

เหล็กปลูกที่เหมาะสมสำหรับเสาคอนกรีตเสริมด้วยเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง



นายพัฒนเทพ เกรือชะเอม

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPROPRIATE TIES FOR CONCRETE COLUMNS REINFORCED WITH HIGH STRENGTH  
DEFORMED STEEL BARS



Mr.Pattanatep Kruechaem

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering  
Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

เหล็กปลอกที่เหมาะสมสำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง

โดย

นาย พัฒนเทพ เครือชะเอม

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วัฒนชัย สมิตธากร


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

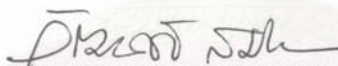
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี)



..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วัฒนชัย สมิตธากร)



..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. สันติสุข ปลุกสวัสดิ์)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นาย พัฒนเทพ เครือชะเอม : เหล็กปลอกที่เหมาะสมสำหรับเสาคอนกรีตเสริมด้วย  
เหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง  
อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. วัฒนชัย สมิทธากร, 89 หน้า.

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของเหล็กปลอกเดี่ยวที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดตามแนวแกนแบบไม่เอียงศูนย์ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีเหล็กขึ้นเป็นเหล็กข้ออ้อยธรรมดาและเหล็กข้ออ้อยแรงดึงสูง ส่วนเหล็กปลอกเดี่ยวใช้เหล็กข้ออ้อยธรรมดาที่มีระยะห่างต่างๆ กัน คือ 0.25, 0.175 และ 0.10 เมตร

ผลการทดสอบพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาตัวอย่างที่ใช้เหล็กขึ้นเป็นเหล็กข้ออ้อยธรรมดามีค่าใกล้เคียงกับเสาตัวอย่างที่เสริมด้วยเหล็กข้ออ้อยแรงดึงสูง เนื่องจากหน่วยการยึดหดตัวของเหล็กขึ้น ในขณะที่เสาตัวอย่างรับแรงอัดสูงสุดมีค่าไม่เกิน 0.002 ซึ่งหมายถึงการพัฒนาหน่วยแรงในเหล็กข้ออ้อยแรงดึงสูงนั้นยังมีค่าไม่ถึงจุดคราก และการที่เหล็กข้ออ้อยแรงดึงสูงไม่สามารถพัฒนากำลังได้ถึงจุดครากนั้น ทำให้กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของเสาตัวอย่างที่ใช้เหล็กข้ออ้อยแรงดึงสูงมีค่าน้อยกว่าสูตรที่คำนวณจากมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลังของว.ส.ท. ระยะห่างที่ต่างกันของเหล็กปลอกจะมีผลต่อเสาตัวอย่างภายหลังจากที่เสารับแรงอัดสูงสุดและคอนกรีตที่หุ้มอยู่โดยรอบแตกออกแล้ว โดยระยะห่างที่น้อยจะช่วยเพิ่มแรงโอบรัดด้านข้างให้มีค่ามาก ทำให้เสาตัวอย่างไม่วิบัติในทันทีแต่สามารถรับแรงอัดได้ต่อไปอีกระยะหนึ่งก่อนที่จะวิบัติเหล็กปลอกที่มีผลทำให้เสามีความเหนียวและเกิดแรงโอบรัดด้านข้างเพียงพอควมมีระยะห่างเท่ากับระยะห่างระหว่างเหล็กขึ้น

นอกจากนี้ ผลจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของเสาคอนกรีตที่ผสมเส้นใยเหล็กและเสริมด้วยเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง พบว่า หน่วยการยึดหดตัวของเหล็กขึ้น ในขณะที่เสาตัวอย่างรับแรงอัดสูงสุด มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ยังไม่เพียงพอที่เหล็กขึ้นจะพัฒนากำลังจนถึงจุดครากได้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนิสิต..... *พัฒน์เทพ*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *ดร. วัฒนชัย*

## 4770376221 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: TIED COLUMN, REINFORCED CONCRETE COLUMN, HIGH STRENGTH STEEL, CONCENTRIC LOADING, TIES SPACING

PATTANATEP KRUECHAEM: APPROPRIATE TIES FOR CONCRETE COLUMNS REINFORCED WITH HIGH STRENGTH DEFORMED STEEL BAR. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. WATANACHAI SMITTAKORN Ph.D., 89 pp.

This research aims to study the effects of ties on the axial load resisting behavior of reinforced concrete columns reinforced longitudinally with normal deformed bars and high strength deformed bars under concentric loading. Ties are normal deformed bars with spacings of 0.10, 0.175 and 0.25 m.

Results from the experiments have shown that the maximum load capacity of columns with longitudinal reinforcement as normal deformed bars are about the same as those reinforced with high strength deformed bars. The strains in the longitudinal steels when the columns reached the maximum capacity are lower than 0.002. Therefore, the stresses in the high strength deformed bars did not reach their yield points. As the result, the maximum capacity of the columns are less than the values computed from the formula given by E.I.T. standards. However, the influence of tie spacing exhibited after the columns reached their maximum capacity, and the spalling occurred . The closer the tie spacing increases the confinement, and prevents the sudden failure. Moreover, it is found that appropriate tie spacing, yielding enough ductility and confinement to the column, is approximately equal to the distance between the longitudinal bars.

Moreover, the result of mixing steel fiber into the concrete found that the strain of longitudinal bars at maximum load minimally increases, but it is not sufficient for developing yield strength of the longitudinal bar.

Department : Civil Engineering

Field of study : Civil Engineering

Academic year : 2007

Student's signature *Pattaratep*

Advisor's signature *W. Smit*



## กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการทางวิศวกรรมโยธา เหล็กปลอกที่เหมาะสมสำหรับเสาคอนกรีตเสริมด้วยเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง นิสิตผู้จัดทำขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนให้คำแนะนำและคำปรึกษาต่าง ๆ จนส่งผลให้การทํางานในครั้งนี้ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.วัฒนชัย สมิตถากร อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการดำเนินการทดลองงานวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งท่านคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.สันติสุข ปลุกสวัสดิ์ และ ผศ.ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี และ ผศ.ปิยะ รัตนสุบรรณ, อ.ดร.ประวิณ ชมปรีดา และ อ.ดร.วรรณสิริ พันธุ์ไธโร ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการเตรียมการ การทดสอบ รวมถึงการจัดทำข้อมูลรายงาน

ขอขอบคุณบริษัท เหล็กบูรพา อุตสาหกรรม จำกัด, บริษัท เอส อาร์ ไฟเบอร์ จำกัด และโรงงานผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด (โรงงานวังเพชรบูรณ์ 4,5) ที่เอื้อเฟื้อวัสดุที่ใช้สำหรับการวิจัยครั้งนี้และขอขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มอบทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ให้สำหรับงานวิจัยนี้ พร้อมทั้งขอขอบคุณ พี่สมบูรณ์ เชียงฉิน, นายณัฐ ภู่วโรดม, นายคุณฤดี ลิ้มปฐาภรณ์ รวมทั้งเพื่อนปริญญาโทที่ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือในระหว่างการเตรียมการทดสอบ และระหว่างการทดสอบ นอกจากนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณชูเกียรติ ฉิมรุ่ง, คุณสมพงษ์ ขำแจ้ง และคุณศิโรจน์ ถนอมพันธุ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ ทั้งในระหว่างการทดสอบและการเตรียมการทดสอบเป็นอย่างดี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	iv
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	v
กิตติกรรมประกาศ.....	vi
สารบัญ.....	vii
สารบัญรูป.....	viii
สารบัญตาราง.....	xiv
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 บทนำและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 งานวิจัยในอดีต.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	18
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	19
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	19
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	20
บทที่ 3 วิธีการทดสอบ	
3.1 ลักษณะเสาตัวอย่าง.....	28
3.2 การดำเนินงานวิจัย.....	32
3.3 ผลการทดสอบ.....	53
3.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	76
บทที่ 4 สรุปผลการทดลอง.....	82
รายการอ้างอิง.....	85
ภาคผนวก.....	87
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	89

## สารบัญรูป

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 รูปแสดงพื้นที่ประสิทธิผลของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทางด้านข้างในเสาคอนกรีต.....	3
รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดหดตัวของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดจากเหล็กปลอก.....	4
รูปที่ 1.3 รูปตัดของเสาคอนกรีตแสดงพื้นที่คอนกรีตที่ไม่ได้รับการโอบรัด.....	6
รูปที่ 1.4 แบบจำลองสำหรับหาพื้นที่คอนกรีตที่ไม่ได้รับการโอบรัด.....	6
รูปที่ 1.5 แสดงพื้นที่คอนกรีตที่ไม่ได้รับการโอบรัดเนื่องจากระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก.....	7
รูปที่ 1.6 แบบจำลองสามมิติแสดงหน้าตัดวงกตของพื้นที่คอนกรีตที่ได้รับการโอบรัด.....	7
รูปที่ 1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดหดตัวของคอนกรีตกำลังสูงที่มีการโอบรัด.....	12
รูปที่ 1.8 แสดงแบบจำลอง 3 มิติ ในการหาหน่วยแรงการโอบรัดด้านข้างของเหล็กปลอก.....	15
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและหน่วยการยืดหดตัวของเหล็กเสริม.....	20
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตกำลังอัดต่างๆ.....	21
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและการหดตัวของคอนกรีตและเหล็กเสริม.....	23
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและการยืดตัวของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก.....	24
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก.....	27
รูปที่ 3.1 แสดงขนาดของเสาคอนกรีตและการเสริมเหล็กในเสาคอนกรีตที่จะทำการทดสอบ.....	28
รูปที่ 3.2 แสดงการเสริมเหล็กปลอกของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่จะทำการทดสอบ.....	29
รูปที่ 3.3 แสดงขนาดของเสาคอนกรีตและการเสริมเหล็กในเสาคอนกรีตที่จะทำการทดสอบ.....	30
รูปที่ 3.4 แบบไม้สำหรับหล่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	32
รูปที่ 3.5 เหล็กที่ใช้ในการทดสอบ.....	33
รูปที่ 3.6 การเตรียมเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบ.....	34
รูปที่ 3.7 การเตรียมผิวบริเวณที่จะติด หน่วยการยืดหดตัว gauge ให้เรียบ.....	35
รูปที่ 3.8 ผิวที่ขัดเรียบแล้ว.....	35
รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ที่ใช้ในการติด หน่วยการยืดหดตัว gauge.....	36
รูปที่ 3.10 การทำความสะอาด.....	36
รูปที่ 3.11 การทาน้ำมันแบบไม้.....	36



รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.12 การร้อยสาย หน่วยการยึดหดตัว gauge.....	37
รูปที่ 3.13 การจัดเรียงแบบ.....	37
รูปที่ 3.14 การใช้รถเข็น.....	37
รูปที่ 3.15 พลับในการเทคอนกรีต.....	37
รูปที่ 3.16 การจี้คอนกรีต.....	38
รูปที่ 3.17 การฉาบผิวคอนกรีต.....	38
รูปที่ 3.18 การทำ Slump Test.....	38
รูปที่ 3.19 การเทคอนกรีตลงในแบบหล่อลูกปูน.....	38
รูปที่ 3.20 ตัวอย่างที่เทเสร็จเรียบร้อยแล้ว.....	38
รูปที่ 3.21 ตัวอย่างที่เทเสร็จเรียบร้อยแล้ว.....	38
รูปที่ 3.22 การแกะแบบ.....	39
รูปที่ 3.23 การแกะแบบ.....	39
รูปที่ 3.24 การบ่มตัวอย่างด้วยการหุ้มพลาสติก.....	39
รูปที่ 3.25 การบ่มตัวอย่างด้วยการหุ้มพลาสติก.....	39
รูปที่ 3.26 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบ.....	40
รูปที่ 3.27 หน่วยการยึดหดตัว gauge ก่อนการทดสอบ.....	40
รูปที่ 3.28 หน่วยการยึดหดตัว gauge หลังการทดสอบ.....	40
รูปที่ 3.29 การแสดงผลจากเครื่อง Instron Universal Testing Machine.....	41
รูปที่ 3.30 การแสดงผลจาก เครื่องData Logger.....	41
รูปที่ 3.31 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของลูกปูน.....	41
รูปที่ 3.32 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของลูกปูน.....	41
รูปที่ 3.33 การจัดตำแหน่งตัวอย่างเสาไม้ให้มีการเอียงศูนย์.....	42
รูปที่ 3.34 การจัดเตรียมเครื่อง Data Logger.....	43
รูปที่ 3.35 เสาตัวอย่างก่อนการทดสอบ.....	43
รูปที่ 3.36 เสาตัวอย่างหลังการทดสอบ.....	43
รูปที่ 3.37 การบันทึกข้อมูลด้วย Data Logger.....	43
รูปที่ 3.38 การบันทึกข้อมูลด้วยการสังเกต.....	43
รูปที่ 3.39 แบบไม้สำหรับหล่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	44
รูปที่ 3.40 เหล็กที่ใช้ในการทดสอบ.....	45

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.41 การติด strain gauge ให้เรียบร้อย .....	46
รูปที่ 3.42 รูปตัวอย่างเส้นใยเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ .....	47
รูปที่ 3.43 การจี้คอนกรีต .....	48
รูปที่ 3.44 การทำ Slump Test .....	48
รูปที่ 3.45 การเทคอนกรีตลงในแบบหล่อลูกปูน .....	48
รูปที่ 3.46 การบ่มตัวอย่างด้วยการหุ้มพลาสติก .....	49
รูปที่ 3.47 การบ่มลูกปูนด้วยการแช่น้ำ .....	49
รูปที่ 3.48 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของลูกปูน .....	50
รูปที่ 3.49 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของลูกปูน .....	50
รูปที่ 3.50 การจัดตำแหน่งตัวอย่างเสาไม้ให้มีการเอียงศูนย์ .....	51
รูปที่ 3.51 การจัดเตรียมเครื่อง Data Logger .....	51
รูปที่ 3.52 เสาตัวอย่างก่อนการทดสอบ .....	52
รูปที่ 3.53 เสาตัวอย่างหลังการทดสอบ .....	52
รูปที่ 3.54 การบันทึกข้อมูลด้วย Data Logger .....	52
รูปที่ 3.55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 1-3 เหล็กยื่นใช้เหล็ก SD40 ระยะห่างเหล็กปลอก 10.0 ซม. ....	53
รูปที่ 3.56 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 1 .....	54
รูปที่ 3.57 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 1 .....	54
รูปที่ 3.58 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 2 .....	54
รูปที่ 3.59 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 2 .....	54
รูปที่ 3.60 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 3 .....	55
รูปที่ 3.61 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 3 .....	55
รูปที่ 3.62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ Strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีต หมายเลข 5-6 โดยเหล็กยื่นใช้เหล็ก SD40 ระยะห่างเหล็กปลอก 17.5 ซม. ....	55
รูปที่ 3.63 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 4 .....	56
รูปที่ 3.64 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 4 .....	56
รูปที่ 3.65 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 5 .....	56
รูปที่ 3.66 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 5 .....	57
รูปที่ 3.67 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 6 .....	57
รูปที่ 3.68 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 6 .....	57

รูปที่ 3.69 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีต หมายเลข 7-9 โดยเหล็กยื่นใช้เหล็ก SD40 ระยะห่างเหล็กปลอก 25.0 ซม. ....	58
รูปที่ 3.70 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 7 .....	58
รูปที่ 3.71 แสดงการเริ่มเกิดการ crack ของตัวอย่างเสาหมายเลข 8 .....	58
รูปที่ 3.72 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 9 .....	59
รูปที่ 3.73 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 9 .....	59
รูปที่ 3.74 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีต หมายเลข 10-12 โดยเหล็กยื่นใช้เหล็ก SD50 ระยะห่างเหล็กปลอก 10.0 ซม. ....	59
รูปที่ 3.75 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 10 .....	60
รูปที่ 3.76 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 11 .....	60
รูปที่ 3.77 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 11 .....	60
รูปที่ 3.78 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีต หมายเลข 13-15 โดยเหล็กยื่นใช้เหล็ก SD50 ระยะห่างเหล็กปลอก 17.5 ซม. ....	61
รูปที่ 3.79 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 13 .....	61
รูปที่ 3.80 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 13 .....	61
รูปที่ 3.81 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 14 .....	62
รูปที่ 3.82 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 14 .....	62
รูปที่ 3.83 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 15 .....	62
รูปที่ 3.84 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 15 .....	62
รูปที่ 3.85 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีต หมายเลข 16-18 โดยเหล็กยื่นใช้เหล็ก SD50 ระยะห่างเหล็กปลอก 25.0 ซม. ....	63
รูปที่ 3.86 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 16 .....	63
รูปที่ 3.87 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 17 .....	63
รูปที่ 3.88 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 17 .....	64
รูปที่ 3.89 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 18 .....	64
รูปที่ 3.90 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 18 .....	64
รูปที่ 3.91 แสดงการเปรียบเทียบกำลังการรับแรงอัดระหว่างการทดสอบกับการคำนวณ .....	65
รูปที่ 3.92 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ strain ของลูกปูนหมายเลข 8-9 .....	66
รูปที่ 3.93 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และอายุของลูกปูน .....	67
รูปที่ 3.94 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ strain ของเหล็กเส้นข้ออ้อยธรรมดา .....	67

รูปที่ 3.95 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ strain ของเหล็กเส้นข้ออ้อยธรรมดา ในช่วงอิลาสติก.....	68
รูปที่ 3.96 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ strain ของเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดิ่งสูง.....	68
รูปที่ 3.97 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ strain ของเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดิ่งสูง ในช่วงอิลาสติก.....	69
รูปที่ 3.98 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 1-3 ใช้การผสมเส้นใยเหล็ก 1.5% โดยปริมาตร ระยะห่างเหล็กปลอก 17.5 ซม.....	69
รูปที่ 3.99 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 1 .....	70
รูปที่ 3.100 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 1.....	70
รูปที่ 3.101 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 2.....	71
รูปที่ 3.102 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 2.....	71
รูปที่ 3.103 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 3.....	71
รูปที่ 3.104 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 3.....	71
รูปที่ 3.105 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 1-3 ใช้คอนกรีตธรรมดา ระยะห่างเหล็กปลอก 17.5 ซม.....	72
รูปที่ 3.106 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 4 .....	72
รูปที่ 3.107 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 4.....	72
รูปที่ 3.108 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 5.....	73
รูปที่ 3.109 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 5.....	73
รูปที่ 3.110 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 6.....	73
รูปที่ 3.111 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 6.....	73
รูปที่ 3.112 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ strain ของลูกปูนหมายเลข 2 และหมายเลข 4.....	75
รูปที่ 3.113 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีต ที่มีระยะห่างของเหล็กปลอก 25.0 ซม.....	76
รูปที่ 3.114 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีต ที่มีระยะห่างของเหล็กปลอก 17.5 ซม.....	77
รูปที่ 3.115 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีต ที่มีระยะห่างของเหล็กปลอก 10.0 ซม.....	77

รูปประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.116 แสดงเหล็กยื่นตัวอย่างที่ 18 หลังทดสอบ.....	78
รูปที่ 3.117 แสดงเหล็กยื่นตัวอย่างที่ 1 หลังทดสอบ.....	78
รูปที่ 3.118 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีต เสริมเส้นใยเหล็ก.....	80
รูปที่ 3.119 แสดงคอนกรีตหุ้มของเสาตัวอย่างที่ 3 หลังการทดสอบ.....	80
รูปที่ 3.120 เสาตัวอย่างที่ 4 หลังการทดสอบ.....	81

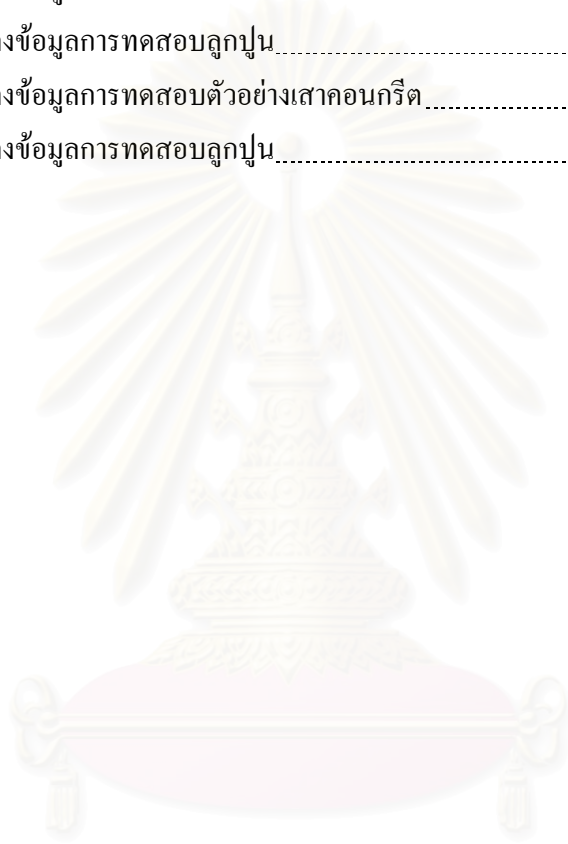


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงกำลังและเปอร์เซ็นต์หลักของเสาตัวอย่างที่จะทำการทดสอบ.....	29
ตารางที่ 3.2 แสดงกำลังและเปอร์เซ็นต์หลักของเสาตัวอย่างที่จะทำการทดสอบ.....	31
ตารางที่ 3.3 แสดงข้อมูลการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีต.....	65
ตารางที่ 3.4 แสดงข้อมูลการทดสอบลูกปูน.....	66
ตารางที่ 3.5 แสดงข้อมูลการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีต.....	74
ตารางที่ 3.6 แสดงข้อมูลการทดสอบลูกปูน.....	74



