การเสริมกำลังอัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยการโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีการศึกษา 2554

STRENGTHENING OF AXIAL COMPRESSIVE SQUARE REINFORCED CONCRETE COLUMNS BY PRECONFINING WITH STEEL JACKETS

Chuleeporn Auyyuenyong



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2011

การเสริมกำลังอัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยการโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. น.อ. คร.วรพจน์ ขำพิศ) กณบคีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

(ศ. คร.ชูกิจ ถิ่มปีจำนงค์) รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ ชุลีพร อุยยืนยงค์ : การเสริมกำลังอัคเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยการ โอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก (STRENGTHENING OF AXIAL COMPRESSIVE SQUARE REINFORCED CONCRETE COLUMNS BY PRECONFINING WITH STEEL JACKETS) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ คร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 174 หน้า

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสึกษาพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง ทดสอบคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัคก่อนด้วย ปลอกเหล็กภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ กับสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของมาตรฐาน ACI Committee 318 และใช้เป็นข้อมูล ในการเสนอสมการการออกแบบที่เหมาะสมของเสาดังกล่าว ตัวแปรหลักที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วยกำลังอัดประลัยคอนกรีตที่ใช้มี 3 ค่า คือ 18 25 และ 32 MPa ความหนาของ ปลอกเหล็กที่ใช้มี 3 ค่า คือ 3.2 4.5 และ 6.0 mm และหน่วยแรงโอบรัดก่อน คือ 0.05 f' และ 0.1 f'

จากการศึกษาตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วย ปลอกเหล็ก พบว่ามีกำลังอัดสูงสุดและความเหนียวสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบ อ้างอิง โดยขึ้นอยู่กับตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปรดังกล่าวข้างต้น ซึ่งมีพฤติกรรมภายใต้แรงกดอัด เป็นแบบเชิงเส้นตรงถึง 50 - 80% ของหน่วยแรงกดอัดสูงสุด (*f*_{max}) จากนั้นจะมีพฤติกรรม เข้าสู่ช่วงไร้เชิงเส้น โดยแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ Elastic perfectly - plastic และ Strain softening และการวิบัติจะเกิดขึ้นแบบค่อยเป็นค่อยไปและเปลี่ยนรูปร่างได้สูงก่อนเกิดการวิบัติ จากผล การทดสอบ ทำให้ทราบว่าความหนาของปลอกเหล็ก 6.0 mm และหน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ 0.1 *f*'' เป็นตัวแปรที่มีความเหมาะสมในการนำไปศึกษาต่อในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัด สิ่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก

จากการศึกษาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วย ปลอกเหล็ก พบว่าตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในช่วงเส้นตรงถึง 60 - 80% ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด (*P*'_{max}) จากนั้น มีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงไร้เชิงเส้น โดยแบ่งได้ เป็น 2 ลักษณะคือ Strain hardening และ Elastic - perfectly plastic และตัวอย่างทดสอบจะมี การวิบัติแบบก่อยเป็นก่อยไปและมีความเหนียวสูงเพิ่มขึ้นก่อนการวิบัติ โดยที่มีอัตราส่วน ของกำลังรับแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบเมื่อเทียบกับค่าที่ทำนายได้โดยสมการใน การออกแบบเสาเชิงประกอบของ ACI Committee 318 (*P*'_{max} /*P_{ACI}*) มีค่าน้อยกว่า 1.0 ดังนั้น เพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน สมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ACI Committee 318 จึงควรถูกปรับให้เหมาะสมอยู่ในรูป $P_{ACI}^{Modified} = 0.85 f_{co}'(A_g - A_s) + A_s f_y^s + 0.30 A_s^{tube} f_y^{tube}$ ซึ่ง สมการดังกล่าวสามารถทำนายค่ากำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาได้อย่างเหมาะสม



สาขาวิชา<u>วิศวกรรมโยธา</u> ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่อนักศึกษา	
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	

CHULEEPORN AUYYUENYONG : STRENGTHENING OF AXIAL COMPRESSIVE SQUARE REINFORCED CONCRETE COLUMNS BY PRECONFINING WITH STEEL JACKETS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SITTICHAI SEANGATITH, Ph.D., 174 PP.

AXIAL COMPRESSION/CONCRETE SPECIMEN/PRECONFINEMENT/ TUBED COLUMN/STEEL JACKET

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

From the study of the square concrete specimens preconfined with steel jackets, it was found that, the ultimate compressive strength and their ductility are increased significantly compared to the reference concrete specimens. The compressive behavior of the specimen is linear up to 50 - 80% of their maximum compressive strength (f'_{max}). Beyond that, the nonlinear behavior with large deformation before failure is shown and can be classified into 2 types: Elastic perfectly - plastic and Strain softening. The failure is in the form of progressive mode of failure. It was also concluded that the steel jacket

with 6.0 mm thick and the preconfining stress of $0.1 f'_{co}$ are the optimum value of the parameters for further study of the RC columns preconfined with steel jackets.

From the study of the square RC columns preconfined with steel jackets, it was found that the compressive behavior of the specimen is linear up to 60 - 80% of their maximum compressive strength (P'_{max}) and, then, the nonlinear behaviors were observed and can be classified into 2 types: Strain hardening and Elastic perfectly - plastic. The specimens have significantly larger ductility and deformation before failure compared to the reference columns. Comparing the obtained compressive strengths with those predicted by the ACI Committee 318 composite column design equation, the ratio of P'_{max} / P_{ACI} is less than 1.0 Therefore, it was proposed that the ACI Committee 318 equation should be adjusted in the form of $P^{Modified}_{ACI} = 0.85 f'_{co} (A_g - A_s) + A_s f_s^s + 0.30 A^{nube}_s f^{nube}_s$.

School of Civil Engineering

Student's Signature _____

Academic Year 2011

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ คร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์อย่างสูง ผู้ซึ่งผลักคันและให้การสนับสนุนในการศึกษาต่อในระคับระคับปริญญาโท ทั้งคอยดูแลให้การอบรม สั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือ ทั้งการทำการศึกษาวิจัยและการคำเนินชีวิต ตลอคจนให้กำแนะนำในการเขียน และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงลงได้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศาสน์ สุขประเสริฐ ผู้ซึ่งเป็นทั้งหัวหน้าและอาจารย์ที่รักยิ่ง และเป็นอีก หนึ่งบุคคลผู้ซึ่งผลักคันและให้การสนับสนุนในการศึกษาต่อในระคับระคับปริญญาโท คอยให้ คำแนะนำ อบรม สั่งสอนและให้คำปรึกษาในทุกค้าน เมื่อผู้วิจัยมีความท้อแท้ในการทำวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คร.วีรพันธ์ ศรีบุญลือและครอบครัว ที่มอบโอกาสในการทำงาน และฝึกงานกับ Durastress Inc. และยังสนับสนุนให้มีโอกาสได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโทพร้อม ทั้งครอบครัววันทะนะ และเพื่อนคนไทยทุกคน ที่คอยดูแลคณะของเราเป็นอย่างดียิ่ง ครั้งที่ไป ฝึกงานที่ Durastress Inc. มลรัฐฟลอริด้า สหรัฐอเมริกา

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษาใน การเขียนและตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ เจ้าหน้าที่สถานวิจัย เจ้าหน้าที่สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่ดูแลเอาใจใส่และอำนวยความสะควกอย่างมาก รวมถึง บุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทค โนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้และผู้ที่มีส่วนร่วมในงานวิจัยนี้ทุกท่าน อีกทั้งข้าพเจ้าของอบคุณ กำลังใจ คำติชม พร้อมข้อกิคดี ๆ จากเพื่อนร่วมเรียนระดับบัณฑิตศึกษาทุกท่านที่ช่วยให้ข้าพเจ้ามี แรงกำลังมุ่งทำงานจนสำเร็จลงได้

วิทยานิพนธ์นี้จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้เลยถ้าข้าพเจ้าไม่ได้รับความรู้ทางวิชาการและแนวคิด ของการทำงานที่ดีจากคณาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่านและ ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ข้าพเจ้าต้อง ขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้วิจัขขอขอบพระคุณสมาชิกในครอบครัวอุยยืนยงค์ทุกคนและคุณมงคล ผานาค สามีผู้เป็นที่รัก ที่ได้ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจอย่างดีแก่ผู้วิจัยตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา ประโยชน์อันใดอันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่บิดา มารดา และคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ เมตตาอบรมสั่งสอน

ชุถิพร อุยยินยงค์

สารบัญ

บทคัดย่	่อ (ภาย	ษาไทย)ก
บทคัดย่	ื่อ (ภาย	ษาอังกฤษ)ค
กิตติกร	รมประ	ะกาศจ
สารบัญ		
สารบัญ	ตาราง	ນ
สารบัญ	รูป	
คำอธิบ	ายสัญส	กักษณ์และคำย่อท
บทที่		
1	บทนํ	1
	1.1	ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย1
	1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย4
	1.3	ขอบเขตของการวิจัย
	1.4	ประโยชน์ที่กาคว่าจะได้รับ7
2	ปริทัศ	าน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง8
	2.1	ประเภทเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก8
	2.2	พฤติกรรมและกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกน
		ของเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก10
		2.2.1 เสาคอนกรีตล้วน10
		2.2.2 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก11
	2.3	เสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตภายใต้แรงกคอัคในแนวแกน
	2.4	ผลการโอบรัคทางค้านข้างต่อพฤติกรรมของคอนกรีต
		2.4.1 ผลของการ โอบรัคต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังปกติ
		2.4.2 ผลของการ โอบรัคต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังสูง
	2.5	ผลการ โอบรัคต่อเสาคอนกรีตที่ถูก โอบรัค โคยปลอกเหล็ก

		2.5.1	ผลการโอบรัคต่อเสากอนกรีตที่ถูกโอบรัค
			โดยปลอกเหล็กหน้าตัดกลม25
		2.5.2	ผลการ โอบรัคต่อเสาคอนกรีตที่ถูก โอบรัค
			โคยปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยม26
		2.5.3	แบบจำลองของคอนกรีตที่ถูก โอบรัค
			โดยปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยม27
	2.6	ข้อกำห	านคที่เกี่ยวข้องกับ Tubed RC column30
3	วิธีก	เรดำเนิน	เการวิจัย
	3.1	บทนำ	
	3.2	การทด	เสอบคุณสมบัติทางกลของวัสคุ
		3.2.1	การทคสอบกำลังรับแรงกคอัคสูงสุดของกอนกรีต
		3.2.2	การทคสอบกำลังรับแรงดึงของปลอกเหล็ก
		3.2.3	การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมคอนกรีต
		3.2.4	การทคสอบแรงกคอัคของตัวอย่างทคสอบคอนกรีต
			ที่ถูกโอบรัคก่อนค้วยปลอกเหล็ก43
	3.3	การทด	เสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (Tubed RC column)
		ที่ถูกโฮ	อบรัคก่อนด้วยปลอกเหล็ก
		ภายใต้	แรงกดอัดในแนวแกน
4	ผลก	ารทดสอ	บและวิจารณ์ผล70
	4.1	บทนำ	
	4.2	ผลการ	ทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ
		4.2.1	ผลการทคสอบกำลังรับแรงกคอัคสูงสุคของกอนกรีต
		4.2.2	ผลการทคสอบกำลังรับแรงดึงของปลอกเหล็ก
		4.2.3	ผลการทคสอบกำลังแรงคึงของเหล็กเสริมคอนกรีต

4.3	ผลการทคสอบตัวอย่างทคสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัคก่อน			
	ด้วยปล	ปลอกเหล็ก (Tubed Concrete speciments)		
	ภายใต้	ขใต้แรงกคอัคในแนวแกนและวิจารณ์ผล80		
	4.3.1	พฤติกรร	มการรับแรงกดอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ)
	4.3.2	ลักษณะก	การวิบัติของตัวอย่างทดสอบ87	,
		4.3.2.1	ตัวอย่างทคสอบคอนกรีตอ้างอิง87	,
		4.3.2.2	ตัวอย่างทคสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัคก่อน	
			ด้วยปลอกเหล็ก	,
	4.3.3	หน่วยแร	งกคอัคสูงสุคในแนวแกนของตัวอย่างทคสอบ	
		และค่าคว	วามเครียคสูงสุด)
	4.3.4	เปรียบเที	ยบกำลังและความแกร่ง	
		ของตัวอย	ย่างทดสอบกลุ่มต่าง ๆ94	
	4.3.5	การถ่ายแ	รงในตัวอย่างทดสอบ94	
	4.3.6	การเปรีย	บเทียบกำลังของตัวอย่างทคสอบ	
		และผลก	ารให้หน่วยแรงโอบรัคก่อน100)
		4.3.6.1	วิเคราะห์ด้านกำลังรับแรงของตัวอย่างทดสอบ100)
		4.3.6.2	วิเคราะห์ด้านพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบ104	•
		4.3.6.3	วิเคราะห์ด้านรากา112	
4.4	ผลการ	ทคสอบเส	าคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อน	
	ด้วยปลอกเหล็ก (Tubed RC column) ภายใต้แรงกดอัด			
	ในแนว	ງແຄນແລະວີ	ิจารณ์ผล116	
	4.4.1	พฤติกรร	มการรับแรงกดอัดในแนวแกน	
		ของ Tub	ed RC column	

	4.4.2	ลักษณะก	ารวิบัติของ Tubed RC column120
		4.4.2.1	เสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง120
		4.4.2.2	Tubed RC column
	4.4.3	การถ่ายแ	รงในเสา Tubed RC column122
	4.4.4	กำลังรับแ	รงกดอัดสูงสุดของ Tubed RC column
		และค่าคว	ามเครียคสูงสุด123
	4.4.5	การเปรียา	บเทียบกำลังของ Tubed RC column
		กับสมกา	รของเสาเชิงประกอบ124
		4.4.5.1	การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC column
			กับสมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
			ตามมาตรฐาน ACI Committee 318124
		4.4.5.2	การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC column
		75h	กับสมการกำลังของเสาเชิงประกอบ
		- 4(ตามมาตรฐาน AISC/LRFD126
สรุปต	งลงานวิจ้	໌ ເຍ	
5.1	สรุปผล	การทคสอ	บในงานวิจัย130
	5.1.1	สรุปผลก	ารทคสอบตัวอย่างทคสอบคอนกรีต
		ที่ถูกโอบร่	รัคก่อนด้วยปลอกเหล็ก
		(Tubed C	oncrete specimens)130
	5.1.2	สรุปผลก	ารทคสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
		ที่ถูกโอบ	รัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก
		(Tubed R	C column)
5.2	ข้อเสนส	อแนะในกา	ารใช้งาน132
5.3	ข้อเสนส	อแนะในงา	นวิจัยต่อไป133

5

หน้า

รายการอ้างอิง	
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่างทคสอบคอน	กรีต
และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูก โอบรัคก่อน	
ค้วยปลอกเหล็ก	
ภาคผนวก ข. การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน	
ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	
ประวัติผู้เขียน	



สารบัญตาราง

ตารา	ตารางที่ หน้า		
2.1	สรุปการเปรียบเทียบข้อกำหนดในการออกแบบ ตามมาตรฐานต่าง ๓ พี่เอี่ยวข้อง	20	
3 1	ต้าอย่างทอสอบอริตที่ใช้ใบงาบวิจัย		
2.1	หรอยาจิทิตตัวอย่างทอสอบและออเสบบัติทางออ		
5.2	า เป็นองอังค์ที่ 190 เจ้าที่ แต่ บางแอกู้ แต่ แม่ บาที่ เป็นและ ของวัสดที่เอี่ยวข้อง	54	
33	รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column ที่ใช้ในงานวิจัย	J 4 59	
3.4	รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column ที่ใช้ในการศึกษา		
	และคณสมบัติทางกลของวัสดที่เกี่ยวข้อง	69	
4.1	ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดสงสุดของคอนกรีต	71	
4.2	คุณสมบัติทางกลของเหล็กที่ตัดจากปลอกเหล็ก	74	
4.3	เปรียบเทียบค่าอัตราส่วน B/t ตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง	77	
4.4	คุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้นกลม RB6	79	
4.5	คุณสมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อย DB12	79	
4.6	แสดงสรุปผลการทดสอบหน่วยแรงสูงสุดและค่าความเครียดสูงสุด		
	ของตัวอย่างทคสอบ	92	
4.7	เปอร์เซ็นต์ของแรงกคอัคในแนวแกนที่ถูกถ่ายลง		
	ปลอกเหล็กเมื่อเทียบกับค่าหน่วยแรง _{f'max}	97	
4.8	หน่วยแรงกคอัคในแนวแกนของคอนกรีต		
	เมื่อพิจารณาการถ่ายแรงลงปลอกเหล็ก	101	
4.9	แสดงการเปรียบเทียบผลทคสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัคก่อน		
	กับการให้หน่วยแรงโอบรัคก่อนที่ 0.05 f_{co}^\prime และ 0.1 f_{co}^\prime	102	
4.10	ผลการทดสอบของหน่วยแรงที่เกิดจาก Passive confinement		
	และ Active confinement	108	
4.11	เปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างรากาก่อสร้างต่อกำลังที่สภาวะใช้งาน	114	

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารา	งที่ หน้า
4.12	กำลังแรงกดอัดสูงสุดและค่าความเครียดสูงสุด
	ที่เกิดขึ้นใน Tubed RC column124
4.13	การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P' _{max} และค่ากำลังรับแรง
	ตามมาตรฐาน ACI 318 125
4.14	การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P' _{max} และค่ากำลังรับแรง
	ตามมาตรฐาน AISC/LRFD
4.15	การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P' _{max} กับค่ากำลังรับแรง
	ตามมาตรฐาน ACI 318127
4.16	การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P'_{\max} และค่าแรง $P^{Modified}_{ACI}$
ข.1	คุณสมบัติทางกลของสลักเกลียว หมุดเกลียว และสตัด
ข.2	เกลียวเมตริกแบบมาตรฐานระหว่างประเทศ เกลียวธรรมดา
ข.3	สรุปผลการคำนวณหาโมเมนต์บิคสำหรับขันสลักเกลียว
	ที่ค่า 0.05 f_{co}^{\prime}
ข.4	สรุปผลการคำนวณหาโมเมนต์บิดสำหรับขั้นสลักเกลียว
	ที่ค่า 0.1 f' _{co}

สารบัญรูป

รูปที่	หน้	์ เก
1.1	การเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	3
1.2	ลักษณะการให้หน่วยแรงโอบรัคก่อน	
	ของตัวอย่างทุดสอบคอนกรีต	7
2.1	ประเภทเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	9
2.2	พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาปลอกเดี่ยว	
	และปลอกเกลียว	2
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียด	
	ของคอนกรีตและเหล็กเสริม	3
2.4	เสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต1	5
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง Ultimate load	
	และ Nominal slenderness ratio1	6
2.6	แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกน	
	และความเครียดของเสา	8
2.7	ลักษณะการให้แรงกดอัดกระทำต่อเสา2	0
2.8	ผลของหน่วยแรงโอบรัคต่อพฤติกรรมการรับแรงกคอัค	
	ในแนวแกนของคอนกรีต2	2
2.9	กราฟตัวอย่างเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของหน่วยแรง	
	และความเครียดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก	
	ที่ถกรัครอบและไม่ถกรัครอบ	3
2.10	การกระจายของหน่วยแรงโอบรัด	5
2.11	คอนกรีตที่ถูกโอบรัคในเสาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม	7
3.1	กรอบแนวกิดการดำเนินงานวิจัย	4
3.2	เครื่องมือที่ใช้ในการทคสอบคอนกรีต	6
3.3	ตัวอย่างทคสอบคอนกรีตล้วน	8

รูปที่	หน้า
3.4	การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทำการทดสอบ
	กำลังรับแรงกดอัด
3.5	รายละเอียดแผ่นตัวอย่างทดสอบรูปกระดูกของปลอกเหล็ก40
3.6	การติดตั้งตัวอย่างเหล็กเส้นเสริมคอนกรีต
	เข้ากับเครื่องทดสอบ UTM41
3.7	ลักษณะการให้แรงกดอัดกระทำต่อ
	ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตโดยตรง43
3.8	LVDT capacity 100 mm
3.9	รายละเอียคสัญลักษณ์ในการกำหนดชื่อเรียก
	ตัวอย่างทดสอบคอนกรีต
3.10	แสดงรายละเอียดแปลนรายละเอียดปลอกเหล็ก47
3.11	แสดงรายละเอียดปลอกเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย47
3.12	การหล่อตัวอย่างทคสอบคอนกรีต
3.13	แสดงรายละเอียดปลอกเหล็กอัดแรงของ
	ตัวอย่างทดสอบคอนกรีต
3.14	แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ52
3.15	ผังการคำเนินงานตัวอย่างทคสอบคอนกรีต53
3.16	รายละเอียคสัญลักษณ์ในการกำหนดชื่อเรียกตัวอย่างทดสอบ
	Tubed RC column
3.17	รายละเอียดของเหล็กเสริมของตัวอย่างทดสอบ
	Tube RC column
3.18	รายละเอียคของตัวอย่างทคสอบ Tube RC column61
3.19	แสดงรายละเอียดปลอกเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย63
3.20	การหล่อตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column63
3.21	รายละเอียดแบบปลอกเหล็กของ Tubed RC column ที่ความหนา 6.0 mm
	และลักษณะของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
	ที่ถูกโอบรัคก่อนด้วยปลอกเหล็ก64

รูปที่	หน้า
3.22	แผนภาพแสดงการติดตั้งตัวอย่างทุดสอบ Tubed RC column
	เพื่อทคสอบแรงกคอัค
3.23	ตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column
	เพื่อทคสอบแรงกคอัค
3.24	ผังการดำเนินงานเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
	ที่ถูกโอบรัคก่อนด้วยปลอกเหล็ก
4.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง
	และค่าความเครียดของคอนกรีต71
4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมดูถัสยึดหยุ่น
	และค่ากำลังรับแรงกคอัคสูงสุดของคอนกรีต72
4.3	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีต
4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึง
	และความเครียดของเหล็ก
4.5	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างแผ่นเหล็ก
4.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียด
	ของเหล็กเส้นกลม RB678
4.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียด
	ของเหล็กข้ออ้อย DB1278
4.8	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทคสอบเหล็กเสริมคอนกรีต
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทคสอบ
	ที่ไม่มีหน่วยแรงโอบรัคก่อนที่ f'_co = 18 MPa83
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ
	ที่ไม่มีหน่วยแรงโอบรัคก่อนที่ f'_co = 25 MPa83
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทคสอบ
	ที่ไม่มีหน่วยแรงโอบรัคที่ f'_co = 32 MPa
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทคสอบ
	ที่มีหน่วยแรงโอบรัคก่อนที่ $0.05 f_{co}'$ และ $f_{co}' = 18$ MPa

รูปที่	หน้า
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ
	ที่มีหน่วยแรงโอบรัคก่อนที่ 0.05 f' และ f' = 25 MPa
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทคสอบ
	ที่มีหน่วยแรงโอบรัคก่อนที่ 0.05 <i>f</i> ' _{co} และ <i>f</i> ' _{co} = 32 MPa85
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทคสอบ
	ที่มีหน่วยแรงโอบรัคก่อนที่ $0.1 f_{co}'$ และ $f_{co}' = 18$ MPa
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ
	ที่มีหน่วยแรงโอบรัคก่อนที่ 0.1 <i>f'_{co}</i> และ <i>f'_{co}</i> = 25 MPa
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทคสอบ
	ที่มีหน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.1 f_{co}'$ และ $f_{co}' = 32$ MPa
4.18	ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทคสอบอ้างอิง
4.19	ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทคสอบ
4.20	ตัวอย่างลักษณะหน้าตัดการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ
	ที่กวามหนา 3.2 4.5 6.0 mm อัยแกลโนโลยี่
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด
	แสดงการพิจารณาหาค่า f'_{\max} ที่ 0.2% offset91
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด
	ในแนวแกนและ ในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก
	ที่กึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทคสอบ SR18 - 3.295
4.23	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Strengthening ratio $f'_{\max,conc}$ / $f'_{\max,conc,withoutpreconfinement}$
	และ Confinement ratio f_1'/f_c' เมื่อพิจารณา
	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต103
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรง
	ที่เกิดจากผลของ Passive confinement109
4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัคประลัยของคอนกรีตและหน่วยแรง
	ที่เกิดจากผลของ Passive confinement109

รูปที่	หน้า
4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรง
	ที่เกิดจากผลของ Active confinement110
4.27	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัคประลัยของคอนกรีตและหน่วยแรง
	ที่เกิดจากผลของ Active confinement111
4.28	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรง
	ที่เกิดจากผลของ Active confinement111
4.29	ความสัมพันธ์ของแรงกคอัคและการหคตัวในแนวแกน
	ของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 18$ MPa
4.30	ความสัมพันธ์ของแรงกคอัคและการหคตัวในแนวแกน
	ของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 25$ MPa119
4.31	ความสัมพันธ์ของแรงกคอัคและการหคตัวในแนวแกน
	ของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 32$ MPa119
4.32	ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง120
4.33	ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสา Tubed RC column
4.34	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด
	ในแนวแกนและ ในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก
	ที่กึ่งกลางความสูงของเสา SRC18 - 6.0122
ก.1	กวามสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับกวามเกรียดกดอัด
	ของตัวอย่างทคสอบคอนกรีตอ้างอิ่ง138
ก.2	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด
	ในแนวแกนและ ในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก
	ที่กึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทคสอบ SR18 - 3.2
ก.3	กวามสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและก่ากวามเกรียด
	ในแนวแกนและ ในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก
	ที่กึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทคสอบ SR18 - 4.5

รูปที่	หน้า
ก.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด
	ในแนวแกนและ ในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก
	ที่กึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทคสอบ SR18 - 6.0139
ก.5	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด
	ในแนวแกนและ ในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก
	ที่กึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทคสอบ SR25 - 3.2
ก.6	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด
	ในแนวแกนและ ในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก
	ที่กึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทคสอบ SR25 - 4.5
ก.7	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด
	ในแนวแกนและ ในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก
	ที่กึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทคสอบ SR25 - 6.0141
ก.8	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและก่าความเกรียด
	ในแนวแกนและ ในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก
	ที่กึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทคสอบ SR32 - 3.2
ก.9	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด
	ในแนวแกนและ ในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก
	ที่กึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทคสอบ SR32 - 4.5142
ก.10	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียด
	ในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก
	ที่กึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทคสอบ SR32 - 6.0142
ก.11	ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกน
	ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง143
ก.12	ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกน
	ของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 18$ MPa143
ก.13	ความสัมพันธ์ของแรงกคอัคและการหคตัวในแนวแกน
	ของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 25$ MPa144

หน้า
ې بې خ بې بې خ
ความสมพนธ์ของแรงกดอดและการหดดว่านแนวแกน
ของเสา Tubed RC column ที่มี $f'_{co} = 32$ MPa
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและก่ากวามเกรียด
ในแนวแกนและ ในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก
ที่ถึงกลางความสูงของเสา Tubed RC column
$ \vec{n} \vec{\mathfrak{I}} f_{co}' = 18 \text{ MPa} \dots 145 $
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเกรียด
ในแนวแกนและ ในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก
ที่กึ่งกลางความสูงของเสา Tubed RC column
ที่มี $f'_{co} = 25$ MPa
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและก่ากวามเกรียด
ในแนวแกนและในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็ก
ที่กึ่งกลางความสูงของเสา Tubed RC column
ที่มี f'_co = 32 MPa

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ACI	= American Concrete Institute
AISC	= American Institute of Steel Construction
ASTM	= American Society for Testing and Materials
LRFD	= Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design
UTM	= Universal Testing Machine
В	= ความกว้างของหน้าตัดเสา
D	= ด้ำนแคบของเสา
L	= ความสูงของเสา
Р	= กำลังรับแรงอัดสูงสุดในแนวแกนของเสาคอนกรีต
CR	= อัตราส่วนการโอบรัด
KL	= ความยาวประสิทธิผลของเสา
t	= ความหนาของปลอกเหล็ก
b	= ความกว้างของหน้าตัดเสา
h	= ความลึกของหน้าตัดเสา
A_{c}	= พื้นที่หน้าตัดสุทธิของเสาคอนกรีต
$A_{_e}$	= พื้นที่การ โอบรัคประสิทธิผลของคอนกรีตหน้าตัคสี่เหลี่ยม
A_{g}	= พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา
A_{s}	= พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมหลัก
A_s^{tube}	= พื้นที่หน้าตัดของปลอกเหล็ก
E_{c}	= โมดูลัสยึคหยุ่นของคอนกรีต
E_m	= Modified elastic modulus ของเสา
E_{s}	= โมคูลัสยึคหยุ่นของเหล็กเสริม
F _{cr}	= หน่วยแรงวิกฤติ
F_{E}	= Euler buckling stress ของเสา
F_{my}	= Modified yield strength ของเสา
$P_{ m max}'$	= แรงกคอัคสูงสุด
$P'_{\max,conc}$	= แรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีต

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

P_{steel}	=	แรงกดอัดในแนวแกนของปลอกเหล็ก
P _{ult}	=	กำลังรับแรงอัดประลัย
P^1_{ACI}	=	กำลังรับแรงกดอัดที่รวมกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็ก
		เข้ากับสมการที่ 2.2
P_{ACI}^2	=	กำลังรับแรงกดอัดที่ไม่รวมกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็ก
		เข้ากับสมการที่ 2.2
$P^{Modified}_{_{ACI}}$	=	กำลังรับแรงกดอัดของ Tubed RC column
R_c	=	รัศมีที่มุมของปลอกเหล็ก
f_1	=	ความดันรัดรอบ (Confining pressure)
f_1'	=	ความดันรัดรอบโอบรัดประสิทธิผลของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม
$f_{\it act}'$	=	หน่วยแรงที่เกิดจาก Active confinement
$f_{act,0.05f_{co}}^{\prime}$	=	หน่วยแรงที่เกิดจาก Active confinement
		ที่มีการให้หน่วยแรงโอบก่อนที่ 0.05 f' _{co}
$f_{act,0.1f_{co}}^{\prime}$	=	หน่วยแรงที่เกิดจาก Active confinement
		ที่มีการให้หน่วยแรงโอบก่อนที่ $0.1f_{co}^\prime$
f_c'	=	กำลังรับแรงอัดประสัยของคอนกรีต
f_{cc}^{\prime}	=	กำลังต้านทานแรงกคอัคในแนวแกนของคอนกรีต
		เมื่อมีแรงคันรอบข้าง
$f'_{ m max}$	=	หน่วยแรงใช้งานสูงสุดที่เกิดจากการถากเส้นขนานกับความชั้น
		ของกราฟที่ค่าความเครียด 0.002 mm/mm
		ตัดกับเส้นกราฟของตัวอย่างทดสอบ
$f'_{\max, \mathit{ref}}$	=	หน่วยแรงใช้งานสูงสุดอ้างอิงที่เกิดจากการลากเส้นขนาน
		กับความชั้นของกราฟที่ก่าความเครียด 0.002 mm/mm
$f'_{\max,conc}$	=	หน่วยแรงใช้งานสูงสุดที่เกิดขึ้นของกอนกรีต
$f'_{\it pass}$	=	หน่วยแรงที่เกิดจาก Passive confinement
$f_{\scriptscriptstyle steel}$	=	หน่วยแรงกดอัดในแนวแกนของปลอกเหล็ก
f_y	=	กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมหลัก
f_y^s	=	กำลังรับแรงคึงที่จุดครากของเหล็กเสริมหลัก

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$f_y^{\it tube}$	=	กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของปลอกเหล็ก
		ตัดกับเส้นกราฟของตัวอย่างทคสอบ
k_1	=	Confinement effectiveness coefficient มีค่าเท่ากับ 4.1
k_s	=	อัตราส่วนรูปร่าง
r_m	=	Radius of gyration ของปลอกเหล็ก
W _c	=	หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต
\mathcal{E}_{cu}	= ,	ความเกรียดในแนวแกนสูงสุดของกอนกรีตเนื่องจากการ โอบรัด
${\cal E}_{j}$	=	ความเครียดทางขวาง (Hoop strain) ของปลอกเหล็ก
\mathcal{E}'_{\max}	=	ความเกรียดสูงสุด ณ จุดที่เกิดจากหน่วยแรงใช้งานสูงสุด
$arepsilon'_{ ext{max}, ref}$	=	ความเกรียดสูงสุดอ้างอิง ณ จุดที่เกิดจากหน่วยแรงใช้งานสูงสุดอ้างอิง
\mathcal{E}_{steel}	=	ความเครียดในปลอกเหล็ก
$\boldsymbol{\mathcal{E}}_{y}$	=	ความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริม
$\sigma_{_j}$	=	หน่วยแรงทางขวาง (Hoop stress) ของปลอกเหล็ก
$\sigma_{_{steel}}$	=	หน่วยแรงเนื่องจากความเครียด
$ ho_{\scriptscriptstyle sc}$	=	ปริมาณเหล็กเสริมของเหล็กเสริมในแนวแกน
λ_{c}	=	Column slenderness parameter

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

อาการคือสิ่งปลูกสร้างถาวรที่มนุษย์สร้างขึ้นโดยมีจุดประสงค์ในการใช้งานที่ชัดเจน ตามอายุการใช้งานของอาคารที่จำกัด แม้จะปรากฏว่าสิ่งปลูกสร้างโบราณเหล่านั้นหลายแห่ง สามารถคงทนถาวรได้เป็นพันปีแต่โดยปกติแล้วอาคารที่ก่อสร้างในยุคสมัยปัจจุบันอายุการใช้งาน ้ของอาการมักถูกกำหนดด้วยคุณค่าทางเศรษฐกิจของอาการ โดยเฉลี่ยวิศวกรมักจะถือว่าอาการ มือายุประมาณ 50 ปี เมื่อหมดคุณค่าทางเศรษฐกิจ แม้โครงสร้างอาการจะมีความคงทนถาวรต่อไป ้ ก็มักจะถูกรื้อถอนเพื่อให้สามารถใช้ที่คินเพื่อประโยชน์อย่างเต็มที่ ด้วยเหตุผลนี้เราจะไม่ค่อยได้พบ เป็นข่าวว่า อาการ ก. อาการ ข. เกิดการทรุดหรือพัง ซึ่งเป็นตามมรณกรรมปกติวิสัยด้วยถึงแก่ อายุงัยของอาการ อย่างไรก็ตามเมื่ออาการถูกใช้งานเป็นระยะเวลานานองก์อาการบางส่วนย่อม เสื่อมโทรมชำรุดเสียหาย จนอาการไม่สามารถจะใช้งานได้อย่างปลอดภัยการชำรุดแบ่งเป็น 2 อย่าง คือ (1) ความบกพร่องทางด้านโครงสร้าง (Structurally deficiency) เช่น เกิดความเสียหายเนื่องจาก การกัดกร่อน (Corrosion) ของถมฟ้าอากาศ และ (2) การที่ไม่สามารถใช้งานได้ตามวัตถประสงค์ (Functionally obsolete) ที่ได้ออกแบบไว้คือมีการเปลี่ยนสภาพการใช้งานโครงสร้างที่ต้องรองรับ แรงกระทำที่สูงขึ้นหรือเนื่องจากภัยที่เกิดจากการใช้งานหนักกว่าที่อาคารจะทนได้จากภัยธรรมชาติ เช่น แผ่นดินใหว เป็นต้น หรือเกิดจากการใช้งาน เช่น อักกีภัยหรือแม้กระทั่งจากการก่อการร้าย เช่น กรณีคนร้ายขับเครื่องบินชนตึกเวิลค์เทรคเซ็นเตอร์ในนิวยอร์ก เป็นต้น การบำรุงรักษา ้ซ่อมแซมอาการจึงต้องมีควบคู่กับการใช้งาน โดยทั่วไปแล้วถ้าความบกพร่องทางด้านโครงสร้าง และการไม่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่เกิดขึ้นนั้น ถ้าไม่มีความรุนแรงมากนักโครงสร้าง ้ คอนกรีตเสริมเหล็กดังกล่าวจะถูกเสริมกำลังหรือซ่อมแซมให้กลับมามีสภาพเดิมมากกว่า การทุบโครงสร้างดังกล่าวทิ้งแล้วทำการก่อสร้างใหม่ เนื่องจากต้องมีการคำนึงถึงในเรื่องของราคา และระยะเวลาในการดำเนินการที่สูงกว่าการเลือกที่จะใช้วิธีเสริมกำลังหรือซ่อมแซม

เนื่องจากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นนั้น มีนักวิจัยจำนวนไม่น้อยโดยเฉพาะในต่างประเทศ ใด้ทำวิจัยเกี่ยวกับการเสริมกำลังต่อองค์อาการของโกรงสร้างกอนกรีตเสริมเหล็กเป็นจำนวนมาก อีกทั้งมีการพัฒนารูปแบบการก่อสร้างแบบต่าง ๆ ขึ้นมา จากการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการเสริมกำลัง ต่อองก์อาการของโกรงสร้างกอนกรีตเสริมเหล็กสามารถกระทำได้ทุกองก์อาการ เช่น ในกรณีของ กานหรือแผ่นพื้นมักเป็นการเสริมกำลังรับแรงดัดหรือกำลังรับแรงเฉือนให้กับกานและในกรณีของ เสาอาจเป็นการเสริมกำลังรับแรงในแนวแกน กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงเฉือนให้กับกานและในกรณีของ เสาอาจเป็นการเสริมกำลังรับแรงในแนวแกน กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงเฉือนหรือกวามสามารถ ในการต้านทานแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว ซึ่งในการเสริมกำลังสามารถกระทำได้ในหลายรูปแบบ สามารถยกตัวอย่างได้เช่น การเสริมกำลังให้แก่เสาโดยใช้วัสดุ Fiber - reinforced polymer หรือ FRP (Lin, H.J., and Chen, C.T., 2001); (Lam, L., and Teng, J.G., 2002); (Lam, L., and Teng, J.G.,2003) การเสริมกำลังเสาโดยใช้ท่อปลอกเหล็ก (Schneider, S.P., 1998); (Johansson, M., 2000); (Huang, C.S., et al., 2002); (Seangatith, S., and Thumrongvuth, J., 2009); (Giakoumelis, G., and Lam, D., 2003) วัสดุที่ถูกนิยมนำมาใช้ในการเสริมกำลังมีหลายประเภท เช่น เหล็ก พลาสติกเสริมเส้นใยและ เฟอร์โรซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 1.1 แสดงการเสริมกำลังเสากอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้พลาสติก เสริมเส้นใยและเฟอร์โรซีเมนต์

ปัจจุบันการก่อสร้างได้มีการนำเสาเชิงประกอบหรือเสาคอมโพสิท (Composite column) อาทิเช่น เสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต (Concrete - filled steel tube column) และเสาคอนกรีต เสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก (Steel - encased reinforced concrete column) มาใช้ในงาน โกรงสร้างมาก โดยข้อดีที่สำคัญคือเสาเชิงประกอบมีความทนทานมากกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก อีกทั้งช่วยทำให้การก่อสร้างมีความสวยงามและสะควกรวดเร็ว โดยไม่ต้องใช้ไม้แบบเสาทำให้ สามารถดำเนินการก่อสร้างโครงสร้างของอาคารในส่วนของเสาได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น อีกทั้งช่วยให้ ประหยัดเวลาและแรงงานได้มาก แบบหล่อสามารถใช้ท่อเหล็กหรือปลอกเหล็กช่วยกันรับแรงกระทำ โดยอาศัยพฤติกรรมเชิงประกอบ (Composite action) เป็นผลทำให้เสาดังกล่าวมีกำลังรับแรงกดอัด (Compressive strength) และความเหนียว (Ductility) สูงกว่าเสาเหล็กรูปพรรณและเสาคอนกรีต เสริมเหล็กอย่างมาก นอกจากนั้นแล้วพฤติกรรมเชิงประกอบ (Composite action) ยังช่วยทำให้ เสาดังกล่าวมีความสามารถในการดูดซึมพลังงานได้มากก่อนที่จะเกิดการวิบัติและเหมาะสำหรับ โกรงสร้างที่อยู่ในพื้นที่ที่มีแผ่นดินไหว



รูปที่ 1.1 การเสริมกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

ดังนั้นจากความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัยข้างต้น การใช้ปลอกเหล็กในการห่อหุ้ม เสาคอนกรีตหรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายนอกดังที่กล่าวข้างต้นนั้นสามารถนำมาประยุกต์ ใช้ได้ทั้งในการก่อสร้างโครงสร้างใหม่และมีการปรับปรุงหรือซ่อมแซมโครงสร้างเดิมที่มีอยู่แล้ว ซึ่งก่อให้เกิดผลดีทั้งทางด้านสังคมและเสรษฐกิจ อย่างไรก็ตามจากการทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง และมาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท.1008 - 38 พบว่าสมการออกแบบของ ว.ส.ท. ไม่ได้พิจารณา พฤติกรรมเชิงประกอบ (Composite action) ข้อกำหนด 4314 กำหนดให้ออกแบบเสาเชิงประกอบ ้โดยใช้เงื่อนใบเช่นเดียวกับการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ซึ่งการไม่ได้พิจารณาถึง พฤติกรรมเชิงประกอบ (Composite action) ของมาตรฐานการออกแบบ ว.ส.ท.1008 - 38 นั้น ก็น่าจะมีสาเหตุมาจากความไม่แน่นอนในการพัฒนาพฤติกรรมเชิงประกอบ (Composite action) ้ที่เกิดขึ้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยอาศัยความแกร่งและความหนาของปลอกเหล็กเป็นหลัก ตลอดจนมาตรฐานการควบคุมการก่อสร้างที่เกิดขึ้นในประเทศไทยยังไม่สมบูรณ์มากนัก ตลอดจนวิศวกรไทยยังขาดความรู้ความเข้าใจในพฤติกรรมเชิงประกอบ (Composite action) ้จึงเป็นสาเหตุของความไม่แน่นอนดังนั้นการไม่พิจารณาพฤติกรรมเชิงประกอบ (Composite action) ้จึงน่าเป็นเรื่องที่มีความเหมาะสมแต่อาจจะทำให้ขาดประสิทธิภาพในการใช้งานองค์อาการดังกล่าว และก่อให้เกิดความสิ้นเปลืองทางเศรษฐกิจอีกด้วย ดังนั้นเพื่อก่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจ ในพฤติกรรมเชิงประกอบ (Composite action) ที่มากขึ้น ผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในการให้หน่วยแรง ้โอบรัดก่อนแก่ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งได้ทำการพัฒนาระบบ การให้หน่วยแรงโอบรัคก่อนแก่ตัวอย่างทคสอบกอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีรูปแบบง่าย และสามารถปฏิบัติได้ในสนาม อีกทั้งเพื่อช่วยให้เกิดความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรม การรับแรงกคอัคและการวิบัติของตัวอย่างทคสอบคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กคังกล่าว ในงานวิจัยได้ถูกออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท.1008 - 38 เพื่อนำค่ากำลังที่ได้ จากการทคสอบเสาเชิงประกอบ (ในรูปของตัวอย่างทคสอบคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก) มาเปรียบเทียบกับสมการตามมาตรฐานการออกแบบของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (ว.ส.ท.) และ ตามข้อกำหนดของ Manual of Steel Construction : Load and Resistant Factor Design (LRFD) ของ American Institute of Steeland Construction (AISC) ในการ สรุปเพื่อมุ่งหาแนวทางการออกแบบที่เหมาะสมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

 เพื่อพัฒนาระบบการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (Preconfinement) แก่ตัวอย่างทดสอบ กอนกรีตและเสากอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้ปลอกเหล็ก (Steel jacket)

 เพื่อศึกษาถึงผลของการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (Preconfinement) ที่มีต่อกำลัง (Strength) และรวมถึงความเหนียว (Ductility) ของคอนกรีตที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน และได้ข้อมูลของความหนาของปลอกเหล็กที่ใช้และการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป

 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนที่เกิดขึ้นและลักษณะการวิบัติ ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนโดยอาศัยข้อมูลของความหนาของปลอกเหล็ก และหน่วยแรงโอบรัดก่อนที่เหมาะสมที่ได้จากวัตถุประสงค์ข้อที่ 2 เพื่อนำเสนอสมการที่มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์หากำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ถูกโอบรัคก่อนภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยเป็นการศึกษาถึงการพัฒนาระบบการให้หน่วยแรงโอบรัคก่อน (Preconfinement) แก่ตัวอย่างทคสอบคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโคยใช้แบบปลอกเหล็ก (Steel jacket) มุ่งเน้นในการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างเพื่อปรับปรุง/ซ่อมแซมสำหรับอาการที่มีความบกพร่อง ทางค้านโครงสร้างและองค์อาการที่ไม่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์โคยขั้นตอนในการศึกษา แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ (1) การทคสอบคุณสมบัติทางกลของวัสคุ (2) การทคสอบตัวอย่างทคสอบ คอนกรีตหน้าตัคสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัคก่อนด้วยปลอกเหล็กภายใต้แรงกคอัคในแนวแกน และ (3) การทคสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัคสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัคก่อนด้วยปลอกเหล็ก ภายใต้แรงกคอัคในแนวแกน โคยมีกำลังรับแรงกคอัคในแนวแกนซึ่งมีก่าอย่างน้อย 300 kN และไม่เกิน 1800 kN เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือทคสอบ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้น พบว่าพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในลักษณะข้างต้นขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่น กำลังอัดประลัย ของคอนกรีต (Ultimate compressive strength of concrete) รวมถึงหน่วยแรงคราก (Yielding stress) และ โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ของเหล็ก ลักษณะวิธีการให้แรงกดอัดกระทำต่อเสา อัตราส่วนของความกว้างของปลอกเหล็กต่อความหนาของปลอกเหล็ก (*B/t*) อัตราส่วนความสูง ของเสาต่อความกว้างของหน้าตัดเสา (*L/B*) รวมทั้งอัตราส่วนกำลังคอนกรีตต่อกำลังของเหล็ก และรูปร่างหน้าตัดของปลอกเหล็ก (Huang et al., 2002) ดังนั้นในการศึกษานี้จึงกำหนดขอบเขต ของงานวิจัยโดยมีรายละเอียดของดังนี้

