



รายงานการวิจัย

**การทดสอบและพัฒนาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลัง
โดยใช้ steel แจ็คเก็ต
(Testing and Development of Reinforced Concrete Columns
Strengthened by Steel Jacket)**

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

สิทธิชัย แสงอาทิตย์

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2548-49
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กรกฎาคม 2550

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินโครงการวิจัย เรื่อง การทดสอบและพัฒนาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังโดยใช้ steel แจ็คเก็ต (Testing and Development of Reinforced Concrete Columns Strengthened by Steel Jacket) ได้รับการสนับสนุนงบประมาณโดยทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งบประมาณ พ.ศ. 2548-2549 ซึ่งได้รับการจัดสรรมาจากงบประมาณแผ่นดินโดยผ่านการประเมินข้อเสนอโครงการจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณต่อสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเป็นอย่างสูง นอกจากนั้นแล้ว ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณนาย จักรกฤษณ์ ชำรงวุฒิ นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา และนาย ธนวิษณุ ทวีศรี นางสาว พัทจารี จิตจง นาย อนุชา จันทา นาย ชานนท์ ฉัตรวิวัฒน์ นาย พีรพัฒน์ เสวตศิลป์ และนาย สุทธิชัย ฤทธิธรราน นักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาที่ได้ช่วยเหลือในการจัดทำตัวอย่างทดสอบและทดสอบอย่างขยันขันแข็งและอดทน สุดท้าย ขอขอบคุณในความอนุเคราะห์ของสถานวิจัย สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนา และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สิทธิชัย แสงอาทิตย์

หัวหน้าโครงการวิจัย

พฤษภาคม 2550

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างและลักษณะการวิบัติของ Tubed concrete column และ Tubed RC column ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน เพื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับสมการออกแบบเสาเชิงประกอบที่มีอยู่แล้ว และสุดท้าย เพื่อนำเสนอสมการที่เหมาะสมในการวิเคราะห์กำลังของเสา โดยตัวแปรหลักประกอบด้วยกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต 3 ค่าคือ 18, 25, และ 32 MPa และความหนาของปลอกเหล็ก 2 ค่าคือ 3.2 mm และ 4.5 mm โดยเสาดังกล่าวมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่าขนาด 150x150 mm และสูง 750 mm โดยมีจำนวนทั้งสิ้น 99 ตัวอย่างทดสอบ โดยแบ่งเป็นกลุ่ม Tubed concrete column จำนวน 33 ตัวอย่าง และกลุ่ม Tubed RC column จำนวน 36 ตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่า Tubed concrete column และ Tubed RC column มีพฤติกรรมการรับแรงที่คล้ายคลึงกัน โดยในช่วงแรกเสามีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจนถึงจุดที่เสาคอนกรีตอ้างอิงรับแรงกดอัดสูงสุดหรือที่ค่าแรงกระทำประมาณ 50-70 % ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดแรกของเสา และช่วงที่สอง เสามีพฤติกรรมไร้เชิงเส้นตรง โดยแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ strain hardening, elastic-perfectly plastic, และ strain-softening ขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา พฤติกรรมไร้เชิงเส้นตรงนี้เกิดจากการแตกร้าวของคอนกรีตและการโก่งคาะเฉพาะที่ของผนังของปลอกเหล็กที่ปลายด้านบนและล่างของเสา และสุดท้าย การวิบัติของเสาเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไปแบบ localized failure โดยเสามีความเหนียวในแนวแกนที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับเสาอ้างอิง ในส่วนของตัวแปรที่ศึกษาพบว่า เมื่อคอนกรีตมีกำลังรับแรงกดอัดสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของกำลังของ Tubed concrete column และ Tubed RC column มีค่าลดลง แต่มีความเหนียวไม่เปลี่ยนแปลง ในส่วนของความหนาของปลอกเหล็กพบว่า ปลอกเหล็กที่หนา 4.5 mm (ผ่านข้อกำหนดของ ว.ส.ท. 1008-38) ให้กำลังรับแรงกดอัดของเสาเพิ่มขึ้นสูงกว่าปลอกเหล็กที่หนา 3.2 mm (ไม่ผ่านข้อกำหนดของ ว.ส.ท. 1008-38) แต่มีความเหนียวเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน นอกจากนั้นแล้ว ยังพบอีกว่า ข้อกำหนดของ ว.ส.ท. 1008-38(ข้อ 4314) ในการออกแบบเสาเชิงประกอบควรได้รับการปรับปรุงให้เหมาะสมในการออกแบบ Tubed concrete column และ Tubed RC column เนื่องจาก overestimate กำลังของเสาที่ใช้ในการศึกษา ดังตัวอย่างของสมการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

Abstract

The objectives of this research are to study the structural behaviors and mode of failure of square Tubed concrete columns and Tubed RC columns, subjected to concentrically axial load applied directly to the concrete core. The obtained test results were compared to those calculated from existing standard design equations in order to study the adequacy of the design equations for these kinds of columns. 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 3.5 mm and 4.5 mm. The dimensions of the column specimens were 150 mm wide and 750 mm long. A total of 99 specimens, in which 33 specimens are Tubed concrete column and 36 specimens are Tubed RC column, were tested under concentrically axial load. It was found that the structural behaviors of the Tubed concrete column and Tubed RC column are similar to each other. They have a linear elastic behavior up to the ultimate compressive strength of the reference columns or 50-70% of their first maximum compressive load. Then, the behavior of the columns is nonlinear. The nonlinear behavior of the Tubed column can be classified into 3 types: strain hardening, elastic-perfectly plastic and strain-softening, depending mainly on the studied variables. The nonlinear behavior was due to the cracking in concrete and the local tube wall buckling of the steel jacket in the area near the top and bottom end of the columns. Finally, the columns were failed in progressive mode of failure, which could be considered as localized failure, with a high axial ductility, compared to the reference columns. In term of the studied variables, it was found that when the ultimate compressive strength of the concrete is increased, the increasing in the axial compressive strength of the columns is reduced, but the ductility of the columns is unchanged. In addition, for a given ultimate compressive strength of the concrete, the columns with 4.5 mm thick steel jacket (passing the E.I.T. 1008-38 building code) possess a higher axial compressive strength than that of the columns with 3.2 mm thick steel jacket (not passing the E.I.T. 1008-38 building code). Finally, it was also found that the E.I.T. 1008-38(4314) specification for composite column was inadequate to predict the strength of the Tubed concrete column and Tubed RC column and must be modified as the recommended equations proposed by this study.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 แบบแผนการวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	5
บทที่ 2 หลักการ ทฤษฎี และข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	
2.1 พฤติกรรมและกำลังรับแรงกอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตและ เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	7
2.1.1 เสาคอนกรีตล้วน	7
2.1.2 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	8
2.2 เสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตภายใต้แรงกอัดในแนวแกน	10
2.3 ผลการโอบรัดทางด้านข้างต่อพฤติกรรมของคอนกรีต	15
2.3.1 ผลของการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังปกติ	16
2.3.2 ผลของการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังสูง	18
2.4 ผลการโอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก	18
2.4.1 ผลการโอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก หน้าตัดกลม	19
2.4.2 ผลการโอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก หน้าตัดสี่เหลี่ยม	20
2.4.3 แบบจำลองของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยปลอกหน้าตัดสี่เหลี่ยม	21
2.5 ข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับ Tubed concrete column และ Tubed RC column...	23

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ.....	27
3.1.1 การทดสอบแรงกดอัดของคอนกรีต	27
3.1.2 การทดสอบแรงดึงของเหล็ก	28
3.1.3 การทดสอบแรงดึงของ stainless steel.....	29
3.1.4 การทดสอบแรงดึงของเหล็กเสริมคอนกรีต	30
3.2 การทดสอบเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก Tubed column ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน	31

บทที่ 4 ผลการศึกษา

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ.....	41
4.1.1 ผลการทดสอบแรงกดอัดของคอนกรีต	41
4.1.2 ผลการทดสอบแรงดึงของเหล็ก	43
4.1.3 ผลการทดสอบแรงดึงของ stainless steel	46
4.1.4 ผลการทดสอบแรงดึงเหล็กเสริมคอนกรีต	48
4.2 ผลการทดสอบ Tubed concrete column ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน และวิจารณ์ผล	50
4.2.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของ Tubed concrete column	50
4.2.2 การถ่ายแรงในเสา Tubed concrete column.....	54
4.2.3 ลักษณะการวิบัติของ Tubed concrete column	58
4.2.4 กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของ Tubed concrete column และ ค่าความเครียดสูงสุด.....	60
4.2.5 การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed concrete column กับ สมการของเสาเชิงประกอบ	61
4.3 ผลการทดสอบ Tubed RC column ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน และวิจารณ์ผล	66
4.3.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของ Tubed RC column.....	66
4.3.2 การถ่ายแรงในเสา Tubed RC column.....	74
4.3.3 ลักษณะการวิบัติของ Tubed RC column	75
4.3.4 กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของ Tubed RC column และ ค่าความเครียดสูงสุด.....	76
4.3.5 การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC column และกับ	

สมการของเสาเชิงประกอบ.....	78
บทที่ 5 เสรูปและข้อเสนอแนะ	
5.1 เสรูปผลการทดสอบ Tubed concrete column และ Tubed RC column.....	85
5.1.1 เสรูปผลการทดสอบ Tubed concrete column	85
5.1.2 เสรูปผลการทดสอบ Tubed RC column	86
5.2 ข้อเสนอแนะในการใช้งาน	87
5.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป	88
เอกสารอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก กราฟความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวของ	
ตัวอย่างเสา Tubed concrete column	93
ภาคผนวก ข กราฟความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวของ	101
ภาคผนวก ค บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	109
ประวัติผู้วิจัย	111

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ Tubed concrete column และคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่เกี่ยวข้อง	35
3.2 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column และคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่เกี่ยวข้อง	38
4.1 ผลการทดสอบแรงกดอัดของคอนกรีต	42
4.2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กที่ตัดจากปลอกเหล็ก	45
4.3 คุณสมบัติทางกลของ stainless steel ที่ตัดจากปลอก stainless steel	47
4.4 คุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้นกลม RB6.....	49
4.5 คุณสมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อย DB12.....	49
4.6 สรุปผลการทดสอบ Tubed concrete column	55
4.7 เปรอ์เซ็นต์ของแรงกดอัดในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปลอกเหล็กเมื่อเทียบกับค่าแรง P_{max}^I	57
4.8 กำลังแรงกดอัดสูงสุดแรกและค่าความเครียดสูงสุดแรกที่เกิดขึ้นใน Tubed concrete column.....	60
4.9 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P_{max}^I และค่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุดเชิงทฤษฎี....	63
4.10 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P_{max}^I และค่ากำลังรับแรงตามมาตรฐาน ว.ส.ท.....	64
4.11 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P_{max}^I และค่ากำลังรับแรงตามมาตรฐาน AISC LRFD	64
4.12 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P_{max}^I ที่ทดลองได้และค่าแรง P_{TCC}	66
4.13 สรุปผลการทดสอบ Tubed concrete column	71
4.14 กำลังแรงกดอัดสูงสุดแรกและค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นใน Tubed RC column	77
4.15 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P_{max}^I และค่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุดตามทฤษฎี ..	78
4.16 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P_{max}^I และค่ากำลังรับแรงตามมาตรฐาน ว.ส.ท.....	80
4.17 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P_{max}^I และค่ากำลังรับแรงตามมาตรฐาน AISC LRFD	81
4.18 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P_{max}^I และค่าแรง P_{TRC}	83

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาปลอกเดี่ยวและปลอกเกลียว.....	9
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริม.....	9
2.3 เสาท่อนเหล็กกรอกคอนกรีต a.) CFT column และ b.) Tubed column.....	12
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง ultimate load และ nominal slenderness ratio.....	13
2.5 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและความเครียดของเสา.....	14
2.6 ผลของหน่วยแรงโอบรัดต่อพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกน ของคอนกรีต.....	17
2.7 กราฟตัวอย่างเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียด ของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ถูกรัดรอบและไม่ถูกรัดรอบ.....	17
2.8 การกระจายของหน่วยแรงโอบรัด (a) ท่อเหล็กที่มีหน้าตัดกลม (b) ท่อเหล็กที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม.....	19
2.9 คอนกรีตที่ถูกโอบรัดในเสาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม.....	20
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคอนกรีต a.) Universal Testing Machine b.) Data Logger และ Data Acquisition และ c.) LVDT และ อุปกรณ์จับแท่งคอนกรีต.....	28
3.2 การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงกดอัด.....	28
3.3 รายละเอียดแผ่นเหล็กตัวอย่างทดสอบรูปกระดุก.....	29
3.4 การติดตั้งแผ่นเหล็กตัวอย่างทดสอบเพื่อทำการทดสอบแรงดึง.....	29
3.5 การคิดมาตรวัดความเครียดของแผ่นตัวอย่าง stainless steel.....	30
3.6 การติดตั้งแผ่นตัวอย่างทดสอบ stainless steel เพื่อทำการทดสอบแรงดึง.....	30
3.7 การติดตั้งเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตเข้ากับเครื่องทดสอบ UTM.....	30
3.8 ลักษณะการให้แรงกดอัดกระทำต่อเสา a.) แรงกดอัดกระทำต่อคอนกรีตโดยตรง b.) แรงกดอัดกระทำต่อปลอกเหล็กโดยตรง และ c.) แรงกดอัดกระทำต่อคอนกรีต และปลอกเหล็กพร้อมกัน.....	29
3.9 ตัวอย่างปลอกเหล็กที่ใช้ในการศึกษา.....	33
3.10 ตัวอย่างเสาคอนกรีตที่ถูกหล่อโดยปลอกเหล็กและปลอก stainless steel เป็นแบบหล่อ.....	33
3.11 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ Tubed concrete column.....	34

3.12	รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column และรายละเอียดเหล็กเสริม	37
3.13	แผนภาพแสดงการติดตั้งเสาตัวอย่างเพื่อทดสอบแรงกดอัด	39
3.14	ตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างเสาเพื่อทดสอบแรงกดอัด	39
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและค่าความเครียดของคอนกรีต	41
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นและค่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุด	43
4.3	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีต	43
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดของเหล็ก	44
4.5	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างแผ่นเหล็ก	45
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดของ stainless steel	46
4.7	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างแผ่น stainless steel	47
4.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดตามแนวแกนและความเครียดตามแนวขวางแกนของ stainless steel	47
4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดของเหล็กเส้นกลม RB6	48
4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดของเหล็กข้ออ้อย DB12	49
4.11	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเหล็กเส้นกลมและเหล็กข้ออ้อย	50
4.12	ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดรัดตัวในแนวแกนของเสา Tubed concrete column	53
4.13	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของเสา S-18-4.5	54
4.14	ลักษณะการวิบัติของเสา Tubed concrete column	59
4.15	ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดรัดตัวในแนวแกนของตัวอย่างเสา Tubed RC column	69
4.16	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของเสา S-32-4.5	74
4.17	ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสา Tubed RC column	76

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ในประเทศไทย อาคารประเภทต่างๆ เช่น บ้าน ทาวเฮาส์ และอาคารพาณิชย์ เป็นต้น มักจะถูกก่อสร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเฉพาะเป็นการก่อสร้างแบบหล่อในที่ (cast-in-place construction) ซึ่งมีข้อดีหลายประการคือ ประหยัด - เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีราคาที่ย่อมเยาหาซื้อได้ง่าย และต้องการการดูแลรักษาน้อย ความเหมาะสมของวัสดุสำหรับงานสถาปัตยกรรมและโครงสร้าง - เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่สามารถทำให้เป็นรูปร่าง ลักษณะ และขนาดที่ต้องการได้ง่าย ความต้านทานต่อไฟไหม้ - คอนกรีตมีความต้านทานต่อไฟไหม้ได้ดี โดยไม่ต้องมีถูกพันทับด้วยฉนวนกันไฟ และความแกร่ง (rigidity) - เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตมีมวลมากและความแกร่งสูง ดังนั้น การสั่น (vibration) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจึงมีน้อยกว่าในโครงสร้างเหล็ก อย่างไรก็ตาม การก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจะต้องดำเนินการเป็นขั้นตอนตามลำดับคือ ติดตั้งแบบหล่อและค้ำยัน ผูกเหล็ก เทคอนกรีต และรอให้คอนกรีตแข็งตัวจนมีกำลังเพียงพอจึงทำการถอดแบบ ซึ่งการก่อสร้างลักษณะนี้มักจะใช้ระยะเวลาการก่อสร้างนานและทำให้ต้นทุนในการก่อสร้างสูง โดยเฉพาะระหว่างขั้นตอนการเทคอนกรีตและถอดแบบหล่อคอนกรีต นอกจากนั้นแล้ว การก่อสร้างดังกล่าวจะต้องมีการจัดเตรียมไม้แบบเพื่อทำแบบหล่อและติดตั้งค้ำยัน ซึ่งมักจะต้องใช้แรงงานที่มีฝีมือค่อนข้างสูง ไม่นั้นแล้วจะเกิดปัญหาอื่นๆ ตามมา เช่น แบบหล่อไม่ได้ขนาดตามที่กำหนด แบบรั่วทำให้คอนกรีตไหลออกในคอนเทคอนกรีต และแบบแตก เป็นต้น ซึ่งจะทำให้เสียเงินและเสียเวลาในการดำเนินการเพิ่มขึ้น ซึ่งไม่สอดคล้องพลวัตทางด้านเศรษฐกิจในปัจจุบัน ซึ่งมีการแข่งขันกันในด้านฝีมือ ราคา และความรวดเร็วในการดำเนินการ ในทางอ้อม การใช้ไม้แบบหล่อคอนกรีตก่อให้เกิดปัญหาการตัดไม้ ซึ่งเป็นผลเสียต่อสภาวะแวดล้อมอีกด้วย

เนื่องจากปัญหาในการก่อสร้างอาคารที่กล่าวข้างต้น จึงเกิดการพัฒนารูปแบบการก่อสร้างแบบต่างๆ ขึ้นมา โดยเฉพาะการนำระบบการก่อสร้างสำเร็จรูป (prefabrication) มาช่วยเสริมในบางส่วนของโครงสร้าง เช่น แผ่นพื้นสำเร็จรูป และคานสำเร็จรูป (กรรมและสิทธิชัย, 2548 และจักษุดาและสิทธิชัย, 2548) เป็นต้น และการใช้แบบหล่อสำเร็จรูปที่ใช้เป็นส่วนหนึ่งการใช้ชิ้นส่วนโครงสร้างสำเร็จเป็นแบบหล่อให้กับโครงสร้างและให้รับแรงกระทำร่วมกับโครงสร้างโดยไม่มีการถอดแบบหล่อดังกล่าวออกจากโครงสร้าง เช่น การใช้ท่อเหล็ก (Johansson, 2000 และ 2001) หรือท่อซีเมนต์ใยหิน (ศรีชัยและสิทธิชัย, 2547) เป็นแบบหล่อสำเร็จรูปถาวรของเสา เป็นต้น โดยในปัจจุบันเสาเชิงประกอบหรือเสาคอมโพสิท (composite column) เช่น เสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled steel tube column) และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก (steel-

encased reinforced concrete column) ได้ถูกนำมาใช้ในงาน โครงสร้างเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั่วโลก ดังปรากฏรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบในมาตรฐานต่างๆ เช่น มาตรฐานสำหรับออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง ว.ส.ท. 1008-38 ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design ของ American Institute of Steel Construction และ Recommendations for Design and Construction of Concrete-Filled Steel Tubular Structures ของ Architectural Institute of Japan โดยมีข้อดีที่สำคัญคือ เสาเชิงประกอบดังกล่าวช่วยทำให้การก่อสร้างมีความสวยงามและรวดเร็ว โดยใช้ท่อเหล็กหรือปลอกเหล็กเป็นแบบหล่อถาวรให้โครงสร้าง และปลอกเหล็กดังกล่าวยังร่วมกับแกนคอนกรีตหรือแกนคอนกรีตเสริมเหล็กในการรับแรงกระทำโดยอาศัย composite action ซึ่งเป็นผลทำให้เสาดังกล่าวมีกำลังรับแรงกดอัด (compressive strength) และความเหนียว (ductility) สูงกว่าเสาเหล็กรูปพรรณและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมาก นอกจากนั้นแล้ว composite action ยังช่วยให้เสาดังกล่าวมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้มากกว่าก่อนที่จะเกิดการวิบัติ และเหมาะสำหรับ โครงสร้างที่อยู่ในพื้นที่ที่มีแผ่นดินไหว (Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 1992)

ในการใช้งานอีกรูปแบบหนึ่ง ท่อเหล็กและปลอกเหล็กข้างต้นยังได้ถูกนำมาเสริมกำลังแบบภายนอก (external strengthening) ให้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเดิมที่มีความบกพร่องทางด้านโครงสร้าง (structurally deficient) เช่น เกิดจากการกัดกร่อนของสภาวะแวดล้อม เป็นต้น หรือเสา คอนกรีตเสริมเหล็กเดิมที่ไม่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ (functionally obsolete) ที่ได้ ออกแบบไว้ เช่น มีการเปลี่ยนแปลงสภาพการใช้งานโครงสร้างที่ต้องรองรับแรงกระทำที่สูงขึ้น เป็นต้น วิธีการเสริมกำลังดังกล่าวก็อาศัย composite action ระหว่างปลอกเหล็กและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก และทำให้เสาเดิมมีกำลังรับแรงกดอัด ความเหนียว และมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้สูงขึ้น เช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นในเสาเชิงประกอบ

โดยสรุปแล้ว การใช้ปลอกเหล็กในการห่อหุ้มเสาคอนกรีตหรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ภายนอกดังที่กล่าวข้างต้นนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ทั้งในการก่อสร้างโครงสร้างใหม่และ ปรับปรุง/ซ่อมแซมโครงสร้างเดิมที่มีอยู่แล้ว อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องและ มาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท. 1008-38 และข้อกำหนดของ AISC LRFD 1994 พบว่า มาตรฐาน การออกแบบทั้งสองกำหนดสมการที่ใช้หาความหนาต่ำสุดที่ต้องใช้ในเสาเชิงประกอบที่แตกต่างกัน โดยข้อกำหนดของ AISC LRFD จะให้ค่าความหนาที่สูงกว่ามาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท. 1.225 เท่า นอกจากนั้นแล้ว สมการออกแบบของ ว.ส.ท. ก็ไม่ได้พิจารณาถึง composite action โดย ข้อกำหนดที่ 4314 กำหนดให้ออกแบบเสาเชิงประกอบโดยใช้เงื่อนไขเช่นเดียวกับการออกแบบเสา คอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ซึ่งคล้ายคลึงกับข้อกำหนดของ AISC LRFD แต่ข้อกำหนดดังกล่าว ได้มี การแปลงค่ากำลังและความแกร่งของวัสดุเพื่อพิจารณาผลของ composite action ระหว่างคอนกรีต

และปลอกเหล็กด้วย ดังนั้น จากความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัยข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาผลของการใช้ปลอกเหล็ก (steel jacket) ที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกน กำลังความเหนียว และลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท. 1008-38 เพื่อนำค่ากำลังที่ได้จากการทดสอบเสาเชิงประกอบ (ซึ่งอยู่ในรูปของ Tubed concrete column และ Tubed RC column) มาเปรียบเทียบกับสมการตามมาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท. และสมการตามข้อกำหนดของ AISC LRFD และสรุปหาแนวทางการออกแบบที่เหมาะสมต่อไป โดยเสาที่ศึกษาเป็นเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและเสาดังกล่าวที่ใช้ปลอกเหล็กเป็นส่วนขององค์อาคารห่อหุ้มภายนอก เพื่อช่วยให้เกิดความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการรับแรงกดอัดและการวิบัติของเสาดังกล่าว และสามารถนำความรู้และความเข้าใจที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานในการก่อสร้างโครงสร้างใหม่และการปรับปรุง/ซ่อมแซมเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กของโครงสร้างเดิมได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาถึงผลของการใช้ปลอกเหล็ก (steel jacket) ที่มีต่อกำลัง (strength) และความเหนียว (ductility) ของคอนกรีตภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนและลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน
3. เพื่อนำเสนอสมการที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาค่ากำลังของเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งทำการทดสอบเสาดังกล่าวเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนและการวิบัติของเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กหรือ steel แจ็คเก็ต โดยเสาดังกล่าวที่ศึกษาเป็นเสาสั้นที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมด้านเท่าและมีขนาดหน้าตัดที่ใช้งานโดยทั่วไปในอาคารขนาดเล็ก เช่น บ้านและอาคารพาณิชย์ เป็นต้น โดยมีกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนอย่างน้อย 300 kN และไม่เกิน 1500 kN เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือทดสอบ และประกอบด้วย เสาคอนกรีต (concrete column) เสาคอนกรีตที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและปลอก stainless steel (Tubed concrete column) เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (reinforced concrete column) และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก (Tubed RC column) โดยให้ปลอกเหล็กทำหน้าที่เป็นแบบหล่อภายนอกถาวรของเสาดังกล่าว โดยปลอก stainless steel ได้ถูกนำมาศึกษาเพิ่มเติมด้วย เนื่องจาก stainless steel เป็นวัสดุที่มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนของสภาวะแวดล้อมสูงกว่าเหล็ก

โครงสร้างเป็นอย่างมาก ทำให้เหมาะสมที่จะใช้ในการปรับปรุง/ซ่อมแซม โครงสร้างคอนกรีตหรือคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในสภาวะดังกล่าว

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า พฤติกรรมของเสาคอนกรีตในลักษณะข้างต้นขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่น กำลังของคอนกรีต หน่วยแรงคราก (yielding stress) และ โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ของเหล็ก ลักษณะการให้แรงกดอัดกระทำต่อเสา อัตราส่วนของความกว้างของปลอกเหล็กต่อความหนาของปลอกเหล็ก (B/t) อัตราส่วนความสูงของเสาต่อความกว้างของหน้าตัดเสา (L/B) อัตราส่วนกำลังของคอนกรีตต่อกำลังของเหล็ก และรูปร่างหน้าตัดของปลอกเหล็ก (Huang et.al., 2002) ดังนั้น ในการศึกษาวิจัยจึงกำหนดขอบเขตของงานวิจัยโดยมีรายละเอียดของดังนี้

1.3.1 ตัวแปรหลักที่ใช้ในงานวิจัยมี 2 ตัวแปร คือ

1. คอนกรีตมีกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด 3 ค่าคือ 18, 25, 32 MPa โดยคอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตผสมเสร็จ (ready-mixed concrete) ที่ขายในเชิงพาณิชย์และมักถูกใช้ในการก่อสร้างอาคารในประเทศไทย
2. ปลอกหรือ jacket เป็นท่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่ากลวง (steel square tube) ที่ผลิตโดยการพับแผ่นเหล็กโครงสร้างแบบเย็น (cold-formed) เป็นรูปตัวซีและนำมาเชื่อมรอยต่อเข้าด้วยกันด้วยการเชื่อมไฟฟ้า โดยแบ่งเหล็กที่ใช้ออกเป็น 2 ชนิดคือเหล็ก ตามมาตรฐาน มอก. ที่มีความหนา 3.2 mm และ 4.5 mm และ stainless steel ชนิด 304 (โครเมียม 18% และนิกเกิล 8%) มีความหนา 4.5 mm โดยปลอกเหล็กที่มีความหนา 4.5 mm มีค่า B/t เท่ากับ 33.3 ผ่านเกณฑ์ของมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 แต่ไม่ผ่านเกณฑ์ของข้อกำหนดของ AISC LRFD 1994 และปลอกเหล็กที่มีความหนา 3.2 mm มีค่า B/t เท่ากับ 46.9 ไม่ผ่านเกณฑ์ทั้งสองข้างต้น อย่างไรก็ตาม ค่า B/t ทั้งสองค่าเป็นค่าที่อยู่ในช่วง 26 ถึง 48 ซึ่งมักใช้การก่อสร้างอาคารเดี่ยวและอาคารสูงปานกลางในสหรัฐอเมริกา (Schneider, 1998) และมีอัตราส่วนของปริมาณปลอกเหล็กต่อพื้นที่หน้าตัดเสามากกว่า 4% ตามข้อกำหนดของ AISC LRFD

1.3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ได้แก่ คอนกรีต แผ่นเหล็กที่ตัดจากปลอกเหล็ก แผ่นเหล็ก stainless steel ที่ตัดจากปลอก stainless steel และเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต ถูกกระทำตามมาตรฐาน ASTM ที่เกี่ยวข้อง

1.3.3 เสาตัวอย่างทดสอบทั้งหมดเป็นเสาสั้น มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่าขนาด 150×150 mm และสูง 750 mm โดยมีค่า L/B เท่ากับ 5.0 ซึ่งเป็นค่าที่มักใช้การก่อสร้างอาคารเดี่ยวและอาคารสูงปานกลางในสหรัฐอเมริกา ซึ่งมักอยู่ในช่วง 5 ถึง 9 (Schneider, 1998)

โดยเสาดตัวอย่างทดสอบไม่มีระบบที่ใช้ในการถ่ายแรงเฉือนระหว่างแกนคอนกรีตและเหล็ก

- 1.3.4 แรงกระทำเป็นแรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อแกนคอนกรีตหรือแกนคอนกรีตเสริมเหล็กของเสาดตัวอย่างทดสอบ โดยใช้ bearing plate ซึ่งเทียบได้กับการกระทำของแรงกดอัดต่อเสาเชิงประกอบตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 ข้อ 4314(ค)

1.4 แบบแผนการวิจัย

แบบแผนการวิจัยนี้เป็นการทดสอบตัวอย่างทดสอบเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและไม่ถูกห่อหุ้ม เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนและการวิบัติของเสาและนำผลการทดสอบที่ได้ไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานการออกแบบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อพัฒนาสมการที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาค่ากำลังของเสาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยมีขั้นตอนการดำเนินการคือ การค้นคว้า ศึกษา และทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง จากนั้น ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้คือ 1. การทดสอบแรงกดอัดของคอนกรีต 2. การทดสอบแรงดึงของแผ่นเหล็ก 3. การทดสอบแรงดึงของแผ่น stainless steel และ 4. การทดสอบแรงดึงของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต จากนั้น นำคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ทดสอบได้ข้างต้นทำการออกแบบเสาดตัวอย่างทดสอบและการทดสอบตามความเหมาะสมของเครื่องมือทดสอบที่มีอยู่ โดยใช้มาตรฐานการออกแบบ ว.ส.ท. 1008-38 จากนั้น ทำการทดสอบเสาดตัวอย่างทดสอบ 2 กลุ่มคือ 1. การทดสอบกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของ Tubed concrete column ซึ่งเป็นเสาคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและปลอก stainless steel 2. การทดสอบกำลังรับแรงกดอัดของ Tubed RC column หรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก และสุดท้าย นำกำลังของเสาดตัวอย่างที่ทดสอบได้มาเปรียบเทียบกับแนวทางการออกแบบเสาเชิงประกอบที่กำหนดโดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ ตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 หัวข้อที่ 4314 และ AISC LRFD 1994 เพื่อนำเสนอสมการที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาค่ากำลังของเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนและสรุปข้อเสนอแนะในการใช้งานที่เหมาะสมต่อไป

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 เข้าใจพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดโดยปลอกเหล็กและปลอก stainless steel ในรูป Tubed concrete column และ Tubed RC column และได้ข้อเสนอแนะที่เหมาะสมมากขึ้นเพื่อนำไปสู่การออกแบบและใช้งานจริงที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นต่อไป

- 1.5.2 ได้รูปแบบการก่อสร้างเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปลอกเหล็กเป็นแบบหล่อถาวร สำหรับอาคารขนาดเล็ก โดยปลอกเหล็กจะช่วยเสริมกำลังและความเหนียวให้เสาดังกล่าวให้สามารถรับแรงได้มากกว่าเสาคอนกรีตรูปแบบเดิม และ

รูปแบบการก่อสร้างนี้จะช่วยให้ประหยัดไม้แบบ ก่อสร้างได้รวดเร็ว เนื่องจาก
ปลอกเหล็กทำหน้าที่เป็นแบบหล่อและค้ำยัน ซึ่งทำให้การก่อสร้างดำเนินการได้ง่าย
และช่วยทำให้ราคาก่อสร้าง โครงสร้างลดลง

บทที่ 2

หลักการ ทฤษฎี และข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงหลักการ ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยจะกล่าวถึงพฤติกรรมและกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled steel tube column) ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน ผลของการโอบรัดทางด้านข้างต่อกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีต ผลการโอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยปลอกเหล็ก และสุดท้าย ข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับเสาดังกล่าว ขอให้ทราบด้วยว่า ในการทบทวนหลักการ ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทนี้จะเน้นเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการใช้ปลอกเหล็กในการห่อหุ้มของเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเท่านั้นเนื่องจาก 1.) เหล็กเป็นวัสดุที่หาซื้อได้ง่าย ราคาไม่แพง และวิศวกรไทยเข้าใจในพฤติกรรมและการก่อสร้างโครงสร้างเหล็กเป็นอย่างดี เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่นๆ ที่สามารถนำมาใช้ห่อหุ้มเสา เช่น พลาสติกเสริมเส้นใย (fiber-reinforced plastic) และเฟอร์โรซีเมนต์ (ferrocement) เป็นต้น และ 2.) เหล็กเป็นวัสดุที่มีกำลังและความแข็งแรงสูง ทำให้สามารถนำใช้งานได้ไม่ยากนัก นอกจากนั้นแล้ว หากต้องการความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมมากขึ้น stainless steel สามารถถูกเลือกนำมาใช้งานได้ แต่จะมีราคาค่อนข้างแพงเมื่อเทียบกับเหล็กโครงสร้าง

2.1 พฤติกรรมและกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.1.1 เสาคอนกรีตล้วน

จากการทดสอบเสาคอนกรีตที่ปราศจากเหล็กเสริม โดยการกดอัดในแนวแกน ซึ่งพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงกดอัดของเสา เช่น ขนาดรูปร่างของเสา คุณภาพของคอนกรีต อัตราการให้แรงกดอัด ความชะลูดของเสา ตลอดจนลักษณะของการหล่อเสาตัวอย่างที่อาจหล่อในแนวตั้งหรือในแนวนอนพบว่า พฤติกรรมการรับแรงกดอัดของเสาคอนกรีตล้วนมีลักษณะแบบเปราะ (brittle) ที่คล้ายกับพฤติกรรมการรับแรงกดอัดของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีต กล่าวคือ ในช่วงแรกของการให้แรงกระทำ ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง (stress) และความเครียด (strain) ในแนวแกนของเสาคอนกรีตจะเป็นเส้นค่อนข้างตรงจนถึงประมาณ 50% ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต จากนั้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะมีความโค้งมากขึ้น เนื่องจากการแตกร้าวภายในที่มากขึ้น จนถึงกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดที่จุดที่เส้นกราฟความสัมพันธ์มีความชันเป็นศูนย์ จากนั้น ความสามารถในการรับแรงกดอัดของเสาคอนกรีตจะลดลงอย่างต่อเนื่อง สุดท้าย เสาคอนกรีตจะเกิดการวิบัติโดยจะเกิดการแตกออก (splitting) ในแนวยาวของเสาหรือเป็นแบบเฉือนขนานในระนาบเอียง โดยหน่วยแรงกดอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.85 เท่าของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีตหรือ $0.85f'_c$ ดังนั้น

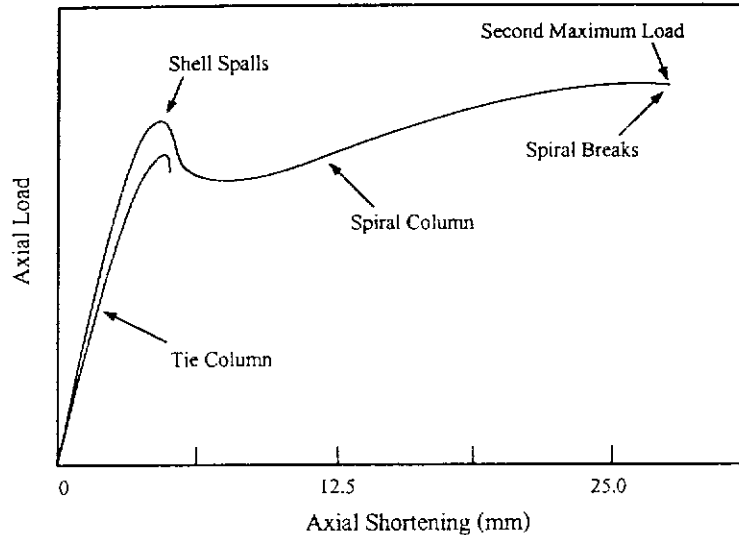
ถ้าเสาคอนกรีตมีพื้นที่หน้าตัดสุทธิ A_c และมีกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก f'_{co} แล้ว กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดในแนวแกนของเสาคอนกรีต P จะหาได้จากสมการ

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

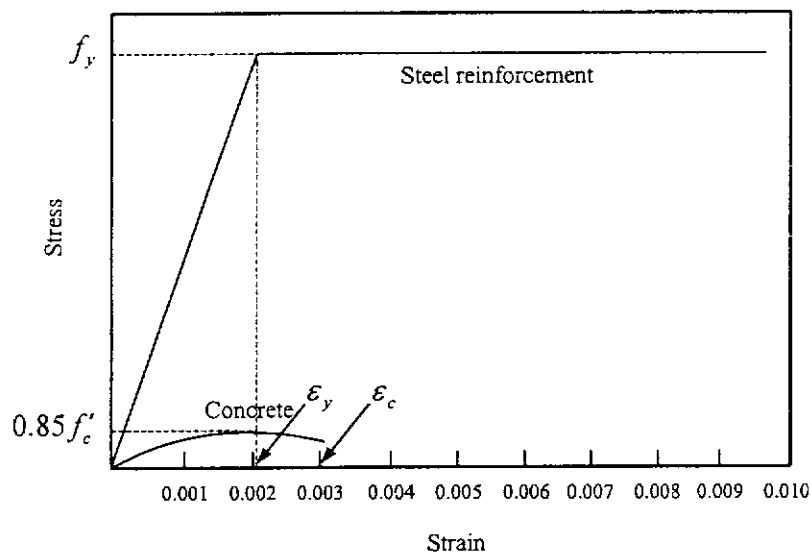
2.1.2 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เสาคอนกรีตที่เสริมเฉพาะเหล็กเสริมหลักอย่างเดียว (ไม่มีเหล็กปลอก) มีพฤติกรรมแบบเปราะและการวิบัติค่อนข้างคล้ายกับการวิบัติของเสาคอนกรีต กล่าวคือทันทีที่คอนกรีตส่วนที่หุ้มเหล็กเสริมหลักถูกกดอัดแตกและร้อนออก เหล็กเสริมหลักจะถูกกดอัดและเกิดการวิบัติโดยการโก่งเดาะ แต่เมื่อเสาคอนกรีตดังกล่าวถูกเสริมด้วยเหล็กปลอกเกลียวหรือเหล็กปลอกเดี่ยว เหล็กปลอกจะช่วยโอบรัดแกนคอนกรีตภายในไว้หลังจากที่คอนกรีตหุ้มถูกอัดแตก ทำให้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีกำลังรับแรงกดอัดเพิ่มขึ้น และช่วยให้เสามีพฤติกรรมแบบเหนียว (ductile) มากขึ้น ก่อนที่จะเกิดการวิบัติ

รูปที่ 2.1 แสดงพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาปลอกเกลียวและเสาปลอกเดี่ยว ถ้าเสาปลอกเกลียวและเสาปลอกเดี่ยวนั้นมีขนาดพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตและมีปริมาณเหล็กเสริมหลักเท่ากันและสมมติว่าเหล็กเสริมหลักมีกำลังจุดครากไม่สูงมากนัก (เช่น เหล็กเส้น SD30 และ SD40) แล้ว จากการทดสอบพบว่า เมื่อหน่วยแรงกดอัดในคอนกรีตและเหล็กเสริมมีค่าอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (elastic) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดกับการหดตัวในแนวแกนของเสาปลอกเกลียวและเสาปลอกเดี่ยวนั้นค่อนข้างเหมือนกัน โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวจะมีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรงในช่วงเริ่มต้น แต่เมื่อเสารับแรงกดอัดมากขึ้นจนหน่วยแรงกดอัดในคอนกรีตมีค่าสูงเกินกว่า $0.5f'_{co}$ โดยประมาณแล้ว ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อแรงกดอัดมีค่าสูงจนกระทั่งหน่วยแรงกดอัดในเหล็กเสริมถึงจุดครากแล้ว แรงกระทำที่เพิ่มขึ้นจะถูกรองรับโดยคอนกรีต จากนั้น คอนกรีตส่วนที่หุ้มเหล็กเสริมจะเริ่มแตกร้าว ถ้าระยะห่างของเหล็กปลอกเดี่ยวนั้นมีค่ามากเกินไป เมื่อคอนกรีตหุ้มถูกอัดแตกแล้ว เสาจะเกิดการวิบัติอย่างทันทีทันใด (abrupt failure) เพราะเหล็กเสริมหลักที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกเดี่ยวนั้นจะถูกกดอัดและโก่งเดาะทางข้างทันที ทำให้เสามีพฤติกรรมการวิบัติแบบเปราะ แต่ถ้าเหล็กปลอกเดี่ยวนั้นมีระยะห่างน้อยกว่าที่มาตรฐานการออกแบบกำหนดแล้ว กำลังรับแรงกดอัดของเสาจะค่อยๆ ลดลงหลังจากที่คอนกรีตหุ้มถูกอัดแตกทำให้เสามีพฤติกรรมการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure) มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ในทางทฤษฎีถือว่าเสานั้นไม่เหมาะที่จะใช้งานอีกต่อไปเมื่อคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมหลักถูกอัดแตก



รูปที่ 2.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาปลอกเดี่ยวและปลอกเกลียว
(Macgregor, 1997)



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริม
(วินิต ช่อวิเชียร, 2540)

การวิเคราะห์หาค่าลึงรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาสั้น พิจารณาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริมดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยกำหนดให้คอนกรีตมีหน่วยแรงกดอัดสูงสุดเท่ากับ $0.85f'_c$ ที่ความเครียดคดอัดเท่ากับ 0.002 mm/mm (ACI committee 318-05) และให้คอนกรีตมีความเครียดคดอัดสูงสุดก่อนวิบัติเท่ากับ 0.003 mm/mm โดยค่าลึงรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาปลอกเดี่ยวและเสาปลอกเกลียว (ก่อนที่คอนกรีตหุ้มถูกอัดแตก) มีค่าเท่ากับผลรวมของค่าลึงรับแรงกดอัดที่ได้จากคอนกรีตและเหล็กเสริมหลัก เมื่อ

พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริม ดังรูปที่ 2.2 จะเห็นว่า เมื่อใช้เหล็กเสริมที่มีหน่วยแรงที่จุดคราก f_y (yield stress) อยู่ระหว่าง 300-400 MPa แล้วเหล็กเสริมนั้นจะมีความเครียดที่จุดคราก (ϵ_y) เท่ากับ 0.0015-0.002 mm/mm ซึ่งทำให้เหล็กเสริมหลักในเสาจะถูกกดอัดถึงจุดครากก่อนที่คอนกรีตถูกกดอัดจนถึงหน่วยแรงกดอัดสูงสุดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้น ก่อนที่คอนกรีตหุ้มจะถูกอัดแตก หน่วยแรงกดอัดของคอนกรีตจะถูกสมมุติให้มีค่า $0.85f'_{co}$ และหน่วยแรงกดอัดของเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับหน่วยแรงคราก f_y ดังนั้น กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะหาได้จากสมการ

