

## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงหลักการ ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งกล่าวถึงพฤติกรรมและกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก พร้อมทั้งนำเสนอถึงพฤติกรรมและ กำลัง ของเสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต (Concrete-filled steel tube column) ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน นอกจากนี้ได้กล่าวถึงผลของการ โอบรัดทางด้านข้างต่อกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีต ผลการ โอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับเสาดังกล่าว

#### 2.1 ประเภทเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เสาเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่อยู่ในแนวตั้งทำหน้าที่รับแรงกดอัดหรือทั้งแรงกดอัดและแรงคดร่วมกัน ซึ่งได้มาจากการถ่ายน้ำหนักบรรทุกของคานหรือแผ่นพื้นในชั้นต่าง ๆ แล้วถ่ายน้ำหนักบรรทุกลงสู่ดินโดยฐานราก หากเสาต้นใดต้นหนึ่งวิบัติจะทำให้ส่วนของโครงสร้างที่ยึดติดต่อเนื่องกันมาขึ้นเกิดการชำรุดเสียหายจนอาจทำให้โครงสร้างทั้งหมดนั้นถึงกับพังลงมาได้ดังนั้นในการคำนวณออกแบบจึงต้องให้ความสำคัญเป็นพิเศษเกี่ยวกับแรงกดอัดและ โมเมนต์คดที่เสาต้องรองรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอาจมีรูปหน้าตัดกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมี 2 ลักษณะคือ เสาสั้นและเสายาว เสาสั้น (Short column) หมายถึงเสาที่มีอัตราส่วนของความชะลูด (Slenderness ratio) มีค่าน้อยไม่เกินพิภคที่จะทำให้เสานั้นเกิดวิบัติโดยการ โกงคาะทางด้านข้างมาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. กำหนดว่าเสาสั้นต้องมีอัตราส่วนระหว่างความสูงของเสาต่อด้านแคบของเสารูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสารูปหน้าตัดกลมมีค่าไม่เกินกว่า  $15 (L/D \leq 15)$  กำลังรับแรงกดอัดของเสาสั้นจะขึ้นอยู่กับกำลังของวัสดุที่ใช้และขนาดรูปตัดของเสาส่วนเสายาว (Slender column) หมายถึงเสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดมาก ( $L/D > 15$ ) ซึ่งมีความสามารถในการรับแรงกดอัดของเสายาวจะน้อยกว่าเสาสั้นที่มีขนาดรูปตัดอย่างเดียวกัน เพราะเสายาวเกิดการโกงคาะทางด้านข้างก่อนเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับน้ำหนักตามแนวแกน (Axially loaded column) ซึ่งมีรูปร่างลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

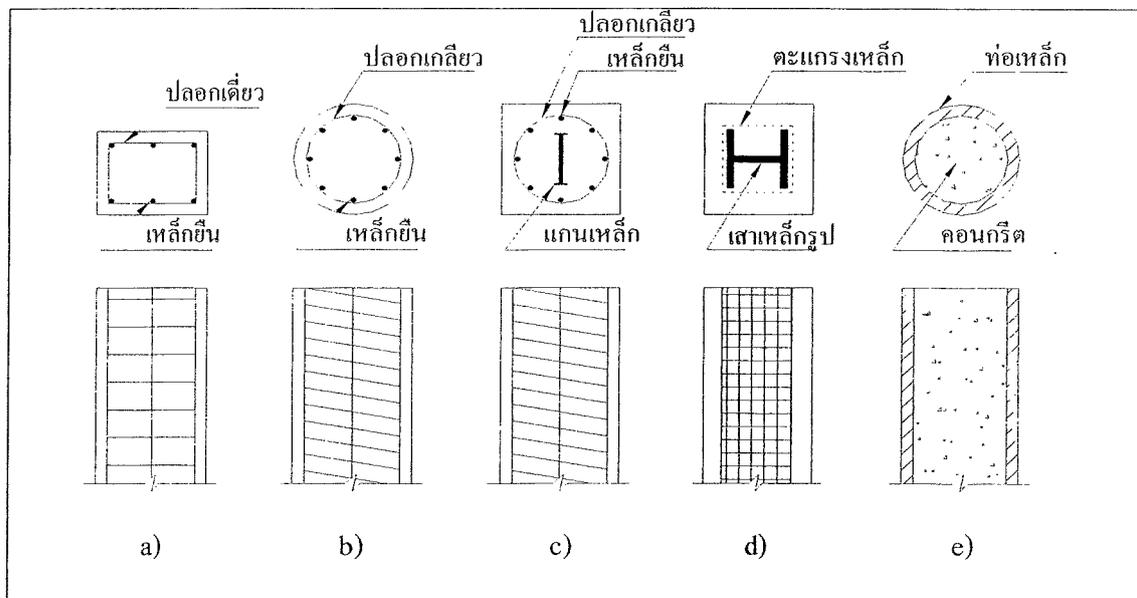
(ก) เสาปลอกเดี่ยว เป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กยื่น โดยมีปลอกรัดเป็นวง ๆ ซึ่งเหล็กปลอกที่รัดอาจจะเป็นวงเดียวหรือหลายวง ลักษณะของเหล็กปลอกควรจะงอฉากให้เกี่ยวยึดเหล็กยื่นดีพอสมควรเพื่อป้องกันเหล็กยื่นไม่ให้โกงงอ นิยมใช้กับอาคารทั่ว ๆ ไป ดังแสดงในรูปที่ 2.1(a)

(ข) เสอปลอกเกลียว เป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กยื่นมีปลอกเป็นเกลียวรัดต่อเนื่อง ซึ่งวับแรง ได้ดีกว่าเสอปลอกเดี่ยวประมาณ 15% มักใช้ในเสากลมหรือเสาหลายเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2.1(b)

(ค) เสอปลอกเกลียวเสริมแกนเหล็กเหมือนเสอปลอกเกลียวแต่แกนกลางจะมีเหล็กเสริมในแนวแกนซึ่งอาจมีหน้าตัด I หรือ H ตามความเหมาะสม พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กเมื่อเทียบกับหน้าตัดเสาแล้วจะไม่ใหญ่นักเสานชนิดนี้นิยมใช้ในกรณีมีแป้นหูช้าง หรือต้องการลดขนาดของเสาลงให้พอเหมาะกับวัตถุประสงค์ทางสถาปัตยกรรม ดังแสดงในรูปที่ 2.1(c)