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

 การทดสอบคุณสมบัติทางกล และพฤติกรรมทางกลของวัสดุที่ใช้ศึกษาในงานวิจัย ได้แก่ การทดสอบกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต (อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 และ ASTM C469) การทดสอบกำลังรับแรงดึงของปลอกเหล็กและเหล็กเสริมคอนกรีต (อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8) ลอนกรีตที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยเป็นคอนกรีตผสมเสร็จ (Ready - mixed concrete)
 โดยใช้กำลังรับแรงกดอัดสูงสุด 3 ค่าคือ 18 25 32 MPa ซึ่งคอนกรีตดังกล่าวมีขายในเชิงพาณิชย์ และมักถูกใช้ในการก่อสร้างอาคารในประเทศไทย

 กำหนดให้แรงกระทำมีลักษณะเป็นแรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อแกนคอนกรีต หรือแกนคอนกรีตเสริมเหล็กของตัวอย่างทดสอบโดยที่ถูกรองรับโดยแผ่นเหล็กรับแรงแบกทาน (Bearing plate) ซึ่งสามารถเทียบได้กับการกระทำของแรงกดอัดต่อเสาเชิงประกอบตามข้อกำหนด ของมาตรฐาน ว.ส.ท.1008 - 38 ข้อ 4314(ค)

5) ตัวอย่างทดสอบมีลักษณะหน้าตัดสี่เหลี่ยมงัตุรัสขนาด 150 x 150 mm โดยที่แบ่งเป็น ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตมีความสูง 300 mm และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีความสูง 750 mm โดยในความสูงดังกล่าวพบว่ามีค่า L/B เท่ากับ 5.0 ซึ่งเป็นค่าที่นิยมมักใช้การก่อสร้างอาคารเตี้ย และอาการสูงปานกลางใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งมักอยู่ในช่วง 5 ถึง 9 (Schneider, S.P., 1998) และถูกจำกัดโดยความสูงของเครื่องมือทดสอบ อีกทั้งเสาตัวอย่างทดสอบทั้งหมดไม่มีระบบที่ใช้ ในการถ่ายแรงเฉือนระหว่างแกนคอนกรีตเสริมเหล็กและปลอกเหล็ก

6) ปลอกเหล็ก (Steel jacket) ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นการนำเหล็กแผ่นโครงสร้างแบบเย็น (Cold - formed) นำมาพับเป็นสองส่วนมาประกอบกันโดยเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งเป็นเหล็ก ตามมาตรฐานเหล็กโครงสร้างของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ที่มีความหนา 3.2 4.5 และ 6.0 mm โดยมีค่า B/t ของเสาเชิงประกอบอยู่ในช่วง 26 ถึง 48 ซึ่งพบว่าเป็นที่นิยมใช้ ในอาการเตี้ยและอาการสูงปานกลางโดยมีการใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา (Schneider, S.P., 1998) และมีอัตราส่วนของปริมาณปลอกเหล็กต่อพื้นที่หน้าตัดเสามากกว่า 4 เปอร์เซ็นต์ ตามข้อกำหนด ของ AISC LRFD

7) การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (Preconfinement) จะได้มาจากระบบการให้แรงกระทำ ซึ่งประกอบด้วยนอตและแบบปลอกเหล็กดังที่แสดงในรูปที่ 1.2(ก) การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (Preconfinement) ต่อตัวอย่างทดสอบนั้น ซึ่งแกนคอนกรีตจะถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กก่อน จากนั้นจะถูกนำมาโอบรัดด้วยแบบปลอกเหล็กโดยใช้ใช้นอตยึดแบบปลอกเหล็กเข้าหากัน เพื่อช่วยในการถ่ายแรงเข้าหากัน ดังที่แสดงในรูปที่ 1.2(ข) และทำการให้หน่วยแรงบิดต่อนอต ซึ่งทำให้แบบปลอกเหล็กส่งถ่ายแรงอัดกระทำต่อปลอกเหล็กและแกนคอนกรีต ตามลำดับ ซึ่งแรงที่ใช้ดังกล่าวเป็นหน่วยแรงโอบรัดก่อน โดยในเบื้องต้นนั้นการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ที่ใช้ในการศึกษางานวิจัยนี้มี 2 ค่า คือ ประมาณ 0.05 f_c และ 0.1 f_c (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะหน้าตัด ของตัวอย่างทดสอบและความสามารถของเครื่องมือ)



รูปที่ 1.2 ลักษณะการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

 ใด้รูปแบบการซ่อมแซมเสาคอนกรีตเสริมเหล็กของโครงสร้างเก่าที่นำปลอกเหล็ก มาช่วยในการซ่อมแซมในอาคารที่มีความบกพร่องหรือมีการปรับเปลี่ยนสภาพการใช้งาน เพื่อให้สามารถรับกำลังได้เพิ่มขึ้นและตรงตามสภาพการใช้งานจริง

 เข้าใจพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัคก่อน ด้วยปลอกเหล็กได้ข้อเสนอแนะที่เหมาะสมนำไปสู่การออกแบบและใช้งานที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

 เป็นการสร้างองค์ความรู้เพื่อพัฒนาระบบการให้หน่วยแรงโอบรัคก่อนจากการนำเอา นอตมาใช้เป็นตัวยึดปลอกเหล็กเข้าหากันทำให้ได้รูปแบบการก่อสร้างที่ง่ายและรวคเร็ว อีกทั้งยังช่วยประหยัดเวลาและปลอกเหล็กที่นำมาใช้ยังช่วยเป็นไม้แบบที่ใช้ในการก่อสร้าง และยังเป็นการรักษาสิ่งแวคล้อมไปอีกทางหนึ่งด้วย

บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงหลักการ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยจะกล่าวถึงประเภทเสาคอนกรีต เสริมเหล็ก พฤติกรรมและกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีต เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก และในเสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต (Concrete - filled steel tube column) ผลของการ โอบรัด ทางด้านข้างต่อพฤติกรรมของคอนกรีต และผลของการ โอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดก่อน ด้วยปลอกเหล็ก สุดท้ายกล่าวถึงข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับเสาดังกล่าว

2.1 ประเภทเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เสาเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่อยู่ในแนวดิ่งทำหน้าที่รับแรงกดอัดหรือทั้งแรงกดอัด และแรงดัดร่วมกัน ซึ่งได้มาจากการถ่ายน้ำหนักบรรทุกของคานหรือแผ่นพื้นในชั้นต่าง ๆ แล้วถ่ายน้ำหนักบรรทุกลงสู่ดินโดยฐานราก หากเสาต้นใดด้นหนึ่งวิบัดิจะทำให้ส่วนของโครงสร้าง ที่ยึดดิดต่อเนื่องกันมานั้นเกิดการชำรุดเสียหายจนอาจทำให้โครงสร้างทั้งหมดนั้นถึงกับพังลงมาได้ ดังนั้นในการกำนวณออกแบบจึงต้องให้ความสำคัญเป็นพิเสยเกี่ยวกับแรงกดอัดและโมเมนต์ดัด ที่เสาต้องรองรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอาจมีรูปหน้าตัดกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า เสาก่มองกรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอาจมีรูปหน้าตัดกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า เสาที่มีอัตราส่วนของความชะลูด (Slendemess ratio) มีก่าน้อยไม่เกินพิกัดที่จะทำให้เสานั้นเกิดวิบัติ โดยการโก่งเดาะทางด้านข้างมาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. กำหนดว่าเสาสั้นด้องมีอัตราส่วนระหว่าง กวามสูงของเสาต่อด้านแคบของเสารูปหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือต่อขนาดเส้นผ่าสูนย์กลาง ของเสารูปหน้าตัดกลมมีก่าไม่เกินกว่า 15 (*L/D* ≤15) กำลังรับแรงกดอัดของเสาสั้นจะขึ้นอยู่กับ กำถังของวัสอุที่ใช้และขนาดรูปตัดของเสาส่วนเสายาว (Slender column) หมายถึงเสาที่มีอัตราส่วน ความชะลูดมาก (*L/D* >15) ซึ่งมีความสามารถในการรับแรงกดอัดของเสายาวจะน้อยกว่าเสาสั้น ที่มีขนาดรูปตัดอย่างเดียวกันเพราะเสายาวเกิดการโก่งเคาะทางด้านข้างก่อนเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่รับน้ำหนักตามแนวแกน (Axially loaded column) ซึ่งมีรูปร่างถักขละต่าง ๆ ดังนี้ เสาปลอกเดี่ยว เป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขึ้นโดยมีปลอกรัดเป็นวง ๆ ซึ่งเหล็กปลอก ที่รัดอาจจะเป็นวงเดียวหรือหลายวง ลักษณะของเหล็กปลอกควรจะงอฉากให้เกี่ยวยึดเหล็กขึ้นถิ่ พอสมควรเพื่อป้องกันเหล็กยืนไม่ให้โก่งงอ นิยมใช้กับอาการทั่ว ๆ ไป ดังแสดงในรปที่ 2.1(ก)

หอแมก มาหอบองเกินเกินเกิน เมาก เกิงอินอมาชิกบอาการทราๆ เป็าจุงแแพง เนรูปที่ 2.1(ก) เสาปลอกเกลียว เป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กยืนมีปลอกเป็นเกลียวรัดต่อเนื่อง ซึ่งรับแรง ได้ดีกว่าเสาปลอกเดี่ยวประมาณ 15% มักใช้ในเสากลมหรือเสาหลายเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ง) เสาปลอกเกลียวเสริมแกนเหล็กเหมือนเสาปลอกเกลียวแต่แกนกลางจะมีเหล็กเสริมแกน ซึ่งอาจมีหน้าตัด I หรือ H ตามความเหมาะสม พื้นที่หน้าตัดแกนเหล็กเมื่อเทียบกับหน้าตัดเสาแล้ว จะไม่ใหญ่นักเสาชนิดนี้นิยมใช้ในกรณีมีแป้นหูช้างหรือต้องการลดขนาดของเสาลงให้พอเหมาะ กับวัตถุประสงค์ทางสถาปัตยกรรม ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ก)

เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตคล้ายกับเสาปลอกเกลียวเสริมแกนเหล็กแต่เหล็กที่เป็นแกนนิยม ใช้เหล็กแผ่นหนา ๆ มาตัดเชื่อมหรือย้ำหมุดขึ้นรูปเป็นหน้าตัด H ขนาดใหญ่ หุ้มด้วยตะแกรงเหล็ก เบอร์ 10 AS&W Gage และมีคอนกรีตกำลังสูงหุ้มไม่น้อยกว่า 6 cm ซึ่งเสาลักษณะนี้นิยมใช้ ในกรณีที่ต้องการขนาดเสาเล็กแต่รับน้ำหนักมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ง)

เสาคอนกรีตหุ้มด้วยท่อเหล็ก มีลักษณะเสาที่รับน้ำหนักไม่มาก เช่นค้ำยันชายคาปลายล่าง ที่ฝังในคอนกรีตพื้นหรือฐานรากต้องมีแผ่นเหล็กหนา 3/8" หรือประมาณ 10 mm เชื่อมติดสำหรับ กระจายน้ำหนักพื้นที่แผ่นเหล็กให้คำนวณแผ่น้ำหนักให้พอเหมาะ ดังแสดงในรูปที่ 2.1(จ)



รูปที่ 2.1 ประเภทเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (ก) เสาปลอกเดี่ยว (ง) เสาปลอกเกลียว (ก) เสาปลอกเกลียวเสริมแกนเหล็ก (ง) เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต (ง) เสาคอนกรีตหุ้มด้วยท่อเหล็ก

พฤติกรรมและกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีต และเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.2.1 เสาคอนกรีตล้วน

จากการพิจารณาในส่วนปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงกดอัดของเสา เช่น ขนาดรูปร่างของเสา คุณภาพของกอนกรีต อัตราการให้แรงกดอัด ความชะลูดของเสา ตลอดจน ลักษณะของการหล่อเสาตัวอย่างซึ่งอาจจะหล่อในแนวตั้งหรือในแนวนอน ในการทดสอบ เสาคอนกรีตที่ปราสจากเหล็กเสริมโดยการกดอัดในแนวแกน พบว่าพฤติกรรมการรับแรงกดอัด ของเสาคอนกรีตสั้นซึ่งมีลักษณะแบบเปราะ (Brittle) ที่คล้ายกับพฤติกรรมการรับแรงกดอัด ของตัวอย่างกอนกรีตรุปทรงกระบอกที่ใช้ในส่วนของการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดจบดงคอนกรีต เมื่อพิจารณาถึงส่วนความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง (Stress) และความเครียด (Strain) ในช่วงแรก ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของกอนกรีต ซึ่งในส่วนของการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีต เมื่อพิจารณาถึงส่วนความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง (Stress) และความเครียด (Strain) ในช่วงแรก ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของกอนกรีต ซึ่งในส่วนความสัมพันธ์ดังกล่าวจะมีความโก้งมากขึ้น เนื่องจากการแตกร้าวภายในที่มากขึ้นจนถึงทำลังรับแรงกดอัดสูงสุดที่จุดที่เส้นกราฟความสัมพันธ์ มีก่าความชันเท่ากับสูนย์ หลังจากนั้นความสามารถในการรับแรงกดอัดจองกอนกรีตจะลดลง อย่างต่อเนื่อง สุดท้ายเสาคอนกรีตจะเกิดการวิบัติโดยเกิดการแตกออก (Splitting) ในแนวยาว ของเสาหรือแบบเฉือนขนานในระนาบเอียงโดยหน่วยแรงกดอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตมีก่าเลลี่ย ประมาณ 0.85 เท่าของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของกอนกรีต ดังนั้นการกำนวณกำลังรับแรงกดอัด สูงสุดในแนวแกนของเสากอนกรีตดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$P = 0.85 f'_{co} A_c \tag{2.1}$$

เมื่อ f_{co}' คือ กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของตัวอย่างกอนกรีตรูปทรงกระบอก

A. คือ พื้นที่หน้าตัดสุทธิเสาคอนกรีต

2.2.2 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

พฤติกรรมการรับแรงของเสาคอนกรีตที่เสริมเฉพาะเหล็กเสริมหลักอย่างเคียว (ไม่มีเหล็กปลอก) มีพฤติกรรมแบบเปราะและการวิบัติก่อนข้างคล้ายกับการวิบัติของเสาคอนกรีต กล่าวคือ ทันทีที่คอนกรีตส่วนที่หุ้มเหล็กเสริมหลักถูกกดอัดแตกและร่อนออก ส่วนเหล็กเสริมหลัก จะถูกกดอัดและเกิดการวิบัติ โดยการ โก่งเดาะเฉพาะที่ แต่เมื่อเสาคอนกรีตดังกล่าวถูกเสริม ด้วยเหล็กปลอกเกลียวหรือเหล็กปลอกเดี่ยว เหล็กปลอกจะช่วย โอบรัดแกนคอนกรีตภายใน ไว้หลังจากที่กอนกรีตหุ้มถูกอัดแตกทำให้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีกำลังรับแรงกดอัดเพิ่มขึ้น และช่วยให้เสามีพฤติกรรมแบบเหนียว (Ductile) มากขึ้นก่อนเกิดการวิบัติ อีกทั้งยังช่วยในการยึด เหล็กเสริมหลักให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการขณะหล่อเสาคอนกรีตอีกด้วย

รูปที่ 2.2 แสดงพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาปลอกเกลียว และเสาปลอกเดี่ยว จากการทคสอบถ้ำเสาปลอกเกลียวและเสาปลอกเดี่ยวมีขนาคพื้นที่หน้าตัด ของคอนกรีตและมีปริมาณเหล็กเสริมหลักเท่ากันนั้น สมมติว่าเหล็กเสริมหลักมีกำลังจุดคราก ไม่สูงมากนัก (เช่น เหล็กเส้น SD30 และ SD40) แล้วพบว่าเมื่อหน่วยแรงกดอัดในคอนกรีต และเหล็กเสริมมีค่าอยู่ในพฤติกรรมช่วงยืดหยุ่น (Elastic) ซึ่งในความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัด กับการหดตัวในแนวแกนของเสาปลอกเกลียวและเสาปลอกเดี่ยวค่อนข้างมีลักษณะเหมือนกันแล้ว โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวจะมีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรงในช่วงเริ่มต้น แต่เมื่อเสารับแรงกคอัด มากขึ้นจนหน่วยแรงกดอัดในคอนกรีตมีก่าสูงเกินกว่า 0.5 f_{co}^\prime โดยประมาณแล้วความสัมพันธ์ ้ดังกล่าวมีลักษณะเป็นเส้นโค้งมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อแรงกดอัดมีก่าสูงจนกระทั่งหน่วยแรงกดอัด ในเหล็กเสริมถึงจุดครากแล้ว แรงกระทำที่เพิ่มขึ้นจะถูกรองรับโด่ยคอนกรีต จากนั้นคอนกรีต ้ส่วนที่หุ้มเหล็กเสริมจะเริ่มแตกร้าวถ้าระยะห่างของเหล็กปลอกเดี่ยวมีก่ามากเกินไป เมื่อคอนกรีต ที่หุ้มถูกอัดแตกแล้วเสาจะเกิดการวิบัติอย่างทันทีทันใด (Abrupt failure) ขึ้นเพราะเหล็กเสริมหลัก ้ที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกเดี่ยวถูกกดอัดและโก่งเดาะทางข้างทันที ทำให้เสามีพฤติกรรมการวิบัติ ์แบบเปราะแต่ถ้าเหล็กปลอกเดี่ยวมีค่าระยะห่างน้อยกว่าที่มาตรฐานการออกแบบกำหนดแล้วนั้น ้ กำลังรับแรงกดอัดของเสาจะก่อย ๆ ลดลงภายหลังจากที่กอนกรีตหุ้มถูกอัดแตก เสาจะมีพฤติกรรม การวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (Progressive failure) มากขึ้น อย่างไรก็ดีในทางทฤษฎีถือว่าเสานั้น ้ไม่เหมาะที่จะใช้งานอีกต่อไปเมื่อคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมหลักถูกอัดแตก


รูปที่ 2.2 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาปลอกเดี่ยวและปลอกเกลียว (MacGregor, J.G., 1992)

ในรูปที่ 2.3 การวิเคราะท์หากำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาสั้น สามารถ พิจารณาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของกอนกรีตและเหล็กเสริม โดยกำหนดให้กอนกรีตมีหน่วยแรงกดอัดสูงสุดมีก่าเท่ากับ 0.85 ƒ' ที่ก่าความเกรียดกดอัด มีก่าเท่ากับ 0.002 mm/mm (ACI committee 318 - 05) และกอนกรีตมีความเกรียดกดอัดสูงสุด ก่อนวิบัติมีก่าเท่ากับ 0.003 mm/mm โดยที่ก่ากำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาปลอกเดี่ยว และเสาปลอกเกลียว (ก่อนที่คอนกรีตหุ้มถูกอัดแตก) มีก่าเท่ากับผลรวมของกำลังรับแรงกดอัด ได้จากกอนกรีตและเหล็กเสริม ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าเมื่อใช้เหล็กเสริมมีหน่วยแรงกราก (Yield stress, f_y) ในช่วงระหว่าง 300 - 400 MPa เหล็กเสริมนั้นจะมีความเกรียดที่จุดกราก (ε_y) เท่ากับ 0.0015 - 0.002 mm/mm ทำให้เหล็กเสริมหลักในเสาจะถูกกดอัดถึงจุดกรากก่อนที่กอนกรีต ถูกกดอัดจนถึงหน่วยแรงกดอัดสูงสุดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นก่อนที่กอนกรีตหุ้มจะถูกอัดแตก หน่วยแรงกดอัดของกอนกรีตจะถูกสมมุติให้มีก่า 0.85 ƒ' และหน่วยแรงกดอัดของเหล็กเสริม มีก่าเท่ากับหน่วยแรงกราก (Yield stress, ƒ,) ดังนั้นในส่วนการกำนวณกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังแสดงในสมการที่ 2.2

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

เมื่อ A_{s} คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา

- A, คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมหลัก
- f, คือ กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมหลัก



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริม (วินิต ช่อวิเชียร, 2540)

มาตรฐานการออกแบบเสากอนกรีตเสริมเหล็กต้องทำตามข้อกำหนดที่ได้ ของ American Concrete Institute (ACI) หรือของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรม ราชูปถัมภ์ (ว.ส.ท.) สำหรับอาการขนาดเล็กในประเทศไทย และคอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างมักถูก กำหนดให้มีกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดอยู่ในช่วงระหว่าง 18 - 25 MPa เหล็กเสริมในแนวแกนมักจะมี หน่วยแรงกราก (Yield stress, f_y) อยู่ในช่วง 300 - 400 MPa และเสามักมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 0.15 - 0.25 m และสูง 2.0 - 2.80 m พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมในแนวแกน (A_y) มีค่าอยู่ในช่วง 0.01 - 0.08 เท่าของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด (A_g) ของเสา เสาคอนกรีตมีเหล็กปลอกยึดเหล็กเสริมใน แนวแกนเพื่อป้องกันการเกิดการ โก่งเดาะของเหล็กเสริมในแนวแกน โดยต้องมีขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางอย่างน้อย 6 mm และระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกตามที่กำหนดในมาตรฐานออกแบบ

2.3 เสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

เสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต (Concrete -filled steel tube column, CFT) คือเสาคอม โพสิท (Composite column) หรือเสาเชิงประกอบที่ก่อสร้างโดยใช้ท่อเหล็กกลวงหรือปลอกเหล็กกลวง ซึ่งมีหน้าตัดทรงกลมหรือหน้าตัดสี่เหลี่ยมเป็นแบบหล่อและเทคอนกรีตลงช่องว่างของปลอกเหล็ก เพื่อใช้เป็นแกนของเสา โดยในส่วนของปลอกเหล็กที่ใช้ได้ถูกออกแบบให้ทำงานร่วมกับคอนกรีต เพื่อให้เกิดลักษณะพฤติกรรมเชิงประกอบ (Composite action) โดยปลอกเหล็กอาจจะถูกออกแบบ ทำหน้าที่หลักในการรองรับหน่วยแรงในแนวแกน (Axial stress) เกิดจากแรงกดอัดและ โมเมนต์ดัด และ/หรืออาจถูกออกแบบให้รองรับหน่วยแรงตามขวาง (Transverse stress) ที่เกิดจากแรงเฉือน และ/หรืออาจถูกออกแบบให้รองรับแรงคันเนื่องจากการขยายตัวของแกนคอนกรีตภายใต้แรงกคอัค ซึ่งทำให้เกิดการ โอบรัด (Confining effect) ต่อแกนคอนกรีตขณะเดียวกันแกนคอนกรีตทำหน้าที่ ้ช่วยปลอกเหล็กในการรองรับหน่วยแรงในแนวแกนบางส่วน อีกทั้งยังช่วยให้ปลอกเหล็ก ้มีความต้านทานต่อการเกิดการ โก่งเดาะเฉพาะที่ (Local buckling) ของผนังของปลอกเหล็กเพิ่มขึ้น ซึ่งผลของพฤติกรรมเชิงประกอบ (Composite action) ข้างต้นทำให้เสา CFT มีข้อคีเหนือกว่าเสา คอนกรีตเสริมเหล็กและเสาเหล็กโครงสร้าง ทั้งในด้านความแกร่ง (Stiffness) กำลัง (Strength) ความเหนียว (Ductility) และการดูคซึมพลังงาน (Energy absorption) และเป็นผลส่งต่อให้ในส่วน ของเสา CFT เป็นเสาที่ใช้ปริมาณของเหล็กลดลงเมื่อทำการเปรียบเทียบกับเสาเหล็ก โครงสร้าง และปลอกเหล็กยังทำหน้าที่เป็นแบบหล่อและค้ำยัน ซึ่งส่งผลทำให้การก่อสร้างคำเนินการได้ง่าย และช่วยให้ราคาค่าก่อสร้างโครงสร้างลดลง ดังนั้นจากข้อดีข้างต้นในช่วงหลายปีที่ผ่านมา เสา CFT จึงได้รับความนิยมและประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในต่างประเทศ เช่น ในประเทศ สหรัฐอเมริกา จีน และญี่ปุ่น (Xiao, Y., et al., 2005) โคยในสหรัฐอเมริกาในส่วนของ เสา CFT ้มักถูกใช้ในอาคารเตี้ยและอาการสูงปานกลางมักจะมีอัตราส่วนของความกว้างของเสาต่อความหนา ้ของปลอกเหล็กอยู่ในช่วงระหว่าง 26 ถึง 48 และมีอัตราส่วนของความสูงต่อความกว้างของเสา อยู่ในช่วง 5 ถึง 9 (Schneider, S.P., 1998)

ในรูปที่ 2.4 เป็นลักษณะของเสา CFT ซึ่งในปัจจุบันถูกแบ่งตามลักษณะการออกแบบ ให้ปลอกเหล็กมีลักษณะรองรับหน่วยแรง 2 แบบคือ (1) ปลอกเหล็กทำหน้าที่หลักเป็นเหล็กแกน (Longitudinal reinforcement) รองรับหน่วยแรงในแนวแกน โดยเสา CFT ถูกก่อสร้างอย่างต่อเนื่อง โดยมีความสูงหลายชั้นหรือสูงตลอดความสูงของอาการ ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ก) ซึ่งเสา CFT แบบนี้รองรับแรงที่กระทำผ่านปลอกเหล็กและคอนกรีตร่วมกันและมักถูกเรียกว่า "CFT column" และ (2) ปลอกเหล็กทำหน้าที่หลักเป็นเหล็กเสริมในแนวขวาง (Transverse reinforcement) โดยมีรายละเอียดจุดเชื่อมต่อการออกแบบและการก่อสร้างที่ใกล้เกียงกับโครงสร้างคอนกรีต เสริมเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.4(ข) ซึ่งมักถูกเรียกว่า "Tubed column"



รูปที่ 2.4 เสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต (ก) CFT column และ (ง) Tubed column

เสา CFT แบบแรกได้ถูกศึกษาโดยนักวิจัยจำนวนมากตั้งแต่ปี 1967 ทั้งในรูปการทดสอบ และการทำระเบียบวิธีไฟในต์อิลิเมนต์ (Finite element analysis) ซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์โครงสร้าง ทุกมิติโดยแบ่งชิ้นส่วนออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ดังตัวอย่างงานวิจัยที่เสนอโดย Schneider, S.P. (1998); Sakino, K., et al., (2004); Xiao, Y., et al., (2005) จากงานวิจัยข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าพฤติกรรม ของเสา CFT ขึ้นอยู่กับในส่วนของตัวแปรหลักได้แก่ อัตราส่วนของความกว้างต่อความหนา (*B/t*) และอัตราส่วนของความสูงต่อความกว้าง (*L/B*) รูปร่างหน้าตัดของปลอกเหล็กและอัตราส่วน ของกำลังคอนกรีตต่อกำลังของเหล็กโดยเสา CFT หน้าตัดสี่เหลี่ยมมีผลการโอบรัดของปลอกเหล็ก ต่อแกนกอนกรีตต่ำกว่าเสาหน้าตัดทรงกลม เนื่องจากผนังของปลอกเหล็กกลมจะต้านความคัน จากการขยายตัวของกอนกรีตโดยการอาศัยในส่วนของหน่วยแรงในแนวเส้นรอบวง (Hoop stress) แต่ผนังของปลอกเหล็กกลวงสี่เหลี่ยมจะต้านความคันดังกล่าว โดยที่อาศัยความแกร่งต่อการดัด (Flexural rigidity) ของผนังปลอกในรูปของแผ่น (Plate) เมื่อผนังปลอกถูกกระทำโดยแรงกดอัด และในส่วนของแรงตามขวางพร้อมกันแล้วนั้น ผนังของปลอกเหล็กจะเกิดการโก่งเคาะเฉพาะที่ (Local buckling) ในปัจจุบันการออกแบบเสา CFT ทำได้ตามมาตรฐานการออกแบบที่เกี่ยวข้อง เช่น มาตรฐานสำหรับอาการคอนกรีตเสริมเหล็กวิธีกำลัง ว.ส.ท.1008 - 38 ของวิศวกรรมสถานแห่ง ประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ ปี 2538 Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design (LRFD) ของมาตรฐาน AISC ในปี 1994 และ Recommendations for Design and Construction of Concrete - Filled Steel Tubular Structures ของ Architectural Institute of Japan ปี 1997 โดยรายละเอียดของข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับเสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตจะถูกกล่าวถึง ต่อไปในหัวข้อที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Ultimate load และ Nominal slenderness ratio (Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 1992)

รูปที่ 2.5 แสดงกวามสัมพันธ์แรงกดอัดสูงสุด (Ultimate load) และ Nominal slenderness ratio ของเสา CFT และเสากอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นเสาสั้นหน้าตัดกลมและสี่เหลี่ยมด้านเท่า ภายใต้การให้แรงกดอัดตรงสูนย์ในแนวแกนโดยแรงกดอัดสูงสุด (Ultimate load) หรือ N ใด้ถูก Normalized โดยหารด้วย Nominal axial load capacity หรือ N, เป็นผลรวมของกำลังรับแรงกดอัด กอนกรีตและเหล็ก มีก่าต่ำสุดของรัศมีใจเรชั่น (Radius of gyration) ซึ่งในส่วนของการกำนวณ Nominal slenderness ratio หรือ λ เท่ากับ 0.25 เท่าของเส้นผ่านสูนย์กลางของเสากลมหรือ 0.29 เท่า ของกวามกว้างด้านนอกของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัดุรัส จากรูปแรงกดอัดสูงสุด (Ultimate load) ของเสาหน้าตัดกลมมีก่ามากกว่า Nominal axial load capacity มากเนื่องจากผล Strain hardening ของปลอกเหล็กและผลการโอบรัดของปลอกเหล็ก โดยจะมีก่าลดลงเมื่อ Nominal slenderness ratio หรือกวามยาวของเสานั้นจะมีก่าเพิ่มขึ้นโดยการโอบรัดของปลอกเหล็กจะไม่เพิ่มแรงกดอัดสูงสุด (Ultimate load) ของเสาเนื้อ Nominal slenderness ratio มีก่ามากกว่า 44.3

การเพิ่มขึ้นของแรงกคอัคสูงสุค (Ultimate load) ของเสา CFT สั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น รูปร่างและขนาคของปลอกเหล็กและคุณสมบัติทางกลของวัสดุ Tomii, M., et al., (1977) ใด้ทำการทดสอบเสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตสั้นภายใต้แรงกคอัคในแนวแกนที่มีอัตราส่วน ความชะลูด (Slenderness ratio) มีค่าน้อยกว่า 36 จำนวน 270 ตัวอย่าง โดยเสาที่ศึกษามีหน้าตัดกลม หน้าตัดแปดเหลี่ยม และหน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่า โดยตัวอย่างทดสอบได้ถูกการอบอ่อน (Annealing) เพื่อศึกษาผลของ Strain hardening ที่มีต่อแรงกคอัคสูงสุด (Ultimate load) ของเสาผลการทคสอบ แสดงว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและความเกรียดซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปร่างหน้าตัด ้อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความหนาและกำลังรับแรงกคอัดของกอนกรีต โดยพฤติกรรม การรับกดอัดของเสาดังกล่าวถูกแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ *แบบที่ 1* Strain hardening โดยพฤติกรรม แบบนี้จะเกิดขึ้นกับวัสดุโอบรัดที่มีก่าความแกร่งมากและสามารถต้านทานการขยายตัวทางด้านข้าง ้งองคอนกรีตได้เป็นอย่างดีนั้น ดังนั้นคอนกรีตจะถ่ายเทแรงไปให้วัสดุโอบรัดทำให้คอนกรีต ้สามารถรับแรงกระทำได้เพิ่มสูงขึ้น *แบบที่ 2* Elasto - perfectly plastic ในงานวิจัยนี้ขอนิยามใหม่ เรียกว่า Elastic - perfectly plastic พฤติกรรมแบบนี้จะเกิดขึ้นกับวัสดุโอบรัดที่มีค่าความแกร่ง เพียงพอสามารถจำกัดการขยายตัวทางด้านข้างของกอนกรีตได้คงที่ทำให้กอนกรีตสามารถ รับแรงกระทำได้ดงที่เป็นระยะเวลาหนึ่งหลังจากนั้นค่อยเกิดการวิบัติ และ *แบบที่ 3* ซึ่งสามารถ แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือแบบ Degrading ซึ่งเกิดขึ้นในเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ไม่มีการโอบรัคเกิดขึ้นโคยพฤติกรรมที่เกิดขึ้นคังกล่าวเมื่อคอนกรีตรับแรงกระทำถึงก่าสูงสุดแล้ว ้คอนกรีตจะแตกร้าวมากขึ้นจนไม่สามารถต้านทานการขยายตัวทางด้านข้างของคอนกรีตเอาไว้ได้ และจะเกิดการวิบัติอย่างทันทีทันใด และในอีกลักษณะคือแบบ Strain softening ซึ่งก่อให้เกิดขึ้น ในเสากอนกรีตและเสากอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการ โอบรัดแก่ตัวอย่างทดสอบ โดยพฤติกรรมแบบนี้

เกิดจากการที่วัสดุโอบรัดที่มีความแกร่งน้อยและเมื่อคอนกรีตรับแรงกระทำถึงค่าสูงสุดแล้วนั้น กอนกรีตจะแตกร้าวมากขึ้นจนวัสดุโอบรัดไม่สามารถต้านทานการขยายตัวทางค้านข้างเอาไว้ได้ และเกิดการวิบัติแบบค่อย ๆ ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยที่ความสัมพันธ์แบบ Strain hardening และแบบ Elastic - perfectly plastic มักเกิดขึ้นในเสาที่มีหน้าตัดกลมและเสาหน้าตัดแปดเหลี่ยม และแบบ Degrading มักเกิดขึ้นในเสาหน้าตัดกลมและเสาหน้าตัดแปดเหลี่ยมบางส่วน



รูปที่ 2.6 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและความเครียดของเสา (Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 1992)

การนำมาใช้งานจริงในประเทศญี่ปุ่นเสา CFT มักใช้ในเฟรมรับโมเมนต์ (Moment frame) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 700 mm โดยที่ไม่ใช้ตัวถ่ายแรงเฉือน (Shear connector) ภายในปลอกเหล็กเพื่อทำการถ่ายเทแรงเฉือนระหว่างคอนกรีตและปลอกเหล็กแต่ในสหรัฐอเมริกา เสาประเภทนี้ถูกใช้ในเฟรมที่ถูกค้ำยัน (Braced frame) มักมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1000 mm และคอนกรีตที่ใช้มักเป็นคอนกรีตกำลังสูงเพื่อทำให้เสามีความแกร่งสูงสุด และอาจจะมีการใช้ ดัวถ่ายแรงเฉือน (Shear connector) เพื่อถ่ายเทแรงเฉือนระหว่างคอนกรีตและปลอกเหล็กบางกรณี ในประเทศไทยเสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีตได้ถูกนำมาใช้ในงานบางประเภท เช่น ใช้เป็นเสาเขีม Micropile เพื่อใช้ในการแก้ไขการทรุดตัวของอาการในหลายพื้นที่ เช่น ในการซ่อมอาการศูนย์ เครื่องมือ F5 และอาการหอพักพักนักศึกษา S7 และ S9 ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เป็นต้น โดยปลอกเหล็กที่ใช้ในงานลักษณะนี้จะเป็นปลอกเหล็กกลมกลวง

แนวกิดของเสา CFT ในลักษณะแบบที่สองได้ถูกนำเสนอโดย Tomii, M., et al., (1985) ์ โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้ปลอกเหล็กของเสา CFT รองรับแรงกระทำตามขวางและโมเมนต์ เนื่องจากแผ่นดินใหว เสาประเภทนี้มักถูกเรียกว่า "Tubed column" โดยแรงกระทำจะกระทำ ้ผ่านแกนคอนกรีตเสริมเหล็กและปลอกเหล็กไม่ได้ถูกออกแบบให้รองรับหน่วยแรงในแนวแกน ้โดยตรงโดยการเว้นช่องว่างระหว่างปลอกเหล็กกับท้องคานหรือฐานรากที่ปลายทั้งสองของเสา ้ดังนั้นภายใต้แรงกระทำปลอกเหล็กทำหน้าที่เป็นปลอก (Jacket) หุ้มแกนเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งช่วยเพิ่มกำลังรับหน่วยแรงในแนวแกนและความเหนียวของเสาให้สูงขึ้น นอกจากนั้นแล้ว แนวกิดนี้ยังได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการเสริมกำลังและซ่อมแซมเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ้โดยการเชื่อมปลอกเหล็ก (Steel jacket) เพื่อรัครอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและทำการอัคมอร์ต้า (Mortar) เพื่อปิคช่องว่างระหว่างปลอกเหล็กและเสา คังในตัวอย่างของงานวิจัยที่ถกนำเสนอโคย Priestley, M.J.N., et al., (1994) อย่างไรก็ตามจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ว่า การศึกษาเกี่ยวกับ Tubed column มีค่าค่อนข้างน้อยและเป็นการศึกษาในส่วนของเสาหน้าตัดกลม และถูกกระทำโดยแรงเนื่องจากแผ่นดินใหวเป็นหลัก นอกจากนั้นแล้วจากการที่ Tubed column ถูกกระทำโดยแรงผ่านแกนคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้น Tubed column จึงเป็นอีกรูปแบบหนึ่ง ของเสาที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการเสริมกำลังให้กับเสาคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีอยู่แล้วซึ่งการเสริมกำลังทำได้โดยการห่อหุ้มเสาดังกล่าวด้วยปลอกเหล็ก โดยการรัครอบ ระหว่างปลอกเหล็กและเสาซึ่งจะทำให้เกิดขึ้นได้ในหลายวิธี เช่น การฉีดอัดน้ำปูนซีเมนต์ (Grout) เข้าไปในบริเวณที่ต้องการประเภทขยายตัว (Expansive) เข้าไปในรอยเชื่อมต่อระหว่างปลอกเหล็ก และเสาหรือการใช้สลักเกลียวในการรัดปลอกเหล็กให้เข้ากับเสาโดยตรง ดังนั้นด้วยเหตุผลข้างต้น กอปรกับมาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท.1008 - 38 และข้อกำหนดของ AISC LRFD 1994 ้มีความแตกต่างกันในการกำหนดความหนาต่ำสุดที่ต้องใช้ใน เสา CFT และแนวคิดของสมการ ้ออกแบบจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างของ Tubed column เพิ่มเติม เพื่อที่จะพัฒนา Tubed column ให้สามารถนำไปใช้งานได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ มากขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของรูปแบบการวิเคราะห์หาความสามารถการเสริมกำลัง ้ของปลอกเหล็กใน Tubed column อันเนื่องมาจากการห่อหุ้มของปลอกเหล็กที่มีต่อเสาคอนกรีต และเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

จากการศึกษาเสา CFT ที่ใช้ปลอกเหล็กหน้าตัดทรงกลมกรอกคอนกรีตโดยให้แรงกดอัดใน แนวแกนโดย Johansson, M. (2000) การทดสอบกระทำต่อเสา CFT มี 3 ลักษณะ ดังที่แสดงในรูป ที่ 2.7 พบว่าพฤติกรรมและกำลังการรับแรงกดอัดของเสาในรูปที่ 2.7(ก) มีลักษณะใกล้เคียง กับเสาในรูปที่ 2.7(ก) มากแต่จะแตกต่างจากเสาในรูปที่ 2.7(บ) ซึ่งมีลักษณะการรับแรงกดอัด เหมือนปลอกเหล็กซึ่งไม่ได้กรอกคอนกรีตและกำลังการรับแรงกดอัดของเสาดังกล่าวมีก่าลดลง อย่างมากเมื่อเทียบกับเสาในรูปที่ 2.7(ก) และ 2.7(ก) นอกจากนั้นแล้ว มาตรฐาน ว.ส.ท.1008 -38 ข้อที่ 4314 กำหนดให้มี "กำลังในการรับแรงตามแนวแกนใด ๆ ที่กำหนดให้รับโดยกอนกรีต ขององก์อาการเชิงประกอบต้องถ่ายผ่านเข้าไปในกอนกรีตโดยองก์อาการหรือแป้นหูช้างในลักษณะ แบกทานโดยตรงลงบนคอนกรีตขององก์อาการเชิงประกอบนั้น" โดยแรงกดอัดซึ่งจะกระทำต่อ แกนกอนกรีตของเสาโดยตรงและจะเรียกเสาในลักษณะนี้ว่า Tubed column ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7(ก) ตามที่ได้ถูกนำเสนอโดย Tomii, M., et al., (1985) โดยเสากอนกรีตที่ถูกเสริมกำลังโดยใช้ ปลอกเหล็กเรียกว่า "Tubed concrete column" ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7(บ) และเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ถูกเสริมกำลังโดยใช้ปลอกเหล็กจะถูกเรียกว่า "Tubed RC column" ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7(ก)



รูปที่ 2.7 ลักษณะการให้แรงกคอัคกระทำต่อเสา (ก) แรงกคอัคกระทำต่อคอนกรีตโดยตรง (ข) แรงกคอัคกระทำต่อปลอกเหล็กโดยตรงและ (ค) แรงกคอัคกระทำต่อคอนกรีต และปลอกเหล็กพร้อมกัน

2.4 ผลการโอบรัดทางด้านข้างต่อพฤติกรรมของคอนกรีต

พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของกอนกรีตถูกหาได้โดยการทดสอบแรงกดอัด ด้วอย่างทดสอบเป็นตามมาตรฐานการทดสอบ เช่น มาตรฐาน ASTM C39 ซึ่งถูกแสดงในรูปของ แผนภาพหน่วยแรงและความเกรียดในส่วนของการทดสอบดังกล่าวเป็นการให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้น ในเนื้อกอนกรีตอยู่ในสภาวะหน่วยแรงแบบแกนเดียว (Uniaxial state of stress) อย่างไรก็ตาม ในสภาพของการใช้งานจริงนั้น เช่น ในเสากอนกรีตเสริมเหล็กและเสาเชิงประกอบ เป็นด้น กอนกรีตมักถูกกระทำโดยแรงกดอัดในแนวแกนและโมเมนต์ดัด ทำให้เนื้อกอนกรีตที่อยู่ในบริเวณ แกนของเสากระทำโดยหน่วยแรงในสภาวะหน่วยแรงแบบหลายแกน (Multiaxial state of stresses) โดยที่สภาวะหน่วยแรงแบบแกนเดียวตามลักษณะการทดสอบเป็นเพียงหนึ่งในสภาวะหน่วยแรง แบบหลายแกนที่ก่อให้เกิดขึ้นในส่วนของกอนกรีตตลอดอายุการใช้งานของโกรงสร้างเท่านั้น และเนื่องจากพฤติกรรมการรับแรงของกอนกรีตภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนเปลี่ยนแปลง ไปตามสภาวะของหน่วยแรงทางด้านข้างที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ดังนั้นการรู้พฤติกรรมของกอนกรีต ภายใต้การกระทำของหน่วยแรงประเภทต่าง ๆ จึงมีความสำคัญในการออกแบบองก์อาการกอนกรีต เสริมเหล็ก

คอนกรีตเป็น Frictional material ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลที่ไวต่อแรงกระทำทางด้านข้าง ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนคอนกรีตจะเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้างเนื่องจาก Poisson's effect และถูกต้านทานหรือโอบรัดโดยวัสดุที่ห่อหุ้ม เช่น ปลอกเหล็กกลวงที่อยู่ภายนอกในกรณี ของเสาเชิงประกอบและเหล็กปลอกหรือเหล็กเสริมทางขวางในกรณีของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นผลทำให้เกิดพฤติกรรมเชิงประกอบ (Composite action) ระหว่างปลอกเหล็กและคอนกรีตในรูป ของการเกิดการถ่ายแรงระหว่างปลอกเหล็กและคอนกรีตและผลการโอบรัด (Confining effect) ซึ่งเป็นผลทำให้เสาในลักษณะดังกล่าวมีกำลังและความเหนียว (Ductility) เพิ่มขึ้นจากเสาคอนกรีต

2.4.1 ผลของการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังปกติ

การศึกษาผลการ โอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังปกติ (Normal strength concrete) ได้ทำการศึกษาเป็นจำนวนมาก เช่น Richard, F.E., et al., (1928) และ Mills, L.L., and Zimmerman, R.M. (1970) เป็นต้น ซึ่งในช่วงเริ่มค้น Richard, F.E., et al., (1928) เป็นบุคคลเริ่มแรก ที่ได้ทดสอบให้เห็นผลของการ โอบรัดคอนกรีตที่ทำให้คอนกรีตมีหน่วยแรงกดอัคสูงสุดความแกร่ง และความเครียดที่หน่วยแรงกดอัคสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยได้ทำการทดสอบตัวอย่างทดสอบ รูปทรงกระบอกภายใต้แรงกดอัคในแนวแกนและแรงกระทำทางด้านข้าง (Lateral load) โดยให้แรง กระทำทางด้านข้างมีค่าเปลี่ยนแปลง โดยความดันของเหลวหรือเรียกอีกชื่อว่า Active confinement ปีต่อมา Richard, F.E., et al., (1928) ได้ทำการทดสอบตัวอย่างทดสอบตัวอย่างทดสอบตัวอย่างทดสอบ โอบรัดด้วย Continuous steel spiral ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนหรือเรียกว่า Passive confinement พบว่ากรณีของ Active confinement มีลักษณะเช่นเดียวกับกรณี Passive confinement ถ้าระยะห่าง ระหว่างชั้นขด (Spiral) จะมีค่าน้อย ๆ และ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด ของกอนกรีตที่ความคันทางด้านข้างต่าง ๆ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าภายใต้หน่วยแรงโอบรัด (Confining stress) ที่เพิ่มขึ้น คอนกรีตมีหน่วยแรงกดอัดสูงสุดสูงขึ้นและสามารถเปลี่ยนแปลง รูปร่างได้มากขึ้นก่อนการวิบัติ นอกจากนี้การวิบัตินั้นเป็นการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไปมากขึ้น เนื่องจากคอนกรีตภายใต้หน่วยแรงโอบรัดมีค่าความเหนียว (Ductility) ที่เพิ่มสูงขึ้น จากการทดสอบ Richard, F.E., et al., (1928) ได้นำเสนอสมการการทำนายกำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวแกน ของกอนกรีตเนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้าง ดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$f_{cc}' = f_{co}' + k_1 f_1 \tag{2.4}$$