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

เมื่อ A_g คือพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา
 A_s คือพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมหลัก
 f_y คือกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมหลัก

การออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กต้องทำตามข้อกำหนดที่ได้กำหนดไว้ในมาตรฐานการออกแบบของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) หรือของ American Concrete Institute (ACI) สำหรับอาคารขนาดเล็กในประเทศไทย คอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างมักถูกกำหนดให้มีกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด (f'_{co}) อยู่ในช่วง 18-25 MPa เหล็กเสริมในแนวแกนมักจะมี yield stress อยู่ในช่วง 300-400 MPa และเสามักมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสอยู่ขนาด 0.15-0.25 m และสูง 2.20-2.80 m โดยพื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมในแนวแกน (A_s) มีค่าอยู่ในช่วง 0.01-0.08 เท่าของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด (A_g) ของเสา เสาคอนกรีตต้องมีเหล็กปลอกยึดเหล็กเสริมในแนวแกนของเสา เพื่อป้องกันการเกิดการโก่งเดาะของเหล็กเสริมในแนวแกน โดยต้องมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอย่างน้อย 6 mm และมีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกตามที่ได้กำหนดไว้ในมาตรฐานการออกแบบ

2.2 เสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

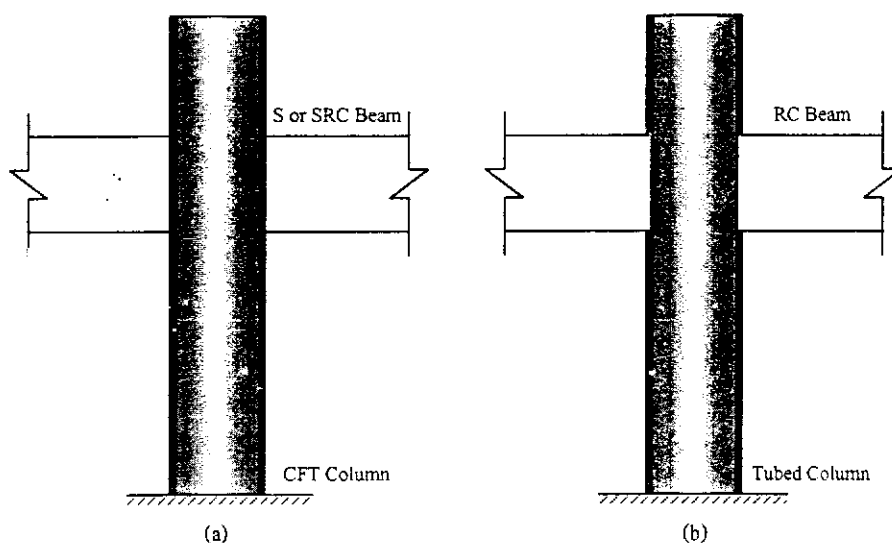
เสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled steel tube column) หรือเสา CFT เป็นเสาคอมโพสิท (composite column) หรือเสาเชิงประกอบที่ก่อสร้างโดยใช้ท่อเหล็กกลวงหรือปลอกเหล็กกลวงซึ่งมีหน้าตัดทรงกลมหรือหน้าตัดสี่เหลี่ยมเป็นแบบหล่อและเทคอนกรีตลงในช่องว่างของปลอกเหล็กเพื่อใช้เป็นแกนของเสา โดยปลอกเหล็กได้ถูกออกแบบให้ทำงานร่วมกับคอนกรีตเพื่อให้เกิด composite action โดยปลอกเหล็กอาจจะถูกออกแบบให้ทำหน้าที่หลักในการรองรับหน่วยแรงในแนวแกน (axial stress) ที่เกิดจากแรงกดอัดและโมเมนต์ดัด และ/หรืออาจจะถูกออกแบบให้รองรับหน่วยแรงตามขวาง (transverse stress) ที่เกิดจากแรงเฉือน และ/หรืออาจจะถูกออกแบบให้รองรับแรงดันเนื่องจากการขยายตัวของแกนคอนกรีตภายใต้แรงกดอัด ซึ่งทำให้เกิดการโอบรัด (confining

effect) คอแกนคอนกรีต ในขณะที่เดียวกัน แกนคอนกรีตทำหน้าที่ช่วยบล็อกเหล็กในการรองรับหน่วยแรงในแนวแกนบางส่วนและยังช่วยให้บล็อกเหล็กมีความต้านทานต่อการเกิดการโก่งเคาะเฉพาะที่ (local buckling) ของผนังของบล็อกเหล็กเพิ่มขึ้น ซึ่งผลของ composite action ข้างต้นทำให้เสา CFT มีข้อดีเหนือกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและเสาเหล็กโครงสร้าง ทั้งในด้านความแกร่ง (stiffness) กำลัง (strength) ความเหนียว (ductility) และการดูดซับพลังงาน (energy absorption) และส่งผลให้เสา CFT เป็นเสาที่ใช้ปริมาณเหล็กลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับเสาเหล็กโครงสร้าง และบล็อกเหล็กยังทำหน้าที่เป็นแบบหล่อและค้ำยัน ซึ่งทำให้การก่อสร้างดำเนินการได้ง่ายและช่วยทำให้ราคาค่าก่อสร้างโครงสร้างลดลง ดังนั้น จากข้อดีข้างต้น ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เสา CFT จึงได้รับความนิยมและประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในต่างประเทศ เช่น ในประเทศสหรัฐอเมริกา จีน และญี่ปุ่น (Xiao et.al., 2005) โดยในสหรัฐอเมริกา เสา CFT ที่ใช้อาคารเตี้ยและอาคารสูงปานกลางมักจะมีอัตราส่วนของความกว้างของเสาคือความหนาของบล็อกเหล็กอยู่ในช่วง 26 ถึง 48 และมีอัตราส่วนของความสูงต่อความกว้างของเสาอยู่ในช่วง 5 ถึง 9 (Schneider, 1998)

ในปัจจุบัน เสา CFT ถูกแบ่งตามลักษณะการออกแบบให้บล็อกเหล็กรองรับหน่วยแรงเป็น 2 แบบ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3 คือ 1.) บล็อกเหล็กทำหน้าที่หลักเป็นเหล็กแกน (longitudinal reinforcement) รองรับหน่วยแรงในแนวแกน โดยเสา CFT จะถูกก่อสร้างอย่างต่อเนื่องโดยมีความสูงหลายชั้นหรือสูงตลอดความสูงของอาคาร ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3a ซึ่งเสา CFT แบบนี้จะรองรับแรงที่กระทำผ่านบล็อกเหล็กและคอนกรีตร่วมกันและมักถูกเรียกว่า “CFT column” และ 2.) บล็อกเหล็กทำหน้าที่หลักเป็นเหล็กเสริมในแนวขวาง (transverse reinforcement) โดยมีรายละเอียดของจุดเชื่อมต่อการออกแบบ และการก่อสร้างที่ใกล้เคียงกับ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3b ซึ่งมักถูกเรียกว่า “Tubed column”

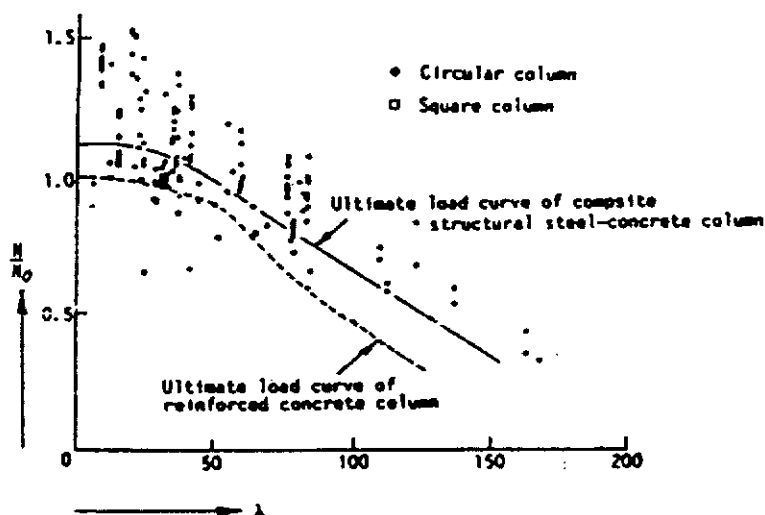
เสา CFT แบบแรกได้ถูกศึกษาโดยนักวิจัยจำนวนมากตั้งแต่ปี 1967 ทั้งในรูปการทดสอบและการทำ finite element analysis (Schneider, 1998) ดังตัวอย่างของงานวิจัยที่ถูกเสนอโดย Schneider ในปี 1998 Sakino et. al. ในปี 2004 และ Xiao et. al. ในปี 2005 จากการศึกษางานวิจัยข้างต้นสรุปได้ว่า พฤติกรรมของเสา CFT ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลักได้แก่ อัตราส่วนของความกว้างต่อความหนา (B/t) และ อัตราส่วนของความสูงต่อความกว้าง (L/B) รูปร่างหน้าตัดของบล็อกเหล็ก และอัตราส่วนของกำลังของคอนกรีตต่อกำลังของเหล็ก โดยเสา CFT หน้าตัดสี่เหลี่ยมมีผลของการโอบรัดของบล็อกเหล็กต่อแกนคอนกรีตต่ำกว่าเสา CFT หน้าตัดทรงกลม เนื่องจากผนังของบล็อกเหล็กกลมจะต้านความดันจากการขยายตัวของคอนกรีตโดยอาศัยหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง (hoop stress) แต่ผนังของบล็อกเหล็กกลวงสี่เหลี่ยมจะต้านความดันดังกล่าวโดยอาศัยความแกร่งต่อการคด (flexural rigidity) ของผนังบล็อกในรูปของ plate ซึ่งเมื่อผนังบล็อกถูกกระทำโดยแรงกดอัดและแรงตามขวางพร้อมกันแล้ว ผนังบล็อกจะเกิดการโก่งเคาะเฉพาะที่ (local buckling) ได้ง่าย ในปัจจุบัน การออกแบบเสา CFT ประเภท

นี้ทำได้ตามมาตรฐานการออกแบบที่เกี่ยวข้อง เช่น มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง ว.ส.ท. 1008-38 ของ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ปี 2538 Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design (LRFD) ของ AISC ปี 1994 และ Recommendations for Design and Construction of Concrete-Filled Steel Tubular Structures ของ Architectural Institute of Japan ปี 1997 เป็นต้น โดยรายละเอียดของข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับเสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตจะถูกกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อที่ 2.5



รูปที่ 2.3 เสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต a.) CFT column และ b.) Tubed column

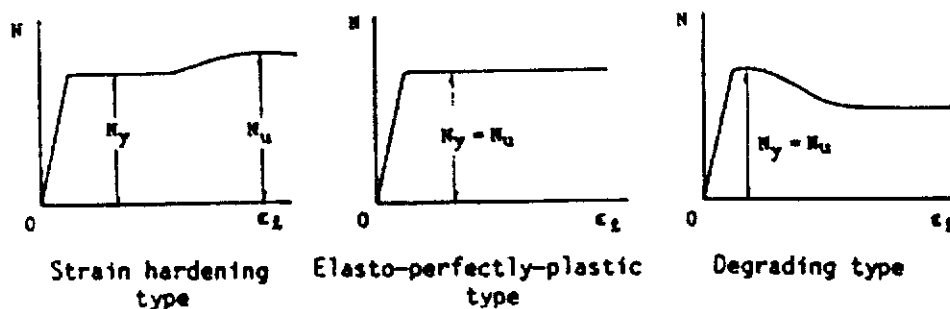
รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดสูงสุด (ultimate load) และ nominal slenderness ratio ของเสา CFT column และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นเสาสั้นหน้าตัดกลมและหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่าภายใต้แรงกดอัดตรงศูนย์กลางในแนวแกน โดย ultimate load หรือ N ได้ถูก normalized โดยการหารด้วย nominal axial load capacity หรือ N_0 ซึ่งเป็นผลรวมของกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตและเหล็ก โดยค่าต่ำสุดของ radius of gyration ที่ใช้ในการคำนวณ nominal slenderness ratio หรือ λ เท่ากับ 0.25 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเสากลม หรือ 0.29 เท่าของความกว้างด้านนอกของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่า จากรูป จะเห็นได้ว่า ultimate load ของเสาหน้าตัดกลมมีค่ามากกว่า nominal axial load capacity มาก เนื่องจากผลของ strain-hardening ของปลอกเหล็กและผลการโอบรัดของปลอกเหล็ก โดยจะมีค่าลดลงเมื่อ nominal slenderness ratio หรือความยาวของเสา มีค่าเพิ่มขึ้น โดยการโอบรัดของปลอกเหล็กจะไม่เพิ่ม ultimate load ของเสาเมื่อ nominal slenderness ratio มีค่ามากกว่า 44.3



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง ultimate load และ nominal slenderness ratio
(Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 1992)

การเพิ่มขึ้นของ ultimate load ของเสา CFT สัมพันธ์กับหลายปัจจัย เช่น รูปปร่างและขนาดของปลอกเหล็กและคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ในปี 1977 Tomii et.al. ได้ทำการทดสอบเสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตสั้นภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนที่มี slenderness ratio น้อยกว่า 36 จำนวน 270 ตัวอย่าง โดยเสาที่ศึกษามีหน้าตัดกลม หน้าตัดแปดเหลี่ยม และหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่า โดยตัวอย่างทดสอบได้ถูก annealing เพื่อศึกษาถึงผลของ strain hardening ที่มีต่อ ultimate load ของเสา ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและความเครียด ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปปร่างหน้าตัด อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนา และกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีต โดยพฤติกรรมการรับกดอัดของเสาดังกล่าวถูกแบ่งออกได้เป็น 3 แบบคือ 1. strain-hardening 2. elastic-perfectly plastic และ 3. degrading ดังที่แสดงในรูปที่ 2.5 โดยที่ความสัมพันธ์แบบ strain-hardening และแบบ elastic-perfectly plastic มักเกิดขึ้นในเสาที่มีหน้าตัดกลมและเสาหน้าตัดแปดเหลี่ยม และแบบ degrading มักเกิดขึ้นในเสาหน้าตัดกลมและเสาหน้าตัดแปดเหลี่ยมบางส่วน

แนวคิดของแรงคราก (yielding load) N_y ได้ถูกนำเสนอเป็นกำลังของเสา CFT แทน ultimate load ของเสา ซึ่งมีปัญหาขึ้นอยู่กับ slenderness ratio และความหนาของปลอกเหล็กอย่างมาก และมักมีค่าที่ค่อนข้างกระจายตัวมาก เมื่อตัวแปรทั้งสองมีค่าเปลี่ยนแปลง จากการทดสอบพบว่า yielding load ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า slenderness ratio น้อยมาก โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0 ถึง 1.25 เท่าของ nominal axial load capacity ของเสาหน้าตัดกลม และมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0 ถึง 1.15 เท่าของ nominal axial load capacity ของเสาหน้าตัดแปดเหลี่ยม และมีค่าอยู่ระหว่าง 0.9 ถึง 1.1 เท่าของ nominal axial load capacity ของเสาหน้าตัดด้านเท่า โดยใช้ plastic theory Tomii et.al. ได้เสนอ semiempirical formula ในการคำนวณหา yielding load ของเสาดังกล่าว



รูปที่ 2.5 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและความเครียดของเสา

(Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 1992)

ในการนำมาใช้งานจริง ในประเทศญี่ปุ่น เสา CFT มักถูกใช้ในเฟรมรับโมเมนต์ (moment frame) ซึ่งมักมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 700 mm โดยไม่ใช้ตัวถ่ายแรงเฉือน (shear connector) ภายในปลอกเหล็ก เพื่อทำการถ่ายเทแรงเฉือนระหว่างคอนกรีตและปลอกเหล็ก แต่ในสหรัฐอเมริกา เสาประเภทนี้มักถูกใช้ในเฟรมที่มีการค้ำยัน (braced frame) โดยมักมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1000 mm และคอนกรีตที่ใช้มักเป็นคอนกรีตกำลังสูงเพื่อให้เสามีความแกร่งสูงสุด และอาจจะมีการใช้ shear connector เพื่อถ่ายเทแรงเฉือนระหว่างคอนกรีตและปลอกเหล็กในบางกรณี ในประเทศไทย เสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตได้ถูกนำมาใช้งานบางประเภท เช่น ใช้เป็นเสาเข็ม micropile เพื่อใช้ในการแก้ไขการทรุดตัวของอาคารในหลายพื้นที่ เช่น ในการซ่อมอาคารศูนย์เครื่องมือ F5 และอาคารหอพักพักนักศึกษา S7 และ S9 ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นต้น โดยปลอกเหล็กที่ใช้ในงานลักษณะนี้จะเป็นปลอกเหล็กกลมกลวง

แนวคิดของเสา CFT แบบที่สองได้ถูกนำเสนอโดย Tomii et. al. ในปี 1985 โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้ปลอกเหล็กของเสา CFT รองรับแรงกระทำตามขวางและโมเมนต์เนื่องจากแผ่นดินไหว ซึ่งเสาประเภทนี้มักถูกเรียกว่า “Tubed column” โดยแรงกระทำจะกระทำผ่านแกนคอนกรีตเสริมเหล็กและปลอกเหล็กไม่ได้ถูกออกแบบให้รองรับหน่วยแรงในแนวแกนโดยตรง โดยการเว้นช่องว่างระหว่างปลอกเหล็กกับท้องคานหรือฐานรากที่ปลายทั้งสองของเสา ดังนั้น ภายใต้แรงกระทำ ปลอกเหล็กทำหน้าที่เป็นปลอก (jacket) ห่อหุ้มแกนของเสา คอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งช่วยเพิ่มกำลังรับหน่วยแรงในแนวแกนและความเหนียวของเสาให้สูงขึ้น นอกจากนั้นแล้ว แนวคิดนี้ยังได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในการเสริมกำลังและซ่อมแซมเสา คอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการเชื่อมปลอกเหล็ก (steel jacket) เพื่อรัดรอบเสา คอนกรีตเสริมเหล็กและทำการคัคมอร์ต้า (mortar) เพื่อปิดช่องว่างระหว่างปลอกเหล็กและเสาคงตัวอย่างของงานวิจัยที่ถูกนำเสนอโดย Priestley et. al. ในปี 1994 อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสรุปได้ว่า การศึกษาเกี่ยวกับ Tubed column มีค่อนข้างน้อยและเป็นการศึกษาเสาหน้าตัดกลมและถูกกระทำโดยแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวเป็นหลัก

นอกจากนั้นแล้ว จากการศึกษาที่ Tubed column ถูกกระทำโดยแรงผ่านแกนคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้น Tubed column จึงเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของเสาที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการเสริมกำลังให้กับเสา คอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอยู่แล้ว ซึ่งการเสริมกำลังจะทำได้โดยการห่อหุ้มเสาดังกล่าว ด้วยปลอกเหล็ก โดยการรัดรอบระหว่างปลอกเหล็กและเสาจะทำให้เกิดขึ้นได้หลายวิธี เช่น การอัด grout ประเภท expansive เข้าไปในรอยเชื่อมต่อระหว่างปลอกเหล็กและเสา หรือการใช้สลักเกลียวในการรัดปลอกเหล็กให้เข้ากับเสาโดยตรง ดังนั้น ด้วยเหตุผลข้างต้น กอปรกับมาตรฐานการออกแบบ ของ ว.ส.ท. 1008-38 และข้อกำหนดของ AISC LRFD 1994 มีความแตกต่างกันในการกำหนดความ หนาต่ำสุดที่ต้องใช้ในเสา CFT และแนวคิดของสมการออกแบบ จึงมีความจำเป็นที่จะต้อง ทำการศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างของ Tubed column เพิ่มเติม เพื่อที่จะพัฒนา Tubed column ให้ สามารถนำไปใช้งานได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปแบบของการ วิเคราะห์หาความสามารถในการเสริมกำลังของปลอกเหล็กใน Tubed column อันเนื่องมาจากการ ห่อหุ้มของปลอกเหล็กที่มีต่อเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.3 ผลการโอบรัดทางด้านข้างต่อพฤติกรรมของคอนกรีต

พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตถูกหาได้โดยการทดสอบแรงกดอัด ตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ เช่น มาตรฐาน ASTM C39 เป็นต้น ซึ่งถูกแสดงในรูปของ แผนภาพหน่วยแรงและความเครียด การทดสอบดังกล่าวเป็นการให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อ คอนกรีตอยู่ในสถานะหน่วยแรงแบบแกนเดียว (uniaxial state of stress) อย่างไรก็ตาม ในสภาพการ ใช้งานจริง เช่นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและเสาเชิงประกอบ เป็นต้น คอนกรีตมักถูกกระทำโดยแรง กดอัดในแนวแกนและโมเมนต์คด ทำให้เนื้อคอนกรีตที่อยู่ในบริเวณแกนของเสาถูกกระทำโดยหน่วย แรง ซึ่งอยู่ในสถานะหน่วยแรงแบบหลายแกน (multiaxial state of stresses) โดยที่สถานะหน่วยแรง แบบแกนเดียวตามลักษณะการทดสอบเป็นเพียงหนึ่งในสถานะหน่วยแรงแบบหลายแกนที่เกิดขึ้นใน คอนกรีตตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างเท่านั้น และเนื่องจากพฤติกรรมการรับแรงของคอนกรีต ภายใต้อันตรึงแรงกดอัดในแนวแกนเปลี่ยนแปลงไปตามสถานะของหน่วยแรงทางด้านข้างที่เกิดขึ้นใน คอนกรีต ดังนั้น การรู้พฤติกรรมของคอนกรีตภายใต้การกระทำของหน่วยแรงประเภทต่างๆ จึงมี ความสำคัญในการออกแบบของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

คอนกรีตเป็น frictional material ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลที่ไวต่อแรงกระทำทางด้านข้าง ภายใต้อันตรึงแรงกดอัดในแนวแกน คอนกรีตจะเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้างเนื่องจาก Poisson's effect และถูก ด้านทานหรือโอบรัดโดยวัสดุที่ห่อหุ้ม เช่น ปลอกเหล็กกลวงที่อยู่ภายนอกในกรณีของเสาเชิง ประกอบ และเหล็กปลอกหรือเหล็กเสริมทางขวางในกรณีของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นต้น ซึ่งเป็น ผลทำให้เกิด composite action ระหว่างปลอกเหล็กและคอนกรีตในรูปของการถ่ายแรงระหว่างปลอก

เหล็กและคอนกรีตและ confining effect ขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้เสาในลักษณะดังกล่าวมีกำลังและความเหนียว (ductility) เพิ่มขึ้นจากเสาคอนกรีต

2.3.1 ผลของการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังปกติ

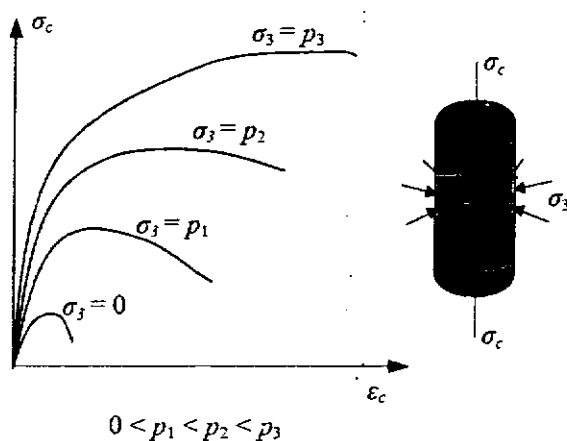
การศึกษาผลของการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังปกติ (normal strength concrete) ได้ถูกศึกษาเป็นจำนวนมาก เช่น Richart et al. (1928) และ Mills และ Zimmerman (1970) เป็นต้น ในช่วงเริ่มต้น Richart et al. (1928) เป็นบุคคลแรกที่ได้ทดสอบให้เห็นผลของการโอบรัดคอนกรีตที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงกดอัดสูงสุด ความแกร่ง และความเครียดที่หน่วยแรงกดอัดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยได้ทำการทดสอบตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน และแรงกระทำทางด้านข้าง (lateral load) โดยให้แรงกระทำทางด้านข้างมีค่าที่เปลี่ยนแปลงได้โดยใช้ความดันของของเหลว หรือเรียกอีกชื่อว่า active confinement และในปีต่อมา Richart et al. ได้ทำการทดสอบตัวอย่างทดสอบรูปทรงกระบอกที่ถูกโอบรัดด้วย continuous steel spiral ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน หรือเรียกอีกชื่อว่า passive confinement โดยพบว่า ผลการทดสอบในกรณีของ active confinement มีลักษณะเช่นเดียวกับกรณี passive confinement ถ้าระยะห่างระหว่าง spiral มีค่าน้อยๆ และได้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่ความดันทางด้านข้างค่าต่างๆ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6 จากรูปจะเห็นได้ว่า ภายใต้หน่วยแรงโอบรัด (confining stress) ที่เพิ่มขึ้น คอนกรีตจะมีหน่วยแรงกดอัดสูงสุดสูงขึ้น และสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มากขึ้นก่อนเกิดการวิบัติ นอกจากนี้การวิบัติจะเป็นการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไปมากขึ้น เนื่องจากคอนกรีตภายใต้หน่วยแรงโอบรัดมีความเหนียว (ductility) เพิ่มสูงขึ้น โดยจากการทดสอบ Richart et al. ได้เสนอสมการทำนายกำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้างในรูป

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_1 \quad (2.4)$$

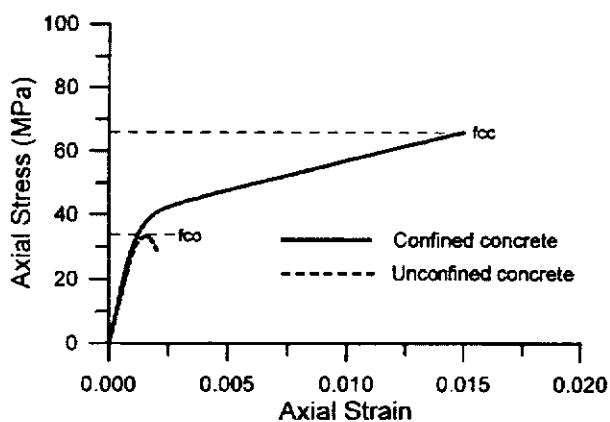
- เมื่อ f'_{cc} คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแกนของคอนกรีต เมื่อมีแรงดันรอบข้าง
 f'_{co} คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแกนของคอนกรีต เมื่อไม่มีแรงดันรอบข้าง
 f_1 คือ ความดันรัดรอบ (confining pressure)
 k_1 คือ confinement effectiveness coefficient มีค่าเท่ากับ 4.1

รูปที่ 2.7 เป็นกราฟตัวอย่างเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกปกติและคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ถูกห่อหุ้มชั้นส่วนที่ห่อหุ้มคอนกรีต จากรูป พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของแท่งคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มถูกแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน โดยที่ ในช่วงแรก กราฟความสัมพันธ์ของคอนกรีตทั้งสองกรณีมีลักษณะที่เหมือนกันจนถึงหน่วยแรงกดอัดสูงสุด f'_{co} เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีค่า Poisson's ratio ที่ต่ำ ทำให้การขยายตัวทางด้านข้าง

ของคอนกรีตมีค่าน้อยมาก เป็นผลทำให้ไม่มี composite action เกิดขึ้นระหว่างคอนกรีตและชิ้นส่วนที่ห่อหุ้มคอนกรีต และคอนกรีตจึงเป็นวัสดุหลักในการรับแรงกดอัด ในช่วงที่สอง หลังจากคอนกรีตถึงกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดแล้ว คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวอย่างต่อเนื่อง เป็นผลทำให้ความเครียดในคอนกรีตเพิ่มขึ้นในอัตราที่รวดเร็วกว่าหน่วยแรง ดังนั้น slope ของกราฟความสัมพันธ์ของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ถูกรัดรอบจึงมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งถึงจุดหนึ่ง กราฟความสัมพันธ์จะเป็นเส้นตรงอีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากการแตกร้าวอย่างต่อเนื่องทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวทางด้านข้างเพิ่มขึ้นจนทำให้เกิด composite action ระหว่างคอนกรีตและชิ้นส่วนที่ห่อหุ้มคอนกรีต และถ้าชิ้นส่วนที่ห่อหุ้มคอนกรีตมีกำลังและความแข็งแรงเพียงพอแล้ว คอนกรีตจะถูกกระทำโดยความดันรัศรอบ (confining pressure) ซึ่งทำให้คอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มชิ้นส่วนที่ห่อหุ้มคอนกรีต มีพฤติกรรมเหมือนวัสดุเหนียว (ductile material) จนกระทั่งถึงจุดวิบัติ



รูปที่ 2.6 ผลของหน่วยแรงโอบรัดต่อพฤติกรรมมารับแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีต
(Johansson, 2000)



รูปที่ 2.7 กราฟตัวอย่างเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีต
รูปทรงกระบอกที่ถูกรัดรอบและไม่ถูกรัดรอบ (Lin และ Chen, 2001)

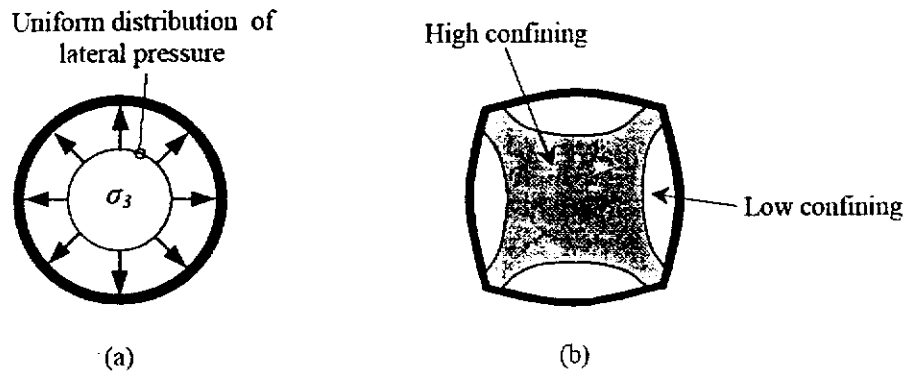
2.3.2 ผลของการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังสูง

สำหรับคอนกรีตกำลังสูง (high-strength concrete) Attard *et al.* ในปี 1996 ได้ทำศึกษาโดยการทดสอบแท่งคอนกรีตประเภทดิ่งกล่าวภายใต้หน่วยแรงโอบรัดซึ่งมีค่าไม่มากนัก และ Ansari และ Li ในปี 1998 ได้ทำการทดสอบแท่งคอนกรีตประเภทดิ่งกล่าวภายใต้หน่วยแรงโอบรัดที่มีค่าสูงถึงหน่วยแรงกอดสูงสุดของคอนกรีตที่ใช้ศึกษา จากผลการศึกษาทั้ง 2 กรณีพบว่า ผลของการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังสูงมีค่าน้อยกว่าที่เกิดขึ้นในคอนกรีตกำลังปกติ ซึ่งจากศึกษาพบว่า สำหรับคอนกรีตกำลังสูงและคอนกรีตมวลเบา ค่า k_1 ในสมการที่ 2.4 ควรมีค่าลดลงจาก 4.1 เหลือ 2.0 โดยคอนกรีตกำลังสูงจะมีความเหนียวเพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับค่าของแรงโอบรัดที่กระทำต่อคอนกรีต

2.4 ผลการโอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก

สภาวะหน่วยแรงในสามแกน (triaxial stresses) ในคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กได้ถูกศึกษาโดยนักวิจัยหลายท่าน เช่น Gardner และ Jacobson ในปี 1967, Tomii *et al.* ในปี 1977, Orito *et al.* ในปี 1987 (Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 1992) และ Schneider ในปี 1998 จากการศึกษาพบว่า คอนกรีตที่ถูกโอบรัดแบบ passive confinement โดยปลอกเหล็กจะมีพฤติกรรมแตกต่างจากคอนกรีตที่ถูกโอบรัดแบบ active confinement โดยขึ้นอยู่กับขนาดของการเปลี่ยนรูปร่างตามขวางของแกนคอนกรีตภายใต้แรงกอดอัดในแนวแกน และความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของปลอกเหล็ก อย่างไรก็ตาม ผลของการโอบรัดต่อคอนกรีตไม่ว่าจะเป็นแบบ passive confinement หรือแบบ active confinement จะมีลักษณะที่เหมือนกัน ตามที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.3.1

คอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กกลวงที่มีขนาดสั้นถูกกระทำโดยแรงกอดอัดในแนวแกนจะมีกำลังที่จุดวิกฤติสูงกว่าผลรวมของกำลังของปลอกเหล็กพร้อมกับกำลังของคอนกรีต จากการศึกษาของ Schneider พบว่า ปลอกเหล็กที่มีหน้าตัดกลม (circular steel jacket) มีความสามารถในการโอบรัดต่อคอนกรีตมากกว่าปลอกเหล็กที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular steel jacket) เนื่องจากปลอกเหล็กที่มีหน้าตัดกลมทำให้เกิด effective hoop tension ที่ทำให้เกิดหน่วยแรงรัดรอบที่สม่ำเสมอ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.8(a) มากกว่าหน่วยแรงรัดรอบของปลอกเหล็กที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีด้านของหน้าตัดที่เรียบ ซึ่งมีความแกร่งต่อการตัดที่ไม่เพียงพอในการต้านทานต่อแรงดันเนื่องจากการขยายตัวทางด้านข้างของคอนกรีตที่กระทำตั้งฉากกับด้านของหน้าตัดดังกล่าว ดังนั้น การโอบรัดโดยส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นเฉพาะกับคอนกรีตด้านในของแกนเสา และที่มุมของหน้าตัดเสา ดังที่แสดงโดยพื้นที่ระบายสีทึบของรูปที่ 2.8(b) โดยความดันโอบรัดที่เกิดขึ้นจะมีค่าไม่สม่ำเสมอตลอดหน้าตัดคอนกรีต



รูปที่ 2.8 การกระจายของหน่วยแรงโอบรัด (a) ปลูกเหล็กที่มีหน้าตัดกลม
(b) ปลูกเหล็กที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม (Johansson, 2000)

2.4.1 ผลการโอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลูกเหล็กหน้าตัดกลม

ตามที่ได้อธิบายไปแล้ว ความดันโอบรัด (confining pressure, f_1) หรือหน่วยแรงโอบรัดในเสาคอนกรีตหน้าตัดทรงกลมมีค่าคงที่รอบเส้นรอบวงของหน้าตัด เมื่อปลูกเหล็ก (steel jacket) ถึงจุดคราก (yielding) ความดันโอบรัดดังกล่าวจะมีค่าสูงสุด โดยหาได้จากสมการที่ 2.5

$$f_1 = \frac{2\sigma_j t}{D} = \frac{2E_s \varepsilon_j t}{D} \quad (2.5)$$

เมื่อ σ_j คือ หน่วยแรงทางขวาง (hoop stress) ของปลูกเหล็ก
 E_s คือ modulus of elasticity ของปลูกเหล็ก
 ε_j คือ ความเครียดทางขวาง (hoop strain) ของปลูกเหล็ก
 t คือ ความหนาของปลูกเหล็ก
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนคอนกรีตหน้าตัดทรงกลมที่ถูกโอบรัด

ระดับของการโอบรัดที่ได้จากปลูกเหล็กถูกแสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนการโอบรัด (confinement ratio, CR) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความดันโอบรัดสูงสุด (f_1) และกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด (compressive strength of unconfined concrete, f'_{co}) หรือ

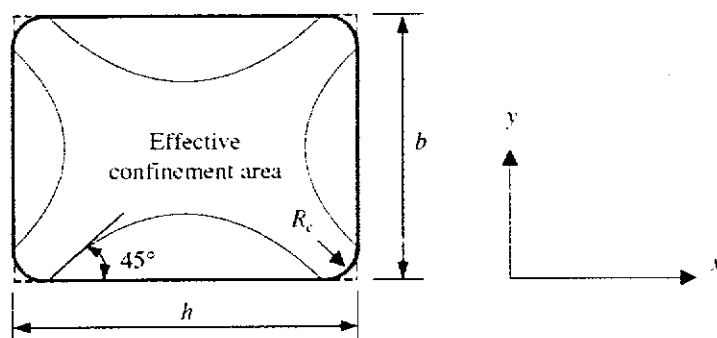
$$CR = \frac{f_1}{f'_{co}} \quad (2.6)$$

จากการศึกษาพบว่า เมื่อความหนาของปลูกเหล็กมีค่ามากกว่าค่าหนึ่ง ซึ่งทำให้กำลังรับแรงกดอัดและความเครียดในแนวแกนของคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มโดยปลูกเหล็กมีค่าสูงสุดที่จุด

เดียวกัน ซึ่งทำให้ผลของการโอบรัดมีค่าสูงสุดแล้ว กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มโดยปลอกเหล็กจะเป็นแบบ bilinear ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 อย่างไรก็ตาม ถ้าความหนาของปลอกเหล็กมีค่าน้อยกว่าค่าดังกล่าวแล้ว กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มโดยปลอกเหล็กจะเป็นแบบกราฟความสัมพันธ์ของคอนกรีตปกติ ซึ่งกำลังรับแรงกักอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจะถึงก่อนการคราก (yielding) ของปลอกเหล็ก ซึ่งทำให้ผลของการโอบรัดมีค่าไม่สูงสุด โดยที่ขนาดหน้าตัดของปลอกเหล็กที่ทำให้กราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นแบบ bilinear นั้น จะเป็นขนาดที่ทำให้ค่า confinement ratio, (f_1 / f'_{co}) มีค่ามากกว่า 0.07 (Lam and Teng, 2003)

2.4.2 ผลการโอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยม

รูปที่ 2.9 แสดงพื้นที่ของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยปลอกเหล็กของเสาคอนกรีตหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมที่มีหน้าตัดกว้าง b และลึก h ซึ่งมุมของปลอกเหล็กดังกล่าวได้ถูกออกแบบให้มีลักษณะมน โดยมีรัศมี R_c เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการโอบรัดที่เกิดขึ้นในแกนคอนกรีต จากการศึกษารายงานของ Park และ Paulay ในปี 1975, Mander et al. ในปี 1988, Cusson และ Paultre ในปี 1995 (Lam และ Teng, 2003) พบว่า แกนคอนกรีตจะถูกโอบรัดโดยปลอกเหล็กภายนอกโดยการเกิด arching action ในปลอกเหล็ก ซึ่งพื้นที่การโอบรัดประสิทธิผล (effective confinement area) ของคอนกรีตดังกล่าวจะอยู่ภายในกรอบพาราโบลา 4 ด้านที่ตัดกับขอบของหน้าตัดเสาที่มุมประมาณ 45° และเนื่องจากการโอบรัดที่เกิดขึ้นมีค่าไม่สม่ำเสมอตลอดหน้าตัดของแกนคอนกรีต ดังนั้น ที่ความเครียดในแนวแกนค่าหนึ่งที่เกิดขึ้นบนเสาดังกล่าว หน่วยแรงที่ถูกรองรับโดยคอนกรีตจะมีค่าไม่สม่ำเสมอตลอดหน้าตัด ซึ่งทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดเสาถูกประมาณให้อยู่ในรูปของหน่วยแรงในแนวแกนเฉลี่ย ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงกระทำหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของเสา



รูปที่ 2.9 คอนกรีตที่ถูกโอบรัดในเสาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม (Lam และ Teng, 2003)

2.4.3 แบบจำลองของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยปลอกหน้าตัดสี่เหลี่ยม

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดในเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม ซึ่งทำให้ได้แบบจำลองของกำลังรับแรงกดอัดและความเครียดสูงสุดในแนวแกนต่างๆจากการทบทวนงานที่เกี่ยวข้องพบว่า ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอแบบจำลองของกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตที่สำคัญ 4 แบบจำลอง โดย Restrepo และ De Vito ในปี 1996, Mirmiran et al. ในปี 1998, ACI Committee 440 ในปี 2002 และ Campione และ Miraglia ในปี 2003 (Lam และ Teng, 2003) ในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะแบบจำลองของ ACI Committee 440 เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าเป็นแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับจากองค์กรที่มีชื่อเสียงทางด้านคอนกรีตมากที่สุดแห่งหนึ่งและได้มีการนำไปใช้งานแล้วอย่างกว้างขวาง

สำหรับเสาคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม ACI Committee 440 ได้เสนอให้ทำการเปลี่ยนหน้าตัดเสาจากหน้าตัดสี่เหลี่ยมให้เป็นหน้าตัดทรงกลมที่สมมูลกัน โดยใช้อัตราส่วนรูปร่าง (shape factor, k_s) สำหรับการพิจารณาผลของการโอบรัดที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากหน้าตัดสี่เหลี่ยม ซึ่ง shape factor ได้ถูกนิยามให้เป็นอัตราส่วนของพื้นที่การโอบรัดประสิทธิผล (effective confinement area) ต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีต โดยสมมติให้พื้นที่การโอบรัดประสิทธิผล เป็นพื้นที่ของคอนกรีตที่อยู่ภายในกรอบพาราโบลา 4 ด้านที่ติดกับขอบของหน้าตัดเสาที่มุม 45° ดังที่แสดงในรูปที่ 2.9 โดยที่สมการของ shape factor (k_s) จะเขียนได้ในรูป

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

เมื่อ A_e คือ พื้นที่การโอบรัดประสิทธิผลของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีต

A_g คือ พื้นที่หน้าตัดของเสาคอนกรีต มีค่าเท่ากับ $bh - (4 - \pi)R_c^2$

ρ_{sc} คือ ปริมาณเหล็กเสริม (cross-sectional area ratio) ของเหล็กเสริมในแนวแกน

ในสมการที่ 2.7 ปริมาณเหล็กเสริมของเหล็กเสริมในแนวแกน (ρ_{sc}) ของเสาที่อยู่นอกพื้นที่รับความดันโอบรัดจะถูกหักลบออกจากพื้นที่หน้าตัดของเสาคอนกรีตเป็นสองเท่า

ในแบบจำลองนี้ เสาหน้าตัดทรงกลมที่สมมูลจะถูกนิยามเป็นเสาที่มีอัตราปริมาตร (volumetric ratio) ของเหล็กที่เท่ากับเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมเดิม ดังนั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาหน้าตัดทรงกลมที่สมมูลหาได้จากสมการ

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

- เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเสาหน้าตัดทรงกลม
 b คือ ความกว้างของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม
 h คือ ความลึกของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม

จากสมการที่ 2.8 ค่าความดันโอบรัดของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะถูกหาโดยการแทนค่าเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเสาหน้าตัดทรงกลมที่สมมูลลงในสมการที่ 2.5 นอกจากนี้ Mirmiran et al. (1998), ACI Committee 440 (2002), และ Campione และ Miraglia (2003) ได้เสนอให้ปรับแก้ค่าความดันโอบรัดของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมอีกครั้ง โดยใช้ค่า shape factor (k_s) เพื่อปรับความดันโอบรัดของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยเรียกความดันโอบรัดที่ผ่านการปรับแก้ว่า ความดันโอบรัดประสิทธิผล (effective confining pressure) ของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

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

- เมื่อ f'_1 คือ ความดันโอบรัดประสิทธิผลของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม
 k_s คือ อัตราส่วนรูปร่าง (shape factor) จากสมการที่ 2.7
 f_1 คือ ความดันโอบรัด จากสมการที่ 2.5

แบบจำลองของ ACI Committee 440 มีพื้นฐานมาจากแบบจำลองที่ถูกเสนอโดย Mander et al. (1988) ซึ่งเป็นบุคคลแรกที่ได้พัฒนาวิธี unified stress-strain approach สำหรับทำนายกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยปลอกเหล็ก โดยสมการดังกล่าวสามารถใช้ได้ทั้งคอนกรีตที่มีหน้าตัดทรงกลมและคอนกรีตที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยม ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางที่สุดแบบจำลองหนึ่ง โดย Mander ได้แนะนำสมการดังกล่าวอยู่ในรูปสมการแบบไร้เชิงเส้นตรง (nonlinear) โดยเขียนได้ในรูป

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

- เมื่อ f'_{cc} คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแกนของคอนกรีต เมื่อมีแรงดันด้านข้าง
 f'_{co} คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแกนของคอนกรีต เมื่อไม่มีแรงดันด้านข้าง
 นอกจากนั้นแล้ว ACI Committee 440 ยังได้แนะนำให้สมการที่ใช้ในการทำนายค่าสูงสุดของความเครียดในแนวแกนสูงสุดของคอนกรีตเนื่องจากการโอบรัด ϵ_{cu} อยู่ในรูป

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

เมื่อ E_c คือ modulus of elasticity ของคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัด

2.5 ข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับ Tubed concrete column และ Tubed RC column

Tubed concrete column และ Tubed RC column เป็นเสาเชิงประกอบ (composite column) ที่อยู่ในรูปแบบเสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled steel tube column) ในการออกแบบเสาดังกล่าวมีมาตรฐานการออกแบบที่เกี่ยวข้องที่ใช้สำหรับประเทศไทยโดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) คือ มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง (มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38) ซึ่งได้กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 4314 องค์อาคารเชิงประกอบรับแรงกดอัด โดยมีรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาดังนี้

(ก) องค์อาคารเชิงประกอบรับแรงกดอัดให้รวมถึงองค์อาคารเสริมเหล็กตามยาวด้วยเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ ปลอกกลมหรือท่อเหลี่ยม ซึ่งอาจมีเหล็กเส้นตามยาวหรือ ไม่มีก็ได้

(ข) กำลังขององค์อาคารเชิงประกอบให้คำนวณหาโดยใช้เงื่อนไขเช่นเดียวกับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป

(ค) กำลังในการรับแรงตามแนวแกนใดๆ ที่กำหนดให้รับ โดยคอนกรีตขององค์อาคารเชิงประกอบต้องถ่ายผ่านเข้าไปในคอนกรีตโดยองค์อาคารหรือเป็นหูช้างในลักษณะแบกทานโดยตรงลงบนคอนกรีตขององค์อาคารเชิงประกอบนั้น

(ง) กำลังรับแรงตามแนวแกนทั้งหมดที่ไม่ได้กำหนดให้รับ โดยคอนกรีตขององค์อาคารเชิงประกอบต้องถ่ายผ่านโดยตรงด้วยจุดต่อไปยังเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ ท่อกลมหรือท่อเหลี่ยม

(ฉ) เหล็กโครงสร้างหุ้มแกนคอนกรีต

1. ความหนาของเหล็กซึ่งหุ้มแกนคอนกรีตขององค์อาคารเชิงประกอบต้องไม่น้อยกว่า

$$B \sqrt{\frac{f_y}{3E_s}} \quad \text{สำหรับแต่ละด้านซึ่งความกว้างเท่ากับ } B \quad (2.12)$$

$$\text{หรือ } \frac{B}{t} \leq \sqrt{\frac{3E_s}{f_y}}$$

และต้องไม่น้อยกว่า

$$D \sqrt{\frac{f_y}{8E_s}} \quad \text{สำหรับหน้าตัดกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ } D \quad (2.13)$$

$$\text{หรือ } \frac{D}{t} \leq \sqrt{\frac{8E_s}{f_y}}$$

เมื่อ E_s คือค่า modulus of elasticity ของเหล็กและ f_y คือ yielding stress ของเหล็ก

2. เหล็กเส้นตามยาวที่อยู่ภายในแกนคอนกรีตที่ถูกหุ้มอาจนำมาพิจารณาในการคำนวณค่าเนื้อที่ของเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ (A_s) ท่อกลมหรือท่อเหลี่ยมในหน้าตัดเชิงประกอบและโมเมนต์อินเนอร์เซียของเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ ท่อกลมหรือท่อเหลี่ยม รอบแกนศูนย์กลางของหน้าตัดองค์อาคารเชิงประกอบ (I_s)

นอกจากนั้นแล้ว จากการทบทวนเอกสารในการออกแบบที่สำคัญอีกเอกสารหนึ่งคือ Manual of Steel Construction: Load and Resistant Factor Design (LRFD) ของ American Institute of Steel and Construction (AISC) พบว่า AISC LRFD ปี 1994 ได้กำหนดให้เสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled steel tube) ต้องมีอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของปลอกเหล็กต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสาเชิงประกอบหรือ $\rho_{sc} = A_s / A_g$ มีค่าได้ไม่น้อยกว่า 4% (AISC LRFD, 1994) และอัตราส่วน B/t สำหรับปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะต้องเป็นไปตามสมการ

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

ซึ่งสมการที่ 2.14 นี้จะให้ค่า B/t ค่าสุดที่กำหนดให้ใช้ในเสาเชิงประกอบต่ำกว่าค่าที่กำหนดโดยข้อกำหนดของ ว.ส.ท. $\sqrt{3/2} = 1.225$ เท่า ดังนั้น ถ้ากำหนดให้เสา CFT หน้าตัดสี่เหลี่ยมมีความกว้างของหน้าตัด B เท่ากันแล้ว ข้อกำหนด AISC LRFD จะให้ความหนาของปลอกเหล็กมากกว่าข้อกำหนดของ ว.ส.ท.