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

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



รูปที่ 2.1 ประเภทเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

## 2.2 พฤติกรรมและกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีต และเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

### 2.2.1 เสาคอนกรีต

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

สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อกำลังอัดประลัยของเสาคอนกรีตล้วน มีหลายปัจจัย เช่น ขนาดและรูปร่างของเสา คุณภาพของคอนกรีต อัตราการให้แรงกระทำแก่เสา ความชะลูดของเสา เป็นต้น

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

โดยที่  $f'_{co}$  คือ กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต

$A_c$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเสาคอนกรีต

### 2.2.2 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

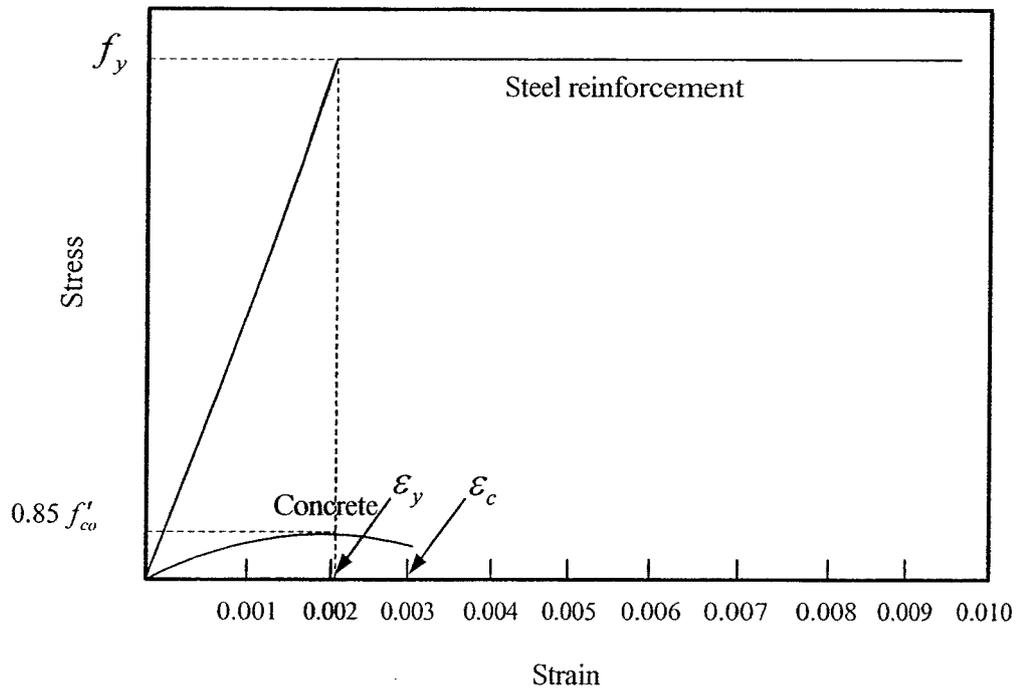
เมื่อเสาคอนกรีตล้วนถูกเสริมเหล็กเสริมในแนวแกน แต่ไม่มีการเสริมเหล็กปลอก (Stirrup) เพื่อป้องกันแรงเฉือน เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีการเสริมเหล็กปลอกดังกล่าวจะมีพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติคล้ายกับเสาคอนกรีตล้วน เนื่องจากเมื่อเสาคอนกรีตรับแรงกระทำเหล็กเสริมในแนวแกนจะถูกกดอัดและเกิดการโก่งคด ทำให้เนื้อคอนกรีตหลุดร่อนออกมาจากเหล็กเสริมในแนวแกน แต่เมื่อมีการเสริมเหล็กปลอกทั้งเหล็กปลอกเดี่ยวหรือเหล็กปลอกเกลียวแก่เสาคอนกรีต จะทำให้แกนคอนกรีตถูกโอบรัดจากเหล็กปลอกมีผลทำให้เสาดังกล่าวสามารถรับแรงกดอัดได้สูงขึ้นและมีพฤติกรรมแบบเหนียวมากขึ้นก่อนเกิดการวิบัติ

สำหรับการวิเคราะห์หาหน่วยแรงกดอัดในแนวแกนของเสาสั้น เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกดอัดและค่าความเครียดในแนวแกนของคอนกรีตและเหล็กเสริมคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 2.2 กำหนดให้หน่วยแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีตมีค่า  $0.85 f'_{co}$  มีค่าความเครียดเท่ากับ 0.002 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร (ACI Committee 318-05) และให้คอนกรีตมีค่าความเครียดสูงสุดก่อนการวิบัติเท่ากับ 0.003 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร และกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าเท่ากับ ผลรวมของกำลังรับแรงกดอัดที่ได้จากคอนกรีตและเหล็กเสริมหลัก เมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ในรูป 2.1 แล้ว พบว่าหน่วยแรงครากของเหล็กเสริมมีค่าประมาณ 300-400 MPa และมีค่าความเครียดที่จุดครากเท่ากับ 0.002-0.003 มิลลิเมตร/มิลลิเมตร ซึ่งเหล็กเสริมจะเกิดการครากก่อนที่คอนกรีตจะถึงหน่วยแรงกดอัดสูงสุด ดังนั้นก่อนที่คอนกรีตจะเกิดการกดอัดแตก หน่วยแรงกดอัดของคอนกรีตจะถูกสมมุติให้มีค่า  $0.85 f'_{co}$  และหน่วยแรงกดอัดของเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับหน่วยแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริม (Yielding Stress,  $f_y$ ) ดังแสดงในสมการ 2.2

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

- โดยที่  $f'_{co}$  คือ กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต  
 $A_g$  คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา  
 $A_s$  คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมในแนวแกน  
 $f_y$  คือ หน่วยแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมในแนวแกน

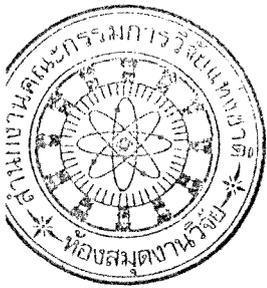
สำหรับมาตรฐานการออกแบบของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) หรือ American Concrete Institute (ACI Committee) มีข้อกำหนดในการออกแบบอาคารขนาดเล็กในประเทศไทยดังนี้ คอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างมักถูกกำหนดให้มีกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด ( $f'_{co}$ ) อยู่ในช่วง 18-25 MPa เหล็กเสริมในแนวแกนมักจะมีหน่วยแรงที่จุดคราก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



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริม  
(วินิต ช่อวิเชียร, 2540)

### 2.2.3 เสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

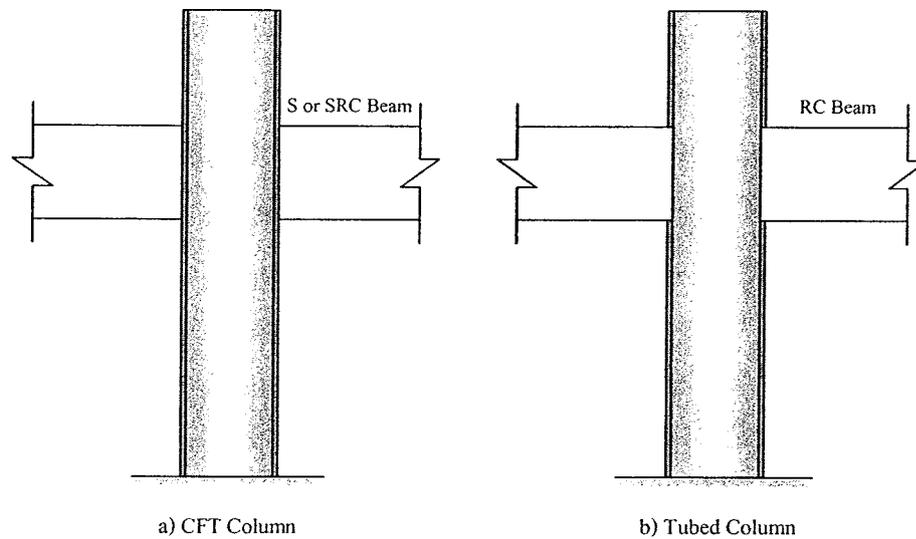
เสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต (Concrete-filled tube column, CFT column) เป็นเสาเชิงประกอบชนิดหนึ่งที่ใช้ในงานก่อสร้างโดยใช้ท่อเหล็กหรือปลอกเหล็กกลวงหน้าตัดกลมหรือหน้าตัดสี่เหลี่ยม ทำหน้าที่เป็นแบบหล่อและเทคอนกรีตลงในช่องว่าง โดยคอนกรีตทำหน้าที่เป็นแกนของเสา ปลอกเหล็กที่โอบรัดเสาได้ถูกออกแบบให้ทำงาน ร่วมกับคอนกรีตเพื่อให้เกิด Composite action ด้วยปลอกเหล็กอาจจะถูกออกแบบให้รับแรงกระทำร่วมกันกับคอนกรีตใน 3 ลักษณะ ดังนี้ (1) ปลอกเหล็กถูกออกแบบให้รองรับหน่วยแรงกระทำในแนวแกน (Axial load) อันเป็นผลมาจากแรงกดอัดในแนวแกนและโมเมนต์คด (2) ปลอกเหล็กถูกออกแบบให้รองรับหน่วยแรงตามขวาง (Transverse shear) อันเป็นผลมาจากแรงเฉือน (3) ปลอกเหล็กถูกออกแบบให้รองรับแรงคั้นเนื่องจากการขยายตัวของแกนคอนกรีตภายใต้แรงกดอัด ซึ่งทำให้เกิดการโอบรัดต่อแกนคอนกรีต (Confining) นอกเหนือจากนั้นแกนคอนกรีตยังสามารถช่วยปลอกเหล็กในการรองรับหน่วยแรงในแนวแกนบางส่วน และยังช่วยให้ปลอกเหล็กสามารถต้านทานการเกิดการโก่งคดเฉพาะที่ของผนังปลอกเหล็กได้เพิ่มมากขึ้น (Local buckling)



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

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

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่..... 15 ส.ค. 2555 .....
เลขทะเบียน..... 244856 .....
เลขเรียกหนังสือ.....



รูปที่ 2.3 รูปแบบของเสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต

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

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

ในการออกแบบ CFT Column ในปัจจุบัน ได้มีมาตรฐานการออกแบบหลายมาตรฐาน ดัง เช่น (1) มาตรฐานการออกแบบสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง ว.ส.ท. 1008-38 ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ปี 2538 (2) มาตรฐานการออกแบบของ

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

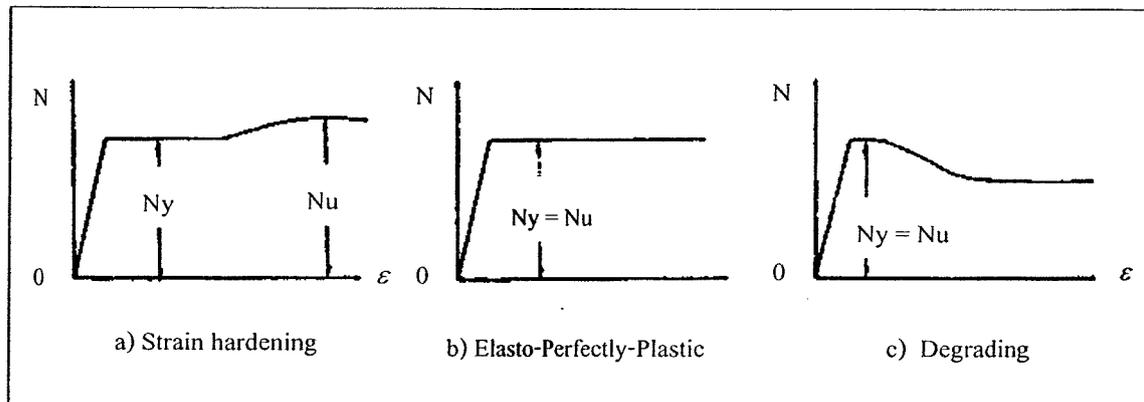
เมื่อพิจารณาปัจจัยเกี่ยวกับ รูปร่างและขนาดของปลอกเหล็กและคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่มีผลต่อกำลังรับแรงกดอัด ได้ทดสอบเสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตสั้นภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน จำนวน 270 ตัวอย่าง โดยเสาดังกล่าวมีหน้าตัดกลม หน้าตัดแปดเหลี่ยมและหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่า และมีอัตราส่วนความชะลูด (Slenderness ratio)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

จากพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นของตัวอย่างทดสอบเสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตสามารถจำแนกพฤติกรรมได้ 3 รูปแบบ ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น และจากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถอธิบายพฤติกรรมช่วงไร้เชิงเส้นในรูปแบบต่าง ๆ ได้ดังนี้

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

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

3) พฤติกรรมช่วงไร้เชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4c พบว่าเมื่อเสาคอนกรีตดังกล่าวรับแรงกระทำในแนวแกนถึงค่าสูงสุดแล้ว เสาทดสอบดังกล่าวจะไม่สามารถรองรับแรงกระทำต่อไปได้ ดังนั้นค่าความชันของกราฟจึงมีค่าลดลง เนื่องจากความแกร่งของท่อปลอกเหล็กมีความแกร่งไม่เพียงพอ ในการต้านทานแรงกระทำ และจำกัดการขยายตัวออกทางด้านข้างของแกนคอนกรีต จากการศึกษาทบทวนงานวิจัยสามารถจำแนกพฤติกรรมช่วงไร้เชิงเส้นของเสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตในลักษณะนี้ออกเป็น 2 ประเภทคือ (ก) พฤติกรรมช่วงไร้เชิงเส้นแบบ Degrading เกิดขึ้นหลังจากเสาทดสอบรับแรงกระทำสูงสุดแล้ว เสาทดสอบไม่สามารถต้านทานแรงกระทำได้ ทำให้ค่าความชันของกราฟลดลงอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งเสาทดสอบเกิดการวิบัติ ดังแสดงในรูป 2.4c พฤติกรรมลักษณะนี้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและเสาทดสอบคอนกรีตล้วน และเสาท่อปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตที่การ โอบรัด โดยท่อปลอกเหล็กที่มีความแกร่งน้อย (ข) พฤติกรรมช่วงไร้เชิงเส้นแบบ Strain softeningเกิดขึ้นหลังจากตัวอย่างทดสอบรับแรงกดอัดสูงสุดแล้ว ความสามารถในการรับแรงกระทำจะค่อย ๆ ลดลงเรื่อย ๆ อย่างค่อยเป็นค่อยไป จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ ซึ่งแตกต่างจากพฤติกรรมแบบ Degrading ในส่วนของความสามารถในการรับแรงกระทำจะลดลงอย่างทันทีทันใดซึ่งกล่าวไว้ในหัวข้อข้างต้น (สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2550); (Seangatith and Thumrongvuth, 2009)



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

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

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

แผ่นดินไหวเป็นหลัก นอกจากนั้น Tubed column ยังเป็นอีกรูปแบบหนึ่งที่เหมาะสมในการเสริมกำลังหรือ ซ่อมแซมแก่เสาคอนกรีตที่มีอยู่แล้ว

### 2.3 ผลการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีต

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

พิจารณาเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยวัสดุอื่น ๆ เช่น เสริมใยแก้วพลาสติก ปลูกเหล็ก หรือท่อเหล็กกลวง และรองรับแรงกระทำในแนวแกน เมื่อเสาคอนกรีตดังกล่าวรองรับแรงกระทำสูงขึ้นเรื่อย ๆ แกนคอนกรีตจะเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้าง อันเป็นผลเนื่องจากอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) การขยายตัวจะเกิดมากขึ้น ทำให้แกนคอนกรีตที่เกิดการขยายตัวไปชนกับผนังปลูกเหล็ก ทำให้เกิดการถ่ายเทแรงกระทำจากแกนคอนกรีตไปยังปลูกเหล็ก (Composite action) ซึ่งเป็นผลมาจากการ โอบรัดจากปลูกเหล็ก (Confining effect) ทำให้เสาดังกล่าวสามารถรองรับแรงกระทำได้สูงขึ้น มีความเหนียวสูงเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตล้วนหรือ เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก หลังจากทราบถึงผลการโอบรัดทางด้านข้างต่อพฤติกรรมของคอนกรีตแล้ว ในลำดับถัดไปได้นำเสนอถึง ผลการ โอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังปกติและคอนกรีตกำลังสูง

#### 2.3.1 ผลการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังปกติ

นักวิจัยหลายท่าน ได้ศึกษาถึงผลของการ โอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังปกติ (Normal strength concrete) โดยการทดสอบในตัวอย่างทดสอบตัวอย่างทดสอบภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนและให้แรงกระทำทางด้านข้าง (Lateral load) ซึ่งใช้ความดันจากของเหลวในการให้แรงกระทำทางด้านข้าง โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความดันหลายค่าการให้แรงกระทำทางด้านข้าง ลักษณะนี้เรียกว่า Active confinement จากการศึกษาพบว่าผลของการ โอบรัดทำให้คอนกรีตมีค่าหน่วยแรงกดอัด ความแกร่ง และความเครียดในแนวแกนสูงเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากในปีถัดมาได้ศึกษาตัวอย่างทดสอบคอนกรีตทรงกระบอกที่ถูกโอบรัดโดยเหล็กเส้นซึ่งพันเป็นเกลียวรอบตัวอย่างทดสอบ (Continuous steel spiral) ภายใต้แรงกระทำในแนวแกนหรือเรียกแรงกระทำในลักษณะนี้ว่า Passive confinement จากการศึกษาพบว่าถ้ากำหนดให้ระยะห่างของ Steel spiral มีค่าน้อย ๆ จะ