เมื่อ

f'co คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแกนของคอนกรีต เมื่อไม่มีแรงคันรอบข้าง

- f_1 คือ ความคันรัครอบ (Confining pressure)
- k₁ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การโอบรัดประสิทธิผล

(Confinement effectiveness coefficient) มีค่าเท่ากับ 4.1



รูปที่ 2.8 ผลของหน่วยแรงโอบรัคต่อพฤติกรรมการรับแรงกคอัคในแนวแกนของคอนกรีต (Johansson, M., 2000) ในรูปที่ 2.9 เป็นกราฟแสดงด้วอย่างเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของหน่วยแรง และค่าความเครียดของคอนกรีตในรูปทรงกระบอกปกติและคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ถูกห่อหุ้ม จากรูปพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของแท่งคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน โดยช่วงแรกกราฟความสัมพันธ์ของคอนกรีตทั้งสองกรณีมีลักษณะเหมือนกันจนถึงหน่วยแรงกด อัคสูงสุด *f*[']₆ เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีก่า Poisson's ratio ที่ต่ำ ทำให้การขยายตัวทางด้านข้าง ของคอนกรีตมีก่าที่น้อยมากซึ่งเป็นผลทำให้ไม่มีพฤติกรรมเชิงประกอบ (Composite action) เกิดขึ้น ระหว่างกอนกรีตและชิ้นส่วนที่ถูกห่อหุ้มคอนกรีตและคอนกรีตเป็นวัสดุหลักในการรับแรงกดอัด ในช่วงที่สองหลังจากคอนกรีตถึงกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดแล้ว คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าว อย่างต่อเนื่อง เป็นผลทำให้ความเสรียดในกอนกรีตเพิ่มขึ้นในอัตราที่รวดเร็วมากกว่าหน่วยแรง ดังนั้นความชัน (Slope) ของกราฟกวามสัมพันธ์ของกอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ถูกรัดรอบมีก่าลดง อย่างต่อเนื่องจนถึงจุดหนึ่งกราฟกวามสัมพันธ์ของกอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ถูกรัดรอบมีก่าลดง อย่างต่อเนื่องกอนกรีตเกิดการขยายตัวทางด้านข้างเพิ่มขึ้นมาก จนเกิดพฤติกรรมเชิงประกอบ (Composite action) ระหว่างกอนกรีตและชิ้นส่วนที่ห่อหุ้มคอนกรีตมี กำลังและความแกร่งเพียงพอแล้ว กอนกรีตจะถูกกระทำโดยกวามดันรัดรอบ (Contining pressure) ทำให้กอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มมีพฤติกรรมเหมือนวัสดุเหนีขว (Ductile material) จนกระทั่งถึงจุดวิบัติ



รูปที่ 2.9 กราฟตัวอย่างเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีต รูปทรงกระบอกที่ถูกรัครอบและไม่ถูกรัครอบ (Lin, H.J., and Chen, C.T., 2001)

2.4.2 ผลของการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังสูง

สำหรับคอนกรีตกำลังสูง (High - strength concrete) Attard, M.M., and Setung, S. (1996) ได้ทำการศึกษาโดยการทดสอบแท่งคอนกรีตประเภทดังกล่าวภายใต้หน่วยแรงโอบรัด ซึ่งมีค่าไม่มากนักและ Ansari, F., and Li, Q. (1998) ทำการทดสอบแท่งคอนกรีตประเภทดังกล่าว ภายใต้หน่วยแรงโอบรัดที่มีค่าสูงถึงหน่วยแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีตที่ใช้ศึกษา จากผลการศึกษา ทั้ง 2 กรณีพบว่า ผลของการโอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังสูงมีค่าน้อยกว่าที่เกิดขึ้น ในคอนกรีตกำลังปกติซึ่งจากศึกษาพบว่า สำหรับคอนกรีตกำลังสูงและคอนกรีตมวลเบาค่า k_1 ในสมการที่ 2.4 ควรมีค่าลดลงจาก 4.1 เหลือ 2.0 โดยคอนกรีตกำลังสูงจะมีความเหนียวเพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับค่าของแรงโอบรัดที่กระทำต่อคอนกรีต

2.5 ผลการโอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยปลอกเหล็ก

คอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กกลวงที่มีขนาดสั้นถูกกระทำโดยแรงกดอัด ในแนวแกนจะมีกำลังที่จุดวิบัติสูงกว่าผลรวมของกำลังของปลอกเหล็กรวมกับกำลังของคอนกรีต จากการศึกษาของ Schneider, S.P. (1998) พบว่าปลอกเหล็กที่มีหน้าตัดกลม (Circular steel jacket) ซึ่งมีความสามารถในการโอบรัดต่อคอนกรีตมีค่ามากกว่าปลอกเหล็กที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular steel jacket) เนื่องจากปลอกเหล็กที่มีหน้าตัดกลมทำให้เกิด Effective hoop tension ที่ทำให้เกิดหน่วยแรงโอบรัดรอบที่สม่ำเสมอ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.10(ก) มากกว่าหน่วยแรงรัดรอบ ของปลอกเหล็กที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีค้านของหน้าตัดที่เรียบ ซึ่งมีกวามแกร่งต่อการดัด ที่ไม่เพียงพอในการด้านทานต่อแรงดันเนื่องจากการขยายตัวทางด้านข้างของคอนกรีตที่กระทำ ตั้งฉากกับด้านของหน้าตัดดังกล่าว ดังนั้น การโอบรัดโดยส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นเฉพาะกับคอนกรีต ด้านในของแกนเสาและที่มุมของหน้าตัดเสา แสดงโดยพื้นที่ระบายสีทีบ ดังแสดงในรูปที่ 2.10(ข) โดยกวามดันโอบรัดที่เกิดขึ้นจะมีค่าไม่สม่ำเสมอตลอดหน้าตัดคอนกรีต



รูปที่ 2.10 การกระจายของหน่วยแรงโอบรัด (ก) ปลอกเหล็กที่มีหน้าตัดกลม (ข) ปลอกเหล็กที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม (Johansson, M., 2000)

2.5.1 ผลการโอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยปลอกเหล็กหน้าตัดกลม

ตามที่ได้กล่าวไปแล้วนั้นความคันโอบรัด (Confining pressure, f₁) หรือหน่วยแรง โอบรัดในเสาคอนกรีตหน้าตัดทรงกลมมีค่าคงที่รอบเส้นรอบวงของหน้าตัด ซึ่งเมื่อปลอกเหล็ก (Steel jacket) ถึงจุดคราก (Yielding) ความคันโอบรัดคังกล่าวมีค่าสูงสุดโดยหาได้จากสมการที่ 2.5

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

เมื่อ

 σ_{i} คือ หน่วยแรงทางขวาง (Hoop stress) ของปลอกเหล็ก

- E_s คือ มอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ของปลอกเหล็ก
- ε, คือ ความเครียดทางขวาง (Hoop strain) ของปลอกเหล็ก
- *t* คือ ความหนาของปลอกเหล็ก
- D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนคอนกรีตหน้าตัดทรงกลมที่ถูกโอบรัด

ระดับของการ โอบรัดที่ได้จากปลอกเหล็กถูกแสดงอยู่ในรูปอัตราส่วนการ โอบรัด (Confinement ratio, *CR*) เป็นอัตราส่วนระหว่างความดัน โอบรัดสูงสุด (f_1) และกำลังรับแรงกดอัด ของคอนกรีตที่ไม่ถูก โอบรัด (Compressive strength of unconfined concrete, f_{co}') หรือ

$$CR = \frac{f_1}{f'_{co}} \tag{2.6}$$

จากการศึกษาพบว่าเมื่อความหนาของปลอกเหล็กมีค่ามากกว่าค่า ๆ หนึ่ง ซึ่งทำให้ กำลังรับแรงกดอัดและความเครียดในแนวแกนของคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มโดยปลอกเหล็กมีค่าสูงสุด ที่จุดเดียวกัน ซึ่งทำให้ผลของการโอบรัดมีค่าสูงสุดแล้ว กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง และความเครียดของคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มโดยปลอกเหล็กเป็นแบบ Bilinear ดังที่แสดงในรูปที่ 2.9 อย่างไรก็ตาม ถ้าความหนาของปลอกเหล็กมีค่าน้อยกว่าค่าดังกล่าวแล้ว กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง หน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มโดยปลอกเหล็กจะเป็นแบบกราฟความสัมพันธ์ ของกอนกรีตปกติ ซึ่งกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจะถึงก่อนการกราก (Yielding) ของปลอกเหล็ก ซึ่งทำให้ผลของการโอบรัดมีก่าไม่สูงสุดโดยที่ขนาดหน้าตัดของปลอกเหล็ก ที่ทำให้กราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นแบบ Bilinear จะเป็นขนาดที่ทำให้ก่าอัตราส่วนการโอบรัด (Confinement ratio, f_1 / f'_{co}) มีค่ามากกว่า 0.07 (Lam, L., and Teng, J.G., 2003)

2.5.2 ผลการโอบรัดต่อเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยม

รูปที่ 2.11 แสดงพื้นที่ของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยปลอกเหล็กของเสาคอนกรีต หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมที่มีหน้าตัดกว้าง (*b*) และลึก (*h*) ซึ่งมุมของปลอกเหล็กดังกล่าวได้ถูกออกแบบ ให้มีลักษณะมน โดยมีรัศมี *R*_c เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการโอบรัดที่เกิดขึ้นในแกนคอนกรีต จากการศึกษาของ Mander, J.B., et al., (1988); Lam, L., and Teng, J.G. (2003) พบว่าแกนคอนกรีต จะถูกโอบรัดโดยปลอกเหล็กภายนอกโดยเกิด Arching action ในปลอกเหล็กซึ่งพื้นที่การโอบรัด ประสิทธิผล (Effective confinement area) ของคอนกรีตดังกล่าวอยู่ภายในกรอบพาราโบลา 4 ด้าน ที่ตัดกับขอบของหน้าตัดเสาที่มุมประมาณ 45° และเนื่องจากการโอบรัดที่เกิดขึ้นมีก่าไม่สม่ำเสมอ ตลอดหน้าตัดของแกนคอนกรีต ดังนั้นที่ความเครียดในแนวแกนก่าหนึ่งที่เกิดขึ้นบนเสาดังกล่าว หน่วยแรงที่ถูกรองรับโดยคอนกรีตจะมีก่าไม่สม่ำเสมอตลอดหน้าตัด ซึ่งทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้น บนหน้าตัดเสาถูกประมาณให้อยู่ในรูปของหน่วยแรงในแนวแกนเลลี่ย ซึ่งมีก่าเท่ากับแรงกระทำ หารด้วยพื้นที่หน้าตัดของเสา



รูปที่ 2.11 คอนกรีตที่ถูกโอบรัคในเสาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม (Lam, L., and Teng, J.G., 2003)

2.5.3 แบบจำลองของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยปลอกหน้าตัดสี่เหลี่ยม

นักวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาพฤติกรรมคอนกรีตที่ถูกโอบรัคในเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาซึ่งทำให้ได้แบบจำลองของกำลังรับแรงกดอัดและความเครียดสูงสุด ในแนวแกนต่าง ๆ ในที่นี้ขอกล่าวถึงเฉพาะแบบจำลองของ ACI Committee 440 (2002) เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าเป็นแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับจากองก์กรที่มีชื่อเสียงทางด้านคอนกรีต มากที่สุดแห่งหนึ่งและได้มีการนำไปใช้งานแล้วอย่างกว้างขวาง

สำหรับเสาคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม ACI Committee 440 (2002) เสนอให้เปลี่ยน หน้าตัดของเสาจากหน้าตัดสี่เหลี่ยมให้เป็นหน้าตัดทรงกลมที่สมมูลกัน โดยที่ใช้อัตราส่วนรูปร่าง (Shape factor, k_s) สำหรับการพิจารณาผลของการ โอบรัดที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากหน้าตัดสี่เหลี่ยม อัตราส่วนรูปร่าง (Shape factor, k_s) ได้ถูกนิยามให้เป็นอัตราส่วนของพื้นที่การ โอบรัดประสิทธิผล (Effective confinement area) ต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีต โดยสมมุติให้พื้นที่การ โอบรัด ประสิทธิผลเป็นพื้นที่ของคอนกรีตที่อยู่ภายในกรอบพาราโบลา 4 ด้านที่ตัดกับขอบของหน้าตัดเสา ที่มุม 45° ดังที่แสดงในรูปที่ 2.11 โดยที่สมการของอัตราส่วนรูปร่าง (Shape factor, k_s) จะเขียนได้ ดังแสดงในสมการที่ 2.7

$$k_{s} = \frac{A_{e}}{A_{c}} = \frac{1 - ((b - 2R_{c})^{2} + (h - 2R_{c})^{2})/3A_{g} - \rho_{sc}}{1 - \rho_{sc}}$$
(2.7)

- เมื่อ A คือ พื้นที่การโอบรัดประสิทธิผลของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยม
 - A คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีต
 - A_{g} คือ พื้นที่หน้าตัดของเสาคอนกรีต มีค่าเท่ากับ $bh (4 \pi)R_{c}^{2}$
 - ho_{sc} คือ ปริมาณเหล็กเสริม (Cross sectional area ratio) ของเหล็กเสริมในแนวแกน

ในสมการที่ 2.7 ปริมาณหลีกเสริมของเหล็กเสริมในแนวแกน (ho_{sc}) ของเสาที่อยู่ นอกพื้นที่รับความคันโอบรัดจะถูกหักลบออกจากพื้นที่หน้าตัดของเสาคอนกรีตเป็นสองเท่า ในแบบจำลองนี้ เสาหน้าตัดทรงกลมที่สมมูลจะถูกนิยามเป็นเสาที่มีอัตราปริมาตร (Volumetric ratio) ของเหล็กที่เท่ากับเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมเดิม ดังนั้น เส้นผ่านศูนย์กลางของเสา หน้าตัดทรงกลมที่สมมูลหาได้จากสมการ

$$D = \frac{2bh}{b+h}$$

(2.8)

- เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาหน้าตัดทรงกลม
 - *b* คือ ความกว้างของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม
 - *h* คือ ความลึกของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม

จากสมการที่ 2.8 ค่าความคันโอบรัคของเสาหน้าตัคสี่เหลี่ยมจะถูกหาโดยการแทน ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาหน้าตัคทรงกลมที่สมมูลลงในสมการที่ 2.5 นอกจากนี้ ACI Committee 440 (2002) ได้เสนอให้ปรับแก้ค่าความคันโอบรัคของเสาหน้าตัคสี่เหลี่ยมอีกครั้ง โดยใช้ค่า อัตราส่วนรูปร่าง (Shape factor, k,) เพื่อที่จะได้ปรับความคันโอบรัคของเสาหน้าตัคสี่เหลี่ยมให้มี ความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยเรียกความคันโอบรัคที่ผ่านการปรับแก้ว่า ความคันโอบรัคประสิทธิผล (Effective confining pressure) ของเสาหน้าตัคสี่เหลี่ยม ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$f_1' = k_s f_1 \tag{2.9}$$

คือ ความคัน โอบรัคประสิทธิผลของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม f_1'

คือ อัตราส่วนรูปร่าง (Shape factor) จากสมการที่ 2.7 k_{s}

คือ ความคันโอบรัค จากสมการที่ 2.5 f_1

เมื่อ

แบบจำลองของ ACI Committee 440 (2002) มีพื้นฐานมาจากแบบจำลองซึ่งถูก เสนอโดย Mander, J.B., et al., (1988) เป็นบุคคลแรกที่ได้พัฒนาวิธี Unified stress - strain approach สำหรับทำนายกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดโดยปลอกเหล็ก โดยสมการดังกล่าว สามารถใช้ได้ทั้งคอนกรีตที่มีหน้าตัดทรงกลมและคอนกรีตที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยม โดยที่แบบจำลอง ดังกล่าวเป็นแบบจำลองที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางที่สุดอีกแบบจำลองหนึ่ง โดย Mander, J.B., et al., (1988) ได้มีการแนะนำสมการดังกล่าวอยู่ในรูปสมการแบบไร้เชิงเส้นตรง (Nonlinear) โดยเขียนได้ในรูป

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

เมื่อ ้ คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแกนของกอนกรีต เมื่อมีแรงคันด้านข้าง f_{cc}' คือ กำลังต้านทานแรงกดอัดในแกนของกอนกรีต เมื่อไม่มีแรงดันด้านข้าง f_{co}'

นอกจากนั้นแล้ว ACI Committee 440 (2002) ยังได้แนะนำให้สมการที่ใช้ในการ ทำนายค่าสูงสุดของความเกรียดในแนวแกนสูงสุดของคอนกรีตเนื่องจากการ โอบรัด \mathcal{E}_{cu} อยู่ในรูป

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

2.6 ข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับ Tubed RC column

Tubed concrete column และ Tubed RC column เป็นเสาเชิงประกอบ (Composite column) ในรูปแบบเสาปลอกเหล็กกรอกคอนกรีต (Concrete - filled steel tube column) ในการออกแบบเสา ดังกล่าวมีมาตรฐานการออกแบบที่เกี่ยวข้องที่ใช้

สำหรับประเทศไทยโดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ (ว.ส.ท.) คือมาตรฐานสำหรับ อาการกอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง (มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008-38) ได้กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 4314 องก์อาการเชิงประกอบรับแรงกดอัด โดยมีรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาดังนี้

- ก) องก์อาการเชิงประกอบจะรองรับแรงกดอัดให้รวมถึงองก์อาการเสริมเหล็กตามยาว
 ด้วยเหล็กโกรงสร้างรูปพรรณ ท่อกลมหรือท่อเหลี่ยม ซึ่งอาจมีเหล็กเส้นตามยาว
 หรือไม่มีก็ได้
- กำลังขององค์อาการเชิงประกอบให้คำนวณหาโดยใช้เงื่อนไขเช่นเดียวกับองค์อาการ กอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป
- กำลังในการรับแรงตามแนวแกนใด ๆ ที่กำหนดให้รับโดยคอนกรีตขององค์อาการ
 เชิงประกอบต้องถ่ายผ่านเข้าไปในคอนกรีตโดยองค์อาการหรือแป้นหูช้างในลักษณะ
 แบกทานโดยตรงลงบนคอนกรีตขององค์อาการเชิงประกอบนั้น
- กำลังรับแรงตามแนวแกนทั้งหมดที่ไม่ได้กำหนดให้รับโดยกอนกรีตขององค์อาการ เชิงประกอบต้องถ่ายผ่านโดยตรงด้วยจุดต่อไปยังเหล็กโกรงสร้างรูปพรรณ ท่อกลม หรือท่อเหลี่ยม
- เหล็กโครงสร้างหุ้มแกนคอนกรีต
 - ความหนาของเหล็กหุ้มแกนคอนกรีตขององค์อาคารเชิงประกอบต้องไม่น้อย กว่า

 $B\sqrt{f_y/3E_s}$ หรือ $B/t \le \sqrt{3E_s/f_y}$ สำหรับแต่ละด้านซึ่งความกว้างเท่ากับ Bและต้องไม่น้อยกว่า $D\sqrt{f_y/8E_s}$ หรือ $D/t \le \sqrt{8E_s/f_y}$ สำหรับหน้าตัดกลมที่มี เส้นผ่านศูนย์กลาง D

 เหล็กเส้นตามยาวที่อยู่ภายในแกนคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มนั้นอาจนำมาพิจารณา การคำนวณหาเนื้อที่ของเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ (A,) ท่อกลมหรือท่อเหลี่ยม ในหน้าตัดเชิงประกอบและโมเมนต์อินเนอร์เชียของเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ ท่อกลมหรือเหลี่ยมรอบแกนศูนย์ถ่วงของหน้าตัดองก์อาการเชิงประกอบ (I,) การออกแบบเสาเหล็ก เพื่อให้รับน้ำหนักที่กระทำตามแนวแกนที่ปราสจากการเยื้องสูนย์ อาจใช้ตามมาตรฐานที่ถูกกำหนดตาม AISC ซึ่งได้ให้ข้อกำหนดในการออกแบบไว้สองวิธีกือ วิธีของ ASD (Allowable Stress Design) และวิธีของ LRFD (Load and Resistance Factor Design) ในแต่ละวิธีตามมาตรฐานของ AISC ได้ให้สูตรกำนวณต่าง ๆ เช่น หน่วยแรงที่คงก้างเหลืออยู่ (Residual stress) เมื่อชิ้นส่วนเย็นไม่สม่ำเสมอในขณะถูกรีดร้อน การโก้งโก่งงอของเสาก่อนรับ น้ำหนักการยึดปลายเสาที่มีต่อช่วงความยาวประสิทธิผล (*KL*) อัตราส่วนความชะลูด (*KL/r*) ในระนาบของการโก่งเดาะและกุณภาพของเหล็ก (โมดูลัสยึดหยุ่น, *E* และหน่วยแรงจุดกราก, *f*,) ทั้งนี้เสาหรือส่วนโครงสร้างรับแรงอัดมีอัตราส่วนความชะลูด (*KL/r*) ไม่เกิน 200 นอกนั้นแล้ว จากการทบทวนเอกสารในการออกแบบที่สำคัญอีกเอกสารหนึ่งคือ Manual of Steel Construction: Load and Resistant Factor Design (LRFD) ของ American Institute of Steel and Construction (AISC) พบว่ามาตรฐาน AISC LRFD ปี 1994 โดยใต้ถูกกำหนดให้เสาปลอกเหล็กกรอกดอนกรีต (Concrete - tilled steel tube) ซึ่งต้องมีอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของปลอกเหล็กกรอกกอนกรีต ทั้งหมดของเสาเชิงประกอบหรือมีค่า $\rho_x = A_x/A_y$ ที่มีก่าได้ไม่น้อยกว่า 4% (AISC LRFD, 1994) และในอัตราส่วน *B/t* สำหรับปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะต้องเป็น ดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$B/t \le \sqrt{2E_s/f_y} \tag{2.12}$$

ซึ่งสมการที่ 2.12 นี้จะให้ก่า *B / t* ต่ำกว่าที่กำหนดให้ใช้ในเสาเชิงประกอบและต่ำกว่าก่าที่ กำหนดโดยข้อกำหนดของ ว.ส.ท. \3/2 =1.225 เท่า ดังนั้นถ้ากำหนดให้เสา CFT หน้าตัดสี่เหลี่ยม มีความกว้างของหน้าตัด *B* เท่ากันแล้ว ข้อกำหนด AISC LRFD จะให้ความหนาของปลอกเหล็ก มากกว่าข้อกำหนดของ ว.ส.ท.

ในส่วนของการกำนวณกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาเชิงประกอบ AISC LRFD 1994 กำหนดให้กำนวณโดยใช้เงื่อนไขเช่นเดียวกับองก์อาการเหล็กโกรงสร้างทั่วไป ยกเว้นก่ากำลัง และกวามแกร่งของวัสดุจะถูกแปลงเพื่อพิจารณาผลของพฤติกรรมเชิงประกอบ (Composite action) ระหว่างกอนกรีตและปลอกเหล็ก โดย AISC LRFD ได้กำหนดให้สมการในการกำนวณหากำลัง รับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาเชิงประกอบจากหน่วยแรงวิกฤติ (Critical stress, *F_{cr}*) ดังแสดงใน สมการที่ 2.14 และ 2.15

$$P_{cr} = A_s F_{cr} \tag{2.13}$$

เมื่อ A, คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของปลอกเหล็ก

$$F_{cr} = (0.658^{\lambda_c^2}) F_{my}$$
 สำหรับ $\lambda_c \le 1.5$ (2.14)

$$F_{cr} = (0.877 / \lambda_c^2) F_{my}$$
 สำหรับ $\lambda_c > 1.5$ (2.15)

$\lambda_{c} = \sqrt{\frac{F_{my}}{F_{E}}} = \left(\frac{KL}{r_{m}\pi}\right)\sqrt{\frac{F_{my}}{E_{m}}}$	คือ Column slenderness parameter
F_{E}	คือ Euler buckling stress ของเสา
r _m	คือ Radius of gyration ของปลอกเหล็ก
KL	คือ ความยาวประสิทธิผลของเสา
$E_m = E_s + 0.40E_c \frac{A_c}{A_s}$	คือ Modified elastic modulus ของเสา
$F_{my} = f_y + 0.85 f_{co}' \frac{A_c}{A_s}$	คือ Modified yield strength ของเสา
	$\lambda_{c} = \sqrt{\frac{F_{my}}{F_{E}}} = \left(\frac{KL}{r_{m}\pi}\right) \sqrt{\frac{F_{my}}{E_{m}}}$ F_{E} r_{m} KL $E_{m} = E_{s} + 0.40E_{c} \frac{A_{c}}{A_{s}}$ $F_{my} = f_{y} + 0.85f_{co} \frac{A_{c}}{A_{s}}$

จากข้อกำหนดในการออกแบบของเสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต ตามมาตรฐานการออกแบบ ของ ว.ส.ท.1008 - 38 หรือตามมาตรฐานการออกแบบของ ACI Committee 318 และในมาตรฐาน การออกแบบของ AISC/LRFD สามารถสรุปข้อกำหนดต่าง ๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สรุปการเปรียบเทียบข้อกำหนดในการออกแบบตามมาตรฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

ข้อกำหนด	มาตรฐานการออกแบบ	
	ວ.ສ.୩./ACI	AISC/LRFD
กำลังรับแรงกดอัดในแนวแกน	$P = 0.85 f_{co}(A_g - A_s) + f_y A_s$	$\phi P_{cr} = A_s F_{cr}$
อัตราส่วน B/t	$B/t \le \sqrt{3E_s/f_y}$	$B/t \leq \sqrt{2E_s/f_y}$
อัตราส่วน D/t	$D/t \leq \sqrt{8E_s/f_y}$	$D/t \le \sqrt{8E_s/f_y}$

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาทคลองที่มีแนวทางในการทคสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ แล้วนำผลที่ได้มาศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรง คุณสมบัติทางกลและลักษณะการวิบัติของเสา เพื่อให้งานวิจัยสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ จึงได้แบ่งวิธีการคำเนินงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นส่วนของทฤษฎีและส่วนที่สองเป็นการทคสอบในห้องปฏิบัติการ ส่วนของทฤษฎีนั้น ทำการศึกษาก้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องพร้อมทั้งทฤษฎีในการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก รวมถึงในข้อกำหนดและคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในตัวอย่างทคสอบตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง อีกทั้งพัฒนาคัดแปลงสมการที่ใช้ในการทำนายกำลังรับแรงกคอัดและสมการที่ใช้ในการออกแบบ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก

ส่วนของการทดสอบในห้องปฏิบัติการถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก เป็นการทดสอบ กุณสมบัติทางกลของวัสดุ ได้แก่ คอนกรีต เหล็กที่ตัดจากปลอกเหล็ก เหล็กเสริมคอนกรีต และตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก เพื่อนำค่าคุณสมบัติ และข้อมูลเบื้องด้นทั้งความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรงโอบรัดก่อนที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้ เป็นข้อมูลในการออกแบบการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก (Tube RC column) ส่วนที่สอง ได้ทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก ภายใต้แรงกดอัดในแนวแถนเพื่อให้สอดกล้องกับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ เพื่อที่จะหาคุณสมบัติทางกล พฤติกรรมการรับแรง และลักษณะการวิบัติของเสาและใช้เป็นข้อมูล ในการเปรียบเทียบกำลังของเสาที่ได้กับค่ากำลังที่สามารถดำนวณโดยใช้สมการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะเป็นการพัฒนารูปแบบของการเสริมกำลังด้วยการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ด้วยย่างทดสอบ กอนกรีตและเสากอนกรีตเสริมเหล็กในงานวิจัยได้ถูกออกแบบให้อยู่ตามมาตรฐานในการออกแบบ ของ ว.ส.ท.1008 - 38 และเพื่อนำค่ากำลังที่ได้จากการทดสอบเสาเซิงประกอบ (ซึ่งอยู่ในรูปของ Tube RC column) มาเปรียบเทียบกับสมการที่ระบุตามมาตรฐานการออกแบบของ ว.ส.ท. และที่ระบุสมการตามข้อกำหนดของ AISC/LRFD และสรุปหาแนวทางการออกแบบที่เหมาะสม ต่อไป ซึ่งแผนการศึกษาสามารถแสดงเป็นแผนภูมิได้ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กรอบแนวคิดการดำเนินงานวิจัย

3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

3.2.1 การทดสอบกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต

ในการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของกอนกรีต มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ส่วนของพฤติกรรมทางกล (Mechanical behaviors) และคุณสมบัติทางกล (Mechanical properties) ของกอนกรีตที่ใช้เป็นวัสดุในการศึกษาในงานวิจัย ซึ่งได้แก่ หน่วยแรงสูงสุด (Ultimate stress) โมดูลัสยึดหยุ่น (Modulus of elasticity) และรูปแบบการวิบัติ (Modes of failure)

- 1) มาตรฐานการทดสอบ
- ASTM C39 96 (Standard Test Methods for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens)

ASTM C469 - 94 (Standard Test Methods for Static Modulus of Elasticity

and Poisson's Ratio of Concrete in Compression)

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

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

 ชุดประมวลผลของเครื่อง Data Logger โดยมียี่ห้อ Yokokawa รุ่น DS600 และ Data Acquisition (DAQ) ยี่ห้อ Yokokawa รุ่น DA100 เป็นชุดที่ใช้ในการต่อเข้าเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine เพื่อรับค่าที่ได้จากการทดสอบและส่งค่าที่ได้ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2(ข)

เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับต่อเข้ากับชุด Data Logger พร้อมทั้งบันทึก
 ค่าที่ได้จากการทดสอบ

 Linear Variable Differential Transducers (LVDT) capacity 5 mm และ อุปกรณ์จับแท่งคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3.2(ค)

- เครื่องหล่อฝา (Capping) ทับชิ้นตัวอย่างรูปทรงกระบอก
- เครื่องชั่งน้ำหนักและไม้บรรทัดเหล็ก



รูปที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทคสอบคอนกรีต

ตัวอย่างทดสอบ

คอนกริตที่ใช้ในการศึกษาเป็นคอนกรีตผสมเสร็จของบริษัทผลิตภัณฑ์ และวัตถุก่อสร้างจำกัด (CPAC) โดยการผสมคอนกรีตจะใช้โม่ผสมคอนกรีตแบบอัตโนมัติ (Batching plant) ที่มีกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด 3 ค่าคือ 18 25 และ 32 MPa เพื่อให้ครอบคลุม กอนกรีตที่ใช้ในการก่อสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในอาคารขนาดเล็กและกลางในประเทศไทย โดยตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 m และมีความสูง 0.30 m และได้รับการบ่มในน้ำจนกระทั่งมีอายุ 28 วัน ก่อนการทดสอบ ซึ่งตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ ในการทดสอบนี้ได้จัดเตรียมขึ้นภายในห้องปฏิบัติการบัณฑิตศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา อาการศูนย์เครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ในการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

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

แปกขนการพกานามนาทหารเพขามากกขนการขนาบูนว่า เก่นอยการเคาเรื่อง ของแบบหล่อ เพ การหล่อตัวอย่าง โดยเทคอนกรีตที่เตรียมไว้ในแบบหล่อรูปทรงกระบอก ครั้งละประมาณหนึ่งในสามของความสูงของแบบหล่อ จากนั้นทำการกระทุ้งด้วยเหล็กเส้นกลม ขนาดเส้นผ่าสูนย์กลาง 16 mm ความยาว 0.60 m มีปลายกลมมน 25 ครั้ง ให้กระจายทั่วทั้งพื้นผิว อย่างสม่ำเสมอและให้ปลายเหล็กกระทุ้งผ่านไปยังชั้นล่างเล็กน้อยสำหรับชั้นล่างสุดให้กระทุ้ง ตลอดความหนาของชั้นโดยไม่ให้ปลายเหล็กกระทุ้งโดนฐานแบบหล่อชั้นบนสุดต้องใส่คอนกรีต ให้สูงกว่าขอบแบบตลอดเวลาที่กระทุ้งเมื่อกระทุ้งชั้นบนสุดเสร็จแล้วใช้เกรียงบาดคอนกรีต

ส่วนเกินออกนำแผ่นพลาสติกชนิดหนากลุมผิวหน้าของตัวอย่าง เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ

 การถอดแบบ การถอดแบบทำหลังการหล่อ 24 ชั่วโมง เมื่อถอดแบบแล้ว
 เขียนหมายเลขและวันที่หล่อคอนกรีต จากนั้นนำไปบ่มชื้น

 การบ่มตัวอย่าง การบ่มตัวอย่างทดสอบใช้การบ่มด้วยน้ำโดยจุ่มตัวอย่าง ลงในน้ำจนท่วมก้อนตัวอย่างทดสอบและควรรักษาอุณหภูมิน้ำให้คงที่ซึ่งระยะเวลาในการบ่ม ตัวอย่างเท่ากับ 28 วัน

 การเคลือบผิวหน้าตัวอย่าง นำส่วนผสมของกำมะถันมาหลอมที่อุณหภูมิ 180 - 210°C แล้วเทลงบนแผ่นเหล็กขัดมันกว่ำก้อนตัวอย่างลงบนของผสมนี้โดยการเคลือบ ทำในลักษณะที่ตั้งฉากกับแกนของก้อนตัวอย่างและควรเคลือบให้บางที่สุดดังแสดงในรูปที่ 3.3(ข)



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตล้วน

5) วิธีการทดสอบ

- วัดขนาดเส้นผ่าสูนย์กลางและความยาว พร้อมทั้งชั่งน้ำหนัก
- ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบแรงอัดของกอนกรีตในทิศทาง
 ที่กำหนดไว้ดังแสดงในรูปที่ 3.4
- ทำการต่อสายนำสัญญาณจาก LVDTs และ Load Cell เข้า Data Logger แล้วตั้งค่าโปรแกรมบันทึกข้อมูล
- ทำการทคสอบกำลังรับแรงอัคโดยการเพิ่มน้ำหนักกระทำอย่างต่อเนื่อง ด้วยอัตราที่ต่ำ (0.5 mm/min) จนกว่าตัวอย่างทคสอบเกิดการวิบัติเพื่อทำการกำนวณหาค่าหน่วยแรง และความเครียดและเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต



รูปที่ 3.4 การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีตเพื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงกดอัด

3.2.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของปลอกเหล็ก

การทคสอบคุณสมบัติของเหล็กที่ตัดจากปลอกเหล็กภายใต้แรงดึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลและคุณสมบัติทางกลของเหล็กที่ใช้ในการศึกษา โดยคุณสมบัติที่สนใจ ในงานวิจัยได้แก่ หน่วยแรงคราก (Yielding stress) หน่วยแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile stress) โมดูลัสยึดหยุ่น (Modulus of elasticity) และเปอร์เซ็นต์การยึดตัว (Percent elongation)

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

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

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

- Extensometer
- Vernier Caliper
- 3) ตัวอย่างทดสอบ

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



รูปที่ 3.5 รายละเอียดแผ่นตัวอย่างทดสอบรูปกระดูกของปลอกเหล็ก

4) วิธีการทดสอบ

 ทำการวัดขนาดความกว้าง ความหนาและกำหนดความยาวเริ่มต้น ของตัวอย่างทดสอบ โดยใช้ Vernier caliper 3 จุด เพื่อทำการหาก่าเฉลี่ย

ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine
 เพื่อทดสอบกำลังรับแรงดึง พร้อมทั้งติดตั้ง Extensometer

เพิ่มแรงจึงให้กับตัวอย่างทดสอบช้า ๆ จนกระทั่งเกิดการวิบัติ

นำตัวอย่างทดสอบออกจากเครื่องทดสอบและนำตัวอย่างทดสอบ ทั้ง 2 ส่วน ที่วิบัติมาต่อกันให้สนิท จากนั้นทำการวัดค่าเส้นผ่าสูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบ ที่จุดวิบัติและวัดความยาว Gauge length ของตัวอย่างทดสอบเมื่อวิบัติโดยวัดระยะระหว่างจุดที่ใช้ วัดความยาวเริ่มต้นและสังเกตรูปแบบการวิบัติที่เกิดขึ้น

3.2.3 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมคอนกรีต

การทดสอบคุณสมบัติของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตภายใต้แรงคึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมและคุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตโดยคุณสมบัติทางกลที่สนใจ คือ หน่วยแรงคราก (Yielding stress) หน่วยแรงคึงสูงสุด (Ultimate tensile stress) โมคูลัสยึดหยุ่น (Modulus of elasticity) และเปอร์เซ็นต์การยึดตัว (Percent elongation) ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การติดตั้งตัวอย่างเหล็กเส้นเสริมคอนกรีตเข้ากับเครื่องทคสอบ UTM

1) มาตรฐานการทดสอบ

ASTM E8 -

98 (Standard Test Methods for Testing of Metallic Materials)

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

- ใช้เครื่อง UTM ยี่ห้อ Instron มีกำลังทดสอบสูงสุด 1000 kN โดยการยืดตัว
- Extensometer
- Venire Caliper

ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทคสอบเหล็กเส้นกลม RB6 จำนวน 4 ตัวอย่างและเหล็กข้ออ้อย

DB12 จำนวน 4 ตัวอย่าง

4) การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

- นำชิ้นตัวอย่างทดสอบไปชั่งหาน้ำหนักและวัดกวามยาวพร้อมบันทึกก่า
- ใช้ Venire วัดขนาดเส้นผ่าสูนย์กลาง 3 จุด เพื่อหาก่าเฉลี่ยและบันทึกก่าไว้
- ใช้สลักตอกระยะ Gauge length เท่ากับ 5D ระยะระหว่างหัวจับ 5.5D

วิธีการทดสอบ

ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine
 เพื่อทดสอบกำลังรับแรงดึง โดยให้ระยะหัวจับได้มาตรฐานที่กำหนดพร้อมทั้งติดตั้ง Extensometer

- เพิ่มแรงดึงให้กับตัวอย่างทดสอบช้า ๆ จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบวิบัติ
- บันทึกแรงที่กระทำและค่า Deformation ที่เกิดขึ้นจนกระทั่งถึงจุดคราก

้จึงถอด Extensometer ออกแล้วออกแรงดึงต่อไปจนกระทั้งชิ้นทดสอบขาดออกจากกัน

 จากนั้นนำตัวอย่างทดสอบที่ได้ ออกจากเครื่องทดสอบสังเกตตำแหน่ง และลักษณะของรอยที่ขาดวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ขาดนำชิ้นทดสอบที่ขาดมาต่อเข้าด้วยกัน เพื่อบันทึกก่าการยึดตัว (Deformation Length) ในช่วง Gauge length

3.2.4 การทดสอบแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต ที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก

โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดและลักษณะการวิบัติ ของตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กและผลของการรัดรอบของปลอกเหล็กที่มีต่อกำลัง และกวามเหนียวของตัวอย่างทดสอบภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน



รูปที่ 3.7 ลักษณะการให้แรงกดอัดกระทำต่อตัวอย่างทดสอบคอนกรีตโดยตรง

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรม การรับแรงกดอัดของเสาดอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มโดยปลอกเหล็กคือ ลักษณะการให้แรงกดอัดกระทำ ต่อเสาซึ่งในที่นี้จะสนใจเฉพาะแรงกดอัดในแนวแกนแบบตรงศูนย์ นอกจากนั้นแล้วมาตรฐาน ว.ส.ท.1008 - 38 ข้อที่ 4314 กำหนดให้ "กำลังในการรับแรงตามแนวแกนใด ๆ ที่กำหนด ให้รองรับโดยคอนกรีตขององก์อาการเชิงประกอบที่ถ่ายผ่านเข้าไปในคอนกรีตโดยองก์อาการ หรือแป้นหูช้างให้อยู่ในลักษณะแบกทานโดยตรงลงบนคอนกรีตขององก์อาการเชิงประกอบนั้น" ดังนั้นในการศึกษานี้จึงต้องกำหนดให้แรงกดอัดในแนวแกนกระทำต่อเสาในลักษณะ ดังที่แสดง ในรูปที่ 3.7 โดยแรงกดอัดจะกระทำต่อแกนกอนกรีตของตัวอย่างทดสอบโดยตรง

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ

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

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

เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับต่อเข้ากับชุด Data Logger พร้อมบันทึก

 Linear Variable Differential Transducers (LVDT) capacity 100 mm และอุปกรณ์จับแท่งคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3.8

Bearing plate ขนาด 150 x 150 x 50 mm งำนวน 2 ชุด



รูปที่ 3.8 LVDT capacity 100 mm

ตัวอย่างทดสอบ

คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นคอนกรีตผสมเสร็จของบริษัทผลิตภัณฑ์ และวัตถุก่อสร้าง จำกัด (CPAC) ที่มีกำลังรับแรงกคอัคสูงสุดที่ใช้ 3 ค่าคือ 18 25 และ 32 MPa โดยตัวอย่างทคสอบนั้นมีหน้าตัคสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งมีขนาค 0.15 x 0.15 m มีความสูง 0.30 m บ่มในน้ำจนกระทั่ง 28 วันก่อนการทคสอบโดยชื่อตัวอย่างทคสอบที่ระบุในตารางที่ 3.1 ถูกกำหนค ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 รายละเอียดสัญลักษณ์ในการกำหนดชื่อเรียกตัวอย่างทดสอบคอนกรีต

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษานี้ได้ถูกจัดเตรียมขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ บัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ศูนย์เกรื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี โดยมีขั้นตอนดังนี้

ดัดปลอกเหล็ก (Steel jacket) โดยการนำเหล็กแผ่นโครงสร้างแบบเย็น (Cold formed) แล้วนำมาพับเป็นสองส่วน จากนั้นนำมาประกอบกันเป็นหน้าดัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีความหนาของปลอกเหล็ก 3 ขนาดคือ 3.2 4.5 และ 6.0 mm ขนาดแสดงตามแบบที่กำหนด โดยมีความยาว 300 mm เพื่อนำมาใช้เป็นแบบในการหล่อตัวอย่างทดสอบและใช้เป็นปลอกเหล็ก (Steel jacket) ของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.11 จากนั้นนำปลอกเหล็กที่ใช้เป็นแบบของเสารูปตัวซี 2 ชิ้นประกบกันพร้อม กับทำการพันแบบให้ติดกันด้วยเทปกาวเพื่อใช้เป็นแบบชั่วคราว แล้วนำมาตั้งบนพื้นเรียบและทำ การจัดดิ่งของตัวอย่างทดสอบ จากนั้นเทคอนกรีตผสมเสร็จลงในปลอกเหล็กดังแสดงในรูปที่ 3.12

 เมื่อตัวอย่างทดสอบมีอายุครบ 24 ชั่วโมงแล้วนั้น ทำการถอดแบบ และเขียนหมายเลขและวันที่หล่อกอนกรีตแล้วนำตัวอย่างทดสอบคอนกรีตไปทำการบ่มชื้น โดยใช้กระสอบชุบน้ำคลุมเป็นเวลา 28 วัน

ภายหลังจากการบ่มตัวอย่างทดสอบครบตามระยะเวลาที่กำหนดแล้ว นำปลอกเหล็กรูปตัวซีที่มีลักษณะที่ได้กำหนดไว้ทั้ง 2 ส่วนประกบเข้ากับตัวอย่างทดสอบคอนกรีต จากนั้นนำแบบปลอกเหล็กมาประกบเข้ากับตัวอย่างทดสอบและนำนอตที่ได้ทำการออกแบบไว้ มาช่วยยึดปลอกเหล็กรูปตัวซีเข้าหากันโดยที่ระยะที่นอตยึดนั้นจะยึดตามระยะที่ได้กำหนดไว้ ทำการให้หน่วยแรงเข้ากับปลอกเหล็กโดยที่พิจารณาหน่วยแรงสำหรับการขันสลักเกลียวเป็น 2 ค่า ถือ 0.05 f_c และ 0.1 f_c ดังแสดงในรูปที่ 3.13 (ก) และ (ง) และตารางที่ 3.1

เมื่อทำการให้หน่วยแรงเข้ากับปลอกเหล็กแล้วนั้นขณะที่นอตช่วยยึด ปลอกเหล็กอยู่นั้นทำการเชื่อมไฟฟ้าตามรอยต่อในแนวแกนโดยใช้ Machine welding หลังจากนั้น ถอดนอตออกและทำการเชื่อมปลอกเหล็กของตัวอย่างทดสอบตลอดแนวอีกครั้งโดยช่างเชื่อมไฟฟ้า ที่มีความเชี่ยวชาญเพื่อเตรียมทำการทดสอบ

ก่อนการทดสอบ 1 วันทำการติดตั้งมาตรวัดความเครียด (Strain gauge) จำนวน 2 ตัวลงบนพื้นผิวของเสาที่ใช้ทดสอบและพื้นผิวของปลอกเหล็กตรงบริเวณกึ่งกลาง ความยาวของตัวอย่างทดสอบในแนวแกนและในแนวขวางเพื่อตรวจสอบความเครียดในแนวแกน และความเครียดในแนวขวางของตัวอย่างทดสอบ ภายใต้แรงกระทำในแนวแกน



รูปที่ 3.10 แสดงรายละเอียดแปลนรายละเอียดปลอกเหล็ก



รูปที่ 3.11 แสดงรายละเอียดปลอกเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย


รูปที่ 3.12 การหล่อตัวอย่างทคสอบคอนกรีต



รูปที่ 3.13 แสดงรายละเอียดปลอกเหล็กอัดแรงของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต

		f_{co}^{\prime}	t	หน่วยแรงที่ใช้	
กลุ่มที่	ตัวอย่าง	(MPa)	(mm)	ในการ โอบรัดก่อน (MPa)	ຈຳນວນ
1	CR18-0-0	18	-	-	3
	CR25-0-0	25	-	-	3
	CR32-0-0	32	-	-	3
2	SR18-3.2-0	18	3.2	0	3
	SR18-4.5-0	18	4.5	0	3
	SR18-6.0-0	18	6.0	0	3
	SR25-3.2-0	25	3.2	0	3
	SR25-4.5-0	25	4.5	0	3
	SR25-6.0-0	25	6.0	0	3
	SR32-3.2-0	32	3.2	0	3
	SR32-4.5-0	32	4.5	0	3
	SR32-6.0-0	-32	6.0	0	3
3	SR18-3.2-0.05 f' _{co}	18	3.2	$0.05 f'_{co}$	3
	SR18-4.5-0.05 f' _{co}	18	4.5	$0.05 f'_{co}$	3
	SR18-6.0-0.05 f'_{co}	18	6.0	0.05 f'_co	3
	SR25-3.2-0.05 f' _{co}	25	3.2	$0.05 f'_{co}$	3
	SR25-4.5-0.05 f' _{co}	25	4.5	$0.05 f'_{co}$	3
	SR25-6.0-0.05 f' _{co}	25	6.0	$0.05f_{co}^{\prime}$	3
	SR32-3.2-0.05 f' _{co}	32	3.2	$0.05f_{co}^{\prime}$	3
	SR32-4.5-0.05 f' _{co}	32	4.5	$0.05f_{co}^{\prime}$	3
	SR32-6.0-0.05 f' _{co}	32	6.0	$0.05f_{co}^{\prime}$	3
4	SR18-3.2-0.1 f' _{co}	18	3.2	$0.1f_{co}^{\prime}$	3
	SR18-4.5-0.1 <i>f</i> ′ _{co}	18	4.5	$0.1 f_{co}^{\prime}$	3
	SR18-6.0-0.1 f' _{co}	18	6.0	$0.1 f_{co}^{\prime}$	3
	SR25-3.2-0.1 f' _{co}	25	3.2	$0.1 f_{co}^{\prime}$	3
	SR25-4.5-0.1 f' _{co}	25	4.5	$0.1 f_{co}^{\prime}$	3
	SR25-6.0-0.1 f' _{co}	25	6.0	$0.1f_{co}^{\prime}$	3
	SR32-3.2-0.1 f' _{co}	32	3.2	$0.1 f'_{co}$	3
	SR32-4.5-0.1 f' _{co}	32	4.5	$0.1 f'_{co}$	3
	SR32-6.0-0.1 f' _{co}	32	6.0	$0.1 f_{co}^{\prime}$	3
		รวมตัวอย่างท	เคสอบ		90

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัย

4) ขั้นตอนการทดสอบ

ปรับฐานรองรับตัวอย่างทดสอบให้เรียบเสมอกันทั้งสองด้าน

 ทำการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่อง UTM โดยปลายทั้งสองด้าน ของตัวอย่างทดสอบถูกรองรับ โดยแผ่นรับแรงแบกทาน (Bearing plate) หนา 50 mm ติดตั้ง LVDT ที่ปลายด้านบนบริเวณหัวกด (Crosshead) ของเครื่อง UTM เพื่อวัดระยะการหดของตัวอย่างทดสอบ ในแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 3.14

จากนั้นต่อสายนำสัญญาณจาก LVDT และค่าแรงกดอัดจาก UTM เข้ากับ
Data Logger แล้วตั้งค่าโปรแกรมเพื่อเกีบข้อมูล

เตรียมตัวอย่างทดสอบและเครื่องมือให้พร้อมทดสอบทำการ Preloading
โดยให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบประมาณ 50 kN

 จากนั้น Unloading เซตศูนย์เครื่องมือวัดต่าง ๆ และทำการบันทึกค่าต่าง ๆ เมื่อเริ่มต้นการทคสอบตัวอย่างทคสอบ

จากนั้นเพิ่มแรงกระทำผ่านเครื่อง UTM อย่างช้า ๆ ประมาณ 1 mm/min และทำการสังเกต อีกทั้งทำการบันทึกพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบควบคู่ด้วย ได้แก่ ค่าแรงกดอัด ที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและการหดตัวในแนวแกนเริ่มเป็นเส้น โด้ง และค่าแรงกดอัดที่ผนังของปลอกเหล็กเริ่มเกิดการโก่งเคาะเฉพาะที่

ทำการเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์
ทำการสังเกตและบันทึกลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

 ทำการคำนวณหา หน่วยแรง ความเครียด เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีต



รูปที่ 3.14 แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3.15 ผังการคำเนินงานตัวอย่างทคสอบคอนกรีต

					HH	คุณสม	เบ้ติของคอ	นกรีต	คุณส	หมบัติของเา	าลึก
กลุ่ม	ตัวอย่าง	จำนวน	B/t	Confining pressure	$\rho_{sc} = A_s / A_g$	A_{c}	f'_{co}	E_{c}	A_{s}	f_{v}	E_s
ที			ratio	(MPa)	(%)	(mm^2)	(MPa)	(GPa)	(mm^2)	(MPa)	(GPa)
1	CR18-0-0	3	-	-	H & H	22500	17.19	20.32	-	-	-
	CR25-0-0	3	-		7 8 7,	22500	24.55	23.29	-	-	-
	CR32-0-0	3	-	- <i>A</i>	- F	22500	30.84	26.09	-	-	-
2	SR18-3.2-0	3	46.9	- /	8.02	22500	17.19	20.32	1961	323.30	203.43
	SR18-4.5-0	3	33.3	之中	11.00	22500	17.19	20.32	2781	324.85	204.66
	SR18-6.0-0	3	25.0	-	14.27	22500	17.19	20.32	3744	325.48	194.90
	SR25-3.2-0	3	46.9	5	8.02	22500	24.55	23.29	1961	323.30	203.43
	SR25-4.5-0	3	33.3	3.5	11.00	22500	24.55	23.29	2781	324.85	204.66
	SR25-6.0-0	3	25.0	- "ลาส	am14.27	22500	24.55	23.29	3744	325.48	194.90
	SR32-3.2-0	3	46.9	-	8.02	22500	30.84	26.09	1961	323.30	203.43
	SR32-4.5-0	3	33.3	-	11.00	22500	30.84	26.09	2781	324.85	204.66
	SR32-6.0-0	3	25.0	-	14.27	22500	30.84	26.09	3744	325.48	194.90

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและกุณสมบัติทางกลของวัสดุที่เกี่ยวข้อง

					НН	คุณสม	บัติของคอ	านกรีต	คุณ	สมบัติของเ	หลึ่ก
กลุ่ม	ตัวอย่าง	จำนวน	B/t	Confining pressure	$\rho_{sc} = A_s / A_g$	A_{c}	f'_{co}	E_{c}	A_{s}	f_y	E_s
ที			ratio	(MPa)	(%)	(mm^2)	(MPa)	(GPa)	(mm^2)	(MPa)	(GPa)
3	SR18-3.2-0.05 f' _{co}	3	46.9	0.90	8.02	22500	17.19	20.32	1961	323.30	203.43
	SR18-4.5-0.05 f' _{co}	3	33.3	0.90	11.00	22500	17.19	20.32	2781	324.85	204.66
	SR18-6.0-0.05 f'_{co}	3	25.0	0.90	14.27	22500	17.19	20.32	3744	325.48	194.90
	SR25-3.2-0.05 f'_{co}	3	46.9	1.25	8.02	22500	24.55	23.29	1961	323.30	203.43
	SR25-4.5-0.05 f'_{co}	3	33.3	1.25	11.00	22500	24.55	23.29	2781	324.85	204.66
	SR25-6.0-0.05 f'_{co}	3	25.0	1.25	14.27	22500	24.55	23.29	3744	325.48	194.90
	SR32-3.2-0.05 f'_{co}	3	46.9	1.60	8.02	22500	30.84	26.09	1961	323.30	203.43
	SR32-4.5-0.05 f' _{co}	3	33.3	1.60	11.00	22500	30.84	26.09	2781	324.85	204.66
	SR32-6.0-0.05 f' _{co}	3	25.0	1.60	am14.27	22500	30.84	26.09	3744	325.48	194.90

<u>ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและกุณสมบัติทางกลของวัสดุที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)</u>

					НН	คุณสม	บัติของคอ	นกรีต	คุณ	สมบัติของเ	หลึก
กลุ่ม	ตัวอย่าง	ຈຳนวน	B/t	Confining pressure	$\rho_{sc} = A_s / A_g$	A_{c}	f_{co}'	E_{c}	A_{s}	f_y	E_s
ที			ratio	(MPa)	(%)	(mm^2)	(MPa)	(GPa)	(mm^2)	(MPa)	(GPa)
4	SR18-3.2-0.1 f' _{co}	3	46.9	1.8	8.02	22500	17.19	20.32	1961	323.30	203.43
	SR18-4.5-0.1 f' _{co}	3	33.3	1.8	11.00	22500	17.19	20.32	2781	324.85	204.66
	SR18-6.0-0.1 f' _{co}	3	25.0	1.8	14.27	22500	17.19	20.32	3744	325.48	194.90
	SR25-3.2-0.1 f' _{co}	3	46.9	2.5	8.02	22500	24.55	23.29	1961	323.30	203.43
	SR25-4.5-0.1 f' _{co}	3	33.3	2.5	11.00	22500	24.55	23.29	2781	324.85	204.66
	SR25-6.0-0.1 f'_{co}	3	25.0	2.5	14.27	22500	24.55	23.29	3744	325.48	194.90
	SR32-3.2-0.1 f' _{co}	3	46.9	3.2	8.02	22500	30.84	26.09	1961	323.30	203.43
	SR32-4.5-0.1 f'_{co}	3	33.3	3.2	11.00	22500	30.84	26.09	2781	324.85	204.66
	SR32-6.0-0.1 f' _{co}	3	25.0	3.2	BIN14.27	22500	30.84	26.09	3744	325.48	194.90

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของตัวอย่างทคสอบและคุณสมบัติทางกลของวัสคุที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

3.3 การทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (Tubed RC column) ที่ถูกโอบรัดก่อน ด้วยปลอกเหล็กภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับอาการขนาดเล็ก เช่น บ้าน ทาวเฮาส์ และอาการพาณิชย์ เป็นด้น โดยเป็นอาการที่มีจำนวนมากสุดในประเทศไทย และเป็นลักษณะเสาสั้น ออกแบบตามมาตรฐาน ว.ส.ท.1008 - 38 หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก

1) จุดประสงค์การทดสอบ

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

 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (Preconfinement) รวมทั้งลักษณะของการวิบัติในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อน ด้วยปลอกเหล็กภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

2) ตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทคสอบ Tubed RC column ในงานวิจัยใช้ปลอกเหล็ก (Steel jacket) ที่ได้จาก การพับแผ่นเหล็กเป็นสองส่วนมาประกอบกันเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งเป็นเหล็กตามมาตรฐาน เหล็ก โครงสร้างของ มอก. และเพื่อให้ตัวอย่างทคสอบ Tubed RC column โดยที่มีพฤติกรรม การโอบรัดก่อน จึงได้มีการนำแบบปลอกเหล็กมาใช้เป็นอุปกรณ์เพื่อทำการโอบรัดตัวอย่างทคสอบ เข้าหากันด้วยนอตตามรอยต่อในแนวแกนโดยพิจารณาถึงผลหน่วยแรงสำหรับการขันสลักเกลียว และระยะการยึดของนอตให้มีตำแหน่งตามระยะ ดังแสดงในรูปที่ 3.21

ขนาดหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบกำหนดโดยสมการออกแบบเสากอนกรีตเสริมเหล็ก ของ ว.ส.ท.1008 - 38 (ตามข้อกำหนดที่ระบุของ ว.ส.ท. ข้อที่ 4314(ข)) และสมการแบบจำลองของ ACI committee 440 (2002) และเปรียบเทียบกำลังของเสาที่ ได้กับความสามารถของเครื่องมือ ทดสอบที่มีในห้องปฏิบัติการและการเลือกขนาดที่เหมาะสม การทดสอบตัวอย่างทดสอบคอนกรีต ทำให้ทราบว่าความหนาของปลอกเหล็ก 6.0 mm และหน่วยแรงโอบรัดก่อน 0.1 f'_{cs} ซึ่งเป็นดัวแปรที่ มีความเหมาะสมที่สุด ในการนำไปใช้ในส่วนของการศึกษาต่อในส่วนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (Tubed RC column) หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็กซึ่งมีขนาดหน้าตัด 0.15 x 0.15 m และ ความสูง 0.75 m ซึ่งเสาดังกล่าวมีก่า B/t ที่ผ่านข้อกำหนดความหนาของ ว.ส.ท. ข้อที่ 4314(ฉ) และ AISC LRFD และมี L/B = 5.0 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ใช้งานของเสาปลอกเหล็ก กรอกคอนกรีต (Concrete - filled steel tube column) ของขนาดอาการเตี้ยและอาการสูงปานกลาง ในสหรัฐอเมริกา (Schneider, S.P., 1998) และมีปริมาณของเหล็กปลอกในแนวแกน $\rho_{sc} > 4\%$ ตามที่กำหนดในมาตรฐานการออกแบบ AISC LRFD (AISC, 1994) ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียดเสาตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column ที่ใช้ในการศึกษา มีจำนวน 18 ตัวอย่างจำแนกเป็น 3 กลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 3.18 โดย กลุ่มที่ 1 เป็นเสาตัวอย่างทดสอบ กอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีวัสดุโอบรัด จำนวน 6 ตัวอย่าง ซึ่งใช้เป็นเสาตัวอย่างทดสอบอ้างอิง (Control RC columns) *กลุ่มที่ 2* เสาตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก โดยไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน จำนวน 6 ตัวอย่าง และ *กลุ่มที่ 3* เสาตัวอย่างทดสอบคอนกรีต เสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนโดยมี จำนวน 6 ตัวอย่าง โดยชื่อเสาตัวอย่างที่ระบุในตารางที่ 3.3 ถูกกำหนดในรูป AX - Y - Z ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ขอให้ทราบด้วยว่าในการศึกษาในกรณีส่วนนี้ได้พิจารณาโดยกำนึงถึงผลของระยะของเหล็กปลอก ต่อกำลังของเสาและผลของระยะของนอตที่ใช้ยึดซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของ ว.ส.ท.



รูปที่ 3.16 รายละเอียดสัญลักษณ์ในการกำหนดชื่อเรียกตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column

กลุ่ม ที่	ตัวอย่างทคสอบ	f_{co}^{\prime} (MPa)	<i>t</i> (mm)	หน่วยแรงที่ใช้ ในการโอบรัดก่อน (MPa)	ຈຳนวน	วัสดุโอบรัด (Confined materials)	รูปหน้าตัด (Cross section)
	CRC18-0-0	18	-	- # 2	2		150.0 mm.
1	CRC25-0-0	25	-	- /	2	ี เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	4 DB12
	CRC32-0-0	32	-		2		RB6 @ 150 mm. No steel jacket
	SRC18-6.0-0	18	6.0		2		6.0 mm. 150.0 mm. 6.0 mm.
2	SRC25-6.0-0	25	6.0	0	2	เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก + ปลอกเหล็ก	2.0 mm 0.0 mm 6.0 n 1.5 0 mm.
	SRC32-6.0-0	32	6.0	onataina		38.5	⁹ ⁹ ⁹ ⁹ ⁹ ⁹ ⁹ ¹
	SRC18-6.0-0.1 f' _{co}	18	6.0	$0.1 f_{co}^{\prime}$	2	เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	6.0 mm. 150.0 mm. 6.0 mm.
3	SRC25-6.0-0.1 f' _{co}	25	6.0	$0.1 f_{co}^{\prime}$	2	+ ปลอกเหลีก + หน่วยแรงโอบรัคก่อน	162.0 mm 6.0
	SRC32-6.0-0.1 f' _{co}	32	6.0	$0.1 f_{co}'$	2		4 DB12 G RB6 @ 150 mm.
		รวมตัวอย่าง	ทคสอบ			18	

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.17 รายละเอียดของเหล็กเสริมของตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column



รูปที่ 3.18 รายละเอียดของตัวอย่างทคสอบ Tubed RC column

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

โดยที่ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษานี้ได้ถูกจัดเตรียมขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ บัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ศูนย์เกรื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี โดยมีขั้นตอนดังนี้

จัดเตรียมตัดปลอกเหล็ก (Steel jacket) โดยการนำเหล็กแผ่นโครงสร้างแบบเย็น นำมาพับเป็นสองส่วน จากนั้นนำมาประกอบกันเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีความหนา 6.0 mm ตามแบบที่กำหนด ให้มีความยาว 750 mm เพื่อนำมาใช้เป็นแบบในการหล่อสำหรับตัวอย่างทดสอบ และใช้เป็นปลอกเหล็ก (Steel jacket) ของตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.19

นำปลอกเหล็กที่ใช้เป็นแบบเสารูปตัวซี 2 ชิ้นประกบกันพร้อมกับตีแบบยึดกันไว้
เป็นแบบชั่วคราวแล้วนำมาตั้งบนพื้นเรียบและทำการจัดดิ่งของเสา จากนั้นทำการเทคอนกรีต
ผสมเสร็จลงในปลอกเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.20

 เมื่อตัวอย่างทดสอบมีอายุครบ 24 ชั่วโมง จัดทำการถอดแบบและเขียนหมายเลข และวันที่หล่อคอนกรีตแล้วนำเสาคอนกรีตเสริมเหล็กไปทำการบ่มชื้นโดยใช้กระสอบชุบน้ำคลุม เป็นเวลา 28 วัน

ภายหลังจากการบ่มตัวอย่างทดสอบครบระยะเวลาที่กำหนดแล้วนำปลอกเหล็ก รูปตัวซีที่มีลักษณะดังที่ได้กำหนดไว้แล้วทั้ง 2 ส่วนนำมาประกบเข้ากับตัวอย่างทดสอบคอนกรีต จากนั้นจึงนำแบบปลอกเหล็กมาประกบเข้ากับตัวอย่างทดสอบและนำนอตที่ได้ทำการออกแบบไว้ มาช่วยยึดปลอกเหล็กรูปตัวซีเข้าหากันโดยที่ระยะที่นอตยึดนั้นจะยึดตามระยะที่ได้กำหนดไว้ทำ การให้หน่วยแรงเข้ากับปลอกเหล็กโดยที่ต้องพิจารณาหน่วยแรงสำหรับการขันสลักเกลียวที่ 0.1 f[']_c ดังแสดงในรูปที่ 3.21

 เมื่อทำการให้หน่วยแรงเข้ากับปลอกเหล็กแล้วนั้นขณะที่นอตช่วยยึดปลอกเหล็ก อยู่นั้นทำการเชื่อมไฟฟ้าตามรอยต่อในแนวแกนโดยใช้ Machine welding จากนั้นถอดนอตออก และทำการเชื่อมปลอกเหล็กของตัวอย่างทดสอบตลอดแนวอีกครั้งหนึ่ง โดยช่างเชื่อมไฟฟ้าที่มี ความเชี่ยวชาญเพื่อเตรียมทำการทดสอบ

ก่อนทคสอบ 1 วันทำการติดตั้งมาตรวัดความเครียด (Strain gauge) จำนวน 2 ตัว ลงบนพื้นผิวของเสาที่ใช้ทดสอบและในบริเวณพื้นผิวของปลอกเหล็กตรงจุดกึ่งกลางความยาว ของตัวอย่างทดสอบในแนวแกนและในแนวขวางเพื่อที่จะตรวจสอบความเครียดในแนวแกน และความเครียดในแนวขวางที่ใช้ทดสอบและปลอกเหล็กภายใต้แรงกระทำในแนวแกน



รูปที่ 3.19 แสดงรายละเอียดปลอกเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.20 การหล่อตัวอย่างทคสอบ Tubed RC column



รูปที่ 3.21 รายละเอียดแบบปลอกเหล็กของ Tubed RC column ที่ความหนา 6.0 mm และลักษณะของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก

4) ขั้นตอนการทดสอบ

ปรับฐานรองรับตัวอย่างทุดสอบให้เรียบเสมอกันทั้งสองด้าน

ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่อง UTM ปลายทั้งสองด้านของตัวอย่างทดสอบ ถูกรองรับ โดยแผ่นรับแรงแบกทาน (Bearing plate) หนา 50 mm ติดตั้ง LVDT ที่ปลายด้านบน บริเวณหัวกด (Crosshead) ของเครื่อง UTM เพื่อวัดระยะการหดของตัวอย่างทดสอบในแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 3.22

 จากนั้นต่อสายนำสัญญาณจาก LVDT และค่าแรงกดอัดจาก UTM เข้า Data logger แล้วตั้งค่าโปรแกรมเพื่อเก็บข้อมูล

เมื่อเตรียมตัวอย่างทดสอบและเครื่องมือพร้อมที่จะทดสอบแล้วทำการ Preloading
โดยให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบประมาณ 50 kN

จากนั้น Unloading เซตศูนย์เครื่องมือวัดต่าง ๆ และบันทึกก่าต่าง ๆ

เพิ่มแรงกระทำผ่านเครื่อง UTM อย่างช้า ๆ ประมาณ 1 mm/min และทำการสังเกต และทำการบันทึกพฤติกรรมของเสา ซึ่งได้แก่ ค่าแรงกดอัดที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัด ในแนวแกนและการหดตัวในแนวแกนเริ่มเป็นเส้นโด้งและค่าแรงกดอัดที่ผนังของปลอกเหล็ก เริ่มเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่

ทำการเพิ่มแรงกระทำต่อไปเรื่อย ๆ จนด้วอย่างทดสอบเกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์
ทำการสังเกตและบันทึกลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

 ทำการกำนวณหาหน่วยแรง ความเครียด เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกดอัดและหดตัวในแนวแกนของเสา Tube RC column



รูปที่ 3.22 แผนภาพแสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column เพื่อทดสอบแรงกดอัด



รูปที่ 3.23 ตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column เพื่อทดสอบแรงกดอัด



รูปที่ 3.24 ผังการคำเนินงานเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัคก่อนด้วยปลอกเหล็ก

กลุ่ม	ตัวอย่าง	ຈຳນວນ	B/t	L/B	Confining	$\rho_{sc} = A_s / A_g$	คอเ	เกรีต	ปลอก	าเหล็ก	เหล็ก	เสริม	អេតិ៍f	าปลอก
ที่			ratio	ratio		(%)					DE	812	R	B6
					pressure		A_{c}	f_{co}^{\prime}	A_s	f_y	A_s	f_y	A_{s}	f_y
					(MPa)	L L	(mm^2)	(MPa)	(mm^2)	(MPa)	(mm^2)	(MPa)	(mm^2)	(MPa)
1	CRC18-0-0	2	-	-	-	2.0	22500	19.6	_	-	113.1	358.40	28.3	260.43
	CRC25-0-0	2	-	-	-	2.0	22500	26.3	-	-	113.1	358.40	28.3	260.43
	CRC32-0-0	2	-	-	-	2.0	22500	32.6	-	-	113.1	358.40	28.3	260.43
2	SRC18-6.0-0	2	33.3	5.0	-	14.27	22500	19.6	3744	325.48	113.1	358.40	28.3	260.43
	SRC25-6.0-0	2	33.3	5.0	- 1	14.27	22500	26.3	3744	325.48	113.1	358.40	28.3	260.43
	SRC32-6.0-0	2	33.3	5.0	-	14.27	22500	32.6	3744	325.48	113.1	358.40	28.3	260.43
3	SRC18-6.0-0.1 f'_{co}	2	33.3	5.0	1.80	14.27	22500	19.6	3744	325.48	113.1	358.40	28.3	260.43
	SRC25-6.0-0.1 f' _{co}	2	33.3	5.0	2.50	14.27	22500	26.3	3744	325.48	113.1	358.40	28.3	260.43
	SRC32-6.0-0.1 f'_{co}	2	33.3	5.0	3.20	14.27	22500	32.6	3744	325.48	113.1	358.40	28.3	260.43

ต<u>ารางที่ 3.4 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ Tubed RC column</u> ที่ใช้ในการศึกษาและคุณสมบัติทางกลของวัสคุที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

4.1 บทนำ

จากการศึกษางานวิจัยนี้จะนำเสนอถึงของผลการทคสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ที่นำมาใช้ได้แก่ คอนกรีต เหล็กที่ตัดจากปลอกเหล็กและเหล็กเสริมคอนกรีต จากนั้นจะนำเสนอผล การทคสอบตัวอย่างทคสอบคอนกรีตที่ถูก โอบรัคก่อนด้วยปลอกเหล็ก (Tubed concrete specimens) และผลการทคสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูก โอบรัคก่อนด้วยปลอกเหล็ก (Tubed RC column) ภายใต้แรงกคอัคในแนวแกนประกอบด้วยพฤติกรรมการรับแรงกคอัคในแนวแกน ลักษณะการวิบัติ กำลังรับแรงกคอัคสูงสุดและก่าความเครียคสูงสุดที่เกิดขึ้นและนำผลการทคสอบเปรียบเทียบ กำลังของเสาที่ทคสอบได้กับสมการกำลังของเสาที่เกี่ยวข้องและสุดท้ายนำเสนอสมการที่เหมาะสม ในการทำนายกำลังรับแรงกคอัคในแนวแกนของเสาดังกล่าว

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

4.2.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต

จากผลของการทดสอบแรงกดอัดแท่งกอนกรีตทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C39 - 96 และ ASTM C469 - 94 โดยกอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยเป็นกอนกรีตผสมเสร็จ ของบริษัทผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้างจำกัด (CPAC) กำลังรับแรงกดอัดสูงสุด 18 25 และ 32 MPa ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.1 ค่าหน่วยแรงกดอัดสูงสุดเฉลี่ย 19.26 26.03 และ 32.02 MPa และมีก่าของโมดูลัสยึดหยุ่นเฉลี่ยเท่ากับ 20.50 24.28 และ 27.75 GPa ตามลำดับ โดยที่กราฟแสดง กวามสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและก่ากวามเกรียดกดอัด ดังแสดงในรูปที่ 4.1

10

สาวอย่าง	N.	กำลังรับแรงกคอัคสูงสุค, f_{co}^{\prime}	โมคูลัสยึคหยุ่น, $E_{_c}$
AL 160 17	No.	(MPa)	(GPa)
	1	18.95	20.15
C19	2	19.13	20.62
C18	3	19.69	20.72
	เฉลี่ย	<u>19.26</u>	<u>20.50</u>
	1	26.55	23.99
C25	2	25.90	24.18
025	3	25.64	24.65
	เฉลี่ย	26.03	<u>24.28</u>
	1	32.33	27.51
622	2	32.19	27.67
0.32	3	31.53	28.06
	เฉลี่ย	32.02	27.75

ตารางที่ 4.1 ผลการทคสอบกำลังรับแรงกคอัคสูงสุคของคอนกรีต



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและค่าความเครียดของคอนกรีต



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมคูลัสยึดหยุ่นและค่ากำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของกอนกรีต

เมื่อนำถ่าหน่วยแรงกดอัดสูงสุดและ โมดูลัสยืดหยุ่นที่กำนวณได้ จากการทดสอบ มาเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ดังกล่าวที่กำนวณได้จากสมการหาก่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ACI ($E_c = 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f'_{co}}$) พบว่าความสัมพันธ์ทั้งสองมีก่าใกล้เกียงกันดังแสดงในรูปที่ 4.2 ในส่วนของลักษณะการวิบัติ พบว่าคอนกรีตเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงกดอัดและแรงเฉือนร่วมกัน โดยรอยแตกร้าวของตัวอย่างกอนกรีตทั้ง 3 กลุ่มทำมุม 50° - 60° กับแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งสาเหตุมาจากว่าคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่ไม่เหมือนกันจากจุดหนึ่ง ไปยังอีกจุดหนึ่งในเนื้อของวัสดุ รวมทั้งแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ส่วนของผิวสัมผัสระหว่างหัวกด และตัวอย่างทดสอบเนื่องจากการขยายตัวทางด้านข้าง ซึ่งผลของทั้ง 2 สาเหตุดังกล่าวนี้จะทำให้ สภาวะของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในวัสดุเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.3 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีต

4.2.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของปลอกเหล็ก

จากการทคสอบแรงคึงของเหล็กที่ตัดจากปลอกเหล็กรูปพรรณกลวงตามมาตรฐาน ASTM E8 พบว่ากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงคึงและความเครียคดึงของตัวอย่าง ทคสอบหนา 3.2 4.5 และ 6.0 mm มีลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ก) 4.4(ข) และ 4.4(ค) ตามลำดับ โดยผลการทคสอบมีก่าดังแสดงในตารางที่ 4.2(ก) 4.2(ข) และ 4.2(ก)

จากรูปที่ 4.4 พฤติกรรมการรับแรงดึงของปลอกเหล็ก ซึ่งแสดงอยู่ในช่วงเริ่มด้น มีลักษณะเป็นแบบยึดหยุ่นเชิงเส้นจนกระทั่งหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นถึงจุดคราก ซึ่งมีค่าเฉลี่ย 323.30 324.85 และ 325.48 MPa สำหรับความหนา 3.2 4.5 และ 6.0 mm ตามลำดับ จากนั้นเหล็ก ซึ่งจะมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงกรากในช่วงนี้ก่าความเกรียดจะมีก่าเพิ่มขึ้นขณะที่หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมี ก่าดงที่และหลังจากผ่านช่วงกรากในช่วงนี้ก่าความเกรียดจะมีก่าเพิ่มขึ้นขณะที่หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมี ก่าดงที่และหลังจากผ่านช่วงกรากในช่วงนี้ก่าความเรมียดจะมีก่าเพิ่มขึ้นขณะที่หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นมี ก่าดงที่และหลังจากผ่านช่วงกรากเหล็กสามารถรับแรงดึงได้เพิ่มขึ้นอีกกรั้ง ซึ่งสังเกตได้จากกราฟซึ่ง มีก่าความชันเพิ่มขึ้นและจากนั้นก่าความชันของเส้นกราฟจะก่อย ๆ ลดลงจนกระทั่งความชันของ กราฟมีก่าเท่ากับสูนย์และเป็นจุดที่หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นนั้นมีก่าสูงสุด (Ultimate stress) ซึ่งมีก่าเฉลื่ย 391.75 431.76 และ 474.62 MPa ตามลำดับ จากนั้นกำลังรับแรงดึงจะก่อย ๆ ลดลง ซึ่งเห็นได้จากเส้นกราฟตกลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติและเมื่อสังเกตลักษณะ การวิบัติ ซึ่งพบว่าตัวอย่างเหล็กมีพฤติกรรมแบบวัสดุเหนียวเนื่องจากในบริเวณกลางช่วงความยาว ของตัวอย่างทดสอบเกิดกอกอด (Necking) ขึ้นและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงก่อนเกิดการวิบัติ โดยการวิบัติเป็นรอยฉีกขาดที่ทำมุมเอียงประมาณ 45°กับแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 นอกจากนี้ ยังพบว่าเหล็กที่ใช้มีเปอร์เซ็นต์ความยึดเฉลี่ย 15.17% 17.98% และ 20.20% ตามถำดับ

(ก) เหล็ศ	าหนา 3.2 mm			
ตัวอย่าง	หน่วยแรงคราก	หน่วยแรงสูงสุด	โมดูถัสยืดหยุ่น	ความยืดตัว
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(%)
1	325.27	394.93	202.51	15.75
2	320.83	385.93	205.86	15.00
3	323.80	394.39	201.92	14.75
เฉลี่ย	323.30	391.75	203.43	15.17
(ข) เหล็ก	าหนา 4.5 mm			
ตัวอย่าง	หน่วยแรงคราก	หน่วยแรงสูงสุด	โมดูลัสยึดหยุ่น	ความยืดตัว
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(%)
1	324.4	435.32	206.64	18.25
2	324.65	426.68	202.67	17.25
3	325.49	433.30	204.68	18.45
เฉลี่ย	324.85	431.76	204.66	17.98
(ค) เหลี่	กหนา 6.0 mm		5	
ตัวอย่าง	หน่วยแรงคราก	หน่วยแรงสูงสุด	โมดูลัสยึดหยุ่น	ความยืดตัว
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(%)
1	327.43	469.56	196.49	21.75
2	326.21	480.74	187.58	20.10
3	322.80	473.57	200.65	18.75
เฉลี่ย	325.48	474.62	194.90	20.20

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กที่ตัดจากปลอกเหล็ก



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงคึงและความเครียดของปลอกเหล็ก



รูปที่ 4.5 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างแผ่นเหล็ก

เมื่อพิจารณาค่าของอัตราส่วน *B/t* ตามข้อกำหนดในการออกแบบเสาเชิงประกอบ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.6 นั้นสามารถสรุปการเปรียบเทียบคุณสมบัติของปลอกเหล็กได้ โดยพิจารณาอัตราส่วน *B/t* ตามมาตรฐาน ว.ส.ท.1008 - 38 หรือมาตรฐานของ ACI Committee 318 และมาตรฐาน AISC/LRFD ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ความหนา	คุณสมบ้	เ ติของปลอกเหล็ก			มาตรฐานก	ารออกแบบ				
ของปลอกเหล็ก	E_s	f_y		ວ.ສ.n./AC	I		AISC/LRFI)		
(mm)	(GPa)	(MPa)	สมการ	ค่ามาตรฐาน	ค่าจากการทคสอบ	สมการ	ค่ามาตรฐาน	ค่าจากการทคสอบ		
3.2	203.43	323.30		46.9	43.4 (ไม่ผ่านข้อกำหนด)		46.9	35.5 (ไม่ผ่านข้อกำหนด)		
4.5	204.66	324.85	$\frac{B}{t} \le \sqrt{\frac{3E_s}{f_y}}$	33.3	43.5 (ผ่านข้อกำหนด)	$\frac{B}{t} \le \sqrt{\frac{2E_s}{f_y}}$	33.3	35.5 (ผ่านข้อกำหนด)		
6.0	194.90	325.48		25.0	42.4 (ผ่านข้อกำหนด)		25.0	34.6 (ผ่านข้อกำหนด)		
หมายเหตุ : ตัวส	เย่างทคสอบมี	มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจ์	เตุรัสขนาด 150	x 150 mm		6				
	ร้างกลาลัยเกลโนโลยีสุรุ่มที่									

d		E	d	Iω				ad	9/
ຫ າ ≈ າ ໑໑	12	ા ગાંજે લાગ	1199 619	าดาจัตร	ะาสาาเ	R/+ C	ນາງເງເກລະສ	າງເທິດຄ	าณ์ลง
	4.5	PLOID	TOINT	ווישו וז נ	มแมน	$D \mid i \forall$	าเททาเผเาภ		1001
							eb		

4.2.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมคอนกรีต

จากการทดสอบแรงดึงของเหล็กเส้นกลมและเหล็กข้ออ้อยตามมาตรฐาน ASTM E8 ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเกรียดดึง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 จากกราฟพบว่าหน่วยแรงคราก หน่วยแรงดึงสูงสุด โมดูลัสยึดหยุ่นและเปอร์เซ็นต์ ความยึดตัวโดยเฉลี่ยมีก่า ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงคึงและความเครียดของเหล็กเส้นกลม RB6



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดของเหล็กข้ออ้อย DB12

ตัวอย่างที่	หน่วยแรงคราก	หน่วยแรงสูงสุด	โมดูลัสยึดหยุ่น	ความยืดตัว
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(%)
1	262.43	336.70	196.50	23.02
2	257.10	326.42	192.20	20.44
3	257.73	337.66	194.80	21.58
4	264.46	337.32	196.10	24.13
เฉลี่ย	260.43	334.52	194.90	22.29

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้นกลม RB6

ตารางที่ 4.5 คุณสมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อย DB12

ตัวอย่างที่	หน่วยแรงคราก	หน่วยแรงสูงสุด	โมดูลัสยึดหยุ่น	ความยืดตัว
	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(%)
1	361.32	484.92	190.30	34.10
2	350.95	502.36	191.30	33.96
3	358.79	462.26	189.20	33.25
4	362.54	508.92	189.90	30.85
เฉลี่ย	358.40	489.62	190.18	33.04

พบว่าพฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเสริมช่วงเริ่มต้นเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น จนกระทั่งหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นถึงจุดครากซึ่งมีค่าเฉลี่ยสำหรับเหล็กเสริม RB6 เท่ากับ 260.43 MPa และเหล็กเสริม DB12 เท่ากับ 358.40 MPa จากนั้นพบว่าเหล็กเสริมมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงคราก ซึ่งในช่วงนี้เหล็กเสริมจะมีค่าความเครียดเพิ่มขึ้น ในขณะที่หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมนั้น มีค่าเท่าเดิมและเมื่อผ่านช่วงครากไปแล้วนั้นเหล็กเสริมจะยังคงสามารถรับแรงดึงได้เพิ่มขึ้นอีกครั้ง ซึ่งจะเห็นได้จากการที่กราฟมีความชันเพิ่มขึ้น จากนั้นความชันของกราฟจะค่อย ๆ ลดลงจนกระทั่ง ความชันของกราฟเท่ากับศูนย์เมื่อหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กมีค่าสูงสุด จากนั้นกำลังรับแรงดึง ของเหล็กเสริมจะค่อย ๆ ลดลง จนกระทั่งเหล็กเสริมเกิดการวิบัติซึ่งลักษณะการวิบัติของเหล็กเสริม ดังแสดงในรูปที่ 4.8(ก) และ 4.8(ข)



รูปที่ 4.8 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบเหล็กเสริมคอนกรีต

4.3 ผลการทดสอบตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก (Tubed concrete specimens) ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนและวิจารณ์ผล 4.3.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ

รูปที่ 4.9 - 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง (Stress) และความเครียด (Strain) ของตัวอย่างทดสอบอ้างอิงและตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก โดยจัดกลุ่มตามค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต ($f'_{co} = 18$ 25 และ 32 MPa) ความหนาของเหล็ก (t = 3.2 4.5 และ 6.0 mm) และหน่วยแรงโอบรัดก่อน (0.05 f'_{co} และ 0.1 f'_{co}) และจำกัดการแสดงผล ที่ค่าการหดตัวมีค่า 15 mm หรือเทียบเท่าค่าความเครียด (Strain) ในคอนกรีตที่ค่า 0.050 mm/mm เป็นค่าความเครียด (Strain) ที่สูงกว่า Ultimate compressive strain ของคอนกรีตประมาณ 18.75 เท่า

จากรูปที่ 4.9 - 4.17 พบว่าพฤติกรรมของตัวอย่างทุดสอบถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วงกือ พฤติกรรมแบบเส้นตรง (Linear) และพฤติกรรมแบบไร้เชิงส้นตรง (Nonlinear) ในช่วงแรกตัวอย่าง ทดสอบในกลุ่มที่ 1 และ 2 (ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน) ซึ่งพบว่ามีค่าความชั้น (Slope) และลักษณะเส้นกราฟที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากในการศึกษานี้แรงกคอัคนั้นถูกกำหนดให้กระทำ ต่อคอนกรีต โดยตรงและคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีค่า Poisson's ratio ที่ต่ำ ดังนั้นคอนกรีตจึงขยายตัว ทางด้านข้างที่น้อยมาก ในช่วงแรกและเป็นวัสดหลักในการรับแรงกดอัดโดยปลอกเหล็กร่วมรับแรง กดอัดได้บ้างโดยอาศัยการถ่ายแรงบางส่วนจากแกนคอนกรีตโดยอาศัยแรงยึดเหนี่ยว (Bond) และแรงเสียคทานระหว่างผิวแกนของคอนกรีตและผิวในของปลอกเหล็ก (Johansson, M., 2000) โดยพฤติกรรมช่วงนี้มีลักษณะแบบเชิงเส้นตรง (Linear) จนถึงจุดที่ตัวอย่างทคสอบรับแรงกคอัค ประมาณ 60 - 80% ของหน่วยแรงสูงสุดและเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 3 และ 4 พบว่า พฤติกรรมในช่วงแรกนั้นจะมีค่าความชั้นสูงมากกว่าตัวอย่างทคสอบกลุ่มที่ 1 และ 2 เนื่องจาก ตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ 0.05 f' และ 0.1 f' ตามลำดับซึ่ง ้ก่อให้เกิดการโอบรัดแกนคอนกรีตทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความแกร่งเพิ่มขึ้น จากนั้นช่วงที่สองเมื่อ แกนคอนกรีตถูกแรงกระทำเพิ่มขึ้นอีก คอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวขนาดเล็ก (Micro cracking)ใน เนื้อคอนกรีตมากขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นผลทำให้แกนคอนกรีตเกิดการขยายตัวทางค้านข้างมากขึ้น เนื่องจาก Poisson's effect ดังนั้นค่าความชั้น (Slope) ของกราฟความสัมพันธ์จึงเริ่มมีค่าลดลง และพฤติกรรมของตัวอย่างทคสอบค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นตรง (Nonlinear) มากขึ้น ในขณะเดียวกันเมื่อแกนคอนกรีตมีการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้น ก่อให้เกิดแรงดันทางด้านขวาง กระทำตั้งฉากกับผนังของปลอกเหล็กมากขึ้นแล้ว ผนังของปลอกเหล็กจะต้านทานต่อแรงคัน ้ดังกล่าวโคยอาศัยความแกร่งต่อการคัดของผนังในรูปของแผ่น (Plate) ซึ่งก่อให้เกิดแรงตั้งฉาก ้และแรงเสียคทานที่ผิวสัมผัสระหว่างแกนคอนกรีตและในส่วนผนังด้านในของปลอกเหล็กมากขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้ปลอกเหล็กต้านทานแรงกดอัดในแนวแกนร่วมกับแกนของกอนกรีตอย่างต่อเนื่อง และเกิดการ โก่งเดาะเฉพาะที่ที่ผนังของปลอกเหล็ก (Local tube wall buckling) ขึ้น ซึ่งเป็นผลให้ ้ตัวอย่างทุดสอบรับแรงกุดอัคเพิ่มขึ้นได้ไม่มากนักโดยปลอกเหล็กทำหน้าที่ในการจำกัด (Contain) แกนคอนกรีตที่แตกร้าวให้มีกำลังรับแรงกคอัคได้มากขึ้นและทำให้ตัวอย่างทคสอบมีความสามารถ ้ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในแนวแกนที่สูงมาก (คล้ายพฤติกรรมของวัสดุเหนียว) ก่อนการวิบัติของ ตัวอย่างทุดสอบ

พฤติกรรมในช่วงที่สองของตัวอย่างทคสอบพบอยู่ 2 รูปแบบ (ดูรูปที่ 2.6 ในหัวข้อ ที่ 2.3 ประกอบ) ดังนี้

แบบที่ 1 ตัวอย่างทดสอบรองรับแรงกระทำสูงถึงก่าหนึ่งจากนั้นด้วอย่างทดสอบ มีความแกร่งประมาณสูนย์หรือ Elastic - perfectly plastic ซึ่งพบว่าเกิดขึ้นในด้วอย่างทดสอบ S18 - 6.0 S25 - 6.0 และ S32 - 6.0 ซึ่งเกิดในทุกกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและในปลอกเหล็ก ที่มีความหนา (6.0 mm) ทั้งหมด และพบในตัวอย่างทดสอบ S18 - 4.5 - 0.1 f_{co} S25 - 4.5 - 0.1 f_{co} และ S32 - 4.5 - 0.1 f_{co} มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน 0.1 f_{co} เกิดขึ้นในปลอกเหล็กหนาปานกลาง (4.5 mm) และทุกกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเช่นกัน ในกรณีนี้เมื่อพบว่าแรงกดอัดในแนวแกน มีก่าหน่วยแรงกดอัดสูงสุดและแถนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวและขยายตัวทางด้านข้ามากพอแล้ว ผนังของปลอกเหล็กจะมีความแกร่งต่อการดัดในการด้านทานต่อผลของการขยายตัวทางด้านข้ามากพอแล้ว ผนังของปลอกเหล็กจะมีความแกร่งต่อการดัดในการด้านทานต่อผลของการขยายตัวทางด้านข้าง ของแกนคอนกรีตอย่างเพียงพอ จากนั้นคอนกรีตเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผนังของปลอกเหลีก เกิดการ โก่งเดาะเฉพาะที่ และปลอกเหล็กจะทำหน้าที่จำกัดแกนกอนกรีตให้สามารถรับแรงกดอัด คงที่ได้อย่างต่อเนื่องถึงจุดหนึ่ง ในบางกรณีกระบวนการจำกัดแกนกอนกรีตอาจเกิดขึ้นได้หลายครั้ง เป็นผลทำให้ด้วอย่างทดสอบมีก่าแรงสูงสุดเกิดได้หลายครั้งก่อนถึงจุดวิบัติ โดยแรงกดอัดที่เพิ่มขึ้น และลดลงหลังจากการ โก่งเดาะเฉพาะพี่ของผนังของปลอกเหล็กถูกรองรับโดยกำลังรับแรงกดอัดใน แนวแกนของปลอกเหล็ก

แบบที่ 2 เมื่อรองรับแรงกระทำใด้สูงสุดถึงก่าหนึ่งแล้ว จากนั้นตัวอย่างทดสอบ จะมีความแกร่งถดลงหรือ Strain softening เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบ S18 - 3.2 S25 - 3.2 และ S32 - 3.2 เป็นตัวอย่างทดสอบที่มีผนังของปลอกเหล็กบาง (3.2 mm) และในตัวอย่างทดสอบ S18 - 4.5 S25 - 4.5 และ S32 - 4.5 ซึ่งเป็นตัวอย่างทดสอบที่มีผนังของปลอกเหล็กหนาปานกลาง (4.5 mm) โดยในกรณีนี้เมื่อแรงกดอัดในแนวแกนมีก่าหน่วยแรงกดอัดสูงสุดแล้วนั้นแกนกอนกรีต เริ่มมีการแตกร้าวและเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้วผนังของปลอกเหล็กไม่มีความแกร่ง ต่อการดัดเพียงพอในการต้านทานต่อการขยายตัวทางด้านข้างข่องแกนกอนกรีต จากนั้นคอนกรีตจะ เกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผนังของปลอกเหล็กจะเกิดการ โก่งเดาะเฉพาะที่ โดยปลอกเหล็ก ไม่สามารถจำกัดแกนกอนกรีตที่แตกร้าวให้มีกำลังรับแรงกดอัดได้เพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีการ โก่งเดาะ เฉพาะที่ของปลอกเหล็กมีก่ามากขึ้นแล้ว ปลอกเหล็กจะมีความสามารถในการจำกัดแกนกอนกรีต และเกิดการแตกร้าวได้อีกครั้งหนึ่ง โดยแรงกดอัดที่เพิ่มขึ้นและลดลงหลังจากการ โก่งเดาะเฉพาะที่ ของผนังของปลอกเหล็กจะถูกรองรับโดยกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของปลอกเหล็ก