ในส่วนของการคำนวณกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาเชิงประกอบ AISC LRFD 1994 กำหนดให้คำนวณหาโดยใช้เงื่อนไขเช่นเดียวกับองค์อาคารเหล็กโครงสร้างทั่วไป ยกเว้น ค่ากำลังและความแกร่งของวัสดุจะถูกแปลงเพื่อพิจารณาผลของ composite action ระหว่างคอนกรีตและปลอกเหล็ก โดย AISC LRFD ได้กำหนดให้สมการในการคำนวณกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาเชิงประกอบจากหน่วยแรงวิกฤติ (critical stress) F_{cr} ซึ่งอยู่ในรูป

$$P_{cr} = A_s F_{cr} \quad (2.15)$$

เมื่อ A_s คือพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของปลอกเหล็กและ F_{cr} หาได้จากสมการ

$$F_{cr} = (0.658^{\lambda_c^2}) F_{my} \quad \text{สำหรับ } \lambda_c \leq 1.5 \quad (2.16)$$

$$F_{cr} = (0.877 / \lambda_c^2) F_{my} \quad \text{สำหรับ } \lambda_c > 1.5 \quad (2.17)$$

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

F_E คือ Euler buckling stress ของเสา

r_m คือ radius of gyration ของปลอกเหล็ก

KL คือ ความยาวประสิทธิผลของเสา

$$E_m = E_s + 0.40 E_c \frac{A_c}{A_s} \quad \text{คือ modified elastic modulus ของเสา}$$

$$F_{my} = f_y + 0.85 f'_{co} \frac{A_c}{A_s} \quad \text{คือ modified yield strength ของเสา}$$

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

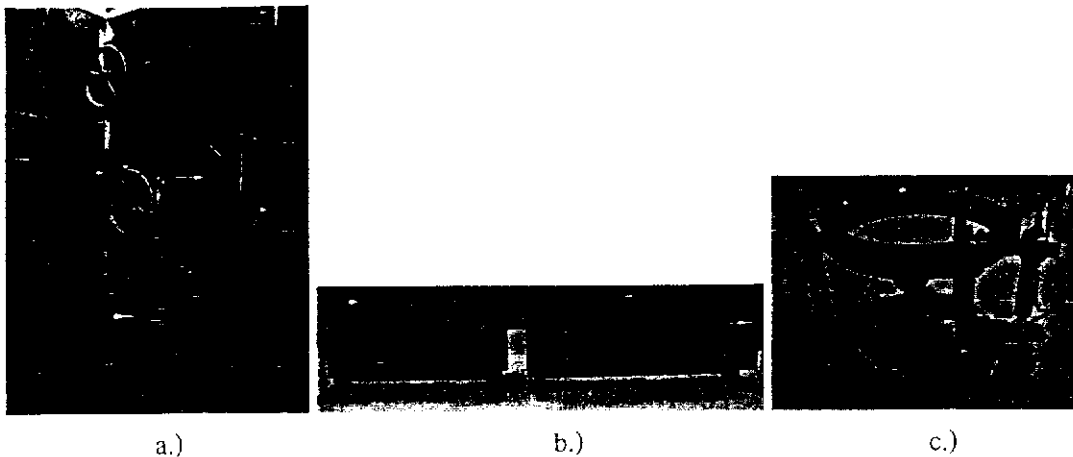
บทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกได้แก่ การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ซึ่งได้แก่ คอนกรีต เหล็กที่ตัดจากบล็อกเหล็กและบล็อก stainless steel และเหล็กเสริมคอนกรีต เพื่อนำค่าคุณสมบัติที่ได้ไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบตัวอย่างทดสอบให้สอดคล้องกับเครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบที่มีอยู่ ส่วนที่สองเป็นการทดสอบตัวอย่างทดสอบเสาคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยบล็อกเหล็กหรือ Tubed concrete column และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยบล็อกเหล็กหรือ Tubed RC column ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน เพื่อหาคุณสมบัติทางกล พฤติกรรมการรับแรง และลักษณะการวิบัติของเสา เพื่อเป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบกำลังของเสาที่ได้กับค่ากำลังที่คำนวณได้ โดยใช้สมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

3.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

3.1.1 การทดสอบแรงกดอัดของคอนกรีต

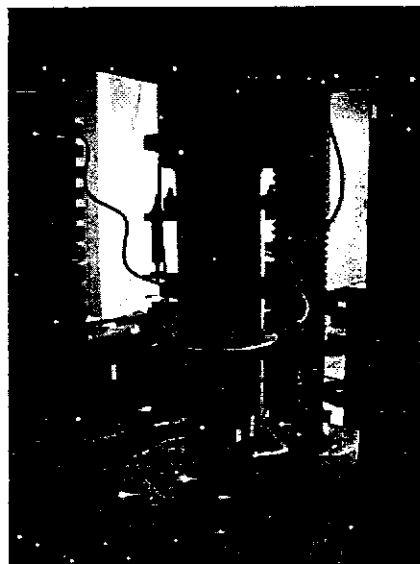
การทดสอบกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ หน่วยแรงสูงสุด (ultimate stress) โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) และรูปแบบการวิบัติ โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39-96 และ ASTM C469-94 โดยใช้เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Shimadzu ขนาด 2000 kN ดังแสดงในรูปที่ 3.1a Data Logger ยี่ห้อ Yokokawa รุ่น DS600 และ Data Acquisition (DAQ) ยี่ห้อ Yokokawa รุ่น DA100 ดังแสดงในรูปที่ 3.1b และ Linear Variable Differential Transducers (LVDT) และอุปกรณ์จับแท่งคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3.1c

คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาเป็นคอนกรีตผสมเสร็จของบริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด (CPAC) ที่มีกำลังรับแรงกดอัด 3 ค่าคือ 18 MPa, 25 MPa, และ 32 MPa เพื่อให้ครอบคลุมคอนกรีตที่มักใช้ในการก่อสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มักใช้ในอาคารขนาดเล็กและกลางในประเทศไทย โดยตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 m สูง 0.30 m และได้รับการบ่มในน้ำจนกระทั่งมีอายุ 28 วันก่อนการทดสอบ รูปที่ 3.2 แสดงการติดตั้งตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทดสอบ



รูปที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคอนกรีต a.) Universal Testing Machine

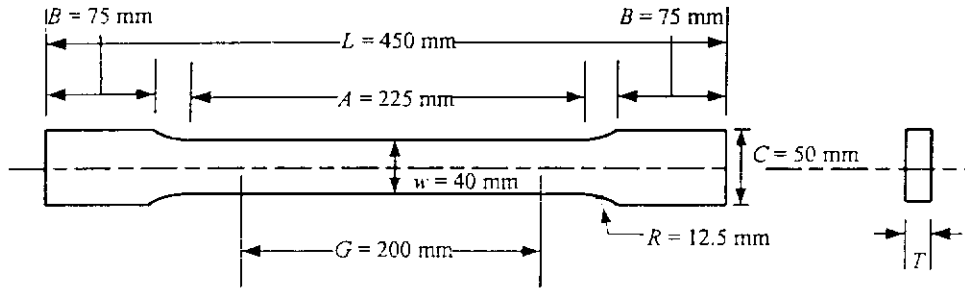
b.) Data Logger และ Data Acquisition และ c.) LVDT และอุปกรณ์จับตำแหน่งคอนกรีต



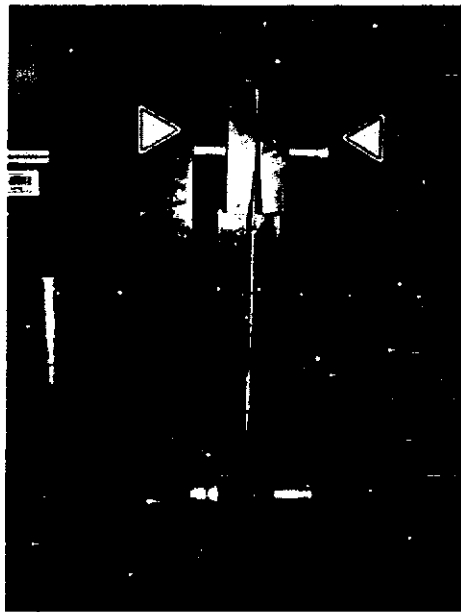
รูปที่ 3.2 การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงกดอัด

3.1.2 การทดสอบแรงดึงของเหล็ก

การทดสอบคุณสมบัติของเหล็กที่ตัดจากปลอกเหล็กภายใต้แรงดึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติทางกลของเหล็กที่ใช้ในการศึกษา โดยคุณสมบัติทางกลที่สนใจได้แก่ หน่วยแรงคราก (yielding stress) หน่วยแรงดึงสูงสุด โมดูลัสยืดหยุ่น และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8-98 ตัวอย่างทดสอบถูกตัดออกมาจากปลอกเหล็กมีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กรูปกระดูก โดยมีรายละเอียดดังที่แสดงในรูปที่ 3.3 และใช้เครื่องทดสอบ UTM ยี่ห้อ Instron ขนาด 1000 kN ในการทดสอบ รูปที่ 3.4 แสดงการติดตั้งตัวอย่างปลอกเหล็กรูปกระดูกในการทดสอบแรงดึง โดยการยึดตัวของแผ่นเหล็กจะถูกวัดโดยใช้ extensometer



รูปที่ 3.3 รายละเอียดแผ่นเหล็กตัวอย่างทดสอบรูปกระดูก



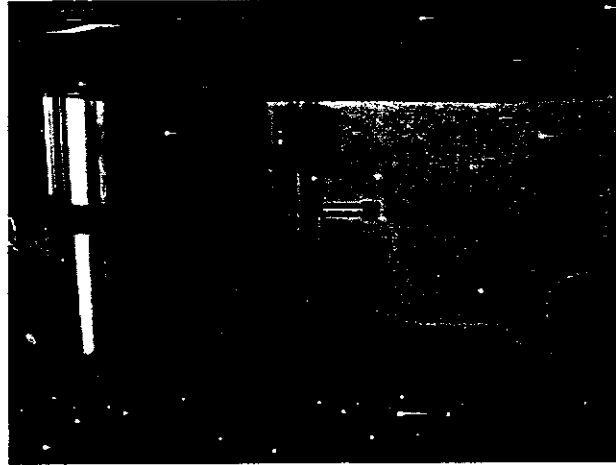
รูปที่ 3.4 การติดตั้งแผ่นเหล็กตัวอย่างทดสอบเพื่อทำการทดสอบแรงดึง

3.1.3 การทดสอบแรงดึงของ stainless steel

เช่นเดียวกับในกรณีของเหล็ก การทดสอบคุณสมบัติของ stainless steel ที่ตัดจากปลอก stainless steel ภายใต้แรงดึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติทางกลของ stainless steel ที่ใช้ในการศึกษา คุณสมบัติทางกลที่สนใจได้แก่ หน่วยแรงคราก หน่วยแรงดึงสูงสุด โมดูลัสยืดหยุ่น และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM A370-03 ตัวอย่างทดสอบถูกตัดออกมาจากปลอกเหล็กในรูปกระดูก โดยมีรายละเอียดดังที่แสดงในรูปที่ 3.3 และใช้เครื่องทดสอบ UTM ยี่ห้อ Instron ขนาด 1000 kN ในการทดสอบ รูปที่ 3.5 แสดงการติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gauge) จำนวน 2 ตัว ในแนวแกนและแนวขวางแกน และรูปที่ 3.9 แสดงการติดตั้งตัวอย่าง stainless steel รูปกระดูก เพื่อทำการทดสอบแรงดึง โดยการยึดตัวของตัวอย่างทดสอบจะถูกวัดโดยใช้ extensometer



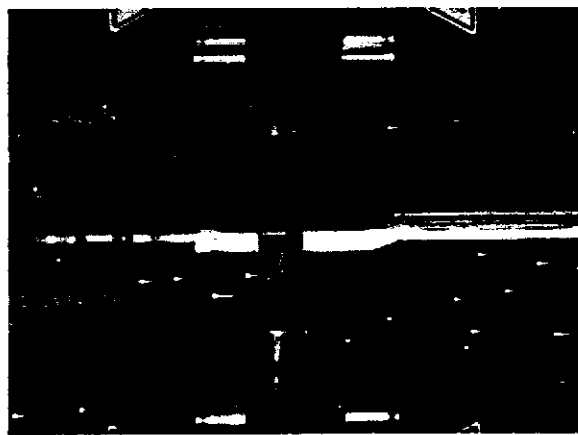
รูปที่ 3.5 การวัดความหยาบผิวของแผ่นตัวอย่าง stainless steel



รูปที่ 3.6 การติดตั้งแผ่นตัวอย่างทดสอบ stainless steel เพื่อทำการทดสอบแรงดึง

3.1.4 การทดสอบแรงดึงของเหล็กเสริมคอนกรีต

จุดประสงค์การทดสอบนี้คือ เพื่อศึกษาพฤติกรรมและคุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต โดยคุณสมบัติทางกลที่สนใจคือ หน่วยแรงคราก หน่วยแรงดึงสูงสุด โมดูลัสยืดหยุ่น และเปอร์เซ็นต์การยืดตัว การทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM E8 โดยใช้เครื่องทดสอบ UTM ยี่ห้อ Instron ซึ่งมีกำลังทดสอบสูงสุด 1,000 kN รูปที่ 3.7 แสดงการติดตั้งเหล็กตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบ โดยการยึดตัวของเหล็กเส้นจะถูกวัดโดยใช้ extensometer



รูปที่ 3.7 การติดตั้งตัวอย่างเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตเข้ากับเครื่องทดสอบ UTM

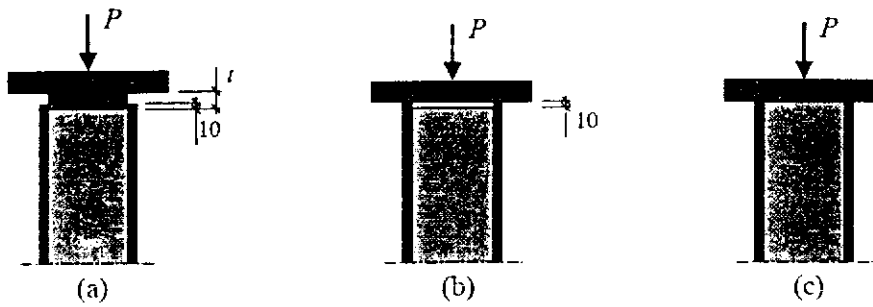
3.2 การทดสอบตัวอย่างเสา Tubed concret column และ Tubed RC column ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับอาคารขนาดเล็ก เช่น บ้าน ทาวเฮาส์ และอาคารพาณิชย์ เป็นต้น ซึ่งเป็นอาคารที่มีจำนวนมากที่สุดในประเทศไทย โดยเป็นเสาสั้นที่ถูกออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท. 1008-38 และมีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมด้านเท่า ถูกห่อหุ้มโดยใช้ปลอกเหล็กและปลอก stainless steel (ปลอก stainless steel เป็นการศึกษเพิ่มเติมจากวัตถุประสงค์หลักของโครงการวิจัย เนื่องจาก stainless steel มีความต้านทานต่อสภาวะแวดล้อมที่ดีกว่าเหล็กโครงสร้างและจะทำให้ได้ข้อมูลของผลของหน่วยแรงครากของวัสดุต่อพฤติกรรมของเสา)

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมการรับแรงกดอัดของเสาคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มโดยปลอกเหล็กคือ ลักษณะการให้แรงกดอัดกระทำต่อเสา ซึ่งในที่นี้จะสนใจเฉพาะแรงกดอัดในแนวแกนแบบตรงศูนย์ จากการศึกษาเสา CFT ที่ใช้ปลอกเหล็กหน้าตัดทรงกลมกรอกคอนกรีตโดยให้แรงกดอัดในแนวแกนโดย Johansson ในปี 2000 โดยการทดสอบกระทำต่อเสา CFT 3 ลักษณะ ดังที่แสดงในรูปที่ 3.8 พบว่า พฤติกรรมและกำลังการรับแรงกดอัดของเสาในรูปที่ 3.8a มีลักษณะใกล้เคียงกับเสาในรูปที่ 3.8c มาก แต่จะแตกต่างจากเสาในรูปที่ 3.8b ซึ่งมีลักษณะการรับแรงกดอัดเหมือนปลอกเหล็กซึ่งไม่ได้กรอกคอนกรีตและกำลังการรับแรงกดอัดของเสาดังกล่าวมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับเสาในรูปที่ 3.8a และ 3.8c นอกจากนั้นแล้ว มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 ข้อที่ 4314 กำหนดให้ “กำลังในการรับแรงตามแนวแกนใดๆ ที่กำหนดให้รับโดยคอนกรีตขององค์อาคารเชิงประกอบต้องผ่านเข้าไปในคอนกรีต โดยองค์อาคารหรือเป็นหูช้างในลักษณะแยกทานโดยตรงลงบนคอนกรีตขององค์อาคารเชิงประกอบนั้น” ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงกำหนดให้แรงกดอัดในแนวแกนกระทำต่อเสาในลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 3.8a โดยแรงกดอัดจะกระทำต่อแกนคอนกรีตของเสาโดยตรงและจะเรียกเสาในลักษณะนี้ว่า Tubed column ตามที่ได้ถูกนำเสนอโดย Tomii ในปี 1985 (Tomii, M. et.al., 1985) โดยเสาคอนกรีตที่ถูกเสริมกำลังโดยใช้ปลอกเหล็กจะถูกเรียกว่า “Tubed concrete column” และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังโดยใช้ปลอกเหล็กจะถูกเรียกว่า “Tubed RC column”

จุดประสงค์การทดสอบ

เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดและลักษณะการวิบัติของ Tubed concrete column และ Tubed RC column ที่ถูกห่อหุ้มและเสริมกำลังด้วยปลอกเหล็กและปลอก stainless steel และผลของการรักรอบของปลอกเหล็กที่มีต่อกำลังและความเหนียวของเสาคอนกรีตภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน



รูปที่ 3.8 ลักษณะการให้แรงกดอัดกระทำต่อเสา a.) แรงกดอัดกระทำต่อคอนกรีตโดยตรง
b.) แรงกดอัดกระทำต่อปลอกเหล็กโดยตรง และ c.) แรงกดอัดกระทำต่อคอนกรีต
และปลอกเหล็กพร้อมกัน

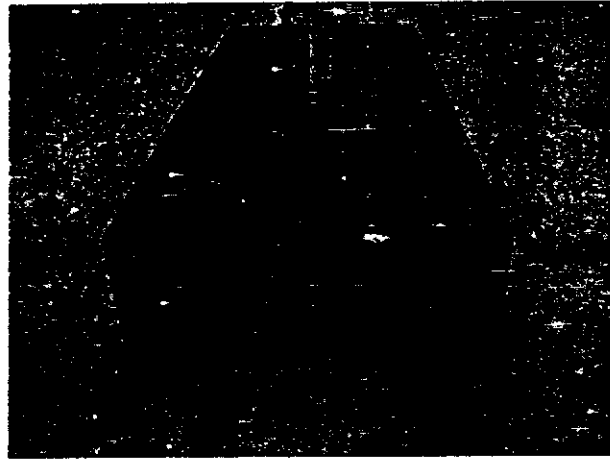
เครื่องมือทดสอบ

เครื่องมือทดสอบที่ใช้ในการศึกษานี้ได้แก่ เครื่องทดสอบ UTM ยี่ห้อ Shimadzu ขนาด 2000 kN ดังแสดงในรูปที่ 3.1a Data Logger ยี่ห้อ Yokokawa รุ่น DS600 และ Data Acquisition (DAQ) ยี่ห้อ Yokokawa รุ่น DA100 ดังแสดงในรูปที่ 3.1b Linear Variable Differential Transducers (LVDT) ขนาดระยะชัก 100 mm และ Bearing plate ขนาด $150 \times 150 \times 50$ mm

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษานี้ได้เตรียมขึ้นที่ห้องปฏิบัติการบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) ตัดปลอกเหล็กและปลอก stainless steel ขนาด $150 \times 150 \times 4.5$ mm ให้มีความยาว 750 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และในกรณีของ Tubed RC column ทำการผูกเหล็กเสาตามที่ได้กำหนดไว้
- 2) นำปลอกเหล็กที่ใช้เป็นแบบของเสามาตั้งบนพื้นเรียบและทำการจัดตั้งของเสา จากนั้นเทคอนกรีตผสมเสร็จลงในปลอกเหล็กและปลอก stainless steel ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 3.10
- 3) เมื่อคอนกรีตมีอายุครบ 24 ชั่วโมงแล้ว ทำการบ่มเสาคอนกรีต โดยใช้กระสอบชุบน้ำคลุมเป็นเวลา 28 วัน
- 4) ภายหลังจากการบ่มตัวอย่างทดสอบครบตามระยะเวลาที่กำหนด ก่อนการทดสอบ 1 วัน ทำการติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gauge) จำนวน 2 ตัว ลงบนพื้นผิวของปลอกเหล็กและปลอก stainless steel ตรงบริเวณกึ่งกลางความยาวของตัวอย่างทดสอบ ในแนวแกนและในแนวขวาง เพื่อตรวจสอบความเครียดในแนวแกนและความเครียดในแนวขวางของปลอกเหล็กและปลอก stainless steel ภายใต้อิทธิพลของแรงกระทำในแนวแกน



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างปลอกเหล็กที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างเสาคอนกรีตที่ถูกหล่อโดยใช้ปลอกเหล็กและปลอก stainless steel เป็นแบบหล่อ

ตัวอย่างทดสอบ

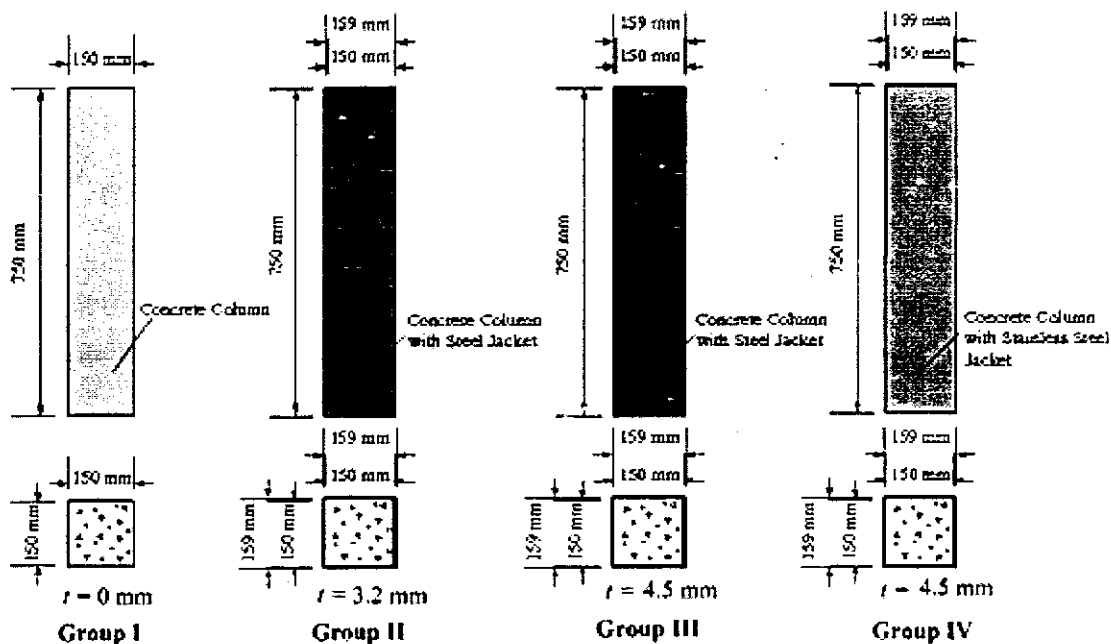
ตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้ถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยคือ Tubed concrete column และ Tubed RC column โดยปลอกเหล็กที่ใช้เป็นท่อเหล็กรูปพรรณและท่อ stainless steel ที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่า ปลอกเหล็กได้มาจากการพับ (cold-formed) แผ่นเหล็ก steel carbon ให้มีหน้าตัดเป็นรูปตัวซีและถูกเชื่อมไฟฟ้าตามรอยต่อในแนวแกนโดยใช้ machine welding ส่วนปลอก stainless steel ได้มาจากการพับ stainless steel ชนิด 304 หรือ stainless steel 18-8 (โครเมียม 18% และนิกเกิล 8%) ตามระเบียบการเรียกชื่อของ American Iron and Steel Institute (AISI) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุด ให้มีหน้าตัดเป็นรูปตัวซีและถูกเชื่อมไฟฟ้าตามรอยต่อในแนวแกน

ขนาดหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบถูกกำหนดโดยใช้สมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กของ ว.ส.ท. 1008-38 (ตามข้อกำหนดของ ว.ส.ท. ข้อที่ 4314(ข)) และสมการแบบจำลองของ ACI committee 440 และเปรียบเทียบกำลังของเสาที่ได้กับความสามารถของเครื่องมือทดสอบที่มีใน

ห้องปฏิบัติการ ซึ่งพบว่าเสาตัวอย่างทดสอบควรมีขนาดหน้าตัด 150×150 mm และสูง 750 mm โดยปลอกเหล็กของเสาตัวอย่างมีความหนา 3.2 mm และ 4.5 mm เพื่อให้เสาดังกล่าวมีค่า B/t ที่ไม่ผ่านและผ่านข้อกำหนดความหนาของ ว.ส.ท. ข้อที่ 4314(จ) ตามลำดับ และมี $L/B = 5.0$ ซึ่งอยู่ในช่วงที่ใช้ งานของเสา CFT ของอาคารเค็ยและอาคารสูงปานกลางในสหรัฐอเมริกา (Schneider, 1998) และมี ปริมาณของเหล็กปลอกในแนวแกน $\rho_{sc} > 4\%$ ตามที่กำหนดในมาตรฐานการออกแบบ AISC LRFD (AISC, 1994) นอกจากนั้นแล้ว เสาตัวอย่างยังมีรายละเอียดต่างๆ เพิ่มเติมอีกดังนี้

1. ตัวอย่างทดสอบ Tubed concrete column

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดตัวอย่างทดสอบ Tubed concrete column และคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่เกี่ยวข้อง โดยมีจำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น 33 ตัวอย่าง และถูกแบ่งย่อยออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 เป็นเสาคอนกรีตอ้างอิงและเสากลุ่มที่ 2 ถึง 4 เป็นเสา Tubed concrete column ชื่อเสาตัวอย่างในตารางที่ 3.1 ถูกกำหนดในรูป X-Y-Z ซึ่ง X หมายถึง ประเภทของเสา โดยที่ C แทนเสาคอนกรีตอ้างอิง S แทน Tubed concrete column ที่ใช้ปลอกเหล็ก และ SL แทน Tubed concrete column ที่ใช้ปลอก stainless steel Y หมายถึงค่ากำลังรับแรงกอัดสูงสุด f'_{co} ของคอนกรีต และ Z หมายถึง ความหนาของปลอกเหล็ก รูปที่ 3.11 แสดงรูปหน้าตัด รูปข้าง และรายละเอียดของเสาตัวอย่าง



รูปที่ 3.11 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ Tubed concrete column

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดตัวอย่งทดสอบ Tubed concrete column และคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่เกี่ยวข้อง

กลุ่ม ที่	ตัวอย่าง	จำนวน	B/t ratio	L/B ratio	$\rho_{sc} = A_s / A_k$ (%)	คุณสมบัติของคอนกรีต			คุณสมบัติของเหล็ก		
						A_c (mm ²)	f'_c (MPa)	E_c (GPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	E_s (GPa)
1	C-18-0	3	-	-	-	22500	18.7	20.7	-	-	-
	C-25-0	3	-	-	-	22500	26.3	24.2	-	-	-
	C-32-0	3	-	-	-	22500	31.9	28.0	-	-	-
2	S-18-3.2	3	46.9	5.0	8.2	20632	18.7	20.7	1833	312.1	205.1
	S-25-3.2	3	46.9	5.0	8.2	20632	26.3	24.2	1833	312.1	205.1
	S-32-3.2	3	46.9	5.0	8.2	20632	31.9	28.0	1833	312.1	205.1
3	S-18-4.5	3	33.3	5.0	11.4	19863	18.7	20.7	2567	421.6	187.7
	S-25-4.5	3	33.3	5.0	11.4	19863	26.3	24.2	2567	421.6	187.7
	S-32-4.5	3	33.3	5.0	11.4	19863	31.9	28.0	2567	421.6	187.7
4	SL-18-4.5	2	33.3	5.0	11.4	19863	18.7	20.7	2567	264.0	202.9
	SL-25-4.5	2	33.3	5.0	11.4	19863	26.3	24.2	2567	264.0	202.9
	SL-32-4.5	2	33.3	5.0	11.4	19863	31.9	28.0	2567	264.0	202.9

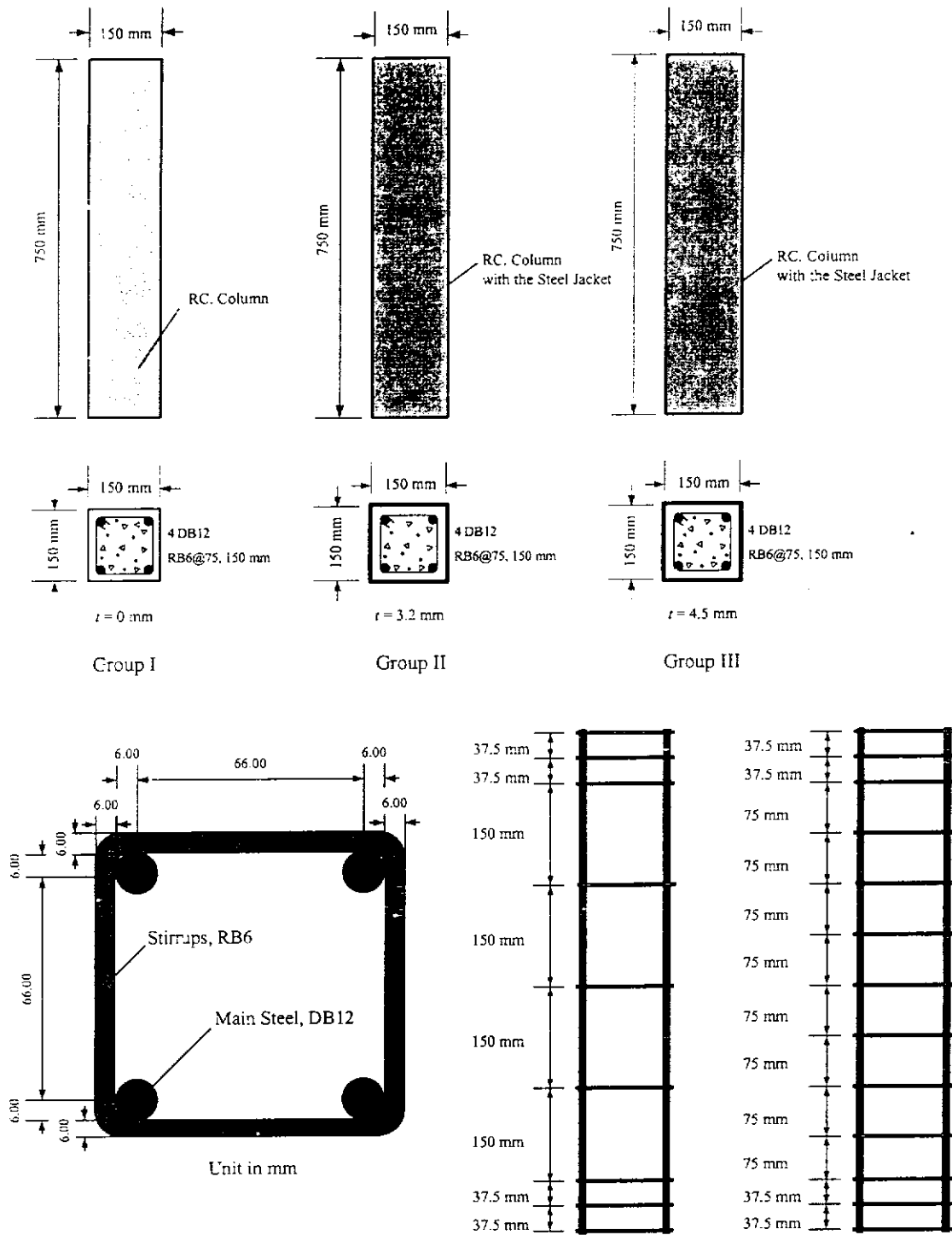
2. ตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column ที่ใช้ในการศึกษาและคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่เกี่ยวข้อง โดย มีจำนวนทั้งสิ้น 36 ตัวอย่าง และถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามความหนาของปลอกเหล็ก โดยกลุ่มที่ 1 เป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง และเสาในกลุ่มที่ 2 และ 3 เป็นเสา Tubed RC column ชื่อเสาตัวอย่างในตารางที่ 3.2 ถูกกำหนดในรูปแบบ W-X-Y-Z ซึ่ง W หมายถึงประเภทของเสา โดยที่ C แทนเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง และ S แทน Tubed RC column X หมายถึงค่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต Y หมายถึง ความหนาของปลอกเหล็ก และสุดท้าย Z หมายถึงระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกของเสา รูปที่ 3.12 แสดงรูปหน้าตัด รูปข้าง และรายละเอียดของเหล็กเสริมของตัวอย่าง Tubed RC column ขอให้ทราบว่า ในการศึกษาในส่วนนี้ได้พิจารณาถึงผลของระยะของเหล็กปลอกต่อกำลังของเสา โดยเหล็กปลอกมีระยะ 75 mm และ 150 mm ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของ ว.ส.ท.