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

เพื่อให้การศึกษาใน โคร่งงานนี้เป็นไปอย่างสัมฤทธิ์ผลจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาทำความเข้าใจพื้นฐานในเรื่องของที่มา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของการศึกษา ขั้นตอนวิธีการดำเนินงาน ตลอดจนประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับก่อนตามลำดับดังต่อไปนี้

### 1.1 ที่มา

ปัญหาที่พบบ่อยสำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อต้องแบกรับแรงอัดมากๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานในอาคารสูง เสาจะต้องมีขนาดใหญ่และใช้ปริมาณเหล็กเสริมจำนวนมาก ซึ่งนอกจากจะทำให้ทำงานลำบากมากขึ้นแล้ว ยังทำให้ไม่ประหยัดและเสียพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารอีกด้วย ฉะนั้น การบรรเทาปัญหาดังกล่าวอาจทำได้โดยใช้เหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูงเสริมในเสาคอนกรีต

จากผลการวิจัยที่ผ่านมา [1] เมื่อทดสอบการรับแรงอัดบรรทุกสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่เป็นเสาสั้น เสริมเหล็กปลอกเดี่ยวตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง รับแรงอัดตามแนวแกน (ไม่มีการเอียงศูนย์) และเสริมเหล็กยื่น 2 ชนิด คือ เหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูงและเหล็กเส้นข้ออ้อยธรรมดา พบว่าการรับแรงอัดสูงสุดของเสาตัวอย่างทั้งหมดเกิดขึ้นเมื่อเหล็กมีหน่วยการยึดหดตัวประมาณ 0.002 แสดงว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูงนั้นยังไม่ถึงจุดคราก เนื่องจากหน่วยแรงของเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูงจะถึงจุดคราก เมื่อมีหน่วยการยึดหดตัวประมาณ 0.0035 ดังนั้น ทำให้แรงอัดสูงสุดของเสาเสริมเหล็กยื่นทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่าการเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวตามมาตรฐาน ว.ส.ท. [2] นั้นไม่เหมาะสมกับเสาสั้นเสริมเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง งานวิจัยนี้จึงเกิดขึ้น เพื่อศึกษาผลของเหล็กปลอกเดี่ยวที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดตามแนวแกนไม่เอียงศูนย์ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีเหล็กยื่นเป็นเหล็กข้ออ้อยธรรมดาและเหล็กข้ออ้อยแรงดึงสูง ส่วนเหล็กปลอกใช้เหล็กข้ออ้อยธรรมดาและมีระยะห่างต่างๆ กัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 1.2 งานวิจัยในอดีต

### 1.2.1 การเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเส้น

- **Somes** [3] ได้ศึกษาผลของการโอบรัดคอนกรีตโดยเหล็กปลอก โดยทำการทดสอบเสาคอนกรีตรูปตัดสี่เหลี่ยมเสริมด้วยเหล็กปลอก ภายใต้แรงอัดตามแนวแกนไม่มีการเอียงศูนย์ ที่ได้พิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อการโอบรัดคอนกรีตคือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกและระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อเสาคอนกรีตมีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกและพื้นที่หน้าตัดของเหล็กปลอกที่เหมาะสม จะทำให้เสาคอนกรีตสามารถรับแรงอัดได้มากขึ้นและเสาคอนกรีตจะมีความเหนียวเพิ่มขึ้น ซึ่งความสามารถในการรับแรงอัดของเสาที่มากขึ้นจะแปรผันตรงกับพื้นที่ของเหล็กปลอกและจะแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบนี้จะสอดคล้องกับสมการหาความสามารถในการรับแรงอัดของคอนกรีตในแกนของเสาคอนกรีตที่เสริมเหล็กปลอก ของ Blume, Newmark และ Corning ทั้งนี้ในการทดสอบพิจารณาปัจจัยแค่ 2 อย่างเท่านั้น ยังไม่รวมปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อกำลังของตัวอย่างคอนกรีต

สมการหาลำดับของคอนกรีตในแกนของเสาคอนกรีตรูปตัดสี่เหลี่ยมเสริมด้วยเหล็กปลอก โดยพิจารณาผลของการโอบรัดทางด้านข้าง ของ Blume, Newmark และ Corning ดังสมการที่ 1.1

$$f_c = 0.85 f'_c + \frac{4.1 f_y}{a} (A_{sb}) \left( \frac{1}{s} \right) \quad (1.1)$$

โดยที่

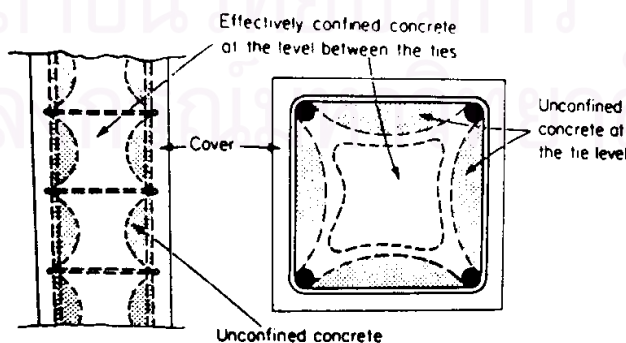
- $f_c$  เป็นกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่มีการโอบรัด (psi)
- $f'_c$  เป็นกำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอก (psi)
- $f_y$  เป็นกำลังที่จุดครากของเหล็กปลอก (psi)
- $a$  เป็นความยาวของขาเหล็กปลอกด้านที่ยาวกว่า (in)
- $A_{sb}$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของขาเหล็กปลอก ( $\text{in}^2$ )
- $s$  เป็นระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก (in)

- **Burdette และ Hilsdorf** [4] ได้ศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตรูปตัดวงกลมและรูปตัดสี่เหลี่ยมเสริมเหล็กปลอกลักษณะต่างๆ ภายใต้แรงอัดตามแนวแกนไม่มีการเอียงศูนย์ จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า ในเสาคอนกรีตรูปตัดวงกลมเสริมด้วยเหล็กปลอก จะเกิดแรงโอบรัดทางด้านข้างทั่วพื้นที่ในแกนเสา จึงทำให้เสาสามารถรับแรงอัดตามแนวแกนได้มากขึ้นและมีความเหนียวเพิ่มขึ้น ส่วนเสาคอนกรีตรูปตัดสี่เหลี่ยมเสริมด้วยเหล็กปลอกนั้นจะเกิดแรงโอบรัดด้านข้างที่บริเวณมุมของเสาเท่านั้น ทำให้เสารับแรงอัดตามแนวแกนได้เท่าเดิมและความเหนียวของเสาคอนกรีตไม่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อลดระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกของเสาคอนกรีต จะทำให้เสาคอนกรีตมีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น แต่ความสามารถในการรับแรงอัดตามแนวแกนจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

- **Park และ Paulay** [5] กล่าวว่าในเสาคอนกรีตรูปตัดสี่เหลี่ยมเสริมด้วยเหล็กปลอกที่มีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกมาก เมื่อรับแรงอัดสูงสุดตามแนวแกน เสาจะเกิดการวิบัติทันที เนื่องจากคอนกรีตจะแตกออกทางด้านข้างและเหล็กยื่นจะโค้งคาะที่บริเวณช่วงระหว่างเหล็กปลอก ส่วนในเสาคอนกรีตรูปตัดวงกลมเสริมด้วยเหล็กปลอก เมื่อรับแรงอัดสูงแล้วเสาจะไม่วิบัติทันที เนื่องจากเหล็กปลอกจะทำหน้าที่ป้องกันการโค้งคาะของเหล็กยื่นและด้านทานการเบ่งของคอนกรีตที่อยู่ในแกนเสา จึงทำให้เสาสามารถรับแรงอัดสูงสุดตามแนวแกนได้มากขึ้นและมีความเหนียวเพิ่มขึ้น

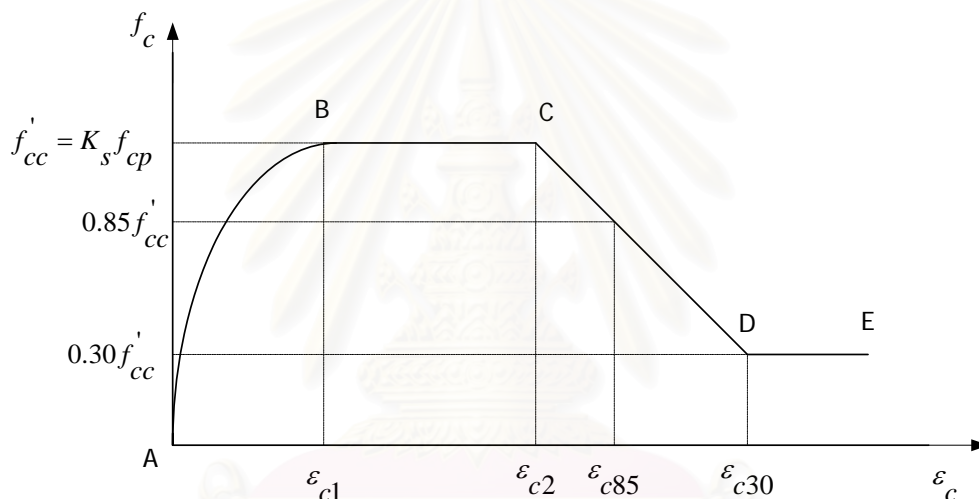
จากผลการทดสอบเสาคอนกรีตรูปตัดสี่เหลี่ยมเสริมด้วยเหล็กปลอกที่มีระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกน้อยๆ พบว่าเสาที่ทดสอบจะรับแรงอัดสูงสุดตามแนวแกนได้มากขึ้นและมีความเหนียวเพิ่มขึ้น แต่จะไม่เท่ากับเสาคอนกรีตรูปตัดวงกลมเสริมด้วยเหล็กปลอก เนื่องจากเหล็กปลอกของเสารูปตัดสี่เหลี่ยมจะให้แรงโอบรัดด้านข้างแก่คอนกรีตที่อยู่ในแกนเสาเฉพาะที่บริเวณมุมเท่านั้น แต่เหล็กปลอกในเสารูปตัดวงกลม จะให้แรงโอบรัดด้านข้างสม่ำเสมอทุกทิศทางของพื้นที่รอบแกนเสา

- **Sheikh และ Uzumer** [6] ได้ศึกษาความสามารถในการรับแรงอัดและความเหนียวของเสาคอนกรีตรูปตัดสี่เหลี่ยมเสริมด้วยเหล็กปลอก โดยทำการทดสอบเสาคอนกรีตสี่เหลี่ยมเสริมด้วยเหล็กเสริมทางยาวและเหล็กปลอกลักษณะต่างๆ จำนวน 24 ตัวอย่าง ภายใต้แรงอัดตามแนวแกนไม่มีการเยื้องศูนย์ จากผลการทดสอบพบว่า พื้นที่ประสิทธิผลของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทางด้านข้างจะน้อยกว่าพื้นที่ทั้งหมดในแกนเสาที่วัดจากเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอกทั้งสองฝั่งดังรูปที่ 1.1 และพื้นที่ประสิทธิผลของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทางด้านข้างจะขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเหล็กปลอกต่อปริมาตรของแกนคอนกรีต ลักษณะการจัดเรียงของเหล็กเสริมตามยาว ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก และลักษณะการจัดเรียงของเหล็กปลอก โดยเสาที่มีเหล็กปลอกและเหล็กเสริมทางยาว ในปริมาณที่เหมาะสม จะสามารถพัฒนากำลังของคอนกรีตในแกนเสาให้มีค่าถึง 1.70 เท่าของเสาที่ไม่ได้เสริมเหล็ก เนื่องจากแกนของเสาคอนกรีตได้รับการโอบรัดทางด้านข้างจากเหล็กปลอกและการกระจายแรงของเหล็กเสริมทางยาว



รูปที่ 1.1 รูปแสดงพื้นที่ประสิทธิผลของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทางด้านข้างในเสาคอนกรีต [6]

- Sheikh และ Uzumer [7] ได้เสนอเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดหดตัวของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดจากเหล็กปลอก ที่ได้จากการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงอัดตามแนวแกนที่ไม่มีการเอียงศูนย์ โดยคอนกรีตจะถูกโอบรัดให้อยู่ภายในเส้นรอบรูปของเหล็กปลอกรูปสี่เหลี่ยม พื้นที่ประสิทธิผลของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดจะขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเหล็กปลอกต่อปริมาตรของแกนคอนกรีต ลักษณะการจัดเรียงของเหล็กเสริมตามยาว ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก และลักษณะการจัดเรียงของเหล็กปลอก ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดหดตัวของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดจากเหล็กปลอกแสดงได้ดังรูปที่ 1.2 โดยแรงดึงของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดจะเพิ่มขึ้นตามการยืดหดตัวที่เพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์ของเส้นโค้งพาราโบลา จนถึงจุดที่มีแรงดึงสูงสุด ( $f'_{cc}$ ) จากนั้นแรงดึงจะมีค่าคงที่และจะมีค่าตกลงตามการยืดหดตัวที่เพิ่มขึ้น โดยช่วงนี้ความสัมพันธ์ของกราฟจะเป็นเส้นตรงจนถึงแรงดึงที่มีค่าเป็น 30%ของแรงดึงสูงสุด



รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดหดตัวของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดจากเหล็กปลอก [7]

สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดหดตัวแบ่งเป็นได้เป็น 4 ช่วงดังสมการที่ 1.2 – 1.13

1. ช่วง AB:  $\epsilon_c \leq \epsilon_{c1}$

$$f_c = f'_{cc} \left[ \frac{2\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} \right)^2 \right] \quad (1.2)$$

2. ช่วง BC:  $\epsilon_{c1} < \epsilon_c \leq \epsilon_{c2}$

$$f_c = f'_{cc} \quad (1.3)$$

3. ช่วง CD:  $\epsilon_{c2} < \epsilon_c \leq \epsilon_{c30}$

$$f_c = f'_{cc} [1 - Z_2 (\epsilon_c - \epsilon_{c2})] \quad (1.4)$$

4. ช่วง DE:  $\epsilon_c > \epsilon_{c30}$

$$f_c = 0.3 f'_{cc} \quad (1.5)$$



โดยที่

$$f'_{cc} = K_s f'_{cp} \quad (1.6)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{c1} &= 0.55 K_s f'_c (10^{-6}) \text{ สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดประมาณ 4000 psi} \\ &= 0.0022 K_s \quad \text{สำหรับคอนกรีตทั่วไป} \end{aligned} \quad (1.7)$$

$$\frac{\varepsilon_{c2}}{\varepsilon_{c0}} = 1 + \frac{0.81}{C} \left[ 1 - 5 \left( \frac{s}{B} \right)^2 \right] \frac{\rho_s f'_s}{\sqrt{f'_c}} \quad (1.8)$$

$$\varepsilon_{c85} = 0.225 \rho_s \sqrt{\frac{B}{S}} + \varepsilon_{c2} \quad (1.9)$$

$$Z_2 = \frac{1.0}{1.5 \rho_s \sqrt{\frac{B}{S}}} \quad (1.10)$$

$$K_s = 1 + \frac{B^2}{10.58 P_{occ}} \left[ \left( 1 - \frac{nC^2}{5.5B^2} \right) \left( 1 - \frac{s}{2B} \right)^2 \right] \sqrt{\rho_s f'_s} \quad (1.11)$$

$$P_{occ} = K_p f'_c (A_{co} - A_s) \quad (1.12)$$

$$\varepsilon_{co} = 0.0022 \quad (1.13)$$

$f'_{cp}$  เป็นกำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด =  $K_p f'_c$

$f'_c$  เป็นกำลังอัดของคอนกรีต (psi)

$K_p$  เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัดต่อคอนกรีตที่มีการโอบรัด

$A_{co}$  เป็นพื้นที่ของแกนคอนกรีตวัดระหว่างกึ่งกลางของเหล็กปลอก (in<sup>2</sup>)

$A_s$  เป็นพื้นที่ของเหล็กเสริมตามยาว (in<sup>2</sup>)

$B$  เป็นความกว้างของเหล็กปลอกโดยวัดระหว่างกึ่งกลางของเหล็กเสริม (in)

$C$  เป็นระยะที่วัดระหว่างเหล็กเสริมตามยาว (in)

$f'_s$  เป็นหน่วยแรงครากที่เกิดในเหล็กปลอก (psi)

$s$  เป็นระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก (in)

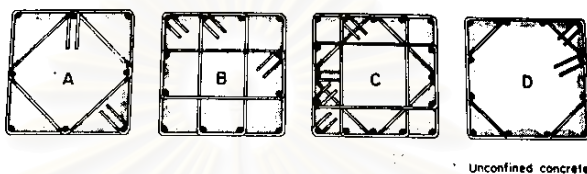
$\rho_s$  เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเหล็กเสริมต่อปริมาตรของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัด โดยคิดจากเส้นรอบนอกของเหล็กปลอก

$n$  เป็นจำนวนเหล็กเสริมตามยาว

พร้อมได้เสนอการหาพื้นที่ประสิทธิผลพร้อมและแสดงแบบจำลองที่แสดงถึงพื้นที่ประสิทธิผลที่หน้าตัดวงกต ดังนี้

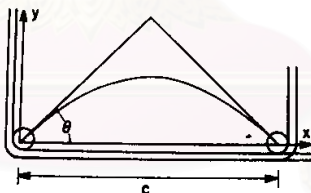
- พิจารณาผลที่เกิดจากการจัดเรียงเหล็กปลอก

การเพิ่มขึ้นของกำลังคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดนั้น จะแปรผันตรงกับพื้นที่คอนกรีตประสิทธิผลที่ได้รับการโอบรัด โดยพื้นที่นี้จะน้อยกว่าพื้นที่ของแกนคอนกรีตวัตรระหว่างกึ่งกลางของเหล็กปลอก ซึ่งเราสามารถคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ประสิทธิผลที่ได้รับการโอบรัดต่อพื้นที่ของแกนคอนกรีตวัตรระหว่างกึ่งกลางของเหล็กปลอก โดยอัตราส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับการจัดเรียงเหล็กปลอก ดังรูปที่ 1.3 โดยพื้นที่ที่แรงเงา คือ พื้นที่คอนกรีตที่ไม่ได้รับการโอบรัด



รูปที่ 1.3 รูปตัดของเสาคอนกรีตแสดงพื้นที่คอนกรีตที่ไม่ได้รับการโอบรัด [7]

เนื่องจากการที่จะหาพื้นที่คอนกรีตประสิทธิผลที่ได้รับการโอบรัดที่แท้จริงนั้นเป็นไปได้ยาก เราจึงนำพื้นที่ทั้งหมดของแกนคอนกรีตลบด้วยพื้นที่คอนกรีตที่ไม่ได้รับการโอบรัดตามรูปที่ 1.4 จึงได้พื้นที่คอนกรีตประสิทธิผลที่ได้รับการโอบรัดโดยประมาณ



รูปที่ 1.4 แบบจำลองสำหรับหาพื้นที่คอนกรีตที่ไม่ได้รับการโอบรัด [7]

จากแบบจำลองในรูปที่ 1.4 เราสามารถหาพื้นที่คอนกรีตประสิทธิผลที่ได้รับการโอบรัดโดยประมาณได้จากความสัมพันธ์

$$A_{co} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i^2}{\alpha}$$

โดยที่

$A_{co}$  เป็นพื้นที่ของแกนคอนกรีตวัตรระหว่างกึ่งกลางของเหล็กปลอก ( $\text{in.}^2$ )

$C$  เป็นระยะที่วัตรระหว่างเหล็กเสริมทางยาว ( $\text{in.}$ )

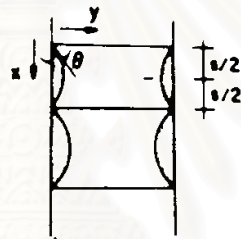
- $\alpha$  เป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของการจัดเรียงเหล็กปลอกและจำนวนเหล็กเสริมทางยาว
- $n$  เป็นจำนวนโค้งวงกลมตามที่แสดงในรูปที่ 1.3

สมมติให้  $\lambda$  เป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่คอนกรีตประสิทธิผลที่ได้รับการโอบรัดต่อพื้นที่ของแกนคอนกรีตทั้งหมดที่ระดับเดียวกับเหล็กปลอก จะได้สมการดังสมการที่ 1.14

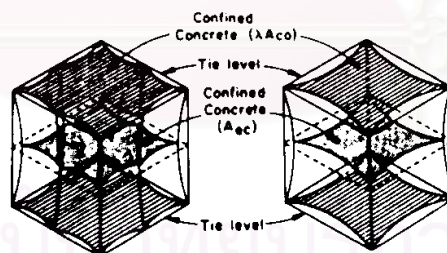
$$\lambda = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n C_i^2}{\alpha A_{co}} \quad (1.14)$$

จากผลการทดสอบของ Sheikh และ Uzumeri จะได้ค่า  $\alpha$  เท่ากับ 5.5

- พิจารณาผลที่เกิดจากระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกและปริมาตรของเหล็กปลอก



รูปที่ 1.5 แสดงพื้นที่คอนกรีตที่ไม่ได้รับการโอบรัดเนื่องจากระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก [7]



รูปที่ 1.6 แบบจำลองสามมิติแสดงหน้าตัดวิกฤติของพื้นที่คอนกรีตที่ได้รับการโอบรัด [7]

พื้นที่คอนกรีตที่ไม่ได้รับการโอบรัดเนื่องจากระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.5 และจากรูปแสดงให้เห็นว่าพื้นที่คอนกรีตที่น้อยที่สุดที่ได้รับการโอบรัดจะอยู่ตรงกลางระหว่างเหล็กปลอก เมื่อเหล็กปลอกมีระยะห่างมากขึ้น จะทำให้พื้นที่คอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดน้อยลง และเมื่อเราพิจารณาจากแบบจำลองสามมิติแสดงพื้นที่คอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างเหล็กปลอก ดังรูปที่ 1.6 เห็นได้ว่าเป็นการยากที่จะทราบพื้นที่คอนกรีตที่แท้จริงที่ได้รับการโอบรัด อย่างไรก็ตามเราสามารถคำนวณหาพื้นที่ดังกล่าวโดยประมาณ

ดังนั้น พื้นที่คอนกรีตประสิทธิผลที่ได้รับการโอบรัดที่ตรงกลางระหว่างเหล็กปลอก ดังสมการที่ 1.15

$$A_{ec} = \lambda(B - 2y_m)(H - 2y_m) \quad (1.15)$$

โดยที่

$A_{ec}$  เป็นพื้นที่คอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างเหล็กปลอก (in.<sup>2</sup>)

$B, H$  เป็นความกว้างของเหล็กปลอกโดยวัดระหว่างกึ่งกลางของเหล็กเสริม (in.)