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ ที่ไม่มีหน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ f_{co} = 18 MPa



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเกรียดของตัวอย่างทดสอบ ที่ไม่มีหน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ *f_{co}* = 25 MPa


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเกรียดของตัวอย่างทดสอบ ที่ไม่มีหน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ *f_{co}* = 32 MPa



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ ที่มีหน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ $0.05 f'_{co}$ และ $f'_{co} = 18 \ {
m MPa}$



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทคสอบ ที่มีหน่วยแรงโอบรัคก่อนที่ 0.05*f*[']_{co} และ *f*'_{co} = 25 MPa



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทคสอบ ที่มีหน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ 0.05*f*'o และ *f*'o = 32 MPa



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ ที่มีหน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ 0.1*f_{co}* และ *f* _{co} = 18 MPa



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทคสอบ ที่มีหน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ 0.1*f*[']_{co} และ *f*'_{co} = 25 MPa



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทคสอบ ที่มีหน่วยแรงโอบรัคก่อนที่ 0.1*f_{co}* และ *f*′_{co} = 32 MPa

4.3.2 สักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ4.3.2.1 ตัวอย่างทดสอบอ้างอิง

จากการทดสอบพบว่าลักษณะการวิบัติตัวอย่างทดสอบอ้างอิง (กลุ่มที่ 1) ที่ถูกให้แรงกดอัดในแนวแกนในส่วนช่วงแรกเกิดการแตกร้าวในบริเวณผิวด้านบนและล่าง เนื่องจากช่วงที่ตัวอย่างทดสอบอ้างอิงมีพฤติกรมแบบไร้เชิงเส้น (Nonlinear) ความเครียดแนวกดอัด ซึ่งมีก่าใกล้เกียงกับความเครียดสูงสุดของคอนกรีต ดังนั้นคอนกรีตจะเกิดการหดตัวในแนวแกน และเกิดการขยายตัวออกด้านข้างตามหลักของ Poisson's effect ผลทำให้รอยแตกร้าวมีการขยายตัว เพิ่มขึ้นรวมทั้งผิวด้านนอกของคอนกรีตเกิดการหลุดร่อนส่งผลให้กำลังรับแรงของตัวอย่างทดสอบ อ้างอิงมีก่าลดลง อันเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบอ้างอิงมีขนาดลดลงตามการแตกร้าว ที่มีก่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามตัวอย่างทดสอบอ้างอิงสามารถที่รับแรงต่อไปอีกระยะหนึ่งจนกระทั่ง เกิดการวิบัติตามแนวแกนอย่างทันทีทันใด ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบอ้างอิง

4.3.2.2 ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก

สำหรับลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 2 3 และ 4 นั้น พบว่ามีลักษณะคล้ายกันเมื่อทำการทดสอบให้แรงกดอัดในแนวแกน โดยควบคุมการให้แรงกระทำ อย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอเริ่มด้นจากการอัดแตก (Crushing) ของกอนกรีตบริเวณที่แรงกดอัดกระทำ (ซึ่งเป็นการวิบัติเฉพาะส่วน (Local failure) และเกิดจากหน่วยแรงรวมศูนย์ (Stress concentration)) ช่วงแรกลักษณะการหดตัวในแนวแกนมีค่าน้อยมากและไม่แสดงอาการภายนอกให้เห็นในช่วงต้น เมื่อการหดตัวลงในแนวแถนมีค่าน้อยมากและไม่แสดงอาการภายนอกให้เห็นในช่วงต้น เมื่อการหดตัวลงในแนวแถนและการขยายตัวออกทางด้านข้างเพิ่มมากขึ้นเนื่องจาก Poisson's effect โดยการขยายตัวทางด้านข้างจะก่อให้เกิดแรงดัดกระทำตั้งฉากกับผนังของปลอกเหล็กประกอบกับ ปลอกเหล็กอยู่ในรูปของแผ่น (Plate) และความแกร่งต่อการดัดไม่สูงมากนักกระทำโดยแรงกดอัด ในแนวแกน เนื่องจาก Micro - interlocking และแรงเสียดทานที่ถ่ายมาจากแรงกดอัดจองกอนกรีต ส่งผลทำให้ผนังของปลอกเหล็กอยู่ในสภาพ Beam - column และเป็นผลทำให้ผนังของปลอกเหล็ก จะเกิดการ โก่งเดาะเฉพาะที่ (Local tube wall buckling) ในบริเวณที่แรงกดอัดกระทำอย่างรวดเร็ว โดยการ โก่งเดาะเฉพาะที่ (Local tube wall buckling) ในบริเวณที่ก้งกลอัเกระกามสูง ช่วงความสูง 100 - 150 mm ของตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20 ดังนั้นปลอกเหล็ก จึงไม่มีความสามารถในการ โอบรัดกอนกรีตให้มีกำลังสูงขึ้นได้ แต่อย่างไรก็ตามปลอกเหล็ก ดังกล่าวจะทำหน้าที่ช่วยจำกัด (Contain) แกนคอนกรีตให้อัดตัวเข้าด้วยกันและทำให้การอัดแตก (Crushing) ของแกนคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งเป็นผลทำให้แกนคอนกรีตยังคงมีความสามารถ ในการรับแรงกดอัดในแนวแกนได้อย่างต่อเนื่องและทำให้แรงกดอัดที่เพิ่มขึ้นถ่ายไปยังปลอกเหล็ก ตามกลไก (Mechanism) เมื่อการ โก่งเคาะเฉพาะที่ของปลอกเหล็กมีค่าสูงมากขึ้นแล้วนั้น ปลอกเหล็ก จะมีความสามารถในการจำกัดแกนคอนกรีตที่แตกร้าวได้อีกครั้งหนึ่ง เป็นผลทำให้ตัวอย่างทดสอบ มีการหดตัวในแนวแกนที่สูงมาก ก่อนที่ตัวอย่างทดสอบจะเกิดการวิบัติโดยรวม



รูปที่ 4.19 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 4.20 ด้วอย่างลักษณะหน้าตัดการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่ความหนา 3.2 4.5 6.0 mm

โดยสรุปแล้ว พบว่าตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาเกิดการวิบัติเฉพาะที่ เนื่องจากการเกิดการ โก่งเดาะเฉพาะที่ (Local tube wall buckling) เกิดขึ้นมากสุดที่บริเวณกึ่งกลาง กวามสูงในช่วงกวามสูง 100 - 150 mm ของตัวอย่างทดสอบ เป็นผลทำให้ตัวอย่างทดสอบมีกำลัง ก่อนข้างต่ำ ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพสูงขึ้นและประหยัด วิธีหนึ่งที่ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงกดอัดใน แนวแกนของตัวอย่างทดสอบให้สูงขึ้น คือตัวอย่างทดสอบดังกล่าวกวรถูกเสริมด้วยปลอกเหล็กให้มี ปริมาณเหล็กมากพอในบริเวณที่เกิดเกิดการ โก่งเดาะเฉพาะที่ (Local tube wall buckling) เพื่อให้ ปลอกเหล็กในบริเวณดังกล่าวมีกำลังในการ โอบรัดแกนคอนกรีตที่เพียงพอ

4.3.3 หน่วยแรงกดอัดสูงสุดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบและค่าความเครียดสูงสุด

จากกราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่างทคสอบในงานวิจัย ค่าหน่วยแรงกคอัคสูงสุด ในแนวแกนของตัวอย่างทคสอบเกิดขึ้นหลายค่าซึ่งไม่ได้แสดงค่าอย่างชัคเจน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงขอนิยามค่าหน่วยแรงกคอัคสูงสุดที่เกิดขึ้น โดยพิจารณาเลือกค่าจากความเครียดที่ 0.2% strain (0.002 mm/mm) บนแกนของความเครียค (Strain) จากนั้นทำการลากเส้นตรงให้ขนานไปกับกราฟ ในส่วนช่วงแรกของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียค (Stress - Strain curve) ที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงซึ่งค่าหน่วยแรง (Stress) จุดที่เส้นตรงดังกล่าวตัดกับกราฟนี้จะถูกนำมาใช้ เป็น"หน่วยแรงใช้งานสูงสุด" หรือ f'_{max} ดังแสดงในรูปที่ 4.21

ตารางที่ 4.6 สรุปผลการทดสอบของตัวอย่างทดสอบที่ได้จากการทดสอบ พิจารณาแถวที่ 8 แสดงก่าการเปรียบเทียบอัตราส่วน f'_{max,ref} โดยทำการพิจารณา f'_{co} ที่เท่ากัน พบว่าตัวอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดก่อนที่กวามหนา 3.2 mm จะมีก่าอัตราส่วนของกำลังเพิ่มขึ้น ในช่วง 1.69 - 2.57 ซึ่งมีก่าน้อยกว่าที่โอบรัดด้วยปลอกเหล็กหนา 4.5 และ 6.0 mm โดยมีก่าอยู่ ในช่วง 2.01 - 3.03 และ 2.41 - 3.38 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาความหนาและคอนกรีตมี f'_{co} ที่เท่ากัน พบว่าอัตราส่วน $f'_{max} / f'_{max,ref}$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่สูงขึ้น (มีค่าอยู่ในช่วง 1.69 - 2.82 1.80 - 3.34 และ 1.86 - 3.38 ในกลุ่มที่ 2 3 และ 4 ตามลำดับ) ซึ่งอาจเนื่องมาจากการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทำ ให้ปลอกเหล็กชิดกับแกนคอนกรีตมากกว่าที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ดังนั้นจึงเกิด การโอบรัดระหว่างปลอกเหล็กและแกนคอนกรีตก่อนที่ตัวอย่างทดสอบนั้นจะเริ่มรับแรงกระทำ ดังนั้นเมื่อตัวอย่างทดสอบเริ่มรับแรงกระทำจึงสามารถรับแรงกคอัดในแนวแกนสงเพิ่มขึ้น

นอกจากนั้นแล้วเมื่อทำพิจารณาการให้หน่วยแรงโอบรัคก่อนทางก่อนที่เท่ากัน พบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน f'max,ref จากความหนา 3.2 mm ไปยัง 4.5 mm มีค่าเพิ่มขึ้น อยู่ในช่วง 14.03 - 27.78% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการเพิ่มขึ้นของปลอกเหล็กความหนา 4.5 mm ไปยัง 6.0 mm มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 8.05 - 23.11%



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด แสดงการพิจารณาหาก่า f'_{\max} ที่ 0.2% offset

โดยสรุปพบว่า ปลอกเหล็กที่ความหนาเพิ่มขึ้นและการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ที่สูงขึ้นมีผลทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบมีแนวโน้ม เพิ่มสูงขึ้นแต่อัตราการเพิ่มขึ้นจะลดลงเมื่อตัวอย่างทดสอบทำด้วยคอนกรีตที่มี f' ที่สูงขึ้น นอกจากนั้นแล้วผลของการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงในช่วง ของพฤติกรรมแบบเส้นตรงให้สูงขึ้นจากเดิมได้ ดังนั้นในส่วนความหนาของปลอกเหล็กและการให้ หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่เพิ่มขึ้น นอกจากช่วยให้กำลังรับแรงกระทำของตัวอย่างทดสอบสูงขึ้นยัง ช่วยทำให้ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมในช่วงเส้นตรงสูงขึ้นด้วย

กลุ่มที่	ตัวอย่าง	f_{cc}^{\prime}	f'_{cc}	ε _u	\mathcal{E}_{u}	$f'_{\rm max}$	$f'_{\rm max}$	\mathcal{E}'_{\max}	\mathcal{E}'_{\max}	ความแกร่ง	พฤติกรรมการรับแรง
			$f_{\it co,ref}'$		$\mathcal{E}_{u,ref}$		$f'_{\max, ref}$		$\mathcal{E}'_{\max, ref}$		
		เฉลี่ย	(MPa)	(% E)	(MPa)	เฉลี่ย	(MPa)	(% <i>E</i>)	(MPa)	(GPa)	
1	CR18-0-0	15.57	-	0.24	-	15.50	Η -	0.26	-	-	Concrete crushing
	CR25-0-0	22.23	-	0.24	-	21.79		0.28	-	-	Concrete crushing
	CR32-0-0	28.26	-	0.21	- H	26.47	÷	0.23	-	-	Concrete crushing
2	SR18-3.2-0	35.76	2.30	0.43	1.79	35.50	2.29	0.36	1.38	22.17	Strain softening
	SR25-3.2-0	41.84	1.88	0.51	2.15	39.90	1.83	0.42	1.52	26.40	Strain softening
	SR32-3.2-0	46.69	1.65	0.47	2.20	44.72	1.69	0.34	1.48	28.73	Strain softening
	SR18-4.5-0	44.23	2.84	0.78	3.25	40.48	2.61	0.40	1.53	25.81	Strain softening
	SR25-4.5-0	49.90	2.24	0.40	1.68	49.59	2.28	0.46	1.67	27.09	Strain softening
	SR32-4.5-0	57.17	2.02	0.51	2.38	53.33	2.01	0.37	1.61	29.70	Strain softening
	SR18-6.0-0	50.75	3.26	4.49	18.62	43.74	2.82	0.41	1.58	26.23	Elastic perfectly plastic
	SR25-6.0-0	63.01	2.83	4.99	21.13	58.74	2.70	0.55	1.99	28.21	Elastic perfectly plastic
	SR32-6.0-0	72.58	2.57	4.98	23.33	63.72	2.41	0.41	1.80	30.92	Elastic perfectly plastic

ตารางที่ 4.6 สรุปผลการทคสอบหน่วยแรงสูงสุดและก่ากวามเกรียคสูงสุดของตัวอย่างทคสอบ

กลุ่มที่	ตัวอย่าง	f_{cc}^{\prime}	f'_{cc}	ε _u	\mathcal{E}_{u}	$f'_{\rm max}$	$f'_{\rm max}$	\mathcal{E}'_{\max}	\mathcal{E}'_{\max}	ความแกร่ง	พฤติกรรมการรับแรง
			$f_{\it co,ref}'$		$\mathcal{E}_{u,ref}$		$f'_{\max, ref}$		$\mathcal{E}'_{\max, ref}$		
		เฉลี่ย	(MPa)	เฉลี่ย	(MPa)	เฉลี่ย	(MPa)	(% <i>E</i>)	(MPa)	(GPa)	
3	SR18-3.2-0.05 f'_{co}	39.21	2.52	0.46	1.89	39.09	2.52	0.41	1.58	23.24	Strain softening
	SR25-3.2-0.05 f'_{co}	43.82	1.97	0.33	1.41	43.64	2.00	0.36	1.30	27.59	Strain softening
	SR32-3.2-0.05 <i>f</i> ′ _{co} ′	48.32	1.71	0.46	2.16	47.53	1.80	0.40	1.74	30.62	Strain softening
	SR18-4.5-0.05 f'_{co}	45.81	2.94	0.82	3.42	45.53	2.94	0.41	1.57	25.91	Strain softening
	SR25-4.5-0.05 f'_{co}	55.37	2.49	0.38	1.63	54.82	2.52	0.39	1.40	28.14	Strain softening
	SR32-4.5-0.05 <i>f</i> ′ _{co}	59.99	2.12	0.45	2.09	57.21	2.16	0.43	1.88	31.21	Strain softening
	SR18-6.0-0.05 f'_{co}	61.14	3.93	5.02	20.83	51.70	3.34	0.44	1.69	27.03	Elastic perfectly plastic
	SR25-6.0-0.05 f'_{co}	74.30	3.34	3.76	15.93	66.29	3.04	0.43	1.57	29.50	Elastic perfectly plastic
	SR32-6.0-0.05 f'_{co}	78.49	2.78	4.10	19.21	70.43	2.66	0.49	2.12	32.40	Elastic perfectly plastic
4	SR18-3.2-0.1 <i>f</i> ′ _{co}	39.13	2.51	0.67	2.77	39.84	2.57	0.37	1.44	25.87	Strain softening
	SR25-3.2-0.1 f' _{co}	45.01	2.02	0.47	1.99	44.49	2.04	0.37	1.33	27.74	Strain softening
	SR32-3.2-0.1 f' _{co}	49.67	1.76	0.58	2.71	49.14	1.86	0.42	1.82	31.81	Strain softening
	SR18-4.5-0.1 f'_{co}	52.40	3.37	4.98	20.66	46.91	3.03	0.40	1.55	25.90	Elastic perfectly plastic
	SR25-4.5-0.1 f'_{co}	63.49	2.86	3.70	15.66	56.84	2.61	0.39	1.43	29.04	Elastic perfectly plastic
	SR32-4.5-0.1 f'_{co}	72.53	2.57	1.21	5.68	59.15	2.23	0.43	1.87	33.44	Elastic perfectly plastic
	SR18-6.0-0.1 f'_{co}	62.67	4.02	4.97	20.62	52.40	3.38	0.40	1.55	29.77	Elastic perfectly plastic
	SR25-6.0-0.1 f'_{co}	75.88	3.41	2.83	12.01	68.04	3.12	0.65	2.37	30.48	Elastic perfectly plastic
	SR32-6.0-0.1 <i>f</i> ['] _{co}	81.90	2.90	4.99	23.39	72.19	2.73	0.49	2.14	33.76	Elastic perfectly plastic

ตารางที่ 4.6 สรุปผลการทคสอบหน่วยแรงสูงสุดและก่ากวามเกรียคสูงสุดของตัวอย่างทคสอบ (ต่อ)

93

4.3.4 เปรียบเทียบกำลังและความแกร่งของตัวอย่างทดสอบกลุ่มต่าง ๆ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของตัวอย่างทดสอบ ที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ค่าต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 - 4.17 และค่าความแกร่งที่แสดง ในตารางที่ 4.6 เมื่อทำการพิจารณาตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 และ 4 พบว่าพฤติกรรมในช่วงแรก ของตัวอย่างทดสอบมีความชันสูงมากกว่าตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และ 2 เนื่องจากตัวอย่างทดสอบ ดังกล่าวมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ 0.05 f'_{co} และ 0.1 f'_{co} ซึ่งก่อให้เกิดการโอบรัดแกนคอนกรีต ทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความแกร่งเพิ่มขึ้น ค่าความแกร่งมีแนวโน้มสูงตามหน่วยแรงโอบรัดก่อน ที่เพิ่มขึ้นและเมื่อพิจารณาการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่เท่ากัน ค่าความแกร่งเพิ่มขึ้นเมื่อความหนา ปลอกเหล็กมากขึ้น ความแกร่งของตัวอย่างในกลุ่มที่ 4 มีก่าสูงกว่ากลุ่มที่ 3 2 และ 1 ตามลำคับ

4.3.5 การถ่ายแรงในตัวอย่างทดสอบ

รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกน (Axial load) กระทำต่อแกนกอนกรีตและค่าความเครียดในแนวแกน (ค่าเป็นอบ) และในแนวขวาง (ค่าเป็นบวก) ที่วัดได้จากสเตรนเกจ (Strain gage) ที่ตรงจุดกึ่งกลางความสูงของปลอกเหล็กตัวอย่าง SR18 - 3.2 จัดกลุ่มตามค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต ($f'_{c} = 18$ 25 และ 32 MPa) และความหนาของเหล็ก (t = 3.2 4.5 และ 6.0 mm) จากรูปจะเห็นได้ว่าแรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อแกนกอนกรีต ที่ปลายของตัวอย่างทดสอบบางส่วนได้ถูกถ่ายไปยังปลอกเหล็กของตัวอย่างทดสอบอย่างต่อเนื่อง จากจุดที่แรงเริ่มกระทำต่อตัวอย่างทดสอบ โดยทำให้เกิดความเครียดในแนวแกนของปลอกเหล็ก อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบ โดยทำให้เกิดความเครียดในแนวแกนของปลอกเหล็ก อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ การถ่ายแรงดังกล่าวเกิดจาก Interaction ระหว่างแกนกอนกรีตและปลอกเหล็ก โดยอาศัย Micro - interlocking และความเสียดทานระหว่าง ผิวสัมผัสด้านในของปลอกเหล็กและแกนกอนกรีตเป็นระบบถ่ายแรงหลัก (Johansson, M., 2000) โดยในส่วนช่วงแรกกวามสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและก่ากวามเครียดในแนวแกน แนวโน้มเป็นเส้นตรง จนกระทั่งตัวจะตั้งหว่ายู่ในช่วง 50% - 60% ของแรงกดอัดสูงสุดแรก P'_{max}

ในช่วงที่สองกวามสัมพันธ์ดังกล่าวมีแนวโน้มของกวามชันที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงกดอัดที่กระทำต่อแกนคอนกรีตได้ถูกถ่ายมายังปลอกเหล็กในอัตราที่สูงขึ้น เมื่อเทียบกับอัตราการที่เพิ่มขึ้นของแรงกระทำซึ่งกล่าวเป็นนัยว่าปลอกเหล็กยังช่วยรับแรงกดอัด ในสัดส่วนที่เพิ่มสูงมากขึ้น โดยน่าจะมีสาเหตุมาจากการที่แกนของกอนกรีตที่อยู่ภายใต้แรงกระทำ เริ่มมีการแตกร้าวมากขึ้นและรองรับแรงกระทำลดลง ส่งผลให้มีการกระจายแรงขึ้นในเนื้อกอนกรีต และมีการถ่ายแรงไปยังปลอกเหล็กมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดการวิบัติก่ากวามเกรียดที่เกิดขึ้น ที่จุดกึ่งกลางกวามสูงของปลอกเหล็กนั้นยังกงมีก่าต่ำกว่าก่ากวามเกรียด ที่จุดกรากของเหล็ก ซึ่งมีค่าประมาณ 0.002 mm/mm หรือ 2000 microstrain ซึ่งแสดงว่าที่จุดดังกล่าว ปลอกเหล็กยังคงมี พฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic)



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกคอัคในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูง ของตัวอย่างทคสอบ SR18 - 3.2

จากผลของแรงกดอัดในแนวแกนกระทำต่อแกนคอนกรีตที่ปลายตัวอย่างทดสอบ บางส่วนได้ถูกถ่ายไปยังปลอกเหล็ก จึงทำให้เกิดความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของผิวด้านใน ของปลอกเหล็กและแกนคอนกรีต ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ดังนั้นในการพิจารณาค่าหน่วยแรง ใช้งานที่เกิดขึ้นของตัวอย่างทดสอบ จากผลของการให้แรงกดอัดกระทำต่อคอนกรีตโดยตรงนั้น จากตารางที่ 4.7 จึงทำการพิจารณาผลที่เกิดขึ้นของความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของผิวด้านใน ของปลอกเหล็กและแกนคอนกรีตด้วย จากค่าหน่วยแรง f'_{max} ที่ทดสอบได้โดยการแปลงค่า ความเครียดตามยาวของปลอกเหล็กที่วัดได้จากสเตรนเกจ (Strain gage) โดยที่จุดกึ่งกลางความสูง ของตัวอย่างทดสอบ ตามกราฟความสัมพันธ์ในภาคผนวก ก โดยใช้สมการของ Hooke ดังแสดงใน สมการที่ 4.1

$$\sigma = E\varepsilon \tag{4.1}$$

$$P = \sigma A \tag{4.2}$$

โดยที่ σ คือ หน่วยแรงกดอัดในแนวแกนของปลอกเหล็กที่ได้จากสมการที่ 4.1 A คือ พื้นที่หน้าตัดของปลอกเหล็ก

จากการศึกษางานวิจัยของเสา Tubed Concrete column หน้าตัดกลมที่ถูกกระทำ โดยแรงกดอัดต่อแกนคอนกรีตของเสาเช่นเดียวกับที่ได้ศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งสามารถกำนวณ โดยใช้ Nonlinear finite element analysis (Johansson, M., 2000) ซึ่งเปอร์เซ็นต์ของแรงกดอัด ในแนวแกนที่ถูกถ่ายเทไปยังปลอกเหล็กนั้นจะมีก่าไม่เกิน 30% ของเสา Tubed Concrete column หน้าตัดกลมซึ่ง จากตารางที่ 4.7 พบว่าเปอร์เซ็นต์ของแรงกดอัดในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปลอกเหลีก เมื่อเทียบกับแรง *P*_{max} ที่กระทำต่อแกนคอนกรีตของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ที่ถูกโอบรัดก่อน (Tubed concrete specimens) ค่าอยู่ในช่วง 17.27 - 37.26% ส่วนใหญ่สูงกว่า 30% สาเหตุที่ปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมรับแรงกดอัดในสัดส่วนที่มากกว่าปลอกเหล็กหน้าตัดกลมนั้น น่าจะเกี่ยวเนื่องมาจากการที่ผนังของปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมดังกล่าวมีก่าความแกร่งต่อการดัด ค่าที่ไม่เพียงพอในการด้านทานต่อแรงดันทางด้านข้างของแกนคอนกรีตที่ก่อให้เกิดการแตกร้าว เป็นผลทำให้ผนังของปลอกเหล็กจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่และไม่สามารถที่จะพัฒนาการโอบรัด ต่อแกนกอนกรีตขึ้นได้ ดังนั้นแกนคอนกรีตจึงเกิดการวิบัติที่ก่ามากขึ้นและในแรงกดอัดดังกล่าว จึงถูกกระจายเข้าสู่แนวแกนของปลอกเหล็กมากขึ้น

				ความเครียด	หน่วยแรง	แรงกดอัดในแนวแกน	เปอร์เซ็นต์
กลุ่มที่	ตัวอย่าง	f'_{\max}	$P'_{\rm max}$	ในปลอกเหล็ก	เนื่องจากความเครียด	ของปลอกเหล็ก	ของแรงกคอัค
		(MPa)	(kN)	ε_{steel} (microstrain)	$\sigma_{\scriptscriptstyle steel}$ (MPa)	P _{steel} (kN)	(%)
1	CR18-0-0	15.57	350.33		-	-	-
	CR25-0-0	22.23	500.18	<i>H</i> - N	H -	-	-
	CR32-0-0	28.26	635.85		-	-	-
2	SR18-3.2-0	35.50	798.64	746.00	151.76	297.59	37.26
	SR25-3.2-0	39.90	897.84	685.00	139.35	273.26	30.44
	SR32-3.2-0	44.72	1006.26	724.00	147.28	288.82	28.70
	SR18-4.5-0	40.48	910.70	507.00	103.76	288.56	31.69
	SR25-4.5-0	49.59	1115.74	679.00	138.96	386.46	34.64
	SR32-4.5-0	53.33	1199.93	696.00	142.44	396.13	33.01
	SR18-6.0-0	43.74	984.05	296.00	57.69	215.99	21.95
	SR25-6.0-0	58.74	1321.56	659.00	128.44	480.88	36.39
	SR32-6.0-0	63.72	1433.65	703.00	137.01	512.98	35.78

ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์ของแรงกดอัดในแนวแกนที่ถูกถ่ายถงปลอกเหล็กเมื่อเทียบกับค่าหน่วยแรง f'_{max}

				ความเครียด	หน่วยแรง	แรงกดอัดในแนวแกน	เปอร์เซ็นต์
กลุ่มที่	ตัวอย่าง	$f'_{\rm max}$	$P'_{\rm max}$	ในปลอกเหล็ก	เนื่องจากความเครียด	ของปลอกเหล็ก	ของแรงกดอัด
		(MPa)	(kN)	\mathcal{E}_{steel} (microstrain)	$\sigma_{\scriptscriptstyle steel}$ (MPa)	P _{steel} (kN)	(%)
3	SR18-3.2-0.05 f_{co}	39.09	879.55	818.00	166.41	326.31	37.10
	SR25-3.2-0.05 f_{co}	43.64	981.89	808.00	164.37	322.33	32.83
	SR32-3.2-0.05 f_{co}	47.53	1069.33	806.00	163.96	321.53	30.07
	SR18-4.5-0.05 $f_{co}^{'}$	45.53	1024.43	552.00	112.97	314.18	30.67
	SR25-4.5-0.05 $f_{co}^{'}$	54.82	1233.47	783.00	160.25	445.65	36.13
	SR32-4.5-0.05 f_{co}	57.21	1287.20	754.00	154,31	429.15	33.34
	SR18-6.0-0.05 $f_{co}^{'}$	51.70	1163.15	344.00	67.05	251.02	21.58
	SR25-6.0-0.05 f_{co}	66.29	1491.59	715.00	Tal 139.35	521.74	34.98
	SR32-6.0-0.05 f_{co}	70.43	1584.68	788.00	153.58	575.01	36.29

ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์ของแรงกคอัคในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปลอกเหล็กเมื่อเทียบกับค่าหน่วยแรง f'_{max} (ต่อ)

				ความเครียด	หน่วยแรง	แรงกดอัดในแนวแกน	เปอร์เซ็นต์
กลุ่มที่	ตัวอย่าง	$f'_{\rm max}$	$P'_{\rm max}$	ในปลอกเหล็ก	เนื่องจากความเครียด	ของปลอกเหล็ก	ของแรงกดอัด
		(MPa)	(kN)	\mathcal{E}_{steel} (microstrain)	$\sigma_{\scriptscriptstyle steel}$ (MPa)	P _{steel} (kN)	(%)
4	SR18-3.2-0.1 f_{co}	39.84	896.46	776.00	157.86	309.56	34.53
	SR25-3.2-0.1 f_{co}	44.49	1000.92	788.00	160.30	314.35	31.41
	SR32-3.2-0.1 f_{co}	49.14	1105.75	843.00	171.49	336.29	30.41
	SR18-4.5-0.1 f_{co}	46.91	1055.50	516.00	105.60	293.69	27.82
	SR25-4.5-0.1 $f_{co}^{'}$	56.84	1278.96	777.00	159.02	442.24	34.58
	SR32-4.5-0.1 f_{co}	59.15	1330.88	750.00	153,50	426.87	32.07
	SR18-6.0-0.1 $f_{co}^{'}$	52.40	1179.04	279.00	54.38	203.59	17.27
	SR25-6.0-0.1 f ['] _{co}	68.04	1530.79	677.00	131.95	494.01	32.27
	SR32-6.0-0.1 f_{co}	72.19	1624.37	759.00	147.93	553.85	34.10

ตารางที่ 4.7 เปอร์เซ็นต์ของแรงกดอัดในแนวแกนที่ถูกถ่ายลงปลอกเหล็กเมื่อเทียบกับค่าหน่วยแรง $f_{
m max}'$ (ต่อ)

4.3.6 การเปรียบเทียบกำลังของตัวอย่างทดสอบและผลการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน4.3.6.1 วิเคราะห์ด้านกำลังรับแรงของตัวอย่างทดสอบ

ในการศึกษานี้นิยามค่า $f'_{max,conc}$ คือหน่วยแรงใช้งานที่เกิดขึ้นของคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 4.8 เป็นค่าที่ใช้ในพิจารณาผลที่เกิดขึ้นของความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของ ผิวด้านในของปลอกเหล็กและแกนคอนกรีต ซึ่งค่าดังกล่าวนั้นสามารถกำนวณได้จากการนำ ก่าหน่วยแรงกดอัดในแนวแกนของปลอกเหล็ก (f_{steel}) โดยพิจารณาจากก่าความเครียดที่เกิดขึ้น ที่ปลอกเหล็กแล้วหักออกจากก่าหน่วยแรงใช้งานสูงสุด ที่เกิดจากการลากเส้นขนานกับกวามชันของ กราฟที่ก่าความเกรียด 0.002 mm/mm ตัดกับเส้นกราฟของตัวอย่างทดสอบ (f'_{max})

เมื่อนำค่า $f'_{max,conc}$ ที่แสดงในตารางที่ 4.8 มาพิจารณาอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ของการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ดังแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนจากไม่มี การให้หน่วยแรงโอบรัดไปยังการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 4.23 - 18.76% และ 7.25 - 27.00% ที่การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน 0.05 f'_{co} และ 0.1 f'_{co} ตามลำดับ เมื่อกอนกรีต มี f'_{co} ที่เท่ากัน อัตราส่วนของกำลังดังกล่าวจะมีแนวโน้มลดลงตามค่ากำลังอัดประลัยของกอนกรีตที่ เพิ่มขึ้น (เช่น จาก 1.10 เป็น 1.04 ใน $f'_{max,conc,0.05f'_{co}} / f'_{max,conc,0}$ ที่ความหนา 3.2 mm เมื่อกอนกรีต มี f'_{co} สูงขึ้นจาก 18 MPa เป็น 32 MPa) ดังแสดงในรูปที่ 4.23 (ก) - (ค) และอัตราส่วนของกำลัง ดังกล่าวจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในปลอกเหล็กที่มีความหนามาก (6.0 mm) และลดลงเมื่อความหนา น้อยลง (เช่น จาก 1.10 เป็น 1.19 ใน $f'_{conc,0.05f'_{co}} / f'_{conc,0}$ ที่ f'_{co} =18 MPa เมื่อปลอกเหล็กมีความหนา เพิ่มขึ้นจาก 3.2 mm เป็น 6.0 mm)

โดยสรุปแล้ว พบว่าอัตราส่วนกำลังที่เพิ่มขึ้นของการให้หน่วยแรงโอบรัด ก่อนที่ 0.05 f_{co} มีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ 0.1 f_{co} แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อมีการให้หน่วยแรงโอบรัดที่มากขึ้น อีกทั้งอัตราส่วนดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในตัวอย่าง ทดสอบที่ f_{co} ที่ต่ำ (18 MPa) และปลอกเหล็กที่มีความหนามาก (6.0 mm) นั่นคือ SR18-6.0-0.1 f_{co}

			แรงกคอัค	หน่วยแรงกดอัด
ตัวอย่าง	f'_{max}	$P'_{\rm max}$	ในแนวแกนของคอนกรีต	ในแนวแกนของคอนกรีต
	(MPa)	(kN)	$P'_{\max,conc}$ (kN)	$f'_{\max, conc}$ (MPa)
SR18-3.2-0	35.50	798.64	501.05	22.27
SR25-3.2-0	39.90	897.84	624.58	27.76
SR32-3.2-0	44.72	1006.26	717.45	31.89
SR18-4.5-0	40.48	910.70	622.13	27.65
SR25-4.5-0	49.59	1115.74	729.28	32.41
SR32-4.5-0	53.33	1199.93	803.80	35.72
SR18-6.0-0	43.74	984.05	768.06	34.14
SR25-6.0-0	58.74	1321.56	840.69	37.36
SR32-6.0-0	63.72	1433.65	920.67	40.92
SR18-3.2-0.05 f' _{co}	39.09	879.55	553.24	24.59
SR25-3.2-0.05 f' _{co}	43.64	981.89	659.57	29.31
SR32-3.2-0.05 f' _{co}	47.53	1069.33	747.80	33.24
SR18-4.5-0.05 f' _{co}	45.53	1024.43	710.26	31.57
SR25-4.5-0.05 f'_{co}	54.82	1233.47	787.82	35.01
SR32-4.5-0.05 f' _{co}	57.21	1287.20	858.05	38.14
SR18-6.0-0.05 f'_{co}	51.70	1163.15	912.13	40.54
SR25-6.0-0.05 f'_{co}	66.29	1491.59	969.85	43.10
SR32-6.0-0.05 f' _{co}	70.43	1584.68	1009.68	44.87
SR18-3.2-0.1 f' _{co}	39.84	896.46	586.90	26.08
SR25-3.2-0.1 f' _{co}	44.49	1000.92	686.57	30.51
SR32-3.2-0.1 f' _{co}	49.14	1105.75	769.46	34.20
SR18-4.5-0.1 f' _{co}	46.91	1055.50	761.81	33.86
SR25-4.5-0.1 f' _{co}	56.84	1278.96	836.72	37.19
SR32-4.5-0.1 f' _{co}	59.15	1330.88	904.01	40.18
SR18-6.0-0.1 f' _{co}	52.40	1179.04	975.45	43.35
SR25-6.0-0.1 f'co	68.04	1530.79	1036.78	46.08
SR32-6.0-0.1 f' _{co}	72.19	1624.37	1070.53	47.58

ตารางที่ 4.8 หน่วยแรงกดอัดในแนวแกนของกอนกรีตเมื่อพิจารณาการถ่ายแรงลงปลอกเหล็ก

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

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบผลทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน กับการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ 0.05 f_{co} และ 0.1 f_{co}

ร้างกลาลัยเกคโนโลยีสรุบ



รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Strengthening ratio $f'_{\max,conc}$ / $f'_{\max,conc, without preconfinement}$ และ Confinement ratio f'_1/f'_{co}

4.3.6.2 วิเคราะห์ด้านพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบ

จากการศึกษาผลของการ โอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังปกติ (Normal strength concrete) ได้ถูกศึกษาเป็นจำนวนมากในช่วงเริ่มต้น Richard, F.E., et al., (1928) ได้นำเสนอผลของการ โอบรัดคอนกรีตที่ทำให้คอนกรีตมีค่าหน่วยแรงกดอัดสูงสุด ความแกร่ง และความเครียดที่หน่วยแรงกดอัดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก จากการทดสอบได้นำเสนอสมการเพื่อ ทำนายกำลังต้านทานแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเนื่องจากแรงกระทำทางด้านข้าง ดังแสดงในสมการที่ 4.3

$$f_{cc}' = f_{co}' + k_1 f_1 \tag{4.3}$$

- โดยที่ f_{cc}^\prime คือ กำลังรับแรงกดอัดในแกนของกอนกรีต เมื่อมีแรงดันรอบข้าง
 - f_{co} คือ กำลังรับแรงกดอัดในแกนของกอนกรีต เมื่อไม่มีแรงดันรอบข้าง
 - k_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การโอบรัคประสิทธิผล (Confinement effectiveness coefficient)

25

f₁ คือ ความคันรัครอบ (Confining pressure) ของเสาหน้าตัดกลม
 ดังแสดงในสมการที่ 4.4

$$f_1 = 2\sigma_i t / D \tag{4.4}$$

สำหรับในเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม Mander, J.B., et al., (1988) ได้นำเสนอการ หาค่าความคันรัครอบนี้ในรูปความคันโอบรัคประสิทธิผล (Effective confining pressure, f₁') ดังแสดงในสมการที่ 4.5

$$f_1' = k_s f_1$$
 (4.5)

โดยที่อัตราส่วนรูปร่าง (Shape factor, k_s) เป็นค่าแฟกเตอร์ (Factor) คำนึงถึงในส่วนผลของการโอบรัดที่ค่าไม่สม่ำเสมอสำหรับเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นอัตราส่วน ของพื้นที่ในการโอบรัดประสิทธิผล (Effective confinement area, A_e) ต่อพื้นที่หน้าตัดทั้งหมด ของกอนกรีต (A_c) ดังแสดงในสมการที่ 4.6

$$k_{s} = \frac{A_{e}}{A_{c}} = \frac{1 - \left(\frac{\left(b - 2R_{c}\right)^{2} + \left(h - 2R_{c}\right)^{2}}{3A_{g} - \rho_{sc}}\right)}{1 - \rho_{sc}}$$
(4.6)

โดยที่ σ_i คือ Hoop stress ของปลอกเหล็ก ซึ่งเท่ากับ f_y ที่จุดที่ปลอกเหล็กวิบัติ

- R คือ รัศมีความโด้งของมุมของหน้าตัดปลอกเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยม
- D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนคอนกรีตที่แปลงจากหน้าตัดสี่เหลี่ยม

ซึ่ง D = 2bh/(b+h) เมื่อ b และ h เป็นความกว้างและลึกของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม

งานวิจัยได้ศึกษาผลของการเพิ่มหน่วยแรงโอบรัดก่อนแก่ตัวอย่างทดสอบ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้นิยามให้ค่า $f'_{max,conc}$ คือค่าหน่วยแรงใช้งานที่เกิดขึ้นของคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 4.8 เป็นค่าที่แสดงการพิจารณาถึงผลที่เกิดขึ้นของความเสียดทานระหว่าง ผิวสัมผัสด้านในของปลอกเหล็กและแกนคอนกรีต ซึ่งก่าดังกล่าวสามารถกำนวณได้จากการนำค่า หน่วยแรงกดอัดในแนวแกนของปลอกเหล็ก (f_{steel}) เป็นการพิจารณาจากความเครียดที่เกิดขึ้นที่ ปลอกเหล็กหักออกจากก่าหน่วยแรงใช้งานสูงสุด (f'_{max}) เกิดจากการลากเส้นขนานกับความชันของ กราฟที่ก่าความเครียด 0.002 mm/mm ตัดกับเส้นกราฟของตัวอย่างทดสอบ

เมื่อพิจารณาถึงผลของการ โอบรัดต่อพฤติกรรมของคอนกรีตกำลังปกติ แล้วนั้นค่า f'_{max,conc} จึงถูกนำมาพิจารณาในสมการเพื่อทำนายกำลังค้านทานแรงกคอัคในแนวแกน ของคอนกรีตอันเนื่องจากแรงกระทำทางค้านข้าง คังที่ได้นำเสนอโคย Richard, F.E., et al., (1928) โดยค่า f'_{max,conc} เป็นค่าเกิดจากผลรวมกำลังอัคประลัยของกอนกรีต (f'_{co}) และผลหน่วยแรงโอบรัค (Confining stress) ที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกคอัคในแนวแกนคังแสคงในสมการที่ 4.7

$$f'_{\max,conc} = f'_{co} + k_1 f'_1$$
(4.7)

โดยที่ f_{co}^\prime คือ กำลังรับแรงกดอัดในแกนของกอนกรีต เมื่อไม่มีแรงดันรอบข้าง,

k₁ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การโอบรัคประสิทธิผล

(Confinement effectiveness coefficient)

f₁ คือ ความคันโอบรัคประสิทธิผล (Effective confining pressure)
 ของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม

เมื่อพิจารณาในพจน์ของผลของหน่วยแรงโอบรัด (Confining stress) ที่เกิดขึ้นภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนซึ่งอยู่ในรูปของ $k_1 f_1'$ ซึ่งในงานวิจัยคำนึงถึงผลของการให้ หน่วยแรงโอบรัดก่อนดังนั้นสามารถแยกพิจารณาหน่วยแรงดังกล่าวเป็น 2 ส่วนคือ

 หน่วยแรงที่เกิดจาก Passive confinement (f'_{pass}) คือผลที่เกิดขึ้นจาก การให้แรงกดอัดในแนวแกน ซึ่งผลของหน่วยแรงดังกล่าวขึ้นอยู่กับความแกร่งของปลอกเหล็กที่ นำมาโอบรัดตัวอย่างทดสอบ ก่าหน่วยแรงเกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 (กรณีไม่มีหน่วยแรง โอบรัดก่อน)ดังแสดงในสมการที่ 4.8

กรณีไม่มีหน่วยแรงโอบรัคก่อนหรือตัวอย่างทคสอบในกลุ่มที่ 2

$$f'_{\max,conc} = f'_{co} + f'_{pass}$$
(4.8)

 หน่วยแรงที่เกิดจาก Active confinement (f'act) คือผลของการให้ หน่วยแรงกระทำทางด้านข้าง (Lateral load) ก่อนแก่ตัวอย่างทดสอบที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กหาได้ จากสมการ f'act = f'max.conc - f'pass - f'co ค่าหน่วยแรงดังกล่าวเกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 3 และ 4 (กรณีมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน 0.05 f'co และ 0.1 f'co) ดังแสดงในสมการที่ 4.9 - 4.10 กรณีมีหน่วยแรงโอบรัดก่อน 0.05 f'co ก่อน 0.05 f'co หรือตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 3

$$f'_{\max,conc} = f'_{co} + f'_{pass} + f'_{act,0.05f'_{co}}$$
(4.9)

กรณีมีหน่วยแรงโอบรัคก่อน 0.1 f_{co}^\prime หรือตัวอย่างทคสอบในกลุ่มที่ 4

$$f'_{\max,conc} = f'_{co} + f'_{pass} + f'_{act,0.1f'_{co}}$$
(4.10)

โดยที่	$f'_{\max,conc}$	คือ	หน่วยแรงใช้งานที่เกิดขึ้นของกอนกรีต
	f'_{pass}	คือ	หน่วยแรงที่เกิดจาก Passive confinement
	f'_{act}	คือ	หน่วยแรงที่เกิดจาก Active confinement
	$f_{act,0.05f_{co}}^{\prime}$	คือ	หน่วยแรงที่เกิดจาก Active confinement
			ที่มีการให้หน่วยแรงโอบก่อนที่ 0.05 f _{co}
	$f'_{act,0.1f'_{co}}$	คือ	หน่วยแรงที่เกิดจาก Active confinement
			ที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัคก่อนที่ 0.1 f _{co}

ในตารางที่ 4.10 แสดงถึงผลของการทดสอบของหน่วยแรงที่เกิดจาก Passive confinement และ Active confinement ซึ่งพบว่าเมื่อเปรียบเทียบหน่วยแรง f'_act ที่เพิ่มขึ้น จาก f'_pass มีค่าสูงขึ้นประมาณ 11.24 - 36.86%

เมื่อพิจารณาค่าหน่วยแรง Passive confinement ที่ f'_{co} เท่ากันค่าหน่วยแรง ดังกล่าวจะมีค่าสูงขึ้นตามความหนาของปลอกเหล็กที่หนาขึ้น พบมากสุดในความหนา 6.0 mm (เช่น จาก 6.77 เป็น 18.64 MPa ใน f'_{pass} ที่ $f'_{co} = 18$ MPa เมื่อปลอกเหล็กหนาเพิ่มขึ้นจาก 3.2 mm เป็น 6.0 mm) ดังแสดงในรูปที่ 4.24 และความหนาเท่ากัน พบว่าค่าหน่วยแรงในตัวอย่างทดสอบ กอนกรีตที่ f'_{co} น้อย (18 MPa) ค่า f'_{pass} มากกว่าคอนกรีตที่ f'_{co} ปานกลางและสูง (25 และ32 MPa) (เช่น จาก 18.64 MPa เป็น 14.45 MPa ใน f'_{pass} ที่ความหนา 6.0 mm เมื่อคอนกรีตมี f'_{co} จาก 18 MPa เป็น 32 MPa) ดังแสดงในรูปที่ 4.25