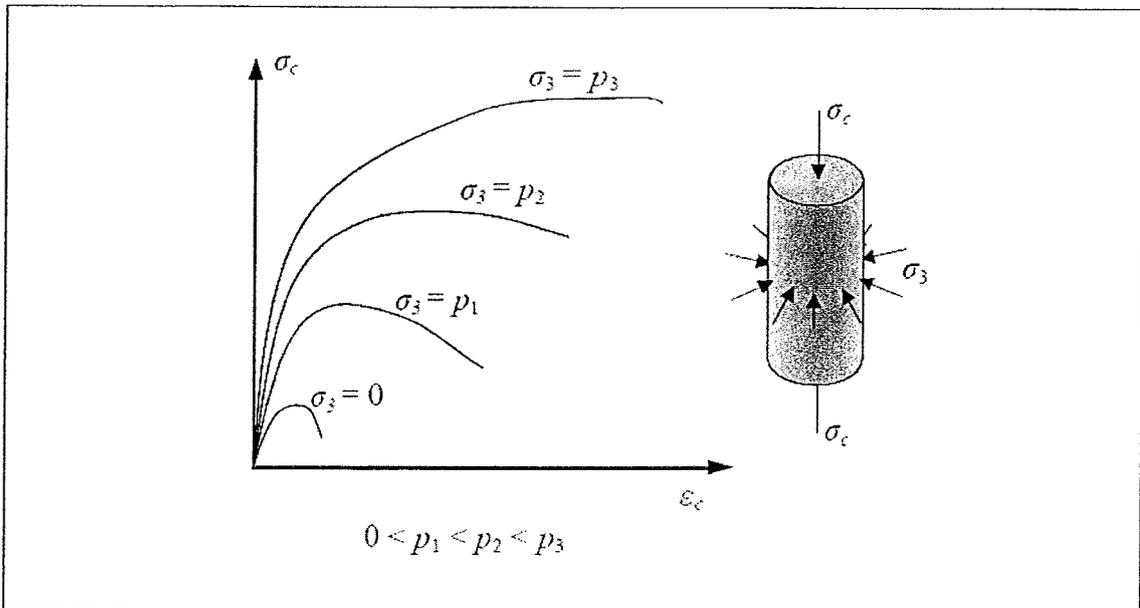
ทำให้ผลการทดสอบในกรณีของ Active confinement มีลักษณะเช่นเดียวกับกรณี Passive confinement (Richart, Brandtzeag, and Brown, 1928) ดังแสดงในรูปที่ 2.5

(Richart, Brandtzeag, and Brown, 1928) ได้นำเสนอ สมการเพื่อทำนายกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตโดยให้แรงกระทำทางด้านข้างดังแสดงในสมการ 2.3

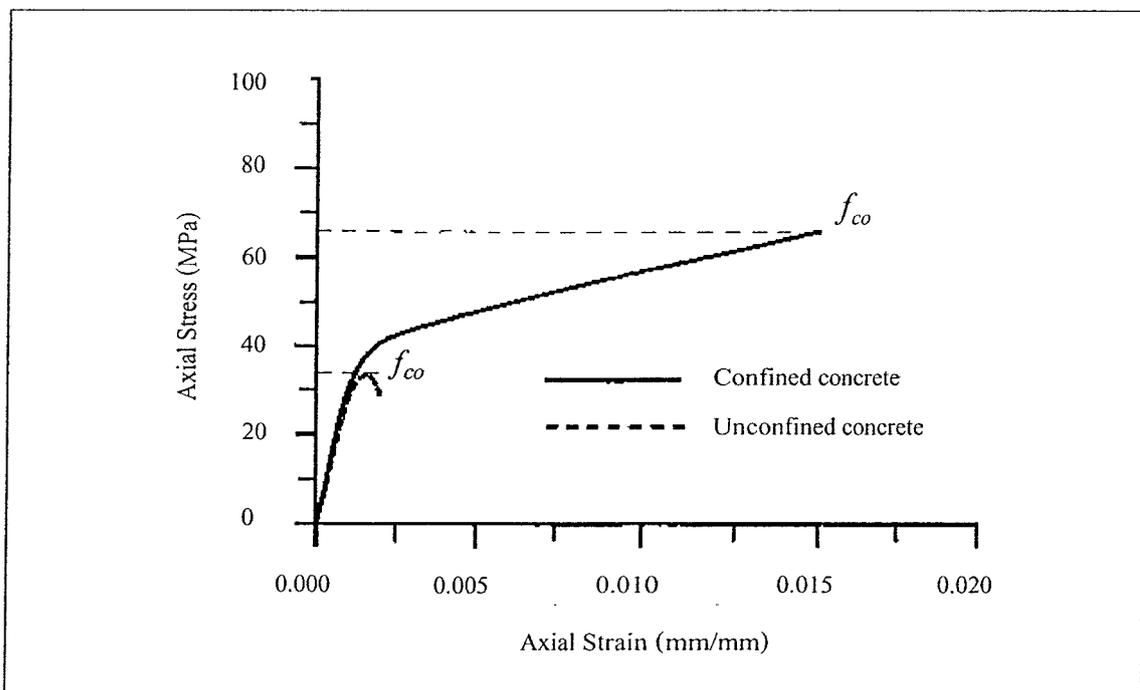
$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_1 \quad (2.3)$$

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

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



รูปที่ 2.5 ผลการโอบรัดต่อพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีต  
(Johansson, 2000)



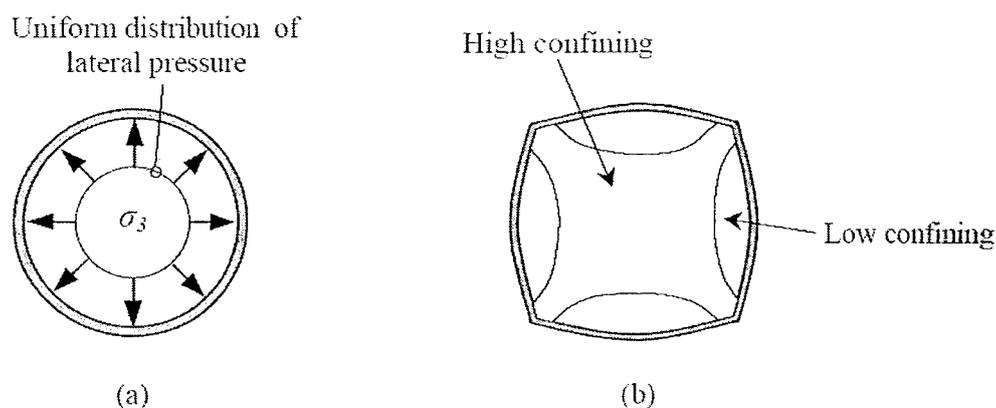
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตทรงกระบอก  
ที่ถูกโอบรัดและไม่ถูกโอบรัด (Lin and Chen, 2001)