ขั้นตอนการทดสอบ

ขั้นตอนการทดสอบที่ใช้ในการศึกษานี้มีดังนี้

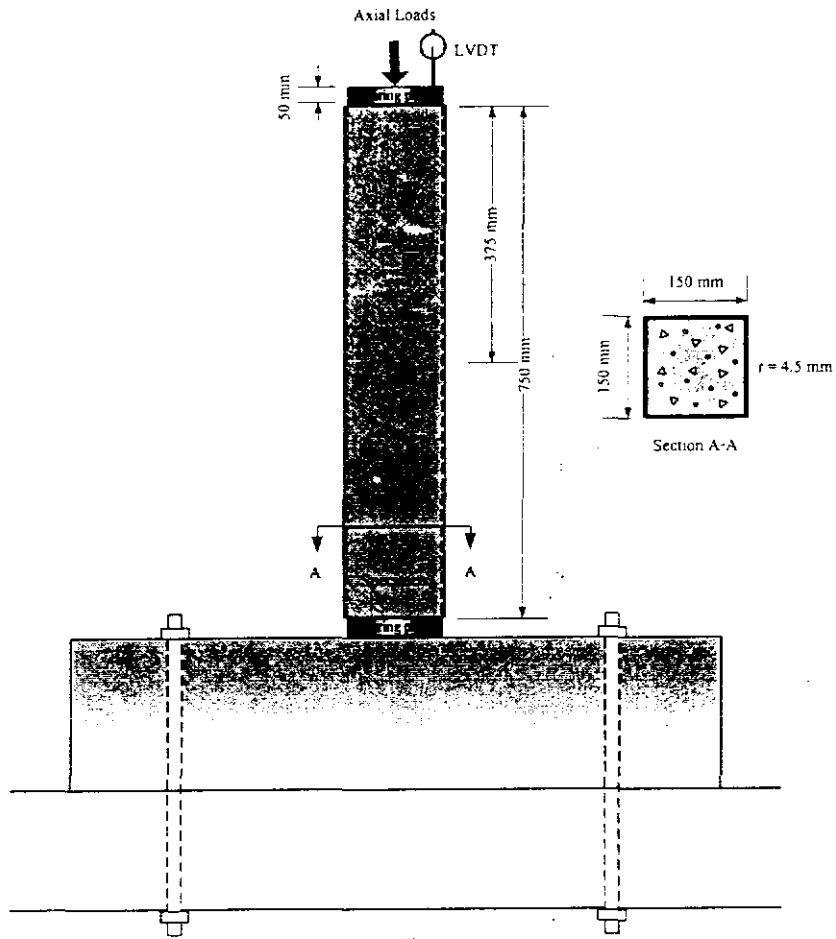
- 1) ปรับฐานรองรับตัวอย่างทดสอบให้เรียบเสมอกันทั้งสองด้าน
- 2) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่อง UTM โดยปลายทั้งสองด้านของตัวอย่างทดสอบถูกรองรับโดยแผ่นรับแรงแบกทาน (bearing plate) หนา 50 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และ 3.14
- 3) ติดตั้ง LVDT ที่ปลายด้านบนบริเวณหัวกด (crosshead) ของเครื่อง UTM เพื่อวัดระยะการหดของเสาในแนวแกน
- 4) ต่อสายนำสัญญาณจาก LVDT และค่าแรงกดอัดจาก UTM เข้า Data Logger แล้วตั้งค่าโปรแกรมเพื่อเก็บข้อมูล
- 5) ทำการ preloading โดยให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบประมาณ 50 kN เพื่อเตรียมตัวอย่างทดสอบและเครื่องมือให้พร้อมทดสอบ
- 6) เชดศูนย์เครื่องมือวัดต่างๆ และทำการบันทึกค่าต่างๆ เมื่อเริ่มต้นการทดสอบตัวอย่างเสา
- 7) เพิ่มแรงกระทำผ่านเครื่อง UTM อย่างช้าๆ ประมาณ 1 mm/min และทำการสังเกตและบันทึกพฤติกรรมของเสาได้แก่ ค่าแรงกดอัดที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและการหดตัวในแนวแกนเริ่มเป็นเส้นโค้ง และค่าแรงกดอัดที่ผนังของปลอกเหล็กเริ่มเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่
- 8) ทำการเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์ ทำการสังเกตและบันทึกลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3.12 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column และรายละเอียดของเหล็กเสริม

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column ที่ใช้ในการศึกษาและคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่เกี่ยวข้อง

กลุ่ม ที่	ตัวอย่าง	จำนวน	B/l ratio	L/B ratio	$\rho_{sc} =$ A_s / A_g (%)	คอนกรีต		ปลอกเหล็ก		เหล็กเสริม DB12		เหล็กปลอก RB6	
						A_c (mm ²)	f'_{co} (MPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	A_s (mm ²)	f_y (MPa)	A_v (mm ²)	f_y (MPa)
1	C-18-0-75	2	-	-	2.0	22047	19.6	-	-	113.1	368.3	28.3	255.3
	C-25-0-75	2	-	-	2.0	22047	26.3	-	-	113.1	368.3	28.3	255.3
	C-32-0-75	2	-	-	2.0	22047	32.6	-	-	113.1	368.3	28.3	255.3
	C-18-0-150	2	-	-	2.0	22047	19.6	-	-	113.1	368.3	28.3	255.3
	C-25-0-150	2	-	-	2.0	22047	26.3	-	-	113.1	368.3	28.3	255.3
	C-32-0-150	2	-	-	2.0	22047	32.6	-	-	113.1	368.3	28.3	255.3
2	S-18-3.2-75	2	46.9	5.0	10.2	20145	19.6	1833	312.1	113.1	368.3	28.3	255.3
	S-25-3.2-75	2	46.9	5.0	10.2	20145	26.3	1833	312.1	113.1	368.3	28.3	255.3
	S-32-3.2-75	2	46.9	5.0	10.2	20145	32.6	1833	312.1	113.1	368.3	28.3	255.3
	S-18-3.2-150	2	46.9	5.0	10.2	20145	19.6	1833	312.1	113.1	368.3	28.3	255.3
	S-25-3.2-150	2	46.9	5.0	10.2	20145	26.3	1833	312.1	113.1	368.3	28.3	255.3
	S-32-3.2-150	2	46.9	5.0	10.2	20145	32.6	1833	312.1	113.1	368.3	28.3	255.3
3	S-18-4.5-75	2	33.3	5.0	13.5	19312	19.6	2567	391.5	113.1	368.3	28.3	255.3
	S-25-4.5-75	2	33.3	5.0	13.5	19312	26.3	2567	391.5	113.1	368.3	28.3	255.3
	S-32-4.5-75	2	33.3	5.0	13.5	19312	32.6	2567	391.5	113.1	368.3	28.3	255.3
	S-18-4.5-150	2	33.3	5.0	13.5	19312	19.6	2567	391.5	113.1	368.3	28.3	255.3
	S-25-4.5-150	2	33.3	5.0	13.5	19312	26.3	2567	391.5	113.1	368.3	28.3	255.3
	S-32-4.5-150	2	33.3	5.0	13.5	19312	32.6	2567	391.5	113.1	368.3	28.3	255.3



รูปที่ 3.13 แผนภาพแสดงการติดตั้งเสาตัวอย่างเพื่อทดสอบแรงกดอัด



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างเสาเพื่อทดสอบแรงกดอัด

บทที่ 4

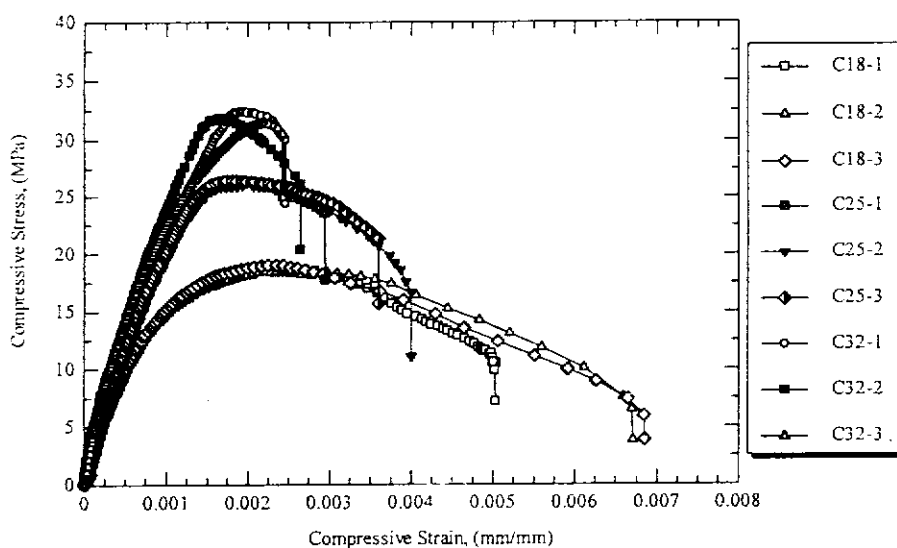
ผลการศึกษา

บทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ทดสอบได้ ซึ่งได้แก่ คอนกรีต เหล็กที่ตัดจากปลอกเหล็กและปลอก stainless steel และเหล็กเสริมคอนกรีต จากนั้น จะนำเสนอผลการทดสอบ Tubed concrete column และ Tubed RC column ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน ซึ่งประกอบด้วยพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกน ลักษณะการวิบัติของเสา กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของเสา และค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้น และการเปรียบเทียบกำลังของเสาที่ทดสอบได้กับสมการกำลังของเสาที่เกี่ยวข้อง และสุดท้าย นำเสนอสมการที่เหมาะสมในการทำนายกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาดังกล่าว

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

4.1.1 ผลการทดสอบแรงกดอัดของคอนกรีต

จากการทดสอบแรงกดอัดแท่งคอนกรีตทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C39-96 และ ASTM C469-94 ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและค่าความเครียดกดอัด ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และได้ค่าหน่วยแรงกดอัดสูงสุด (ultimate compressive stress) และ โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ของคอนกรีต ดังที่แสดงในตารางที่ 4.1 โดยคอนกรีต ซึ่งเป็นคอนกรีตผสมเสร็จของบริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด (CPAC) ที่มีกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดระบุ 18 MPa, 25 MPa, และ 32 MPa มีหน่วยแรงกดอัดสูงสุดเฉลี่ย 18.72, 26.29 และ 31.88 MPa และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ย 20.66, 24.24 และ 28.01 GPa ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและค่าความเครียดของคอนกรีต

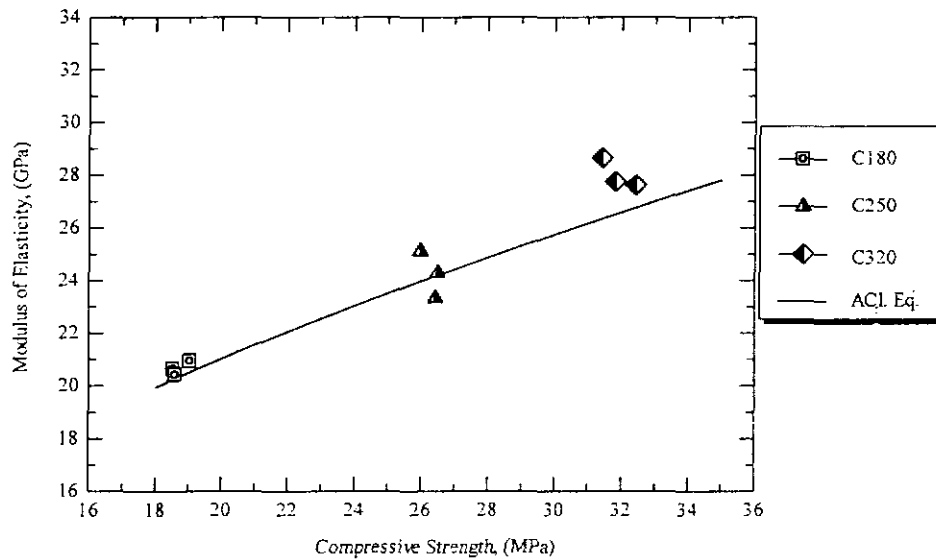
จากรูปที่ 4.1 พบว่า พฤติกรรมการรับแรงกดอัดของคอนกรีตในช่วงเริ่มต้นเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) จนกระทั่งหน่วยแรงกดอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมีค่าประมาณ 40-50% ของหน่วยแรงกดอัดสูงสุด จากนั้น ตัวอย่างทดสอบจะเริ่มเกิดรอยแตกร้าว (microcrack) อย่างต่อเนื่องจนทำให้ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) โดยเส้นกราฟจะมีความชันลดลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งมีค่าความชันเท่ากับศูนย์เมื่อหน่วยแรงกดอัดมีค่าสูงสุด จากนั้น หน่วยแรงกดอัดจะลดลงอย่างต่อเนื่องและส่งผลให้ตัวอย่างทดสอบเกิดการแตกร้าวอย่างเห็นได้ชัด จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบแรงกดอัดของคอนกรีต

ตัวอย่าง	No.	กำลังรับแรงกดอัดสูงสุด, f'_{co} (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่น, E_c (GPa)
C18	1	18.53	20.64
	2	18.59	20.41
	3	19.05	20.93
	เฉลี่ย	18.72	20.66
C25	1	26.49	24.28
	2	25.96	25.12
	3	26.43	23.33
	เฉลี่ย	26.29	24.24
C32	1	32.41	27.62
	2	31.81	27.75
	3	31.42	28.65
	เฉลี่ย	31.88	28.01

เมื่อนำค่าหน่วยแรงกดอัดสูงสุดและ โมดูลัสยืดหยุ่นที่คำนวณได้จากการทดสอบมาทำการเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ดังกล่าวที่คำนวณได้จากสมการหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตของ ACI ($E_c = 0.043w_c^{1.5} \sqrt{f'_{co}}$) พบว่า ความสัมพันธ์ทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ในส่วนของลักษณะการวิบัติพบว่า คอนกรีตเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงกดอัดและแรงเฉือนร่วมกัน โดยรอยแตกร้าวของตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 3 กลุ่มทำมุม 50-60 องศากับแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งสาเหตุมาจากว่าคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ไม่เหมือนกันจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในเนื้อวัสดุ รวมทั้งแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างหัวกดและตัวอย่าง

ทดสอบเนื่องจากการขยายตัวด้านข้าง ซึ่งทั้ง 2 สาเหตุดังกล่าวนี้จะทำให้สถานะของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในวัสดุเปลี่ยนแปลงไป



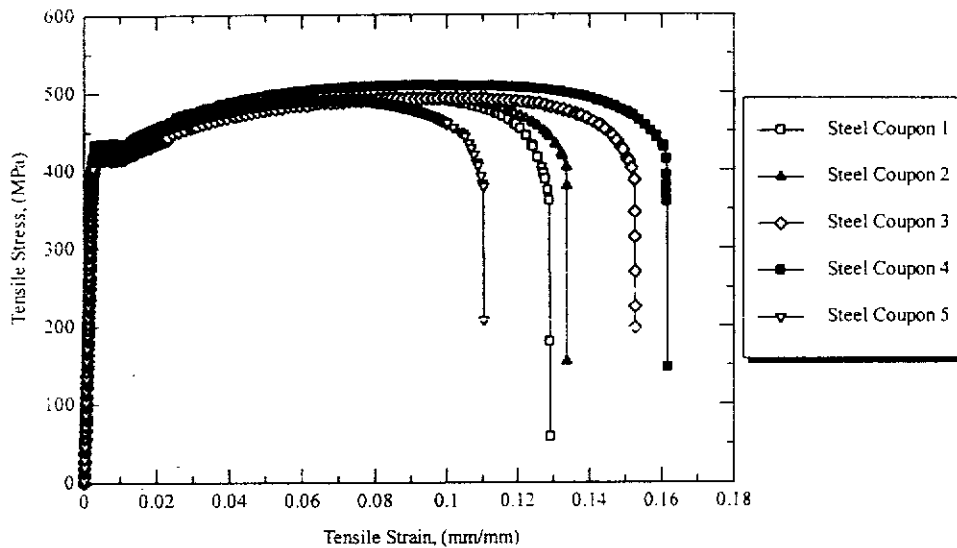
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง โมดูลัสยืดหยุ่นและค่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุด



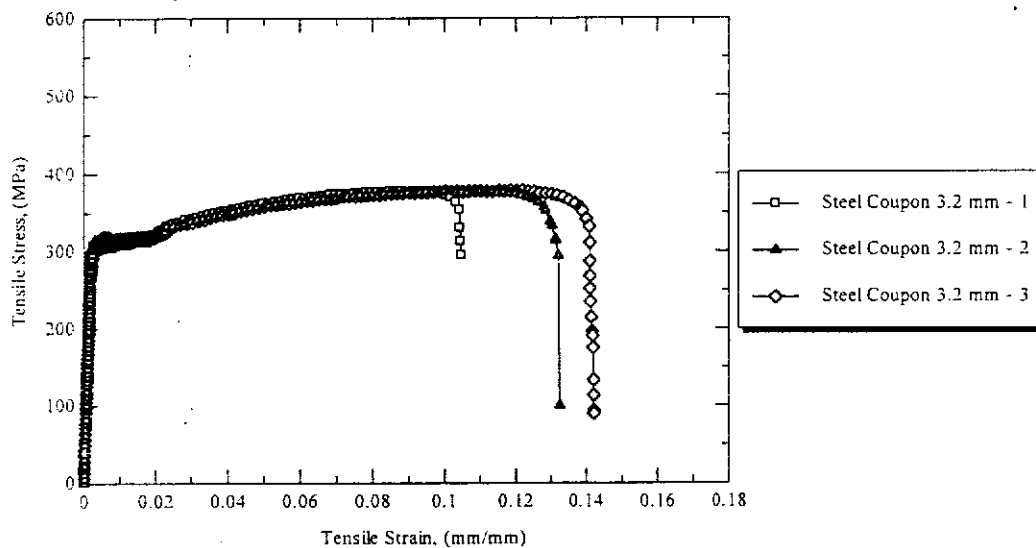
รูปที่ 4.3 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีต

4.1.2 ผลการทดสอบแรงดึงของเหล็ก

จากการทดสอบแรงดึงของเหล็กที่ตัดจากปลอกเหล็กรูปพรรณกลวงตามมาตรฐาน ASTM E8 พบว่า กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึง (tensile stress) และความเครียดดึง (tensile strain) ของตัวอย่างทดสอบหนา 4.5 mm และ 3.2 mm มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.4a และ 4.4b ตามลำดับ โดยมีหน่วยแรงคราก (yielding stress) หน่วยแรงสูงสุด (ultimate stress) โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) และเปอร์เซ็นต์ความยืดตัว (percent elongation) โดยเฉลี่ยของตัวอย่างทดสอบหนา 4.5 mm และ 3.2 mm มีค่าดังที่แสดงในตารางที่ 4.2a และ 4.2b ตามลำดับ



(a) เหล็กหนา 4.5 mm



(b) เหล็กหนา 3.2 mm

รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดของเหล็ก

จากรูปที่ 4.4 พบว่า พฤติกรรมการรับแรงดึงของปลอกเหล็กในช่วงเริ่มต้นเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนกระทั่งหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นถึงจุดคราก ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 421.61 MPa และ 312.10 MPa สำหรับความหนา 4.5 mm และ 3.2 mm ตามลำดับ จากนั้น เหล็กจะมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงคราก ในช่วงนี้ความเครียดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะที่หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่ และหลังจากผ่านช่วงคราก เหล็กสามารถรับแรงดึงได้เพิ่มขึ้นอีกครั้ง ซึ่งสังเกตได้จากกราฟมีค่าความชันเพิ่มขึ้น และจากนั้นค่าความชันของเส้นกราฟจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งความชันของกราฟมีค่าเท่ากับศูนย์ และเป็นจุดที่หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมีค่าสูงสุด (ultimate stress) ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 496.54 MPa และ 377.93 MPa ตามลำดับ จากนั้น ถ้ารับแรงดึงจะค่อยๆ ลดลง ซึ่งเห็นได้จากเส้นกราฟตกลงเรื่อยๆ จนกระทั่งตัวอย่าง

ทดสอบเกิดการวิบัติ และเมื่อสังเกตลักษณะการวิบัติพบว่า ตัวอย่างเหล็กมีพฤติกรรมแบบวัสดุเหนียว เนื่องจากบริเวณกลางช่วงความยาวของตัวอย่างทดสอบเกิดคอคอด (necking) และเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงก่อนเกิดการวิบัติ โดยการวิบัติเป็นรอยฉีกขาดที่ทำมุมเอียงประมาณ 45 องศากับแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 นอกจากนี้ ยังพบว่า เหล็กที่ใช้มีเปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น 14.3 เปอร์เซ็นต์ และ 12.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กที่ตัดจากปลอกเหล็ก

(a) เหล็กหนา 4.5 mm

ตัวอย่างที่	หน่วยแรงคราก (MPa)	หน่วยแรงสูงสุด (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	ความยืดตัว (%)
1	419.95	493.24	171.8	12.3
2	419.53	494.29	185.4	13.6
3	416.11	492.76	173.9	15.8
4	434.21	509.41	187.7	16.3
5	418.41	493.02	219.9	13.6
เฉลี่ย	421.64	496.54	187.7	14.3

(b) เหล็กหนา 3.2 mm

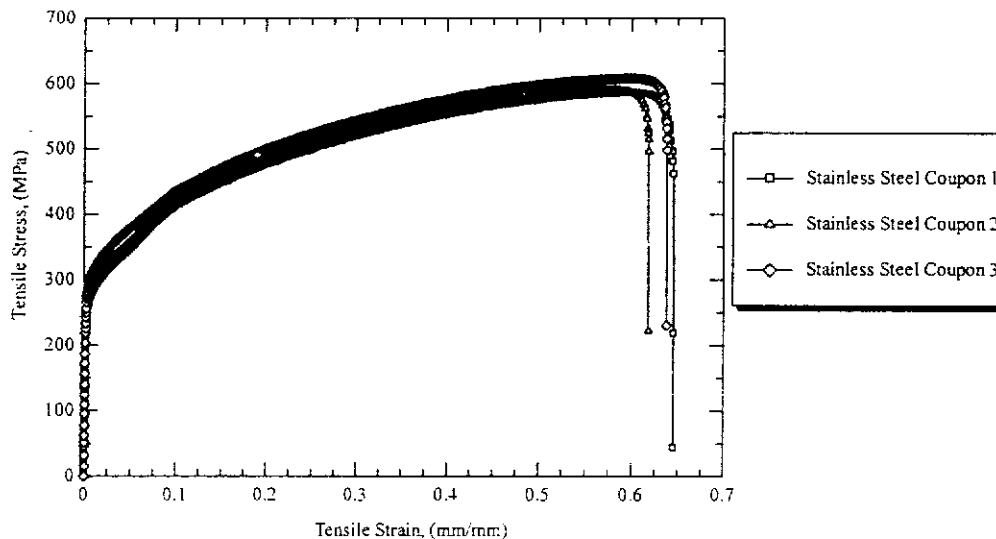
ตัวอย่างที่	หน่วยแรงคราก (MPa)	หน่วยแรงสูงสุด (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	ความยืดตัว (%)
1	318.29	377.58	209.7	10.5
2	312.28	377.65	201.4	13.3
3	305.74	378.55	204.3	14.2
เฉลี่ย	312.10	377.93	205.1	12.7



รูปที่ 4.5 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างแผ่นเหล็ก

4.1.3 ผลการทดสอบแรงดึงของ stainless steel

จากการทดสอบ stainless steel ที่ตัดจากบล็อก stainless steel ภายใต้อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM A370-03 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดดึงมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยมีหน่วยแรงคราก หน่วยแรงดึงสูงสุด โมดูลัสยืดหยุ่น เปอร์เซ็นต์ความยืดตัว และอัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson's ratio) ดังที่แสดงในตารางที่ 4.3



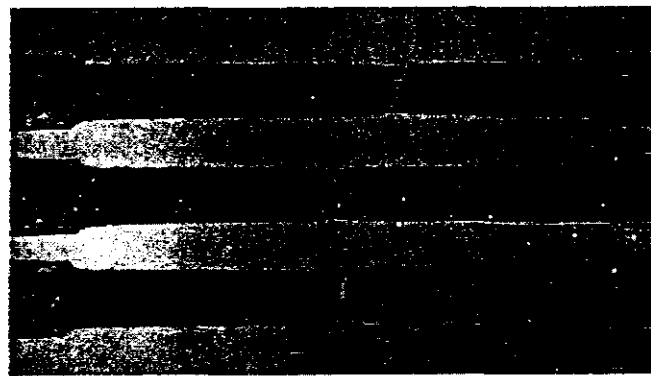
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดของ stainless steel

จากรูปที่ 4.6 พบว่า ในช่วงเริ่มต้นพฤติกรรมการรับแรงดึงของ stainless steel เป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น จากนั้น stainless steel มีพฤติกรรมเป็นแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) ซึ่งสังเกตได้จากเส้นกราฟที่เริ่มโค้ง และมีค่าความชันลดลง จากกราฟพบว่า stainless steel ไม่มีจุดครากที่ชัดเจน โดยใช้วิธี 0.2% offset พบว่า หน่วยแรงครากเฉลี่ยมีค่า 263.97 MPa จากนั้น ค่าความชันของเส้นกราฟจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งความชันของกราฟมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งเป็นจุดที่หน่วยแรงดึงมีค่าสูงสุด จากนั้น กำลังรับแรงดึงจะค่อยๆ ลดลง ซึ่งเห็นได้ชัดจากเส้นกราฟตกลงเรื่อยๆ จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ และเมื่อสังเกตลักษณะการวิบัติพบว่า stainless steel มีพฤติกรรมแบบวัสดุเหนียว เนื่องจากบริเวณกลางช่วงความยาวของตัวอย่างทดสอบเกิดคอคอด (necking) ขึ้นก่อนเกิดการวิบัติ และการวิบัติเป็นรอยฉีกขาดที่ทำมุมเอียงประมาณ 45 องศา กับแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 นอกจากนี้ ยังพบว่า stainless steel ที่ใช้มีเปอร์เซ็นต์ความยืดตัว 65.3 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่า stainless steel ที่ใช้มีความสามารถในการยืดตัว (ductility) ได้ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับเหล็กที่ได้จากบล็อกเหล็ก

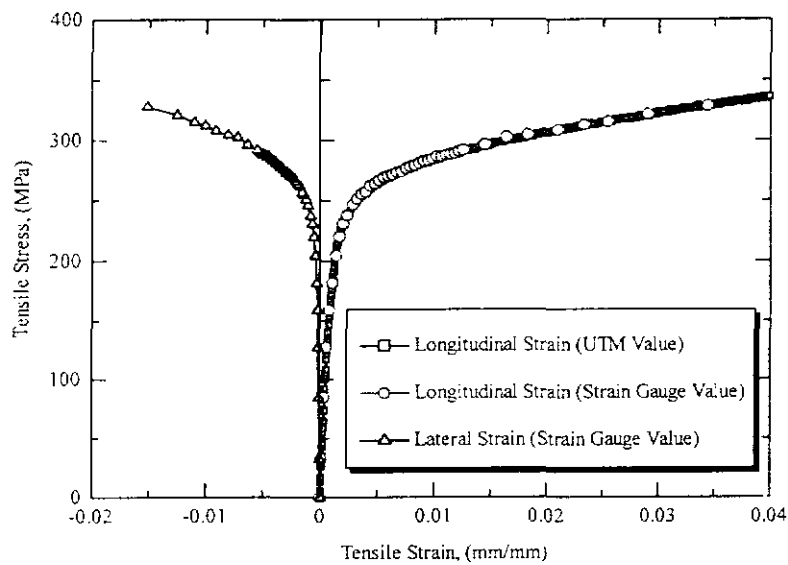
รูปที่ 4.8 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดในแนวแกนและความเครียดในแนวขวางของ stainless steel จากรูป พบว่า ในช่วงที่ stainless steel มีพฤติกรรมในช่วงยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซองส์โดยเฉลี่ยมีค่า 0.29 ซึ่งใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานของ stainless steel 304

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติทางกลของ stainless steel ที่ตัดจากบล็อก stainless steel

ตัวอย่าง ที่	หน่วยแรง คราก (MPa)	หน่วยแรง สูงสุด (MPa)	โมดูลัส ยืดหยุ่น (GPa)	ความยืดตัว (%)	อัตราส่วน ปัวซองส์
1	250.64	586.60	194.58	70.0	0.29
2	259.42	591.28	219.60	57.9	0.27
3	281.86	608.62	194.40	68.0	0.30
เฉลี่ย	263.97	595.50	202.86	65.3	0.29



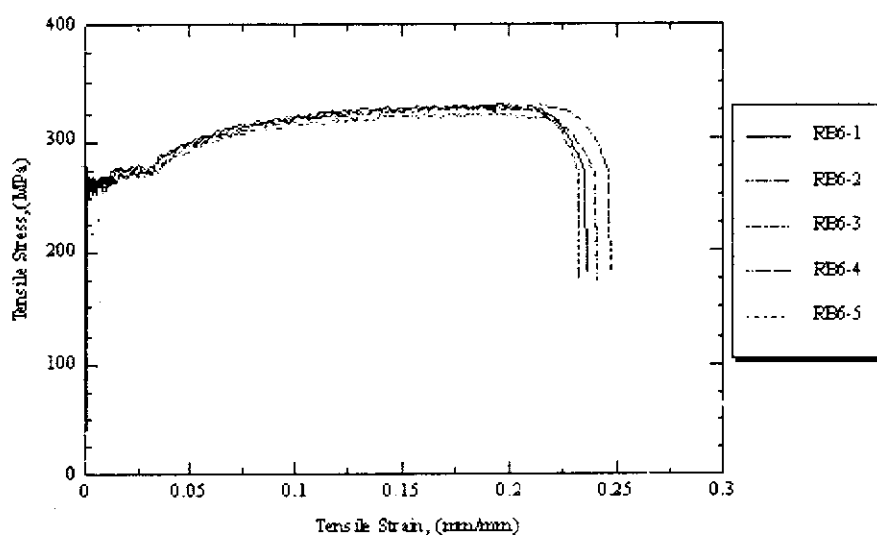
รูปที่ 4.7 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างแผ่น stainless steel



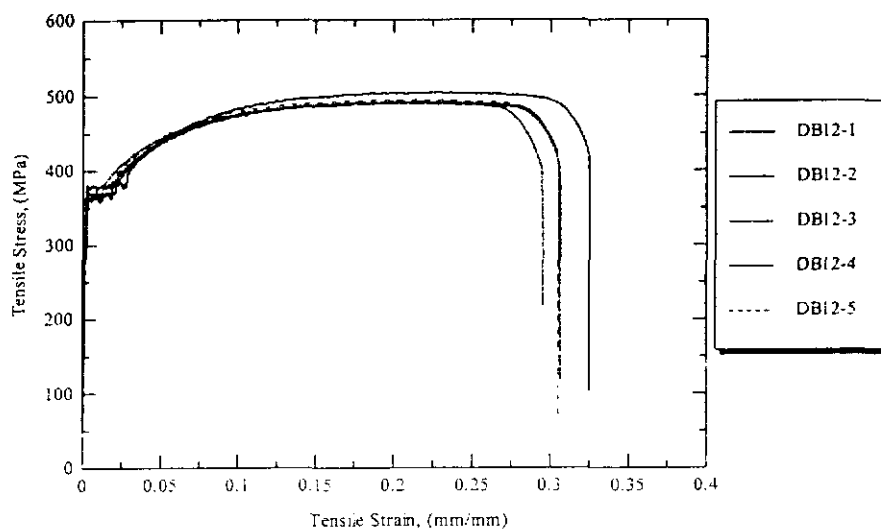
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดในแนวแกน
และความเครียดในแนวขวางแกนของ stainless steel

4.1.4 ผลการทดสอบแรงดึงเหล็กเสริมคอนกรีต

จากการทดสอบแรงดึงของเหล็กเส้นกลมและเหล็กข้ออ้อยตามมาตรฐาน ASTM E8 ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดดึง ดังที่แสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 จากกราฟพบว่า หน่วยแรงคราก หน่วยแรงดึงสูงสุด โมดูลัสยืดหยุ่น และเปอร์เซ็นต์ความยืดตัว โดยเฉลี่ยมีค่าดังที่แสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.5 จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 พบว่า พฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเสริมในช่วงเริ่มต้นเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น จนกระทั่งหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นถึงจุดคราก ซึ่งมีค่าเฉลี่ยสำหรับเหล็กเสริม RB6 255.29 MPa และเหล็กเสริม DB12 368.26 MPa ตามลำดับ จากนั้นเหล็กเสริมจะมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงคราก ซึ่งในช่วงนี้เหล็กเสริมจะมีค่าความเครียดเพิ่มขึ้น ในขณะที่หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมมีค่าเท่าเดิม และเมื่อผ่านช่วงครากไปแล้ว เหล็กเสริมจะสามารถรับแรงดึงได้เพิ่มขึ้นอีกครั้ง ซึ่งจะเห็นได้จากการที่กราฟมีความชันเพิ่มขึ้น และจากนั้นความชันของกราฟจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งความชันของกราฟมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กมีค่าสูงสุด จากนั้น กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมจะค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งเหล็กเสริมเกิดการวิบัติ ซึ่งลักษณะการวิบัติของเหล็กเสริมจะเป็นดังรูปที่ 4.11(a) และ 4.11(b)



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดของเหล็กเส้นกลม RB6



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดของเหล็กข้ออ้อย DBI2

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้นกลม RB6

ตัวอย่างทดสอบ	หน่วยแรงคราก (MPa)	หน่วยแรงสูงสุด (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	ความยืดตัว (%)
1	259.19	328.25	190.03	23.6
2	256.23	326.56	200.14	23.3
3	251.53	320.32	201.34	24.1
4	258.90	327.58	188.91	24.7
5	250.58	325.41	196.15	24.1
ค่าเฉลี่ย	255.29	325.62	195.31	24.0

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อย DBI2

ตัวอย่างทดสอบ	หน่วยแรงคราก (MPa)	หน่วยแรงสูงสุด (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่น (GPa)	ความยืดตัว (%)
1	381.48	503.85	172.37	32.5
2	368.79	491.80	184.19	30.6
3	361.86	490.43	207.74	29.6
4	366.87	491.88	174.11	30.6
5	362.28	494.74	191.70	30.5
ค่าเฉลี่ย	368.26	494.51	186.08	30.8



a.) เหล็กเส้นกลม RB6



b.) เหล็กข้ออ้อย DB12

รูปที่ 4.11 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเหล็กเส้นกลมและเหล็กข้ออ้อย

4.2 ผลการทดสอบ Tubed concrete column ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนและวิจารณ์ผล

4.2.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของ Tubed concrete column

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกน (axial load) และการหดตัวในแนวแกน (axial shortening) ของ Tubed concrete column โดยจัดกลุ่มตามค่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุด f'_{co} ของคอนกรีตและจำกัดการแสดงผลที่ค่าการหดตัว 20 mm หรือเทียบได้กับความเครียดเฉลี่ยในคอนกรีต 0.0267 mm/mm ซึ่งเป็นค่าความเครียดที่สูงกว่าความเครียดที่กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีตประมาณ 10 เท่า โดยกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวที่แสดงผลการทดสอบจนถึงจุดวิบัติได้ถูกนำเสนอไว้ในภาคผนวก ก เพื่อให้เห็นภาพรวมของพฤติกรรมการรับแรงของ Tubed concrete column โดยในการศึกษานี้ได้นิยามให้ค่าแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดค่าแรก (first maximum load) ที่เกิดขึ้นในเสาก่อนที่จะรับค่าแรงกดอัดในแนวแกนที่สูงกว่าที่จุดอื่นๆ (ยกเว้นกรณีของเสา S-18-4.5 และ SL-18-4.5 ที่กำหนดให้แรงดังกล่าวเกิดขึ้นที่จุดที่ผนังปลอกเหล็กเกิดการ โกงเคาะเฉพาะที่ที่สามารถสังเกตเห็นได้) เป็น “ค่ากำลังรับแรงสูงสุดใช้งาน” หรือ P_{max} ของเสา และนิยามให้ค่าแรงสูงสุดที่จุดวิบัติของเสาเป็น “ค่ากำลังรับแรงกดอัดประลัย” หรือ P_{ult}

จากกราฟในภาคผนวก ก จะเห็นได้ว่า Tubed concrete column เป็นเสาที่มีพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนที่แบ่งได้ออกเป็น 2 ช่วง โดยในช่วงแรกจะมีความชันที่สูงกว่าในช่วงที่สอง โดย P_{ult} ของเสาเกิดขึ้นที่จุดที่เสามีการหดตัวในแนวแกนที่สูงมากกว่า 50 mm (หรือมีความเครียดเฉลี่ยของแกนคอนกรีตที่จุดวิบัติอยู่ในช่วง 0.06-0.13 mm/mm เมื่อเทียบกับกรณีของเสาคอนกรีต ซึ่งมีความเครียดเฉลี่ยที่จุดรับแรงสูงสุดอยู่ในช่วงเพียง 0.002-0.003 mm/mm) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Tubed concrete column เป็นเสาที่มีความเหนียวในแนวแกน (axial ductility) ที่สูงมาก อย่างไรก็ตาม ค่าการหดตัวสูงสุดที่ใช้งานจริงจะมีค่าน้อยกว่าค่าการหดตัวดังกล่าวมาก

จากรูปที่ 4.12 ในช่วงแรก ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวของเสาคอนกรีต อังอิงและ Tubed concrete column มี slope และลักษณะเส้นกราฟที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจาก ใน

การศึกษานี้ แรงกคอัดถูกกำหนดให้กระทำต่อคอนกรีตโดยตรงและคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีค่า Poisson's ratio ที่ต่ำ ดังนั้น คอนกรีตจึงมีการขยายตัวทางด้านข้างที่น้อยมากในช่วงแรกและเป็นวัสดุหลักในการรับแรงกคอัด โดยปลอกเหล็กมารับแรงกคอัดได้บ้าง โดยอาศัยการถ่ายแรงบางส่วนจากแกนคอนกรีตโดยอาศัย bond และแรงเสียดทานระหว่างผิวแกนคอนกรีตและผิวในของปลอกเหล็ก (Johansson, 2000) โดยพฤติกรรมของเสาในช่วงนี้มีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นตรง (linear) จนถึงจุดที่เสารับแรงกคอัดประมาณ 50-70 % ของแรง P_{max}^I จากนั้น ในช่วงที่สอง เมื่อแกนคอนกรีตถูกแรงกระทำเพิ่มขึ้นอีก คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวขนาดเล็ก (microcracking) ในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผลทำให้แกนคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้น เนื่องจาก Poisson's effect ดังนั้น slope ของกราฟความสัมพันธ์จึงเริ่มมีค่าลดลงและพฤติกรรมของ Tubed concrete column จะค่อยๆ เปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นตรง (nonlinear) มากขึ้น ในขณะเดียวกัน เมื่อแกนคอนกรีตมีการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้นและก่อให้เกิดแรงดันทางด้านขวางกระทำดังกล่าวกับผนังของปลอกเหล็กมากขึ้นแล้ว ผนังของปลอกเหล็กจะต้านทานต่อแรงดันดังกล่าวโดยอาศัยความแกร่งต่อการคดของผนังในรูปของ plate ซึ่งก่อให้เกิดแรงดึงฉากและแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างแกนคอนกรีตและผนังด้านในของปลอกเหล็กมากขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้ปลอกเหล็กด้านแรงกคอัดในแนวแกนร่วมกับแกนคอนกรีตอย่างต่อเนื่องและเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ที่ผนังของปลอกเหล็ก (local tube wall buckling) ขึ้น ซึ่งเป็นผลให้เสารับแรงกคอัดเพิ่มขึ้นได้ไม่มากนัก โดยปลอกเหล็กทำหน้าที่จำกัด (contain) แกนคอนกรีตที่แตกร้าวให้มีกำลังรับแรงกคอัดได้มากขึ้นและทำให้เสามีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวแกนที่สูงมาก (คล้ายพฤติกรรมของวัสดุเหนียว) ก่อนการวิบัติของเสา นอกจากนั้นแล้ว การจำกัดของปลอกเหล็กต่อแกนคอนกรีตดังกล่าวยังเป็นผลทำให้เสา (ในบางกรณี) มีค่าแรงกคอัดสูงสุดเกิดขึ้นหลายค่าก่อนที่จะถึงค่ากำลังรับแรงกคอัดประลัย P_{ult} ของเสา

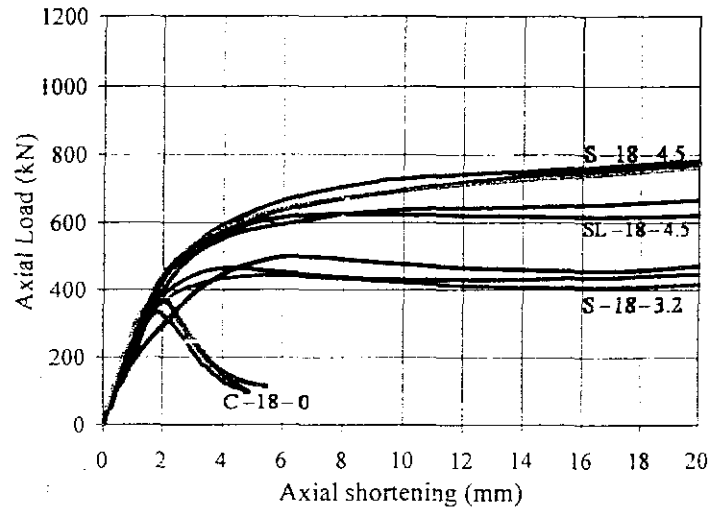
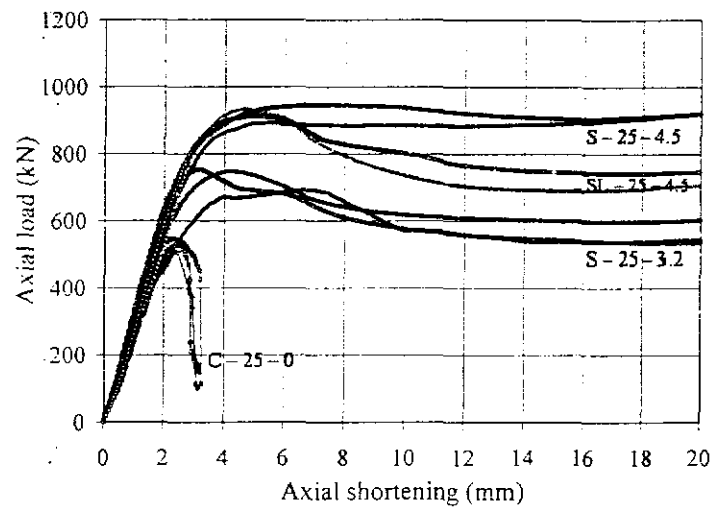
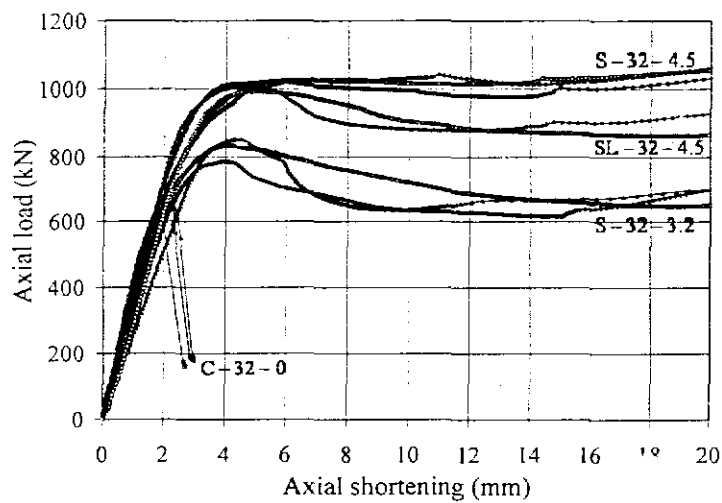
จากรูปที่ 4.12 และกราฟในภาคผนวก ก พฤติกรรมในช่วงที่สองของ Tubed concrete column ถูกแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ (ดูรูปที่ 2.5 หัวข้อที่ 2.2 ประกอบ) ดังนี้

แบบที่ 1 เสารองรับแรงกคอัดในแนวแกนได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือ strain hardening จนถึงจุดวิบัติ (โดยไม่มีค่าแรงกคอัดสูงสุดเกิดขึ้นหลายค่าก่อนที่จะถึงแรง P_{ult}) โดยพฤติกรรมลักษณะนี้เกิดขึ้นในตัวอย่างเสา S-18-4.5 และ SL-18-4.5 ซึ่งเป็นเสาที่ทำด้วยคอนกรีตกำลังต่ำ (18 MPa) และปลอกเหล็กหนา (4.5 mm) โดยในกรณีนี้ เมื่อแรงกคอัดทำให้แกนคอนกรีตในบริเวณที่แรงกคอัดกระทำเกิดการแตกร้าวและเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้ว ผนังของปลอกเหล็กจะสามารถต้านทานต่อแรงดันทางด้านข้างได้เป็นอย่างดี และปลอกเหล็กจะทำหน้าที่จำกัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าวให้รับแรงกคอัดที่เพิ่มขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง โดยแรงกคอัดในแกนคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นหลังจากที่ผนังของปลอกเหล็กมีการโก่งเดาะเฉพาะที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทไปยังปลอกเหล็กในบริเวณกึ่งกลาง

ความสูงของเสา โดยอาศัยแรงสืบทอดระหว่างผิวของแกนคอนกรีตและผิวด้านในของปลอกเหล็ก ตามที่จะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อที่ 4.2.2 ดังจะเห็นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนที่จุดกึ่งกลางความสูงของเสาดังที่แสดงในรูปที่ 4.13 ซึ่งค่าความเครียดในแนวแกนที่จุดกึ่งกลางความสูงของเสาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องหลังจากที่แรงกระทำมีค่ามากกว่า P_{max}^I โดยค่า P_{max}^I ของเสาที่มีพฤติกรรมในลักษณะนี้จะถูกพิจารณาให้เป็นค่าแรงกดอัดที่จุดที่ผนังของปลอกเหล็กมีการโก่งเดาะเฉพาะที่เกิดขึ้น

แบบที่ 2 เสารองรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่ง จากนั้น เสามีความแกร่งประมาณศูนย์หรือ elastic-perfectly plastic ซึ่งเกิดขึ้นในตัวอย่างเสา S-25-4.5 และ S-32-4.5 ซึ่งเป็นเสาที่ทำด้วยคอนกรีตกำลังปานกลาง 25 MPa และปลอกเหล็กหนา 4.5 mm โดยในกรณีนี้ เมื่อแรงกดอัดในแนวแกนมีค่าถึง P_{max}^I และแกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวและเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้ว ผนังของปลอกเหล็กมีความแกร่งต่อการดัดในการต้านทานต่อการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีตอย่างเพียงพอ จากนั้น คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผนังของปลอกเหล็กจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่และปลอกเหล็กจะทำหน้าที่จำกัดแกนคอนกรีตให้สามารถรับแรงกดอัดที่คงที่ได้อย่างต่อเนื่องจนถึงจุดหนึ่ง จากนั้น ปลอกเหล็กจะเกิดพฤติกรรม strain hardening ทำให้ปลอกเหล็กกลับมา มีความสามารถในการจำกัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าวได้อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งในบางกรณีกระบวนการจำกัดแกนคอนกรีตอาจเกิดขึ้นได้หลายครั้ง ซึ่งเป็นผลทำให้เสามีค่าแรงสูงสุดเกิดขึ้นได้หลายครั้งก่อนถึงจุดวิบัติของเสา โดยแรงกดอัดที่เพิ่มขึ้นและลดลงหลังจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังของปลอกเหล็ก จะถูกรองรับโดยกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของปลอกเหล็ก ดังจะเห็นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและค่าความเครียดในแนวแกนของเสาดังที่แสดงในภาคผนวก ก