$y_m$  ตำแหน่งของหน้าตัดวิฤติที่มีค่าเท่ากับ  $0.25s \tan \theta$

จากสมการที่ 1.15 เมื่อเราให้  $\lambda^*$  เป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ประสิทธิผลที่ได้รับการโอบรัดต่อพื้นที่ของแกนคอนกรีต โดยพิจารณาทั้งปริมาตรของเหล็กปลอกและระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก จะหาพื้นที่โอบรัดได้ดังสมการที่ 1.16

$$A_{ec} = \lambda(B - 0.5s \tan \theta)(H - 0.5s \tan \theta) = \lambda^* A_{co} \quad (1.16)$$

โดยที่

$\lambda$  เป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ประสิทธิผลที่ได้รับการโอบรัดต่อพื้นที่ของแกนคอนกรีต โดยพิจารณาเฉพาะปริมาตรของเหล็กปลอกเท่านั้น

$\lambda^*$  เป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ประสิทธิผลที่ได้รับการโอบรัดต่อพื้นที่ของแกนคอนกรีต โดยพิจารณาทั้งปริมาตรของเหล็กปลอกและระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก

จากผลการทดสอบของ Sheikh และ Uzumeri จะได้ว่า  $\theta$  เท่ากับ  $45^\circ$

- พิจารณาผลที่เกิดจากหน่วยแรงโอบรัดของเหล็กปลอก

กำลังที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตเนื่องจากการโอบรัดมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเหล็กปลอกต่อปริมาตรของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดและหน่วยแรงโอบรัดของเหล็กปลอก ดังนี้

$$\beta(\rho_s, f_s')$$

โดยที่

$\beta$  เป็นค่าคงที่

$\gamma$  เป็นค่าคงที่ที่มีค่าน้อยกว่า 1

- $\rho_s$  เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเหล็กปลอกต่อปริมาตรของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัด โดยคิดจากเส้นรอบนอกของเหล็กปลอก
- $f'_s$  เป็นกำลังสูงสุดที่เกิดในเหล็กปลอก เมื่อทำการ โอบรัดแกนคอนกรีต (ksi.)

จากผลการทดสอบของ Sheikh และ Uzumeri จะได้ค่า  $\beta$  เท่ากับ 2.73 และค่า  $\gamma$  เท่ากับ 0.5

เมื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อพื้นที่คอนกรีตประสิทธิผลที่ได้รับการโอบรัดและให้  $k_s$  เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของคอนกรีตที่มีการโอบรัดต่อกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด โดยขึ้นอยู่กับลักษณะของการจัดเรียงเหล็กปลอก ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริม จำนวนเหล็กเสริมทางยาว และหน่วยแรงที่เกิดในเหล็กปลอก สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ 1.17

$$k_s = 1.0 + \frac{B^2}{140P_{occ}} \left[ \left( 1 - \frac{nC^2}{5.5B^2} \right) \left( 1 - \frac{s}{2B} \right)^2 \right] \sqrt{\rho_s f'_s} \quad (1.17)$$

โดยที่

- $B$  เป็นความกว้างของเหล็กปลอกโดยวัดระหว่างกึ่งกลางของเหล็กเสริม (in.)
- $P_{occ}$  เป็นแรงอัดตามแนวแกนของพื้นที่ของแกนคอนกรีตวัดระหว่างกึ่งกลางของเหล็กเสริมทางขวาง มีค่าเท่ากับ  $0.85f'_c(A_{co} - A_s)$  (kip)
- $n$  เป็นจำนวนเหล็กเสริมทางยาว
- $C$  เป็นระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมทางยาว (in.)
- $s$  เป็นระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก (in.)
- $\rho_s$  เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเหล็กปลอกต่อปริมาตรของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัด โดยคิดจากเส้นรอบนอกของเหล็กปลอก
- $f'_s$  เป็นกำลังสูงสุดที่เกิดในเหล็กปลอก เมื่อทำการ โอบรัดแกนคอนกรีต (ksi.)

โดยกำลังของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดทางด้านข้างนั้นจะขึ้นอยู่กับพื้นที่คอนกรีตประสิทธิผลที่แท้จริงที่ถูกโอบรัด ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก การกระจายแรงของเหล็กยื่น พื้นที่ของคอนกรีตในแกนเสาและคุณสมบัติของเหล็กปลอก ตามสมการที่ 1.17 และจากผลการวิเคราะห์ด้วยเส้นโค้งความสัมพันธ์นี้เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ACI 318-77 พบว่าเสาที่มีเหล็กเสริมทางยาวเพียง 4 เส้น ตามมุมเสา จะทำให้เสาได้รับการโอบรัดทางด้านข้างน้อย แต่ถ้าเพิ่มเหล็กเสริมทางยาวอีก 4 เส้นตรงกลางระหว่างมุม ทำให้เสาได้รับการโอบรัดทางด้านข้างมากขึ้นมาก จึงทำให้เสาสามารถรับแรงอัดได้มากขึ้นและมีความเหนียวเพิ่มขึ้น ซึ่งในมาตรฐาน ACI 318-77 กำหนดให้มีเหล็กเสริมทางยาวอย่างน้อยที่สุด 4 เส้น ในเสารูป



ตัดสี่เหลี่ยม ดังนั้นหากการคำนวณค่ากำลังอัดในเสาคอนกรีตที่จะพิจารณาการโอบรัดทางด้านข้างด้วย ควรจะเสริมเหล็กเสริมทางยาวในเสารูปตัดสี่เหลี่ยมอย่างน้อย 8 เส้น จึงจะปลอดภัย

- Nilson [8] กล่าวว่าพฤติกรรมของเสาคอนกรีตรูปตัดวงกลมเสริมเหล็กปดอก สามารถใช้แบบจำลองเป็นถังทรงกระบอกผนังเป็นแผ่นเหล็กบางข้างในใส่ทรายไว้ในถัง ทดสอบโดยใส่แรงอัดตามแนวแกนลงไปที่ทราย จะทำให้เกิดแรงตามขวางกระทำกับผนังถัง โดยทรายจะรับแรงอัดได้เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนกว่าผนังของถังจะทะลุออกมา ซึ่งพฤติกรรมจะเหมือนกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปดอกรับแรงอัดตามแนวแกน คือ เหล็กปดอกจะทำหน้าที่รับแรงขยายทางด้านข้างของแกนเสา ทำให้เสามีกำลังมากขึ้นกว่าเสาที่ไม่ได้เสริมเหล็กปดอก และเสาจะวิบัติก็ต่อเมื่อมีหน่วยแรงดึงในเหล็กปดอกถึงจุดคราก ซึ่งจากการทดสอบ พบว่ากำลังของแกนคอนกรีตในเสาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการโอบรัดด้านข้างของเหล็กปดอก สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 1.18

$$f_c^* - 0.85f_c' = 4.0f_2' \quad (1.18)$$

โดยที่

$f_c^*$  เป็นกำลังรับแรงอัดของแกนคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดจากเหล็กปดอก

$0.85f_c'$  เป็นกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด

$f_2'$  เป็นหน่วยแรงโอบรัดด้านข้างของเหล็กปดอก

เมื่อสมมติให้เหล็กปดอกสามารถพัฒนากำลังได้ถึงจุดคราก จึงสามารถหาหน่วยแรงโอบรัดด้านข้าง  $f_2'$  ในเหล็กปดอก ได้ดังสมการที่ 1.19

$$f_2' = \frac{2A_{sp}f_y}{d_c s} \quad (1.19)$$

โดยที่

$A_{sp}$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของเหล็กปดอก

$f_y$  เป็นกำลังที่จุดครากของเหล็กปดอก

$d_c$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนคอนกรีตโดยวัดจากขอบนอกของเหล็กปดอก

$s$  เป็นระยะห่างระหว่างเหล็กปดอก

ดังนั้น อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเหล็กปดอกต่อปริมาตรของคอนกรีตสามารถแสดงได้ตามสมการที่ 1.20 – 1.21

$$\rho_s = \frac{2\pi d_c A_{sp}}{2} \frac{4}{\pi d_c^2 s} \quad (1.20)$$

และจาก

$$A_{sp} = \frac{\rho_s d_c s}{4} \quad (1.21)$$

ซึ่งเมื่อแทนค่าของ  $A_{sp}$  จากสมการที่ 1.21 ลงในสมการที่ 1.20 จะได้

$$f_2' = \frac{\rho_s f_y}{2} \quad (1.22)$$

การหาปริมาณของเหล็กปลอกที่เหมาะสมในเสาคอนกรีตหน้าตัดวงกลม

$$\text{กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหุ้ม} = 0.85 f_c' (A_g - A_c) \quad (1.23)$$

โดยที่

$A_g$  เป็นพื้นที่หน้าตัดเสา

$A_c$  เป็นพื้นที่หน้าตัดแกนคอนกรีตในเสา

เมื่อเรานำค่า  $f_2'$  ในสมการที่ 1.22 ไปแทนค่าในสมการที่ 1.18 และคูณด้วยหน้าตัดของแกนคอนกรีตในเสา จะได้

$$\text{กำลังของแกนคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น} = 2\rho_s f_y A_c \quad (1.24)$$

เมื่อพิจารณาให้กำลังของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการโอบรัด มีค่าอย่างน้อยที่สุดเท่ากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหุ้ม จะได้

$$0.85 f_c' (A_g - A_c) = 2\rho_s f_y A_c \quad (1.25)$$

จากสมการที่ 1.25 เราจะหาอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเหล็กปลอกต่อปริมาตรของคอนกรีตได้ตามสมการที่ 1.26

$$\rho_s = 0.425 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_c'}{f_y} \quad (1.26)$$

แต่ตาม ACI Code กำหนดให้อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเหล็กปลอกต่อปริมาตรของคอนกรีตน้อยที่สุดในเสาคอนกรีตรูปตัดวงกลม ตามสมการที่ 1.27

$$\rho_s = 0.45 \left( \frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_y} \quad (1.27)$$

โดยที่

$\rho_s$  เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเหล็กปลอกต่อปริมาตรของคอนกรีต

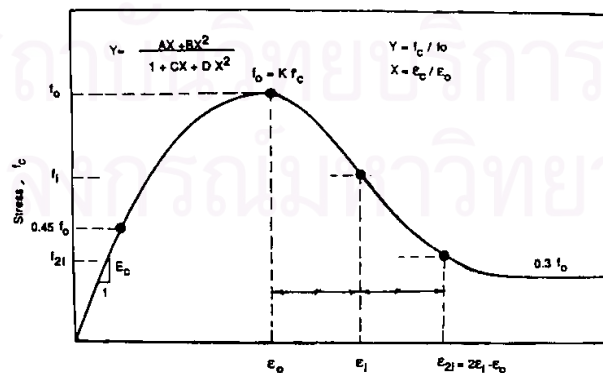
$f'_c$  เป็นกำลังอัดประลัยของคอนกรีตรูปทรงกระบอก (psi)

$f_y$  เป็นกำลังที่จุดครากของเหล็กปลอก (psi)

$A_g$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของเสา ( $\text{in}^2$ )

$A_c$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตที่อยู่ภายในเส้นรอบรูปของเหล็กปลอก ( $\text{in}^2$ )

- **Yong และคณะ [9]** ได้ศึกษาผลของการโอบรัดคอนกรีตกำลังสูงโดยเหล็กปลอก โดยทำการทดสอบเสาคอนกรีตกำลังสูงรูปตัดสี่เหลี่ยมเสริมด้วยเหล็กปลอกและเหล็กเสริมทางยาว ภายใต้แรงอัดตามแนวแกนไม่มีการเอียงศูนย์ ที่ได้พิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อการโอบรัดคอนกรีตคือ ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก จำนวนเหล็กเสริมทางยาว อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเหล็กปลอกต่อปริมาตรของแกนคอนกรีต อัตราส่วนระหว่างปริมาตรเหล็กเสริมทางยาวต่อปริมาตรเสาคอนกรีต คอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกและกำลังครากของเหล็กปลอก จากผลการทดสอบพบว่า ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกจะแปรผกผันกับความสามารถในการรับแรงอัดและความเหนียวของเสาคอนกรีตกำลังสูงและเสาคอนกรีตที่เสริมด้วยเหล็กเสริมทางยาวเพียง 4 เส้น จะมีความเหนียวน้อยกว่าเสาที่เสริมเหล็กเสริมทางยาว 8 เส้น และเมื่อเปรียบเทียบผลของการโอบรัดทางด้านข้างระหว่างเสาคอนกรีตกำลังสูงกับเสาคอนกรีตธรรมดา จะพบว่า ผลจากการโอบรัดทางด้านข้างในเสาคอนกรีตกำลังสูงจะน้อยกว่าในเสาคอนกรีตธรรมดา และได้เสนอเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดหดตัวของเสาคอนกรีตกำลังสูงรูปตัดสี่เหลี่ยมที่ได้รับการโอบรัดจากเหล็กปลอก ดังรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดหดตัวของคอนกรีตกำลังสูงที่มีการโอบรัด [9]

สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับการยืดหดตัวสมการสำหรับเสาคอนกรีตกำลังสูงรูปตัดสี่เหลี่ยมที่ได้รับการโอบรัดด้านข้าง แบ่งเป็น 2 ช่วง ดังสมการที่ 1.28 – 1.29

1. ช่วง  $\varepsilon_c \leq \varepsilon_0$

$$Y = \frac{AX + BX^2}{1 + (A-2)X + (B+1)X^2} \quad (1.28)$$

2. ช่วง  $\varepsilon_c \geq \varepsilon_0$

$$Y = \frac{CX + DX^2}{1 + (C-2)X + (D+1)X^2} \quad (1.29)$$

โดยที่

$$Y = \frac{f_c}{f_0} \quad (1.30)$$

$$X = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \quad (1.31)$$

$$A = \frac{E_c \varepsilon_0}{f_0} \quad (1.32)$$

$$B = \left[ \frac{(A-1)^2}{0.55} \right] - 1 \quad (1.33)$$

$$E_c = 27.55w^{1.5} \sqrt{f'_c} \quad (1.34)$$

$$C = \left[ \frac{(\varepsilon_{2i} - \varepsilon_i)}{\varepsilon_0} \right] \left\{ \left[ \frac{\varepsilon_{2i} E_i}{(f_0 - f_i)} \right] - \left[ \frac{4\varepsilon_i E_{2i}}{(f_0 - f_{2i})} \right] \right\} \quad (1.35)$$

$$D = (\varepsilon_i - \varepsilon_{2i}) \left\{ \left[ \frac{E_i}{(f_0 - f_i)} \right] - \left[ \frac{4\varepsilon_{2i}}{f_0 - f_{2i}} \right] \right\} \quad (1.36)$$

$$E_i = \frac{f_i}{\varepsilon_i} \quad (1.37)$$

$$E_{2i} = \frac{f_{2i}}{\varepsilon_{2i}} \quad (1.38)$$

$$\varepsilon_0 = 0.00265 + \frac{0.0035 \left( 1 - \frac{0.734s}{h''} \right) (\rho'' f_y'')^{2/3}}{\sqrt{f'_c}} \quad (1.39)$$

$$K = 1 + 0.0091 \left( 1 - \frac{0.245s}{h''} \right) \left( \rho'' + \frac{nd''}{8sd} \rho \right) \frac{f_y''}{\sqrt{f'_c}} \quad (1.31)$$

$$f_i = f_0 \left[ 0.25 \left( \frac{f'_c}{f_0} \right) + 0.4 \right] \quad (1.40)$$

$$\varepsilon_i = K \left[ 1.4 \left( \frac{\varepsilon_0}{K} \right) + 0.0003 \right] \quad (1.41)$$

$$f_{2i} = f_0 \left[ 0.025 \left( \frac{f_0}{1000} \right) - 0.065 \right] \geq 0.3 f_0 \quad (1.42)$$

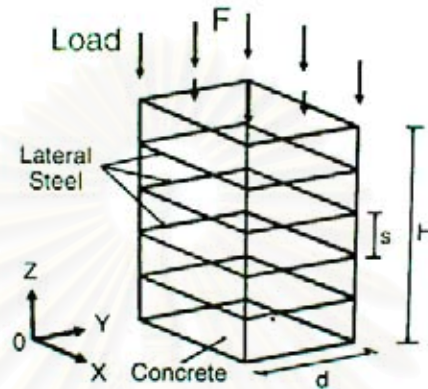
- $\varepsilon_0$  เป็นการยืดหดตัวของเสาคอนกรีตที่รับแรงอัดสูงสุด ( $f_0$ ) ในแกนเสาคอนกรีต (in./in.)
- $\varepsilon_c$  เป็นการยืดหดตัวของเสาคอนกรีต (in./in.)
- $h''$  เป็นความยาวภายในของเหล็กปลอก (in.)
- $\rho''$  เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเหล็กเสริมต่อปริมาตรของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดโดยคิดจากเส้นรอบนอกของเหล็กปลอก
- $f'_c$  เป็นกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด 6x12 in<sup>2</sup> (psi)
- $f'_y$  เป็นกำลังครากของเหล็กเสริม (psi)
- $n$  เป็นจำนวนเหล็กเสริมทางยาว (เส้น)
- $d''$  เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอก (in)
- $d$  เป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมทางยาว (in)
- $s$  เป็นระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก (in)
- $\rho$  เป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ทั้งหมดของเหล็กเสริมทางยาวต่อพื้นที่ของหน้าตัดเสาทั้งหมด
- $f_0$  เป็นกำลังอัดสูงสุดของแกนเสาคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดด้านข้าง (psi)

- **Sheikh และ Toklucu** [10] ได้ศึกษาผลของการโอบรัดคอนกรีตโดยเหล็กปลอก โดยทำการทดสอบเสาคอนกรีตรูปตัดวงกลมเสริมด้วยเหล็กปลอกแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ภายใต้แรงอัดตามแนวแกนไม่มีการเอียงศูนย์ ที่ได้พิจารณาปัจจัยที่ผลต่อการโอบรัดคอนกรีตคือ ปริมาตรและชนิดของเหล็กปลอก ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกและขนาดของเสาตัวอย่าง จากผลทำการทดสอบเสาคอนกรีตสั้นรูปตัดวงกลมเสริมเหล็กปลอกแบบต่อเนื่องและปลอกแบบไม่ต่อเนื่อง จำนวน 27 ตัวอย่าง ผลการทดสอบสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาตรของเหล็กปลอกแล้วจะมีผลให้เสามีความเหนียวและกำลังเพิ่มมากขึ้น และผลการทดสอบเสาคอนกรีตที่เสริมเหล็กตามมาตรฐาน ACI318-89 พบว่าความสามารถในการรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าความสามารถในการรับแรงอัดที่ได้จากการคำนวณเล็กน้อย ส่วนระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกแบบต่อเนื่อง เมื่อมีระยะห่างน้อยจะทำให้เหล็กปลอกสามารถพัฒนากำลังได้ใกล้เคียงกับกำลังที่จุดคราก มีผลให้เสามีความเหนียวและความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มขึ้นมาก แต่เมื่อเหล็กปลอกพัฒนากำลังได้ถึงจุดครากแล้วการลดระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกลงอีกจะไม่มีผลต่อเสาคอนกรีต ส่วนขนาดของเสาคอนกรีตไม่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงอัดและความเหนียวของเสา พร้อมทั้งเสนอค่า



สัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของการโอบรัดทางด้านข้างในเสาคอนกรีตรูปตัดสี่เหลี่ยมเสริมเหล็กปลอกแบบต่อเนื่องจะอยู่ระหว่าง 2.1 -4.0

- **Pallewatta,Irawan และ Maekawa** [11] นำเสนอแบบจำลอง 3 มิติ ในการหาหน่วยแรงการโอบรัดด้านข้างของเหล็กปลอกในเสาคอนกรีตรูปตัดสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 แสดงแบบจำลอง 3 มิติ ในการหาหน่วยแรงการโอบรัดด้านข้างของเหล็กปลอก [11]

จากรูปที่ 1.8 สามารถแสดงหน่วยแรงการโอบรัดทางด้านข้างที่จุด  $(x,y,z)$  ใดๆ ในแบบจำลองได้ตามสมการที่ 1.43 และ 1.44

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{c,xx} + \sigma_{c,yy}}{2} \quad (1.43)$$

$$\overline{\sigma}_c = \overline{\sigma}_c(z) = \frac{1}{A_c} \int \sigma_c(x, y, z) dx dy \quad (1.44)$$