### 2.3.2 ผลการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังสูง

Attard and Setung (1996) ได้ศึกษาถึงผลการโอบรัดในคอนกรีตกำลังสูงโดยทดสอบแท่งคอนกรีตกำลังสูงภายใต้หน่วยแรงโอบรัดซึ่งมีค่าไม่สูงมาก และ Ansari and Li (1998) ได้ทดสอบแท่งคอนกรีตกำลังสูงภายใต้หน่วยแรงโอบรัดที่มีค่าสูงถึงหน่วยแรงกดอัดสูงสุด ของคอนกรีตที่นำมาศึกษา ผลการทดสอบทั้ง 2 กรณีพบว่าผลการโอบรัดต่อพฤติกรรม ของคอนกรีตกำลังสูงมีค่าน้อยกว่าที่เกิดขึ้นในคอนกรีตกำลังปกติและพบว่าในคอนกรีตกำลังสูงและคอนกรีตมวลเบา ค่า  $k_1$  ดังแสดงในสมการที่ 2.3 มีค่าลดลงจาก 4.1 เป็น 2.0 และสำหรับพฤติกรรมการรับหน่วยแรงกระทำของคอนกรีตดังกล่าวจะมีกำลังและความเหนียวสูงเพิ่มขึ้น โดยขึ้นอยู่กับค่าหน่วยแรงโอบรัดที่กระทำแก่คอนกรีต

### 2.4 ผลการโอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก

Schneider (1998) จากการศึกษาคอนกรีตที่ถูก โอบรัดด้วยปลอกเหล็กและรองรับแรงกดอัดในแนวแกน พบว่ากำลังรับแรงกดอัดที่จุดวิกฤติของตัวอย่างทดสอบ มีค่าสูงกว่าผลรวมของกำลังคอนกรีตรวมกับกำลังของปลอกเหล็ก และคอนกรีตที่ถูก โอบรัดด้วยปลอกเหล็กที่มีหน้าตัดกลม จะมีความสามารถในการโอบรัดแกนคอนกรีต สูงกว่าคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม เนื่องจากปลอกเหล็กที่มีหน้าตัดกลมทำให้เกิดหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง(Hoop stress) ที่ทำให้เกิดหน่วยแรงรัศรอบที่สม่ำเสมอมากกว่าหน่วยแรงรัศรอบที่เกิดจากปลอกเหล็กหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมที่มีด้านของหน้าตัดที่เรียบซึ่งมีความแกร่งต่อแรงคด ไม่เพียงพอในการต้านทานแรงคด เนื่องจากการขยายตัวทางด้านข้างของคอนกรีตที่กระทำตั้งฉากกับผนังปลอกเหล็ก ดังนั้นการ โอบรัดส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นที่มุมและคอนกรีตด้านในของแกนเสา โดยความคดโอบรัดจะเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัดเมื่อเปรียบเทียบกับเสาหน้าตัดกลมดังแสดงในที่รูป 2.7



รูปที่ 2.7 การกระจายของหน่วยแรงโอบรัด (Johansson, 2000)

### 2.4.1 ผลการโอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กหน้าตัดกลม

ความดันโอบรัด (Confining pressure,  $f_1$ ) หรือหน่วยแรงโอบรัดในเสาคอนกรีตจะมีค่าคงที่รอบเส้นรอบวงของหน้าตัด โดยค่าความดัน โอบรัดมีค่าสูงสุดที่จุดครากของปลอกเหล็ก การหาค่าความดัน โอบรัด จะดังแสดงในสมการ 2.4

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

โดยที่  $\sigma_j$  คือ หน่วยแรงทางขวางของปลอกเหล็ก (Hoop stress)  
 $\varepsilon_j$  คือ ความเครียดทางขวางของปลอกเหล็ก (Hoop strain)  
 $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนคอนกรีตหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัด  
 $E_s$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของปลอกเหล็ก  
 $t$  คือ ความหนาของปลอกเหล็ก

อัตราการโอบรัด (Confining ratio) จะบ่งบอกถึงระดับการ โอบรัดที่ได้จากปลอกเหล็กซึ่งแสดงในรูปอัตราส่วนของความดัน โอบรัดสูงสุด ( $f_1$ ) และกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด ( $f'_{co}$ ) ดังสมการ 2.5

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

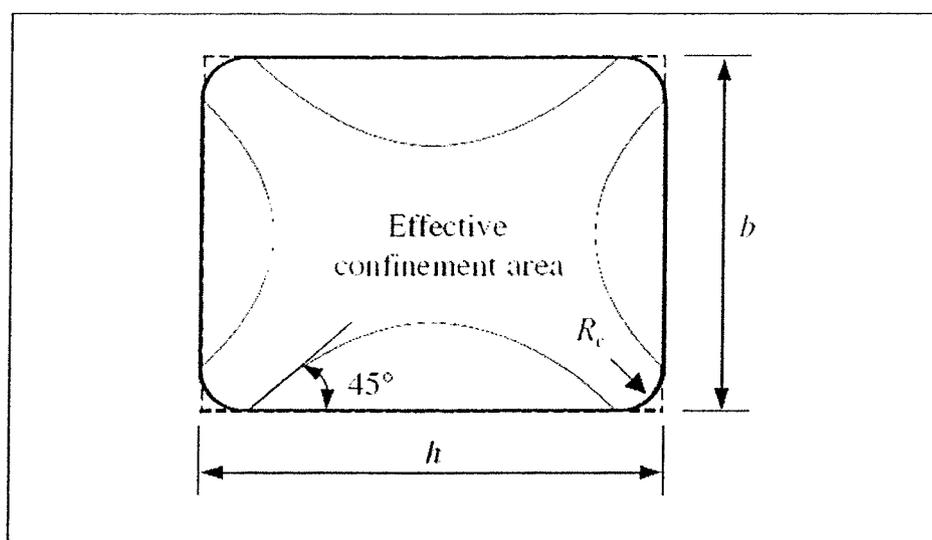
โดยที่  $f_1$  คือ ความดันโอบรัด  
 $f'_{co}$  คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเมื่อ ไม่มีแรงดันด้านข้าง