แบบที่ 3 เสารองรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว เสามีความแกร่งลดลงหรือ strain-softening ซึ่งเกิดขึ้นในตัวอย่างเสา S-18-3.2, S-25-3.2, S-32-3.2 ซึ่งเป็นเสาที่มีผนังของปลอกเหล็กบาง 3.2 mm โดยในกรณีนี้ เมื่อแรงกดอัดในแนวแกนมีค่าถึง P_{max}^I และแกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวและเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้ว ผนังของปลอกเหล็กไม่มีความแกร่งต่อการดัดเพียงพอในการต้านทานต่อการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีต จากนั้น คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผนังของปลอกเหล็กจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่และปลอกเหล็กจะไม่สามารถจำกัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าวให้มีกำลังรับแรงกดอัดได้เพิ่มขึ้นในช่วงแรก แต่เมื่อการโก่งเดาะเฉพาะที่ของปลอกเหล็กมีค่ามากขึ้นแล้ว ปลอกเหล็กจะมีความสามารถในการจำกัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าวได้อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งในบางกรณีกระบวนการจำกัดแกนคอนกรีตอาจเกิดขึ้นได้หลายครั้ง ซึ่งเป็นผลทำให้เสามีค่าแรงสูงสุดเพิ่มขึ้นได้หลายครั้งก่อนถึงจุดวิบัติของเสา โดยแรงกดอัดที่เพิ่มขึ้นและลดลงหลังจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังของปลอกเหล็กจะถูกรองรับโดยกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของปลอกเหล็ก ดังจะเห็นได้จากกราฟดังที่แสดงในภาคผนวก ก

a.) Column with $f'_{co} = 18$ MPab.) Column with $f'_{co} = 25$ MPac.) Column with $f'_{co} = 32$ MPa

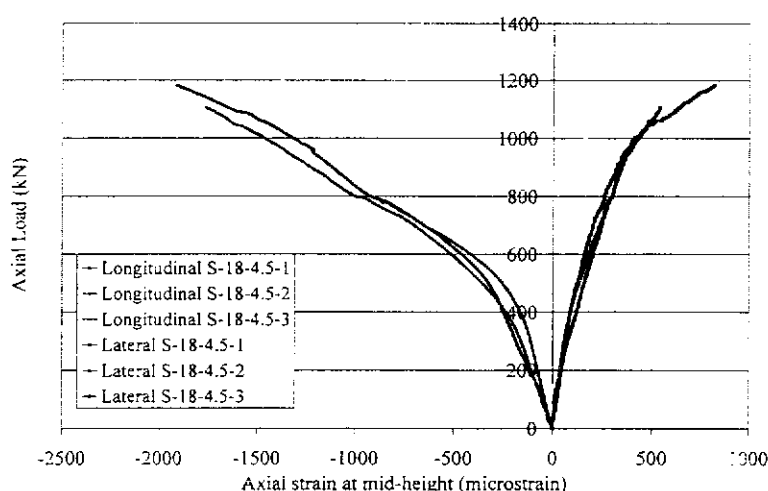
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา Tubed concrete column

อย่างไรก็ตาม ในกรณีเสา SL-25-4.5 และ SL-32-4.5 นั้น พฤติกรรมแบบ strain-softening น่าจะมีสาเหตุมาจากความไม่สมบูรณ์ของรอยเชื่อมของผนังของปลอก stainless steel ซึ่งเห็นได้จากการปริแตกของรอยเชื่อมที่จุดวิบัติของเสาดังกล่าว ดังที่แสดงในรูปที่ 4.14(c)

ตารางที่ 4.6 แสดงสรุปผลการทดสอบ Tubed concrete column ที่ได้จากการทดสอบ โดยค่าการหดตัวที่ผนังปลอกเหล็กเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ได้มาจากการสังเกตตัวอย่างทดสอบระหว่างการทดสอบ ซึ่งเป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น

4.2.2 การถ่ายแรงในเสา Tubed concrete column

รูปที่ 4.13 แสดงตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกน (axial load) ที่กระทำต่อแกนคอนกรีตและค่าความเครียดในแนวแกน (ค่าเป็นลบ) และค่าความเครียดในแนวขวาง (ค่าเป็นบวก) ที่วัดได้จาก strain gage ที่จุดกึ่งกลางความสูงของปลอกเหล็กของ Tubed concrete column S-18-4.5-x จากรูป จะเห็นได้ว่า แรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อแกนคอนกรีตที่ปลายเสาบางส่วนได้ถูกถ่ายไปยังปลอกเหล็กของ Tubed concrete column อย่างต่อเนื่องจากจุดที่แรงเริ่มกระทำต่อเสา โดยทำให้เกิดความเครียดในแนวแกนของปลอกเหล็กอย่างค่อนเนื่องจนกระทั่งเสาสกิดการวิบัติ การถ่ายแรงดังกล่าวเกิดจาก interaction ระหว่างแกนคอนกรีตและปลอกเหล็กโดยอาศัย micro-interlocking และความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของผิวด้านในของปลอกเหล็กและแกนคอนกรีต เป็นระบบการถ่ายแรงหลัก (Johansson, 2000) โดยในช่วงแรก ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง จนกระทั่งแรงกดอัดมีค่าอยู่ในช่วง 60-70% ของแรงกดอัดสูงสุดแรก P_{max}^I ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในช่วงนี้ การถ่ายแรงจากแกนคอนกรีตไปยังปลอกเหล็กมีค่าที่ค่อนข้างสมบูรณ์



รูปที่ 4.13 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของเสา S-18-4.5

ตารางที่ 4.6 สรุปผลการทดสอบ Tubed concrete column

ตัวอย่าง	P_{max}^I (kN)	P_{max}^I เฉลี่ย	การหาคัดวัด P_{max}^I (mm)	การหาคัดวัด wall buckling (mm)	ลำดับการเกิด P_{max}^I	P_{ult}^I (kN)	P_{ult}^I เฉลี่ย (kN)	การหาคัดวัดที่ P_{ult}^I (mm)	mode of failure
C-18-0-1	366.8		N/A	N/A	N/A	366.8		2.0	concrete cracking
C-18-0-2	376.6	359	N/A	N/A	N/A	376.6	359	1.8	"
C-18-0-3	334.1		N/A	N/A	N/A	334.1		1.8	"
C-25-0-1	546.8		N/A	N/A	N/A	546.8		2.3	"
C-25-0-2	506.5	528	N/A	N/A	N/A	506.5	528	2.4	"
C-25-0-3	530.4		N/A	N/A	N/A	530.4		2.4	"
C-32-0-1	641.7		N/A	N/A	N/A	641.7		2.3	"
C-32-0-2	652.8	640	N/A	N/A	N/A	652.8	640	2.2	"
C-32-0-3	624.1		N/A	N/A	N/A	624.1		1.8	"
S-18-3.2-1	499.8		6.5		before local tube wall buckling	753.0		100.4	local tube wall buckling and concrete cracking
S-18-3.2-2	464.9	469	4.3	8.3	before local tube wall buckling	701.6	730	100.2	"
S-18-3.2-3	442.6		5.8		before local tube wall buckling	728.1		101.4	"
S-25-3.2-1	747.6		4.2		before local tube wall buckling	891.5		96.8	"
S-25-3.2-2	753.9	731	3.2	8.1	before local tube wall buckling	807.7	859	95.7	"
S-25-3.2-3	692.6		6.9		before local tube wall buckling	879.0		100.5	"
S-32-3.2-1	786.5		4.0		before local tube wall buckling	905.9		74.9	"
S-32-3.2-2	834.2	824	4.0	7.6	before local tube wall buckling	949.1	922	73.4	"
S-32-3.2-3	851.6		4.3		before local tube wall buckling	911.6		73.5	"

ตารางที่ 4.6 สรุปผลการทดสอบ Tubed concrete column (ต่อ)

ตัวอย่าง	P_{max}^1 (kN)	P_{max}^1 เฉลี่ย	การหัดตัวที่ P_{max}^1 (mm)	การหัดตัวที่ Wall buckling (mm)	ลำดับการเกิด P_{max}^1	P_{ult}^1 (kN)	P_{ult}^1 เฉลี่ย (kN)	การหัดตัวที่ P_{ult}^1 (mm)	mode of failure
S-18-4.5-1	716.1		11.8		- ¹	- ¹		24.3	- ¹
S-18-4.5-2	742.8	724	12.0	12.1	at local tube wall buckling	1105.8	1144	93.7	local tube wall buckling และ concrete cracking
S-18-4.5-3	711.9		12.0		at local tube wall buckling	1181.5		99.1	"....."
S-25-4.5-1	892.1		5.8		before local tube wall buckling	1127.1		77.0	"....."
S-25-4.5-2	927.9	922	5.2	12.2	before local tube wall buckling	1240.1	1191	93.3	"....."
S-25-4.5-3	945.5		7.6		before local tube wall buckling	1206.2		90.2	"....."
S-32-4.5-1	1027.1		7.9		before local tube wall buckling	1307.1		80.6	"....."
S-32-4.5-2	1031	1033	5.5	11.5	before local tube wall buckling	1211.3	1281	70.2	"....."
S-32-4.5-3	1042.3		10.9		before local tube wall buckling	1324.1		80.7	"....."
SL-18-4.5-1	638.7		9.8		at local tube wall buckling	837.0		69.5	local tube wall buckling, concrete cracking และ welding failure
SL-18-4.5-2	613.2	626	5.8	9.5	at local tube wall buckling	834.2	836	82.7	"....."
SL-25-4.5-1	933.9		4.6		before local tube wall buckling	960.6		85.3	"....."
SL-25-4.5-2	912.7	923	5.0	9.3	before local tube wall buckling	949.6	955	84.0	"....."
SL-32-4.5-1	1010.9		4.7		before local tube wall buckling	1123.8		45.9	"....."
SL-32-4.5-2	992.4	1002	4.7	8.7	before local tube wall buckling	1109.0	1116	49.9	"....."

หมายเหตุ: ¹ หมายถึงเครื่องมือทดสอบเสียก่อนที่เสาค้ำอย่างเกิดการวิบัติ

ในช่วงที่สอง ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีแนวโน้มของความชื้นที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แรงกดอัดที่กระทำต่อแกนคอนกรีตได้ถูกถ่ายมายังปลอกเหล็กในอัตราที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำ ซึ่งกล่าวเป็นนัยว่า ปลอกเหล็กช่วยรับแรงกดอัดในสัดส่วนที่เพิ่มมากขึ้น โดยน่าจะมีสาเหตุมาจากการที่แกนคอนกรีตที่อยู่ภายใต้แรงกระทำเริ่มมีการแตกร้าวมากขึ้นและรองรับแรงกระทำได้ลดลง เป็นผลให้มีการกระจายแรงเกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตและมีการถ่ายแรงไปยังปลอกเหล็กมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเสา Tubed concrete column เกิดการวิบัติ ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่จุดกึ่งกลางความสูงของปลอกเหล็กยังคงมีค่าต่ำกว่าค่าความเครียดที่จุดครากของเหล็ก ซึ่งมีค่าประมาณ 0.002 mm/mm หรือ 2000 microstrain ซึ่งแสดงว่า ที่จุดดังกล่าว ปลอกเหล็กยังคงมีพฤติกรรมอยู่ในช่วง linear elastic

โดยการแปลงค่าความเครียดตามยาวของปลอกเหล็กที่วัดได้จากตัวอย่างทดสอบตามกราฟความสัมพันธ์ในภาคผนวก ก โดยใช้สมการของ Hooke, $\sigma = E\varepsilon$ และสมการแรงกดอัดในแนวแกน $P = \sigma A$ พบว่า เปอร์เซ็นต์ของแรงกดอัดในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปลอกเหล็กเมื่อเทียบกับแรง P_{max}^I ที่กระทำต่อแกนคอนกรีตของเสาตัวอย่างมีค่าดังที่แสดงในตารางที่ 4.7 โดยอยู่ในช่วง 26.1-65.7% ซึ่งส่วนใหญ่สูงกว่าค่า 30% ที่เกิดขึ้นในเสา Tubed concrete column หน้าตัดกลมที่ถูกกระทำโดยแรงกดอัดต่อแกนคอนกรีตของเสาเช่นเดียวกับที่ได้ศึกษาในงานนี้ ซึ่งคำนวณได้โดยใช้ nonlinear finite element analysis (Johansson, 2000) ซึ่งสาเหตุที่ปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมรับแรงกดอัดในสัดส่วนที่มากกว่าปลอกเหล็กหน้าตัดกลมนั้นน่าจะเกี่ยวเนื่องมาจากการที่ผนังของปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมมีความแกร่งต่อการคดที่ไม่เพียงพอในการต้านทานต่อแรงดันทางด้านข้างของแกนคอนกรีตที่เกิดการแตกร้าว เป็นผลทำให้ผนังของปลอกเหล็กเกิดการโก่งคดเฉพาะที่และไม่สามารถพัฒนาการโอบรัดต่อแกนคอนกรีตได้ ดังนั้น แกนคอนกรีตจึงเกิดการวิบัติที่มากขึ้นและแรงกดอัดดังกล่าวจึงถูกกระจายเข้าสู่แนวแกนของปลอกเหล็กมากขึ้น

ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์ของแรงกดอัดในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปลอกเหล็กเมื่อเทียบกับค่าแรง P_{max}^I :

ตัวอย่าง	P_{max}^I (kN)	ความเครียดใน ปลอกเหล็กที่วัด ได้ (microstrain)	หน่วยแรงเนื่องจาก ความเครียด (MPa)	แรงกดอัดใน แนวแกนของปลอก เหล็ก (kN)	เปอร์เซ็นต์ของ แรงกดอัด (%)
S-18-3.2	469	508	104	191	40.7
S-25-3.2	731	524	107	197	26.1
S-32-3.2	824	665	136	250	30.3
S-18-4.5	724	726	163	350	48.3
S-25-4.5	922	766	144	369	40.0
S-32-4.5	1033	685	129	330	31.9
SL-18-4.5	626	790	160	410	65.7
SL-25-4.5	923	788	160	410	44.5
SL-32-4.5	1002	618	125	322	32.1

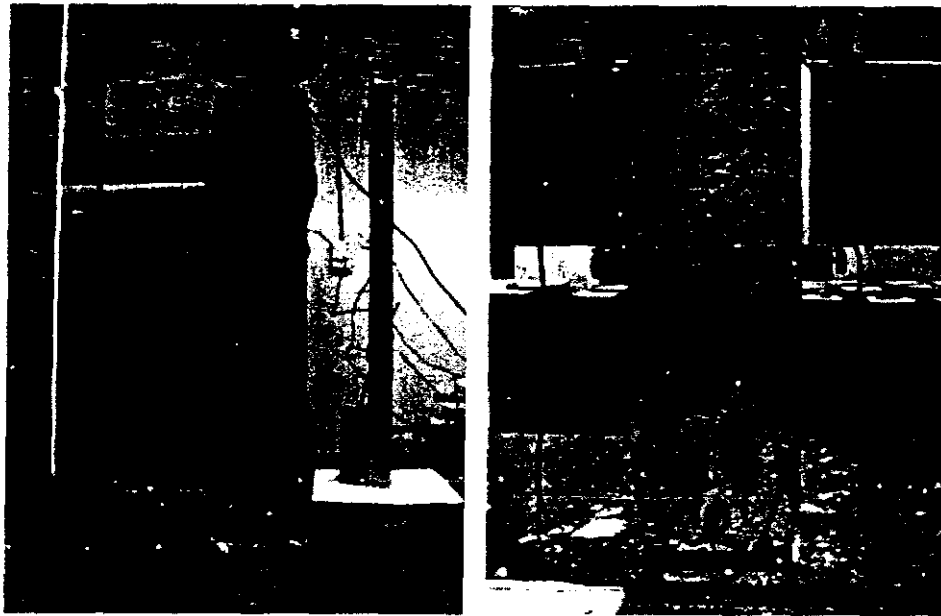
4.2.3 ลักษณะการวิบัติของ Tubed concrete column

จากผลการทดสอบดังกราฟที่แสดงในภาคผนวก ก และจากข้อมูลในตารางที่ 4.6 พบว่า Tubed concrete column มีลักษณะการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure) ดังที่แสดงในรูปที่ 4.13 โดยเสาโดยส่วนใหญ่ (ยกเว้นเสา S-18-4.5-1 ที่เครื่องมือทดสอบเสียก่อนการวิบัติของเสา และเสา SL-32-4.5-1 และ SL-32-4.5-2 ที่วิบัติเนื่องจากการปริแตกของรอยเชื่อมก่อนเวลาอันควร) เกิดการวิบัติที่ค่าการหดตัวเกินกว่า 70 mm หรือที่ค่าความเครียดเฉลี่ยมากกว่า 0.093 mm/mm (9.3% strain) และในบางกรณีมีค่าการหดตัวสูงเกิน 100 mm ซึ่งแสดงว่า Tubed concrete column เป็นเสาที่มีความเหนียวในแนวแกน (axial ductility) ที่สูงมาก เมื่อเทียบกับเสาคอนกรีตอ้างอิงเกิดการวิบัติโดยการแตกร้าวของคอนกรีตอย่างรวดเร็วที่ค่าการหดตัวประมาณ 2-3 mm

โดยส่วนใหญ่ การวิบัติของ Tubed concrete column เริ่มต้นจากการการอัดแตก (crushing) ของคอนกรีตในบริเวณที่แรงกดอัดกระทำ (ซึ่งเป็น local failure และเกิดจาก stress concentration) ซึ่งทำให้แกนคอนกรีตเกิดการหดตัวลงในแนวแกนและการขยายตัวออกทางด้านข้างที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก Poisson's effect โดยการขยายตัวทางด้านข้างจะก่อให้เกิดแรงคดกระทำตั้งฉากกับผนังของปลอกเหล็ก ประกอบกับปลอกเหล็ก ซึ่งอยู่ในรูปของ plate และมีความแกร่งต่อการคดไม่สูงมากนัก ถูกกระทำโดยแรงกดอัดในแนวแกนเนื่องจาก micro-interlocking และแรงเสียดทานที่ถ่ายมาจากแรงกดอัดของคอนกรีต เป็นผลทำให้ผนังของปลอกเหล็กอยู่ในสภาพของ beam-column และเป็นผลทำให้ผนังของปลอกเหล็กเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local tube wall buckling) ในบริเวณที่แรงกดอัดกระทำอย่างรวดเร็ว โดยการโก่งเดาะของผนังของปลอกเหล็กดังกล่าวเกิดขึ้นที่ปลายด้านบนและล่างที่ตำแหน่งประมาณ 100-150 mm วัดจากปลายทั้งสองด้านของเสา ดังที่แสดงในรูปที่ 4.13(a) ดังนั้น ปลอกเหล็กจึงไม่มีความสามารถโอบรัดคอนกรีตให้มีกำลังสูงขึ้นได้ แต่ปลอกเหล็กดังกล่าวจะทำหน้าที่ช่วยจำกัด (contain) แกนคอนกรีตให้อัดตัวเข้าด้วยกันและทำให้การ crushing ของแกนคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งเป็นผลทำให้แกนคอนกรีตยังคงมีความสามารถในการรับแรงกดอัดในแนวแกนได้อย่างต่อเนื่อง และทำให้แรงกดอัดที่เพิ่มขึ้นถ่ายไปยังปลอกเหล็กตาม mechanism ที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 4.2.2 แต่เมื่อการโก่งเดาะเฉพาะที่ของปลอกเหล็กมีค่ามากขึ้นแล้ว ปลอกเหล็กจะมีความสามารถในการจำกัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าวได้อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งในบางกรณีกระบวนการจำกัดแกนคอนกรีตอาจเกิดขึ้นได้หลายครั้ง ซึ่งเป็นผลทำให้เสามีค่าแรงสูงสุดเพิ่มขึ้นได้หลายครั้งก่อนถึงจุดวิบัติของเสา และเป็นผลทำให้เสามีการหดตัวในแนวแกนที่สูงมาก ก่อนที่เสาจะเกิดการวิบัติโดยรวม โดยลักษณะการวิบัตินี้แตกต่างจากการวิบัติของเสาคอนกรีตอ้างอิงที่เกิดการแตกร้าวของคอนกรีตในแนวทแยงและเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (abrupt failure) ดังที่แสดงในรูปที่ 4.13b

นอกจากนั้นแล้ว จากการทดสอบพบว่า Tubed concrete column โดยเฉพาะบางล่วนที่ใช้ปลอก stainless steel (เสา SL-32-4.5-1 และ SL-32-4.5-2) เกิดการวิบัติที่ค่าการหดตัว (น้อยกว่า 50

mm) ที่ค่อนข้างต่ำกว่า Tubed concrete column อื่นๆ ค่อนข้างมาก เนื่องมาจากการปริแตกของรอยเชื่อมก่อนเวลาอันควร ซึ่งเกิดจากการที่รอยเชื่อมไม่มีความสมบูรณ์ ดังนั้น การตรวจสอบความสมบูรณ์ของรอยเชื่อมจึงมีความสำคัญต่อความเหนียวของ Tubed concrete column เป็นอย่างมาก



(a)

(b)



(c)

รูปที่ 4.14 ลักษณะการวิบัติของเสา Tubed concrete column

โดยสรุปแล้ว จากการทดสอบพบว่า Tubed concrete column ที่ใช้ในการศึกษาเกิดการวิบัติเฉพาะที่ เนื่องจากการเกิด local tube wall buckling ที่ปลายด้านบนและล่างที่ตำแหน่งประมาณ 100-

150 mm วัดจากปลายทั้งสองด้านของเสา ซึ่งเป็นผลทำให้ Tubed concrete column มีกำลังก่อนข้างต่ำ (ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป) ดังนั้น วิธีการหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของ Tubed concrete column ให้สูงขึ้นคือ เสาดังกล่าวควรถูกเสริมด้วยปลอกเหล็กที่มีปริมาณเหล็กมากพอในบริเวณที่เกิด local tube wall buckling เพื่อให้ปลอกเหล็กในบริเวณดังกล่าวมีกำลังในการโอบรัดแกนคอนกรีตที่เพียงพอ ซึ่งในเบื้องต้น ความหนาของปลอกเหล็กที่ควรใช้อาจหาได้โดยใช้ข้อกำหนดของ AISC LRFD ตามสมการที่ 2.14 ซึ่งให้ค่าความหนาค่าสุดของ Tubed concrete column ที่สูงกว่าค่าที่กำหนดโดย ว.ส.ท. 1.225 เท่า (ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษานี้ได้ถูกออกแบบตามข้อกำหนดของ ว.ส.ท. 1008-38)

4.2.4 กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของ Tubed concrete column และค่าความเครียดสูงสุด

ตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดค่าแรก P_{max}^I และแรงกดอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตอ้างอิง (P_c) และอัตราส่วนของค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่แรง P_{max}^I ของ Tubed concrete column (ϵ_{max}^I) ต่อค่าความเครียดที่ค่าแรงสูงสุดของเสาคอนกรีตอ้างอิง (ϵ_{cu}) เช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไปแล้ว ในการศึกษา ค่าแรงกดอัด P_{max}^I จะถูกพิจารณาให้เป็นกำลังใช้งานสูงสุดของ Tubed concrete column เนื่องจากที่จุดดังกล่าว ค่าการหดตัวในแนวแกนของเสามีค่าสูงเกินกว่า 2 เท่าของค่าความเครียดที่ค่าแรงกดอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตอ้างอิง $\epsilon_{u,conc}$ ซึ่งในการใช้งานจริง ค่าความเครียดขนาดดังกล่าวจะทำให้เสาโดยทั่วไปขาดความเหมาะสมในการใช้งานแล้ว เนื่องจากเสามีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูง

ตารางที่ 4.8 กำลังแรงกดอัดสูงสุดแรกและค่าความเครียดสูงสุดแรกที่เกิดขึ้นใน Tubed concrete column (หมายเหตุ: เกิดจากความไม่สมบูรณ์ของรอยเชื่อมของผนังของปลอก stainless steel)

ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ				พฤติกรรมรับแรง
	P_{max}^I (kN)	P_{max}^I / P_c	ϵ_{max}^I (% strain)	$\epsilon_{max}^I / \epsilon_{u,conc}$	
C-18-0	359	-	0.25	-	-
C-25-0	528	-	0.32	-	-
C-32-0	640	-	0.28	-	-
S-18-3.2	469	1.31	0.74	3.0	แบบที่ 3
S-25-3.2	731	1.39	0.64	2.0	แบบที่ 3
S-32-3.2	824	1.29	0.55	2.0	แบบที่ 3
S-18-4.5	727	2.01	1.59	6.5	แบบที่ 1
S-25-4.5	922	1.75	0.83	2.6	แบบที่ 2
S-32-4.5	1033	1.62	1.09	3.9	แบบที่ 2
SL-18-4.5	626	1.74	0.90	3.7	แบบที่ 1
SL-25-4.5	923	1.75	0.64	2.0	แบบที่ 2
SL-32-4.5	1002	1.57	0.63	2.2	แบบที่ 2

จาก column ที่ 3 ของตารางที่ 4.8 พบว่า เมื่อคอนกรีตมี f'_{co} ที่เท่ากันแล้ว Tubed concrete column กลุ่มที่ 2 ที่ใช้ปลอกเหล็กที่บางกว่า (3.2 mm) มีอัตราส่วน P_{max}^1 ต่อแรงกดอัดสูงสุดของเสา คอนกรีตอ้างอิง (P_c) อยู่ในช่วง 1.29 ถึง 1.39 ซึ่งต่ำกว่า Tubed concrete column ที่ใช้ปลอกเหล็กที่หนากว่า (4.5 mm) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1.62 ถึง 2.01 และ 1.57 ถึง 1.75 สำหรับเสาในกลุ่มที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาให้ความหนาของปลอกเหล็กมีค่าเท่ากันและคอนกรีตมี f'_{co} ที่เท่ากันระหว่างเสาในกลุ่มที่ 3 (ปลอกเหล็ก; $f_y = 421$ MPa) และเสาในกลุ่มที่ 4 (ปลอก stainless steel; $f_y = 264$ MPa) เช่น พิจารณา S-18-4.5 เทียบกับ SL-18-4.5 เป็นต้น พบว่า เมื่อปลอกเหล็กมีค่า f_y เพิ่มขึ้นแล้ว อัตราส่วน P_{max}^1 / P_c ของเสามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1.62 ถึง 2.01 สำหรับเสาในกลุ่มที่ 3 และ 1.57 ถึง 1.75 สำหรับเสาในกลุ่มที่ 4)

เมื่อพิจารณาให้ปลอกเหล็กที่มีความหนาและ f_y เท่ากัน (เฉพาะในกลุ่มของเสาในกลุ่มหนึ่งๆ) พบว่า เมื่อคอนกรีตมี f'_{co} สูงขึ้นแล้ว อัตราส่วน P_{max}^1 / P_c มีแนวโน้มลดลง (เช่น จาก 2.01 เป็น 1.62 ในเสาในกลุ่มที่ 3 และ จาก 1.74 เป็น 1.57 ในเสาในกลุ่มที่ 4 เมื่อคอนกรีตมี f'_{co} สูงขึ้นจาก 18 MPa เป็น 32 MPa)

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่แรง P_{max}^1 ต่อค่าความเครียดที่กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของเสา คอนกรีตอ้างอิง ($\epsilon_{max}^1 / \epsilon_{u,conc}$) ใน column ที่ 5 พบว่า Tubed concrete column มีค่า $\epsilon_{max}^1 / \epsilon_{u,conc}$ สูงกว่าเสา คอนกรีตอ้างอิงอยู่ในช่วง 2.0 ถึง 6.5 เท่า โดยขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการรับแรงของ Tubed concrete column โดยเสาที่มีพฤติกรรมแบบที่ 1 จะมีค่า $\epsilon_{max}^1 / \epsilon_{u,conc}$ ที่สูงอยู่ในช่วง 3.7 ถึง 6.5 เท่า เมื่อเทียบกับ Tubed concrete column ที่มีพฤติกรรมแบบที่ 2 และ 3 ที่มีค่า $\epsilon_{max}^1 / \epsilon_{u,conc}$ อยู่ในช่วง 2.0-3.9 เท่า ดังนั้น ในการใช้งานจริง พฤติกรรมของ Tubed concrete column แบบที่ 1 จึงเป็นพฤติกรรมที่ควรออกแบบให้เกิดขึ้น

โดยสรุปแล้ว ความหนาและกำลังครากของปลอกเหล็กที่สูงขึ้นเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ Tubed concrete column มีกำลังสูงขึ้น และ Tubed concrete column จะมีกำลังลดลงเมื่อคอนกรีตที่ใช้ในเสามีกำลังสูงขึ้น โดยพฤติกรรมของเสาที่ควรให้เกิดขึ้นคือพฤติกรรมแบบที่ 1 ซึ่งมีความเหนียว (ductility) ที่สูงและสามารถรับแรงกดอัดที่เพิ่มขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนถึงจุดวิบัติของเสา

4.2.5 การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed concrete column กับสมการของเสาเชิงประกอบ

ในหัวข้อนี้ กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดแรก (P_{max}^1) ของ Tubed concrete column จะถูกเปรียบเทียบกับกำลังของเสาดังกล่าวที่ได้จากสมการกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของเสาเชิงประกอบตามทฤษฎี (theoretical ultimate load) สมการออกแบบเสา คอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 และสมการกำลังของเสาเชิงประกอบของ AISC LRFD (AISC LRFD, 1994)

เมื่อสมมติให้ Tubed concrete column มี full interaction เกิดขึ้นระหว่างแกนคอนกรีตและปลอกเหล็กภายใต้การกระทำของแรงแล้ว กำลังรับแรงกอดสูงสุดเชิงทฤษฎีของเสาดังกล่าว ซึ่งเป็นเสาเชิงประกอบ (composite column) จะหาได้จากสมการ

$$P_{u,cal} = P_{s,cal} + P_{c,cal} \quad (4.1)$$

โดยที่ $P_{s,cal} = f_y A_s$ คือกำลังรับแรงกอดสูงสุดที่จุดครากของปลอกเหล็ก

$P_{c,cal} = f'_{co} A_c$ คือกำลังรับแรงกอดสูงสุดของคอนกรีต

f'_{co} คือกำลังรับแรงกอดสูงสุดของคอนกรีตที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C469

A_c คือพื้นที่หน้าตัดของแกนคอนกรีต

A_s คือพื้นที่หน้าตัดของปลอกเหล็ก

f_y คือกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมหลัก

ขอให้ทราบด้วยว่า สมการที่ 4.1 นี้เป็นสมการเดียวกับสมการที่ใช้หา nominal axial strength ของเสาเชิงประกอบที่กำหนดอยู่ใน Eurocode 4 ENV 1994-1-1 ของสถาบันมาตรฐานแห่งอังกฤษ หรือ British Standard Institute (Huang et.al., 2002)

ตารางที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงกอดในแนวแกนสูงสุดค่าแรก P_{max}^I ที่ทดสอบได้กับกำลังรับแรงกอดสูงสุดของเสาเชิงประกอบในทางทฤษฎี จากตารางพบว่า ค่า $P_{max}^I / P_{u,cal}$ ของ Tubed concrete column ทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 0.49-0.77 ซึ่งน้อยกว่า 1.0 เป็นอย่างมาก ดังนั้น เสาตัวอย่างทดสอบไม่มี full interaction เกิดขึ้นระหว่างแกนคอนกรีตและปลอกเหล็ก ซึ่งจะเห็นได้จากการที่ตัวอย่าง Tubed concrete column ที่ศึกษาเกิดการวิบัติโดยการ crushing ของคอนกรีต และ local tube wall buckling ของผนังปลอกเหล็กที่ปลายด้านบนและล่างของปลายทั้งสองด้านของเสา ซึ่งเป็นการวิบัติแบบ localized failure โดยมีสาเหตุหลักมาจากปลอกเหล็กมีความหนาไม่เพียงพอที่จะช่วยโอบรัดแกนเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า ขอให้สังเกตด้วยว่า ค่ากำลังรับแรงกอดสูงสุดของแกนคอนกรีตมีค่าอยู่ในช่วง 0.85-0.89 ของ $P_{c,cal}$ ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์ 0.85 ที่ใช้ในการลดกำลังของคอนกรีตในสมการของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 (สมการที่ 2.2)

ตารางที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงกอดในแนวแกนสูงสุดค่าแรก P_{max}^I ที่ทดสอบได้กับค่าที่คำนวณได้จากสมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 (สมการที่ 2.2) ขอให้ทราบด้วยว่า เนื่องจากมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 ตามข้อกำหนดที่ 4314 กำหนดให้ทำการคำนวณหากำลังของเสาเชิงประกอบโดยใช้เงื่อนไขเช่นเดียวกับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป ดังนั้นในที่นี้ การคำนวณกำลังของ Tubed concrete column จึงถูกแบ่งออกเป็น

2 กรณีคือ P_{EIT}^1 เป็นกำลังรับแรงกอดักรวมกำลังรับแรงกอดักของปลอกเหล็กเข้ากับสมการที่ 2.2 และ P_{EIT}^2 เป็นกำลังรับแรงกอดักที่ไม่รวมกำลังรับแรงกอดักของปลอกเหล็กเข้ากับสมการที่ 2.2

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P_{max}^1 และค่ากำลังรับแรงกอดักสูงสุดเชิงทฤษฎี

ตัวอย่าง	P_{max}^1 (kN)	$P_{max}^1 / P_{s,cal}$	$P_{max}^1 / P_{c,cal}$	$P_{max}^1 / P_{u,cal}$
C-18-0	359	-	0.85	0.85
C-25-0	528	-	0.89	0.89
C-32-0	640	-	0.89	0.89
S-18-3.2	469	0.82	1.21	0.49
S-25-3.2	731	1.28	1.35	0.66
S-32-3.2	824	1.44	1.25	0.67
S-18-4.5	727	0.67	1.95	0.50
S-25-4.5	922	0.85	1.76	0.57
S-32-4.5	1033	0.95	1.63	0.60
SL-18-4.5	626	0.92	1.68	0.60
SL-25-4.5	923	1.36	1.77	0.77
SL-32-4.5	1002	1.48	1.58	0.76

จากตารางพบว่า ค่า P_{max}^1 / P_{EIT}^1 ของ Tubed concrete column ทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 0.54-0.87 ซึ่งน้อยกว่า 1.0 เป็นอย่างมาก เช่นเดียวกับในกรณีกำลังรับแรงกอดักสูงสุดเชิงทฤษฎีข้างต้น ดังนั้น การรวมกำลังรับแรงกอดักของปลอกเหล็กเข้ากับสมการที่ 2.2 จะทำให้สมการดังกล่าว overestimate กำลังของ Tubed concrete column ซึ่งไม่ปลอดภัยในการใช้งาน แต่เมื่อพิจารณาค่า P_{max}^1 / P_{EIT}^2 ของ Tubed concrete column พบว่า ค่า P_{max}^1 / P_{EIT}^2 อยู่ในช่วง 1.43-2.30 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการไม่รวมกำลังรับแรงกอดักของปลอกเหล็กเข้ากับสมการที่ 2.2 จะทำให้สมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ว.ส.ท. underestimate กำลังของ Tubed concrete column ซึ่งปลอดภัยในการใช้งาน แต่ไม่มีประสิทธิภาพในการใช้งาน ดังนั้น ในขอบเขตของค่า B/t ที่ใช้ในการศึกษานี้ ข้อกัณฑ์ที่ 4314 ตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 ควรได้รับการปรับแก้ให้เหมาะสมกับข้อมูลที่ทดสอบได้ โดยไม่ควรพิจารณากำลังรับแรงกอดักของปลอกเหล็กเข้ากับสมการที่ 2.2 ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในช่วงท้ายของหัวข้อนี้

ตารางที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงกอดักในแนวแกนสูงสุดค่าแรก P_{max}^1 ที่ทดสอบได้กับค่าที่คำนวณได้จากสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC LRFD (สมการที่ 2.15) จากตารางพบว่า ค่า P_{max}^1 / P_{AISC} ของ Tubed concrete column ทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 0.60-0.94 ซึ่งน้อยกว่า 1.0 เช่นเดียวกับในกรณีต่างๆ ข้างต้น ขอให้ทราบว่า Tubed concrete column มีความ

หนาของปลอกเหล็กไม่ผ่านตามข้อกำหนดของ AISC LRFD และ Tubed concrete column เกิดการวิบัติแบบ localized failure โดยการเกิด local tube wall buckling ดังนั้น ในเบื้องต้น จึงอาจสรุปได้ว่าในการออกแบบเสา Tubed concrete column ผู้ออกแบบควรจะต้องกำหนดความหนาของปลอกเหล็กตามข้อกำหนดของ AISC LRFD

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P_{max}^1 และค่ากำลังรับแรงตามมาตรฐาน ว.ศ.ท.

ตัวอย่าง	P_{max}^1 (kN)	P_{EIT}^1 (kN)	P_{max}^1 / P_{EIT}^1	P_{EIT}^2 (kN)	P_{max}^1 / P_{EIT}^2
C-18-0	359	358.0	1.00	358.0	1.00
C-25-0	528	502.8	1.05	502.8	1.05
C-32-0	640	609.7	1.05	609.7	1.05
S-18-3.2	469	871.2	0.54	328.3	1.43
S-25-3.2	731	992.2	0.74	461.0	1.59
S-32-3.2	824	1081.5	0.76	559.1	1.47
S-18-4.5	727	1358.1	0.54	316.6	2.30
S-25-4.5	922	1469.6	0.63	444.6	2.07
S-32-4.5	1033	1552.0	0.67	539.2	1.92
SL-18-4.5	626	953.4	0.66	316.6	1.98
SL-25-4.5	923	1064.9	0.87	444.6	2.08
SL-32-4.5	1002	1147.2	0.87	539.2	1.86

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P_{max}^1 และค่ากำลังรับแรงตามมาตรฐาน AISC LRFD

ตัวอย่าง	P_{max}^1 (kN)	P_{AISC} (kN)	P_{max}^1 / P_{AISC}
S-18-3.2	469	786.0	0.60
S-25-3.2	731	896.6	0.82
S-32-3.2	824	979.0	0.84
S-18-4.5	727	1195.3	0.61
S-25-4.5	922	1300.1	0.71
S-32-4.5	1033	1378.8	0.75
SL-18-4.5	626	874.1	0.72
SL-25-4.5	923	981.4	0.94
SL-32-4.5	1002	1061.3	0.94

โดยสรุปแล้ว Tubed concrete column ที่ใช้ในการศึกษานี้มีความหนาของผนังของปลอกเหล็กที่บางเกินไปเป็นสาเหตุทำให้เกิดการวิบัติของ Tubed concrete column เนื่องจากการวิบัติของ

คอนกรีตและการเกิด local tube wall buckling แบบ localized failure ดังนั้น Tubed concrete column ที่ใช้ในการศึกษานี้จึงไม่มี full interaction เกิดขึ้นระหว่างแกนคอนกรีตและปลอกเหล็กและเป็นผลทำให้ไม่มี confining effect เกิดขึ้นต่อแกนคอนกรีต อย่างไรก็ตาม จาก column ที่ 3 ของตารางที่ 4.8 พบว่า ปลอกเหล็กช่วยทำให้แกนคอนกรีตมีกำลังเพิ่มสูงขึ้น อยู่ในช่วง 1.21-1.35 สำหรับเสาที่ใช้ปลอกเหล็กบาง (ไม่ผ่านเกณฑ์ของ ว.ส.ท. และไม่ผ่านเกณฑ์ของ AISC LRFD) และอยู่ในช่วง 1.58-1.95 สำหรับเสาที่ใช้ปลอกเหล็กหนา (ผ่านเกณฑ์ของ ว.ส.ท. แต่ไม่ผ่านเกณฑ์ของ AISC LRFD) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปลอกเหล็กที่ใช้ในการห่อหุ้มแกนคอนกรีตช่วยในการเสริมกำลังให้กับแกนคอนกรีตได้บางส่วน โดยอาศัย mechanism ในการถ่ายแรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อแกนคอนกรีตบางส่วนไปยังปลอกเหล็กที่หุ้มแกนคอนกรีต โดยแรงเสียดทานระหว่างผิวของแกนคอนกรีตและปลอกเหล็ก อย่างไรก็ตาม ในการศึกษานี้ เราไม่สามารถทำนายส่วนของแรงกดอัดที่ปลอกเหล็กช่วยรองรับจากแกนคอนกรีตเนื่องจาก mechanism ข้างต้นได้โดยตรง ดังนั้น ในเบื้องต้น อาจจะพิจารณาส่วนที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวเป็นส่วนความปลอดภัยของ Tubed concrete column นอกจากนั้นแล้ว อาจจะสรุปได้ว่า ความหนาของปลอกเหล็กที่คำนวณได้ตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 นั้นไม่เพียงพอในการป้องกันการวิบัติแบบ localized failure ของ Tubed concrete column

จากข้อมูลการเปรียบเทียบกำลังของ Tubed concrete column กับสมการต่างๆ ข้างต้น พบว่า สมการที่เหมาะสมที่สุดที่ควรนำมาใช้ในการออกแบบ Tubed concrete column ที่มีอัตราส่วน B/t ที่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่ AISC LRFD กำหนดคือ สมการกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีตในเชิงทฤษฎีที่ลดรูปมาจากสมการที่ 4.1 (สมการของ Eurocode 4 ENV 1994-1-1 ของ BS) ที่อยู่ในรูป

$$P_{TCC} = f'_{co} A_g \quad (4.2)$$

เมื่อ P_{TCC} คือกำลังรับแรงกดอัดของ Tubed concrete column
 f'_{co} คือกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีตที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C459
 A_g คือพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของ Tubed concrete column

โดยสมการนี้อยู่ในรูปเดียวกับสมการออกแบบเสาคอนกรีตล้วน (สมการที่ 2.1) โดยนำตัวคูณ 0.85 ออกจากเทอมกำลังของคอนกรีต เนื่องจากจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ปลอกเหล็กมีความสามารถในการช่วยในการโอบรัดแกนคอนกรีตโดยป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติแบบเปราะ (brittle failure) เป็นผลทำให้คอนกรีตสามารถพัฒนากำลังได้จนถึงกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต นอกจากนั้นแล้ว เนื่องจากการเสริมกำลังของปลอกเหล็กต่อแกนคอนกรีตเสริมเหล็กยังต้องการศึกษาอีกต่อไป แต่ในเบื้องต้นพบว่า ปลอกเหล็กสามารถเสริมกำลังให้กับแกนคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างน้อย 21% (ภายใต้ขอบเขตการวิจัยที่ศึกษา) และเนื่องจากเหล็กมีกำลัง

ครากสูงกว่าคอนกรีตมาก ดังนั้น เราอาจพิจารณาให้พื้นที่ของปลอกเหล็กเป็นพื้นที่รับแรงเพิ่มเติมของคอนกรีตของ Tubed concrete column ได้ ดังนั้น เทอมพื้นที่ของคอนกรีต A_c จึงควรเปลี่ยนเป็นพื้นที่ทั้งหมดของหน้าตัด Tubed concrete column หรือ A_g