กลุ่ม	ตัวอย่าง		ผลก	ารคำนวณต	ามแบบจำลอง	$f_{cc}' = f_{co}'$	$+k_{1}f_{1}$	
		$f_{_1}$	k _s	f_1'	$f'_{\max,conc}$	f_{co}'	f'_{pass}	f'_{act}
		(MPa)		(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
1	CR18-0-0	-	-	-	15.50	-	-	-
	CR25-0-0	-	-	-	21.79	-	-	-
	CR32-0-0	-	-	-	26.47	-	-	-
2	SR18-3.2-0	13.88	0.41	5.69	22.27	15.50	6.77	-
	SR25-3.2-0	13.88	0.41	5.69	27.76	21.79	5.97	-
	SR32-3.2-0	13.88	0.41	5.69	31.89	26.47	5.41	-
	SR18-4.5-0	19.57	0.44	8.61	27.65	15.50	12.15	-
	SR25-4.5-0	19.57	0.44	8.61	32.41	21.79	10.62	-
	SR32-4.5-0	19.57	0.44	8.61	35.72	26.47	9.25	-
	SR18-6.0-0	26.21	0.47	12.32	34.14	15.50	18.64	-
	SR25-6.0-0	26.21	0.47	12.32	37.36	21.79	15.57	-
	SR32-6.0-0	26.21	0.47	12.32	40.92	26.47	14.45	-
3	SR18-3.2-0.05 f' _{co}	13.88	0.41	5.69	24.59	15.50	6.77	2.32
	SR25-3.2-0.05 f' _{co}	13.88	0.41	5.69	29.31	21.79	5.97	1.55
	SR32-3.2-0.05 f' _{co}	13.88	0.41	5.69	33.24	26.47	5.41	1.35
	SR18-4.5-0.05 f'_{co}	19.57	0.44	8.61	31.57	15.50	12.15	3.92
	SR25-4.5-0.05 f' _{co}	19.57	0.44	8.61	35.01	21.79	10.62	2.60
	SR32-4.5-0.05 f'_{co}	19.57	0.44	8.61	38.14	26.47	9.25	2.41
	SR18-6.0-0.05 f'_{co}	26.21	0.47	12.32	40.54	15.50	18.64	6.40
	SR25-6.0-0.05 f' _{co}	26.21	0.47	12.32	43.10	21.79	15.57	5.74
	SR32-6.0-0.05 f' _{co}	26.21	0.47	12.32	44.87	26.47	14.45	3.96
4	SR18-3.2-0.1 <i>f</i> ' _{co}	13.88	0.41	5.69	26.08	15.50	6.77	3.82
	SR25-3.2-0.1 <i>f</i> ' _{co}	13.88	0.41	5.69	30.51	21.79	5.97	2.75
	SR32-3.2-0.1 <i>f</i> ' _{co}	13.88	0.41	5.69	34.20	26.47	5.41	2.31
	SR18-4.5-0.1 <i>f</i> ' _{co}	19.57	0.44	8.61	33.86	15.50	12.15	6.21
	SR25-4.5-0.1 <i>f</i> ' _{co}	19.57	0.44	8.61	37.19	21.79	10.62	4.78
	SR32-4.5-0.1 <i>f</i> ' _{co}	19.57	0.44	8.61	40.18	26.47	9.25	4.45
	SR18-6.0-0.1 <i>f</i> ' _{co}	26.21	0.47	12.32	43.35	15.50	18.64	9.22
	SR25-6.0-0.1 f' _{co}	26.21	0.47	12.32	46.08	21.79	15.57	8.72
	SR32-6.0-0.1 <i>f</i> ' _{co}	26.21	0.47	12.32	47.58	26.47	14.45	6.66

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบหน่วยแรงที่เกิดจาก Passive confinement และ Active confinement



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรงที่เกิดจาก

ผลของ Passive confinement



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและหน่วยแรงที่เกิดจาก ผลของ Passive confinement

เมื่อพิจารณาหน่วยแรงจากผล Active confinement ดังแสดงในรูปที่ 4.26 พบว่าค่าหน่วยแรงมีค่าสูงขึ้นตามความหนาปลอกเหล็กที่หนาขึ้น กราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงาย ซึ่งความหนาปลอกเหล็กที่ทำให้ f'_{act} มีค่าสูงสุดคือความหนา 6.0 mm (เช่น จาก 3.82 เป็น 9.22 MPa ใน f'_{act} ที่ $f'_{co} = 18$ MPa และค่าการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ 0.1 f'_{co} เมื่อปลอกเหล็กมีความหนา จาก 3.2 เป็น 6.0 mm) และที่ความหนาเท่ากันพบว่าค่า f'_{act} จะมีแนวโน้มสูงในตัวอย่างทดสอบ คอนกรีตที่มี f'_{co} น้อย (18 MPa) และจะมีค่าลดลงใน f'_{co} ปานกลางและสูง (25 และ 32 MPa) (เช่น จาก 9.22 เป็น 6.66 MPa ใน f'_{act} ที่ความหนา 6.0 mm และการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ 0.1 f'_{co} เมื่อกอนกรีตมี f'_{co} จาก 18 เป็น 32 MPa) ดังแสดงในรูปที่ 4.27

การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ค่าการอัดแรงต่างกัน พบว่าลักษณะกราฟ ในรูปที่ 4.28 มีรูปร่างแบบ โด้งหงายเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.26 โดยหน่วยแรงที่เกิดจากผลของ Active confinement นั้นจะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความหนาที่มากขึ้น และมีค่ามากขึ้นใน f'_{co} ที่ต่ำ (18 MPa) และค่าลดลงเมื่อกำลังปานกลาง (25 MPa) และสูง (32 MPa) ค่า f'_{act} ของตัวอย่างทดสอบที่ ให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ 0.05 f'_{co} ไปยัง 0.1 f'_{co} พบว่าค่าเพิ่มขึ้นในช่วงระหว่าง 43.95 - 84.70% และเมื่อพิจารณาถึงค่า f'_{act} ที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่เท่ากันพบว่าการเพิ่มขึ้นของค่า f'_{act} จาก ความหนา 3.2 ไปยัง 4.5 mm มีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 62.71 - 92.67% ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าที่เพิ่มขึ้นของ ปลอกเหล็กหนา 4.5 ไปยัง 6.0 mm มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 48.48 - 120.64%



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรงที่เกิดจาก ผลของ Active confinement



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและหน่วยแรงที่เกิดจาก ผลของ Active confinement



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรงที่เกิดจากผล ของ Active confinement

้โดยสรุปแล้ว พบว่าการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ค่าการอัดแรงต่างกัน

หน่วยแรงจากผล Passive confinement และ Active confinement มีแนวโน้มสูงขึ้นตามความหนา ที่มาก (6 mm) และมีมากใน f_{co}' ที่ต่ำ (18 MPa) ซึ่งพบมากที่การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ 0.1 f_{co}'

4.3.6.3 วิเคราะห์ด้านราคา

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างรากาก่าก่อสร้าง ต่อกำลังอัคที่เพิ่มขึ้นจากการให้หน่วยแรงโอบรัคก่อน สำหรับการคำเนินงานก่อสร้างตัวอย่าง ทดสอบคอนกรีต 1 ตัวอย่าง ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบตัวอย่างทดสอบคอนกรีตล้วน กับตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดก่อนภายใต้การให้แรงกดอัดในแนวแกนที่เท่ากัน ้โดยคำนึงรากาวัสดุในส่วนกลาง สำหรับการถอดแบบและคำนวณรากากลางจากกลุ่มดัชนึ ในการก่อสร้างสำนักงานคัชนีเศรษฐกิจการค้า ของกรมการค้าภายในซึ่งเป็นราคาซื้อขายค้วยเงินสค ณ.โรงงานหรือร้านก้าโดยไม่รวมค่าขนส่งและภาษีมูลค่าเพิ่ม (VAT.) ดังต่อไปนี้

1) ค่าวัสดุ

C

	 ปลอกเหล็กหนา 3.2 mm 	ราคา	276	บาทต่อ 1 ตัวอย่าง
1	 ปลอกเหล็กหนา 4.5 mm 	ราคา	388	บาทต่อ 1 ตัวอย่าง
	 ปลอกเหล็กหนา 6.0 mm 	ราคา	516	บาทต่อ 1 ตัวอย่าง
	คอนกรีต f' _{co} =18 MPa	ราคา	2470	บาท/ลบ.ม
37		เท่ากับ	18.53	บาท/ตัวอย่าง
	คอนกรีต f' _{co} =25 MPa	ราคา	2550	บาท/ลบ.ม
		เท่ากับ	19.13	บาท/ตัวอย่าง
	■ คอนกรีต <i>f</i> ′ _{co} =32 MPa	ราคา	2740	บาท/ลบ.ม
		เท่ากับ	20.55	บาท/ตัวอย่าง
2)	ค่าแรงงาน (เชื่อมปลอกเหล็ก-	+อัดแรง)	1	
		ราคา	250	บาทต่อ 1 ตัวอย่าง
3)	ค่าเครื่องมือ			
	 แบบปลอกเหล็ก 	ราคา	5000	บาท
	 ประแจปอนด์ 	ราคา	8000	บาท
	_ CV & I I &			

บ้อกซ์ประแจปอนด์ ราคา 510 บาท จากตารางที่ 4.11 พบว่าอัตราส่วนราคาต่อกำลังของตัวอย่างทคสอบ

ในตัวอย่างกลุ่มที่ 1 มีค่า 0.78 - 1.20 กลุ่มที่ 2 มีค่า 8.69 - 16.76 และกลุ่มที่ 3 มีค่า 13.48 - 23.60 และในกลุ่มที่ 4 มีค่า 12.61 - 22.94 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนราคาต่อกำลังที่เพิ่มขึ้น ความหนาของปลอกเหล็กเท่ากันพบว่าอัตราส่วนราคาต่อกำลังมีแนวโน้มเพิ่ม เมื่อตัวอย่างทดสอบ ทำด้วย f'_{co} ที่น้อยและมีแนวโน้มลดลงเมื่อ f'_{co} สูงขึ้น อีกทั้งยังพบว่ามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อค่า t สูงขึ้นพบมากสุดที่ความหนา 6.0 mm f'_{co} =18 MPa และค่าหน่วยแรงโอบรัดก่อน 0.05 f'_{co} ไป 0.1 f'_{co}) มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่สูงขึ้น แสดงว่าการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ที่มากขึ้นทำให้กำลังของตัวอย่างทดสอบสูงขึ้นและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการจะถูกลง



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

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างรากาก่อสร้างต่อกำลังที่สภาวะใช้งาน

้โดยสรุปแล้ว ความหนาที่สูงขึ้นเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ตัวอย่างทดสอบ ้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้นและลคลงเมื่อคอนกรีตที่ใช้มีกำลังสูง อีกทั้งผลการให้หน่วยแรงโอบรัคก่อน และสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงในช่วงของพฤติกรรมแบบเส้นตรงให้สูงขึ้นจากเดิม ้โดยเมื่อพิจารณาค่าความหนาของปลอกเหล็กและการให้หน่วยแรงโอบรัคก่อนที่เหมาะสม ในการศึกษานี้พบว่าความหนา 6.0 mm และหน่วยแรงโอบรัคก่อน 0.1 f_{ω}^{\prime} เป็นตัวแปรที่เหมาะสมใน การศึกษาต่อในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัคก่อนด้วยปลอกเหล็ก (Tubed RC column) ค่าคังกล่าวนั้นสามารถที่จะเพิ่มกำลังรับแรงกคอัคในช่วงของเส้นตรงได้สูงขึ้น ประมาณ 60 - 80% ของหน่วยแรงสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ นอกจากนั้นพฤติกรรมช่วงไร้เชิงเส้น ของตัวอย่างทคสอบที่มีการให้หน่วยแรงโอบรัคก่อน 0.1 f' เป็นแบบ Elastic - perfectly plastic ซึ่งทำให้ตัวอย่างทดสอบมีความเหนียวสูงขึ้นและสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้สูงก่อนการวิบัติ พฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นลักษณะนี้มีความปลอดภัยในการนำไปใช้งานอีกทั้ง พบว่าเมื่อมีการให้ หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่มากขึ้น (กำลังของตัวอย่างทดสอบมีค่าสูงขึ้น) ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการจะ มีแนวโน้มน้อยลงและเมื่อพิจารณารูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทคสอบที่ความหนา 6.0 mm พบว่า เกิดการโป่งออกทางด้านข้างมีค่าไม่สูงมากนัก เมื่อเปรียบเทียบความหนาที่ 3.2 และ 4.5 mm เนื่องจากปลอกเหล็กขนาด 6.0 mm มีความแกร่งเพียงพอในการต้านทานและจำกัดแกนคอนกรีต พร้อมทั้งผ่านทั้งสองมาตรฐานการออกแบบความหนาต่ำสุดของเสาเชิงประกอบคือ AISC/LRFD และ ว.ส.ท. ^{จัก}ยาลัยเทคโนโลยี^{สร}

4.4 ผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก (Tubed RC column) ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนและวิจารณ์ผล

จากผลการทดสอบตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อน ด้วยปลอกเหล็ก (Tubed concrete specimens) ในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าการโอบรัดด้วยปลอกเหล็ก หนา 6.0 mm และมีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ 0.1 f'_{o} นั้นช่วยเพิ่มกำลังรับแรงกดอัดให้สูงขึ้น และมีพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นที่เหมาะสมและปลอดภัยในการนำไปใช้งานพร้อมทั้งสามารถ เปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงก่อนวิบัติโดยความหนาปลอกเหล็กและหน่วยแรงโอบรัดก่อนดังกล่าว นั้นมีความเหมาะสมในการนำไปพัฒนาเสากอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก (Tubed RC column) และในหัวข้อนี้จะนำเสนอพฤติกรรมการรับแรงกอัดในแนวแกนและลักษณะ การวิบัติของตัวอย่างทดสอบเสากอนกรีตเสริมเหล็กมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 150 x 150 mm สูง 750 mm ปลอกเหล็กหนา 6.0 mm การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ 0.1 f'_{o} โดยมีตัวแปรที่ต่างกัน ก็อกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ 18 25 และ 32 MPa

4.4.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของ Tubed RC column

รูปที่ 4.29 - 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกน (Axial load) และการหดตัวในแนวแกน (Axial shortening) ของ Tubed RC column โดยการจัดกลุ่มตามก่า f'co ของกอนกรีตและจำกัดการแสดงผลที่ก่าการหดตัวที่ 20 mm หรือเทียบเท่าก่ากวามเครียด (Strain) ในกอนกรีตที่ 0.0267 mm/mm ซึ่งเป็นก่าความเครียด (Strain) ที่สูงกว่า Ultimate compressive strain ของกอนกรีตประมาณ 10 เท่า โดยกราฟกวามสัมพันธ์ดังกล่าวที่แสดงผลการทดสอบจนถึงจุดวิบัดิ นำเสนอไว้ในภากผนวก ก เพื่อให้เห็นภาพรวมของพฤติกรรมการรับแรงของ Tubed RC column โดยในการศึกษานี้ได้นิยามให้ก่าแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดเกิดจากการลากเส้นขนานกับความชัน ของกราฟที่ก่าการหดตัว 1.5 mm หรือเทียบได้กับก่าความเกรียด 0.002 mm/mm ตัดกับเส้นกราฟ ของ Tubed RC column เป็น "ก่ากำลังรับแรงสูงสุดใช้งาน" หรือ *P*'mx ของเสา

จากกราฟในภาคผนวก ก จะเห็นได้ว่าในภาพรวม Tubed RC column มีพฤติกรรม การรับแรงกดอัดในแนวแกนคล้ายคลึงกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีต โดยแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง โดย ในช่วงแรกนั้นจะมีความชันที่สูงกว่าในช่วงที่สอง โดยกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดของเสา ซึ่งจะเกิดขึ้นที่จุดที่เสาเกิดการวิบัติและเสามีการหดตัวในแนวแกนที่สูงมากกว่า 100 mm (หรือมีความเครียดที่จุดวิบัติมากกว่า 0.133 mm/mm ซึ่งสูงกว่าในกรณีของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก และตัวอย่างทดสอบคอนกรีตล้วน) ดังนั้น Tubed RC column เป็นเสาที่มีความเหนียวในแนวแกน (Axial ductility) ที่สูงมาก จากรูปในช่วงแรกความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวของเสาคอนกรีต เสริมเหล็กอ้างอิงและ Tubed RC column มีลักษณะใกล้เคียงกันโดยพฤติกรรมเป็นแบบเชิงเส้นตรง (Linear) จนถึงจุดที่เสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงมีค่าแรงกดอัดสูงสุด (เหล็กเสริมมีความเครียด ถึงจุดคราก) อยู่ช่วงประมาณ 60 - 80% ของแรงกดอัดสูงสุดช่วงที่พิจารณา Tubed RC column (ซึ่งมีค่าสูงกว่าตัวอย่างทดสอบคอนกรีตเล็กน้อยเนื่องจากมีเหล็กเสริมช่วยรับแรงกดอัด) จากนั้น ในช่วงที่สอง เมื่อแรงกดอัดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกอย่างต่อเนื่องนั้น เหล็กเสริมจะเกิดการครากและใน แกนคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นอย่างต่อเนื่องนั้นเป็นผลทำให้ แกนคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นอย่างต่อเนื่องนั้นเป็นผลทำให้ แกนคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นอย่างต่อเนื่องนั้นเป็นผลทำให้ แกนคอนกรีตเสริมเหลีกขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้นเนื่องมาจาก Poisson's effect ดังนั้นกวามชัน (Slope) ของเส้นความสัมพันธ์เริ่มลดลงและพฤติกรรมค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นตรง มากขึ้น ในขณะเดียวกันนั้นเมื่อแกนคอนกรีตเสริมเหลีกเริ่มมีการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้นนั้น และก่อให้เกิดแรงดันทางด้านขวางกระทำต่อผนังของปลอกเหล็กมากขึ้น พฤติกรรมการรับแรงของ Tubed RC column ถูกแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ ดังนี้ (เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.29 - 4.31 และในภาคผนวก ก ประกอบ)

แบบที่ 1 เสารองรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงก่าหนึ่งแล้ว เสามีความแกร่งประมาณ ศูนย์หรือพฤติกรรมแบบ Elastic - perfectly plastic ซึ่งเกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบเสา SRC32 - 6.0 เป็นเสาทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงโดยกรณีนี้เมื่อแรงกดอัดในแนวแกนมีค่าถึง P_{max} ทำให้เหล็กเสริม และกอนกรีตบริเวณที่แรงกดอัดกระทำเกิดการครากและเกิดแตกร้าวโดยแกนคอนกรีตเสริมเหล็ก เกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้ว ผนังของปลอกเหล็กจะทำการต้านทานต่อการขยายตัว ทางด้านข้างของแถนคอนกรีตได้อย่างเพียงพอ จากนั้นเมื่อแถนคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการแตกร้าว มากขึ้นและผนังปลอกเหล็กจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่และปลอกเหล็กจะทำหน้าที่จำกัดแกน คอนกรีตดังกล่าวโดยสามารถรับแรงกดอัดที่คงที่ได้อย่างต่อเนื่องจนถึงจุดหนึ่ง จากนั้นปลอกเหล็ก จะเกิดพฤติกรรม Strain hardening ทำให้ปลอกเหล็กกลับมามีความสามารถในการจำกัด (Contain) แกนคอนกรีตที่แตกร้าวได้อีกครั้งหนึ่งซึ่งในบางกรณีกระบวนการจำกัดแถนคอนกรีตอาจเกิดขึ้นได้ หลายครั้งเป็นผลทำให้เสามีก่าแรงสูงสุดเกิดขึ้นได้หลายครั้งก่อนถึงจุดวิบัติของเสา โดยแรงกดอัด เพิ่มขึ้นและลดลงหลังจากโก่งเดาะเฉพาะที่ผนังของปลอกเหล็กถูกรองรับโดยกำลังรับแรงกดอัด ในแนวแถนของปลอกเหล็ก ดังจะเห็นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแถนและ ค่าความเกรียดในแนวแกนของเสาดังที่แสดงในภากผนวก ก แบบที่ 2 เสารองรับแรงกระทำได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือ Strain hardening ซึ่ง เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบเสา SRC18 - 6.0 และ SRC25 - 6.0 เป็นเสาที่ทำด้วยคอนกรีตกำลังค่ำ และปานกลางในกรณีนี้เมื่อแรงกดอัดทำให้เหล็กเสริมและแกนคอนกรีตบริเวณที่แรงกดอัดกระทำจึ เกิดการแตกร้าวเป็นผลทำให้แกนคอนกรีตเสริมเหล็กขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้วผนังของ ปลอกเหล็กจะสามารถต้านทานต่อแรงคันทางด้านข้างได้เป็นอย่างดีแล้วและปลอกเหล็กทำหน้าที่ จำกัด (Contain) แกนคอนกรีตเสริมเหล็กที่แตกร้าวให้รับแรงกดอัดเพิ่มได้ต่อเนื่องแรงกดอัดในแกน คอนกรีตที่เพิ่มขึ้นหลังจากที่ผนังของปลอกเหล็กมีการ โก่งเดาะเฉพาะที่เกิดขึ้นจะถูกถ่ายเทไปยัง ปลอกเหล็กในบริเวณกึ่งกลางกวามสูงของเสา โดยอาศัยแรงเสียดทานระหว่างผิวของแกนคอนกรีต และผิวด้านในของปลอกเหล็ก ดังจะเห็นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกน และค่ากวามเกรียดในแนวแกนที่จุดกึ่งกลางของความสูงของเสานั้น ซึ่งก่าความเกรียดในแนวแกนที่ จุดกึ่งกลางความสูงของเสาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องนั้นหลังจากที่แรงกระทำมีก่ามากกว่า *P*_{max}

ขอให้สังเกตด้วยว่าการที่ Tubed RC column มีเหล็กเสริมในแนวแกนของเสา ทำให้เสามีกำลังและความแกร่งสูงขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีต อย่างไรก็ตามพบว่า พฤติกรรมในช่วงที่สองของ Tubed RC column มีพฤติกรรมคล้ายกับด้วอย่างทดสอบคอนกรีต ในเสาที่ทำด้วยคอนกรีตกำลังสูงและมีพฤติกรรมที่ต่างไปในเสาที่ทำด้วยคอนกรีตกำลังต่ำ และปานกลางอาจเนื่องจากเหตุผลข้างต้นที่กล่าวไปแล้ว



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกน ของเสา Tubed RC column ที่มี $f_{co}' = 18~\mathrm{MPa}$



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกน ของเสา Tubed RC column ที่มี f'_co = 32 MPa

Axial Shortening, (mm)

+ CRC32-0-1

CRC32-0-2 SRC32-6.0-0-1

+ SRC32-6.0-0.1

-2
4.4.2 ลักษณะการวิบัติของ Tubed RC column4.4.2.1 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง

จากผลการทดสอบ พบว่าการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง มีลักษณะการวิบัติที่ค่อยเป็นค่อยไปมากกว่าตัวอย่างคอนกรีตอ้างอิง แต่ยังคงเป็นลักษณะการวิบัติ ที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อได้ทำการเทียบกับลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต และ Tubed RC column โดยเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงถึงจุดรับแรงกดอัดสูงสุดที่ก่าการหดตัว ในช่วง 2.2 ถึง 3.0 mm การวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงเกิดจากการกรากเหล็กเสริมหลัก ในน่วง 2.2 ถึง 3.0 mm การวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงเกิดจากการกรากเหล็กเสริมหลัก ในแนวแถนและการแตกร้าว (Crushing) ของกอนกรีต ซึ่งเมื่อกอนกรีตกะเทาะออกแล้วเหล็กปลอก จะไม่มีคอนกรีตยึดรั้งได้เพียงพอทำให้เกิดการอ้าออกของเหล็กปลอก ส่งผลให้เกิดการ โก่งเดาะ (Buckling) ของเหล็กเสริมหลัก เนื่องจากการสูญเสียการยึดรั้งตรงตำแหน่งเหล็กปลอกที่อ้าออก ดังแสดงในรูปที่ 4.32 จากนั้นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะสูญเสียกำลังและเกิดการวิบัติอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.32 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง

4.4.2.2 Tubed RC column

การวิบัติของ Tubed RC column ทุกค้นมีลักษณะการวิบัติแบบค่อยเป็น ก่อยไป (Progressive failure) เช่นเดียวกับในกรณีของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต โดยเสาทั้งหมด เกิดการวิบัติที่ค่าการหดตัวเกินกว่า 100 mm ซึ่งแสดงว่า Tubed RC column เป็นเสาที่มีความเหนียว ที่สูงกว่าตัวอย่างทดสอบคอนกรีต โดยที่ลักษณะการวิบัติเกิดขึ้นโดยเริ่มจากการครากของเหล็ก ตามด้วยการแตกร้าว (Crushing) ของคอนกรีต เช่นเดียวกับในกรณีของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก จากนั้นผนังของปลอกเหล็กจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ (Local tube wall buckling) ดังแสดงในรูป ที่ 4.33 โดยยังคงสามารถรับแรงกดอัดในแนวแกนได้เพิ่มขึ้นและค่าการหดตัวในแนวแกนที่สูงมาก แสดงว่า Tubed RC column มีความเหนียวในแนวแกนที่สูง



รูปที่ 4.33 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเสา Tubed RC column

โดยสรุปแล้วจากผลการทดสอบ พบว่าเสา Tubed RC column ที่ใช้ใน การศึกษาจะเกิดการวิบัติเฉพาะที่ อันเนื่องมาจากปลอกเหล็กมีความหนาไม่เพียงพอในการป้องกัน การโก่งเดาะเฉพาะที่ ดังนั้นวิธีการที่ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของ Tubed RC column ที่อัตราส่วน *B/t* ตามที่ศึกษาคือการป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติเฉพาะที่ดังกล่าว โดยเสริมความหนา ของปลอกเหล็กในบริเวณดังกล่าวให้มีค่าความแกร่งต่อการดัดที่เพียงพอและทำให้การถ่ายแรง จากแกนคอนกรีตเสริมเหล็กเข้าสู่ปลอกเหล็กได้มากขึ้นอีกด้วย

4.4.3 การถ่ายแรงในเสา Tubed RC column

รูปที่ 4.34 แสดงตัวอย่างกวามสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกน (Axial load) ที่กระทำต่อแกนคอนกรีตเสริมเหล็กและค่าความเกรียดในแนวแกน (ค่าเป็นลบ) และในแนวขวาง (ก่าเป็นลบ) ที่วัดได้จาก Strain gage จุดกึ่งกลางกวามสูงของปลอกเหล็กของเสา Tubed RC column ในตัวอย่าง SRC18 - 6.0 จากรูปเห็นได้ว่า Tubed RC column มีลักษณะพฤติกรรมถ่ายแรงในเสา เช่นเดียวกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีต โดยแรงกดอัดในแนวแกนกระทำต่อแกนคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ปลายเสาบางส่วนถูกถ่ายมายังปลอกเหล็ก โดยทำให้เกิดกวามเกรียดในแนวแกนของปลอกเหล็ก อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเสาเกิดการวิบัติ



รูปที่ 4.34 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเกรียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของเสา SRC18 - 6.0

ในลักษณะเช่นเดียวกับในตัวอย่างทดสอบคอนกรีต การถ่ายแรงดังกล่าวเกิดจาก Interaction ระหว่างแกนคอนกรีตเสริมเหล็กและปลอกเหล็กนั้นโดยอาศัย Micro - interlocking และความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของผิวด้านในของปลอกเหล็กและผิวของแกนคอนกรีต ในช่วงแรกความสัมพันธ์ดังกล่าวมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงจนกระทั่งแรงกดอัดมีค่าอยู่ในช่วง ประมาณ 50 - 60% ของแรงกดอัดสูงสุดแรก P'max แสดงว่าการถ่ายแรงจากแกนคอนกรีตเสริมเหล็ก ใปยังปลอกเหล็กมีค่าที่ก่อนข้างสมบูรณ์ ในช่วงที่สองกวามสัมพันธ์ดังกล่าวมีแนวโน้มของความชัน ที่ลดลงอย่างต่อเนื่องแสดงให้เห็นว่าแรงกดอัดต่อแกนคอนกรีตเสริมเหล็กใด้ถูกถ่ายมายังปลอก เหล็กในอัตราที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงกระทำ ซึ่งกล่าวเป็นนัยว่าปลอกเหล็ก ช่วยรับแรงกดอัดเพิ่มขึ้นกว่าที่แกนคอนกรีตเสริมเหล็กรับ อย่างไรก็ตามการถ่ายแรงในเสา Tubed RC column ซึ่งเกิดขึ้นได้มากกว่าการถ่ายแรงที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบคอนกรีตดังจะเห็น จากที่ก่าความเครียดที่เกิดขึ้นในปลอกเหล็กในหลายกรณีมีค่าถึงค่าความเครียดที่จุดครากของเหล็ก (มีค่ามากว่า 0.002 mm/mm) โดยสาเหตุหลักมาจาก Tubed RC column มีแกนคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีกำลังรับแรงกดอัดสูงกว่าแถนคอนกรีตของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต ดังนั้นหลังจากที่คอนกรีต ที่ปลายเสานั้นเกิดการแตกร้าว (Crushing) ของคอนกรีตและเหล็กเสริมเกิดการกรากเฉพาะที่ ที่บริเวณปลายเสาและปลอกเหล็กเกิดการโก่งตัวเฉพาะที่แล้วนั้นแรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อ Tubed RC column จะเกิดการกระจายลงสู่บริเวณกึ่งกลางเสามากขึ้นเป็นผลให้ปลอกเหล็กของ Tubed RC column รับแรงกดอัดสูงขึ้นและมีก่าความเครียดสูงดังกล่าว

4.4.4 กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของ Tubed RC column และค่าความเครียดสูงสุด

จากการทดสอบ ตารางที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุด และค่าความเครียดที่เกิดขึ้นของ Tubed RC column จากแถวที่ 4 ของตารางพบว่า เมื่อพิจารณา กอนกรีตมีค่า f_c' เท่ากันแล้ว Tubed RC column เสากลุ่มที่ 2 (ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน) มีอัตราส่วน P'_{max} ต่อแรงกดอัดสูงสุดของเสากอนกรีตอ้างอิง (P_c) อยู่ในช่วง 1.59 - 1.72 ซึ่งต่ำกว่า เสากลุ่มที่ 3 (มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ 0.1 f'_c) มีก่าอยู่ในช่วง 1.71 - 2.06 นอกจากนั้นแล้ว ยังพบว่าอัตราส่วน P'_{max} / P_c มีแนวโน้มลดลงเมื่อกอนกรีตมีก่า f'_c สูงขึ้น

พิจารณาอัตราส่วน $\varepsilon_{max} / \varepsilon_{u,RC}$ แถวที่ 6 พบว่ามีค่าสู่งกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก อ้างอิงอยู่ในช่วง 1.80 - 2.04 เท่า โดยขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการรับแรงของ Tubed RC column มีพฤติกรรมแบบ Strain hardening มีค่าสูงในช่วง 1.80 - 2.04 เท่าและแบบ Elastic - perfectly plastic มีค่า $\varepsilon_{max} / \varepsilon_{u,RC}$ ที่สูงในช่วง 1.92 - 2.04 เท่า ดังนั้นในการใช้งานจริงพฤติกรรม Tubed RC column ทั้ง 2 แบบเป็นพฤติกรรมที่ควรออกแบบให้เกิดขึ้น โดยพฤติกรรมแบบ Elastic - perfectly plastic จะเป็นพฤติกรรมที่เหมาะสมที่สุดเช่นเดียวกับในกรณีตัวอย่างทดสอบคอนกรีตโดยปลอกเหล็กควร มีความหนาที่เพียงพอตลอดจนมีรอยเชื่อมต่อของผนังที่สมบูรณ์ที่จะช่วยทำให้ปลอกเหล็กรองรับ กวามดันเนื่องจากการขยายตัวของคอนกรีตได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนถึงจดวิบัติ

โดยสรุปแล้ว เมื่อปลอกเหล็กที่ใช้มีความหนาเท่ากันแล้วอัตราส่วนกำลังของ Tubed RC column ลดลง เมื่อเสามี f' สูงขึ้น อีกทั้งการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนมีผลให้กำลังของ Tubed RC column สูงขึ้นและทำให้ความสามารถในการรับแรงในช่วงพฤติกรรมแบบเส้นตรง สูงขึ้นจากเดิมซึ่งพฤติกรรมของเสาทั้งแบบ Strain hardening และ Elastic - perfectly plastic เป็นพฤติกรรมที่เหมาะสมในการใช้งานเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนเกิดการวิบัติ

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

ตารางที่ 4.12 กำลังแรงกดอัดสูงสุดและค่าความเครียดสูงสุดที่เกิดขึ้นใน Tubed RC column

4.4.5 การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC column กับสมการของเสาเชิงประกอบ

ในหัวข้อนี้กำลังรับแรงกดอัดสูงสุด (*P*'_{max}) ของ Tubed RC column จะถูกนำมา เปรียบเทียบกับกำลังของเสาคังกล่าวที่ได้จากสมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ACI Committee 318 และสมการกำลังของเสาเชิงประกอบของ AISC/LRFD

4.4.5.1 การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC column กับสมการออกแบบเสา คอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ACI Committee 318

ตารางที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงกดอัดในแนวแกน สูงสุด P'_{max} ที่ทดสอบได้กับค่าที่คำนวณได้จากสมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตาม มาตรฐาน ACI Committee 318 (ซึ่งสมการของ ว.ส.ท. 1008 - 38 ใช้สมการเดียวกันกับสมการ ออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กของ ACI Committee 318) ดังแสดงในสมการที่ 2.2 โดยนิยาม ให้ P¹_{ACI} เป็นค่ากำลังรับแรงกดอัดที่รวมกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็กเข้ากับสมการที่ 2.2 และ P²_{ACI} เป็นค่ากำลังรับแรงกดอัดที่ไม่รวมกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็กเข้ากับสมการที่ 2.2

จากตารางพบว่าค่า P'_{\max} / P^1_{ACI} ของ Tubed RC column ทั้งหมดนั้นมีค่า ในช่วง 0.46 - 0.62 ซึ่งน้อยกว่า 1.0 เป็นอย่างมาก ดังนั้นการรวมกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็ก เข้ากับสมการที่ 2.2 แล้วจะทำให้สมการการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐานของ ACI Committee 318 ทำให้ทำนายกำลังของ Tubed RC column มีค่าค่อนข้างสูงกว่าที่ควรจะเป็น (Overestimate) ซึ่งไม่ปลอดภัยมากนักในการใช้งานเป็นอย่างมาก แต่เมื่อพิจารณาก่า P'_{max} / P^2_{EIT} ของ Tubed RC column พบว่ามีค่าในช่วง 1.65 - 2.17 จะเห็นได้ว่าการไม่รวมกำลังรับแรงกคอัคของ ปลอกเหล็กเข้ากับสมการที่ 2.2 จะทำให้สมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ACI Committee 318 ในการทำนายกำลังของ Tubed RC column มีค่าค่อนข้างต่ำกว่าที่ควรจะเป็น (Underestimate) ซึ่งมีความปลอดภัยในการใช้งานแต่อาจไม่ประหยัดนัก ดังนั้นเมื่อพิจารณา มาตรฐาน ว.ส.ท. 1008 - 38 ตามข้อกำหนดที่ 4314 ที่ให้ทำการคำนวณหากำลังของเสาเชิงประกอบ โดยใช้เงื่อนไขเช่นเดียวกับองค์อาการคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทั่วไปนั้นและให้กำลังในการรับแรง ตามแนวแกนใด ๆ กำหนดให้รับโดยกอนกรีตของเสาต้องถ่ายผ่านเข้าไป ในกอนกรีตโดยองก์ อาการหรือแป้นหูช้างในลักษณะแบกทานโดยตรงลงบนกอนกรีตของเสานั้น (ซึ่งเมื่อพิจารณา ฐปแบบของเสาในการวิจัยนี้ กำลังของเสากำหนดให้ใช้คือ กำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง) แล้วพบว่าข้อกำหนดอาจก่อให้เกิดกวามไม่ปลอดภัยต่อการออกแบบเสาเชิงประกอบเป็นอย่างมาก ในด้านหนึ่งและอาจจะมีความปลอดภัยสูงอีกด้านหนึ่ง แต่ไม่มีประสิทธิภาพในการใช้งานนัก ดังนั้นข้อกำหนดดังกล่าวควรพิจารณาปรับแก้ให้เหมาะสมกับข้อมูลที่ทดสอบได้ ซึ่งจะกล่าวถึง ต่อไปในช่วงท้ายของหัวข้อนี้ 🤇 อาลัยเกลโนโล

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

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P'_max และค่ากำลังรับแรงตามมาตรฐาน ACI 318

4.4.5.2 การเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC column กับสมการกำลังของ เสาเชิงประกอบของ AISC/LRFD

ตารางที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างก่าแรงกดอัดในแนวแกน สูงสุดก่าแรก P'_{max} ที่ทดสอบได้กับก่าที่กำนวณได้จากสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC/LRFD (สมการที่ 2.15) โดยในการกำนวณได้พิจารณาเฉพาะพื้นที่ของปลอกเหล็กเท่านั้น โดยไม่พิจารณาพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมกอนกรีต จากตารางพบว่าอัตราส่วน P'_{max} / P_{AISC} ของ Tubed RC column ทั้งหมดมีก่าอยู่ในช่วง 1.04 - 1.52 ซึ่งมากกว่า 1.0 ทำให้การทำนายกำลังของ Tubed RC column จากสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ AISC/LRFD มีก่าก่อนข้างต่ำกว่า ที่กวรจะเป็น (Underestimate) ซึ่งมีกวามปลอดภัยในการใช้งาน แต่อาจไม่ประหยัดมากนัก ซึ่งเหมือนกับในกรณีการพิจารณาก่า P'_{max} / P²_{ACC} ที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

กลุ่มที่	ตัวอย่าง	$P'_{\rm max}$ (kN)	P_{AISC} (kN)	$P'_{\rm max}$ / P_{AISC}
1	CRC18-0-0	431.0	-	-
	CRC25-0-0	581.0	-	-
	CRC32-0-0	678.0	192	-
2	SRC18-6.0-0	743.0	713.7	1.04
	SRC25-6.0-0	953.2	740.3	1.29
	SRC32-6.0-0	1075.5	764.7	1.41
3	SRC18-6.0-0.1 <i>f</i> ′ _{co}	887.5	713.7	1.24
	SRC25-6.0-0.1 <i>f</i> ′ _{co}	1059.0	740.3	1.43
	SRC32-6.0-0.1 f' _{co}	1158.5	764.7	1.52

ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P'_max และค่ากำลังรับแรงตามมาตรฐาน AISC/LRFD

โดยสรุปแล้ว จากข้อมูลการเปรียบเทียบกำลังของ Tubed RC column กับสมการต่าง ๆ ข้างต้นพบว่าสมการที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการออกแบบ Tubed RC column คือสมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ACI Committee 318 หรือ ว.ส.ท.1008-38 ในกรณีที่ค่ากำลังรับแรงกดอัดที่นำมาพิจารณาได้รวมกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็ก (*P*¹_{ACI}) เข้ากับสมการที่ 2.2 ตารางที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงกดอัดในแนวแกน สูงสุด P'_{max} ที่ทดสอบได้กับค่าที่คำนวณได้จากสมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตาม มาตรฐาน ACI Committee 318 (ซึ่งสมการของ ว.ส.ท.1008 - 38 ใช้สมการเดียวกันกับสมการ ออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กของ ACI Committee 318) ดังแสดงในสมการที่ 2.2 ซึ่งสมการ ที่เหมาะสมที่สุดที่ควรนำมาใช้ในการออกแบบ Tubed RC column คือสมการออกแบบเสาคอนกรีต เสริมเหล็กตามมาตรฐาน ACI Committee 318 ในกรณีที่ค่ากำลังรับแรงกดอัดพิจารณารวมกำลัง รับแรงกดอัดของปลอกเหล็ก (P¹_{ACI}) เข้ากับสมการที่ 2.2 ดังแสดงในสมการที่ 4.11

$$P_{ACI}^{1} = 0.85 f_{co}'(A_{g} - A_{s}) + A_{s} f_{y}^{s} + A_{s}^{tube} f_{y}^{tube}$$
(4.11)

- โดยที่ P^1_{ACI} คือ กำลังรับแรงกดอัดที่รวมกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็ก เข้ากับสมการของ ACI Committee 318
 - A ู คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของ Tubed RC column
 - A. คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนคอนกรีต
 - A, คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมหลัก
 - A^{tube} คือ พื้นที่หน้าตัดของปลอกเหล็ก
 - f'_co คือ กำลังรับแรงกดอัคสูงสุดของกอนกรีตที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C469
 - f^s คือ กำลังรับแรงคึงที่จุดครากของเหล็กเสริมหลัก
 - f^{tube} คือ กำลังรับแรงคึงที่จุดครากของปลอกเหล็ก

ตารางที่ 4.15 การเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P'_max กับค่ากำลังรับแรงตามมาตรฐาน ACI 318

กลุ่มที่	ตัวอย่าง	$P'_{\rm max}$	P_{ACI}^1	$P_{\rm max}^\prime / P_{\rm ACI}^1$	$P_{ m max}^{tube}$	$P_{\max}^{tube} / A_s^{tube} f_y^{tube}$
		(kN)	(kN)		(kN)	
1	CRC18-0-0	431.0	408.9	1.05	-	-
	CRC25-0-0	581.0	538.4	1.08	-	-
	CRC32-0-0	678.0	652.9	1.04	-	-
2	SRC18-6.0-0	743.0	1627.5	0.46	312.0	0.30
	SRC25-6.0-0	953.2	1757.0	0.54	372.2	0.31
	SRC32-6.0-0	1075.5	1871.5	0.57	397.5	0.33
3	SRC18-6.0-0.1 f'_{co}	887.5	1627.5	0.55	456.5	0.37
	SRC25-6.0-0.1 f' _{co}	1059.0	1757.0	0.60	478.0	0.39
	SRC32-6.0-0.1 f' _{co}	1158.5	1871.5	0.62	480.5	0.39

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P'_{max} กับค่ากำลังรับแรงตามมาตรฐาน ACI Committee 318 ซึ่งสมการดังกล่าวทำให้มีอัตราส่วนของกำลังรับแรงกดอัดกับค่าที่ทำนาย (P'_{max} / P¹_{ACI}) ดังแสดงในตารางที่ 4.15 ค่าอยู่ในช่วง 0.46 - 0.62 ค่าดังกล่าวต่ำกว่า 1.0 เป็นอย่างมาก จะเห็น ได้ว่าการรวมกำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็กเข้ากับสมการที่ 2.2 นั้นทำให้สมการ การออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน ACI Committee 318 นั้นสามารถทำนายกำลัง ของ Tubed RC column มีก่าค่อนข้างสูงกว่าผลการทดสอบที่ได้มาก (Overestimate) ซึ่งไม่ปลอดภัย ในการใช้งาน ดังนั้นในการใช้งานสมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ACI Committee 318 จึงควรพิจารณาปรับให้เหมาะสมกับข้อมูลที่ทดสอบได้

พิจารณาสมการออกแบบเสาเชิงประกอบ ACI Committee 318 ข้อมูล ที่ทดสอบได้เพื่อนำไปใช้งานให้เหมาะสม เมื่อพิจารณาในสมการที่ 4.11 เป็นการรวมผลของ การรับแรงกดอัดของกอนกรีตเสริมเหล็ก เหล็กเสริมกอนกรีตและปลอกเหล็กเข้าไว้ด้วยกันแล้ว ดังนั้นเพื่อนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสมจึงต้องพิจารณาค่ากำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็ก (P_{\max}^{ube}) ข้อมูลตารางที่ 4.15 และแถวที่ 6 ในการหาค่ากำลังรับแรงกดอัดของปลอกเหล็ก (P_{\max}^{ube}) ข้อมูลตารางที่ 4.15 และแถวที่ 6 ในการหาค่ากำลังรับแรงกดอัดก่องของปลอกเหล็ก (P_{\max}^{ube}) โดยแขกออกจากกำลังรับแรงกดอัด Tubed RC column (P_{\max}^{\prime}) จากนั้นเมื่อนำค่ากำลังรับแรงกดอัด ของปลอกเหล็ก (P_{\max}^{ube}) ได้มาเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงกดอัดที่จุดกรากปลอกเหล็ก ($A_s^{ube} f_s^{ube}$) โดยพบว่ามีก่าอัตราส่วนอยู่ในช่วงระหว่าง 0.30 - 0.39 ซึ่งพบว่าตัวดูณลดกำลังของปลอกเหล็ก ที่เหมาะสมนำมาพิจารณาค่าน้อยสุดคือ 0.30 ดังนั้นในการใช้งานสมการออกแบบเสาเชิงประกอบ ของ ACI Committee 318 กวรพิจารณาปรับให้อยู่ในรูป ดังแสดงในสมการที่ 4.12

$$P_{ACI}^{Modified} = 0.85 f_{co}'(A_g - A_s) + A_s f_y^s + 0.30 A_s^{tube} f_y^{tube}$$
(4.12)

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

- A, คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของ Tubed RC column
- A. คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนคอนกรีต
- A, คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมหลัก
- A^{tube} คือ พื้นที่หน้าตัดของปลอกเหล็ก
- f_{co} คือ กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของกอนกรีตที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C469
- *f*^s คือ กำลังรับแรงคึงที่งุดครากของเหล็กเสริมหลัก
- f^{tube} คือ กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของปลอกเหล็ก

จากสมการในการทำนายกำลังรับแรงกดอัดของ Tubed RC column ที่นำเสนอดังแสดงในสมการที่ 4.12 เมื่อนำค่า P'_{max} ที่ได้จากผลการทดสอบนำมาลองคำนวณ เปรียบเทียบระหว่างค่าแรง P'_{max} และค่าแรง P^{Modified} ดังแสดงในตารางที่ 4.16 จะเห็นได้ว่า ค่า P'_{max} / P^{Modified} ที่ได้อยู่ในช่วง 1.02 - 1.24 โดยที่อัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามากกว่า 1 จะเห็นได้ว่า สมการดังกล่าวทำนายกำลัง Tubed RC column มีค่าที่ต่ำกว่าผลการทดสอบที่ได้ (Underestimate) ซึ่งมีความปลอดภัยในการใช้งานและสามารถทำนายค่ากำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาได้ อย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตามการใช้สมการข้างต้นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ต้องอยู่ในขอบเขต ของการวิจัยนี้และใช้วิจารณญาณในการนำไปใช้งานเป็นหลัก