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

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

#### 2.4.2 ผลการโอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยม

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



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

### 2.4.3 แบบจำลองของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กหน้าตัดกลม

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

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

โดยที่  $f_1$  คือ ความดันโอบรัด

$f'_{co}$  คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเมื่อมีแรงดันด้านข้าง

### 2.4.4 แบบจำลองของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยปลอกหน้าตัดสี่เหลี่ยม

นักวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาพฤติกรรมคอนกรีตที่ถูกโอบรัดในเสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมในช่วงหลายปีที่ผ่านมาซึ่งทำให้ได้แบบจำลองของกำลังรับแรงกดอัดและความเครียดสูงสุดในแนวแกนต่าง ๆ ในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะแบบจำลองของ ACI Committee 440 (2002) เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าเป็นแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับจากองค์กรที่มีชื่อเสียงทางด้านคอนกรีตมากที่สุดแห่งหนึ่งและได้มีการนำไปใช้งานแล้วอย่างกว้างขวาง

สำหรับเสาคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม ACI Committee 440 (2002) เสนอให้เปลี่ยนหน้าตัดของเสาคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมให้เป็นหน้าตัดทรงกลมที่สมมูลกัน โดยใช้อัตราส่วนรูปร่าง (Shape factor,  $k_s$ ) สำหรับการพิจารณาผลของการโอบรัดที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากหน้าตัดสี่เหลี่ยม อัตราส่วนรูปร่าง (Shape factor,  $k_s$ ) ได้ถูกนิยามให้เป็นอัตราส่วนของพื้นที่การโอบรัดประสิทธิผล (Effective confinement area) ต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีต โดยสมมติให้พื้นที่การโอบรัดประสิทธิผลเป็นพื้นที่ของคอนกรีตที่อยู่ภายในกรอบพาราโบลา 4 ด้านที่ตัดกับขอบของหน้าตัดเสาคี่มุม  $45^\circ$  ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 โดยที่สมการของอัตราส่วนรูปร่าง (Shape factor,  $k_s$ ) จะเขียนได้ ดังแสดงในสมการที่ 2.7

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

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

ในสมการที่ 2.7 ปริมาณเหล็กเสริมของเหล็กเสริมในแนวแกน ( $\rho_{sc}$ ) ของเสาที่อยู่ นอกพื้นที่รับความดันโอบรัดจะถูกหักลบออกจากพื้นที่หน้าตัดของเสาคอนกรีตเป็นสองเท่า

ในแบบจำลองนี้ เสาหน้าตัดทรงกลมที่สมมูลจะถูกนิยามเป็นเสาที่มีอัตราปริมาตร (Volumetric ratio) ของเหล็กที่เท่ากับเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมเดิม ดังนั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาหน้าตัดทรงกลมที่สมมูลหาได้จากสมการที่ 2.8

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

เมื่อ	$D$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาหน้าตัดทรงกลม
	$b$	คือ ความกว้างของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม
	$h$	คือ ความลึกของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม

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

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

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

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

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

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

นอกจากนั้นแล้วแบบจำลองของ ACI Committee 440 สามารถทำนายค่าความเค้นสูงสุดในแนวแกนของคอนกรีตอันเนื่องจากการโอบรัด สามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

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

- โดยที่  $E_c$  คือ Modulus of elasticity ของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด  
 $f'_{cc}$  คือ กำลังต้านทานแรงกอดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเมื่อมีแรงดันด้านข้าง  
 $f'_{co}$  คือ กำลังต้านทานแรงกอดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเมื่อไม่มีแรงดันด้านข้าง

## 2.5 ข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับ Tubed RC column

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

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

### 2.5.1 มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง (มาตรฐาน ว.ส.ท.1008-38)

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

มีรายละเอียดที่เกี่ยวข้องในการศึกษาดังนี้

1) องค์อาคารเชิงประกอบรับแรงกดอัดให้รวมถึงองค์อาคารเสริมเหล็กตามยาวด้วย เหล็กโครงสร้างรูปพรรณ ปลอกเหล็กหรือท่อเหลี่ยม ซึ่งอาจมีเหล็กเส้นตามยาวหรือไม่มีก็ได้

2) กำลังขององค์อาคารเชิงประกอบให้คำนวณโดยใช้เงื่อนไขขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป

3) กำลังในการรับแรงตามแนวแกนใด ๆ ที่กำหนดให้รับโดยคอนกรีตขององค์อาคารเชิงประกอบต้องถ่ายผ่านเข้าไปในคอนกรีต โดยองค์อาคารหรือเป็นหูช้างในลักษณะแบกทาน โดยตรงลงบนคอนกรีตขององค์อาคารเชิงประกอบนั้น

4) กำลังรับแรงในแนวแกนทั้งหมดที่ไม่ได้กำหนดให้รับโดยคอนกรีตขององค์อาคารเชิงประกอบต้องถ่ายผ่าน โดยตรงด้วยจุดต่อ ไปยังเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ ท่อกลมหรือท่อเหลี่ยม