โดยที่

$A_c$  เป็นพื้นที่หน้าตัดคอนกรีต

เมื่อสมมติให้  $\sigma_v$  เป็นหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างเฉลี่ยของเหล็กปลอก ซึ่งก็คือปริมาตรของหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างเฉลี่ยที่กระทำต่อคอนกรีต ดังแสดงตามสมการที่ 1.45

$$\sigma_v = \frac{1}{H} \int \overline{\sigma}_c dz = \frac{1}{V_c} \int \frac{\sigma_{c,xx} + \sigma_{c,yy}}{2} dV \quad (1.45)$$

โดยที่

$V_c$  เป็นปริมาตรของคอนกรีต

$H$  เป็นความสูงของคอนกรีตที่โอบรัดโดยเหล็กปลอก

จากสมการที่ 1.45 เมื่อพิจารณาจาก Principle of Virtual Work และ Equilibrium Condition จะได้หน่วยแรงโอบรัดด้านข้างของเหล็กปลอกที่เกิดขึ้นจริง ตามสมการที่ 1.46

$$\sigma_v = -\frac{1}{2V_c} \int_{V_s} \sigma_s dV \quad (1.46)$$

แต่ถ้าสมมติให้เหล็กปลอกสามารถพัฒนากำลังได้ถึงจุดคราก จะได้ตามสมการที่ 1.47

$$\sigma_{v,\text{lim}} = -\frac{1}{2} \rho f_y \quad (1.47)$$

โดยที่

- $\rho$  เป็นเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเหล็กปลอกต่อปริมาตรของคอนกรีต
- $f_y$  เป็นกำลังครากของเหล็กเสริมตามขวาง

จากการทดสอบพบว่าค่า  $\sigma_v$  จะน้อยกว่าค่า  $\sigma_{v,\text{lim}}$  เนื่องจากเหล็กปลอกไม่สามารถพัฒนากำลังได้ถึงกำลังที่จุดคราก จึงเสนอค่าดัชนีบ่งชี้ประสิทธิภาพในการโอบรัดด้านข้าง ตามสมการที่ 1.48

$$\alpha = \sigma_v / \sigma_{v,\text{lim}} \quad (1.48)$$

โดยที่

- $\alpha$  เป็นค่าดัชนีบ่งชี้ประสิทธิภาพในการโอบรัดด้านข้าง
- $\sigma_v$  เป็นหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างเฉลี่ยของเหล็กปลอกที่เกิดขึ้นจริง
- $\sigma_{v,\text{lim}}$  เป็นหน่วยแรงโอบรัดทางด้านข้างเฉลี่ยของเหล็กปลอกสูงสุด

ในการศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตรูปตัดสี่เหลี่ยมเสริมด้วยเหล็กปลอก ภายใต้แรงอัดตามแนวแกนไม่มีการเอียงศูนย์จึงนำผลที่ได้จากแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าโดยทั่วไปเหล็กปลอกจะไม่สามารถพัฒนากำลังได้ถึงกำลังที่จุดคราก จึงทำให้ความสารถในการโอบรัดทางด้านข้างของเหล็กปลอกไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นของเสาคอนกรีต ดังนั้นความสามารถในการรับแรงอัดของเสาที่ได้จากการทดสอบจะน้อยกว่าความสามารถในการรับแรงอัดของเสาที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง ซึ่งกำลังของเหล็กปลอกจะพัฒนาได้มากเมื่อปริมาตรของเหล็กปลอกมากและระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกน้อย ส่วนเสาที่มีพื้นที่คอนกรีตในแกนเสาต่างกัน ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการโอบรัดทางด้านข้างของเหล็กปลอก

- **Tan และ Yip** [12] ทำการทดสอบเสาคอนกรีตสั้นรูปตัดวงรีเสริมเหล็กปลอกแบบไม่ต่อเนื่อง ภายใต้แรงอัดตามแนวแกนไม่มีการเยื้องศูนย์ จำนวน 18 ตัวอย่าง เพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีต ภายใต้การโอบรัดทางด้านข้างจากเหล็กปลอก จากผลการทดสอบพบว่าแกนของเสาคอนกรีตได้รับการโอบรัดทางด้านข้างจากเหล็กปลอก จะทำให้เสาคอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงอัดมากขึ้นและมีความเหนียวเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการรับแรงอัดของเสาคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนด้านกว้างต่อด้านแคบของเสา ซึ่งเมื่อเสาคอนกรีตรูปตัดวงรีมีอัตราส่วนด้านกว้างต่อด้านแคบมากขึ้นกำลังส่วนที่เพิ่มขึ้นจากการโอบรัดทางด้านข้างของเหล็กปลอกจะลดลงเป็นกราฟเส้นตรง และเมื่ออัตราส่วนดังกล่าวเกินกว่า 2.60 การโอบรัดทางด้านข้างจะไม่มีผลต่อเสาคอนกรีตอีก ทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดในเสาคอนกรีตจะเท่ากับเสาคอนกรีตที่ไม่เสริมด้วยเหล็กปลอก

- **ผศ.ดร.วัฒนชัย** [1] ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดบรรทุกของเสาคอนกรีตที่เสริมด้วยเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง โดยทำการทดสอบกับเสาตัวอย่างคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมตามยาวเป็นเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง ภายใต้แรงอัดในแนวแกนเพียงอย่างเดียวเปรียบเทียบกับเสาตัวอย่างคอนกรีตที่เสริมด้วยเหล็กเส้นข้ออ้อยธรรมดา (SD 40) ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะเสาสั้นรูปตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้เหล็กปลอกแบบไม่ต่อเนื่องเท่านั้น โดยคำนวณออกแบบตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง ของสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย จากผลการทดสอบพบว่า เสาที่มีเหล็กตามยาวเป็นเหล็กเส้นข้ออ้อยธรรมดา (SD 40) มีค่าแรงอัดสูงสุดที่เกิดขึ้นจริง มากกว่าค่าแรงอัดจากสูตรคำนวณ ส่วนเสาที่เสริมด้วยเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง มีค่าแรงอัดสูงสุดที่เกิดขึ้นจริงน้อยกว่าค่าแรงอัดที่ได้จากสูตรคำนวณ เนื่องจากเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูงเกิดการ โกงเดาะขึ้น ก่อนที่หน่วยแรงในเหล็กเสริมจะพัฒนาถึงจุดคราก จึงสรุปได้ว่าข้อกำหนดตามมาตรฐานดังกล่าวไม่เหมาะกับการใช้เหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง เพื่อเสริมในเสาคอนกรีต

## 1.2.2 เสาคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กและเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง

- **Fanella and Naaman** [13] ศึกษาคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของมอร์ต้าเสริมเส้นใย โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ต้าเสริมเส้นใยชนิดและปริมาณต่างๆ กัน เพื่อหาความสัมพันธ์ของหน่วยแรงดึง(stress) และ หน่วยการยืดหดตัว (strain) เส้นใยที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ steel, glass, monofilament polypropylene และ twisted polypropylene เมื่อผสมเส้นใยชนิดต่างๆ ในมอร์ต้าแล้วเส้นใยจะช่วยโอบรัดทางด้านข้าง ทำให้มอร์ต้าแตกช้าลง ดังนั้น จึงมีผลให้หน่วยการยืดหดตัว (strain) ของมอร์ต้า ณ จุดที่รับแรงอัดสูงสุดมีค่าสูงขึ้นและช่วยทำให้มีความเหนียวเพิ่มขึ้น

- Lin Hsu and Cheng – Tzu Hsu [14] ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดของคอนกรีตกำลังสูงเสริมเส้นใยเหล็ก โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างคอนกรีตกำลังสูง ( $> 10,000$  psi) รูปตัดวงกลมเสริมเส้นใยเหล็กปริมาณต่างๆ กันดังนี้ 0, 0.50, 0.75 และ 1.00 โดยปริมาตร และเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวระยะห่างต่างๆ กัน ผลจากการทดสอบพบว่า ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กมีหน่วยการยึดหดตัว ณ จุดที่รับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างมีค่าสูงขึ้น, ปริมาณของเส้นใยเหล็กมีผลต่อดัชนีความเหนียว (Toughness Index) คือ ปริมาณเส้นใยเหล็กมากขึ้นค่าดัชนีความเหนียว (Toughness Index) ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยและเส้นใยเหล็กในตัวช่วยชะลอการแยกออกของตัวอย่าง

### 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ในการวิจัยการเสริมเหล็กเดี่ยวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กข้ออ้อยแรงดึงสูงและคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กและเสริมเหล็กข้ออ้อยแรงดึงสูง มีวัตถุประสงค์ ดังนี้

1. เพื่อศึกษาผลของเหล็กปลอกเดี่ยวที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดตามแนวแกนไม่เอียงศูนย์ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีเหล็กยื่นเป็นเหล็กข้ออ้อยธรรมดาและเหล็กข้ออ้อยแรงดึงสูง
2. ศึกษาระยะห่างของเหล็กปลอกเดี่ยวที่เหมาะสมในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง
3. เปรียบเทียบแรงอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กข้ออ้อยธรรมดาและเหล็กข้ออ้อยแรงดึงสูงที่ได้จากการทดสอบกับค่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีของการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
4. เพื่อศึกษาผลของเส้นใยเหล็กที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงอัดตามแนวแกนไม่เอียงศูนย์ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีเหล็กยื่นเป็นเหล็กข้ออ้อยแรงดึงสูง

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

#### 1.4.1 การเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง

ทดสอบกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนแบบไม่มีการเอียงศูนย์สูงสุดของเสาคอนกรีตรูปตัดสี่เหลี่ยมเสริมเหล็กปลอกเดี่ยว มีขนาดหน้าตัด 25 x 25 ซม. สูง 100 ซม.เสริมเหล็กยื่นขนาด 20 มม. จำนวน 4 เส้น และคอนกรีตมีกำลังอัดประลัย 350 กก./ตร.ซม. ที่ 28 วัน เสริมเหล็กปลอกระยะห่าง 10.0, 17.5 และ 25.0 ซม. มีจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 18 ตัวอย่าง โดยแบ่งออกเป็น 6 กลุ่มๆ ละ 3 ตัวอย่าง ดังนี้

- 1 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กยื่นเป็นเหล็ก SD40 ระยะห่างปลอก 10.0 ซม.
- 2 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กยื่นเป็นเหล็ก SD40 ระยะห่างปลอก 17.5 ซม.
- 3 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กยื่นเป็นเหล็ก SD40 ระยะห่างปลอก 25.0 ซม.
- 4 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กยื่นเป็นเหล็ก SD50 ระยะห่างปลอก 10.0 ซม.
- 5 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กยื่นเป็นเหล็ก SD50 ระยะห่างปลอก 17.5 ซม.
- 6 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กยื่นเป็นเหล็ก SD50 ระยะห่างปลอก 25.0 ซม.

#### 1.4.2 เสาคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กและเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง

ทดสอบกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนแบบไม่มีการเอียงศูนย์กลางสูงสุดของเสาคอนกรีตรูปตัดสี่เหลี่ยมเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวมีขนาดหน้าตัด 25 x 25 ซม. สูง 100 ซม.เสริมเหล็กยื่นเป็นเหล็กข้ออ้อยกำลังสูงขนาด 20 มม. จำนวน 4 เส้น เสริมเหล็กปลอกเป็นเหล็กข้ออ้อยธรรมดาระยะห่าง 17.50 ซม. ที่มีส่วนผสมคอนกรีต 2 ชนิด คือ คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก มีจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 6 ตัวอย่าง โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มๆ ละ 3 ตัวอย่าง ดังนี้

- 1 ใช้คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก 1.5% โดยปริมาตร กำลังอัดประลัย 300 กก./ตร.ซม. ที่ 28 วัน
- 2 ใช้คอนกรีตธรรมดา กำลังอัดประลัย 300 กก./ตร.ซม. ที่ 28 วัน

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้รู้ถึงระยะห่างที่เหมาะสมของเหล็กปลอกในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กข้ออ้อยแรงดึงสูง
2. ทำให้รู้ถึงพฤติกรรมในการวิบัติของเสาที่มีการใช้ระยะของเหล็กปลอกต่างๆกัน
3. การลดเนื้อที่ของเหล็กในเสา ทำให้ในการทำงานสามารถทำงานได้ง่ายขึ้นและประหยัดงบประมาณในการก่อสร้าง
4. การลดขนาดของเสาในการก่อสร้างอาคารสูง ทำให้อาคารมีพื้นที่ใช้สอยมากขึ้น
5. สร้างความมั่นใจในการนำเหล็กข้ออ้อยแรงดึงกำลังสูงมาใช้งาน
6. ทำให้รู้ถึงส่วนผสมที่เหมาะสมของเส้นใยเหล็กในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กข้ออ้อยแรงดึงสูง
7. ทำให้รู้ถึงพฤติกรรมการวิบัติของเสาที่ใช้คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กตัดส่วนต่างๆ กัน



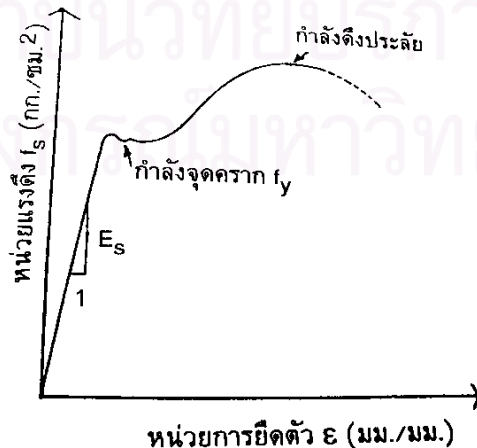
## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 การเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง

##### 2.1.1 เหล็กเสริม

เมื่อนำเหล็กเสริมไปทดสอบกำลังรับแรงดึง จะได้ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงดึง(stress) และหน่วยการยืดหดตัว (strain) ดังรูปที่ 2.1 และจากรูปที่ 2.1 จะพบว่าในช่วงแรกหน่วยแรงดึงและหน่วยการยืดหดตัวจะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ซึ่งความสัมพันธ์ในช่วงนี้เรียกว่า ช่วงอีลาสติก คืออยู่ในช่วงที่เหล็กมีการยืดหดตัวน้อย และถ้าหยุดแรงดึงเหล็กจะสามารถหดตัวกลับมาเหมือนเดิมได้ และเมื่อแรงดึงเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งกราฟตกลงเล็กน้อย คือ ช่วงที่เหล็กถูกยืดออกจนถึงจุดเริ่มคราก ซึ่งเหล็กที่ถูกดึงจนเลยจุดครากแล้ว จะไม่สามารถหดตัวกลับมาเหมือนเดิมได้อีก ถึงแม้ว่าจะหยุดแรงดึง โดยหน่วยแรงดึงที่จุดนี้เรียกว่า หน่วยแรงที่จุดคราก ( yield strength :  $f_y$ ) ซึ่งบางครั้ง อาจมีทั้งจุดครากบน (upper Yield Point) และจุดครากล่าง (lower Yield point) โดยจุดครากที่แท้จริงคือจุดครากล่าง เนื่องจากจุดครากบนนั้นจะมีค่าไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอัตราการเร่งของแรงดึงและหน้าตัดของเหล็ก หลังจากเลยจุดครากแล้ว หน่วยแรงดึงจะมีค่าค่อนข้างคงที่แต่หน่วยการยืดหดตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วงนี้เรียกว่า ช่วงพลาสติก โดยการยืดตัวในช่วงนี้จะมีค่า 10 – 12 เท่าของหน่วยการยืดหดตัวที่จุดคราก แต่หน่วยการยืดหดตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกำลังของเหล็ก ถ้าหน่วยแรงดึงของเหล็กที่จุดครากมาก หน่วยการยืดหดตัวในช่วงพลาสติกก็จะน้อย ถ้าหน่วยแรงดึงของเหล็กที่จุดครากน้อยหน่วยการยืดหดตัวในช่วงพลาสติกก็จะมาก และเมื่อเลยช่วงพลาสติก หน่วยแรงดึงและหน่วยการยืดหดตัวจะเพิ่มขึ้น โดยไม่เป็นสัดส่วนเส้นตรง ซึ่งช่วงนี้เรียกว่า ช่วงการแข็งตัวเพิ่ม (strain hardening) หน่วยแรงดึงจะเพิ่มขึ้นจนสูงสุด และเมื่อเลยช่วงนี้ไป หน่วยแรงดึงจะลดลง ขณะที่หน่วยการยืดหดตัวจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งช่วงกลางของเหล็กทดสอบเริ่มคอคอดจนเหล็กขาดในที่สุด



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและหน่วยการยืดหดตัวของเหล็กเสริม [15]



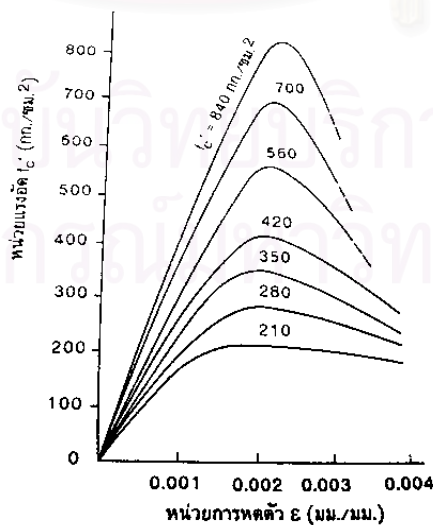
จากผลการทดสอบ เราสามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity :  $E_c$ ) หรือ โมดูลัสของยังก์ (Young's modulus) ของเหล็กได้จากความสัมพันธ์ของหน่วยแรงดึง(stress) และหน่วยการยืดหดตัว (strain) ในช่วงอีลาสติก ซึ่งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กโดยทั่วไปจะมีค่าคงที่เท่ากับ  $2.04 \times 10^6$  กก./ซม.<sup>2</sup> และถือว่าเหล็กมีกำลังรับแรงอัดเท่ากับกำลังรับแรงดึง จึงมีโมดูลัสยืดหยุ่นเมื่อรับแรงดึงเท่ากับค่าที่รับแรงอัด

เนื่องจากเหล็กเสริมที่มีกำลังที่จุดครากสูงมาก ( $>4000$  กก./ซม.<sup>2</sup>) มีหน่วยแรงที่จุดครากไม่ชัดเจน มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. กำหนดให้หาหน่วยแรงที่จุดครากจากจุดที่เหล็กมีค่าหน่วยการยืดหดตัวเท่ากับ 0.0035 คือ ที่จุดนั้นให้ลากเส้นขนานกับความชันขึ้นไปตัดกับเส้นแสดงความสัมพันธ์จุดตัดนั้น ถือเป็นหน่วยแรงที่จุดคราก

### 2.1.2 คอนกรีต

#### ● กำลังต้านทานแรงอัด

เมื่อคอนกรีตรับแรงอัด จะมีพฤติกรรมดังรูปที่ 2.2 โดยในช่วงแรกจนถึงช่วงที่รับแรงอัด 40% – 50% ของแรงอัดสูงสุด ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัด (stress) และหน่วยการยืดหดตัว (strain) จะเป็นสัดส่วนเส้นตรง เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุเปราะ เมื่อแรงอัดเพิ่มมากขึ้นความสัมพันธ์จะเปลี่ยนเป็นเส้นโค้ง จนถึงช่วงที่คอนกรีตมีหน่วยการยืดหดตัวประมาณ 0.002 ซึ่งหน่วยแรงอัดในช่วงนี้จะเป็นหน่วยแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต หลังจากนั้น หน่วยแรงอัดจะเริ่มลดลง แต่หน่วยการยืดหดตัวจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งหน่วยการยืดหดตัวมีค่า 0.003 – 0.004 คอนกรีตจะวิบัติ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ พบว่า คอนกรีตที่มีกำลังน้อยจะมีความเหนียว (ductility) มากกว่าคอนกรีตที่มีกำลังมาก เนื่องจากคอนกรีตที่มีหน่วยแรงอัดสูงมากจะวิบัติอย่างรวดเร็วหลังจากผ่านจุดรับแรงอัดสูงสุด ต่างกับคอนกรีตที่มีหน่วยแรงอัดสูงคือน้อย เมื่อผ่านจุดรับแรงอัดสูงสุดแล้วหน่วยแรงอัดจะค่อยๆ ลดลงจนคอนกรีตวิบัติ



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตกำลังอัดต่างๆ [15]

มาตรฐาน ACI หรือ ว.ส.ท. กำหนดให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตหาได้จากสมการนี้

$$E_c = w^{1.5} 4270 \sqrt{f'_c} \quad (2.1)$$

เมื่อ	$E_c$ = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต	กก./ซม. <sup>2</sup>
	$w$ = หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต	ตัน/ลบ.ม.
	$f'_c$ = หน่วยแรงอัดสูงสุดของคอนกรีตที่ 28 วัน	กก./ซม. <sup>2</sup>

### ● กำลังต้านทานแรงดึง

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ต้านทานแรงดึงได้ต่ำมาก มีกำลังต้านทานแรงดึงสูงสุดเพียง 10% ของกำลังอัดสูงสุด หมายถึง คอนกรีตเป็นวัสดุที่เปราะมากจึงไม่สามารถรับแรงดึงได้ ดังนั้น ในการคำนวณกำลังของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จึงไม่นำคอนกรีตมาพิจารณาในการรับแรงดึง คือ ให้เหล็กรับแรงดึงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างทั้งหมด แต่จะนำกำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตมาพิจารณาการแตกร้าวของโครงสร้าง ซึ่งจะพิจารณาโดยใช้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเมื่อรับแรงดึงเท่ากับ โมดูลัสของคอนกรีตเมื่อรับแรงอัด