ตารางที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดค่าแรก P_{max}^I ที่ทดสอบได้กับค่าที่คำนวณได้จากสมการออกแบบที่ 4.2 จากตารางจะเห็นได้ว่า ค่า P_{max}^I / P_{TCC} ที่ได้ อยู่ในช่วง 1.11 ถึง 1.24 สำหรับเสาที่ใช้ปลอกเหล็กบาง (ไม่ผ่านเกณฑ์ของ ว.ส.ท. และไม่ผ่านเกณฑ์ของ AISC LRFD) และอยู่ในช่วง 1.40-1.73 สำหรับเสาที่ใช้ปลอกเหล็กหนา (ผ่านเกณฑ์ของ ว.ส.ท. แต่ไม่ผ่านเกณฑ์ของ AISC LRFD) ซึ่งจะเห็นได้ว่า สมการที่เสนอใหม่นี้เหมาะสมในกรณีของ Tubed concrete column ที่ใช้ปลอกเหล็กบาง 3.2 mm แต่จะ underestimate กำลังของ Tubed concrete column ที่ใช้ปลอกเหล็กหนา 4.5 mm

ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P_{max}^I ที่ทดสอบได้และค่าแรง P_{TCC}

ตัวอย่าง	P_{max}^I (kN)	P_{TCC} (kN)	P_{max}^I / P_{TCC}
S-18-3.2	469	421.2	1.11
S-25-3.2	731	591.5	1.24
S-32-3.2	824	717.3	1.15
S-18-4.5	727	421.2	1.73
S-25-4.5	922	591.5	1.56
S-32-4.5	1033	717.3	1.44
SL-18-4.5	626	421.2	1.49
SL-25-4.5	923	591.5	1.56
SL-32-4.5	1002	717.3	1.40

4.3 ผลการทดสอบ Tubed RC column ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนและวิจารณ์ผล

4.3.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของ Tubed RC column

รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกน (axial load) และการหดตัวในแนวแกน (axial shortening) ของ Tubed RC column โดยจัดกลุ่มตามค่า f'_{co} ของคอนกรีตและจำกัดการแสดงผลที่ค่าการหดตัว 20 mm เช่นเดียวกับในกรณีของ Tubed concrete column โดยกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวที่แสดงผลการทดสอบจนถึงจุดวิบัติได้ถูกนำเสนอไว้ในภาคผนวก ข เพื่อให้เห็นภาพรวมของพฤติกรรมการรับแรงของ Tubed RC column

จากกราฟในภาคผนวก ข จะเห็นได้ว่า ในภาพรวม Tubed RC column มีพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนคล้ายคลึงกับ Tubed concrete column โดยแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง โดยในช่วง

แรกจะมีความชันที่สูงกว่าในช่วงที่สอง โดยกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดของเสาจะเกิดขึ้นที่จุดที่เสาเกิดการวิบัติและเสามีการหดตัวในแนวแกนที่สูงมากกว่า 100 mm (หรือมีความเครียดที่จุดวิบัติมากกว่า 0.133 mm/mm ซึ่งสูงกว่าในกรณีของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและ Tubed concrete column) ดังนั้น Tubed RC column เป็นเสาที่มีความเหนียวในแนวแกน (axial ductility) ที่สูงมาก

จากรูป ในช่วงแรก ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงและ Tubed RC column มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ตามเหตุผลเช่นเดียวกับในกรณี Tubed concrete column โดยพฤติกรรมของ Tubed RC column เป็นแบบเชิงเส้นตรง (linear) จนถึงจุดที่เสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงมีแรงกดอัดสูงสุด (เหล็กเสริมมีความเครียดจนถึงจุดคราก) ซึ่งอยู่ในช่วงประมาณ 60-70 % ของแรงกดอัดสูงสุดแรก P_{max}^1 ของ Tubed RC column (ซึ่งสูงกว่าของ Tubed concrete column เล็กน้อย เนื่องจากมีเหล็กเสริมช่วยรับแรงกดอัด) จากนั้น ในช่วงที่สอง เมื่อแรงกดอัดมีค่าเพิ่มขึ้นอีกอย่างต่อเนื่อง เหล็กเสริมจะเกิดการครากและแกนคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผลทำให้แกนคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้น เนื่องจาก Poisson's effect ดังนั้น slope ของเส้นความสัมพันธ์เริ่มมีค่าลดลง และพฤติกรรมของ Tubed RC column จะค่อยๆ เปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นตรงมากขึ้น ในขณะเดียวกัน เมื่อแกนคอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มมีการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้นและก่อให้เกิดแรงดันทางด้านขวางกระทำต่อผนังของปลอกเหล็กมากขึ้นแล้ว พฤติกรรมการรับแรงของ Tubed RC column ถูกแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบและมีลักษณะเช่นเดียวกับที่เกิดใน Tubed concrete column ดังนี้ (พิจารณากราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.14 และในภาคผนวก ข ประกอบ)

แบบที่ 1 เสารองรับแรงกระทำได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือ strain hardening ซึ่งเกิดขึ้นในตัวอย่างเสา S-18-4.5-75, S-18-4.5-150, S-25-4.5-75 และ S-25-4.5-150 ซึ่งเป็นเสาที่ทำด้วยคอนกรีตกำลังค่าและปานกลางและผนังปลอกเหล็กหนา 4.5 mm โดยในกรณีนี้ เมื่อแรงกดอัดทำให้เหล็กเสริมและแกนคอนกรีตในบริเวณที่แรงกดอัดกระทำเกิดการแตกร้าว เป็นผลทำให้แกนคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้ว ผนังของปลอกเหล็กจะสามารถต้านทานต่อแรงดันทางด้านข้างได้เป็นอย่างดี และปลอกเหล็กจะทำหน้าที่จำกัด (contain) แกนคอนกรีตเสริมเหล็กที่แตกร้าวให้รับแรงกดอัดที่เพิ่มขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง โดยแรงกดอัดในแกนคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นหลังจากที่ผนังของปลอกเหล็กมีการโก่งเดาะเฉพาะที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทไปยังปลอกเหล็กในบริเวณกึ่งกลางความสูงของเสา โดยอาศัยแรงเสียดทานระหว่างผิวของแกนคอนกรีตและผิวด้านในของปลอกเหล็กตามที่จะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อที่ 4.3.2 ดังจะเห็นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนที่จุดกึ่งกลางความสูงของเสาดังที่แสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งค่า ความเครียดในแนวแกนที่จุดกึ่งกลางความสูงของเสาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องหลังจากที่แรงกระทำมีค่ามากกว่า P_{max}^1

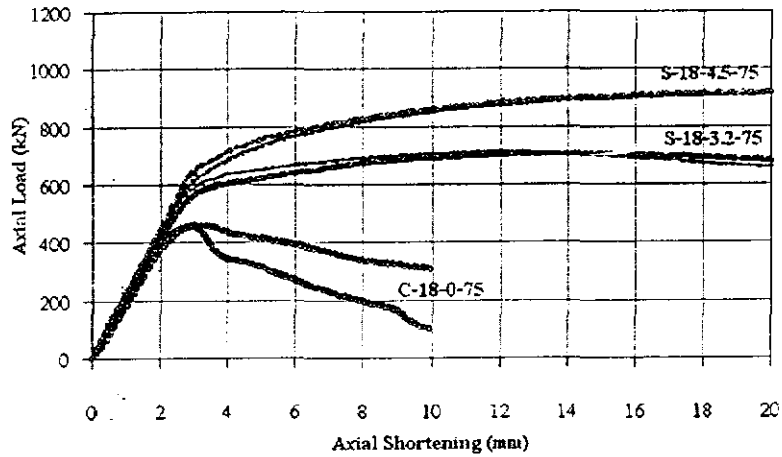
โดยค่า P_{max}^I ของเสาที่มีพฤติกรรมในลักษณะนี้จะถูกพิจารณาให้เป็นค่าแรงกดอัดที่จุดที่ผนังของปลอกเหล็กมีการโก่งเดาะเฉพาะที่เกิดขึ้น

แบบที่ 2 เสารองรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว เสามีความแข็งแรงประมาณศูนย์หรือ elastic-perfectly plastic ซึ่งเกิดขึ้นในตัวอย่างเสา S-32-4.5-75 และ S-32-4.5-150 ซึ่งเป็นเสาที่ทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงและผนังปลอกเหล็กหนา 4.5 mm โดยในกรณีนี้ เมื่อแรงกดอัดในแนวแกนมีค่าถึง P_{max}^I และเหล็กเสริมและคอนกรีตในบริเวณที่แรงกดอัดกระทำเกิดการครากและมีการแตกร้าวและแกนคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้ว ผนังของปลอกเหล็กจะทำการต้านทานต่อการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีตได้อย่างเพียงพอ จากนั้น เมื่อแกนคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผนังของปลอกเหล็กจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่และปลอกเหล็กจะทำหน้าที่จำกัดแกนคอนกรีตดังกล่าว โดยสามารถรับแรงกดอัดที่คงที่ได้อย่างต่อเนื่องจนถึงจุดหนึ่ง จากนั้น ปลอกเหล็กจะเกิดพฤติกรรม strain hardening ทำให้ปลอกเหล็กกลับมามีความสามารถในการ contain แกนคอนกรีตที่แตกร้าวได้อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งในบางกรณีกระบวนการจำกัดแกนคอนกรีตอาจเกิดขึ้นได้หลายครั้ง ซึ่งเป็นผลทำให้เสามีค่าแรงสูงสุดเกิดขึ้นได้หลายครั้งก่อนถึงจุดวิบัติของเสา โดยแรงกดอัดที่เพิ่มขึ้นและลดลงหลังจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังของปลอกเหล็กจะถูกรองรับโดยกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของปลอกเหล็ก ดังจะเห็นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนของเสาดังที่แสดงในภาคผนวก ข

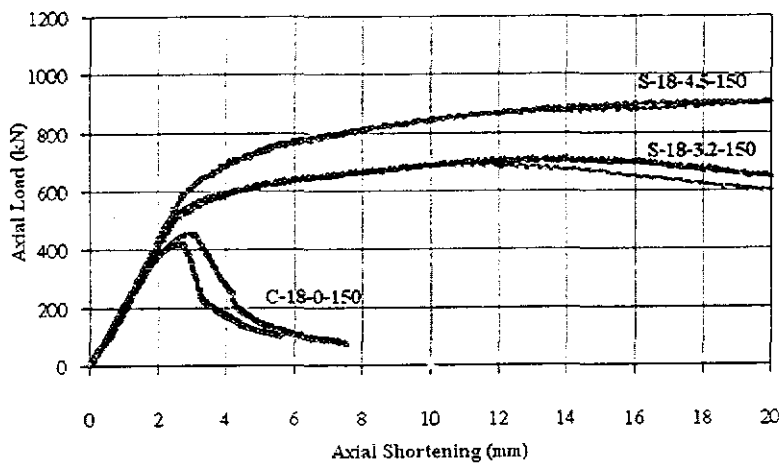
แบบที่ 3 เสารองรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว เสามีความแข็งแรงลดลงหรือ strain-softening สำหรับตัวอย่างเสา S-18-3.2-75, S-18-3.2-150, S-25-3.2-75, S-25-3.2-150, S-32-3.2-75 และ S-32-3.2-150 ซึ่งจะเกิดกับเสาที่ทำด้วยคอนกรีตกำลังต่ำ ปานกลางและสูง และปลอกเหล็กที่มีผนังปลอกบาง 3.2 mm ทั้งหมด โดยในกรณีนี้ เมื่อแรงกดอัดในแนวแกนมีค่าถึง P_{max}^I และแกนคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้ว ผนังของปลอกเหล็กไม่มีความแข็งแรงต่อการดัดเพียงพอในการต้านทานต่อการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีตเสริมเหล็ก จากนั้น เมื่อแกนคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้นไปอีก ผนังของปลอกเหล็กจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่และปลอกเหล็กจะไม่สามารถจำกัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าวให้มีกำลังรับแรงกดอัดได้เพิ่มขึ้นเหมือนในช่วงแรก แต่เมื่อการโก่งเดาะเฉพาะที่ของปลอกเหล็กมีค่ามากขึ้นไปอีกแล้ว ปลอกเหล็กจะมีความสามารถในการจำกัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าวได้อีกครั้งหนึ่ง เนื่องจาก ปลอกเหล็กจะเกิดพฤติกรรม strain hardening ซึ่งในบางกรณีกระบวนการจำกัดแกนคอนกรีตอาจเกิดขึ้นได้หลายครั้ง เช่นเดียวกับในกรณีของแบบที่ 2 ดังจะเห็นได้จากกราฟดังที่แสดงในภาคผนวก ข

ขอให้สังเกตด้วยว่า การที่ Tubed RC column มีเหล็กเสริมในแนวแกนของเสาทำให้เสามีกำลังและความแข็งแรงสูงขึ้นเมื่อเทียบกับเสา Tubed concrete column อย่างไรก็ดีตาม พบว่า พฤติกรรม

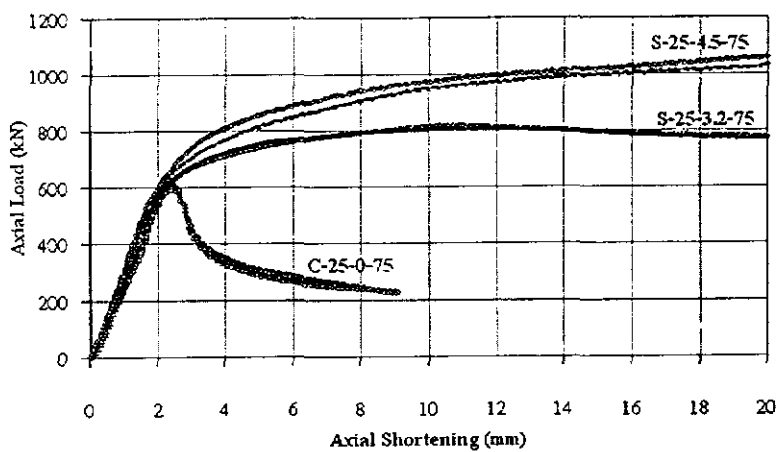
ในช่วงที่สองของ Tubed RC column ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปจาก Tubed concrete column ตารางที่ 4.13 แสดงสรุปผลการทดสอบ Tubed concrete column ที่ได้จากการทดสอบ



(a.) Column with $f'_{co} = 18$ MPa, $s = 75$ mm

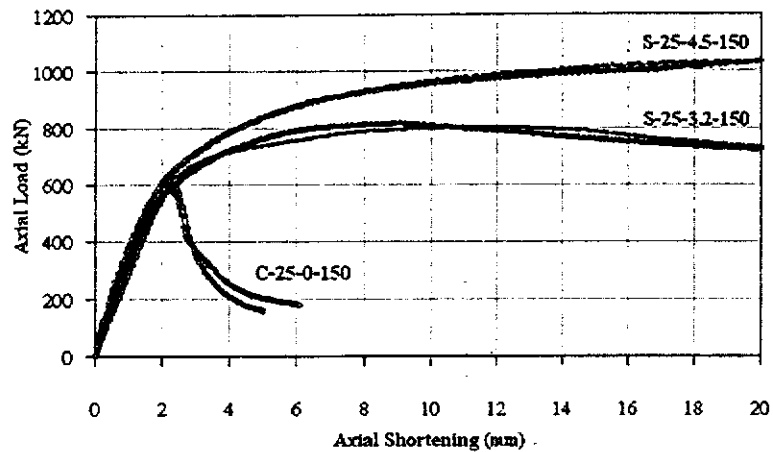


(b.) Column with $f'_{co} = 18$ MPa, $s = 150$ mm

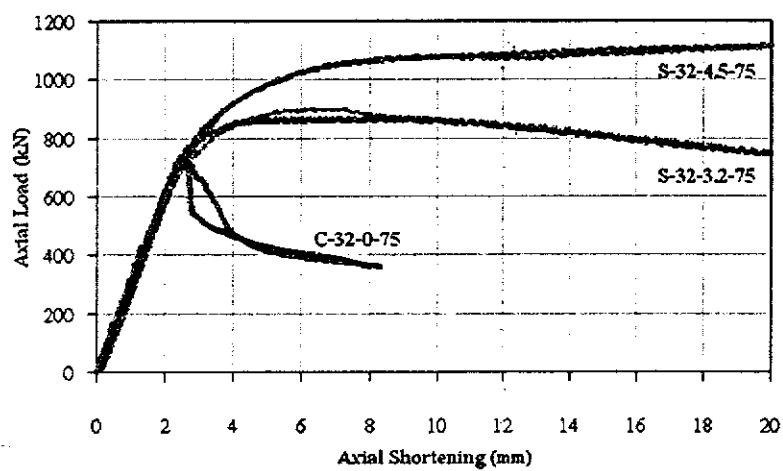


(c.) Column with $f'_{co} = 25$ MPa, $s = 75$ mm

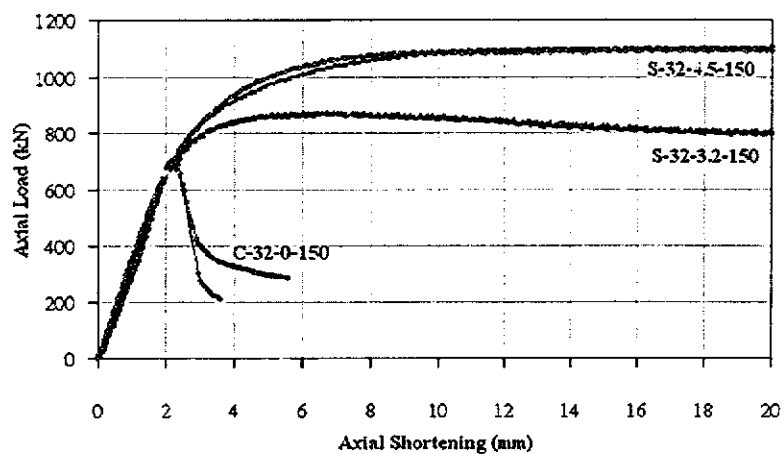
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของแรงกอดยึดและการหดตัวในแนวแกนของตัวอย่างเสา Tubed RC column



(d.) Column with $f'_{co} = 25$ MPa, $s = 150$ mm



(e.) Column with $f'_{co} = 32$ MPa, $s = 75$ mm



(f.) Column with $f'_{co} = 32$ MPa, $s = 150$ mm

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของตัวอย่างเสา Tubed RC column

(ต่อ)

ตารางที่ 4.13 สรุปผลการทดสอบ Tubed concrete column

ตัวอย่าง	P_{max}^1 (kN)	P_{max}^1 เฉลี่ย	การหาคัดตัวที่ P_{max}^1 (mm)	ลำดับการเกิด P_{max}^1	P_{ult} (kN)	P_{ult} เฉลี่ย (kN)	การหาคัดตัวที่ P_{ult} (mm)	mode of failure
C-18-0-75A	463.2		N/A	N/A	463.2		3.0	steel yielding และ concrete cracking
C-18-0-75B	456.5	460	N/A	N/A	456.5	460	3.0	"....."
C-25-0-75A	615.3		N/A	N/A	615.3		2.4	"....."
C-25-0-75B	595.3	605	N/A	N/A	595.3	605	2.5	"....."
C-32-0-75A	713.0		N/A	N/A	713.0		2.6	"....."
C-32-0-75B	714.2	714	N/A	N/A	714.2	714	2.6	"....."
C-18-0-150A	454.9		N/A	N/A	454.9		2.9	"....."
C-18-0-150B	419.8	437	N/A	N/A	419.8	437	2.7	"....."
C-25-0-150A	583.1		N/A	N/A	583.1		2.2	"....."
C-25-0-150B	597.4	590	N/A	N/A	597.4	590	2.3	"....."
C-32-0-150A	706.9		N/A	N/A	706.9		2.3	"....."
C-32-0-150B	680.8	694	N/A	N/A	680.8	694	2.2	"....."

ตารางที่ 4.13 สรุปผลการทดสอบ Tubed concrete column (ต่อ)

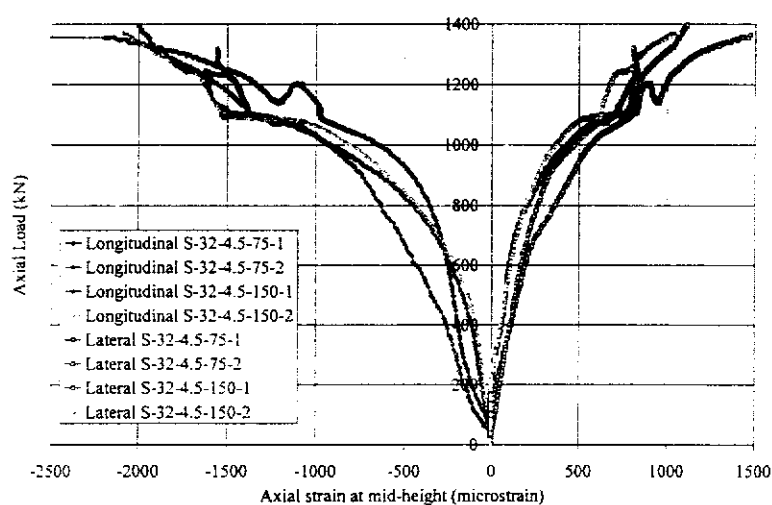
ตัวอย่าง	P_{max}^1 (kN)	P_{max}^1 เฉลี่ย	การหาค่าที่ P_{max}^1 (mm)	ลำดับการเกิด P_{max}^1	P_{ult} (kN)	P_{ult} เฉลี่ย (kN)	การหาค่าที่ P_{ult} (mm)	mode of failure
S-18-3.2-75A	615.9		4.5	at local tube wall buckling	861.5		99.7	local tube wall buckling และ concrete cracking
S-18-3.2-75B	648.2	632	4.6	at local tube wall buckling	886.1	874	99.5	"
S-25-3.2-75A	719.0		4.2	at local tube wall buckling	990.3		60.6	"
S-25-3.2-75B	730.4	725	4.2	at local tube wall buckling	1002.6	996	53.5	"
S-32-3.2-75A	854.7		4.4	before local tube wall buckling	1052.6		59.9	"
S-32-3.2-75B	863.2	859	4.5	before local tube wall buckling	1063.4	1058	59.3	"
S-18-3.2-150A	607.9		4.6	at local tube wall buckling	816.0		59.4	"
S-18-3.2-150B	603.0	606	4.5	at local tube wall buckling	792.1	804	61.1	"
S-25-3.2-150A	705.3		3.7	before local tube wall buckling	1021.6		66.6	"
S-25-3.2-150B	703.3	704	3.6	before local tube wall buckling	957.8	990	61.5	"
S-32-3.2-150A	841.6		4.0	before local tube wall buckling	1111.6		101.2	"
S-32-3.2-150B	841.3	842	4.0	before local tube wall buckling	1115.8	1114	100.9	"

ตารางที่ 4.13 สรุปผลการทดสอบ Tubed concrete column (ต่อ)

ตัวอย่าง	P_{max}^I (kN)	P_{max}^I เฉลี่ย	การหาคัดตัวที่ P_{max}^I (mm)	ลักษณะการเกิด P_{max}^I	P_{ult} (kN)	P_{ult} เฉลี่ย (kN)	การหาคัดตัวที่ P_{ult} (mm)	mode of failure
S-18-4.5-75A	739.4		5.0	at local tube wall buckling	1354.9		100.4	local tube wall buckling (และ concrete cracking
S-18-4.5-75B	751.3	745	4.9	at local tube wall buckling	1336.4	1346	100.8	"....."
S-25-4.5-75A	772.2		4.1	at local tube wall buckling	1419.1		102.3	"....."
S-25-4.5-75B	815.5	794	4.2	at local tube wall buckling	1393.30	1406	102.0	"....."
S-32-4.5-75A	960.5		4.6	at local tube wall buckling	1363.60		101.2	"....."
S-32-4.5-75B	951.8	956	4.5	at local tube wall buckling	1396.70	1380	100.2	"....."
S-18-4.5-150A	741.6		5.0	at local tube wall buckling	1140.40		99.9	"....."
S-18-4.5-150B	725.9	734	5.0	at local tube wall buckling	1164.40	1152	101.8	"....."
S-25-4.5-150A	734.8		3.4	at local tube wall buckling	1307.40		104.5	"....."
S-25-4.5-150B	737.9	736	3.3	at local tube wall buckling	1274.70	1291	104.6	"....."
S-32-4.5-150A	927.4		4.1	at local tube wall buckling	1320.10		100.7	"....."
S-32-4.5-150B	943.2	935	4.1	at local tube wall buckling	1371.10	1346	102.8	"....."

4.3.2 การถ่ายแรงในเสา Tubed RC column

รูปที่ 4.16 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกน (axial load) ที่กระทำต่อแกนคอนกรีตเสริมเหล็กและค่าความเครียดในแนวแกน (ค่าเป็นลบ) และในแนวขวาง (ค่าเป็นลบ) ที่วัดได้จาก strain gage ที่จุดกึ่งกลางความสูงของปลอกเหล็กของเสา Tubed RC column S-32-4.5 จากรูป จะเห็นได้ว่า Tubed RC column มีพฤติกรรมการถ่ายแรงในเสาในลักษณะเช่นเดียวกับใน Tubed concrete column โดยแรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อแกนคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปลายเสาบางส่วนได้ถูกถ่ายมายังปลอกเหล็ก โดยทำให้เกิดความเครียดในแนวแกนของปลอกเหล็กอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเสาเกิดการวิบัติ



รูปที่ 4.16 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของเสา S-32-4.5

ในลักษณะเช่นเดียวกับใน Tubed concrete column การถ่ายแรงดังกล่าวเกิดจาก interaction ระหว่างแกนคอนกรีตเสริมเหล็กและปลอกเหล็กโดยอาศัย micro-interlocking และความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของผิวด้านในของปลอกเหล็กและผิวของแกนคอนกรีต ในช่วงแรก ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง จนกระทั่งแรงกดอัดมีค่าอยู่ในช่วง 60-70% ของแรงกดอัดสูงสุดแรก P_{max}^i ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การถ่ายแรงจากแกนคอนกรีตเสริมเหล็กไปยังปลอกเหล็กมีค่าที่ค่อนข้างสมบูรณ์ ในช่วงที่สอง ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีแนวโน้มของความชันที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แรงกดอัดต่อแกนคอนกรีตเสริมเหล็กได้ถูกถ่ายมายังปลอกเหล็กในอัตราที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำ ซึ่งกล่าวเป็นนัยว่า ปลอกเหล็กช่วยรับแรงกดอัดเพิ่มมากขึ้นกว่าที่แกนคอนกรีตเสริมเหล็กรับ อย่างไรก็ตาม การถ่ายแรงในเสา Tubed RC column เกิดขึ้นได้มากกว่าการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นใน Tubed concrete column ดังจะเห็นได้จากการที่ค่าความเครียดที่เกิดขึ้นใน

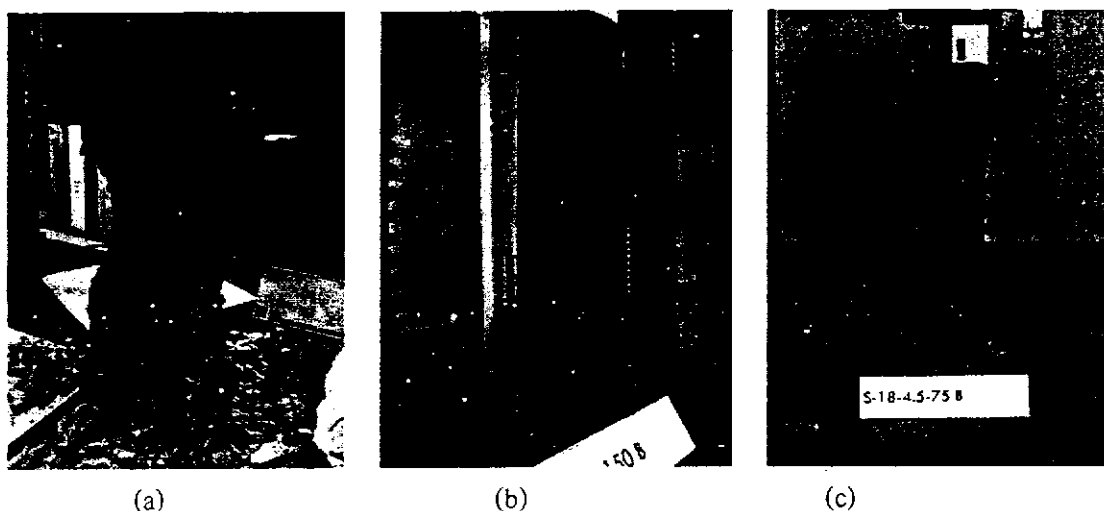
ปลอกเหล็กในหลายกรณีมีค่าถึงความเครียดที่จุดครากของเหล็ก (มีค่ามากกว่า 0.002 mm/mm) โดยสาเหตุหลักน่าจะมาจากกรณีที่ Tubed RC column มีแกนคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีกำลังรับแรงกดอัดที่สูงกว่าแกนคอนกรีตของ Tubed concrete column ดังนั้น หลังจากที่คอนกรีตที่ปลายเสาเกิดการ crushing และเหล็กเสริมเกิดการครากเฉพาะที่ที่บริเวณปลายเสาและปลอกเหล็กเกิดการโก่งตัวเฉพาะที่แล้ว แรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อ Tubed RC column จะเกิดการกระจายลงสู่บริเวณกึ่งกลางเสามากขึ้น เป็นผลทำให้ปลอกเหล็กของ Tubed RC column รับแรงกดอัดสูงขึ้นและมีค่าความเครียดสูงดังกล่าว

4.3.3 ลักษณะการวิบัติของ Tubed RC column

จากผลการทดสอบดังกราฟที่แสดงในภาคผนวก ข และจากข้อมูลในตารางที่ 4.13 พบว่า การวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงมีลักษณะการวิบัติที่ค่อยเป็นค่อยไปมากกว่าเสาคอนกรีตอ้างอิง แต่ยังคงเป็นลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับลักษณะการวิบัติของ Tubed concrete column และ Tubed RC column โดยเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงถึงจุดรับแรงกดอัดสูงสุดที่ค่าการหดตัวอยู่ในช่วง 2.2 ถึง 3.0 mm การวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงนี้เกิดจากการครากของเหล็กเสริมหลักในแนวแกนและการ crushing ของคอนกรีต ซึ่งเมื่อคอนกรีตเกาะออกแล้ว เหล็กปลอกจะไม่มีคอนกรีตยึดรั้งได้เพียงพอ ทำให้เกิดการแอ่นออกของเหล็กปลอก ส่งผลให้เกิดการโก่งคาะ (buckling) ของเหล็กเสริมหลัก เนื่องจากการสูญเสียการยึดรั้ง (restraint) ตรงตำแหน่งเหล็กปลอกที่แอ่นออก ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4.17(a) จากนั้น เสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะสูญเสียกำลังและเกิดการวิบัติอย่างรวดเร็ว โดยเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะห่างของเหล็กปลอก 75 mm มีการวิบัติที่ค่าการหดตัวสูงกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะห่างของเหล็กปลอก 150 mm เล็กน้อย และมีพฤติกรรมช่วงหลังจากจุดดังกล่าวที่คิดว่าจะ (มีกำลังลดลงช้ากว่าและเหนียวมากกว่า) โดยมีสาเหตุมาจากการเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระยะห่างของเหล็กปลอก 75 mm มีเหล็กปลอกช่วยยึดเหล็กเสริมในแนวแกนที่ถี่กว่าทำให้การโก่งคาะของเหล็กแกนเกิดได้ยากกว่า อย่างไรก็ตาม เสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงทั้งสองกรณีมีกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดที่ไม่แตกต่างกัน

การวิบัติของ Tubed RC column ทุกต้นมีลักษณะการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure) เช่นเดียวกับในกรณีของ Tubed concrete column โดยเสาทั้งหมดเกิดการวิบัติที่ค่าการหดตัวเกินกว่า 100 mm ซึ่งแสดงว่า Tubed RC column เป็นเสาที่มีความเหนียวที่สูงมากกว่า Tubed concrete column โดยที่การวิบัติเกิดขึ้นโดยเริ่มจากการครากของเหล็ก ตามด้วยการ crushing ของคอนกรีต เช่นเดียวกับในกรณีของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก จากนั้น ผนังของปลอกเหล็กจะเกิดการโก่งคาะเฉพาะที่ (local tube wall buckling) ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4.17b และ 4.17c โดยยังคงสามารถรับแรงกดอัดในแนวแกนได้เพิ่มขึ้นและมีค่าการหดตัวในแนวแกนที่สูงมาก ซึ่งแสดงว่า Tubed RC column มีความเหนียวในแนวแกนที่สูง

โดยสรุปแล้ว จากการทดสอบพบว่าเสา Tubed RC column ที่ใช้ในการศึกษาเกิดการวิบัติเฉพาะที่เนื่องจากปลอกเหล็กมีความหนาไม่เพียงพอในการป้องกันการโก่งเคาะเฉพาะที่ ดังนั้นเช่นเดียวกับในกรณีของ Tubed concrete column วิธีการหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสา Tubed RC column ที่มีอัตราส่วน B/l ตามที่ศึกษา คือ การป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติเฉพาะที่ดังกล่าว โดยการเสริมความหนาของปลอกเหล็กในบริเวณดังกล่าวให้มีค่าความแกร่งต่อการคดที่เพียงพอ และทำให้การถ่ายแรงจากแกนคอนกรีตเสริมเหล็กเข้าสู่ปลอกเหล็กได้มากขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 4.17 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสา Tubed RC column

4.3.4 กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของ Tubed RC column และค่าความเครียดสูงสุด

ตารางที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดค่าแรกและค่าความเครียดที่เกิดขึ้นของ Tubed RC column จาก column ที่ 3 ของตารางพบว่า เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีค่า f'_c ที่เท่ากันแล้ว Tubed RC column ที่ใช้ปลอกเหล็กที่บางกว่า (เสาในกลุ่มที่ 2) จะมีอัตราส่วน P_{max}^1 ต่อแรงกดอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตอ้างอิง (P_c) อยู่ในช่วง 1.24 ถึง 1.60 ซึ่งต่ำกว่า Tubed RC column ที่ใช้ปลอกเหล็กที่หนากว่า (เสาในกลุ่มที่ 3) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1.56 ถึง 2.07 (ซึ่งมีลักษณะเดียวกับที่พบใน Tubed concrete column แต่มีค่าที่สูงกว่า Tubed concrete column เล็กน้อย) ซึ่งแสดงว่า Tubed RC column มีพฤติกรรมการรับแรงกดอัดที่เหนียวมากกว่า Tubed concrete column เล็กน้อย เนื่องจากมีเหล็กเสริม นอกจากนั้นแล้วยังพบว่า อัตราส่วน P_{max}^1 / P_c มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อปลอกเหล็กมีความหนามากขึ้นจาก 3.2 mm เป็น 4.5 mm กล่าวคือ มีอัตราส่วน P_{max}^1 / P_c อยู่ในช่วง 1.24-1.60 ในกรณีหนา 3.2 mm และ อยู่ในช่วง 1.56-2.07 ในกรณีหนา 4.5 mm ในทางกลับกัน เมื่อพิจารณาให้ปลอกเหล็กที่มีความหนาและ f'_c ของคอนกรีตที่เท่ากันแล้ว (เช่น เปรียบเทียบเสา S-18-3.2-75 และเสา S-18-4.5-150 ในกลุ่มที่ 2 เป็นต้น) พบว่า อัตราส่วน P_{max}^1 / P_c มีแนวโน้มไม่

เปลี่ยนแปลง เมื่อระยะระหว่างเหล็กปลอกมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในกรณีนี้ที่ศึกษานี้ ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกที่เป็นไปตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 ไม่มีอิทธิพลต่อกำลังรับแรงกอดสูงสุดของ Tubed RC column

ตารางที่ 4.14 กำลังแรงกอดสูงสุดแรกและค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นใน Tubed RC column

ตัวอย่าง	ผลการทดสอบ				
	P_{max}^1 (kN)	P_{max}^1 / P_c	ϵ_{max}^1 (% strain)	$\epsilon_{max}^1 / \epsilon_{u,RC}$	พฤติกรรมการรับแรง
C-18-0-75	459.9	-	0.396	-	-
C-25-0-75	605.3	-	0.329	-	-
C-32-0-75	713.6	-	0.351	-	-
C-18-0-150	437.4	-	0.373	-	-
C-25-0-150	590.3	-	0.305	-	-
C-32-0-150	693.9	-	0.298	-	-
S-18-3.2-75	711.8	1.55	1.726	4.36	แบบที่ 3
S-25-3.2-75	811.2	1.34	1.459	4.44	แบบที่ 3
S-32-3.2-75	883.7	1.24	0.969	2.76	แบบที่ 3
S-18-3.2-150	701.4	1.60	1.607	4.30	แบบที่ 3
S-25-3.2-150	810.5	1.37	1.383	4.54	แบบที่ 3
S-32-3.2-150	876.1	1.26	0.893	3.00	แบบที่ 3
S-18-4.5-75	914.9	1.99	2.667	6.73	แบบที่ 1
S-25-4.5-75	1044.5	1.73	2.667	8.11	แบบที่ 1
S-32-4.5-75	1113.2	1.56	2.667	7.60	แบบที่ 2
S-18-4.5-150	904.0	2.07	2.667	7.14	แบบที่ 1
S-25-4.5-150	1033.6	1.75	2.667	8.75	แบบที่ 1
S-32-4.5-150	1101.9	1.59	2.667	8.95	แบบที่ 2

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่แรง P_{max}^1 ของ Tubed RC column ต่อค่าความเครียดที่จุดรับแรงสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง ($\epsilon_{max}^1 / \epsilon_{u,RC}$) ใน column ที่ 5 พบว่า Tubed RC column มีค่า $\epsilon_{max}^1 / \epsilon_{u,RC}$ สูงกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงอยู่ในช่วง 2.76 ถึง 8.95 เท่า โดยขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการรับแรงของ Tubed RC column โดยเสาที่มีพฤติกรรมแบบที่ 1 และแบบที่ 2 มีค่า $\epsilon_{max}^1 / \epsilon_{u,RC}$ ที่สูงอยู่ในช่วง 6.73 ถึง 8.95 เท่า เมื่อเทียบกับ Tubed RC column ที่มีพฤติกรรมแบบที่ 3 ที่มีค่า $\epsilon_{max}^1 / \epsilon_{u,RC}$ อยู่ในช่วง 2.76-4.54 เท่า ดังนั้น ในการใช้งานจริง พฤติกรรมของ Tubed RC column แบบที่ 1 และแบบที่ 2 เป็นพฤติกรรมที่ควรออกแบบให้เกิดขึ้นโดยพฤติกรรมแบบที่ 1 จะเป็นพฤติกรรมที่เหมาะสมที่สุดเช่นเดียวกับในกรณี Tubed concrete column โดยปลอกเหล็กควรมี

ความหนาที่เพียงพอ ตลอดจนมีรอยเชื่อมต่อของผนังที่สมบูรณ์ที่จะช่วยทำให้ปลอกเหล็กรองรับความดันเนื่องจากการขยายตัวของคอนกรีต ได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนถึงจุดวิบัติ

โดยสรุปแล้ว เช่นเดียวกับในกรณี Tubed concrete column เมื่อคอนกรีตที่ใช้ในเสามีกำลังเท่ากันแล้ว ความหนาของปลอกเหล็กที่สูงขึ้นเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ Tubed RC column มีกำลังสูงขึ้น และที่ความหนาที่เท่ากัน กำลังของ Tubed RC column จะลดลง เมื่อคอนกรีตที่ใช้ในเสามีกำลังสูงขึ้น โดยพฤติกรรมของเสาที่ควรให้เกิดขึ้นคือพฤติกรรมแบบที่ 1 ซึ่งมีความเหนียวที่สูง

4.3.5 การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC column กับสมการของเสาเชิงประกอบ

ตารางที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดค่าแรก P_{max}^I ที่ทดสอบได้กับค่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของเสาเชิงประกอบตามทฤษฎี (สมการที่ 4.1 ซึ่งเป็นสมการหา nominal ultimate strength ของเสาเชิงประกอบตามข้อกำหนด Eurocode 4 ENV 1994-1-1 ของ BS1) โดยพิจารณาให้กำลังรับแรงกดอัดที่จุดครากของเหล็กเสริมรวมอยู่ในเทอมของกำลังรับแรงกดอัดที่จุดครากของปลอกเหล็ก

ตารางที่ 4.15 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P_{max}^I และค่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุดตามทฤษฎี

ตัวอย่าง	P_{max}^I (kN)	$P_{max}^I / P_{s,cal}$	$P_{max}^I / P_{c,cal}$	$P_{max}^I / P_{u,cal}$
C-18-0-75	459.9		1.07	1.07
C-25-0-75	605.3		1.04	1.04
C-32-0-75	713.6		0.99	0.99
C-18-0-150	437.4		1.01	1.01
C-25-0-150	590.3		1.02	1.02
C-32-0-150	693.9		0.97	0.97
S-18-3.2-75	711.8	1.03	1.60	0.63
S-25-3.2-75	811.2	1.18	1.37	0.63
S-32-3.2-75	883.7	1.40	1.31	0.68
S-18-3.2-150	701.4	0.99	1.54	0.60
S-25-3.2-150	810.5	1.15	1.33	0.62
S-32-3.2-150	876.1	1.37	1.28	0.66
S-18-4.5-75	914.9	0.71	1.97	0.52
S-25-4.5-75	1044.5	0.76	1.56	0.51
S-32-4.5-75	1113.2	0.91	1.52	0.57
S-18-4.5-150	904.0	0.70	1.94	0.51
S-25-4.5-150	1033.6	0.70	1.44	0.47
S-32-4.5-150	1101.9	0.89	1.48	0.56

จากตารางพบว่า ค่า $P_{max}^1 / P_{u,cal}$ ของ Tubed RC column มีค่าอยู่ในช่วง 0.47-0.68 (ซึ่งต่ำกว่าในกรณีของเสา Tubed concrete column ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.49-0.77 เล็กน้อย) ซึ่งน้อยกว่าค่า 1.0 เป็นอย่างมาก ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า เสาตัวอย่างทดสอบไม่มี full interaction เกิดขึ้นระหว่างแกนคอนกรีต เหล็กเสริม และปลอกเหล็ก ซึ่งจะเห็นได้จากการที่ตัวอย่าง Tubed RC column ที่ศึกษานี้เกิดการวิบัติ โดยการครากของเหล็กเสริม การ crushing ของคอนกรีต และ local tube wall buckling ของผนังปลอกเหล็กที่ปลายด้านบนและล่างของปลายทั้งสองด้านของเสา ซึ่งเป็นการวิบัติแบบ localized failure โดยมีสาเหตุหลักมาจากปลอกเหล็กมีความหนาไม่เพียงพอที่จะช่วยโอบรัดแกนเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อถ่ายแรงกดอัด ไปยังแกนคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่กึ่งกลางเสา เพื่อส่งเสริมให้เกิด confining effect ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่า ซึ่งแตกต่างกับสมมติฐานสมการข้างต้นสมมติให้มี full interaction เกิดขึ้นระหว่างแกนคอนกรีต เหล็กเสริม และปลอกเหล็กจนถึงจุดวิบัติ

ตารางที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดค่าแรก P_{max}^1 ที่ทดสอบได้กับค่าที่คำนวณได้จากสมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 (สมการที่ 2.2) โดยที่ P_{ET}^1 เป็นค่ากำลังรับแรงกดอัดที่รวมกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็กเข้ากับสมการที่ 2.2 และ P_{ET}^2 เป็นค่ากำลังรับแรงกดอัดที่ไม่รวมกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็กเข้ากับสมการที่ 2.2 จากตารางพบว่า ค่า P_{max}^1 / P_{ET}^1 ของ Tubed RC column ทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 0.48-0.70 (ซึ่งต่ำกว่าในกรณีของ Tubed concrete column ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.54-0.87) ซึ่งน้อยกว่า 1.0 เป็นอย่างมาก เช่นเดียวกับในกรณีค่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุดตามทฤษฎีข้างต้น ดังนั้น การรวมกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็กเข้ากับสมการที่ 2.2 จะทำให้สมการดังกล่าว overestimate กำลังของ Tubed RC column ซึ่งไม่ปลอดภัยในการใช้งานเป็นอย่างมาก แต่เมื่อพิจารณาค่า P_{max}^1 / P_{ET}^2 ของ Tubed RC column พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 1.28-1.81 (ซึ่งต่ำกว่าในกรณีของ Tubed concrete column ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1.43-2.30) แล้ว จะเห็นได้ว่า การไม่รวมกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็กเข้ากับสมการที่ 2.2 จะทำให้สมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ว.ส.ท. ทำนายกำลังของ Tubed RC column มีค่าค่อนข้างต่ำกว่าที่ควรจะเป็น (underestimate) ซึ่งมีความปลอดภัยในการใช้งาน แต่อาจไม่ประหยัดนัก ดังนั้น เช่นเดียวกับในกรณี Tubed concrete column เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 ตามข้อกำหนดที่ 4314 ที่ให้ทำการคำนวณหาำลังของเสาเชิงประกอบโดยใช้เงื่อนไขเช่นเดียวกับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปนั้นและให้กำลังในการรับแรงตามแนวแกนใดๆ ที่กำหนดให้รับโดยคอนกรีตของเสาต้องถ่ายผ่านเข้าไปในคอนกรีตโดยองค์อาคารหรือเป็นหูช้างในลักษณะเบกทาน โดยตรงลงบนคอนกรีตของเสานั้น (ซึ่งเมื่อพิจารณารูปแบบของเสาที่ใช้ในการวิจัยนี้แล้ว กำลังของเสาที่กำหนดให้ใช้คือ กำลังของเสาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง) แล้วพบว่า ข้อกำหนดดังกล่าวอาจจะก่อให้เกิดความไม่ปลอดภัยต่อการออกแบบเสาเชิงประกอบเป็นอย่างมากในด้านหนึ่ง และอาจมีความปลอดภัยสูงอีกด้านหนึ่ง แต่ไม่มีประสิทธิภาพในการใช้งานนัก ดังนั้น ข้อกำหนด

ดังกล่าวควรพิจารณาปรับแก้ให้เหมาะสมกับข้อมูลที่ทดสอบได้ ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในช่วงท้ายของหัวข้อนี้

ตารางที่ 4.16 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P_{max}^1 และค่ากำลังรับแรงตามมาตรฐาน ว.ส.ท.