5) เหล็กโครงสร้างหุ้มแกนคอนกรีต

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

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

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

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

โดยที่  $E_s$  คือ Modulus of Elasticity ของปลอกเหล็ก

$f_y$  คือ Yielding stress ของปลอกเหล็ก

(ข) เหล็กเส้นตามยาวที่อยู่ภายในแกนคอนกรีตที่ถูกหุ้มอาจนำมาพิจารณาในการคำนวณหาค่าพื้นที่ของเหล็กรูปพรรณ ( $A_s$ ) ท่อกลมหรือท่อเหลี่ยมในหน้าตัดเชิงประกอบและโมเมนต์อินเนอร์เซียของเหล็กรูปพรรณ ท่อกลม และท่อเหลี่ยม รอบแกนศูนย์กลางของหน้าตัดองค์อาคารเชิงประกอบ ( $I_s$ )

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

### 2.5.2 มาตรฐานการออกแบบ American Institute of Steel: Manual of Steel

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

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

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

และสำหรับเสาหน้าตัดกลมเป็นดังสมการ 2.15

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

สำหรับการคำนวณกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาเชิงประกอบตามมาตรฐาน AISC/LRFD เมื่อพิจารณาผลของ Composite action ระหว่างคอนกรีตและปลอกเหล็คนอกจากนั้นในการคำนวณต่าง ๆ จะเป็นไปตามเงื่อนไขในการออกแบบของค้ำอาคารเหล็ก โครงสร้างทั่วไป ซึ่งสมการในการคำนวณกำลังรับแรงกดอัดของเสาเชิงประกอบหรือ  $P_{cr}$  สามารถหาได้จากจากหน่วยแรงวิกฤต (Critical stress,  $F_{cr}$ ) หรือ ดังสมการ 2.16

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

โดยที่  $A_s$  คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของปลอกเหล็ก

$F_{cr}$  คือ หน่วยแรงวิกฤต

$\phi$  คือ ตัวคูณลดกำลัง = 0.85

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

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

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

$F_E$  คือ Euler buckling stress ของเสาเชิงประกอบ

$r_m$  คือ Radius of gyration ของปลอกเหล็ก

$KL$  คือ ความยาวประสิทธิผลของเสาเชิงประกอบ

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

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

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

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อกำหนดในการออกแบบเสาเชิงประกอบของมาตรฐานการออกแบบต่าง ๆ

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

## 2.6 กระบวนการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนแก้ตัวอย่างทดสอบ

สำหรับการคำนวณหาค่าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในปลอกเหล็กที่ใช้หน่วยแรงโอบรัดแก้ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและเสาทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้ประยุกต์ใช้สมการคำนวณหาหน่วยแรงในแนวทิศทางเส้นรอบวงของท่อรับความดันผนังบาง (Hoop stress,  $\sigma_1$ ) โดยความดันภายในที่เกิดขึ้นนั้น ( $p$ ) เกิดจากการขยายตัวของแกนคอนกรีตที่รับแรงกดอัดในแนวแกนกระทำในแนวตั้งฉากแก่ผนังของท่อปลอกเหล็ก จึงทำให้เกิดหน่วยดึงแรงในแนวเส้นรอบวงในปลอกเหล็ก หรือเรียกว่าหน่วยแรงโอบรัดที่เกิดขึ้น โดยที่มีอัตราส่วนของรัศมีภายในของท่อรับความดันต่อความหนาของผนังท่อมักกว่าหรือเท่ากับ 10 หรือ  $\frac{r}{t} \geq 10$  สามารถคำนวณได้ดังสมการ 2.19

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

โดยที่  $p$  คือ ความดันภายในท่อรับความดัน

$r$  คือ รัศมีภายในท่อรับความดัน

$t$  คือ ความหนาของผนังของท่อรับความดัน

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

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

โดยที่  $T$  คือ โมเมนต์การบิด

$C$  คือ สัมประสิทธิ์ของโมเมนต์บิด สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์บิดจะเปลี่ยนไปตามลักษณะและคุณภาพของเกลียว ซึ่งค่าที่แนะนำให้ใช้งานคือ

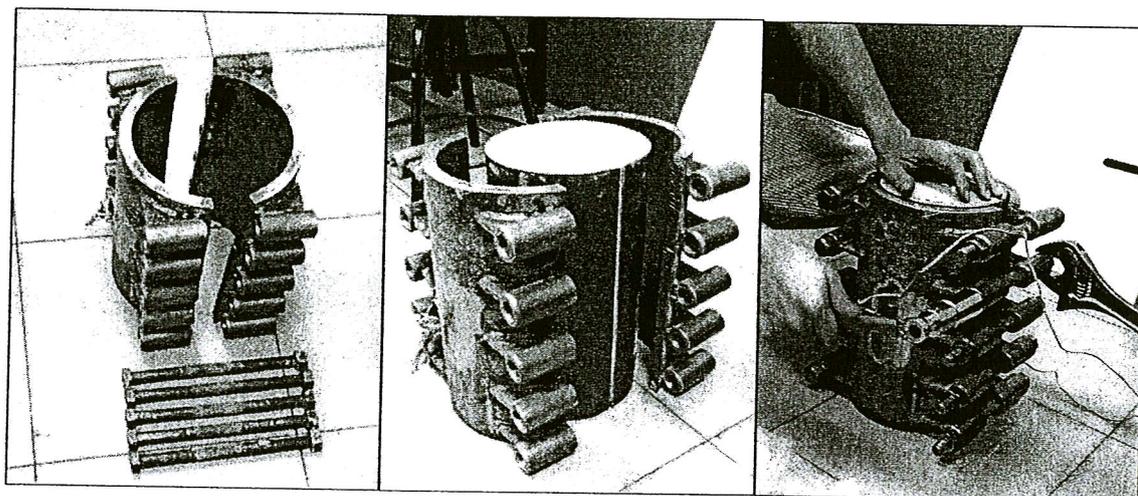
$C = 0.15$  เมื่อสลักเกลียวมีการหล่อลื่น

$C = 0.20$  เมื่อสลักเกลียวไม่มีการหล่อลื่น

$d$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุของสลักเกลียว

$F_i$  คือ แรงดึงขั้นต้นในแนวแกนของสลักเกลียว

สำหรับรายละเอียดในการคำนวณ การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนแก้ตัวอย่างทดสอบและเสา  
คอนกรีตเสริมเหล็ก ได้นำเสนอเพิ่มเติมไว้ในภาคผนวก ก.



รูปที่ 2.9 การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนแก้ตัวอย่างทดสอบ