กลุ่มที่	ตัวอย่าง	$P'_{\rm max}$ (kN)	$P_{ACI}^{Modified}$ (kN)	P_{\max}' / $P_{ACI}^{Modified}$
1	CRC18-0-0	431.0	-	-
	CRC25-0-0	581.0	-	-
	CRC32-0-0	678.0	-	-
2	SRC18-6.0-0	743.02	725.7	1.02
	SRC25-6.0-0	953.17	855.2	1.11
	SRC32-6.0-0	1075.50	969.8	1.11
3	SRC18-6.0-0.1 f'_{co}	887.50 8 A	725.7	1.22
	SRC25-6.0-0.1 f'_{co}	1059.00	855.2	1.24
	SRC32-6.0-0.1 f'_{co}	1158.50	969.8	1.19

ตารางที่ 4.16 การเปรียบเทียบระหว่างก่าแรง P_{\max}' และก่าแรง $P_{ACI}^{Modified}$

บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบการให้หน่วยแรงโอบรัคก่อนแก่ด้วอย่างทคสอบ กอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้แบบปลอกเหล็ก เพื่อศึกษาผลการให้หน่วยแรง โอบรัคก่อนที่มีต่อกำลังและความเหนียวของกอนกรีตภายใต้แรงกคอัคในแนวแกนข้อมูลความหนา ปลอกเหล็กและหน่วยแรงโอบรัคก่อนที่เหมาะสมที่ได้ในเบื้องต้นถูกนำไปใช้ในการศึกษา ถึงผลของพฤติกรรมการรับแรงกคอัคในแนวแกนและลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ถูกโอบรัคก่อนด้วยปลอกเหล็ก (Tubed RC column) อีกทั้งได้นำเสนอสมการที่มีความเหมาะสม ในการวิเกราะห์กำลังของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัคก่อนด้วยปลอกเหล็กภายใต้แรงกคอัค ในแนวแกน โดยตัวอย่างทคสอบที่ใช้ในการศึกษาเป็นตัวอย่างกอนกรีตอ้างอิงและเสาคอนกรีต เสริมเหล็กอ้างอิงที่ใช้เป็นพื้นฐานในการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วอย่างทคสอบกอนกรีต (Tubed Concrete specimens) และเสากอนกรีตเสริมเหล็ก (Tubed RC column) โดยที่แรงกระทำ เป็นแรงกคอัคในแนวแกนที่กระทำต่อแกนกอนกรีตโดยตรงโดยที่ไม่กระทำต่อปลอกเหล็ก ตัวแปร สำคัญในการศึกษาก็อิกำลังอัดประลัยของกอนกรีต (Ultimate compressive strength of concrete) กวามหนาของปลอกเหล็ก (Thickness of steel jacket) และการให้หน่วยแรงโอบรัคก่อนแก่ตัวอย่าง ทดสอบ (Preconfinement) ซึ่งจากการศึกษาพบข้อสรุปที่สำคัญดังนี้

5.1 สรุปผลการทดสอบในงานวิจัย

5.1.1 สรุปผลการทดสอบตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดก่อน ด้วยปลอกเหล็ก (Tubed Concrete specimens)

1) พฤติกรรมในการรับแรงแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ในช่วงแรกนั้นมีพฤติกรรม แบบเชิงเส้นตรงถึงจุดที่ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตอ้างอิงรับแรงกดอัดสูงสุด ประมาณ 50 - 80% ของกำลังอัดประลัยสูงสุด จากนั้นมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงไร้เชิงเส้นซึ่งมีความชันเฉลี่ยต่ำกว่า ในช่วงแรกมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ความหนาของปลอกเหล็กและหน่วยแรง โอบรัดก่อน โดยในช่วงนี้พฤติกรรมดังกล่าวจะพบอยู่ 2 ลักษณะคือ Elastic - perfectly plastic และ Strain softening โดยพฤติกรรมแบบ Elastic - perfectly plastic เป็นพฤติกรรมที่เหมาะสม ในการใช้งาน เนื่องจากตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีค่า $\varepsilon_u / \varepsilon_{u,ref}$ สูงกว่าตัวอย่างทดสอบที่มีพฤติกรรม แบบ Strain softening และมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนเกิดการวิบัติ 2) การวิบัติเกิดที่ค่าการหดตัวที่สูงมากและมีลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป แสดงว่ามีความเหนียวในแนวแกนสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบอ้างอิง อย่างไรก็ตาม การวิบัติของตัวอย่างทดสอบเป็นแบบ Localized failure โดยการแตกร้าวของคอนกรีตภายใต้งุดที่ แรงกดอัดกระทำและโก่งเคาะเฉพาะที่ของผนังของปลอกเหล็ก ซึ่งการวิบัติเกิดขึ้นโดยการขยายตัว ออกทางด้านข้าง เกิดมากสุดที่บริเวณกึ่งกลางความสูงในช่วง 100 - 150 mm ของตัวอย่างทดสอบ เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นปลอกเหล็กจะช่วยโอบรัดคอนกรีตที่อยู่ภายในไม่ให้เกิดการวิบัติทำให้แกน คอนกรีตรับแรงได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพที่สูงขึ้นช่วงของตัวอย่างทดสอบบริเวณดังกล่าว กวรถูกเสริมด้วยปลอกเหล็กที่มีปริมาณเหล็กที่มากพอเพื่อให้มีกำลังโอบรัดแถนคอนกรีตที่เพียงพอ อย่างไรก็ตามตัวอย่างทดสอบคอนกรีตมีกำลังสูงกว่าคอนกรีตอ้างอิงมาก โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้ ปลอกเหล็กที่หนาโดยผ่านข้อกำหนดของมาตรฐาน ว.ส.ท.1008 - 38 ข้อ 4314 และการให้หน่วยแรง โอบรัดก่อนแก่ตัวอย่างทดสอบที่ก่าสูงขึ้น

3) ปลอกเหล็กที่มีความหนาที่เพิ่มขึ้นและการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่สูงขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพียงเล็กน้อยจากกรณีไม่ให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน ซึ่งเป็นไปตามลักษณะการเกิดความดันโอบรัด (Confining pressure) ของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมที่จะเกิดขึ้นน้อยทางด้านข้าง แต่อย่างไรก็ตาม ผลของการโอบรัดก่อนสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรง ในช่วงพฤติกรรมแบบเส้นตรง ให้สูงขึ้นจากเดิม ดังนั้นความหนาที่เพิ่มขึ้นและการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนจึงมีผลทำให้กำลังรับ แรงกดอัด ความเหนียวและพฤติกรรมในช่วงเส้นตรงมีก่าสูงขึ้น จากผลการทดสอบทำให้ทราบว่า ความหนาปลอกเหล็ก 6.0 mm และหน่วยแรงโอบรัดก่อน 0.1 f[']₆ เป็นตัวแปรที่มีความเหมาะสม ในการนำไปศึกษาต่อในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วย ปลอกเหล็ก (Tubed RC column)

5.1.2 สรุปผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัดก่อน ด้วยปลอกเหล็ก (Tubed RC column)

 พฤติกรรมรับแรงกดอัดในแนวแกนและลักษณะการวิบัติ Tubed RC Column มีลักษณะคล้ำยคลึงกับตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัดก่อน (Tubed Concrete specimens) เป็นอย่างมากโดยมีแรงกดอัดสูงสุด P'max ที่สูงกว่าตัวอย่างทดสอบคอนกรีต เนื่องจากมีเหล็กเสริม กอนกรีตช่วยรับแรงกระทำและสูงกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงมากโดยพฤติกรรมการรับแรง ของ Tubed RC column แบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงเช่นเดียวกับในกรณีของ Tubed Concrete specimens คือช่วงแรกเชิงเส้นตรงถึงจุดที่เสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงรับแรงกดอัดสูงสุดหรือประมาณ 60 - 80% ของกำลังรับแรงอัดสูงสุดในช่วงของการพิจารณา Tubed RC column และช่วงที่สองแบบ ใร้เชิงเส้นตรงช่วงนี้พฤติกรรมของ Tubed RC column ขึ้นอยู่กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และความหนาปลอกเหล็ก แบ่งเป็น 2 แบบ (1) Elastic - perfectly plastic และ (2) Strain hardening โดยมีพฤติกรรมทั้งสองแบบเป็นพฤติกรรมของเสาที่เหมาะสมในการใช้งานเนื่องจากเสานี้ มีก่า*ɛ_u / ɛ_{u.ref}* สูงมากและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงก่อนเกิดการวิบัติ

2) ปลอกเหล็กสามารถช่วยเสริมกำลังและความเหนียวในแนวแกนให้กับ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงได้ก่อนข้างที่จะสูง โดยแรงกดอัดสูงสุดแรก P_{max} ที่กำหนดให้เป็น "แรงกดอัดสูงสุดใช้งาน"ของเสาที่เกิดขึ้นในช่วงที่แกนของคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวมากขึ้น และมักเกิดก่อนที่จุดที่ผนังของปลอกเหล็กเกิดการ โก่งเดาะเฉพาะที่มีค่าอยู่ในช่วง 1.59 - 2.06 เท่า ของแรงกดอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง โดย Mechanism ที่ใช้ในการถ่ายแรงระหว่าง แกนคอนกรีตและปลอกเหล็กเกิดจาก Micro - interlocking และความเสียดทานระหว่างแกน กอนกรีตและปลอกเหล็ก นอกจากนั้นแล้ว Tubed RC column ยังมีก่ากวามเครียดที่แรง P_{max} สูงกว่า ก่ากวามเกรียดที่จุดรับแรงกดอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงในช่วง 1.80 - 2.04 เท่า

3) การวิบัติของ Tubed RC column มีลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป เช่นเดียวกับ ในกรณีของ Tubed Concrete specimens โดยเสาทั้งหมดเกิดการวิบัติจริงที่ค่าการหดตัวเกินกว่า 50 mm ซึ่งแสดงว่า Tubed RC column เป็นเสาที่มีความเหนียวที่สูงมาก การวิบัติของเสาเป็นแบบ Localized failure โดยในการ โก่งเดาะเฉพาะที่ที่เกิดขึ้น โดยการ โป่งออกของผนังของปลอกเหล็ก ที่ปลายด้านบนและล่างของเสา ดังนั้นกำลังของ Tubed RC column ที่ทดสอบได้จึงมีค่าต่ำกว่า กี่ทำนายโดยสมการของเสาเชิงประกอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตาม Tubed RC column มีกำลัง ความเหนียวและสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่าง สูงกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงเป็นอย่างมาก อีกทั้งพฤติกรรมในช่วงไร้เชิงเส้นมีความปลอดภัยในการนำไปใช้งาน

5.2 ข้อเสนอแนะในการใช้งาน

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทคสอบ กอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็กภายใด้ แรงกดอัดในแนวแกน เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทคสอบที่ได้กับสมการออกแบบ เสาเชิงประกอบของ ACI Committee 318 และใช้เป็นข้อมูลในการเสนอสมการการออกแบบ ที่เหมาะสมของเสาดังกล่าว จากการวิเคราะห์ข้อมูลดังที่ปรากฏในบทที่ 4 พบว่าอัตราส่วนของกำลัง รับแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบเมื่อเทียบกับค่าที่ทำนายโดยสมการออกแบบเสาเชิงประกอบ ของ ACI Committee 318 (P'_{max} / P_{ACI}) มีก่าน้อยกว่า 1.0 ดังนั้นเพื่อกวามเหมาะสมในการใช้งาน สมการออกแบบเสาเชิงประกอบของ ACI ที่ใช้ในการวิเคราะห์หากำลังรับแรงกดอัดในแนวแกน ของ Tubed RC column ลักษณะที่ใช้ในการศึกษาควรถูกปรับให้เหมาะสม ดังแสดงในสมการที่ 5.1

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

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

- A_{μ} คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของ Tubed RC column
- A. คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนคอนกรีต
- A, คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมหลัก
- A^{tube} คือ พื้นที่หน้าตัดของปลอกเหล็ก
- f'_co คือ กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของกอนกรีตที่ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C469
- f^s_y คือ กำลังรับแรงดึงที่งุดครากของเหล็กเสริมหลัก
- f,^{tube} คือ กำลังรับแรงคึงที่จุดครากของปลอกเหล็ก

อย่างไรก็ตาม การใช้สมการข้างต้นนั้นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ต้องอยู่ในขอบเขต ของการวิจัยนี้และใช้วิจารฉญาณในการนำไปใช้งานเป็นหลัก

5.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

 ควรศึกษา Tubed Concrete specimens และ Tubed RC column ให้มีความลึกซึ่งมากขึ้น โดยเพิ่มตัวแปรในส่วนของอัตราส่วน B/t อัตราส่วน L/B หน่วยแรงครากและ โมดูลัสยืดหยุ่น ของปลอกเหล็กและผลของแรงโอบรัดก่อนในหลาย ๆ ค่าเพื่อให้ครอบคลุมในการใช้งานจริง อีกทั้งศึกษาในเชิงลึกของระบบการถ่ายแรง (Load transferring mechanism) ระหว่างผิวคอนกรีต และผนังของปลอกเหล็กที่เกิดขึ้น

ควรศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดแบบเยื้องศูนย์ของ Tubed Concrete specimens
 และ Tubed RC column ที่อยู่ในรูปของ Beam - column

 ควรศึกษาในส่วนของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยใช้ตัวแปรเช่นเดียวกับเสาหน้าตัด สี่เหลี่ยมจัตุรัส

รายการอ้างอิง

- วินิต ช่อวิเชียร (2529). **คอนกรีตเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพมหานคร : หจก.ป.สัมพันธ์ พานิชย์.
- วินิต ช่อวิเชียร (2540). การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วริทธิ์ อึ้งภากรณ์ และ ชาญ ถนัดงาน (2544). <mark>การออกแบบเครื่องจักรกล 1.</mark> พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2538). <mark>มาตรฐานสำหรับออกแบบอาคาร</mark> ดอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. มาตรฐาน ว.ส.ท.1008.38 วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. กรุงเทพมหานุกร.
- สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ จักษคา ธำรงวุฒิ. (2550). พฤติกรรมทางโครงสร้างของ tubed column หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่า. พิษณุโลก : การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12. หน้า STR 51 - 55.
- สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2550). การทดสอบและพัฒนาเสาคอนกรีตแสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังโดยใช้ steel แจ็คเก็ต. โครงการวิจัยของสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- 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 C39 96 (1996). Standard Test Methods for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual Book of ASTM Standard. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C469 94 (1994). Standard Test Methods for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ration of Concrete in Compression. **Annual Book of ASTM Standard**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM E8 98 (1998). Standard Test Methods for Testing of Metallic Materials. Annual Book of ASTM Standard. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Attard, M.M., and Setung, S. (1996). Stress Strain Relationship of Confined and Unconfined Concrete. ACI Materials Journal. Title no.93 - M49: 432 - 442.
- Giakoumelis, G., and Lam, D. (2003). Axial capacity of circular concrete filled tube columns. Journal of Construction steel research. 60(2003): 1049 - 1068
- Huang, C.S., Yeh, Y.K., Liu, G.Y., Hu, H.T., Tsai, K.C., Weng, Y.T., 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. (2002). Strength modal for fiber reinforced plastic confined concrete. Journal of Structural Engineering. 128(5):612 - 623.
- Lam, L., and Teng, J.G. (2003). Design oriented Stress Strain Modal 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.
- Nawy, E.G. (2000). Reinforced Concrete a Fundamental Approach. Fourth Edition. New Jersey: Prentice - Hall Inc.
- Priestley, M.J.N., Seible, F., Xiao, Y., and Verma, R. (1994). 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.
- Seangatith, S., and Thumrongvuth, J. (2009). Experimental investigation on square steel tubed RC columns under axial compression. Suranaree J.Sci. Technol. 16(3): 205 220
- Tomii, M., Yoshimura, K., and Morishita, Y. (1977). Experimental studies on concrete filled steel tubular columns under concentric loading. Proceeding of International Colloquium on Stabillity of Structural under Static and Dynamic Loads (pp.718 - 741). National Science Foundation, Washington D.C., USA.
- 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.

รายการอ้างอิง

- วินิต ช่อวิเชียร (2529). **คอนกรีตเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพมหานคร : หจก.ป.สัมพันธ์ พานิชย์.
- วินิต ช่อวิเชียร (2540). การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วริทธิ์ อึ้งภากรณ์ และ ชาญ ถนัดงาน (2544). <mark>การออกแบบเครื่องจักรกล 1.</mark> พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2538). <mark>มาตรฐานสำหรับออกแบบอาคาร</mark> ดอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. มาตรฐาน ว.ส.ท.1008.38 วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. กรุงเทพมหานุกร.
- สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ จักษคา ธำรงวุฒิ. (2550). พฤติกรรมทางโครงสร้างของ tubed column หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่า. พิษณุโลก : การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12. หน้า STR 51 - 55.
- สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2550). การทดสอบและพัฒนาเสาคอนกรีตแสริมเหล็กที่ถูกเสริมกำลังโดยใช้ steel แจ็คเก็ต. โครงการวิจัยของสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- 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 C39 96 (1996). Standard Test Methods for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual Book of ASTM Standard. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C469 94 (1994). Standard Test Methods for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ration of Concrete in Compression. **Annual Book of ASTM Standard**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- ASTM E8 98 (1998). Standard Test Methods for Testing of Metallic Materials. Annual Book of ASTM Standard. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Attard, M.M., and Setung, S. (1996). Stress Strain Relationship of Confined and Unconfined Concrete. ACI Materials Journal. Title no.93 - M49: 432 - 442.
- Giakoumelis, G., and Lam, D. (2003). Axial capacity of circular concrete filled tube columns. Journal of Construction steel research. 60(2003): 1049 - 1068
- Huang, C.S., Yeh, Y.K., Liu, G.Y., Hu, H.T., Tsai, K.C., Weng, Y.T., 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. (2002). Strength modal for fiber reinforced plastic confined concrete. Journal of Structural Engineering. 128(5):612 - 623.
- Lam, L., and Teng, J.G. (2003). Design oriented Stress Strain Modal 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.
- Nawy, E.G. (2000). Reinforced Concrete a Fundamental Approach. Fourth Edition. New Jersey: Prentice - Hall Inc.
- Priestley, M.J.N., Seible, F., Xiao, Y., and Verma, R. (1994). 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.
- Seangatith, S., and Thumrongvuth, J. (2009). Experimental investigation on square steel tubed RC columns under axial compression. Suranaree J.Sci. Technol. 16(3): 205 220
- Tomii, M., Yoshimura, K., and Morishita, Y. (1977). Experimental studies on concrete filled steel tubular columns under concentric loading. Proceeding of International Colloquium on Stabillity of Structural under Static and Dynamic Loads (pp.718 - 741). National Science Foundation, Washington D.C., USA.
- 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.



กราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก



รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและค่าความเครียดของตัวอย่างทคสอบอ้างอิง



รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเกรียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR18 - 3.2



รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกคอัคในแนวแกนและค่าความเครียคในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR18 - 4.5



รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกคอัคในแนวแกนและค่าความเกรียคในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR18 - 6.0



รูปที่ ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกคอัคในแนวแกนและค่าความเครียคในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR25 - 3.2



รูปที่ ก.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR25 - 4.5



รูปที่ ก.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกคอัคในแนวแกนและค่าความเครียคในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR25 - 6.0



รูปที่ ก.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกคอัคในแนวแกนและค่าความเครียคในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR32 - 3.2



รูปที่ ก.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกคอัคในแนวแกนและค่าความเครียคในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR32 - 4.5



รูปที่ ก.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูงของ SR32 - 6.0



รูปที่ ก.11 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกน ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิง



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



รูปที่ ก.13 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกน

ของเสา Tubed RC column ที่มี $f_{co}' = 25 \text{ MPa}$



รูปที่ ก.14 ความสัมพันธ์ของแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกน ของเสา Tubed RC column ที่มี f'_co = 32 MPa



รูปที่ ก.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกคอัคในแนวแกนและค่าความเครียคในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูง ของเสา Tubed RC column ที่มี f'_c = 18 MPa



รูปที่ ก.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าความเครียดในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูง ของเสา Tubed RC column ที่มี *f_{co}* = 25 MPa



รูปที่ ก.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกคอัคในแนวแกนและค่าความเครียคในแนวแกน และในแนวขวางที่เกิดขึ้นที่ปลอกเหล็กที่กึ่งกลางความสูง

ของเสา Tubed RC column ที่มี $f_{co}' = 32$ MPa

ภาคผนวก ข

10

การให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน

ข.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องข.1.1 ท่อผนังบาง

สำหรับการคำนวณหาค่าหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในปลอกเหล็กที่ใช้โอบรัดแกน ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตหรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้ถูกประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาหน่วยแรง ในทิศทางของเส้นรอบวงในท่อรับความดันผนังบาง (σ₁) โดยความดันภายในที่เกิดขึ้นนั้น (ρ) เกิดการขยายตัวของแกนคอนกรีตที่รับแรงกดอัดในแนวแกน กระทำในแนวตั้งฉากแก่ผนังของท่อ ปลอกเหล็กทำให้เกิดหน่วยแรงดึงในแนวเส้นรอบวงในปลอกเหล็กหรือเรียกว่าหน่วยแรงโอบรัด ที่เกิดขึ้น โดยที่มีอัตราส่วนของรัศมีภายในของท่อรับความดันต่อความหนาของผนังท่อมากกว่าหรือ เท่ากับ 10 หรือ $\frac{r}{t} \ge 10$ สามารถคำนวณได้ ดังแสดงในสมการที่ ง.1

$$\sigma_1 = \frac{\rho r}{t} \tag{9.1}$$

โดยที่	ρ	คือ	ความคันภายในท่อรับความคัน

r คือ รัศมีภายในท่อรับความดัน

t กือ กวามหนาของท่อรับกวามคัน

ข.1.2 แรงบิด

การให้หน่วยแรงโอบรัคก่อนแก่ตัวอย่างทคสอบกระทำโคยการใช้อุปกรณ์สำหรับ โอบรัคแก่ตัวอย่างทคสอบคอนกรีตหรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกโอบรัคก่อนด้วยปลอกเหล็ก หน่วยแรงโอบรัคที่เกิดจากการขันอุปกรณ์ด้วยสลักเกลียวโคยใช้ประแจปอนด์ (Torque wrench) ซึ่งสามารถที่จะระบุขนาดของโมเมนต์ในการบิคที่ต้องการได้ โดยสามารถกำนวณโมเมนต์บิค ดังแสดงในสมการที่ ง.2 $T = CdF_i$

- 6 คือ สัมประสิทธิ์ของโมเมนต์บิดสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของโมเมนต์บิดจะเปลี่ยน
 ไปตามลักษณะและคุณภาพของเกลียว ซึ่งค่าที่แนะนำให้ใช้งานคือ
 - C = 0.15 เมื่อสลักเกลียวมีการหล่อลื่น
 - C = 0.2 เมื่อสลักเกลียวไม่มีการหล่อลื่น
- d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุของสลักเกลียว
- F_i คือ แรงคึงชั้นต้นในแนวแกนของสลักเกลียว

ข.2 การคำนวณหาหน่วยแรงโอบรัดก่อน

ข.2.1 การคำนวณขนาดสลักเกลียว

ตัวอย่างทคสอบที่นำมาคำนวณมี f'_{co} เท่ากับ 32 MPaและหน่วยแรงโอบรัคก่อน ที่ต้องการจากการขันสลักเกลียวคือ 0.1 f'_{co} ซึ่งเป็นกรณีที่มีค่าสูงสุดและเกิดแรงดึงที่สลักเกลียวสูง ที่สุดด้วยเช่นกัน เพื่อให้ใช้ได้กับตัวอย่างทคสอบอื่น ๆ ที่มีค่า f'_{co} เท่ากับ 18 และ 25 MPa ได้ด้วย และเป็นการป้องกันการวิบัติจากสลักเกลียวก่อน

- หน่วยแรงโอบรัดก่อนที่ต้องการให้เกิดขึ้นในคอนกรีตคือ 0.1 f'_{co} จะได้
 0.1 $f'_{co} = 0.1 \ge 0.1 \ge 32$ MPa
- คำนวณหาแรงดึงที่เกิดขึ้นจากหน่วยแรงโอบรัดก่อน โดยใช้

 $P = 0.1f'_{co} \ge A$ $P = (3.2 \text{ MPa}) \ge (0.15 \text{ m}) \ge (0.30 \text{ m})$ P = 144 kN

คำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นในสลักเกลียวแต่ละตัว

เนื่องจากมีการใช้สลักเกลียวทั้งหมดจำนวน 10 ตัว ดังนั้น n จึงมีค่าจำนวนสลัก เกลียวเท่ากับ 10 แรงที่เกิดขึ้นในสลักเกลียวแต่ละตัว โดยใช้

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

$$P_i = \frac{114}{10} = 11.4 \text{ kN}$$

จากตารางที่ ข.1 สามารถเลือกสลักเกลียวตามมาตรฐาน ISO/R898/I-1968(E) ที่มี ขั้นคุณสมบัติ 6.9 มีหน่วยแรงพิสูจน์ต่ำสุดเท่ากับ 540 N/mm² และใช้อัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of safety, FS) เท่ากับ 5 ดังนั้นหน่วยแรงใช้งานคือ

 $\sigma_{td} = \frac{540}{5} = 108 \text{ N/mm}^2$ จาก $A_{ss} = \frac{P_i}{\sigma_{td}}$ โดยที่ A_{ss} คือ พื้นที่รับความเค้นของสลักเกลียว ดังนั้น $A_{ss} = \frac{11.4 \times 10^3}{108} = 133.33 \text{ mm}^2$

จากตารางที่ ข.2 เลือกใช้สลักเกลียวขนาด M16 ซึ่งมีพื้นที่รับหน่วยแรง A_s=157 mm²

· ·			-H	- 1	4	v						
คุณสมบัติทางกล		งั้นคุณสมบัติ						บัติ				
	3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.6	6.8	6.9	8.8	10.9	12.9	14.9
ความต้านแรงดึง ต่ำสุด (N/mm²)	340	40	00	5(00	Ð	600		800	1000	1200	1400
ความต้านแรงคึง สูงสุด (N/mm²)	490	5:	50	70	00		800	10	1000	1200	1400	1600
ความต้านแรงคึง ครากต่ำสุด (N/mm ²)	200	240	320	3 00	400	3 60	480	-	-	-	-	-
หน่วยแรงพิสูจน์ 0.2 % ต่ำสุด (N/mm ²)	-	-	-	-	-	-	-	540	640	900	1080	1260
การยึด หลังจากขาด %	25	25	14	20	10	16	8	12	12	9	8	7

ตารางที่ ง.1 คุณสมบัติทางกลงองสลักเกลียว หมุดเกลียวและสตัด

ขนาดเส้นผ่าเ	เศูนย์กลางระบุ	ระยะพิตช์	ขนาดเส้นผ่าน	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย		พื้นที่รับหน่วยแรง
ช่องที่ 1	ช่องที่ 2	Р	ศูนย์กลางพิตช์ $d_{_2}$, $D_{_2}$	d_1	D_1	A_s , mm ²
1.00		0.25	0.838	0.693	0.729	0.456
1.20		0.25	1.038	0.893	0.929	0.730
1.60		0.35	1.373	1.170	1.221	1.270
2.00		0.40	1.740	1.509	1.567	2.070
2.50		0.45	2.208	1.948	2.013	3.390
3.00		0.50	2.675	2.387	2.459	5.030
	3.50	0.60	3.110	2.764	2.850	6.780
4.00		0.70	3.545	3.141	3.242	8.780
	4.50	0.75	4.013	3.580	3.688	11.300
5.00		0.80	4.480	4.019	4.134	14.200
6.00		1.00	5.350	4.773	4.917	20.100
8.00		1.25	-7.183	6.466	6.647	36.600
	(9)	1.25	8.188	7.466	7.647	48.100
10.00		1.50	9.026	8.160	8.376	58.000
	(11)	1.50	10.026	9.160	9.376	72.300
12.00		1.75	10.863	9.853	10.106	84.300
	14.00	2.00	12.701	11.546	11.835	115.000
16.00		2.00	14.701	13.546	13.835	157.000
	18.00	2.50	16.376	14.933	15.294	192.000
20.00		2.50	18.376	16.933	17.294	245.000
	22.00	2.50	20.376	18.933	19.294	303.000
24.00		3.00	22.051	20.319	20.752	353.000
	27.00	3.00	25.051	23.319	23.752	459.000
30.00		3.50	27.727	25.706	26.211	561.000
	33.00	3.50	30.727	28.706	29.211	694.000
36.00		4.00	33.402	31.093	31.670	817.000
	39.00	4.00	36.402	34.093	34.670	976.000
42.00		4.50	39.077	36.479	37.129	1120.00
	45.00	4.50	42.077	39.479	40.129	1300.000
48.00		5.00	44.752	41.866	42.587	1470.000
	52.00	5.00	48.752	45.866	46.587	1760.000
56.00		5.50	52.428	49.252	50.046	2030.000
	60.00	5.50	56.428	53.252	54.046	2360.000
64.00		6.00	60.103	56.639	57.505	2680.000
	68.00	6.00	64.103	60.639	61.505	3060.000

ตารางที่ ข.2 เกลียวเมตริกแบบมาตรฐานระหว่างประเทศ เกลียวธรรมดา

ข.2.2 ขั้นตอนการคำนวณการหาโมเมนต์บิดสำหรับการขันสลักเกลียว

การคำนวณหาค่าหน่วยแรงโอบรัดก่อนของตัวอย่างทดสอบ SC18-3.2-0.05 f_{co}' และ $f_{co}' = 18 \text{ MPa}$ โดยมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

คำนวณหาหน่วยแรงโอบรัดที่ต้องการให้เกิดขึ้นจากการขันสลักเกลียวคือ
 0.05 f_c หน่วยแรงโอบรัดที่ต้องการคือ

0.05 f'_{co} = 0.05 x 18 MPa = 0.9 MPa
 คำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นในปลอกเหล็กและสลักเกลียว โดยใช้
 P = σ₁A

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

Р

เนื่องจากมีการใช้สลักเกลียวทั้งหมดจำนวน 10 ตัวดังนั้น n = จำนวนสลัก เกลียวเท่ากับ 10 แรงที่เกิดขึ้นในสลักเกลียวแต่ละตัว โดยใช้

		P_i		$\frac{P}{n}$	7		
		P _i	E	$\frac{40.5}{10}$	匀.	4.05	kN
		■ คำนวณหาโ	ไมเมนต์โ	โ ดที่เกิดจ์	ม ้ นเพื่อน _้ า	เปปขันใเ	เสลักเกลียว โคยใช้สมการ
		$T = CdP_i$				av?	
โดยที่	d	คือ เส้นผ่านศูน	ย์กลางขอ	องสลักเศ	າລີຍว MI	6 เท่ากับ	14.701 mm
	P_i	คือ แรงดึงในแร	นวแกนข	องสลักเ	กลียว		
	С	คือ สัมประสิทร์	ธิ์โมเมนด	า์บิด			
		C = 0.15	เมื่อสลั	กเกลี่ยวมี	วิการหล่ย	อลิ่น	
		C = 0.20	เมื่อสล้เ	กเกลียวไ	ม่มีการห	เล่อลื่น	
		เนื่องจากกา	รทคสอา	านี้ไม่มีก	ารหล่อส	เล้กเกลี ย	ว ดังนั้น <i>C</i> เท่ากับ 0.2
ดังนั้น		Т	=	(0.2) x	(14.701	mm) x (4	4.05kN)
		Т	=	11.91	N.m		
รายการคำนวณ	กำลังอัคประลัย (MPa)						
---	----------------------	-------	-------				
	18	25	32				
หน่วยแรงโอบรัคที่ต้องการให้เกิคขึ้นในคอนกรีต 0.05 f_{co}^{\prime} (MPa)	0.9	1.25	1.6				
แรงที่เกิดขึ้นในสลักเกลียวแต่ละตัว P (kN)	4.05	5.625	7.2				
โมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปขันในสลักเกลียว T (N.m)	11.91	16.54	21.17				

ตารางที่ ข.3 สรุปผลการคำนวณหาโมเมนต์บิดสำหรับขันสลักเกลียวที่ก่า 0.05 f_{co}^{\prime}

ตารางที่ ข.4 สรุปผลการคำนวณหาโมเมนต์บิดสำหรับขันสลักเกลียวที่ก่า 0.1 f_{co}^{\prime}

รายการคำนวณ	กำลังอัคประลัย (MPa)			
	18	25	32	
หน่วยแรงโอบรัคที่ต้องการให้เกิดขึ้นในคอนกรีต 0.1 f_{co}^{\prime} (MPa)	1.8	2.5	3.2	
แรงที่เกิดขึ้นในสลักเกลียวแต่ละตัว P (kN)	8.1	11.25	14.4	
โมเมนต์บิคที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปขันในสลักเกลียว T (N.m)	23.82	33.08	42.34	



ภาคผนวก ค

10

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

- ชุลีพร อุยยืนยงก์ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และศาสน์ สุขประเสริฐ. (2553). การศึกษากำลังอัดของ กอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก. การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15 (The 15th National Convention on Civil Engineering), หน้า 272, STR041.
- ชุลีพร อุยยืนยงค์ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ จักษดา ธำรงวุฒิ และศาสน์ สุขประเสริฐ. (2554). พฤติกรรมการรับแรงอัดของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอก เหล็ก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 (The 16th National Convention on Civil Engineering), หน้า 251, STR053.







มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 12-14 พฤษภาคม 2553

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

> ชุลีพร อุยยืนยงก์ (Chuleeporn Auyyuenyong)¹ สิทธิหัย แสงอาทิตย์ (Sittichai Seangatith)² ศาสน์ สุขประเสริฐ (Sart Sukprasert)³

¹นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิสวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (aom_ce_sut@hotmail.com) ²รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิสวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (sitichai@sut.ac.th) ³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิสวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (sart@sut.ac.th)

บทกัดย่อ : บทกวามนี้นำเสนอผลการทคสอบพากำลังรับแรงอัคในแนวแกนของกอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ขมจัตุรัสที่ห่อหุ้มค้วยปลอก เหล็ก ตัวอย่างทอสอบจะถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็กโดยการให้แรงกระทำทางด้านข้างเพื่อก่อให้เกิด pre-confining pressure แก่ ด้วอย่างกอนกรีต โดยทคสอบภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อกอนกรีตโดยตรง จากการศึกษาพบว่า ด้วอย่างทอสอบมี พฤติกรรมการรับแรงแบบเชิงเส้นในช่วงแรกสูงกว่าตัวอย่างกอนกรีตอ้างอิงถึงประมาณ 50-70% ของกำลังรับแรงสูงสุด จากนั้น มี พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นโดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สูงมากโดยเกิดการหคตัวในแนวแถนและการขยายตัวด้านข้างของตัวอย่าง ทดสอบมีก่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ปลอกเหล็กที่โดบรัดเกิดการโก่งตัวออกด้านข้าง จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ นอกจากนั้นแล้ว ด้วอย่างทดสอบคอนกรีตที่ถูกโอบรัตก่อนมีกำลังและความเหนียวในการรับแรงกดอัดในแนวแกนที่สูงขึ้นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของกอนกรีตอ้างอิง โดยขึ้นอยู่กับกำลังของกอนกรีต ความหนาของปลอกเหล็ก และแรงที่ใช้กระทำ ทางค้านข้าง

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

KEYWORDS: Axial compression, Concrete, Steel jacket, Preconfinement

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 12-14 พฤษภาคม 2553

1. บทนำ

เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled steel tube column) หรือเสา CFT เป็นโครงสร้างซึ่งเกิดจากการบรรจ คอนกรีตล้วนลงในท่อเหล็กกลวงซึ่งมีหน้าตัดกลมกลวงหรือ หน้าตัดสี่เหลี่ยมเพื่อใช้เป็นแกนของเสา เป็นการทำงานร่วมกัน ของท่อเหล็กและคอนกรีตในลักษณะเสาคอมโพสิท (composite column) โดยท่อเหล็กอาจจะฉกออกแบบให้ทำหน้าที่หลักในการ รองรับหน่วยแรงในแนวแกน (axial stress) ที่เกิดจากแรงกดอัด และ โมเมนต์คัค และ/หรืออาจจะถูกออกแบบรองรับแรงคัน เนื่องจากการขยายตัวของแกนคอนกรีตภายใต้แรงกคอัค ซึ่งทำ ให้เกิดการโอบรัด (confining effect) ต่อแกนคอนกรีตใน ขณะเดียวกันแกนคอนกรีตทำหน้าที่ในการรองรับหน่วยแรงใน แนวแกนบางส่วนและยังช่วยให้ท่อเหล็กมีความด้านทานต่อการ เกิดการโก่งเคาะเฉพาะที่ (local buckling) เพิ่มขึ้นซึ่งผลของ composite action ข้างต้นทำให้เสา CFT มีข้อคีเหนือกว่าเสา กอนกรีตเสริมเหล็กและเสาเหล็กโครงสร้าง ทั้งในค้านความ แกร่ง (stiffness) กำลัง (strength) ความเหนียว(ductility) และการ ดูดซึมพลังงาน(energy absorption) เหมาะสำหรับ โครงสร้างที่อยู่ ในพื้นที่ที่มีแผ่นคินไหว และเป็นผลส่งต่อให้เสา CFT เป็นเสาที่ ใช้ปริมาณเหล็กลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับเสาเหล็ก โครงสร้าง และท่อเหล็กยังทำหน้าที่เป็นแบบหล่อและก้ำยัน ซึ่งทำให้การ ก่อสร้างคำเนินการได้ง่ายและช่วยทำให้ราคาก่อสร้าง โครงสร้าง ลคลง ดังนั้นจากข้อดีข้างต้นในช่วงหลายปีที่ผ่านมาเสา CFT จึง ได้รับความนิยมและประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในต่างประเทศ ดังตัวอย่างของงานวิจัยที่ถูกนำเสนอ โดยXiao *et. al*. ในปี2005 [1]

เสาประเภทนี้ถูกออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบที่ เกี่ขวข้อง เช่น มาตรฐานการออกแบบอาการกอนกรีตเสริมเหล็ก โดขวิธีกำลัง ว.ส.ท. 1008-38 ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศ ไทยฯ [5] และข้อกำหนดของ AISC/LRFD 1994 ใน Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design (LRFD) ของ AISC [4] อย่างไรก็ตามในปัจจุบันนี้เสา CFT ถูกแบ่งตาม ลักษณะการออกแบบให้ท่อเหล็กรองรับหน่วยแรงเป็น 2 แบบคือ 1.)ทำหน้าที่หลักเป็นเหล็กแกน (longitudinal reinforcement) รองรับหน่วยแรงในแนวแกนโดยเสา CFT จะถูกก่อสร้างอย่าง ต่อเนื่อง โดยมีกวามสูงหลายชั้นหรือสูงตลอดกวามสูงของอาการ ซึ่งเสา CFT แบบนี้จะรองรับแรงที่กระทำผ่านท่อเหล็กและ คอนกรีตร่วมกัน และ 2).ทำหน้าที่หลักในเหล็กเสริมในแนว ขวาง (transverse reinforcement) โดยมีรายละเอียดของจุด เชื่อมต่อ การออกแบบ และการก่อสร้างที่ใกล้เคียงกับ โครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งแนวคิดของเสา CFT แบบที่สองได้ถูก นำเสนอ โดย Tomii et. al. ในปี 1985 [2] โดยมีวัตถุประสงค์หลัก ในท่อเหล็กรองรับแรงกระทำตามขวางและ โมเมนต์เนื่องจาก แผ่นดินไหว ซึ่งเสาประเภทนี้มักถูกเรียกว่า "Tubed column" โดยท่อเหล็กจะถูกออกแบบไม่ให้รองรับหน่วยแรงในแนวแกน โดยตรง โดยการเว้นช่องว่างระหว่างท่อเหล็กกับท้องกานหรือ จานรากที่ปลายทั้งสองของเสา คังนั้น ภายใต้แรงกระทำ ท่อเหล็ก ทำหน้าที่เป็นปลอก (jacket) โอบรัคต่อแกนเสาคอนกรีตเสริม เหล็กซึ่งช่วยเพิ่มกำลังรับหน่วยแรงในแนวแกนและความเหนียว ของเสาให้สูงขึ้น Seangatith และ Thumrongvut ในปี 2009 [6] ได้นำแนวกิดนี้ไปประยุกต์ใช้ในการเสริมกำลังและซ่อมแซมเสา คอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเสนอผลการทคสอบถึงพฤติกรรมและ ลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นทางโครงสร้างของ Tubed column หน้า ตัดสี่เหลี่ยมค้านเท่าภายใต้แรงกคอัคในแนวแกนที่กระทำต่อแกน คอนกรีต โดยตรง ซึ่งพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตอ้างอิง แล้ว Tubed column มีพฤติกรรมการรับแรงสูงสุดและความ เหนียวเพิ่มขึ้นมาก โดยต้องพิจารณาถึงกำลังรับแรงสงสดของ กอนกรีตและความหนาของปลอกเหล็ก

จากการทบทวนงานวิจัยพบว่ารูปแบบการใช้ปลอกเหล็กใน การห่อหุ้มเสาคอนกรีตหรือเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายนอกนั้น สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ทั้งในโครงสร้างที่ก่อสร้างใหม่และ ปรับปรุงและ/หรือซ่อมแซมโครงสร้างเคิมที่มีอยู่แล้ว แต่ การศึกษามีก่อนข้างน้อยและมุ่งประเด็นในกรณีการเสริมกำลัง ให้กับ โครงสร้างใหม่ในเสาหน้าตัดกลมและถูกกระทำเนื่องจาก แรงแผ่นดินไหว งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการพัฒนาระบบการ ให้แรงโอบรัคก่อน (pre-confinement) แก่เสาคอนกรีตโคยใช้ ปลอกเหล็ก (steel jacket) แบบใหม่ในช่วงที่มีการเสริมกำลังหรือ ซ่อมแซมอาการ โคยไม่ต้องทำการรื้อถอนแล้วก่อสร้างขึ้นใหม่ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกน กำลัง ความ เหนียวและลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วย ปลอกเหล็กและถุกให้แรง โอบรัคก่อนพร้อมทั้งเปรียบเทียบผล ของการรับแรงที่เกิดขึ้นของเสาคอนกรีตล้วน เสาคอนกรีตที่มี การให้หน่วยแรงและไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัคก่อน (preconfinement) ทางค้านข้าง นอกจากนั้นแล้วองค์ความรู้ที่ได้ยัง

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยชาแห่งชาติครั้งที่ 15

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 12-14 พฤษภาคม 2553

สามารถใช้เป็นพื้นฐานในการเสริมกำลังหรือช่อมแชมอาการ ต่างๆซึ่งมีความเสี่ยงต่อแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวในประเทศไทย อีกด้วย

2. ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบ

ในการศึกษานี้ การทดสอบสมบัติของวัสดุจะกระทำตาม มาตรฐานของ American Society for Testing and Materials (ASTM) โดยการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดของกอนกรีต ทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C39 และการทดสอบกำลัง รับแรงดึงของเหล็กตามมาตรฐาน ASTM E8

2.1 ตัวอย่างทคสอบ

ด้วอย่างทดสอบในงานวิจัยเป็นด้วอย่างทดสอบกอนกรีด จำนวน 42 ด้วอย่าง โดยถูกจำแนกออกเป็น 3 กลุ่ม โดย กลุ่มที่ 1 เป็นด้วอย่างทดสอบกอนกรีตล้วนที่ไม่มีวัสดุโอบรัด จำนวน 6 ด้วอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 1(a) ซึ่งใช้เป็นตัวอย่างทดสอบอ้างอิง (control columns), กลุ่มที่ 2 ด้วอย่างทดสอบกอนกรีตที่ถูกห่อหุ้ม ด้วยปลอกเหล็กโดยที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทาง ด้านข้าง จำนวน 18 ตัวอย่าง ดังแสดงในภาพที่ 1(b) และกลุ่มที่ 3 ตัวอย่างทดสอบกอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและมีการ ให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง จำนวน 18 ตัวอย่าง ดัง แสดงในภาพที่ 1(c)

ด้วอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษามีหน้าดัดสี่เหลี่ยมงัดุรัส ขนาด 150x150 mm และสูง 300 mm และมีรายละเอียดของ ด้วอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยดังแสดงในภาพที่ 2 และตาราง ที่ 1 โดยชื่อด้วอย่างทดสอบที่ระบุถูกกำหนดในรูป WX-Y-Z ซึ่ง W หมายถึง ประเภทของตัวอย่างทดสอบ (CR หมายถึงตัวอย่าง กอนกรีตค้างอิงหน้าดัดสี่เหลี่ยมงัดุรัส ที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก), X หมายถึงก่ากำลังอัดประลัยของกอนกรีต (f'_{co} =18 และ 25 MPa), Y หมายถึงกวามหนาของปลอกเหล็ก (t=3.2, 4.5 และ 6.0 mm.) และ Z หมายถึงหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่กระทำต่อ ด้วอย่างทดสอบ (0 และ0.05 f'_{co}) และภาพที่ 3 แสดงลักษณะ ปลอกเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย

กลุ่มที่	ตัวอย่าง	กำลังรับแรง	ดวามหนา	หน่วยแรงที่ใช้ในการ	จำนวน
		อัดประลัย (MPa)	ปลอกเหล็ก	โอบรัดก่อน (MPa)	
		Une.	(mm)	- 5-22	
1	CR18-0-0	18	lagin	Aluia	3
	CR25-0-0	25		-	3
2	SR18-3.2-0 f'_co	18	3.2	0	3
	SR18-4.5-0 f'_co	18	4.5	0	3
	SR18-6.0-0 f' _{co}	18	6.0	0	3
	SR25-3.2-0 f'_co	25	3.2	0	3
	SR25-4.5-0 f'co	25	4.5	0	3
	SR25-6.0-0 f'_co	25	6.0	0	3
3	SR18-3.2-0.05 f'_co	18	3.2	0.05 f'_co	3
	SR18-4.5-0.05 f'_co	18	4.5	0.05 f'_co	3
	SR18-6.0-0.05 f'_co	18	6.0	0.05 f'_co	3
	SR25-3.2-0.05 f'_co	25	3.2	0.05 f'_co	3
	SR25-4.5-0.05 f' _{co}	25	4.5	0.05 f'_{co}	3
	SR25-6.0-0.05 f' _{co}	25	6.0	$0.05 f_{co}^{\prime}$	3
		รวมตัวอย่างทุดส	ช ุลาเ		42