### 2.1.3 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

โดยปกติแล้วเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอาจมีรูปตัดกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีเหล็กเสริมชนิดเหล็กขึ้นใช้ช่วยคอนกรีตรับแรงอัด และมีเหล็กเสริมทางข้างชนิดปลอกเกลียวซึ่งพันต่อเนื่องกันรอบเหล็กขึ้นที่อยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมเรียกว่าเสาปลอกเกลียว (Spiral Column) เหล็กเสริมทางข้างอาจเป็นชนิดปลอกเดี่ยวพันรอบเหล็กขึ้น ที่วางในตำแหน่งขอบของรูปสี่เหลี่ยมและเว้นเป็นระยะ ๆ เรียกว่าเสาปลอกเดี่ยว (Tied Column) เหล็กเสริมทางข้างช่วยให้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กกับรับแรงอัดได้มากขึ้น และทำให้เสามีพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนเกิดการวิบัติ ในบางครั้งอาจใช้เหล็กรูปพรรณ หรือเหล็กหล่อเสริมเพิ่มเติมแกนกลางของเสา ซึ่งเรียกว่า เสาคอนกรีตเชิงประกอบ (Composite Column)

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กมี 2 ประเภท คือ เสาสั้นและเสายาว

เสาสั้น (Short Columns) หมายถึง เสาที่มีอัตราส่วนความชะลูด (slenderness ratio) น้อย ไม่เกินพิกัดที่จะทำให้เสานั้น โกงเดาะทางข้าง กำลังแรงอัดของเสาสั้นขึ้นกับกำลังต้านทานของวัสดุที่ใช้และขนาดรูปตัดของเสา

เสายาว (slender column) หมายถึง เสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดมาก ความสามารถในการรับแรงอัดของเสายาวจะน้อยกว่าเสาสั้นที่มีรูปตัดอย่างเดียวกัน เพราะเสายาวเกิดการโกงเดาะทางข้างก่อน

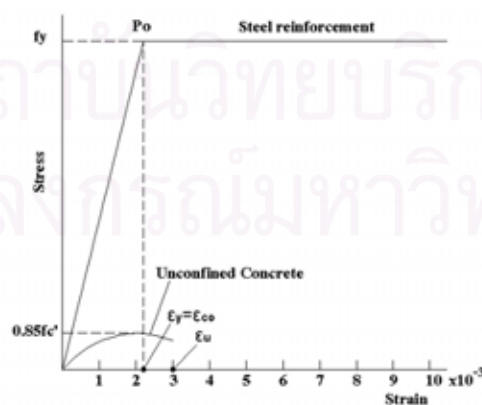
เสาคอนกรีตที่เสริมเฉพาะเหล็กขึ้นจะมีพฤติกรรมแบบเปราะ (Brittle) และการวิบัติลักษณะจะคล้ายกับเสาคอนกรีตล้วน คือ เมื่อคอนกรีตส่วนที่หุ้มเหล็กถูกอัดแตก หดและร่อนออก ซึ่งจะเหลือให้เห็นแต่เหล็กขึ้น เหล็กขึ้นจะถูกอัดและวิบัติจากการ โกงเดาะ แต่หากเสาคอนกรีตมีการเสริมด้วยเหล็กปลอก (เหล็กปลอก) แล้ว เหล็กปลอกจะช่วยในการ โอบรัดแกนคอนกรีตภายในไว้หลังจากคอนกรีตหุ้มถูกอัดแตก ทำให้

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นและยังช่วยให้สามีพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนที่จะเกิดการวิบัติ นอกจากนั้นเหล็กปลอกยังจะช่วยยึดเหล็กยื่นให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการขณะหล่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอีกด้วย

พฤติกรรมของการรับแรงอัดที่กระทำตามแนวแกนไม่มีการเอียงศูนย์กลางของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก [15] ที่มีการเสริมเหล็กทางขวางด้วย โดยสมมติว่าเหล็กยื่นมีกำลังจุดครากไม่สูงเกินไปพบว่า ก่อนที่คอนกรีตส่วนที่หุ้มเหล็กเสริมจะถูกอัดแตก ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดที่กระทำกับการเปลี่ยนรูปจะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงในช่วงที่หน่วยแรงอัดที่มีค่าน้อยๆ ซึ่งทั้งหน่วยแรงอัดในคอนกรีตและในเหล็กเสริมมีค่าอยู่ในช่วงอลาสติก แต่เมื่อเสารับแรงอัดในคอนกรีตมากขึ้น โดยมีค่าเกินกว่า  $0.5f_c'$  ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดที่กระทำกับการเปลี่ยนแปลงรูปจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง เนื่องจากความสัมพันธ์ไม่เป็นสัดส่วนกัน เมื่อแรงอัดกระทำมากขึ้นจนกระทั่งหน่วยแรงอัดในเหล็กเสริมถึงจุดคราก ซึ่งค่อนข้างจะพอดีกับที่หน่วยแรงอัดคอนกรีตมีค่าสูงสุด(เท่ากับ  $0.85 f_c'$  ที่หน่วยการหดตัวเท่ากับ  $0.002\text{mm./mm.}$ ) คอนกรีตส่วนที่หุ้มเหล็กเสริมจะเริ่มถูกอัดแตก หลุดและร้อนออกโดยแรงเฉือนในรูปแบบของแรงดึงทแยง

หากระยะห่างของเหล็กปลอกมีค่ามากเกินไป เมื่อคอนกรีตถูกอัดแตกเสาจะวิบัติในทันที เพราะเหล็กยื่นที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกจะถูกอัดและโก่งคดทางด้านข้างทันทีเช่นกัน ซึ่งทำให้สามีพฤติกรรมแบบเปราะ ฉะนั้นเมื่อเสริมเหล็กปลอกถี่ๆ กำลังรับแรงอัดของเสาจะค่อยๆลดลง ภายหลังจากที่คอนกรีตหุ้มนั้นถูกอัดแตก ทำให้สามีพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนเกิดการวิบัติ แต่อย่างไรก็ดีในทางทฤษฎีเราจะต้องถือว่าเสานั้นไม่เหมาะที่จะใช้งานอีกต่อไปเมื่อคอนกรีตหุ้มเหล็กยื่นถูกอัดแตก

การวิเคราะห์หากำลังต้านทานแรงอัดตามแกนของเสาสั้นจะพิจารณาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง หน่วยแรง กับ หน่วยการยืดหดตัว ทั้งของคอนกรีตและเหล็กเสริม ดังรูปที่ 2.3 โดยกำหนดให้คอนกรีตมีหน่วยแรงอัดสูงสุดเท่ากับ  $0.85 f_c'$  ที่หน่วยการหดตัวเท่ากับ  $0.002\text{mm/mm}$  และคอนกรีตมีหน่วยการหดตัวสูงสุดก่อนการวิบัติเท่ากับ  $0.003\text{mm/mm}$



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและการหดตัวของคอนกรีตและเหล็กเสริม [15]

ในช่วงอีลาสติกหรือหน่วยการหดตัวในเสา  $\varepsilon$  มีค่าน้อยๆ ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีตและเหล็กเสริมจะเป็นเส้นตรง นั่นคือ หน่วยแรงในเหล็กเสริม  $f_s = E_s \varepsilon_s$  และหน่วยแรงอัดในคอนกรีต  $f_c = E_c \varepsilon_c$  และสมมติว่าคอนกรีตและเหล็กเสริมมีการยืดหยุ่นกันที่คี่ นั่นคือ  $\varepsilon_s = \varepsilon_c$  หรือ  $f_s = E_s f_c / E_c = n f_c$  ในเมื่อ  $n = E_s / E_c$  เรียกว่า Modular ratio

นั่นหมายความว่า สามารถแทนหรือแปลงหน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมเท่ากับ  $A_s$  ในเสาได้ด้วยหน้าตัดของคอนกรีต ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $nA_s$  ดังนั้นเสารูปตัดใดๆ ที่มีเนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดเท่ากับ  $A_g$  และเสริมเหล็กเสริมทางยาวทั้งหมดเป็นปริมาณเท่ากับ  $A_{st}$  เนื้อที่หน้าตัดแปลงของเสาจะมีค่าเท่ากับ  $(A_g - A_{st}) + nA_{st}$  หรือเท่ากับ  $A_g + (n - 1) A_{st}$

จะได้กำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกนของเสาในสภาวะใช้งาน คือ

$$P = f_c [A_g + (n - 1) A_{st}] \quad (2.2)$$

โดย  $f_c$  เป็นหน่วยแรงอัดของคอนกรีตในสภาวะใช้งาน

ค่าที่วิเคราะห์ได้ข้างต้นยังไม่ได้พิจารณา รวมถึงการล้าและการหดตัวของคอนกรีต เมื่อเสาต้องรับแรงอัดบรรทุกค้าง ซึ่งค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของคอนกรีต  $E_c$  จะลดน้อยลงตามระยะเวลาที่มีแรงอัดบรรทุกคงค้างและเมื่อหน่วยแรงอัดมีค่าสูง ซึ่งทำให้อัตราส่วน โมดูลัส (modular ratio:  $n$ ) เพิ่มขึ้นกว่าปกติ ผลของการล้าของคอนกรีตทำให้คอนกรีตในเสารับหน่วยแรงอัดน้อยลงแต่เหล็กเสริมในเสาต้องรับแรงอัดมากขึ้นกว่าเดิม นั่นคือการล้าของคอนกรีตทำให้เกิดการถ่ายแรงให้กับเหล็กยื่นในเสา ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวข้างต้นค่อนข้างยุ่งยากในการวิเคราะห์หาหน่วยแรงที่แท้จริงหรือในการที่จะกำหนดอัตราส่วนความปลอดภัยของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อต้องรับแรงอัดบรรทุกในสภาวะใช้งาน

สำหรับกำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนที่คอนกรีตหุ้มจะถูกอัดแตก จะมีค่าเท่ากับผลรวมของกำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากคอนกรีตและเหล็กยื่น ซึ่งเมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีตและเหล็กเสริมดังรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าเหล็กเสริมในเสาจะถึงจุดครากก่อนที่คอนกรีตหุ้มจะถูกอัดจนถึงหน่วยแรงสูงสุดเพียงเล็กน้อย ดังนั้นก่อนที่คอนกรีตหุ้มจะถูกอัดแตกหน่วยแรงของคอนกรีตจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ  $0.85 f_c'$  และหน่วยแรงอัดของเหล็กเสริมจะมีค่าเท่ากับกำลังที่จุดคราก  $f_y$  ดังนั้นกำลังต้านทานแรงอัดที่สภาวะนี้ คือ

$$P_0 = 0.85 f_c' (A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \quad (2.3)$$

โดย  $P_0$  = กำลังรับแรงอัดตามแนวแกนที่ไม่มีการเยื้องศูนย์กลาง (กก.)

$f_c'$  = กำลังอัดประลัยของของคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่อายุ

28 วัน(กก./ตร.ชม.)

$f_y$  = กำลังที่จุดครากของเหล็กเสริมทางยาว (กก./ตร.ชม.)

$A_s$  = พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กยื่นในเสา (ตร.ชม.)

$A_g$  = พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา (ตร.ชม.)

แต่หากเหล็กยื่นมีกำลังจุดครากสูงมาก (High strength steel) การวิเคราะห์หากำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกนของเสาจะต้องพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับหน่วยการหดตัวจริงทั้งของคอนกรีตและเหล็กเสริม ซึ่งกำลังรับแรงอัดของเสาจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นได้ต่อเมื่อกำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากเหล็กเสริมมีค่ามากกว่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่มีค่าต่ำลง

ข้อกำหนดเหล็กปลอกเดี่ยวตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง ของสมาคมวิศวกรรรมสถานแห่งประเทศไทย [2] กำหนดไว้ดังนี้

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอกเดี่ยว ขึ้นกับขนาดของเหล็กยื่น คือ
  - ขนาดอย่างน้อย 6 มม. สำหรับเหล็กยื่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. หรือเล็กกว่า
  - ขนาดอย่างน้อย 9 มม. สำหรับเหล็กยื่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 25 ถึง 32 มม.
  - ขนาดอย่างน้อย 12 มม. สำหรับเหล็กยื่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 32 มม.ขึ้นไป และสำหรับเหล็กยื่นมัดรวมกันเป็นกำ
- ระยะห่างของเหล็กปลอกเดี่ยวต้องไม่มากกว่าค่าต่อไปนี้
  - 16 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กยื่น
  - 48 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอกเดี่ยว
  - มิติที่เล็กที่สุดขององค์อาคารรับแรงอัด

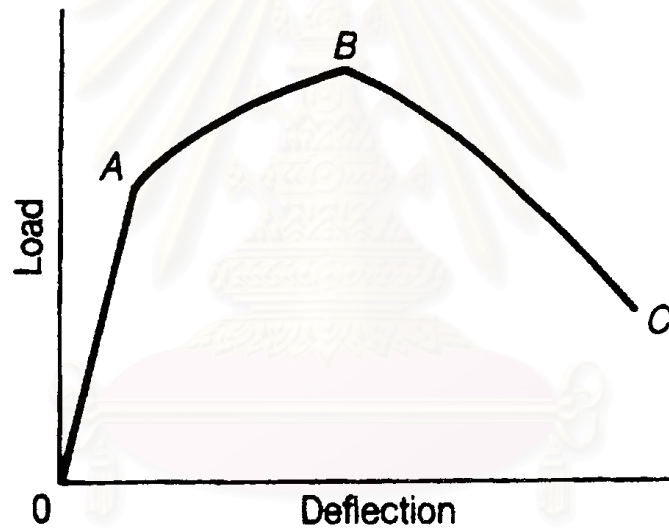
## 2.2 การผสมเส้นใยเหล็ก ในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง

เมื่อกอนกรีตรับแรงอัดในแนวแกน จะเกิดแรงดันด้านข้างขึ้น มีผลให้บริเวณนั้นเป็นพื้นที่รับแรงดึง แต่เนื่องจากคอนกรีตธรรมดาจะรับแรงดึงได้น้อย จึงทำให้เกิดรอยแตกเล็กๆ ในบริเวณดังกล่าว เมื่อเสารับแรงอัดประมาณ 10 – 15% ของแรงอัดสูงสุด และเริ่มขยายมากขึ้นเมื่อรับแรงอัดประมาณ 25 – 30 % ของแรงอัดสูงสุด ดังนั้น เมื่อเราเสริมเส้นใยเหล็กลงในส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อช่วยยึดชิ้นส่วนคอนกรีตไว้ ก็จะสามารถหยุดหรือชะลอการแยกตัวของคอนกรีตได้ ทำให้คอนกรีตมีความเหนียวมากขึ้น



### 2.2.1 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กมีพฤติกรรมการรับแรงดึงดังรูปที่ 2.4 โดยจุด A แทนด้วยตำแหน่งที่คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กจะเกิดรอยแยกขึ้นครั้งแรก ซึ่งจะเป็นตำแหน่งเดียวกันกับคอนกรีตธรรมดา ดังนั้นความชันของเส้นตรง OA ของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กกับคอนกรีตธรรมดาก็จะเหมือนกัน และเมื่อคอนกรีตเริ่มมีรอยแยกแล้ว แรงดึงจะถ่ายแรงอัดไปให้กับเส้นใยเหล็กที่ทำหน้าที่ยึดคอนกรีตไว้ไม่ให้แยกออกจากกัน และเมื่อ เส้นใยเหล็ก ยึดออกรอยแยกก็จะเพิ่มขึ้นทีละน้อย จนถึงจุดที่รับแรงดึงสูงสุดที่จุด B ซึ่งที่จุดนี้ เส้นใยเหล็ก ในคอนกรีตบางส่วนจะหลุดออกจากคอนกรีต แต่เส้นใยเหล็กส่วนใหญ่จะไม่ขาดเนื่องจากโดยทั่วไปเส้นใยเหล็กไม่ได้พัฒนากำลังถึงจุดคราก ในส่วนของเส้นตรง BC นั้น เส้นใยเหล็ก ในคอนกรีตจะหลุดออกมาเรื่อยๆ จนวิบัติ ซึ่งถ้า เส้นใยเหล็ก มีความยาวมาก ทำให้มีหน่วยแรงยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตมาก ก็จะพัฒนากำลังได้ถึงจุดครากได้

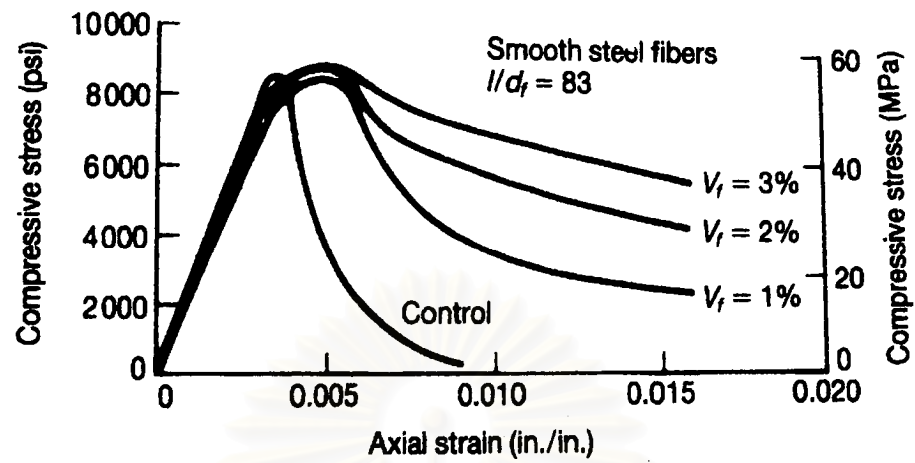


รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและการยืดตัวของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก [16]

### 2.2.2 ผลของเส้นใยเหล็กต่อกำลังต้านทานแรงอัดในคอนกรีต

เมื่อผสมเส้นใยเหล็กลงในคอนกรีต มีผลให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่จะช่วยให้คอนกรีตมีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น คือ คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กจะมีหน่วยการยืดหดตัว ขณะรับแรงอัดสูงสุดมากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเส้นใยเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.5





รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก [14]

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### วิธีการทดสอบ

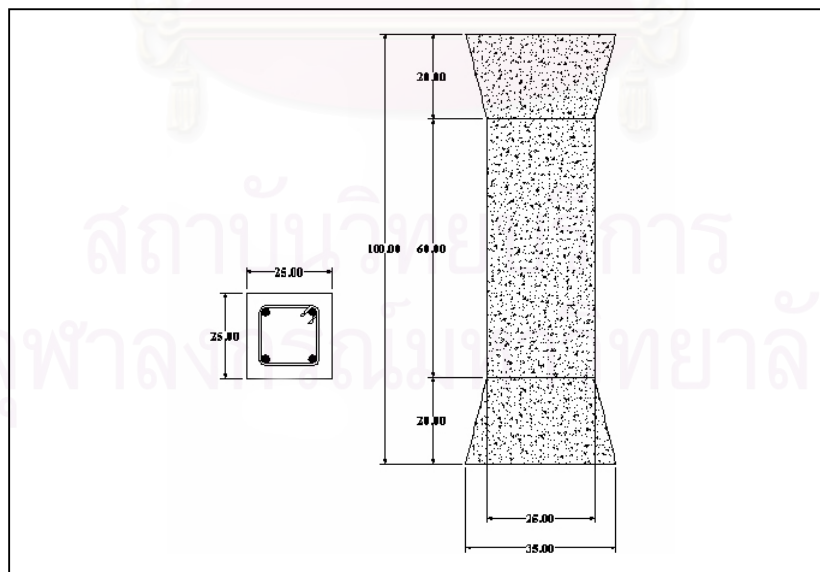
#### 3.1 ลักษณะเสาตัวอย่าง

##### 3.1.1 การเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง

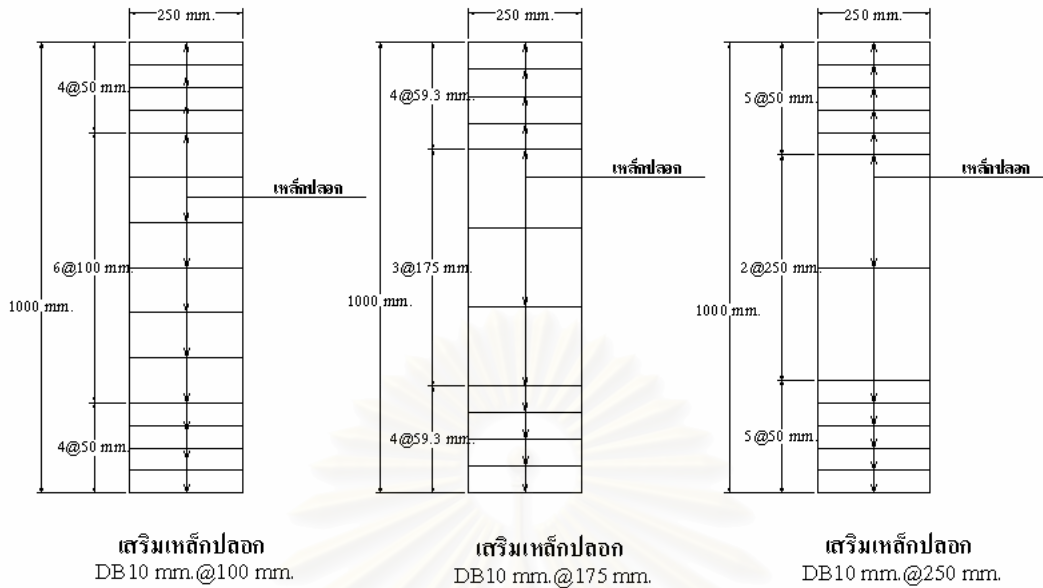
เสาคอนกรีตรูปตัดสี่เหลี่ยมเสริมเหล็กปลอกเดี่ยว มีขนาดหน้าตัด 25 x 25 ซม. สูง 100 ซม. เสริมเหล็กขึ้นขนาด 20 มม. จำนวน 4 เส้น และคอนกรีตมีกำลังอัดประลัย 350 กก./ตร.ซม. ที่ 28 วัน เสริมเหล็กปลอกระยะห่าง 10.0, 17.5 และ 25.0 ซม. มีจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 18 ตัวอย่าง โดยแบ่งออกเป็น 6 กลุ่มๆ ละ 3 ตัวอย่าง ดังนี้

- 1 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขึ้นเป็นเหล็ก SD40 ระยะห่างปลอก 10.0 ซม.
- 2 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขึ้นเป็นเหล็ก SD40 ระยะห่างปลอก 17.5 ซม.
- 3 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขึ้นเป็นเหล็ก SD40 ระยะห่างปลอก 25.0 ซม.
- 4 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขึ้นเป็นเหล็ก SD50 ระยะห่างปลอก 10.0 ซม.
- 5 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขึ้นเป็นเหล็ก SD50 ระยะห่างปลอก 17.5 ซม.
- 6 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขึ้นเป็นเหล็ก SD50 ระยะห่างปลอก 25.0 ซม.