ตัวอย่าง	P_{max}^1 (kN)	P_{EIT} (kN)	P_{max}^1 / P_{EIT}	P_{EIT}^2 (kN)	P_{max}^1 / P_{EIT}^2
C-18-0-75	459.9	413.9	1.11	413.9	1.11
C-25-0-75	605.3	542.9	1.11	542.9	1.11
C-32-0-75	713.6	661.0	1.08	661.0	1.08
C-18-0-150	437.4	413.9	1.06	413.9	1.06
C-25-0-150	590.3	542.9	1.09	542.9	1.09
C-32-0-150	693.9	661.0	1.05	661.0	1.05
S-18-3.2-75	711.8	984.8	0.64	412.7	1.53
S-25-3.2-75	811.2	1113.4	0.65	541.3	1.34
S-32-3.2-75	883.7	1231.2	0.70	659.1	1.30
S-18-3.2-150	701.4	984.8	0.61	412.7	1.47
S-25-3.2-150	810.5	1113.4	0.63	541.3	1.30
S-32-3.2-150	876.1	1231.2	0.68	659.1	1.28
S-18-4.5-75	914.9	1416.8	0.53	411.8	1.81
S-25-4.5-75	1044.5	1545.1	0.51	540.1	1.47
S-32-4.5-75	1113.2	1662.6	0.58	657.6	1.45
S-18-4.5-150	904.0	1416.8	0.52	411.8	1.78
S-25-4.5-150	1033.6	1545.1	0.48	540.1	1.36
S-32-4.5-150	1101.9	1662.6	0.56	657.6	1.42

ตารางที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดค่าแรก P_{max}^1 ที่ทดสอบได้กับค่าที่คำนวณได้จากสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC LRFD (สมการที่ 2.15) โดยในการคำนวณได้พิจารณาเฉพาะพื้นที่ของปลอกเหล็กเท่านั้นโดยไม่พิจารณาพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมคอนกรีต จากตารางพบว่า อัตราส่วน P_{max}^1 / P_{AISC} ของ Tubed RC column ทั้งหมดมีค่าอยู่ในช่วง 0.60-0.88 (ซึ่งใกล้เคียงกับกรณีของ Tubed concrete column ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.60-0.94) ซึ่งน้อยกว่า 1.0 เช่นเดียวกับในกรณีต่างๆ ข้างต้น ขอให้ทราบด้วยว่า หนึ่งในเหตุผลในทางปฏิบัติที่อัตราส่วน P_{max}^1 / P_{AISC} มีค่าค่อนข้างต่ำกว่า 1.0 คือ Tubed RC column ที่ศึกษา มีความหนาของปลอกเหล็กไม่ผ่านตามข้อกำหนดของ AISC LRFD ใดๆก็ตาม จากทั้งสามกรณีข้างต้น สมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC LRFD ให้ค่าอัตราส่วน P_{max}^1 / P_{AISC} ของ Tubed concrete column ที่

ใกล้เคียง 1.0 มากที่สุด ดังนั้น เช่นเดียวกับกรณีของ Tubed concrete column จึงสรุปในเบื้องต้นได้ว่า ในการออกแบบเสา Tubed RC column ผู้ออกแบบจะต้องกำหนดให้ความหนาของปลอกเหล็กมีค่าอย่างน้อยตามข้อกำหนดของ AISC LRFD

ตารางที่ 4.17 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P_{max}^I และค่ากำลังรับแรงตามมาตรฐาน AISC LRFD

ตัวอย่าง	P_{max}^I (kN)	P_{AISC} (kN)	P_{max}^I / P_{AISC}
S-18-3.2-75	711.8	791.5	0.80
S-25-3.2-75	811.2	888.4	0.82
S-32-3.2-75	883.7	976.4	0.88
S-18-3.2-150	701.4	791.5	0.76
S-25-3.2-150	810.5	888.4	0.79
S-32-3.2-150	876.1	976.4	0.86
S-18-4.5-75	914.9	1143.0	0.65
S-25-4.5-75	1044.5	1235.2	0.64
S-32-4.5-75	1113.2	1318.9	0.72
S-18-4.5-150	904.0	1143.0	0.64
S-25-4.5-150	1033.6	1235.2	0.60
S-32-4.5-150	1101.9	1318.9	0.71

โดยสรุปแล้ว จากผลการทดสอบพบว่า Tubed RC column ที่ใช้ในการศึกษานี้มีความหนาของผนังของปลอกเหล็กที่น้อยเกินไป ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ Tubed RC column เกิดการวิบัติที่แรงกดอัดมีค่าต่ำกว่าค่าที่คำนวณได้จากสมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เนื่องจากการวิบัติแบบ localized failure ของคอนกรีตและปลอกเหล็ก (ในลักษณะเดียวกับที่พบใน Tubed concrete column) ดังนั้น Tubed RC column ที่ใช้ในการศึกษานี้จึงไม่มี full interaction เกิดขึ้นระหว่างคอนกรีต เหล็กเสริม และปลอกเหล็ก และเป็นผลทำให้ไม่มี confining effect เกิดขึ้นต่อแกนคอนกรีตเสริมเหล็ก อย่างไรก็ตาม จาก column ที่ 3 ของตารางที่ 4.14 พบว่า ปลอกเหล็กช่วยทำให้แกนคอนกรีตเสริมเหล็กมีกำลังเพิ่มสูงขึ้น อยู่ในช่วง 1.24 ถึง 1.60 สำหรับเสาที่ใช้ปลอกเหล็กบาง (ไม่ผ่านเกณฑ์ของ ว.ส.ท. และไม่ผ่านเกณฑ์ของ AISC LRFD) และอยู่ในช่วง 1.56 ถึง 2.07 สำหรับเสาที่ใช้ปลอกเหล็กหนา (ผ่านเกณฑ์ของ ว.ส.ท. แต่ไม่ผ่านเกณฑ์ของ AISC LRFD) โดยสูงกว่าในกรณีของ Tubed concrete column เล็กน้อย โดยการเสริมกำลังให้กับแกนคอนกรีตเสริมเหล็กดังกล่าวอาศัย mechanism ในการถ่ายแรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อแกนคอนกรีตบางส่วนไปยังปลอกเหล็กที่หุ้มแกนคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้ micro-interlocking และแรงเสียดทานระหว่างผิวของแกนคอนกรีตเสริมเหล็กและปลอกเหล็ก อย่างไรก็ตาม ในการศึกษานี้ เราไม่สามารถทำนายส่วนของแรงกดอัดที่ปลอกเหล็กช่วยรองรับจาก

แกนคอนกรีตเนื่องจาก mechanism ข้างต้นได้โดยตรง (ซึ่งอาจทำได้โดยการทำการทดสอบที่เหมาะสม แล้วทำการ calibrate model ของ finite element analysis เพื่อทำการศึกษาเชิงลึกต่อไป) ดังนั้น ในเบื้องต้น เราอาจจะพิจารณาส่วนที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวเป็นส่วนความปลอดภัยของ Tubed RC column ได้

จากข้อมูลการเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC column กับสมการต่างๆ ข้างต้น พบว่า สมการที่เหมาะสมที่สุดที่ควรนำมาใช้ในการออกแบบ Tubed RC column ที่มีอัตราส่วน B/t ที่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่ AISC LRFD กำหนดคือ สมการกำลังรับแรงกดอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ในรูปของสมการที่ 2.2 โดยนำตัวคูณ 0.85 ออกจากเทอมกำลังของคอนกรีต เนื่องจากจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ป्लอกเหล็กมีความสามารถในการช่วยให้แกนคอนกรีตเสริมเหล็กไม่เกิดการวิบัติแบบเปราะ เป็นผลทำให้คอนกรีตในแกนคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถพัฒนากำลังได้จนถึงกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต นอกจากนั้นแล้ว เนื่องจากการเสริมกำลังของปลอกเหล็กต่อแกนคอนกรีตเสริมเหล็กยังต้องการศึกษาอีกต่อไป แต่ในเบื้องต้นพบว่า ปลอกเหล็กสามารถเสริมกำลังให้กับแกนคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างน้อย 24% (ภายใต้ขอบเขตการวิจัยที่ศึกษา) และเนื่องจากเหล็กมีกำลังครากสูงกว่ากำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตมาก ดังนั้น เราอาจพิจารณาให้พื้นที่ของปลอกเหล็กเป็นพื้นที่ของคอนกรีตเพิ่มเติมของ Tubed RC column ได้ และเทอมพื้นที่ของคอนกรีต $A_g - A_s$ จึงควรเปลี่ยนเป็นพื้นที่ทั้งหมดของหน้าตัด Tubed RC column หรือ A_g โดยเหตุผลข้างต้น สมการที่ 2.2 สามารถเขียนใหม่ได้ในรูป

$$P_{TRC} = f'_{co} A_g + f_y A_s \quad (4.3)$$

โดยที่	P_{TRC}	คือกำลังรับแรงกดอัดของ Tubed RC column
	f'_{co}	คือกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีตที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C469
	A_g	คือพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของ Tubed RC column
	A_s	คือพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมหลัก
	f_y	คือกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมหลัก

ซึ่งคล้ายคลึงกับสมการของ Eurocode 4 ENV 1994-1-1 ของ BSI

ตารางที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดค่าแรก P_{max}^I ที่ทดสอบได้กับค่าที่คำนวณได้จากสมการออกแบบที่ 4.2 จากตารางจะเห็นได้ว่า ค่า P_{max}^I / P_{TRC} ที่ได้ อยู่ในช่วง 1.09 ถึง 1.32 สำหรับเสาที่ใช้ปลอกเหล็กบาง (ไม่ผ่านเกณฑ์ของ ว.ส.ท. และไม่ผ่านเกณฑ์ของ AISC LRFD) และอยู่ในช่วง 1.17-1.55 สำหรับเสาที่ใช้ปลอกเหล็กหนา (ผ่านเกณฑ์ของ ว.ส.ท. แต่ไม่ผ่านเกณฑ์ของ AISC LRFD) ซึ่งจะเห็นได้ว่า สมการที่เสนอใหม่นี้เหมาะสมในกรณีของ

Tubed RC column ที่ใช้ปลอกเหล็กบาง 3.2 mm แต่จะ underestimate กำลังของ Tubed concrete column ที่ใช้ปลอกเหล็กหนา 4.5 mm

ตารางที่ 4.18 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P_{max}^i และค่าแรง P_{TRC}

ตัวอย่าง	P_{max}^i (kN)	P_{TRC} (kN)	P_{max}^i / P_{TRC}
S-18-3.2-75	711.8	480.4	1.32
S-25-3.2-75	811.2	632.5	1.15
S-32-3.2-75	883.7	771.8	1.11
S-18-3.2-150	701.4	480.4	1.26
S-25-3.2-150	810.5	632.5	1.11
S-32-3.2-150	876.1	771.8	1.09
S-18-4.5-75	914.9	479.3	1.55
S-25-4.5-75	1044.5	631.0	1.26
S-32-4.5-75	1113.2	770.6	1.24
S-18-4.5-150	904.0	479.3	1.53
S-25-4.5-150	1033.6	631.0	1.17
S-32-4.5-150	1101.9	770.0	1.21

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลของการใช้ปลอกเหล็กที่มีต่อกำลังและความเหนียวของคอนกรีตภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนและลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน และเพื่อนำเสนอสมการที่เหมาะสมในการวิเคราะห์กำลังของเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน โดยตัวอย่างเสาที่ใช้ในการศึกษาเป็นเสาคอนกรีตอ้างอิงและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงที่ใช้เป็นพื้นฐานในการเปรียบเทียบกับเสา Tubed concrete column และเสา Tubed RC column ตามลำดับ แรงกระทำเป็นแรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อแกนคอนกรีตโดยตรงและไม่กระทำต่อปลอกเหล็ก โดยตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการศึกษาคือกำลังของคอนกรีตและความหนาของปลอกเหล็กที่ใช้ในการเสริมกำลังให้กับเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งจากการศึกษาพบข้อสรุปที่สำคัญดังนี้

5.1 สรุปผลการทดสอบ Tubed concrete column และ Tubed RC column

5.1.1 สรุปผลการทดสอบ Tubed concrete column

จากการทดสอบ Tubed concrete column พบว่า

1. Tubed concrete column มีพฤติกรรมการรับแรงแบ่งออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงแรกเชิงเส้นตรงถึงจุดที่เสาคอนกรีตอ้างอิงรับแรงกดอัดสูงสุดหรือประมาณ 50-70 % ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดแรกของเสา และช่วงที่สอง ไร้เชิงเส้นตรง โดยช่วงนี้ พฤติกรรมของเสาถูกแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ขึ้นอยู่กับ f'_{co} ของคอนกรีต f_y ของปลอกเหล็ก และความหนาของท่อเหล็ก คือ 1.) strain hardening 2.) elastic-perfectly plastic และ 3.) strain-softening โดยพฤติกรรมแบบที่ 1 และแบบที่ 2 เป็นพฤติกรรมของเสาที่เหมาะสมในการใช้งาน เนื่องจากเสาดังกล่าวมีค่า $\epsilon_u / \epsilon_{u,ref}$ สูงกว่าเสาที่มีพฤติกรรมแบบที่ 3 มากและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนเกิดการวิบัติ

2. ปลอกเหล็กสามารถช่วยเสริมกำลังและความเหนียวในแนวแกนให้กับเสาคอนกรีตอ้างอิงได้ค่อนข้างสูง โดยแรงกดอัดสูงสุดแรก P_{max}^1 ที่กำหนดให้เป็น “แรงกดอัดสูงสุดใช้งาน” ของเสาเกิดขึ้นในช่วงที่แกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวและมักจะเกิดก่อนที่หรือจุดที่ผนังของปลอกเหล็กเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่มีค่าอยู่ในช่วง 1.29 ถึง 2.01 เท่าของแรงกดอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตอ้างอิง โดย mechanism ที่ใช้ในการถ่ายแรงระหว่างแกนคอนกรีตและปลอกเหล็กเกิดจาก micro-interlocking และความเสียดทานระหว่างแกน

คอนกรีตและปลอกเหล็ก นอกจากนั้นแล้ว Tubed concrete column ยังมีค่าความเครียดที่แรง P_{max}^I สูงกว่าค่าความเครียดที่จุดรับแรงกคอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตอ้างอิงในช่วง 2.0 ถึง 6.5 เท่า

3. การวิบัติของ Tubed concrete column เกิดที่ค่าการหดตัวที่สูงมากเกินกว่า 50 mm และมีลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป ซึ่งแสดงว่า Tubed concrete column เป็นเสาที่มีความเหนียวในแนวแกนที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับเสาอ้างอิงที่เกิดการวิบัติเมื่อค่าการหดตัวในช่วง 2-3 mm อย่างไรก็ตาม การวิบัติของเสาเป็นแบบ localized failure โดยการแตกร้าวของคอนกรีตภายใต้จุดที่แรงกคอัดกระทำและการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังของปลอกเหล็กที่ปลายด้านบนและล่างของเสา ดังนั้น กำลังของเสา Tubed concrete column ที่ทดสอบได้จึงมีค่าต่ำกว่าที่ทำนายโดยสมการของเสาเชิงประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตาม Tubed concrete column มีกำลังสูงกว่าเสาคอนกรีตอ้างอิงเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้ปลอกเหล็กที่หนาเกินกว่าที่กำหนดโดยข้อกำหนดของมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 ข้อ 4314

5.2.2 สรุปผลการทดสอบ Tubed RC column

จากการทดสอบ Tubed RC column พบว่า

1. พฤติกรรมการรับแรงกคอัดในแนวแกนและลักษณะการวิบัติของ Tubed RC column มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับ Tubed concrete column เป็นอย่างมาก โดยมีแรงกคอัดสูงสุดแรก P_{max}^I ที่สูงกว่า Tubed concrete column เนื่องจากมีเหล็กเสริมคอนกรีตช่วยรับแรงกระทำ และสูงกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้ปลอกเหล็กที่หนาเกินกว่าที่กำหนดโดยข้อกำหนดของมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 ข้อ 4314

2. พฤติกรรมการรับแรงของ Tubed RC column แบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง เช่นเดียวกับในกรณีของ Tubed concrete column คือ ช่วงแรกเชิงเส้นตรงถึงจุดที่เสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงรับแรงกคอัดสูงสุดหรือประมาณ 60-70 % ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดแรกของ Tubed column และช่วงที่สองไร้เชิงเส้นตรง โดยช่วงนี้ พฤติกรรมของ Tubed column แบ่งออกได้เป็น 3 แบบ ขึ้นอยู่กับ f_{co}' ของคอนกรีตและความหนาของปลอกเหล็ก คือ 1.) strain hardening 2.) elastic-perfectly plastic และ 3.) strain-softening โดยพฤติกรรมแบบที่ 1 และแบบที่ 2 เป็นพฤติกรรมของเสาที่เหมาะสมในการใช้งาน เนื่องจากเสานี้มีค่า $\epsilon_u / \epsilon_{u,ref}$ สูงกว่าเสาที่มีพฤติกรรมแบบ ที่ 3 มากและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนเกิดการวิบัติ

3. เช่นเดียวกับในกรณีของ Tubed concrete column ปลอกเหล็กสามารถช่วยเสริมกำลังและความเหนียวในแนวแกนให้กับเสาคอนกรีตอ้างอิงได้ค่อนข้างสูง โดยแรงกคอัดสูงสุดแรก P_{max}^I อยู่ในช่วง 1.24 ถึง 2.07 เท่าของแรงกคอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตคอนกรีต

อ้างอิง และมีค่าความเครียดที่แรง P_{max}^I สูงกว่าค่าความเครียดที่จุดรับแรงกดอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตอ้างอิงในช่วง 2.76 ถึง 8.95 เท่า ซึ่งสูงกว่าในกรณี Tubed concrete column เล็กน้อย

4. การวิบัติของ Tubed RC column มีลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป เช่นเดียวกับในกรณีของ Tubed concrete column โดยเสาทั้งหมดเกิดการวิบัติจริงที่ค่าการกดตัวเกินกว่า 50 mm ซึ่งแสดงว่า Tubed RC column เป็นเสาที่มีความเหนียว (ductility) ที่สูงมาก การวิบัติเกิดขึ้นโดยการโป่งออกของผนังของท่อเหล็กที่ปลายด้านบนและล่าง เช่นเดียวกับเสา Tubed concrete column อย่างไรก็ตาม การวิบัติของเสาเป็นแบบ localized failure โดยการโก่งเดาะเฉพาะที่ของผนังของปลอกเหล็กที่ปลายด้านบนและล่างของเสา ดังนั้น กำลังของเสา Tubed concrete column ที่ทดสอบได้จึงมีค่าต่ำกว่าที่ทำนายโดยสมการของเสาเชิงประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตาม Tubed concrete column มีกำลังสูงกว่าเสาคอนกรีตอ้างอิงเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้ปลอกเหล็กที่หนาเกินกว่าที่กำหนดโดยข้อกำหนดของมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 ข้อ 4314

5.2 ข้อเสนอแนะในการใช้งาน

ในงานวิจัยนี้ ตัวอย่างทดสอบได้ถูกออกแบบเสาเชิงประกอบโดยอิงข้อมูลตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 ข้อ 4314 สำหรับเสาหน้าคดสี่เหลี่ยมด้านเท่า ที่มีกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนอย่างน้อย 300 kN และไม่เกิน 1500 kN ซึ่งเหมาะสมสำหรับอาคารขนาดเล็กถึงขนาดกลาง เช่น บ้าน ทาวเฮาส์ และอาคารพาณิชย์ ซึ่งได้ข้อเสนอแนะในการใช้งานดังนี้

1. จากผลการศึกษาพบว่า ข้อกำหนดอัตราส่วน B/t ของมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 ข้อ 4314 ที่ใช้ในการออกแบบเสาเชิงประกอบให้ค่าอัตราส่วน B/t ที่ต่ำเกินไป โดยต่ำกว่าค่าที่ AISC LRFD กำหนดในการออกแบบเสาเชิงประกอบถึง 1.225 เท่า เป็นผลทำให้เสา Tubed concrete column และเสา Tubed RC column เกิด localized failure ดังนั้น ข้อกำหนดดังกล่าวของว.ส.ท. 1008-38 ข้อ 4314 ควรได้รับการปรับปรุงให้เหมาะสมต่อไป

2. จากการวิเคราะห์ข้อมูลดังที่ปรากฏในบทที่ 4 พบว่า สมการที่ควรใช้ในการวิเคราะห์กำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสา Tubed concrete column และเสา Tubed RC column ในลักษณะที่ใช้ในการศึกษานี้ควรอยู่ในรูปของสมการดังนี้

ในกรณีของ Tubed concrete column สมการดังกล่าวอยู่ในรูปสมการที่ 4.2

$$P_{TCC} = f'_{co} A_g$$

เมื่อ P_{TCC} คือกำลังรับแรงกดอัดของ Tubed concrete column

f'_{co} คือกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีตที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C469

A_g คือพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของ Tubed concrete column

ในกรณีของ Tubed RC column สมการดังกล่าวอยู่ในรูปสมการที่ 4.3

$$P_{TRC} = f'_{co} A_g + f_y A_s$$

โดยที่	P_{TRC}	คือกำลังรับแรงกดอัดของ Tubed RC column
	f'_{co}	คือกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีตที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C469
	A_g	คือพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของ Tubed RC column
	A_s	คือพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมหลัก
	f_y	คือกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมหลัก

ซึ่งอยู่ในรูปที่คล้ายคลึงกับสมการของ Eurocode 4 ENV 1994-1-1 ของ British Standard Institute อย่างไรก็ตาม การใช้สมการข้างต้นนั้น เสาคอนกรีตที่อยู่ในขอบเขตของการวิจัยนี้และใช้วิจารณ์ญาณในการนำไปใช้งานเป็นหลัก

5.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

5.4.1 ควรศึกษาผลของความหนาของปลอกเหล็กต่อพฤติกรรมการรับแรง ลักษณะการวิบัติ และกำลังของเสา Tubed concrete column และเสา Tubed RC column ให้ลึกซึ้งมากขึ้น โดยใช้อัตราส่วน B/t อย่างน้อยตามข้อกำหนด AISC LRFD เพื่อเป็นข้อมูลสนับสนุนการปรับปรุงมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 ข้อ 4314 ให้เหมาะสม

5.4.2 ควรนำผลการทดสอบที่ได้ร่วมกับผลการทดสอบที่ได้จากหัวข้อที่ 5.4.1 มาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์เสาโดยใช้ finite element analysis เพื่อทำการ calibrate model จากนั้นทำการศึกษาเสา Tubed concrete column และเสา Tubed RC column ให้ลึกซึ้งมากขึ้น โดยเพิ่มตัวแปรในส่วนของอัตราส่วน B/t อัตราส่วน L/B หน่วยแรงคราก และ โมดูลัสยืดหยุ่นของปลอกเหล็กให้ครอบคลุมการใช้งานจริง และศึกษาในเชิงกลของระบบการถ่ายแรง (load transferring mechanism) ระหว่างผิวคอนกรีตและผนังของปลอกเหล็กที่เกิดขึ้น

5.4.3 ควรมีการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดแบบเอียงศูนย์กลางของเสา Tubed concrete column และเสา Tubed RC column ที่อยู่ในรูปของ Beam-column

5.4.4 ควรศึกษาในส่วนของเสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยใช้ตัวแปรเช่นเดียวกับเสาน้ำตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่า

เอกสารอ้างอิง

- ACI Committee 318 (2005). Building Code Requirement for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills: ACI Committee 318R-05.
- ACI Committee 440 Report (2002). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. ACI Committee 440, Technical Committee Document 440.2R-02.
- American Institute of Steel Construction (1994). Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design (LRFD). 2nd Ed., Chicago.
- Architectural Institute of Japan (1997). Recommendations for Design and Construction of Concrete-Filled Steel Tubular Structures, AIJ. Tokyo, Japan.
- Ansari, F., and Li, Q. (1998). High Strength Concrete Subjected to Triaxial Compression. ACI Materials Journal. 95(6): 747-755.
- ASTM A276-03 (2003). Standard Specifications for Stainless Steel Bars and Shapes. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM A370-03 (2003). Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C39-96 (1996). Standard Test Methods for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C192-98 (1994). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C469-94 (1994). Standard Test Methods for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ration of Concrete in Compression. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM E8-98 (1998). Standard Test Methods for Testing of Metallic Materials. Annual Book of ASTM Standard, Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Attard, M.M. and Setung, S. (1996). Stress-Strain Relationship of Confined and Unconfined Concrete. ACI Materials Journal. Title no.93-M49: 432-442.

- Huang, C.S., Yeh, Y.K., Liu, G.Y., Hu, H.T., Tsai, K.C., Weng, Y.T., Wang, S.H. and Wu, M.H. (2002). Axial load Behavior of Stiffened Concrete Filled Steel Columns. *Journal of Structural Engineering, ASCE*. 128(9): 1222-1230.
- Johansson, M. (2000). Structural Behavior of Circular Steel-Concrete Composite Columns, [Licentiate Thesis]. Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology. Goteborg, Sweden.
- Johansson, M. and Gylltoft, K. (2001). Structural Behavior of Slender Circular Steel-Concrete Composite Columns under Various Means of Load Application. *Steel and Composite Structures*. 1(4):393-410.
- Lam, L. and Teng, J.G. (2003). Design-oriented Stress-Strain Model for FRP-confined Concrete in Rectangular Columns. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 22(13):1149-1186.
- Lin, H.J. and Chen, C.T. (2001). Strength of Concrete Cylinder Confined by Composite Materials. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 20(18): 1577-1600.
- MacGregor, J.G. (1992). *Reinforced Concrete Mechanics and Design*. Second edition. Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. (1988). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering, ASCE*. 114(8):1804-1826.
- Mills, L.L. and Zimmerman, R.M. (1970). Compressive Strength of Plain Concrete under Multiaxial Loading Conditions, *Journal of American Concrete Institute*. 67: 802-807.
- Priestley, M.J.N., Seible, F., Xiao, Y. and Verma, R. (1994b). Steel Jacket Retrofitting of RC Bridge Columns for Enhanced Shear Strength: Test Result and Comparison with Theory. *ACI Structural Journal, ACI*. 91(5): 537-551.
- Richard, 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.
- Sakino, K., Nakahara, H., Morino, S. and Nishiyama, I. (2004). Behavior of Centrally Loaded Concrete-Filled Steel-Tube Short Columns. *Journal of Structural Engineering, ASCE*. 130(2): 1125-1138.
- Schneider, S.P. (1998). Axially Loaded Concrete-Filled Steel Tubes. *Journal of Structural Engineering, ASCE*. 124(10): 1125-1138.

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.

Xiao, Y., He, W. and Choi, K. (2005). Confined Concrete Filled Tubular Columns. Journal of Structural Engineering, ASCE. 131(3): 488-497.

กรรม คำลือ และสิทธิชัย แสงอาทิตย์, “พฤติกรรมของคานคอนกรีตสำเร็จรูปแบบอัดแรงบางส่วนภายใต้แรงกระทำตามขวาง,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, พัทยา, ชลบุรี, 2-4 พฤษภาคม 2548, Vol. 1, หน้า ST 58-63.

จักษดา ชำรงวุฒิ และสิทธิชัย แสงอาทิตย์, “คานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กหน้าตัดรูปตัวซีฝังที่ส่วนรองรับภายใต้แรงกระทำเป็นจุดตามขวาง,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, พัทยา, ชลบุรี, 2-4 พฤษภาคม 2548, Vol. 1, หน้า STR 1-6.

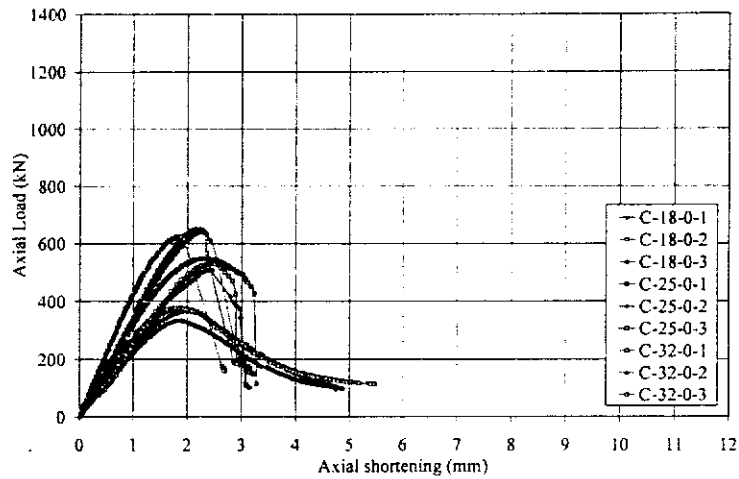
วินิต ช่อวิเชียร (2540). การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

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

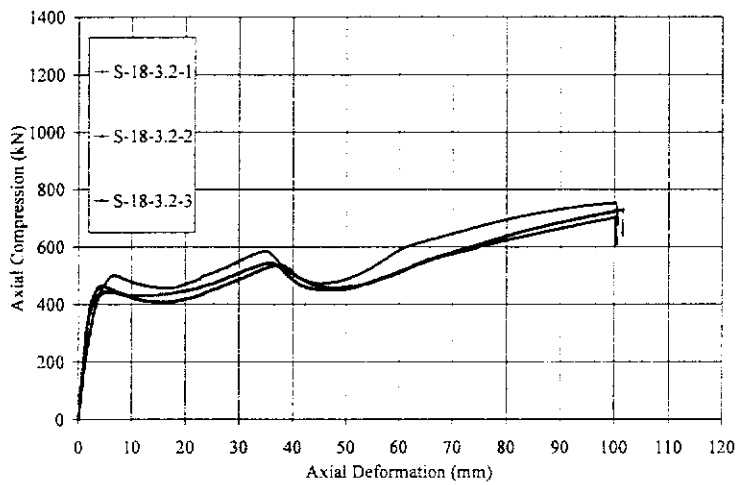
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (2544). ศัพท์วิชาการวิศวกรรมโยธา. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, กรุงเทพมหานคร.

สรณ์ย์ กำจัดโรค และสิทธิชัย แสงอาทิตย์, “เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไบนินภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน,” การประชุมวิชาการนวัตกรรมทางวิศวกรรมสำหรับการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 23-24 มกราคม 2547. (ในรูปแบบ CD-Rom)

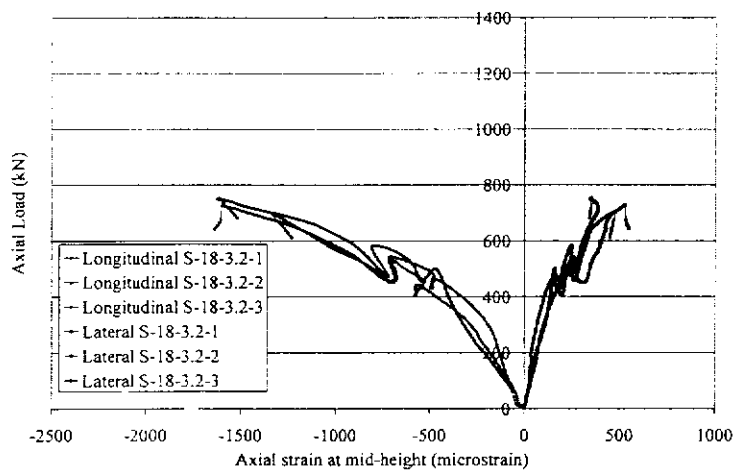
ภาคผนวก ก
กราฟความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวของ
ตัวอย่างเสา Tubed concrete column



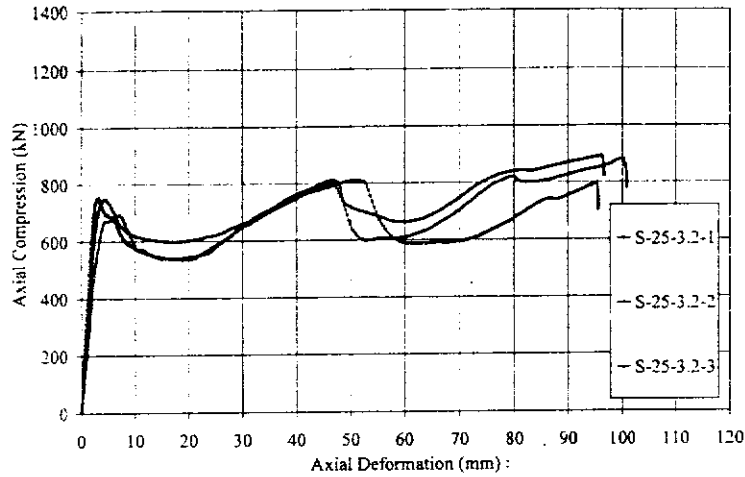
รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสาคอนกรีตอ้างอิง



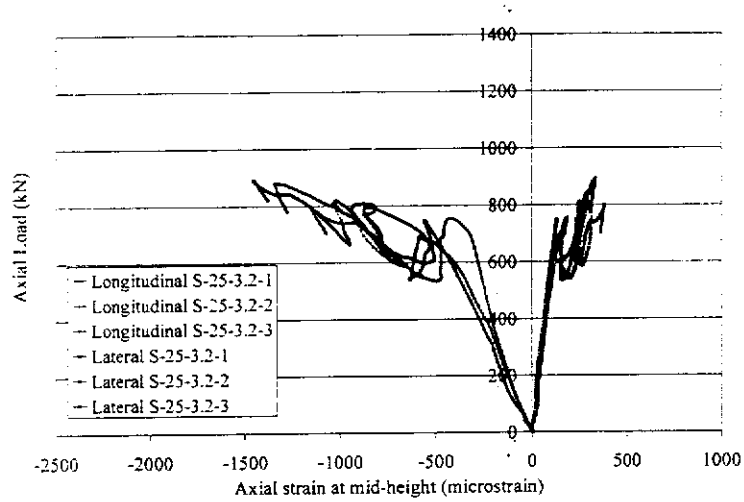
รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา S-18-3.2



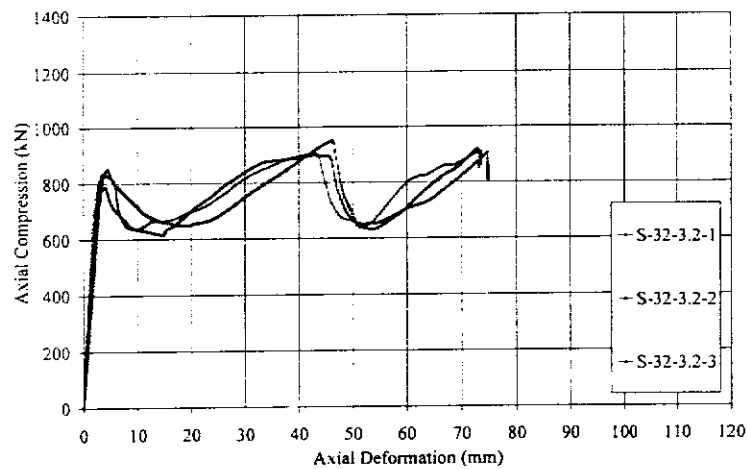
รูปที่ ก.3 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของเสา S-18-3.2



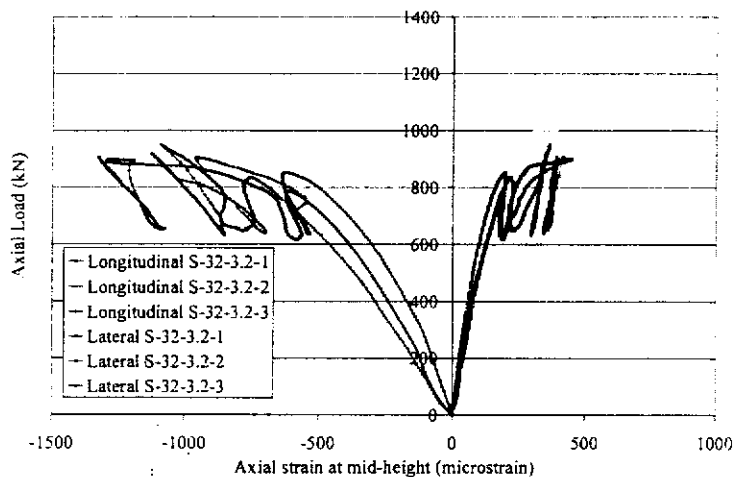
รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา S-25-3.2



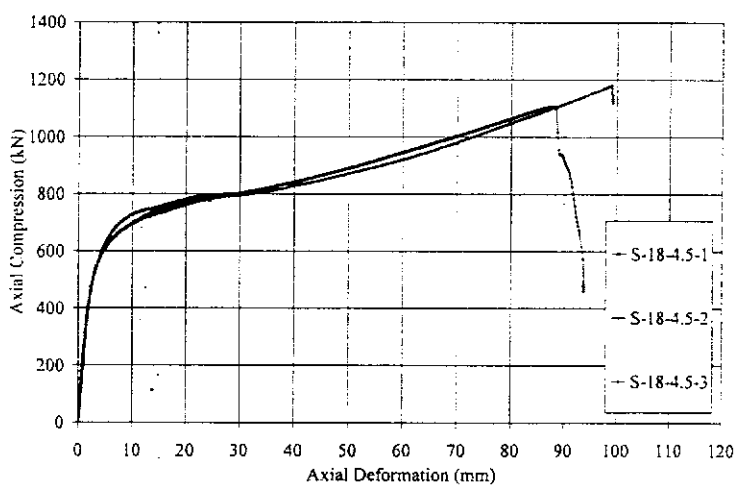
รูปที่ ก.5 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของเสา S-25-3.2



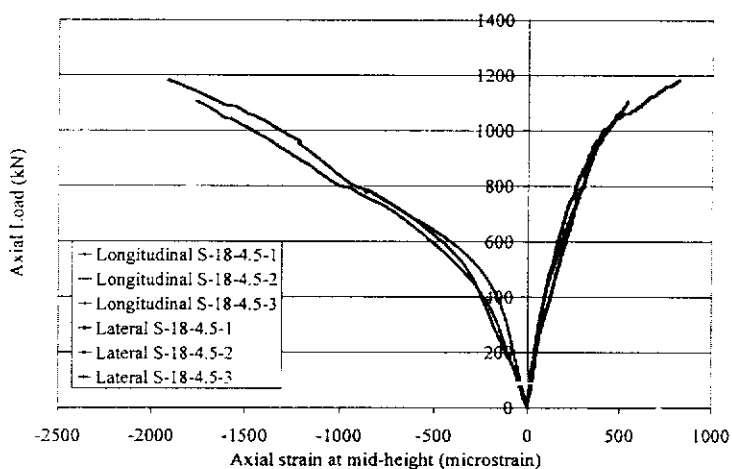
รูปที่ ก.6 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา S-32-3.2



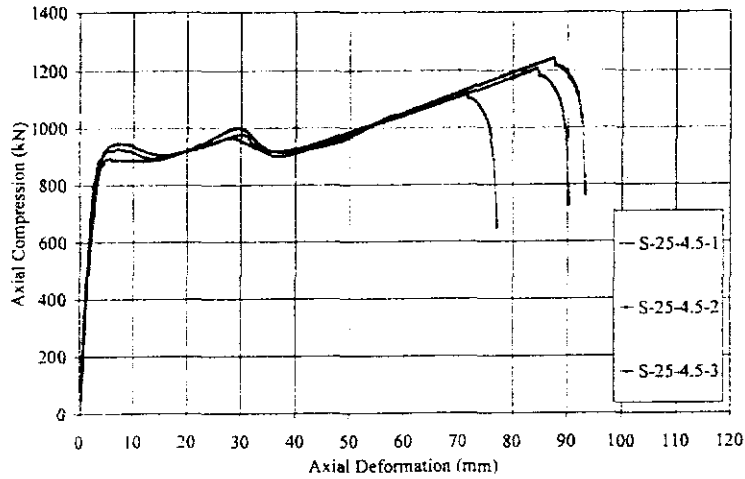
รูปที่ ก.7 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของเสา S-32-3.2



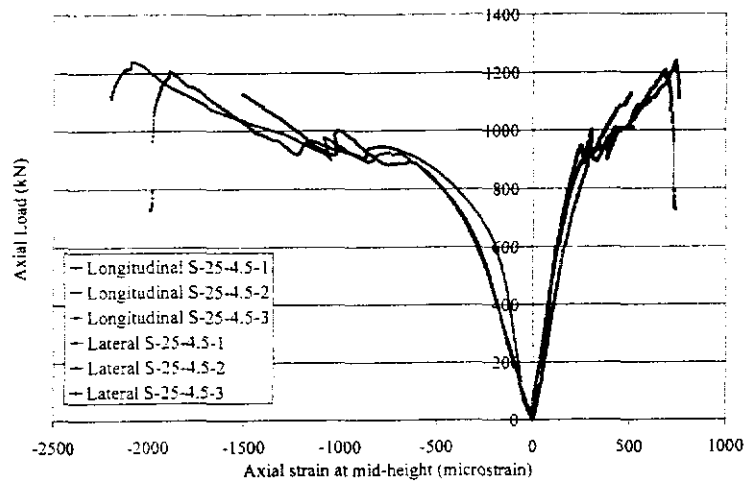
รูปที่ ก.8 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา S-18-4.5