(a)





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

(c)



2.2 การทดสอบตัวอย่าง

ภาพที่ 4 แสดงแผนภาพการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับ เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) ขนาด 2000 kN โดยแรงกดอัคในแนวแกนกระทำต่อตัวอย่างทคสอบที่ปลาย ผ่าน steel bearing plate ขนาด 140 x 140 mm หนา 50 mm ลงสู่ คอนกรีตโดยตรง การหดตัวในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบถูก วัดโดย Linear Variable Differential Transducers (LVDTs) ้ งำนวน 2 ตัว ที่ติดตั้งที่ปลายด้านบนบริเวณหัวกดของเครื่อง UTM

pre-loading ประมาณ 25% ของกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และ unloading เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างหัวกดและตัวอย่าง ทคสอบ จากนั้นจึงเริ่มทำการทคสอบโคยเพิ่มแรงกระทำอย่าง ช้าๆ โดยใช้ Data Acquisition System (DAQ) ดังแสดงในภาพ ที่ 5 เก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่อง จนตัวอย่างทคสอบเกิดการวิบัติอย่าง สมบูรณ์



ภาพที่ 5 Data Acquisition System (DAQ)

3. ผลการทดสอบ

3.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัด

ภาพที่ 6 และ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง (stress) และความเครียด (strain) ของตัวอย่างทดสอบอ้างอิงและ ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก โดยจัดกลุ่ม ตามก่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต (f'_{ω} =18 และ 25 MPa), ความหนาของเหล็ก (t= 3.2, 4.5 และ 6.0 mm) และหน่วยแรง โอบรัดก่อนทางด้านข้างที่กระทำต่อตัวอย่างทดสอบ (0 และ 0.05 f'_{ω}) และจำกัดการแสดงผลที่ก่าการหดตัว 15 mm หรือก่า ความเครียด(strain) ในกอนกรีตที่ 0.050 mm/mm ซึ่งเป็นก่า ความแครียด(strain) ที่สูงกว่า ultimate compressive strain ของ คอนกรีตประมาณ 10 เท่า

โดยตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 ในช่วงแรกจะมีพฤติกรรมแบบ เชิงเส้น (linear elastic) จนถึงค่าของหน่วยแรงประมาณ 50%

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 12-14 พฤษภาคม 2553

ของหน่วยแรงอัดสูงสุดที่หาได้ในช่วงของการพิจารณาและใน กลุ่มที่ 3 มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้น(linear elastic) จนถึงค่าของ หน่วยแรงประมาณ 60-70% ของหน่วยแรงอัดสูงสุด จากนั้นเมื่อ แรงกดอัดมีก่าเพิ่มขึ้นจนแกนกอนกรีตถูกแรงกระทำถึงจุดรับ แรงสูงสุดแล้ว กอนกรีตจะเริ่มมีแตกร้าวขนาดเล็กเกิดขึ้น (micro cracking) และมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) มากขึ้น และแกนกลางกอนกรีตเริ่มขยายตัวออกทางด้านข้างมากขึ้น โดย กอนกรีตจะถ่ายเทแรงสู่ปลอกเหล็ก เป็นผลทำให้กอนกรีตที่ถูก ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กมีพฤติกรรมกล้ายวัสดุเหนียว (ductile material) มากขึ้น โดยแรงกดอัดในแนวแกนที่กระทำต่อ กอนกรีตที่เพิ่มขึ้นจะถูกรองรับโดยปลอกเหล็ก

นอกจากนั้นแล้ว ยังพบอีกว่าปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมของ ตัวอย่างทดสอบในช่วงพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น(nonlinear) ขึ้นอยู่กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต(f'_), ความหนาของ ปลอกเหล็ก (t) และหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่กระทำ ต่อตัวอย่างทดสอบ โดยพบว่าตัวอย่างทดสอบเมื่อรองรับแรง กระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว จะมีความแกร่งลดลงหรือ พฤติกรรมแบบ strain-softening ซึ่งแกนคอนกรีตเริ่มมีการ แตกร้าวและเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้ว ผนังของ ปลอกเหล็กไม่มีความแกร่งต่อการคัคเพียงพอในการต้านทานต่อ การขยายตัวทางด้านข้างของแกนกอนกรีต จากนั้น คอนกรีตจะ เกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผนังของปลอกเหล็กจะเกิดการ โก่ง ้เคาะเฉพาะที่และปลอกเหล็กจะไม่สามารถจำกัคแกนคอนกรีตที่ แตกร้าวให้มีกำลังรับแรงกดอัดได้เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นในตัวอย่าง ทดสอบที่มีกำลังอัดประลัยที่ 18, 25 MPaและปลอกเหล็กที่ ความหนา 3.2, 4.5 mm ทั้งหมด และความหนา 6.0 mm บางตัว ยกเว้น SR18-6.0-0 f และ SR18-6.0-0.05 f ซึ่งมีพฤติกรรม เมื่อรองรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงก่าหนึ่งแล้ว ตัวอย่างทคสอบมี ความแกร่งประมาณศูนย์หรือพฤติกรรมแบบ elastic-perfectly plastic ซึ่งแกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวและเกิดการขยายตัว ทางด้านข้างที่มากพอ ผนังของปลอกเหล็กที่ห่อหุ้มมีความแกร่ง ต่อการดัดในการด้านทานต่อการขยายตัวทางด้านข้างแกน คอนกรีตอย่างเพียงพอ จากนั้นคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวมาก ขึ้นและผนังของปลอกเหล็กจะเกิคการโก่งเคาะเฉพาะที่และ ปลอกเหล็กจะทำหน้าที่จำกัดแกนคอนกรีตให้สามารถรับแรงกค อัดที่คงที่ได้อย่างต่อเนื่อง



3.2 ลักษณะการวิบัติ

จากการทดสอบพบว่า ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 มีลักษณะการวิบัติแบบก่อยเป็นก่อยไป (progressive failure) เริ่มต้นจากกอนกรีตถูกกดอัดและแตกร้าวที่ผิวด้านบนและล่าง และเกิดการยุบตัวตามแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ จากนั้น ตัวอย่างทดสอบเกิดการขยายตัวออกด้านข้างเนื่องจากผลของ Poisson's effect โดยเกิดขึ้นมากสุดที่บริเวณตำแหน่ง 100-150 mm ใกล้บริเวณที่แรงกดอัดกระทำซึ่งก่อให้เกิดแรงดันออก กระทำตั้งจากกับผนังของปลอกเหล็กทางด้านข้างโดยการไป่ง ออกของปลอกเหล็ก ดังแสดงในภาพที่ 8(a) และ 8(b) โดย ลักษณะการวิบัตินี้แตกต่างจากการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ กอนกรีตอ้างอิง (กลุ่มที่ 1) ที่เกิดการแตกร้าวของกอนกรีตอย่าง รวดเร็วในแนวทแขงเมื่อแรงกดอัคมีค่าสูงสุดและเกิดขึ้นอย่าง รวดเร็ว (abrupt failure) ดังแสดงในภาพที่ 8(c)



(a)
 (b)
 (c)
 ภาพที่ 8 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ
 (a) หน้าตัดการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3
 (b) กลุ่มที่ 2 และ 3
 (c) กลุ่มที่

ກຄຸ່ນທີ່	ตัวอย่าง	$f_{\scriptscriptstyle co,ref}'$	f_{cc}^{\prime}	$f_{\rm cc}^\prime$ / $f_{\rm co,ref}^\prime$	[€] u,ref	E _u	$\varepsilon_u / \varepsilon_{u,ref}$	พฤติกรรมการรับแรง
		(MPa)	(MPa)	(MPa)				
1	CR18-0-0	19.29		-	0.0081		100	Concrete crushing
	CR25-0-0	21.27			0.0071			Concrete crushing
2	SR18-3.2-0 f'_co	19.29	45.29	2.35	0.0081	0.0612	7.56	Strain softening
	SR18-4.5-0 f' _{co}	19.29	54.23	2.81	0.0081	0.0654	8.07	Strain softening
	SR18-6.0-0 f' _{co}	19.29	61.31	3.18	0.0081	0.0870	10.74	Elastic-perfectly plasti
	SR25-3.2-0 f'_co	21.27	47.59	2.24	0.0071	0.0526	7.41	Strain softening
	SR25-4.5-0 f_{co}^{\prime}	21.27	59.90	2.82	0.0071	0.0566	7.97	Strain softening
	SR25-6.0-0 f_{co}^{\prime}	21.27	69.72	3.28	0.0071	0.0610	8.59	Strain softening
3	SR18-3.2-0.05 f'_co	19.29	48.21	2.50	0.0081	0.0554	6.84	Strain softening
	SR18-4.5-0.05 f_{co}^{\prime}	19.29	55.74	2.89	0.0081	0.0670	8.27	Strain softening
	SR18-6.0-0.05 f_{co}^{\prime}	19.29	61.95	3.21	0.0081	0.0851	10.51	Elastic-perfectly plasti
	SR25-3.2-0.05 f' _{co}	21.27	52.33	2.46	0.0071	0.0548	7.72	Strain softening
	SR25-4.5-0.05 f_{co}^{\prime}	21.27	62.61	2.94	0.0071	0.0613	8.63	Strain softening
	SR25-6.0-0.05 f'	21.27	71.71	3.37	0.0071	0.0572	8.06	Strain softening

4. วิจารณ์ผลการทดสอบ

ตารางที่ 3 แสดงสรุปผลการทดสอบหน่วยแรงสูงสุดและค่า กวามเครียดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ โดยก่ากำลังอัดประลัย ของกอนกรีต (f'_o) เป็นก่าหน่วยแรงสูงสุดที่ทดสอบได้ในช่วงที่ ตัวอย่างทดสอบมีการหดตัวในแนวแกนไม่เกิน 15 mm จาก ตารางที่ 3 และภาพที่ 6 และ 7 พบว่า

 เมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรง โอบ รัคก่อนทางด้านข้าง (กลู่มที่2) ที่ความหนาเท่ากัน พบว่าเมื่อ ด้วอย่างทดสอบมีก่ากำลังอัดประลัยของกอนกรีตที่ต่ำ (f' =18MPa) มีก่าอัตราส่วน f'_{co.tef} อยู่ในช่วง 2.81-3.18 ซึ่งมี ก่าน้อยกว่าด้วอย่างทดสอบที่มีก่ากำลังอัดประลัยของกอนกรีตที่ สูงกว่า (f' =25MPa) ซึ่งอยู่ในช่วง 2.89-3.28 ยกเว้นปลอก เหล็กที่มีความหนา 3.2 mm พบว่าก่าอัตราส่วน f' (f' _{o.tef} มีก่า น้อยลงและเมื่อพิจารณาด้วอย่างทดสอบที่มีการให้แรงโอบรัค ก่อนทางด้านข้างไปที่ 0.05 เท่าของ f' (กลุ่มที่ 3) พบว่าที่ความ หนาเท่ากัน พบว่าเมื่อตัวอย่างทดสอบที่มีก่ากำลังอัดประลัยของ ถอนกรีตที่ต่ำ (f' =18MPa) มีก่าอัตราส่วน f' (f' อ.tef อยู่ ในช่วง 2.89-3.21 ซึ่งมีก่าน้อยกว่าตัวอย่างทดสอบที่มีก่ากำลังอัด ประลัยของกอนกรีตที่สูงกว่า (f' =25MPa) ซึ่งอยู่ในช่วง 2.94-3.37 ยกเว้นปลอกเหล็กที่มีความหนา 3.2 mm พบว่าก่า อัตราส่วน f'_{cc} / $f'_{cc,rer}$ มีก่าน้อยลงเช่นกัน ซึ่งลักษณะดังกล่าวที่ เกิดขึ้นน่าจะมีสาเหตุมาจากผนังของปลอกเหล็กหน้าดัดสี่เหลี่ยม จะรับแรงค้นจากการขยายด้วของกอนกรีต โดยอาศัยกวามแกร่ง ต่อการคัดของผนังปลอกในรูปของ plate ดังนั้นผนังปลอกเหล็ก ที่หนาจะมีกวามแกร่งต่อการคัดมากกว่าผนังที่บาง

(1) 2. เมื่อพิจารณาตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบผลทดสอบที่ ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัคก่อนทางค้านข้าง (กลุ่มที่2) กับการ ให้หน่วยแรงโอบรัคก่อนทางค้านข้างไปที่ 0.05 เท่าของ f' (กลุ่มที่ 3) พบว่า เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีก่า f' ที่เท่ากันแล้ว อัตราส่วน f' 0.005 (/ f' 0.0 (พิ่มขึ้นมากสุดในปลอกเหล็กที่มี ความหนาน้อย(3.2 mm) และมีแนวโน้มลคลงเรื่อยๆ เมื่อความ หนามีก่าเพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากก่าของการให้หน่วยแรง โอบรัคก่อนทางค้านข้างควรมีก่าที่สูงมากพอ โดยต้องพิจารณา ถึงความหนาของปลอกเหล็กและกำนึงถึงกวามสมบูรณ์ของรอย เชื่อมต่อของผนังในขั้นตอนของการให้หน่วยแรงโอบรัคก่อน ทางค้านข้าง ที่จะช่วยทำให้ปลอกเหล็กรองรับแรงคันเนื่องจาก การขยายตัวของกอนกรีตได้เพิ่มขึ้น

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบผลทดสอบที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัด ก่อนทางด้านข้างกับการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างไปที่ 0.05 เท่าของ f'...

ตัวอย่าง		f' _{cc}	$f'_{cc0.05C}$	$\int_{-\infty}^{1} \int_{-\infty}^{1} \int_{-\infty}^{1$
	$f_{cc,0f_{co}^{\prime}}^{\prime}$	$f_{cc,0.05f_{co}^{\prime}}^{\prime}$	$\overline{f_{cc,0f_{co}'}'}$	% [cc,0 f _{co})
SR18-3.2	45.29	48.21	1.06	6
SR18-4.5	54.23	55.74	1.03	3
SR18-6.0	61.31	61.95	1.01	1
SR25-3.2	47.59	52.33	1.10	10
SR25-4.5	59.90	62.61	1.05	5
SR25-6.0	69.72	71.71	1.03	E 3

5. บทสรุป

จากการทคสอบตัวอย่างทคสอบที่ถูก โอบรัคก่อนค้วยปลอก เหล็กโดยการให้หน่วยแรงโอบรัคก่อนทางค้านข้างพบว่า

พฤติกรรมในการรับแรงของด้วอข่างทดสอบแบ่งออกเป็น
 ช่วง คือช่วงพฤติกรรมแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น เมื่อ
 พิจารณาด้วอข่างทดสอบพบว่าจะมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจนถึง
 ก่าที่มีกำลังอัค 50-70% ของกำลังอัคประลัยสูงสุดและจากนั้นจะ
 เข้าสู่ช่วงพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น โดยพบพฤติกรรมอยู่สอง
 ลักษณะคือ Strain-softening และ Elastic-perfectly plastic ซึ่ง
 พฤติกรรมของด้วอย่างทดสอบในช่วงนี้จะขึ้นกับ กำลังอัค
 ประลัยของคอนกรีต(f'_o), ความหนาของปลอกเหล็ก(t)และ
 หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่กระทำต่อด้วอย่างทดสอบ
 และด้วอย่างทดสอบจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงก่อนเกิดการ
 วับดิ

2. สำหรับการวิบัติจะมีลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป การวิบัติ เกิดขึ้นโดยการขยายตัวออกทางด้านข้างที่บริเวณด้านบนและล่าง เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้น ปลอกเหล็กจะช่วยโอบรัดคอนกรีตที่อยู่ ภายในไม่ให้เกิดการวิบัติ ทำให้แกนกอนกรีตรับแรงได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ช่วงของเสาบริเวณดังกล่าวควร ถูกเสริมด้วยปลอกเหล็กที่มีปริมาณเหล็กที่มากพอ เพื่อให้มีกำลัง โอบรัดแกนกอนกรีตที่เพียงพอ

 ผลของการโอบรัคค้วยปลอกเหล็กในกรณีการให้หน่วย แรงกระทำทางค้านข้างที่ 0.05 f₆ พบว่า ความสามารถในการรับ แรงกคอัคในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจากกรณีไม่ให้ หน่วยแรงกระทำค้านข้าง ซึ่งเป็นไปตามลักษณะการเกิค

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 12-14 พฤษภาคม 2553

contining pressure ของเสาหน้าดัคสี่เหลี่ยมที่จะเกิดขึ้นน้อยทาง ด้านข้าง ทำให้การให้หน่วยแรงด้านข้างมีผลน้อยต่อการ โอบรัด และมีผลน้อยลงตามความหนาของปลอกเหล็ก แต่ทั้งนี้ก็เป็นการ บ่งบอกในเบื้องด้นว่า การเสริมกำลังเสาคอนกรีตเติมหน้าดัด สี่เหลี่ยมด้วยปลอกเหล็กโดยการให้แรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง มีผลต่อการโอบรัด

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัขใคร่งองอบคุณ มหาวิทขาลัยเทค โนโลขีสุรนารีที่ได้ให้ การสนับสนุนทุนวิจัข ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่อง " การพัฒนาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก และถูกโอบรัดก่อนภาขใต้แรงอัดในแนวแกน" ทั้งสถานที่คำเนิน การศึกษาและเครื่องมือในการทดสอบ

บรรณานุกรม

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

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 มหาวิทยาลัยมหิดล | 18 – 20 พฤษภาคม 2554



พฤติกรรมการรับแรงอัดของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมอัตุรัส ที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก Compressive Behaviors of Square Concrete Specimens Preconfined with Steel Jackets

ซุลีพร อุยยืนยงค์ ^{1*}, สิทธิชัย แสงอาทิตย์², จักษดา ธำรงวุฒิ ³, ศาสน์ สุขประเสริฐ ⁴ ^{1,2,3,4} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี aom_ce_sut@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการทดสอบคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก เพื่อ ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัด ลักษณะการวิบัติและผลของการโอบรัดก่อนที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของ คอนกรีต โดยตัวแปรหลักประกอบด้วยกำลังรับแรงอัดสูงสุด 3 ค่าคือ 18, 25 และ 32 MPa และความ หนาของปลอกเหล็ก 3 ค่า คือ 3.2, 4.5 และ 6.0 mm ในการศึกษานี้ ด้วอย่างถูกให้แรงโอบรัดกระทำ ทางด้านข้าง เพื่อก่อให้เกิด pre-confining pressure ต่อแกนคอนกรีต และถูกแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ ด้วอย่างทดสอบคอนกรีตอ้างอิง ด้วอย่างทดสอบคอนกรีตที่ไม่ถูกโอบรัดและห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก และตัวอย่างทดสอบคอนกรีตก็ถูกหน่วยแรงโอบรัดก่อ 0.1 _{ภิณ}์ ตัวอย่างทดสอบมีจำนวนทั้งสิ้น 63 ด้วอย่าง มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 150x150 mm และสูง 300 mm จากผลการทดสอบพบว่า ในช่วงแรกด้วอย่างทดสอบคอนกรีตมีพฤติกรรมรับแรงแบบเชิงเส้นจนถึงจุดที่ด้วอย่างทดสอบ คอนกรีตอ้างอิงรับแรงอัดสูงสุดหรือที่ค่าแรงกระทำประมาณ 60-80% ของกำลังรับแรงสูงสุดแรก และ ช่วงที่สองมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นตรง โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ elastic-perfectly plastic และ strain-softening สุดท้าย การวิบัติของด้วอย่างทดสอบเป็นแบบก่อยเป็นค่อยไปโดยมี ความเหนียวที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตอ้างอิง

ABSTRACT

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

[์] ซุลีพร อุยยืนยงค์ (Corresponding author)

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 มหาวิทยาลัยมหิดล I 18 – 20 พฤษภาคม 2554



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

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

1. บทน้ำ

เสาท่อเหล็กกรอกคอนกรีต (concrete-filled steel tube column) หรือเสา CFT เป็นเสา composite ที่ ได้จากการใช้ท่อเหล็กกลวงซึ่งมีหน้าตัดทรงกลมหรือหน้าตัดสี่เหลี่ยมเป็นแบบห่อห้มแกนของเสาซึ่ง อาจจะเป็นคอนกรีตล้วนหรือคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีข้อดีเหนือกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและเสา เหล็กโครงสร้าง ทั้งในด้านกำลัง (strength) ความแกร่ง (stiffness) ความเหนียว (ductility) และการดูด ซึมพลังงาน (energy absorption) Xiao et al. (2005) โดยทั่วไปเสา CFT ถูกแบ่งตามลักษณะการ ออกแบบให้ท่อเหล็กรองรับหน่วยแรงเป็น 2 แบบคือ 1.) ทำหน้าที่หลักเป็นเหล็กแกน (longitudinal reinforcement) รองรับหน่วยแรงในแนวแกนโดยเสา CFT จะถูกก่อสร้างอย่างต่อเนื่อง โดยมีความสูง หลายชั้นหรือสูงตลอดความสูงของอาการ ซึ่งเสา CFT แบบนี้จะรองรับแรงที่กระทำผ่านท่อเหล็กและ คอนกรีตร่วมกัน และ 2.) ทำหน้าที่หลักเป็นเหล็กเสริมในแนวขวาง (transverse reinforcement) โดย ้มีรายละเอียดของจุดเชื่อมต่อ การออกแบบ และการก่อสร้างที่ใกล้เคียงกับโครงสร้างคอนกรีตเสริม ี้เหล็ก ซึ่งแนวคิดของเสา CFT แบบที่สองได้ถูกนำเสนอโดย Tomii et al. (1985) โดยมีวัตถุประสงค์ หลักให้ท่อเหล็กดังกล่าวรองรับแรงกระทำตามขวางและโมเมนต์เนื่องจากแผ่นดินไหว ซึ่งเสาประเภทนี้ ้มักถูกเรียกว่า "Tubed column" โดยท่อเหล็กจะถูกออกแบบไม่ให้รองรับหน่วยแรงในแนวแกนโดยตรง โดยการเว้นซ่องว่างระหว่างท่อเหล็กกับท้องคานหรือจานรากที่ปลายทั้งสองของเสา ดังนั้น ภายใต้แรง กระทำ ท่อเหล็กทำหน้าที่เป็นปลอก (jacket) โอบรัดด่อแกนเสาคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งช่วยเพิ่มกำลัง รับหน่วยแรงในแนวแกนและความเหนียวของเสาให้สูงขึ้น สิทธิชัยและจักษดา (2550) ได้นำแนวคิดนี้ ไปประยุกต์ใช้ในการเสริมกำลังและช่อมแชมเสาคอนกรีต โดยนำเสนอผลการทดสอบที่กล่าวถึง พฤติกรรมโครงสร้างและลักษณะการวิบัติของ Tubed column หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่าภายใต้แรงอัด ในแนวแกนที่กระทำต่อแกนคอนกรีตโดยตรงและได้เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดสูงสุดกับสมการของ ACI Committee 440 ซึ่งพบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเสาคอนกรีตอ้างอิงแล้ว Tubed column มี

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 มหาวิทยาลัยมหิดล | 18 – 20 พฤษกาคม 2554



พฤติกรรมการรับแรงสูงสุดและความเหนียวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ แบบจำลองของ ACI ยังสามารถ ทำนายกำลังรับแรงอัดของเสาตัวอย่างได้ถูกต้องพอเพียง และเพื่อประสิทธิภาพของ Tubed column ที่สูงขึ้นควรเสริมท่อเหล็กที่มีปริมาณเหล็กมากพอ เพื่อให้มีกำลังโอบรัดแกนคอนกรีตที่เพียงพอ

จากการทบทวนงานวิจัยพบว่า รูปแบบการใช้ปลอกเหล็กในการโอบรัดเสาคอนกรีดหรือเสาคอนกรีด เสริมเหล็กภายนอก สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ทั้งในโครงสร้างที่ก่อสร้างใหม่และปรับปรุงและ/หรือ ซ่อมแซมโครงสร้างเดิมที่มีอยู่แล้ว โดยพบว่ากำลังและความเหนียวของเสา CFT และ Tube concrete column จะเพิ่มขึ้นเมื่อเสามีการโอบรัดทางด้านข้างที่พอเพียง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะเพิ่ม ประสิทธิภาพของการรับแรงอัดของเสาให้สูงขึ้น โดยการเพิ่มแรงโอบรัดทางด้านข้างแก่ตัวอย่าง ทดสอบโดยตรงแก่ปลอกเหล็กสู่แกนตอนกรีด โดยการพัฒนาระบบการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อน (preconfinement) แก่ตัวอย่างทดสอบคอนกรีตโดยใช้ปลอกเหล็ก (steel jacket) แบบใหม่ เพื่อศึกษาถึง พฤติกรรมการรับแรงอัดในแนวแกน และลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตที่โอบรัดด้วย ปลอกเหล็กและถูกให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง เพื่อเป็นแนวทางในการเสริมกำลังอีกรูปแบบ หนึ่งให้กับ Tubed column

2. ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบ

2.1 ตัวอย่างทดสอบ ปลอกเหล็กที่ใช้เป็น cold-formed steel carbon ที่ได้จากการพับแผ่นเหล็กสอง ส่วนมาประกอบกันเป็นหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัดุรัส โดยเป็นเหล็กตามมาตรฐานเหล็กโครงสร้างของ มอก. และคอนกรีตเป็นคอนกรีตผสมเสร็จ ผลิตโดยบริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด (CPAC) การ ทดสอบสมบัติของวัสดุกระทำตามมาตรฐานของ ASTM โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C39 และการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กตามมาตรฐาน ASTM E8 ตัวอย่างทดสอบมี ขนาด 150x150 mm และสูง 300 mm และมีรายละเอียดดังแสดงในภาพ ที่ 1 โดยชื่อตัวอย่างทดสอบถูกกำหนดในรูป WX-Y-Z ซึ่ง W คือประเภทของตัวอย่างทดสอบ (CR หมายถึงคอนกรีตอ้างอิง และ SR คือคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็ก) X หมายถึงค่ากำลังอัด ประลัยของคอนกรีต (ƒ_ =18, 25 และ 32 MPa) ที่อายุ 28 วัน Y คือความหนาของปลอกเหล็ก (*t*=3.2, 4.5 และ 6.0 mm) และ Z หมายถึงหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่กระทำต่อตัวอย่าง ทดสอบ (0 และ 0.1 f_c)) ตัวอย่างทดสอบจำนวน 63 ตัวอย่าง ถูกจำแนกเป็น 3 กลุ่มโดย กลุ่มที่ 1 เป็นคอนกรีตล้วนที่ไม่มีวัสดุโอบรัด (control column) จำนวน 9 ตัวอย่าง, กลุ่มที่ 2 คอนกรีตที่ถูก ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กโดยไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง 27 ตัวอย่าง และกลุ่มที่ 3 ้ตัวอย่างทดสอบถูกกระทำ โดยให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่ 0.1 f_c 27 ด้วอย่าง เมื่อทำ การให้หน่วยแรงมีค่าตามที่ได้คำนวณออกแบบไว้แล้ว ปลอกเหล็กของตัวอย่างทดสอบจะถูกเชื่อม ดิดกันโดยช่างเชื่อมไฟฟ้าที่มีความเชี่ยวชาญ



2.2 รายละเอียดการทดสอบ การทดสอบไข้เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ขนาด 2000 kN โดยแรงอัดในแนวแกนกระทำลงสู่แกนคอนกรีตของตัวอย่างทดสอบโดยตรงที่ปลายทั้งสองข้าง ผ่าน Steel bearing plate ขนาด 140x140 mm หนา 50 mm ดังแสดงในภาพที่ 2 การทดตัวใน แนวแกนถูกวัดโดยใช้ Linear Variable Differential Transducers (LVDTs) จำนวน 2 ตัว ติดตั้งที่ ปลายต้านบนบริเวณหัวกด จากนั้นเมื่อติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้าที่แล้ว ทำการ pre-loading ประมาณ 40% ของกำลังอัดประลัยของคอนกรีต และ unloading เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างหัวกดและ ด้วอย่างทดสอบ เริ่มทำการทดสอบโดยเพิ่มแรงกระทำอย่างช้าๆ เก็บข้อมูลการทดสอบโดยใช้ Data Acquisition System (DAQ) อย่างต่อเนื่อง จนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์

^{ขอ}าลัยเทคโนโลยี^ต

3. ผลการทดสอบ

3.1 พฤติกรรมการรับแรงอัด ในการศึกษาได้จำกัดการแสดงผลที่ต่าการหดด้ว 15 mm หรือ เทียบเท่าค่าความเครียด (strain) ในคอนกรีตที่ 0.050 mm/mm ซึ่งเป็นค่าความเครียดที่สูงกว่า ultimate compressive strain ของคอนกรีตประมาณ 18.75 เท่า ภาพที่ 3 และ 4 แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างหน่วยแรง (stress) และความเครียด (strain) ของด้วอย่างทดสอบ พบว่าพฤติกรรมของ ด้วอย่างทดสอบถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือพฤติกรรมแบบเส้นตรงและพฤติกรรมไร้เชิงเส้น เมื่อ พิจารณาด้วอย่างในกลุ่มที่ 1 และ 2 (ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง) ในช่วงแรก ความสัมพันธ์มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเริ่มรับแรงกระทำแกนคอนกรีตจะเป็นวัสดุหลักในการรับแรง และจะเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้าง ในช่วงนี้คอนกรีตมีการขยายตัวทางด้านข้างน้อยมาก เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีค่า Poisson's ratio ต่ำกว่าเหลัก โดยพฤติกรรมของด้วอย่างทดสอบ ทุกต้นเป็นแบบเชิงเส้นตรง (linear) จนถึงประมาณ 60-80% ของหน่วยแรงสูงสุด อย่างไรก็ตามเมื่อ พิจารณาด้วอย่างทดสอบในกลุ่มที่ 3 พบว่าพฤติกรรมในช่วงแรกของด้วอย่างทดสอบจะมีความชั้นสูง

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 มหาวิทยาลัยมหิดล | 18 – 20 พฤษกาคม 2554



มากกว่าตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และ 2 เนื่องจากตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีการให้หน่วยแรงโอบรัด ก่อนทางด้านข้างที่ 0.1 ƒ ซึ่งจะก่อให้เกิดการโอบรัดแกนคอนกรีตทำให้ด้วอย่างทดสอบมีความแกร่ง เพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 1 และภาพที่ 3 และ 4 เมื่อพิจารณา ƒ และความหนาปลอกเหล็กที่ เท่ากัน พบว่าค่าความแกร่งมีแนวโน้มสูงขึ้นตามหน่วยแรงโอบรัดที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาการให้ หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่เท่ากัน คำความแกร่งมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาปลอกเหล็กที่ เต๋ากัน พบว่าค่าความแกร่งมีแนวโน้มสูงขึ้นตามหน่วยแรงโอบรัดที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาการให้ หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่เท่ากัน คำความแกร่งมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาปลอกเหล็กมากขึ้น โดยที่ความแกร่งของตัวอย่างในกลุ่มที่ 3 มีค่าสูงกว่ากลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 1 ตามลำตับ จากนั้นในช่วงที่ สอง ค่าความชั่นของกราฟจะเริ่มลดลงเข้าสู่พฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้นตรง (nonlinear) คอนกรีตจะเกิด การแตกร้าวขนาดเล็กมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผลทำให้แกนคอนกรีตเกิดการขยายตัวทางด้านข้าง มากขึ้น เนื่องจาก Poisson's effect เป็นผลทำให้ความชั่นของกราฟเริ่มมีค่าลดลง ในขณะเดียวกัน แทนทอนกรีตจะมีการขยายตัวทางด้านข้างมากขึ้นและจะทำให้ความตันรัดรอบ (confining pressure) ระหว่างคอนกรีตและปลอกเหล็กเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นผลทำให้คอนกรีตมีพฤติกรรมกล้ายวัสดุ เหนียว(ductile)

นอกจากนี้ พฤติกรรมในช่วงที่สองของตัวอย่างทดสอบจะขึ้นอยู่กับกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ($f_{
m co}$) ความหนาของปลอกเหล็ก (t) และหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้าง โดยแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ 1.) ด้วอย่างทดสอบรองรับแรงกระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว จะมีความแกร่งประมาณศูนย์หรือ elastic-perfectly plastic ซึ่งแกนคอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวและเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอ ผนังของปลอกเหล็กที่ห่อหุ้มมีความแกร่งต่อการดัดในการด้านทานต่อการขยายตัวทางด้านข้างแกน คอนกรีตอย่างเพียงพอ จากนั้นคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวมากขึ้นและผนังของปลอกเหล็กจะเกิดการ โก่งเดาะเฉพาะที่และทำหน้าที่รัดแกนคอนกรีตให้สามารถรับแรงอัดที่คงที่ได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งเกิดขึ้น ในตัวอย่างทดสอบทุกกำลังอัดประลัยของคอนกรีตและปลอกเหล็กที่ความหนา 6.0 mm ทั้งหมด อีก ทั้งพฤติกรรมดังกล่าวยังพบในการให้หน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างที่ 0.1 ƒ__ ซึ่งเกิดขึ้นในปลอก เหล็กที่หนาปานกลาง (4.5 mm) และทุกกำลังอัดประลัยของคอนกรีต 2.) ตัวอย่างทดสอบเมื่อรับแรง กระทำได้สูงสุดถึงค่าหนึ่งแล้ว จะมีความแกร่งลดลงหรือ strain-softening ซึ่งแกนคอนกรีตเริ่มมีการ แตกร้าวและเกิดการขยายตัวทางด้านข้างที่มากพอแล้ว ผนังของปลอกเหล็กไม่มีความแกร่งต่อการดัด เพียงพอในการต้านทานต่อการขยายตัวทางด้านข้างของแกนคอนกรีต จากนั้น คอนกรีตจะเกิดการ .แตกร้าวมากขึ้นและผนังของปลอกเหล็กจะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่และปลอกเหล็กจะไม่สามารถรัด แกนคอนกรีตที่แตกร้าวให้มีกำลังรับแรงอัดได้เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบทุกกำลังอัดประลัย ของคอนกรีตและปลอกเหล็กที่ความหนา 3.2 และ 4.5 mm ทั้งหมด



การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 มหาวิทยาลัยมหิดล I 18 – 20 พฤษภาคม 2554



แบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure) เริ่มต้นจากการอัดแตกของคอนกรีตในบริเวณที่แรงอัด กระทำ ซึ่งทำให้แกนคอนกรีตเกิดการหดตัวในแนวแกนและการขยายตัวออกทางด้านข้างที่เพิ่มมาก ขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดแรงดันออกกระทำตั้งฉากกับผนังของปลอกเหล็กทางด้านข้างทำให้ปลอกเหล็กเกิด การโก่งเดาะของผนังโดยการโป่งออกของปลอกเหล็กซึ่งเกิดขึ้นมากสุดที่บริเวณกึ่งกลางความสุงใน ช่วงความสูง 100-150 mm ของตัวอย่างทดสอบดังแสดงในภาพที่ 5(ข)-(ค) เมื่อแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้น และปลอกเหล็กเกิดการขยายตัวออกทางจ้านข้างมากจนไม่สามารถโอบรัดดอนกรีตให้มีกำลังสูงขึ้นได้ ปลอกเหล็กจะช่วยรัดแกนคอนกรีตให้อัดตัวเข้าหากันและทำให้การ crushing ของแกนคอนกรีต เกิดขึ้นอย่างซ้า ๆ ซึ่งเป็นผลทำให้แกนคอนกรีตยังคงสามารถในการรับแรงอัดในแนวแกนได้อย่าง ้ต่อเนื่อง และทำให้แรงอัดที่เพิ่มขึ้นถ่ายไปยังปลอกเหล็ก เป็นผลทำให้มีการหดตัวในแนวแกนที่สูงมาก ก่อนที่จะเกิดการวิบัติโดยรวม ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและประหยัด ตัวอย่างทดสอบควรถูก เสริมด้วยปลอกเหล็กที่มีปริมาณเหล็กมากพอ เพื่อให้มีกำลังโอบรัดแกนคอนกรีตที่เพียงพอในบริเวณ ที่ผนังท่อเกิดการโป่งออก



(ก) คอนกรีตล้วน (ฃ) ตัวอย่างทดสอบคอนกรีต (ค) หน้าตัดตัวอย่างทดสอบคอนกรีต ภาพที่ 5 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

4. วิจารณ์ผล

^ยาลัยเทคโน หน่วยแรงอัดสูงสุดในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบและค่าความเครียดสูงสุด

ในการศึกษานี้ได้นิยามให้ f_m_ เป็นค่าหน่วยแรงใช้งานสูงสุดที่เกิดจากการลากเส้นขนานกับความชั้น ของกราฟที่ค่าความเครียด 0.002 mm/mm ตัดกับเส้นกราฟของตัวอย่างทดสอบ จาก column ที่ 4 ของตารางที่ 1 พบว่า เมื่อคอนกรีดมี 🎢 ที่เท่ากัน ด้วอย่างทดสอบที่ถูกโอบรัดด้วยปลอกเหล็กที่ หนา 3.2 mm มีค่าอัตราส่วน $f_{
m max}^{'}/f_{\infty}^{'}$ อยู่ในช่วง 1.69-2.57 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่ความหนา 4.5 และ 6.0 mm มีค่าอยู่ในช่วง 2.01-3.03 และ 2.41-3.38 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความหนาของปลอกเหล็ก และคอนกรีตมี f'_{∞} ที่เท่ากัน พบว่า อัตราส่วน $f'_{
m max}/f'_{
m co}$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการให้หน่วยแรงโอบ รัดก่อนทางด้านข้างที่สูงขึ้น (มีค่าอยู่ในช่วง 1.69-2.82 และ 1.86-3.38 ในกลุ่มที่ 2 และ 3 ตามลำดับ) อาจเนื่องมาจากการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างแก่ตัวอย่างทดสอบทำให้ปลอกเหล็กซิดกับแกน ้คอนกรีตมากกว่าที่ไม่มีการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้าง ดังนั้นจึงเกิดการโอบรัดระหว่างปลอก เหล็กและแกนคอนกรีตก่อนที่จะเริ่มรับแรงกระทำ เมื่อเริ่มรับแรงกระทำจึงสามารถรับแรงอัดใน แนวแกนได้สูงเพิ่มขึ้น



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

ตารางที่ 1 แสดงสรุปผลการทดสอบหน่วยแรงสูงสุดและกำกวามเกรียดสูงสุดของตัวอย่างทดสอบ

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

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นของการให้แรงโอบรัด พบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนจากไม่มีการให้ หน่วยแรงโอบรัดไปยังการให้หน่วยแรงโอบรัดที่ 0.1 ƒ่ มีก่าเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 17.0-56.0% ซึ่งเมื่อ กอนกรีตมี ƒ่ ที่เท่ากัน การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนกำลังของดัวอย่างทดสอบที่ถูกให้หน่วยแรงโอบรัด ก่อนทางด้านข้างที่ 0.1 ƒ่ มีแนวโน้มทำให้อัตราส่วนกำลังมีก่าสูงขึ้นและอัตราส่วนของกำลังดังกล่าว จะมีแนวโน้มลดลงตามกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 6



การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 มหาวิทยาลัยมหิดล I 18 – 20 พฤษภาคม 2554



ภาพที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วน Strengthening ratio $f_{
m max}^{'}/f_{\infty}^{'}$ ของตัวอย่างทดสอบ

โดยสรุปพบว่า ปลอกเหล็กที่มีความหนาเพิ่มขึ้นและการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างที่สูงขึ้น มีผล ทำให้ความสามารถในการรับแรงกระทำในแนวแกนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แต่อัตราการเพิ่มขึ้นจะลดลง เมื่อตัวอย่างทดสอบทำด้วยคอนกรีตที่มี f'_{∞} ที่สูงขึ้น และเพิ่มความสามารถในการรับแรงในช่วง พฤติกรรมแบบเส้นตรงให้สูงขึ้นจากเดิม ดังนั้นความหนาของปลอกเหล็กและการให้แรงโอบรัดทาง ด้านข้างที่เพิ่มขึ้น นอกจากจะช่วยทำให้กำลังรับแรงกระทำของตัวอย่างทดสอบสูงขึ้น ยังช่วยทำให้ ด้วอย่างทดสอบมีพฤติกรรมในช่วงเส้นตรงสูงขึ้นด้วย ^ยาลัยเทคโนโลยี^{สรุ}

5. สรุปผลการทดสอบ

้จากการคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็กภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. พฤติกรรมในการรับแรงแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือพฤติกรรมแบบเชิงเส้นและแบบไร้เชิงเส้น ้ตัวอย่างทดสอบจะมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจนถึงค่าที่มีกำลังอัด 60-80% ของกำลังอัดประลัยสูงสุด จากนั้นจะเข้าสู่ช่วงพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น พฤติกรรมดังกล่าวพบอยู่ 2 ลักษณะคือ Strain-softening และ Elastic-perfectly plastic พฤติกรรมในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (f'_{∞}) ้ความหนาของปลอกเหล็ก (t) และหน่วยแรงโอบรัดก่อนทางด้านข้างและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ สูงก่อนเกิดการวิบัติ

2. การวิบัติเกิดที่ค่าการหดตัวที่สูงมากและมีลักษณะแบบค่อยเป็นค่อยไป แสดงว่าตัวอย่างทดสอบ มีความเหนียวในแนวแกนที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างทดสอบอ้างอิง ซึ่งการวิบัติเกิดขึ้นโดย การขยายตัวออกทางด้านข้างและเกิดมากสุดที่บริเวณกึ่งกลางความสูงในช่วง 100-150 mm ของ

การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 มหาวิทยาลัยมหิดล | 18 – 20 พฤษกาคม 2554



ตัวอย่างทดสอบ เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นปลอกเหล็กจะช่วยโอบรัดคอนกรีตที่อยู่ภายในไม่ให้เกิดการ วิบัติ ทำให้แกนคอนกรีตรับแรงได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ช่วงของตัวอย่างทดสอบ บริเวณดังกล่าวควรถูกเสริมด้วยปลอกเหล็กที่มีปริมาณเหล็กที่มากพอ เพื่อให้มีกำลังโอบรัดแกน คอนกรีดที่เพียงพอ

3. ผลของการให้หน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างในเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจาก กรณีไม่ให้หน่วยแรงกระทำด้านข้าง ซึ่งเป็นไปตามลักษณะการเกิด confining pressure ของเสาหน้า ตัดสี่เหลี่ยมที่จะเกิดขึ้นน้อยทางด้านข้าง อย่างไรก็ตามความหนาที่เพิ่มขึ้นและการให้แรงโอบรัดทาง ด้านข้างมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดและความเหนียวมีค่าสูงขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย สถานที่ดำเนินการ ศึกษา และเครื่องมือในการทดสอบ ในโครงการวิจัยเรื่อง "*การพัฒนาเลาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูก ห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและถูกโอบรัดก่อนภายใต้แรงอัดในแนวแกน*"

เอกสารอ้างอิง

สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และจักษดา ธำรงวุฒิ, 2550. พฤติกรรมทางโครงสร้างของ Tubed Column หน้า ตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่า, เอกสารการประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, พิษณุโลก, 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2550, บทความ Vol.7 (STR):51-56

American Institute of Steel Construction, 1994. Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design (LRFD). 2nd Ed., Chicago.

Architectural Institute of Japan, 1997. Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design (LRFD). 2nd Ed., Chicago.

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

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

ประวัติผู้เขียน

นางสาวชุลีพร อุยยืนยงค์ เกิดเมื่อวันที่ 17 ธันวาคม พ.ศ.2524 ที่อำเภอเมือง จังหวัด มหาสารคาม ปัจจุบันมีภูมิลำเนาอยู่ที่อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษา ปีที่ 1 - 6 ที่ โรงเรียนเทศบาลสวนสนุก จังหวัดขอนแก่น ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1 - 6 ที่ โรงเรียน แก่นนครวิทยาลัย จังหวัดขอนแก่น และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) เมื่อ พ.ศ.2547 จากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หลังจากสำเร็จการศึกษา ในปี พ.ศ.2547 เข้าปฏิบัติงานตำแหน่ง "วิศวกร" ในหน่วยปฏิบัติ การวิจัยพัฒนาและบริการวิชาการด้านวิศวกรรมโยธา (Civil Engineering Research Development and Academic Service Unit) หรือ CRU เมื่อปี พ.ศ.2548 ระหว่างทำงานทำให้เกิดแรงจูงใจ ที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ทางด้านวิศวกรรมโครงสร้าง เพื่อเป็นการพัฒนาความรู้ และความสามารถให้กับตนเอง จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ควบคู่ไปกับการทำงานด้วย และได้มีโอกาสเดินทางไปศึกษาดูงาน ในด้าน Precast/Prestress Concrete ที่ Durastress Inc. มลรัฐฟลอริด้า สหรัฐอเมริกา ในปี พ.ศ.2549 และได้มีโอกาสเป็นผู้สอนปฏิบัติการในรายวิชาปฏิบัติการการสำรวจ (Surveying Laboratory) และรายวิชาปฏิบัติการทคสอบวัสดุ (Material Testing) ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยได้นำประสบการณ์ และความรู้ที่ได้จากการเป็นผู้สอนปฏิบัติการและวิจัยมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดี นอกจากนั้นได้มีโอกาสเป็นวิทยากรอบรมการใช้งานโปรแกรม AutoCAD แก่นายช่างขององก์การ บริหารส่วนตำบลจังหวัดนครราชสีมา ต่อมาในปี พ.ศ. 2552 เข้าทำงานในตำแหน่ง "อาจารย์" ประจำสาขาเทคโนโลยีการก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี ้จังหวัดอุบลราชธานี ซึ่งเป็นอีกหนึ่งประสบการณ์ที่ช่วยให้ผู้วิจัยได้นำเอาประสบการณ์และความรู้ ในการทำงานที่ผ่านมา มาประยุกต์ใช้ในงานสอนเพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้ที่มีให้แก่นักศึกษา ได้เป็นอย่างดียิ่ง

ระหว่างศึกษาระดับปริญญาโทมีบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ จำนวน 2 บทความ ดังต่อไปนี้ (1) ในงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15 (The 15th National Convention on Civil Engineering) และ (2) ในงานการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16 (The 16th National Convention on Civil Engineering) ดังปรากฏในภาคผนวก ค.