โดยรายละเอียดต่างๆที่กล่าวมาได้แสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2 และนอกจากนี้ได้มีการแสดงคุณสมบัติของตัวอย่างเสาในรูปแบบของตารางดังแสดงในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงขนาดของเสาคอนกรีตและการเสริมเหล็กขึ้นในเสาคอนกรีตที่จะทำการทดสอบ



รูปที่ 3.2 แสดงการเสริมเหล็กปลอกของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่จะทำการทดสอบ

ตารางที่ 3.1 แสดงกำลังและเปอร์เซ็นต์เหล็กของเสาตัวอย่างที่จะทำการทดสอบ

กลุ่ม	กว้างxยาว (ซม.)	ความสูง (ซม.)	เหล็ก ยื่น	$f_y$ (ksc)	เหล็ก ปลอก	$f'_c$ (ksc)	จำนวน	กำลังของเสาคอนกรีต* (Tons)
1	25x25	100	4-DB20	4000	DB10@25.0	350	3	232.44
2	25x25	100	4-DB20	4000	DB10@17.5	350	3	232.44
3	25x25	100	4-DB20	4000	DB10@10.0	350	3	232.44
4	25x25	100	4-DB20	5000	DB10@25.0	350	3	251.28
5	25x25	100	4-DB20	5000	DB10@17.5	350	3	251.28
6	25x25	100	4-DB20	5000	DB10@10.0	350	3	251.28

\* คำนวณจากสูตร

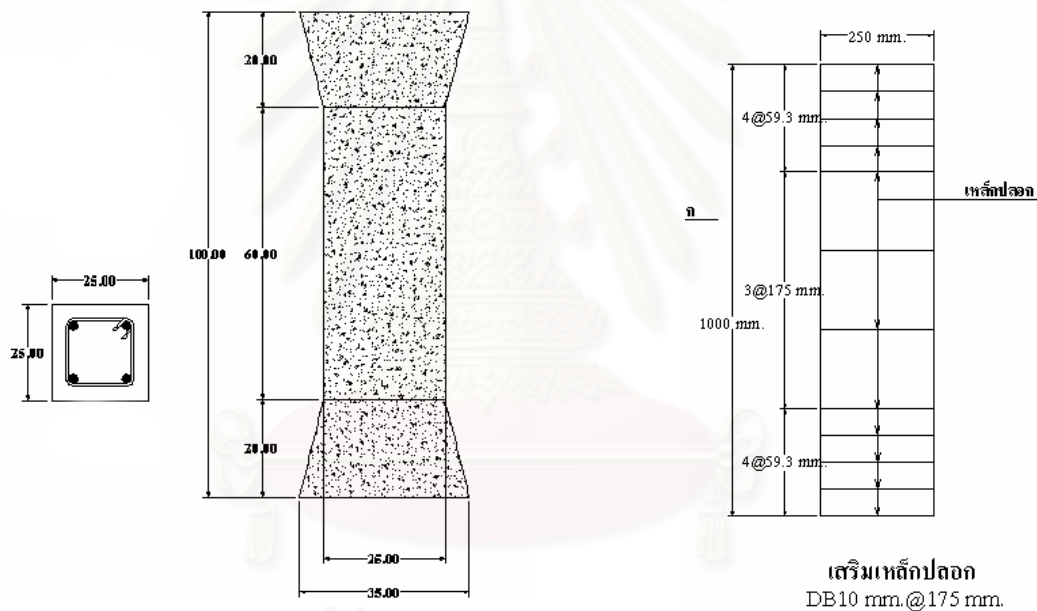
$$P_o = 0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}$$

### 3.1.2 เสาคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กและเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง

เสาคอนกรีตรูปตัดสี่เหลี่ยมเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวมีขนาดหน้าตัด 25 x 25 ซม. สูง 100 ซม. เสริมเหล็กขึ้นเป็นเหล็กข้ออ้อยกำลังสูงขนาด 20 มม. จำนวน 4 เส้น เสริมเหล็กปลอกเป็นเหล็กข้ออ้อยธรรมดาระยะห่าง 17.50 ซม. มีส่วนผสมคอนกรีต 2 ชนิด คือ คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก มีจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 6 ตัวอย่าง โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มๆ ละ 3 ตัวอย่าง ดังนี้

- 1 ใช้คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก 1.5% โดยปริมาตร กำลังอัดประลัย 300 กก./ตร.ซม. ที่ 28 วัน
- 2 ใช้คอนกรีตธรรมดา กำลังอัดประลัย 300 กก./ตร.ซม. ที่ 28 วัน

โดยรายละเอียดต่างๆ ที่กล่าวมาได้แสดงในรูปที่ 3.3 และนอกจากนี้ได้มีการแสดงคุณสมบัติของตัวอย่างเสาในรูปแบบของตารางดังแสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.3 แสดงขนาดของเสาคอนกรีตและการเสริมเหล็กในเสาคอนกรีตที่จะทำการทดสอบ

ตารางที่ 3.2 แสดงกำลังและเปอร์เซ็นต์เหล็กของเสาตัวอย่างที่จะทำการทดสอบ

กลุ่ม	กว้างx ยาว (ซม.)	ความ สูง (ซม.)	จำนวน เหล็ก ยื่น	Steel Fiber (%)	$f_y$ (ksc)	เหล็ก ปลอก	$f'_c$ (ksc)	จำนวน	กำลังของเสาคอนกรีต* (kg)
1	25x25	100	4-DB20	1.5	5000	DB10@17.5	300	3	218847
2	25x25	100	4-DB20	0.0	5000	DB10@17.5	300	3	218847

\* คำนวณจากสูตร

$$P_0 = 0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 3.2 การดำเนินงานวิจัย

### 3.2.1 การเสริมเหล็กปลอกเดียวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง

การดำเนินงานวิจัยประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆดังนี้

#### 3.2.1.1 การดำเนินงานก่อนการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เมื่อได้ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการรับแรงอัดของเสา คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง มาตรฐานต่างๆในการออกแบบเสา รวมถึงการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดสอบ เสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็ จะเริ่มทำการออกแบบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ และ ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ ต่างๆที่จะนำมาทดสอบ รวมถึงการหล่อเสาตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละ ขั้นตอนดังต่อไปนี้

- การออกแบบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ

การออกแบบขนาดเสาตัวอย่างต้องรับแรงอัดสูงสุดได้ไม่เกินกำลังอัดสูงสุดของเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ เมื่อได้ขนาดหน้าตัดของเสาตัวอย่างแล้ว จึงเลือกความสูงเพื่อไม่ให้เสามีความชะลูดมาก และมี จำนวนเหล็กเสริมตามมาตรฐานงานอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กของ ว.ส.ท.

- การเตรียมแบบไม้สำหรับหล่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

แบบที่ใช้จะใช้เป็นแบบไม้ ซึ่งทำด้วยไม้อัด และ เสริมโครงสร้างให้แข็งแรงเพื่อไม่ให้ไม้แบบแอนทำให้ตัวอย่างผิครูปร่างได้ และ แข็งแรงพอที่จะสามารถขนย้ายได้ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แบบไม้สำหรับหล่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก



- การเตรียมเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบ

การเตรียมเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะแบ่งเป็นการเตรียมเหล็กยื่น และ การเตรียมเหล็กปลอก การเตรียมเหล็กยื่นนั้นจะทำการตัดเหล็กเสริมให้ได้ระยะตามแบบ ซึ่งจะตัดให้ปลายของเหล็กเสริมเรียบ และ พยายามให้ชิดแบบมากที่สุดเพื่อให้เกิดการถ่ายแรงได้ดี ซึ่งเหล็กเสริมที่ใช้จะประกอบด้วย เหล็กเส้นข้ออ้อยธรรมดา ( $f_y = 4000$  ksc) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. (DB20) จำนวน 9 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 4 เส้น และ เหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดิ่งสูง ( $f_y = 5000$  ksc) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. (DB20) จำนวน 9 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 4 เส้น

ส่วนเหล็กปลอกที่ใช้นั้นจะเป็นเหล็กปลอกเดี่ยว ซึ่งเป็นเหล็กเส้นข้ออ้อยธรรมดา ( $f_y = 4000$  ksc) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. (DB10) การเตรียมเหล็กปลอกนั้นจะตัด และ ตัดเหล็กปลอกให้ได้ตามแบบ โดยคำนึงระยะงอของเหล็กปลอกด้วยจากนั้นจึงนำเหล็กปลอกมาผูกเข้ากับเหล็กยื่นให้ได้ตามแบบ โดยจะมีระยะห่างต่าง ๆ กัน 3 ระยะ คือ 10.0 17.5 และ 25.0 ซม. โดยมีระยะคอนกรีตที่หุ้ม คือ 3.5 ซม. ดังรูปที่ 3.5 และ 3.6



รูปที่ 3.5 เหล็กที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.6 การเตรียมเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบ

- การติด strain gauge

ตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่จะนำมาทดสอบนั้น จะมีการติด strain gauge บริเวณเหล็กยื่น เพื่อวัด หน่วยการยึดหดตัว ตามแนวของเหล็กยื่น หรือ ตามแนวแกนของเสาตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างเสาแต่ละตัวอย่างจะติด strain gauge 2 ตัว บนเหล็กยื่น 2 เส้น ที่ทแยงกัน บริเวณกึ่งกลางของเสาตัวอย่าง โดยก่อนการติด strain gauge นั้น จะต้องทำให้บริเวณที่จะติด strain gauge มีลักษณะเรียบเสียก่อน โดยจะตะไบข้ออ้อยออก แล้วจึงขัดให้เรียบมากขึ้นด้วยกระดาษหยาบ และกระดาษทรายละเอียด ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.7 และ 3.8

เมื่อบริเวณที่จะติด strain gauge เรียบแล้ว จะเช็ดทำความสะอาดผิวบริเวณนั้นด้วยอะซิโตน (Acetone) ก่อน หลังจากนั้นจะหยดกาวสำหรับติด strain gauge ลงบน strain gauge ด้านสีทองแดง (ไม่ใช่ด้านที่เห็นวงจร) ให้ทั่ว สบัด strain gauge เพื่อไม่ให้กาวชุ่มเกินไปแล้วจึงติด strain gauge ลงบนผิวเหล็กเสริมที่ทำความสะอาดตามแนวของเหล็กเสริม แล้วจึงใช้แผ่นพลาสติกที่ใ้มาทับ strain gauge กดบน strain gauge ประมาณ 1-2 นาทีเพื่อ strain gauge แนบติดสนิท ข้อควรระวังในการติด strain gauge จะต้องไม่ให้สายทองแดงช่วงที่ต่อจาก strain gauge ติดกับผิวเหล็กเสริม เพราะอาจจะทำให้ สายทองแดงขาดได้ เมื่อติด strain gauge เรียบร้อยแล้ว จะนำเทปกาวสำหรับป้องกันน้ำมาติดทับ strain gauge เพื่อป้องกันน้ำจากคอนกรีตสดที่อาจทำให้ strain gauge ชำรุดได้ เหล็กเสริมที่ติด strain gauge แล้วนี้ควรทิ้งไว้เกิน 24 ชั่วโมง เพื่อให้กาวแห้งสนิทก่อนนำไปทำการหล่อตัวอย่าง อุปกรณ์ที่ใช้ในการติด strain gauge นั้นจะแสดงไว้ในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.7 การเตรียมผิวบริเวณที่จะติด strain gauge ให้เรียบ



รูปที่ 3.8 ผิวที่ขัดเรียบแล้ว





รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ที่ใช้ในการติด strain gauge

- การหล่อและการบ่มตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

ก่อนการหล่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น จะเจาะแบบไม้เพื่อเตรียมใส่เหล็กที่ใช้เป็นที่จับสำหรับการเคลื่อนย้าย และ ใช้เป็นรื้อยสาย strain gauge จากนั้นจึงขนย้ายแบบไม้ และ เหล็กเสริมไปบริเวณที่จะทำการหล่อตัวอย่าง แล้วทำความสะอาดแบบไม้ ดังรูปที่ 3.10 และ ทาแบบด้านในด้วยน้ำมันเพื่อป้องกันคอนกรีตติดไม้แบบ ดังรูปที่ 3.11 แล้วจึงนำเหล็กเสริมที่ติด strain gauge เรียบร้อยแล้วใส่ลงในแบบไม้ และ รื้อยสาย strain gauge ออกมานอกแบบไม้ ดังรูปที่ 3.12 จัดเรียงแบบให้เป็นระเบียบพร้อมทั้งเขียนหมายเลขตัวอย่างกำกับบนแบบไม้ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.10 การทำความสะอาด



รูปที่ 3.11 การทาน้ำมันแบบไม้



รูปที่ 3.12 การร้อยสาย strain gauge



รูปที่ 3.13 การจัดเรียงแบบ

การหล่อเสาต้วอย่างนั้นคอนกรีตที่ใช้จะใช้เป็นคอนกรีตผสมเสร็จ โดยจะใช้รถเข็นคอนกรีตช่วยในการลำเลียงคอนกรีต ดังรูปที่ 3.14 และ ใช้พลั่วเทคอนกรีตลงในแบบ ดังรูปที่ 3.15 ในขณะที่เดียวกัน จะทำการจี้คอนกรีตให้ทั่วด้วยเครื่องจี้คอนกรีต (Internal Vibrators) ด้วย เพื่อลดช่องว่างในเนื้อคอนกรีต (Void) ดังรูปที่ 3.16 ซึ่งในการเท และ จี้คอนกรีตจะต้องทำด้วยความระมัดระวัง โดยเฉพาะในบริเวณที่ติดตั้ง strain gauge และ บริเวณที่คืนสาย strain gauge ด้วย เมื่อคอนกรีตเต็มแบบก็จะทำการฉาบผิวให้เรียบ ดังรูปที่ 3.17 เมื่อคอนกรีตเริ่มหมาดก็จะแต่งผิวหน้าคอนกรีตอีกครั้ง พร้อมทั้งเขียนหมายเลขของตัวอย่างลงบนผิวคอนกรีต จากนั้นจะนำพลาสติกมาคลุมตัวอย่างเพื่อป้องกันสิ่งแปลกปลอมติดผิวตัวอย่าง และ ป้องกันผืนด้วย ดังรูปที่ 3.20 และ 3.21 ในขณะที่เราเทคอนกรีตลงในแบบหล่อตัวอย่าง เราจะทดสอบค่าการยุบตัว (Slump Test) ด้วย ดังรูปที่ 3.18 และ เทคอนกรีตลงในแบบหล่อลูกปูน ดังรูปที่ 3.19 เพื่อนำไปทำการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบต่อไป



รูปที่ 3.14 การใช้รถเข็น



รูปที่ 3.15 พลั่วในการเทคอนกรีต





รูปที่ 3.16 การจี้คอนกรีต



รูปที่ 3.17 การฉาบผิวคอนกรีต



รูปที่ 3.18 การทำ Slump Test



รูปที่ 3.19 การเทคอนกรีตลงในแบบหล่อลูกปุน



รูปที่ 3.20 ตัวอย่างที่ทดสอบเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 3.21 ตัวอย่างที่ทดสอบเรียบร้อยแล้ว

หลังจากหล่อตัวอย่างเสาคอนกรีต 2 วัน ก็จะทำการแกะแบบไม้ ออก และ หุ้มตัวอย่างเสาด้วยพลาสติกเพื่อเป็นการบ่มคอนกรีต โดยการบ่มตัวอย่างเสา คอนกรีตนี้จะใช้ระยะเวลาการบ่มอย่างน้อย 28 วัน ส่วนลูกปุนนั้น จะทำการแกะแบบ ดังรูปที่ 3.22 และ 3.23 จากนั้นนำไปบ่มโดยการแช่น้ำ ซึ่งจะใช้ระยะเวลาการบ่มอย่างน้อย 28 วันเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 3.24 และ 3.25





รูปที่ 3.22 การแกะแบบ



รูปที่ 3.23 การแกะแบบ



รูปที่ 3.24 การบ่มตัวอย่างด้วยการหุ้มพลาสติก



รูปที่ 3.25 การบ่มตัวอย่างด้วยการหุ้มพลาสติก

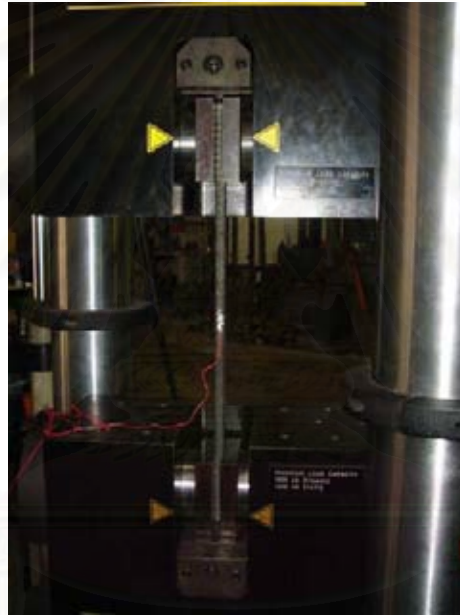
- การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบ

การทดสอบคุณสมบัติของเหล็กเส้นข้ออ้อยที่จะใช้ในการทดสอบนั้น จะใช้การทดสอบกำลังรับแรงดึงเพื่อหาค่ากำลังที่จุดครากของเหล็กเส้นข้ออ้อย (Yield Strength,  $f_y$ ) และ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเส้นข้ออ้อย (Modulus of Elasticity,  $E_s$ ) ทั้งเหล็กเส้นข้ออ้อยธรรมดา และ เหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง

การทดสอบจะทดสอบด้วย Instron Universal Testing Machine กำลังสูงสุด 100 ตัน เหล็กเส้นข้ออ้อยที่จะนำมาทดสอบนั้น จะตัดให้ได้ระยะพอที่จะให้เครื่องทดสอบจับได้แน่น แล้วนำไปเตรียมผิวให้เรียบสำหรับติด strain gauge บริเวณกลางของเหล็กเส้นข้ออ้อย หลังจากนั้นจะวัดความยาว และ ชั่งแรงอัดของเหล็กเส้นข้ออ้อย เพื่อนำไปหาค่าพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเส้นข้ออ้อยต่อไป แล้วจึงติด strain

gauge ตามวิธีที่ได้กล่าวไปแล้ว และ ทิ้งไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมงเพื่อให้กาวแห้งสนิทก่อนการทดสอบกำลังรับแรงดึง ดังรูปที่ 3.26

การบันทึกผลการทดลองนั้นจะบันทึกค่าแรงดึง (Load) และ ค่าหน่วยการยืดหดตัว (strain) ด้วยคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 3.29 และ 3.30 โดยค่าแรงดึงจะได้จากเครื่อง Instron Universal Testing Machine ดังรูป 3.27 ส่งข้อมูลต่อมายังเครื่อง Data Logger ก่อนที่จะส่งข้อมูลมายังเครื่องคอมพิวเตอร์อีกทอดหนึ่ง ส่วนข้อมูลค่าหน่วยการยืดหดตัวนั้น จะได้จาก strain gauge ส่งข้อมูลผ่านเครื่อง Data Logger แล้วส่งข้อมูลมายังเครื่องคอมพิวเตอร์ แล้วจึงนำข้อมูลต่างๆมาหาความสัมพันธ์ของแรงดึง (Stress) และ หน่วยการยืดหดตัว (strain) เพื่อหาค่ากำลังที่จุดครากของเหล็กเส้นข้ออ้อย (Yield Strength,  $f_y$ ) และ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเส้นข้ออ้อย (Modulus of Elasticity,  $E_s$ ) ต่อไป การทดสอบจะทดสอบจนเกิดการวิบัติ ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.26 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.27 strain gauge ก่อนการทดสอบ



รูปที่ 3.28 strain gauge หลังการทดสอบ



รูปที่ 3.29 การแสดงผลจากเครื่อง Intron  
Universal Testing Machine



รูปที่ 3.30 การแสดงผลจาก เครื่อง Data Logger

- การทดสอบกำลังรับแรงอัดของลูกปูน

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของลูกปูนนี้ จะทดสอบเพื่อหาค่ากำลังอัดประลัยของลูกปูน ( $f_c'$ ) ที่อายุของคอนกรีตต่างๆกัน ซึ่งอย่างน้อย 28 วันก่อนการทดสอบจะนำลูกปูนที่บ่มด้วยการแช่น้ำเรียบร้อยแล้ว มา Cap เพื่อให้ผิวเรียบ ทั้งไว้ให้กำมะถันแห้งดีแล้ว จึงนำไปทดสอบเพื่อหาค่ากำลังอัดประลัยต่อไป ดังรูปที่ 3.31 โดยบางตัวอย่างจะทำการหาค่า Stress และ strain ของตัวอย่างด้วย ดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.31 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของลูกปูน



รูปที่ 3.32 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของลูกปูน



### 3.2.1.2 การดำเนินการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เมื่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอายุครบ 28 วัน จะเริ่มทำการทดสอบตัวอย่างเสา คอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งการทดสอบจะทดสอบการรับแรงอัดในแนวแกนของเสาโดยไม่มีการเอียงศูนย์ด้วย เครื่อง Instron Universal Testing Machine กำลังสูงสุด 500 ตัน ก่อนการทดสอบจะต้องทำการเปลี่ยนหัวกด ของเครื่องทดสอบให้เหมาะกับตัวอย่างด้วย เมื่อเตรียมเครื่องทดสอบเรียบร้อยแล้วจะขนย้ายตัวอย่างเสาด้วย รถ Forklift ขึ้นบนแท่นกดที่มีแผ่นเหล็กรองอยู่แล้วจึงวางแผ่นเหล็กบนเสาตัวอย่างอีกหนึ่งหนึ่งเพื่อให้แรงอัดที่ กดกระจายสม่ำเสมอ จากนั้นจะจัดตำแหน่งของตัวอย่างให้ดีเพื่อไม่ให้เกิดการเอียงศูนย์ ดังรูปที่ 3.33 และ 3.35 แล้ววัดขนาดของเสาตัวอย่าง และเตรียมเครื่องมือที่ใช้ทดสอบให้พร้อมดังรูปที่ 3.34

การทดสอบเสาดังนั้นจะทดสอบด้วยวิธี strain Control การบันทึกค่าจะบันทึกค่าด้วย คอมพิวเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยค่าแรงอัด (Load) และ ค่าหน่วยการยืดหดตัว (strain) โดยค่าแรงอัดจะได้จาก เครื่อง Instron Universal Testing Machine ส่งข้อมูลต่อมายังเครื่อง Data Logger ก่อนที่จะส่งข้อมูลมายัง เครื่องคอมพิวเตอร์อีกทอดหนึ่ง ส่วนข้อมูลค่าหน่วยการยืดหดตัวนั้น จะได้จาก strain gauge ทั้งสองตัวใน ตัวอย่างเสาส่งข้อมูลผ่านเครื่อง Data Logger แล้วส่งข้อมูลมายังเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 3.37 ระหว่าง การทดสอบจะมีการถ่ายรูป และ สังเกตพฤติกรรมของเสาดังตัวอย่างที่ค่าแรงอัดต่างๆ ว่าเริ่มมีการวิบัติที่จุดใด ก่อน วิบัติลักษณะใด พร้อมทั้งบันทึกผลการสังเกตด้วย ดังรูปที่ 3.38 เมื่อทดสอบจนวิบัติแล้วจะสังเกต ลักษณะคอนกรีต และ เหล็กเสริมบริเวณที่วิบัติ พร้อมบันทึกผล ดังรูปที่ 3.39 จากนั้นจึงนำตัวอย่างที่วิบัติ แล้วไปทิ้ง



รูปที่ 3.33 การจัดตำแหน่งตัวอย่างเสาไม่ให้เกิดการเอียงศูนย์



รูปที่ 3.34 การจัดเตรียมเครื่อง Data Logger



รูปที่ 3.35 เสาตัวอย่างก่อนการทดสอบ



รูปที่ 3.36 เสาตัวอย่างหลังการทดสอบ



รูปที่ 3.37 การบันทึกข้อมูลด้วย Data Logger



รูปที่ 3.38 การบันทึกข้อมูลด้วยการสังเกต

### 3.2.2 การผสมเส้นใยเหล็ก ในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง

การดำเนินงานวิจัยประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

#### 3.2.2.1 การดำเนินงานก่อนการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เมื่อได้ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการรับแรงอัดของเสา ทฤษฎีเกี่ยวกับคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง มาตรฐานต่างๆ ในการออกแบบเสา รวมถึงการใช้เครื่องมือ และ อุปกรณ์ในการทดสอบ เสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็จะเริ่มทำการออกแบบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ และ ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุต่างๆที่จะนำมาทดสอบ รวมถึงการหล่อเสาตัวอย่างเสา คอนกรีตเสริมเหล็กด้วย ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้

- การออกแบบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ

ขนาดเสาตัวอย่างต้องรับแรงอัดสูงสุดได้ไม่เกินกำลังอัดสูงสุดของเครื่องมือที่ใช้ทดสอบ เมื่อได้ขนาดหน้าตัดของเสาตัวอย่างแล้ว จึงเลือกความสูงเพื่อไม่ให้เสามีความชะลูดมาก และมีจำนวนเหล็กเสริมตามมาตรฐานงานอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กของ ว.ส.ท. และศึกษางานวิจัยในอดีต เพื่อหาปริมาณของเส้นใยเหล็กที่เหมาะสมสำหรับการผสมในคอนกรีต

- การเตรียมแบบไม้สำหรับหล่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

แบบที่ใช้จะใช้เป็นแบบไม้ ซึ่งทำด้วยไม้อัด และ เสริมโครงสร้างให้แข็งแรงเพื่อไม่ให้ไม้แบบแอนทำให้ตัวอย่างผิกรูปร่างได้ และ แข็งแรงพอที่จะทำให้สามารถขนย้ายได้ ดังรูปที่ 3.39



รูปที่ 3.39 แบบไม้สำหรับหล่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก



- **การเตรียมเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบ**

การเตรียมเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบนั้นจะแบ่งเป็นการเตรียมเหล็กยื่น และ การเตรียมเหล็กปลอก การเตรียมเหล็กยื่นนั้นจะทำการตัดเหล็กเสริมให้ได้ระยะตามแบบ ซึ่งจะตัดให้ปลายของเหล็กเสริมเรียบ และ พยายามให้ชิดแบบมากที่สุดเพื่อให้เกิดการถ่ายแรงได้ดี ซึ่งเหล็กเสริมที่ใช้จะประกอบด้วยเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง ( $f_y = 5000 \text{ ksc}$ ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. (DB20) จำนวน 6 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 4 เส้น

ส่วนเหล็กปลอกที่ใช้นั้นจะเป็นเหล็กปลอกเดี่ยว ซึ่งเป็นเหล็กเส้นข้ออ้อยธรรมดา ( $f_y = 4000 \text{ ksc}$ ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. (DB10) การเตรียมเหล็กปลอกนั้นจะตัด และ ดัดเหล็กปลอกให้ได้ตามแบบ โดยคำนึงระยะของเหล็กปลอกด้วยจากนั้นจึงนำเหล็กปลอกมาผูกเข้าเหล็กยื่นให้ได้ตามแบบ โดยจะมีระยะห่าง คือ 17.5 ซม. โดยมีระยะคอนกรีตที่หุ้ม คือ 3.5 ซม. ดังรูปที่ 3.40



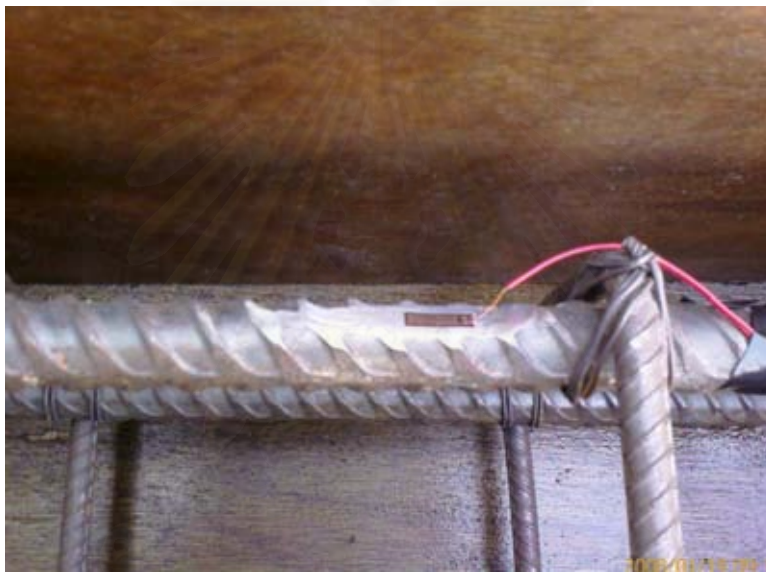
รูปที่ 3.40 เหล็กที่ใช้ในการทดสอบ

- **การติด strain gauge**

ตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่จะนำมาทดสอบนั้น จะมีการติด strain gauge บริเวณเหล็กยื่น เพื่อวัด strain ตามแนวของเหล็กยื่น หรือ ตามแนวแกนของเสาตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างเสาแต่ละตัวอย่างจะติด strain gauge 2 ตัว บนเหล็กยื่น 2 เส้น ที่ทแยงกัน บริเวณกึ่งกลางของเสาตัวอย่าง โดยก่อนการติด strain gauge นั้น จะต้องทำให้บริเวณที่จะติด strain gauge มีลักษณะเรียบเสียก่อน โดยจะตะไบข้ออ้อยออก แล้วจึงขัดให้เรียบมากขึ้นด้วยกระดาษหยาบ และกระดาษทรายละเอียด ตามลำดับ

เมื่อบริเวณที่จะติด strain gauge เรียบแล้ว จะเช็ดทำความสะอาดผิวบริเวณนั้นด้วยอะซิโตน (Acetone) ก่อน หลังจากนั้นจะหยดกาวสำหรับติด strain gauge ลงบน strain gauge ด้านสีทองแดง (ไม่ใช่

ด้านที่เห็นวงจร) ให้ทั่ว สะบัด strain gauge เพื่อไม่ให้กาวชุ่มเกินไปแล้วจึงติด strain gauge ลงบนผิวเหล็กเสริมที่ทำความสะอาดตามแนวของเหล็กเสริม แล้วจึงใช้แผ่นพลาสติกที่ให้มากับ strain gauge กดบน strain gauge ประมาณ 1-2 นาทีเพื่อ strain gauge แนบติดสนิท ข้อควรระวังในการติด strain gauge จะต้องไม่ให้สายทองแดงช่วงที่ต่อจาก strain gauge ติดกับผิวเหล็กเสริม เพราะอาจจะทำให้ สายทองแดงขาดได้ เมื่อติด strain gauge เรียบร้อยแล้ว จะนำเทปกาวสำหรับป้องกันน้ำมาติดทับ strain gauge เพื่อป้องกันน้ำจากคอนกรีตสดที่อาจทำให้ strain gauge ชำรุดได้ เหล็กเสริมที่ติด strain gauge แล้วนี้ควรทิ้งไว้เกิน 24 ชั่วโมง เพื่อให้กาวแห้งสนิทก่อนนำไปทำการหล่อตัวอย่าง อุปกรณ์ที่ใช้ในการติด strain gauge นั้นจะแสดงไว้ในรูปที่ 3.41



รูปที่ 3.41 การติด strain gauge ให้เรียบร้อย

- การเตรียมเส้นใยเหล็ก

เส้นใยเหล็กที่จะนำมาทดสอบเป็นของบริษัท Duramix ดังแสดงในรูปที่ 3.42 มีความยาวเส้นละ 60 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.75 มม. มีค่า  $L/d = 80$  มีกำลังต้านทานแรงดึง 1,050 นิวตัน/ตร.มม. ในการทดสอบเสาตัวอย่าง ต้องการเส้นใยเหล็กผสมในคอนกรีตเท่ากับ 1.5% โดยปริมาตรของเสาตัวอย่างทั้ง 3 ตัวอย่าง ดังนั้นต้องคำนวณน้ำหนักของเส้นใยเหล็กที่จะใช้ในการผสมในคอนกรีต ดังนี้

เสาตัวอย่างจำนวน 1 ต้น มีปริมาตร 0.0675 ลบ.ม.

เสาตัวอย่างจำนวน 3 ต้น มีปริมาตร =  $0.0675 \times 3 = 0.2025$  ลบ.ม.

ผสมเส้นใยเหล็ก 1.5% โดยปริมาตร คิดเป็น =  $0.2025 \times 0.015 = 0.0030375$  ลบ.ม.

เส้นใยเหล็ก 1 ลบ.ม.หนัก 7850 กก.

ดังนั้น ต้องใช้เส้นใยเหล็กหนัก =  $7850 \times 0.0030375 = 23.84$  กก.



รูปที่ 3.42 รูปตัวอย่างเส้นใยเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ

- **การหล่อและการบ่มตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก**

ก่อนการหล่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น จะเจาะแบบไม้เพื่อเตรียมใส่เหล็กที่ใช้เป็นที่จับสำหรับการเคลื่อนย้าย และ ใช้เป็นรูร้อยสาย strain gauge จากนั้นจึงขนย้ายแบบไม้ และ เหล็กเสริมไปบริเวณที่จะทำการหล่อตัวอย่าง แล้วทำความสะอาดแบบไม้ และ ทาแบบด้านในด้วยน้ำมันเพื่อป้องกันคอนกรีตติดไม้แบบ แล้วจึงนำเหล็กเสริมที่ติด strain gauge เรียบร้อยแล้วใส่ลงในแบบไม้ และ ร้อยสาย strain gauge ออกมานอกแบบไม้ จัดเรียงแบบให้เป็นระเบียบพร้อมทั้งเขียนหมายเลขกำกับบนแบบไม้

การหล่อเสาตัวอย่างนั้นคอนกรีตที่ใช้จะใช้เป็นคอนกรีตผสมเสร็จ โดยจะผสมสองครั้ง ครั้งแรกเป็นคอนกรีตธรรมดาและครั้งที่สองเป็นคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก 1.5 % โดยปริมาตร

การลำเลียงคอนกรีตจะใช้รถเข็นคอนกรีตช่วย และ ใช้พลั่วเทคอนกรีตลงในแบบ ในขณะที่เดียวกันจะทำการจี้คอนกรีตให้ทั่วด้วยเครื่องจี้คอนกรีต (Internal Vibrators) ด้วย เพื่อลดช่องว่างในเนื้อคอนกรีต (Void) ดังรูปที่ 3.43 ซึ่งในการเท และ จี้คอนกรีตจะต้องทำด้วยความระมัดระวัง โดยเฉพาะในบริเวณที่ติด strain gauge และ บริเวณที่คืนสาย strain gauge ด้วย เมื่อคอนกรีตเต็มแบบก็จะทำการฉาบผิวให้เรียบ เมื่อคอนกรีตเริ่มหมาดก็จะแต่งผิวหน้าคอนกรีตอีกครั้ง ในขณะที่เราเทคอนกรีตลงในแบบหล่อตัวอย่าง เราจะทดสอบค่าการยุบตัว (Slump Test) ด้วย ดังรูปที่ 3.44 และ เทคอนกรีตลงในแบบหล่อลูกปูน ดังรูปที่ 3.45 เพื่อนำไปทำการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบต่อไป





รูปที่ 3.43 การจี้คอนกรีต



รูปที่ 3.44 การทำ Slump Test



รูปที่ 3.45 การเทคอนกรีตลงในแบบหล่อลูกปูน

หลังจากหล่อตัวอย่างเสาคอนกรีต 2 วัน ก็จะทำการแกะแบบไม้ ออก และ หุ้มตัวอย่างเสาด้วยพลาสติกเพื่อเป็นการบ่มคอนกรีต โดยการบ่มตัวอย่างเสาคอนกรีตนี้จะใช้ระยะเวลาการบ่มอย่างน้อย 28 วัน ส่วนลูกปูนนั้น จะทำการแกะแบบ จากนั้นนำไปบ่มโดยการแช่น้ำ ซึ่งจะใช้ระยะเวลาการบ่มอย่างน้อย 28 วัน เช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 3.46 และรูปที่ 3.47



รูปที่ 3.46 การบ่มตัวอย่างด้วยการหุ้มพลาสติก



รูปที่ 3.47 การบ่มลูกปุ่นด้วยการแช่น้ำ

- **การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบ**

การทดสอบคุณสมบัติของเหล็กเส้นข้ออ้อยที่จะใช้ในการทดสอบนั้น จะใช้การทดสอบกำลังรับแรงดึงเพื่อหาค่ากำลังที่จุดครากของเหล็กเส้นข้ออ้อย (Yield Strength,  $f_y$ ) และ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเส้นข้ออ้อย (Modulus of Elasticity,  $E_s$ ) ทั้งเหล็กเส้นข้ออ้อยธรรมดา และ เหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง เนื่องจากเหล็กข้ออ้อยที่ใช้ในการทดสอบนี้ เป็นเหล็กที่ผลิตขึ้นพร้อมกันกับเหล็กที่ใช้ในการทดสอบที่ 3.2.1 จึงนำค่ากำลังที่จุดครากของเหล็กเส้นข้ออ้อย (Yield Strength,  $f_y$ ) และ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเส้นข้ออ้อย (Modulus of Elasticity,  $E_s$ ) ทั้งเหล็กเส้นข้ออ้อยธรรมดา และ เหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูงของการทดสอบที่ 3.2.1 มาใช้

- **การทดสอบกำลังรับแรงอัดของลูกปุ่น**

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของลูกปุ่นนี้ จะทดสอบเพื่อหาค่ากำลังอัดประลัยของลูกปุ่น ( $f'_c$ ) ที่อายุ 28 วัน ก่อนการทดสอบจะนำลูกปุ่นที่บ่มด้วยการแช่น้ำเรียบร้อยแล้ว มา Cap เพื่อให้ผิวเรียบ ทิ้งไว้ให้ก้ำมะกันแห้งดีแล้ว จึงนำไปทดสอบเพื่อหาค่ากำลังอัดประลัยต่อไป ดังรูปที่ 3.49 โดยบางตัวอย่างจะทำการหาค่า Stress และ strain ของตัวอย่างด้วย ดังรูปที่ 3.48



รูปที่ 3.48 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของลูกปูน รูปที่ 3.49 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของลูกปูน

### 3.2.2.2 การดำเนินการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เมื่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอายุครบ 28 วัน จะเริ่มทำการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งการทดสอบจะทดสอบการรับแรงอัดบรรทุกในแนวแกนของเสาโดยไม่มีภาระเชื่อมศูนย์ด้วยเครื่อง Amsler Testing Machine กำลังสูงสุด 500 ตัน เมื่อเตรียมเครื่องทดสอบเรียบร้อยแล้วจะขนย้ายตัวอย่างเสา ขึ้นบนแท่นกดที่มีแผ่นเหล็กรองอยู่แล้ว จากนั้นจะจัดตำแหน่งของตัวอย่างให้ดีเพื่อไม่ให้เกิดการเชื่อมศูนย์ ดังรูปที่ 3.50 แล้ววัดขนาดของเสาตัวอย่าง และเตรียมเครื่องมือที่ใช้ทดสอบให้พร้อมดังรูปที่ 3.51

การทดสอบเสาตัวอย่างนั้น มีการบันทึกค่าหน่วยการยืดหดตัว (strain) ที่อ่านได้จากเครื่อง Data Logger เมื่อแรงอัดในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้นทุกครั้งครั้งละ 10 ตัน และส่งข้อมูลหน่วยการยืดหดตัว (strain) จากเครื่อง Data Logger เข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อนำมาตรวจสอบอีกครั้ง โดยข้อมูลค่าหน่วยการยืดหดตัวนั้น จะได้จาก strain gauge ทั้งสองตัวในตัวอย่างเสาส่งข้อมูลผ่านเครื่อง Data Logger แล้วส่งข้อมูลมายังเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 3.54 ระหว่างการทดสอบจะมีการถ่ายรูป และ สังเกตพฤติกรรมของเสาตัวอย่างที่ค่าแรงอัดต่างๆ ว่าเริ่มมีการวิบัติที่จุดใดก่อน วิบัติลักษณะใด พร้อมทั้งบันทึกผลการสังเกตด้วย เมื่อทดสอบจนวิบัติแล้วจะสังเกตลักษณะคอนกรีตดังรูปที่ 3.52 และ เหล็กเสริมบริเวณที่วิบัติ พร้อมบันทึกผล ดังรูปที่ 3.53 จากนั้นจึงนำตัวอย่างที่วิบัติแล้ว ไปทิ้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 3.50 การจัดตำแหน่งตัวอย่างเสาไม้ให้ไม่เกิดการเอียงศูนย์



รูปที่ 3.51 การจัดเตรียมเครื่อง Data Logger

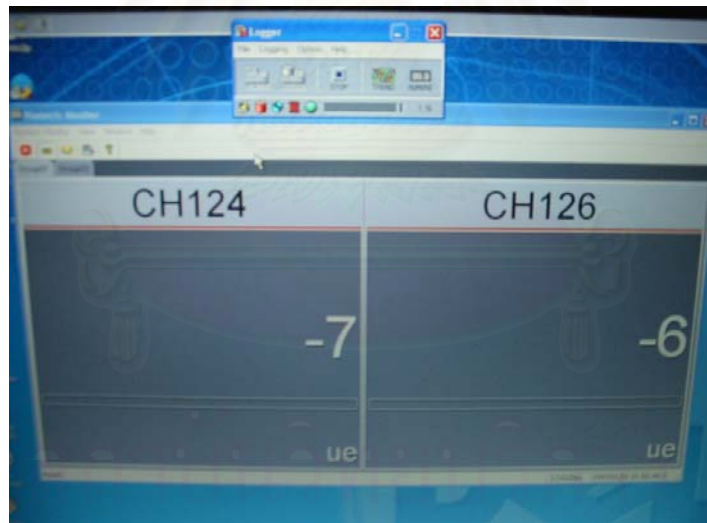
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.52 เสาตัวอย่างก่อนการทดสอบ