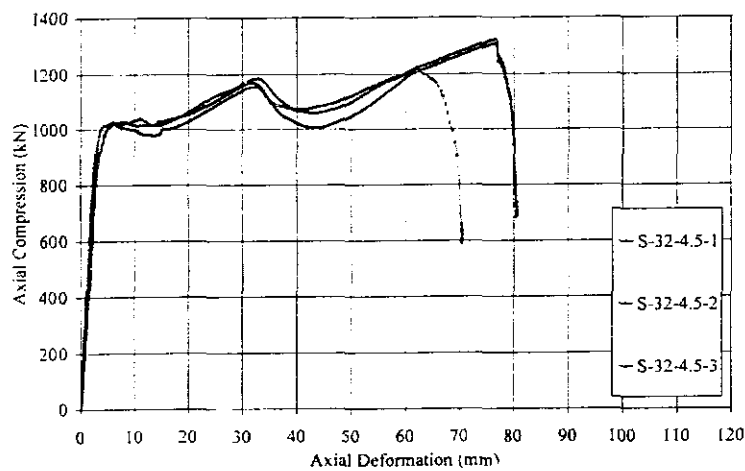
รูปที่ ก.9 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของเสา S-18-4.5



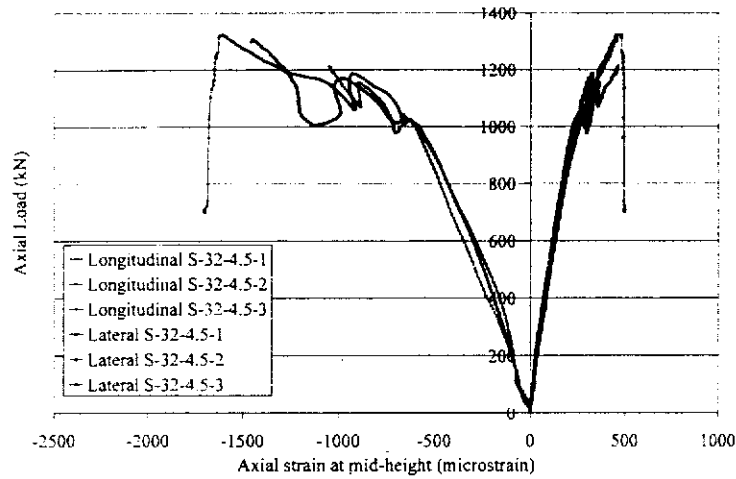
รูปที่ ก.10 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา S-25-4.5



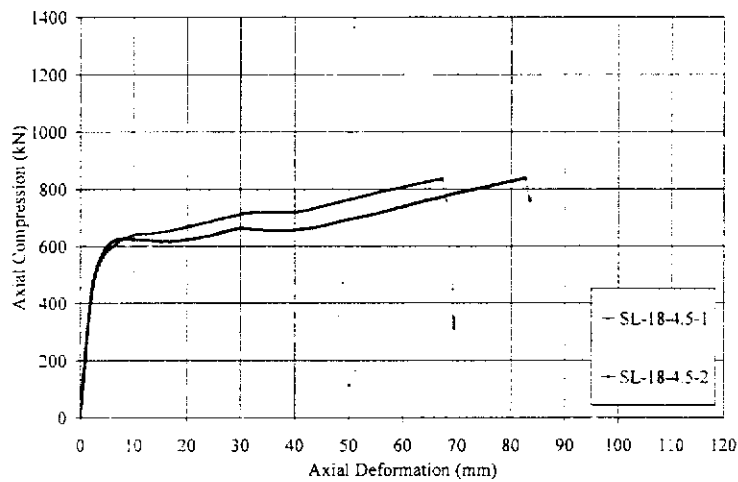
รูปที่ ก.11 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของเสา S-25-4.5



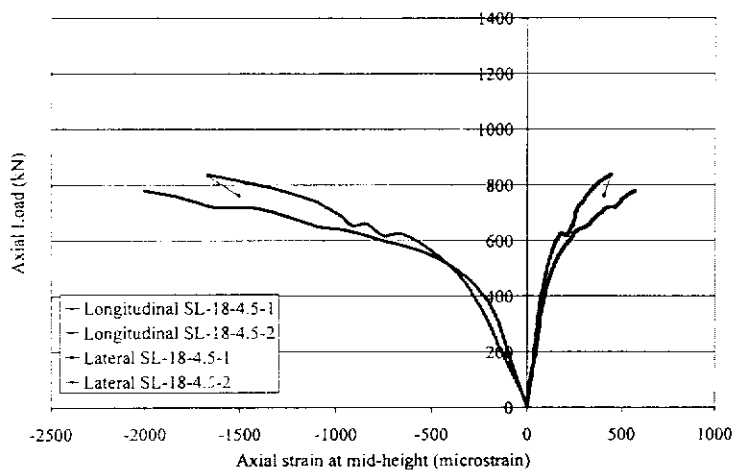
รูปที่ ก.12 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา S-32-4.5



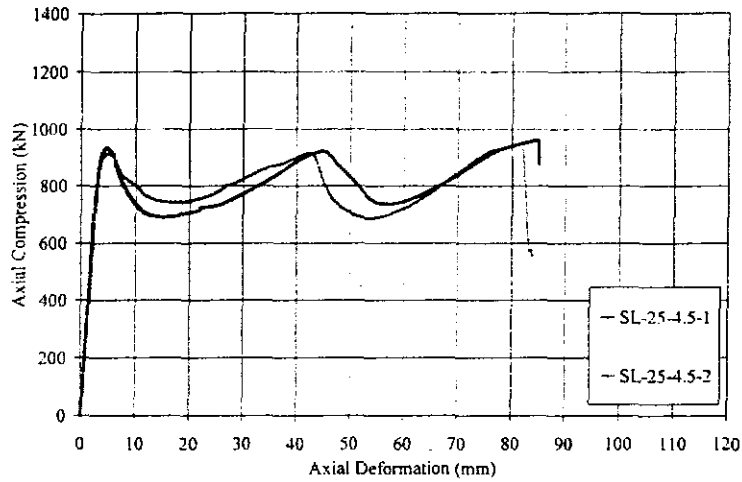
รูปที่ ก.13 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่ตั้งกลางความสูงของเสา S-32-4.5



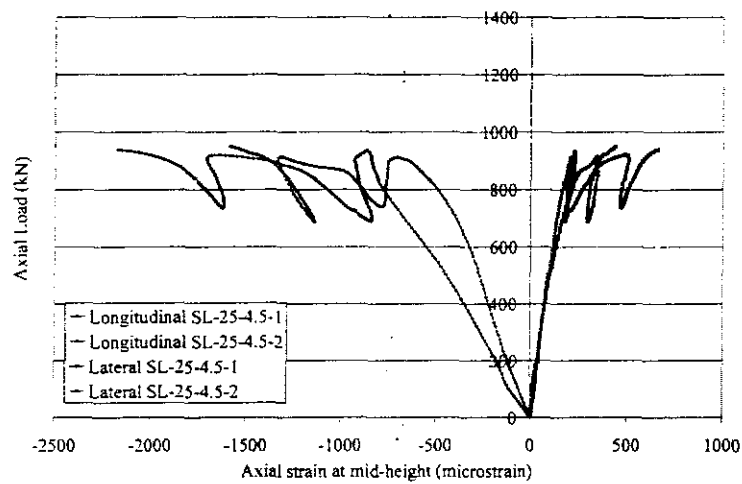
รูปที่ ก.14 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา SL-18-4.5



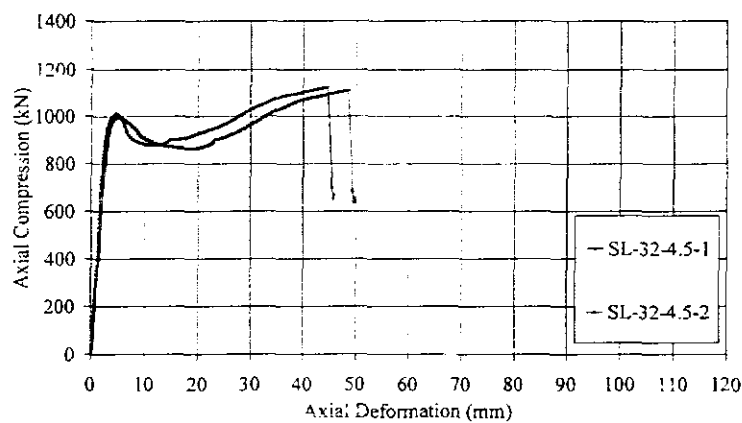
รูปที่ ก.15 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่ตั้งกลางความสูงของเสา SL-18-4.5



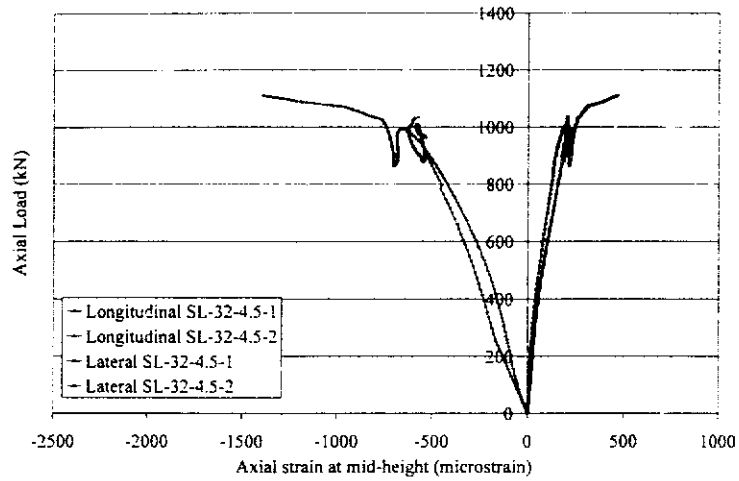
รูปที่ ก.16 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา SL-25-4.5



รูปที่ ก.17 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของเสา SL-25-4.5

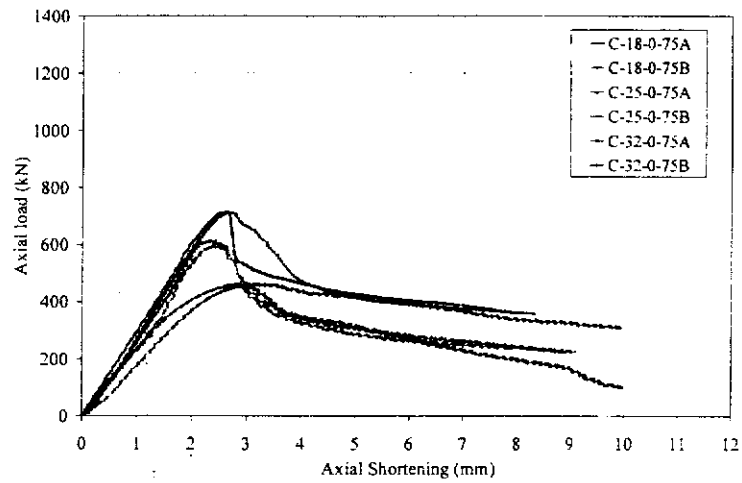


รูปที่ ก.16 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา SL-32-4.5

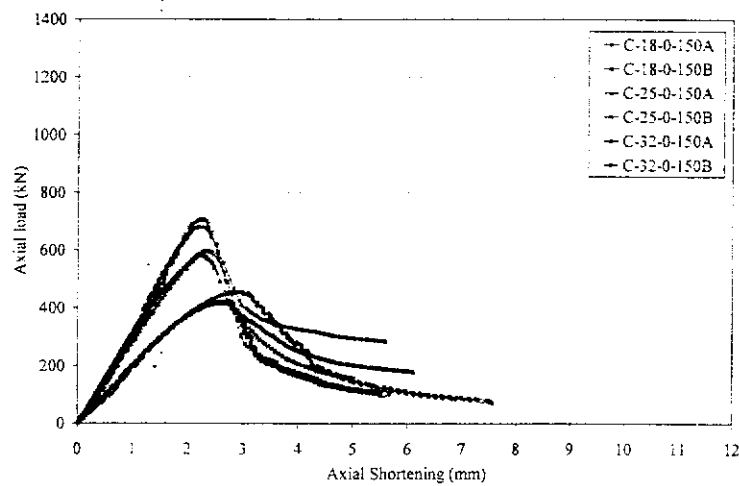


รูปที่ ก.17 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของเสา SL-32-4.5

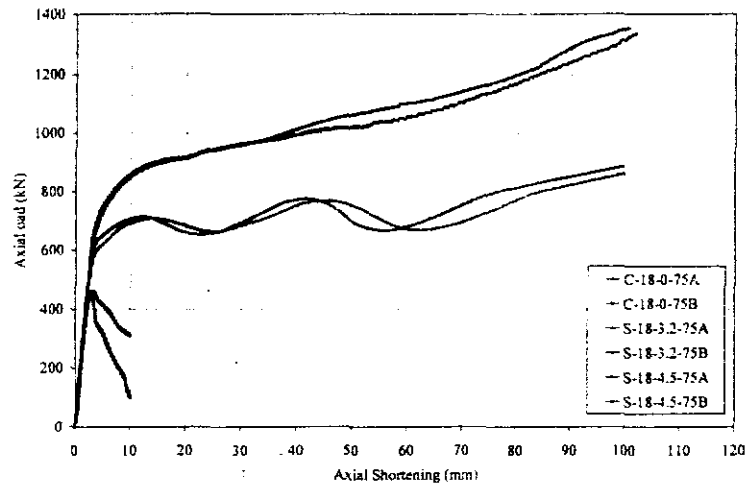
ภาคผนวก ข
กราฟความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวของ
ตัวอย่างเสา Tubed RC column



รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง
ที่มีระยะเหล็กปลอก 75 mm

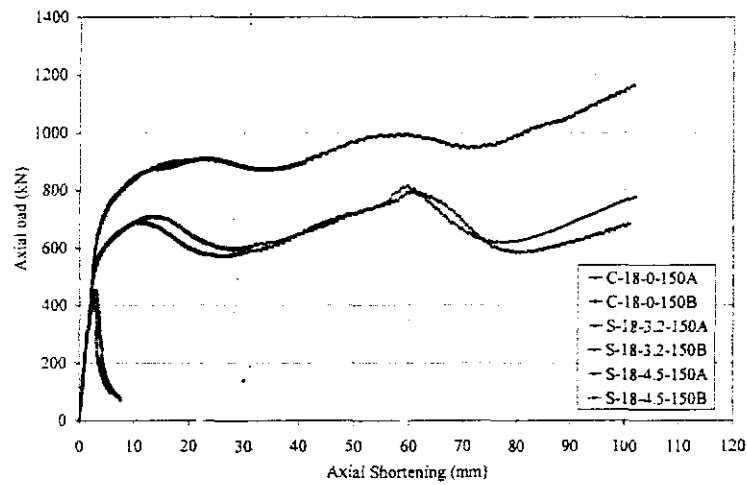


รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง
ที่มีระยะเหล็กปลอก 150 mm



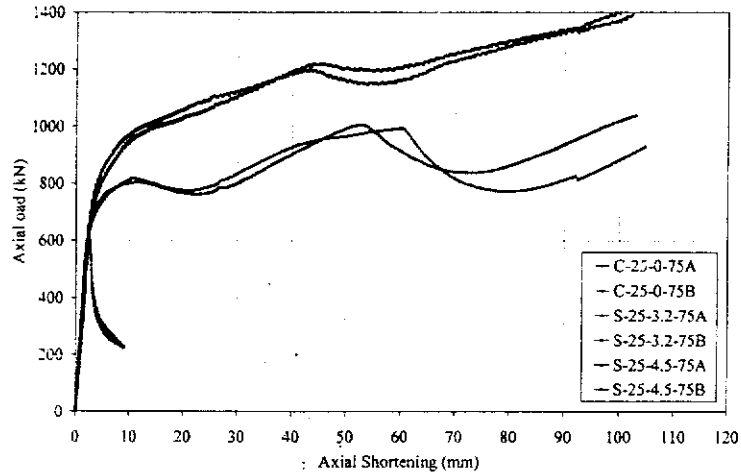
รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา Tubed RC column

ที่มี $f'_{co} = 18$ MPa และระยะเหล็กปลอก 75 mm

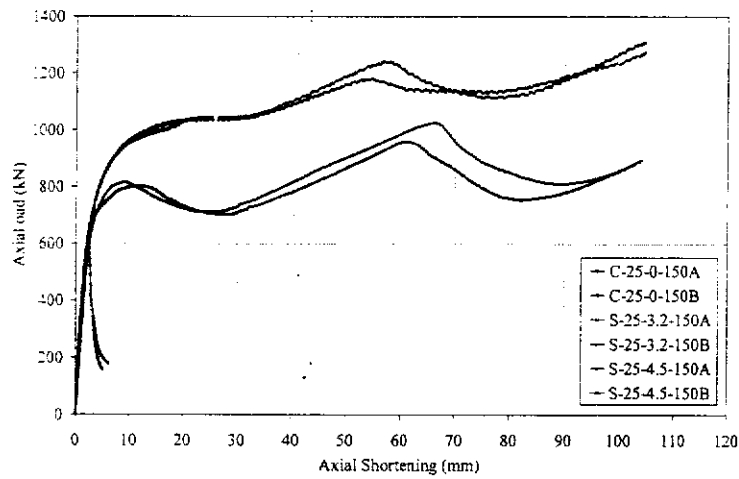


รูปที่ ข.4 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา Tubed RC column

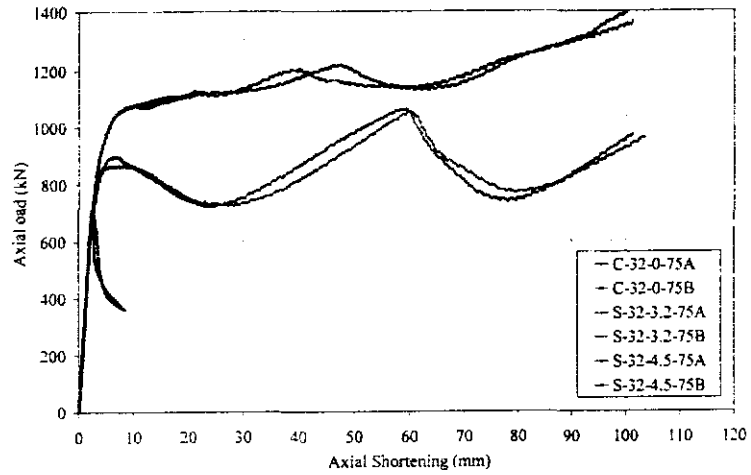
ที่มี $f'_{co} = 18$ MPa และระยะเหล็กปลอก 150 mm



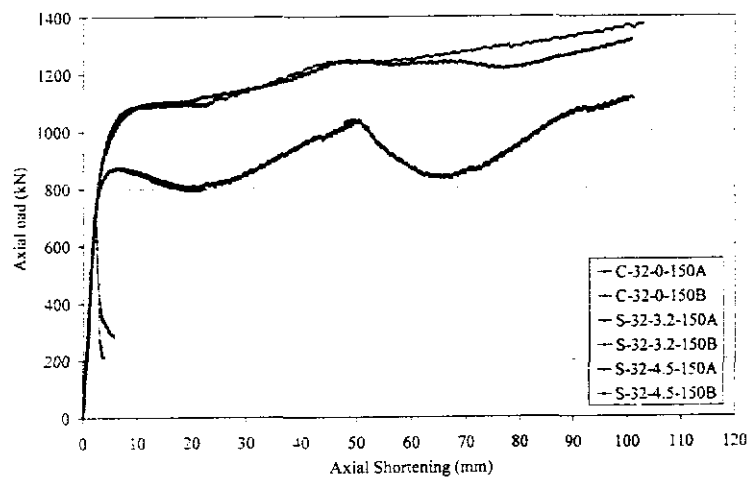
รูปที่ ข.5 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา Tubed RC column
ที่มี $f'_{co} = 25$ MPa และระยะเหล็กปลอก 75 mm



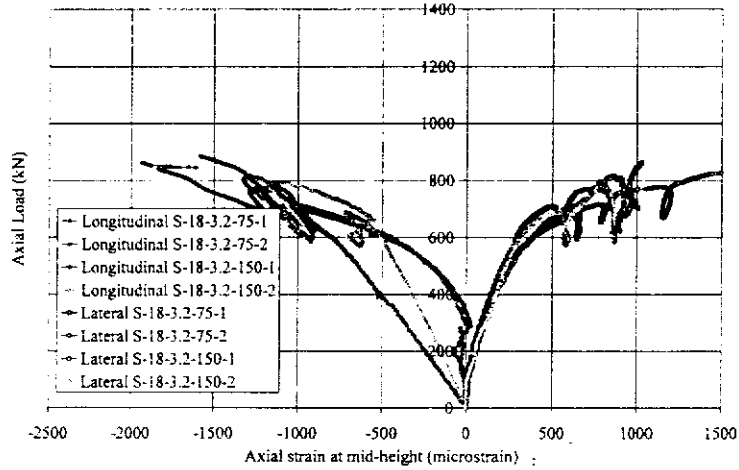
รูปที่ ข.6 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา Tubed RC column
ที่มี $f'_{co} = 25$ MPa และระยะเหล็กปลอก 150 mm



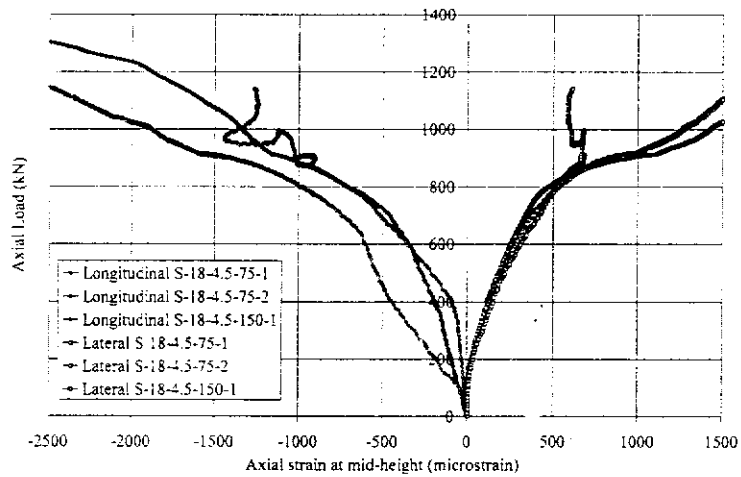
รูปที่ ข.7 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 32$ MPa และระยะเหล็กปลอก 75 mm



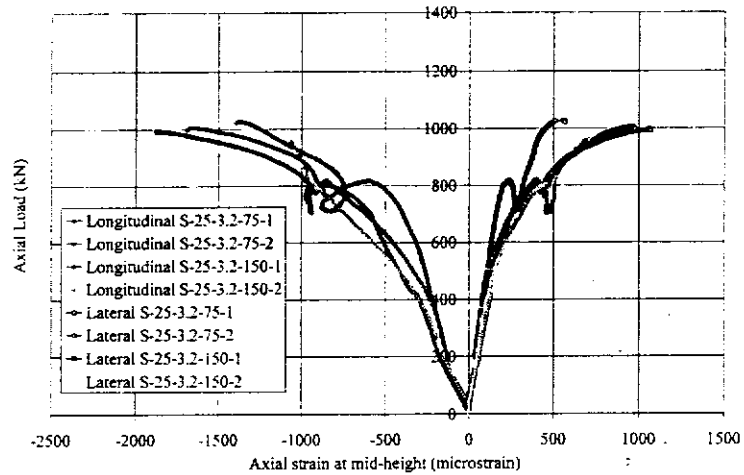
รูปที่ ข.8 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 32$ MPa และระยะเหล็กปลอก 150 mm



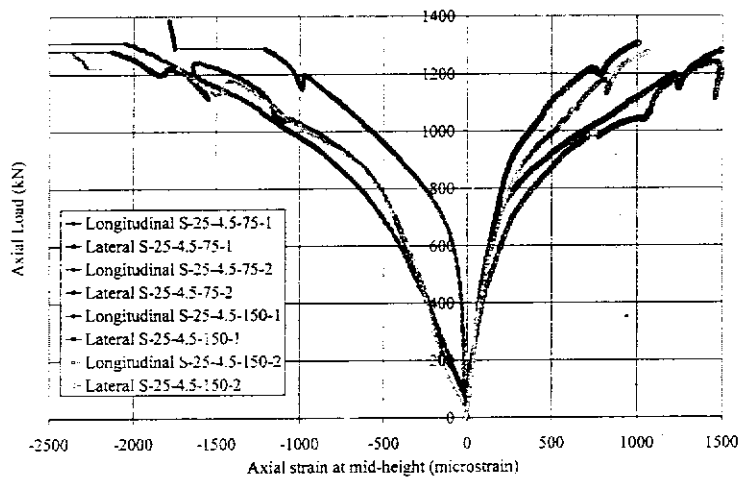
รูปที่ ข.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 18$ MPa และระยะเหล็กปลอก 75 mm



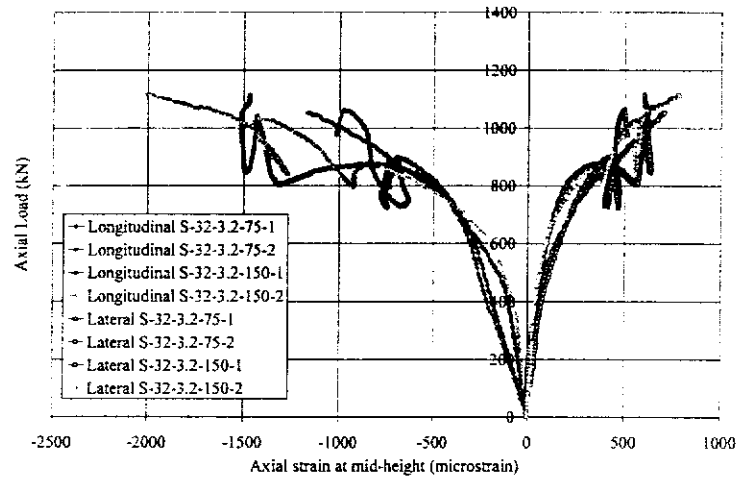
รูปที่ ข.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 18$ MPa และระยะเหล็กปลอก 150 mm



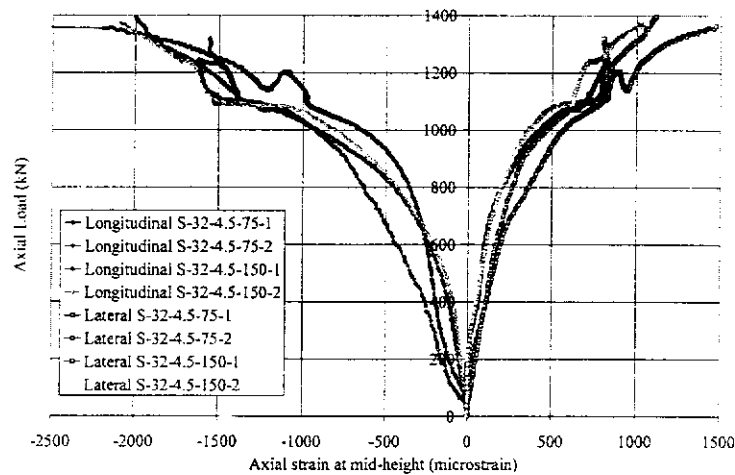
รูปที่ ข.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 25$ MPa และระยะเหล็กปลอก 75 mm



รูปที่ ข.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 25$ MPa และระยะเหล็กปลอก 150 mm



รูปที่ ข.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 32$ MPa และระยะเหล็กปลอก 75 mm



รูปที่ ข.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 32$ MPa และระยะเหล็กปลอก 150 mm

ภาคผนวก ก
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ผลจากการศึกษาในงานวิจัยนี้ได้นำไปสู่การเผยแพร่ผลงานจำนวน 3 ครั้ง ในที่ประชุมวิชาการในระดับชาติ ดังที่ปรากฏรายละเอียดด้านล่าง โดยผู้วิจัยมีแผนจะตีพิมพ์ผลงานในวารสารวิชาการในประเทศอีก 1 ผลงานและจะนำเสนอต่อผู้เกี่ยวข้องในการปรับปรุงมาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38 ข้อ 4314 ให้มีความเหมาะสมต่อไป

1. Thumrongvut, J. and Seangatith, S., "Experimental Investigation on Concrete Columns Confined with Steel Jackets Subjected to Concentric Axial Compression," The 6th National Symposium on Graduate Research, Graduate School, Chulalongkorn University, Bangkok, October 13-14, 2006, paper no. J1_J0028. (in CD-Rom format)
2. จั๊กจกดา ชำรงวุฒิและสิทธิชัย แสงอาทิตย์, "ผลของการโอบรัดของปลอกเหล็กและปลอก stainless steel ต่อพฤติกรรมเสาคอนกรีต," การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 2, สมาคมคอนกรีตไทย, อุตรธานี, 25-27 ตุลาคม 2549. paper no. STR-002. (in CD-Rom format)
3. สิทธิชัย แสงอาทิตย์และจั๊กจกดา ชำรงวุฒิ "พฤติกรรมทางโครงสร้างของ tubed column หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่า," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, พิษณุโลก, 2-4 พฤษภาคม 2550.

ประวัตินักวิจัย

1. ชื่อ-สกุล นายสิทธิชัย แสงอาทิตย์
Mr. Sittichai Seangatith
2. ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์
3. วันเดือนปีและสถานที่เกิด 19 สิงหาคม พ.ศ. 2511 ที่จังหวัดเพชรบุรี
4. สถานที่ติดต่อ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

5. ประวัติการศึกษา

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

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

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

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญ

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

7. ผลงานทางวิชาการ

7.1 บทความวิจัย (ในรอบ 3 ปี)

1. ศรีชัย กำจัดโรค และสิทธิชัย แสงอาทิตย์, “เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ใยหินภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน,” การประชุมวิชาการนวัตกรรมทางวิศวกรรมสำหรับการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 23-24 มกราคม 2547. (ในรูปแบบ CD-Rom)
2. สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และศาสน์ สุขประเสริฐ, “กำลังรับแรงดึงของรอยเชื่อมไฟฟ้าที่ใช้เชื่อมต่อแผ่นเหล็กโดยช่างเชื่อมในจังหวัดนครราชสีมา,” วารสารเทคโนโลยีสุรนารี, ปีที่ 11, ฉบับที่ 2, เมษายน-มิถุนายน 2547, หน้า 115-124.
3. Seangatith, S., “GFRP Box Columns with Different Supports Subjected to Axial Compression,” The Ninth National Convention on Civil Engineering, Phetchaburi, Thailand, May 19-21, 2004, Vol. I, pp. STR 17-22.
4. สิทธิชัย เลิศวิชัย และสิทธิชัย แสงอาทิตย์, “พฤติกรรมของผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนภายใต้แรงกดอัด,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 9, เพชรบุรี, 19-21 พฤษภาคม 2547, เล่มที่ 1, หน้า STR 23-28.

5. Duangjaras, C., Seangatith, S., and Apichatvullop, A., "Moment Coefficients of Two-way Slabs by Finite Element Method," The Eight Annual National Symposium on Computational Science and Engineering, Suranaree University of Technology, July 21-23, 2004. (ในรูปแบบ CD-Rom)
6. Seangatith, S., "Buckling Strength of GFRP Equal-leg Angle Structural Members under Concentric Axial Compression," Suranaree Journal of Science and Technology, Vol. 12, No. 3, July-September, 2004, pp. 230-242.
7. Seangatith, S., "Mortarless Reinforced Concrete Masonry Wall under Concentrated Axial Load," The First International Conference of Asian Concrete Federation (ACF), Chiang Mai, Thailand, October 28-29, 2004, Vol. 1, pp. 143-160.
8. จักษดา ชำรงวุฒิ และสิทธิชัย แสงอาทิตย์, "คานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กหน้าค้ำรูปตัวซีฝังที่ส่วนรองรับภายใต้แรงกระทำเป็นจุดตามขวาง," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, พัทยา, ชลบุรี, 2-4 พฤษภาคม 2548, Vol. 1, หน้า STR 1-6.
9. กรรณ คำลือ และสิทธิชัย แสงอาทิตย์, "พฤติกรรมของคานคอนกรีตสำเร็จรูปแบบอัดแรงบางส่วนภายใต้แรงกระทำตามขวาง," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 10, พัทยา, ชลบุรี, 2-4 พฤษภาคม 2548, Vol. 1, หน้า ST 58-63.
10. นริศ พิเชียรโชติ และสิทธิชัย แสงอาทิตย์, "การทดสอบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปที่ถูกเสริมด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน," เอกสารประกอบการสัมมนาการพัฒนากลุ่มงานวิจัยในเครือข่ายอุดมศึกษานครราชสีมา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 24 มิถุนายน 2548, หน้า 52-56. (Poster presentation)
11. จักษดา ชำรงวุฒิ และสิทธิชัย แสงอาทิตย์, "ผลของความยาวระยะฝังเหล็กวางน้ำที่มีต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป," เอกสารประกอบการสัมมนาการพัฒนากลุ่มงานวิจัยในเครือข่ายอุดมศึกษานครราชสีมา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 24 มิถุนายน 2548, หน้า 57-60. (Poster presentation)
12. Seangatith, S., "Short-term Behaviors and Design Equations of Mortarless Reinforced Concrete Masonry Walls," Suranaree Journal of Science and Technology, Vol. 13, No. 3, July-September, 2005, pp. 178-192.
13. หวังแก้ว บุญสวน และสิทธิชัย แสงอาทิตย์, "การคำนวณพฤติกรรมและน้ำหนักโก่งเดาะของชิ้นส่วนพลาสติกเสริมเส้นใยรูปฉากขาเท่ากันภายใต้การรับน้ำหนักกดอัดตามแนวแกนตรงศูนย์โดยใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์," การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

- ครั้งที่ 31, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 18-20 ตุลาคม 2548. I0036. (ในรูปแบบ CD-Rom)
14. Duangjaras, C., **Seangatith, S.**, and Apichatvullop, A., "Distribution of Moments in Slabs with Elastic Mid-span Beams and Elastic Beams Between All Supports," Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD2006), Faculty of Engineering, Khon Kaen University, January 25-27, 2006. (in CD-Rom format)
 15. จักขดา ชำรงวุฒิและ**สิทธิชัย แสงอาทิตย์**, "ผลของความยาวระยะฝังเหล็กทรงน้ำที่มีต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป," วารสารเทคโนโลยีสุรนารี, ปีที่ 13, ฉบับที่ 1, มกราคม-มีนาคม 2549, หน้า 11-19.
 16. อมรรัตน์ สุริยวิจิตรเสรณี **สิทธิชัย แสงอาทิตย์** และอำนาจ อภิชาติวัลลภ, "การศึกษาการใช้เส้นพลาสติกที่ใช้แล้วแบบสั้นผสมในคอนกรีต," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11, ภูเก็ต, 19-21 เมษายน 2549. MAT003. (ในรูปแบบ CD-Rom)
 17. **สิทธิชัย แสงอาทิตย์** และนริศ พิเชียร โชติ, "การตรวจสอบพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพลาสติกเสริมใยคาร์บอนภายใต้แรงกระทำตามขวาง," วิศวกรรมสาร มช., ปีที่ 33, ฉบับที่ 5, กันยายน-ตุลาคม 2549. หน้า 525-539.
 18. **สิทธิชัย แสงอาทิตย์** และศรัณย์ กำจัดโรค, "พฤติกรรมการรับแรงอัดในแนวแกนและสมการออกแบบของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ท่อซีเมนต์ใยหินเป็นแบบหล่อถาวร," วารสารเทคโนโลยีสุรนารี, ปีที่ 13, ฉบับที่ 4, ตุลาคม-ธันวาคม 2549. หน้า 351-362.
 19. Thumrongvut, J. and **Seangatith, S.**, "Experimental Investigation on Concrete Columns Confined with Steel Jackets Subjected to Concentric Axial Compression," The 6th National Symposium on Graduate Research, Graduate School, Chulalongkorn University, Bangkok, October 13-14, 2006, paper no. J1_J0028. (in CD-Rom format)
 20. จักขดา ชำรงวุฒิและ**สิทธิชัย แสงอาทิตย์**, "ผลของการโอบรัดของปลอกเหล็กและปลอก stainless steel ต่อพฤติกรรมเสาคอนกรีต," การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 2, สมาคมคอนกรีตไทย, อุดรธานี, 25-27 ตุลาคม 2549. paper no. STR-002. (in CD-Rom format)
 21. **สิทธิชัย แสงอาทิตย์**และจักขดา ชำรงวุฒิ "พฤติกรรมทางโครงสร้างของ tubed column หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่า," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, พิษณุโลก, 2-4 พฤษภาคม 2550. paper no. STR-018. (in CD-Rom format)
 22. จักขดา ชำรงวุฒิ กรรณ คำลือ **สิทธิชัย แสงอาทิตย์** และวินัย มณีรัตน์ "การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลของรอยต่อของคานคอนกรีตสำเร็จรูป," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, พิษณุโลก, 2-4 พฤษภาคม 2550. paper no. STR-028. (in CD-Rom format)

7.2 บทความทั่วไป

1. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “แนวทางในการประเมินต้นทุนในการนำเศษคอนกรีตห้มาใช้เป็นมวลรวมหยาบในคอนกรีต,” วารสารเทคโนโลยีสุรนารี, ปีที่ 8, ฉบับที่ 1-2, มกราคม-มิถุนายน, 2544, หน้า 50-54
2. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “มาตรการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในโรงงาน SME และอาคารธุรกิจของกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน,” สาร สวทศ, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ปีที่ 3, ฉบับที่ 1, มกราคม-มีนาคม, 2545.
3. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “การใช้วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยในการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก,” สาร สวทศ, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ปีที่ 3, ฉบับที่ 1, มกราคม-มีนาคม, 2545.
4. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “มหาวิทยาลัยในกำกับของรัฐ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี,” สาร สวทศ, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ปีที่ 4, ฉบับที่ 3, มิถุนายน-สิงหาคม, 2546.
5. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อหินปูนที่เหมาะสมในการผลิตอิฐบล็อก,” เทคโนโลยีสาร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ปีที่ 1, ฉบับที่ 1, กันยายน 2546, หน้า 27-28.
6. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “การเสริมกำลังและซ่อมแซมองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยพลาสติกเสริมเส้นใย (ตอนที่ 1),” วิศวกรรมสาร, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, ปีที่ 57, ฉบับที่ 673, กุมภาพันธ์ 2547, หน้า 42-45.
7. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “การเสริมกำลังและซ่อมแซมองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยพลาสติกเสริมเส้นใย (ตอนที่ 2),” วิศวกรรมสาร, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ปีที่ 57, ฉบับที่ 676, พฤษภาคม 2547, หน้า 73-76.
8. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “เกร็ดความรู้ทางประวัติศาสตร์ของการวิเคราะห์โครงสร้าง (Structural Analysis),” สาร สวทศ, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ปีที่ 5, ฉบับที่ 1, มีนาคม-พฤษภาคม 2547, หน้า 3-4.
9. สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และวิมล สมสะอาด, “พื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นเหล็ก,” ทำเนียบเทคโนโลยีและผลิตภัณฑ์ด้านงานวิศวกรรม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, สำนักพิมพ์บริษัท กระแสธุรกิจ จำกัด, 2548, หน้า 98-115.

7.3 รายงานวิจัย

1. Yuan, R.L., and Seangatith, S., “GFRP Composite Columns with Various End Conditions,” Technical Report, College of Engineering, University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, 1996.

2. Yuan, R.L., and Seangatith, S., "Development of Column Design Equations for GFRP Composite Columns," Technical Report, College of Engineering, University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, 1997. (Funded by Creative Pultrusions, USA)
3. Seangatith, S., "Characterization and Analysis of Composite Beams Subjected to Impact Loads," Dissertation, The University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, 1997
4. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, "การทดสอบและการพัฒนาโครงสร้างอิฐก่อ." รายงานการวิจัยหมายเลข SUT 4-410-41-12-20, สถาบันวิจัยและพัฒนา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2542. (แหล่งทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 100%)
5. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, "การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของอิฐดินซีเมนต์และหาแนวทางปรับปรุงคุณภาพ," รายงานเทคนิค, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2542. (แหล่งทุน: มูลนิธิจักรราชพัฒนา, สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 100%)
6. "โครงการศึกษาการจัดทำแผนแม่บทด้านการจราจรและขนส่งเมืองภูมิภาค ระยะที่ 5 จังหวัดปราจีนบุรี," รายงานเทคนิค, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2543. (แหล่งทุน: สำนักงานคณะกรรมการจัดระบบการจราจรทางบก สำนักนายกรัฐมนตรี, สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 30%)
7. "โครงการศึกษาการจัดทำแผนแม่บทด้านการจราจรและขนส่งเมืองภูมิภาค ระยะที่ 5 จังหวัดสระแก้ว," รายงานเทคนิค, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2545. (แหล่งทุน: สำนักงานคณะกรรมการจัดระบบการจราจรทางบก สำนักนายกรัฐมนตรี, สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 30%)
8. "โครงการจัดทำแผนยุทธศาสตร์พลังงานระดับจังหวัดแบบบูรณาการจังหวัดบุรีรัมย์," รายงานเทคนิค, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2547. (แหล่งทุน: สำนักงานพลังงานภูมิภาคที่ 5, กระทรวงพลังงาน, สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 20%)
9. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, "การพัฒนาสมการที่ใช้ในการออกแบบผนังคอนกรีตบล็อกเสริมเหล็กแบบไร้ปูนก่อภายใต้แรงกดอัดและแรงคัต," รายงานการวิจัยหมายเลข SUT 7-712-47-12-05, สถาบันวิจัยและพัฒนา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2547. (แหล่งทุน: สำนักงานงบประมาณโดยการพิจารณาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 100%)
10. "โครงการศึกษาการจัดทำกรอบแผนยุทธศาสตร์พลังงานระดับจังหวัดแบบบูรณาการจังหวัดชัยภูมิ," รายงานเทคนิค, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2548. (แหล่งทุน: สำนักงานพลังงานภูมิภาคที่ 5, กระทรวงพลังงาน, สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 20%)

11. “โครงการศึกษาการจัดทำกรอบแผนยุทธศาสตร์พลังงานระดับจังหวัดแบบบูรณาการจังหวัดมหาสารคาม,” รายงานเทคนิค, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2548. (แหล่งทุน: สำนักงานพลังงานภูมิภาคที่ 5, กระทรวงพลังงาน, สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 20%)
12. “โครงการศึกษาการจัดทำกรอบแผนยุทธศาสตร์พลังงานระดับจังหวัดแบบบูรณาการจังหวัดศรีสะเกษ,” รายงานเทคนิค, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2548. (แหล่งทุน: สำนักงานพลังงานภูมิภาคที่ 5, กระทรวงพลังงาน, สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 20%)
13. “โครงการจัดทำแผนปฏิบัติการด้านการซ่อมแซมบำรุงรักษาสภาพลำน้ำและคุณภาพน้ำลำตะคอง,” รายงานเทคนิค, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2549. (แหล่งทุน: สำนักงานชลประทานที่ 8 จังหวัดนครราชสีมา, สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 15%)

7.4 ตำราและเอกสารคำสอน

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