รูปที่ 3.53 เสาตัวอย่างหลังการทดสอบ



รูปที่ 3.54 การบันทึกข้อมูลด้วย Data Logger

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.3 ผลการทดสอบ

#### 3.3.1 การเสริมเหล็กปลอกเดียวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง

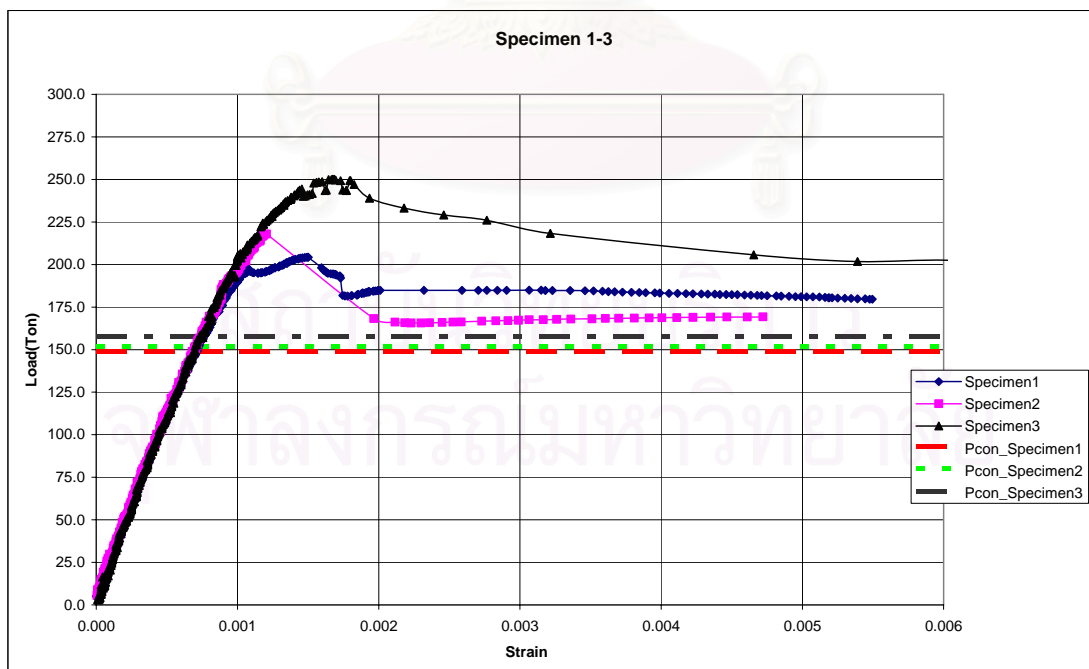
##### ● ผลการทดสอบเสาตัวอย่าง

การแสดงผลการทดสอบนั้นจะแสดงผลการทดสอบด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการรับแรงอัดของเสาตัวอย่างกับหน่วยการขีดหุด โดยจะแสดงเป็นกลุ่มๆ ซึ่งแบ่งตามระยะห่างของเหล็กปลอก สามารถแบ่งเป็น 6 กลุ่มดังนี้

1. เหล็กยื่นใช้เหล็ก SD40 ระยะห่างเหล็กปลอก 10.0 ซม.(หมายเลข 1-3)
2. เหล็กยื่นใช้เหล็ก SD40 ระยะห่างเหล็กปลอก 17.5 ซม.(หมายเลข 4-6)
3. เหล็กยื่นใช้เหล็ก SD40 ระยะห่างเหล็กปลอก 25.0 ซม.(หมายเลข 7-9)
4. เหล็กยื่นใช้เหล็ก SD50 ระยะห่างเหล็กปลอก 10.0 ซม.(หมายเลข 10-12)
5. เหล็กยื่นใช้เหล็ก SD50 ระยะห่างเหล็กปลอก 17.5 ซม.(หมายเลข 13-15)
6. เหล็กยื่นใช้เหล็ก SD50 ระยะห่างเหล็กปลอก 25.0 ซม.(หมายเลข 16-18)

โดยผลที่แสดงนั้นจะแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ strain ของแต่ละตัวอย่าง ซึ่ง strain ที่แสดงนั้นจะเป็นค่าที่ได้จากเฉลี่ยของ strain gauge สองเส้นที่ได้ทำการติดในเสาตัวอย่างในด้านที่อยู่ตรงกันข้ามกันเป็นเส้นทแยงมุม

#### กลุ่มที่ 1 ตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 1-3 มีความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ดังรูปที่ 3.55



รูปที่ 3.55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 1-3 เหล็กยื่นใช้เหล็ก SD40 ระยะห่างเหล็กปลอก 10.0 ซม.

ตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 1-3 เกิดการวิบัติดังรูปที่ 3.56 ถึงรูปที่ 3.61



รูปที่ 3.56 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 1



รูปที่ 3.57 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 1



รูปที่ 3.58 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 2



รูปที่ 3.59 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 2



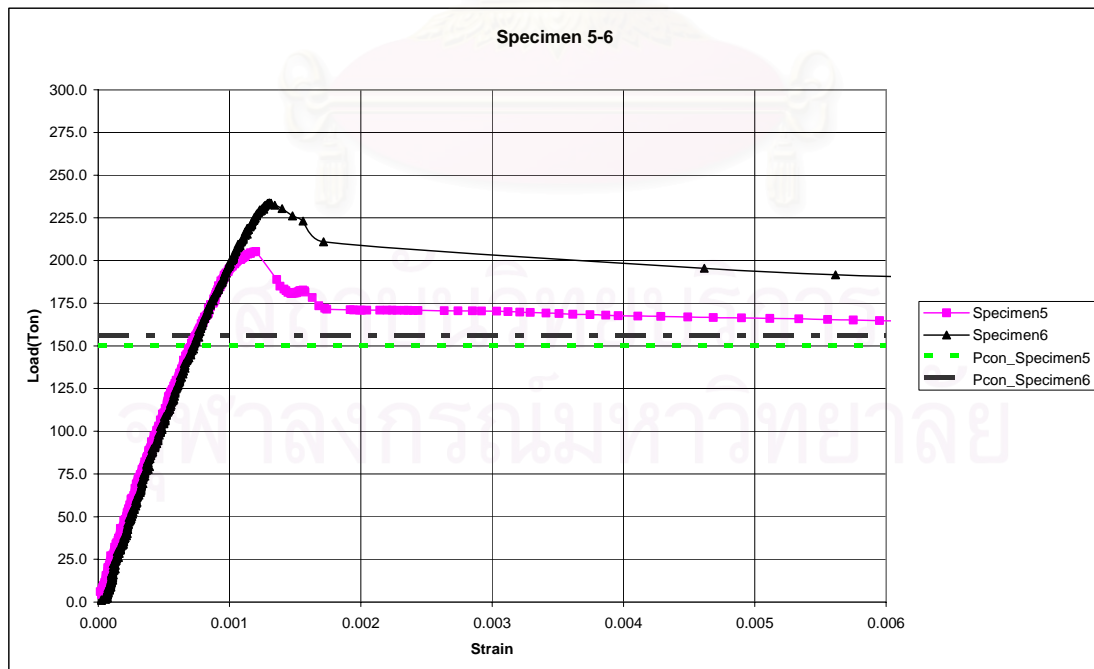


รูปที่ 3.60 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 3



รูปที่ 3.61 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 3

กลุ่มที่ 2 ตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 5-6 มีความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ดังรูปที่ 3.62  
 ในกลุ่มที่ 2 นี้มีผลการทดสอบเพียง 2 ตัวอย่าง เนื่องจากในการทดสอบตัวอย่างที่ 4 นั้นมีความผิดพลาดในการทดสอบเกิดขึ้น



รูปที่ 3.62 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 5-6 โดยเหล็กชั้น  
 ใช้เหล็ก SD40 ระยะห่างเหล็กปลอก 17.5 ซม.

ตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 1-3 เกิดการวิบัติดังรูปที่ 3.63 ถึง รูปที่ 3.68



รูปที่ 3.63 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 4



รูปที่ 3.64 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 4



รูปที่ 3.65 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 5





รูปที่ 3.66 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 5



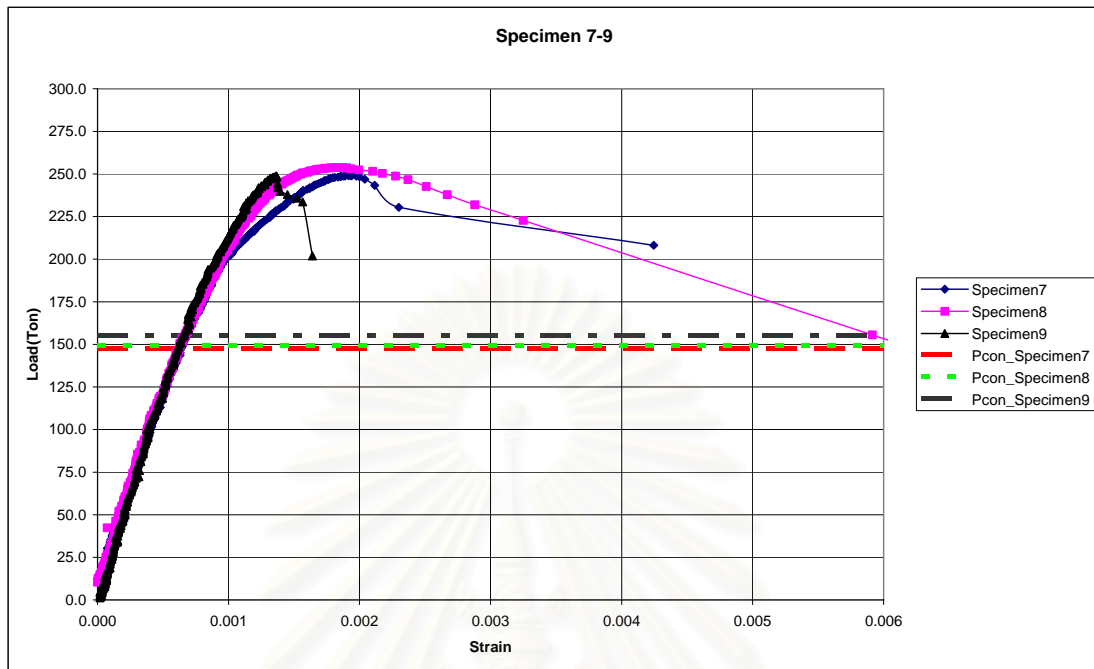
รูปที่ 3.67 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 6



รูปที่ 3.68 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กลุ่มที่ 3 ตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 7-9 มีความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ดังรูปที่ 3.69



รูปที่ 3.69 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 7-9 โดยเหล็กยื่นใช้เหล็ก SD40 ระยะห่างเหล็กปลอก 25.0 ซม.

ตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 7-9 เกิดการวิบัติดังรูปที่ 3.70 ถึง รูปที่ 3.73



รูปที่ 3.70 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 7

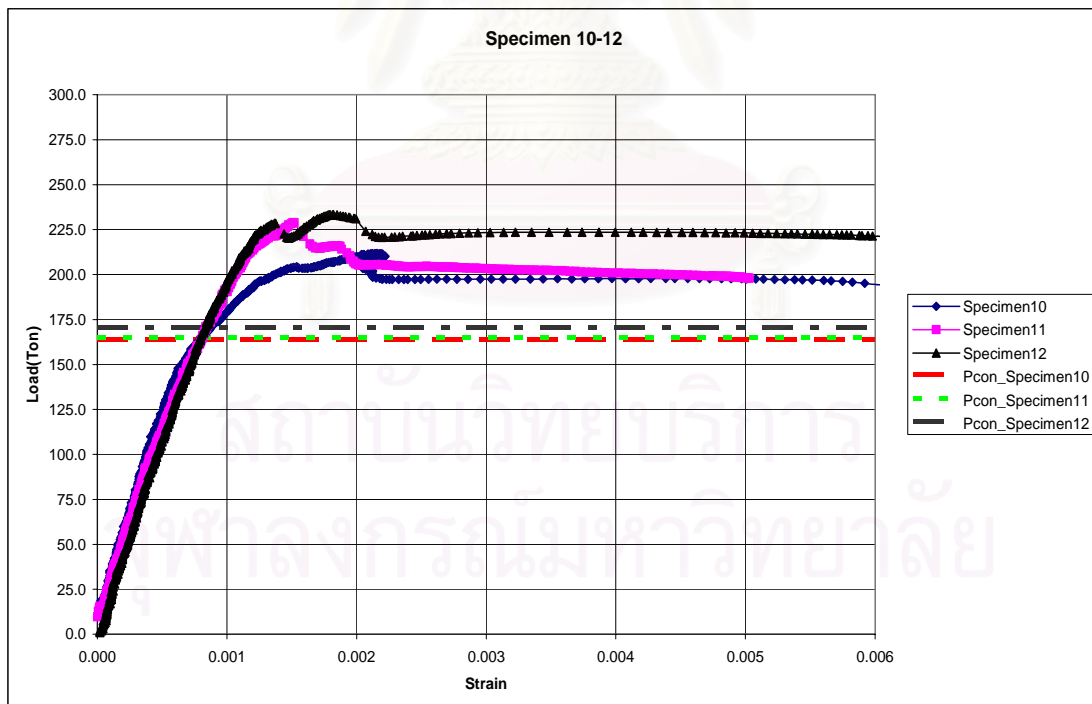


รูปที่ 3.71 แสดงการเริ่มเกิดการcrackของตัวอย่างเสาหมายเลข 8



รูปที่ 3.72 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 9      รูปที่ 3.73 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 9

กลุ่มที่ 4 ตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 10-12 มีความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ดังรูปที่ 3.74



รูปที่ 3.74 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 10-12 โดยใช้เหล็ก SD50 ระยะห่างเหล็กปลอก 10.0 ซม.



ตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 10-12 เกิดการวิบัติดังรูปที่ 3.75 ถึง รูปที่ 3.77



รูปที่ 3.75 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 10

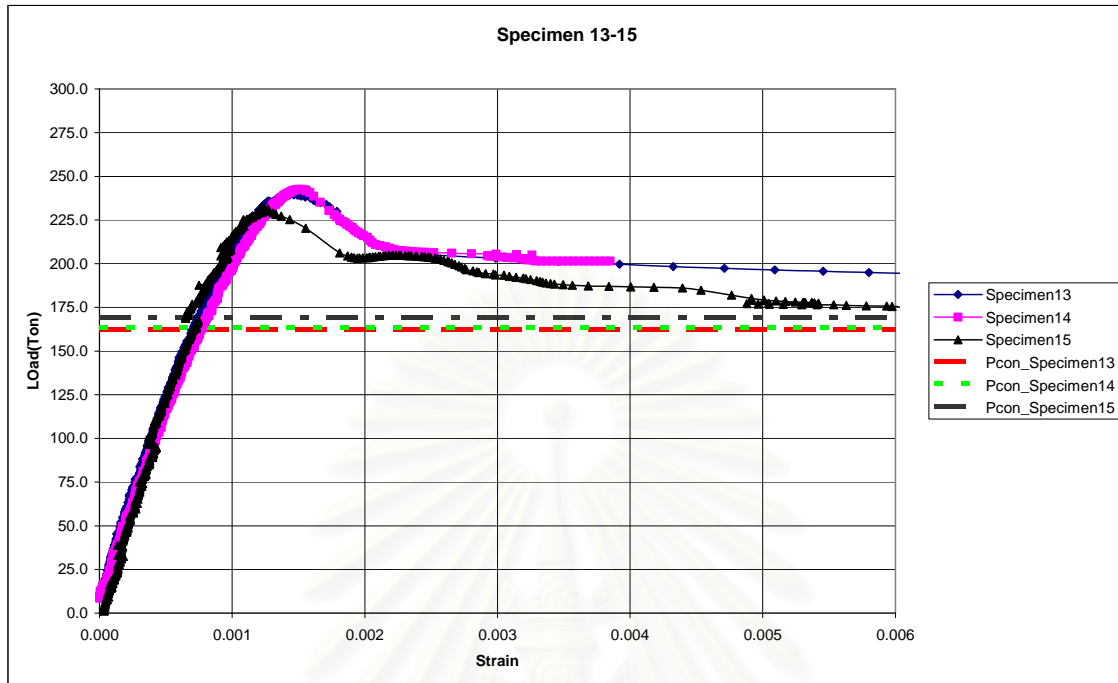


รูปที่ 3.76 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 11



รูปที่ 3.77 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 11

กลุ่มที่ 5 ตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 13-15 มีความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ดังรูปที่ 3.78



รูปที่ 3.78 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 13-15 โดยใช้เหล็ก SD50 ระยะห่างเหล็กปลอก 17.5 ซม.

ตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 13-15 เกิดการวิบัติดังรูปที่ 3.79 ถึง รูปที่ 3.84



รูปที่ 3.79 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 13      รูปที่ 3.80 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 14





รูปที่ 3.81 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 14



รูปที่ 3.82 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 14

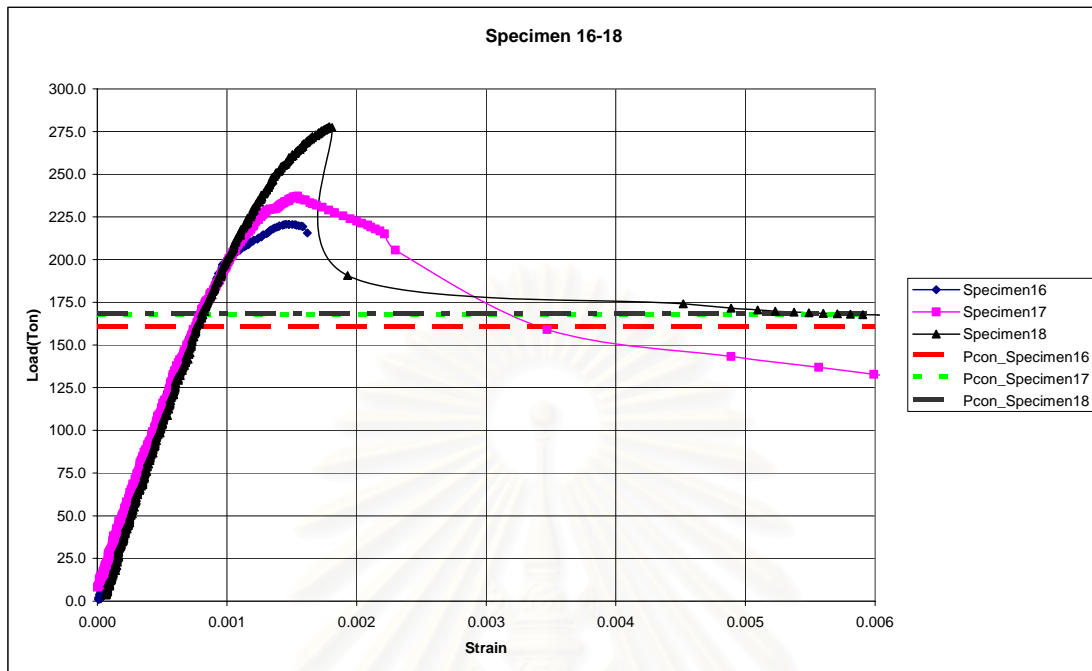


รูปที่ 3.83 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 15



รูปที่ 3.84 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 15

กลุ่มที่ 6 ตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 16-18 มีความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ดังรูปที่ 3.85



รูปที่ 3.85 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 16-18 โดยเหล็กยื่นใช้เหล็ก SD50 ระยะห่างเหล็กปลอก 25.0 ซม.

ตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 16-18 เกิดการวิบัติดังรูปที่ 3.86 ถึง รูปที่ 3.90



รูปที่ 3.86 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 16



รูปที่ 3.87 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 17



รูปที่ 3.88 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 17 รูปที่ 3.89 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 18



รูปที่ 3.90 แสดงการวิบัติของตัวอย่างเสาหมายเลข 18

นอกจากนี้ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.3



ตารางที่ 3.3 แสดงข้อมูลการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีต

No.	$F_y$ (ksc)	$f_y$ (ksc)	$*f'_c$ (ksc)	Gross Area (ซม. <sup>2</sup> )	Core Area (ซม. <sup>2</sup> )	** $P_0$ (Design) (Ton)	Max. Load (Ton)	*** $P_{core^*}$ (Ton)	strain at Max. Load
1	4000	5002	337.36	627.50	289.00	235.70	212.47	150.17	0.001500
2			343.06	633.78	289.00	238.94	224.93	151.51	0.001205
3			368.11	632.52	289.00	244.43	250.10	157.40	0.001675
4	4000	5002	339.64	628.75	289.00	-	-	-	-
5			345.33	628.75	289.00	237.94	207.38	150.33	0.001200
6			370.39	631.51	289.00	244.64	233.70	156.02	0.001305
7	4000	5002	339.64	628.76	289.00	236.62	250.04	147.62	0.001930
8			346.47	634.62	289.00	239.99	254.82	149.43	0.001825
9			370.39	628.25	289.00	243.62	248.80	155.05	0.001365
10	5000	6075	338.50	629.59	289.00	249.16	212.86	163.69	0.002150
11			345.33	622.06	289.00	248.46	229.66	165.30	0.001520
12			368.11	624.47	289.00	254.46	223.55	170.65	0.001820
13	5000	6075	339.64	630.43	289.00	249.68	239.66	162.04	0.001465
14			345.33	627.92	289.00	250.25	242.75	163.38	0.001515
15			370.39	634.53	289.00	258.15	231.90	169.27	0.001230
16	5000	6075	339.64	628.76	289.00	249.18	224.00	161.07	0.001475
17			368.11	621.96	289.00	253.68	237.30	167.76	0.001545
18			370.39	632.94	289.00	257.65	277.85	168.30	0.001790

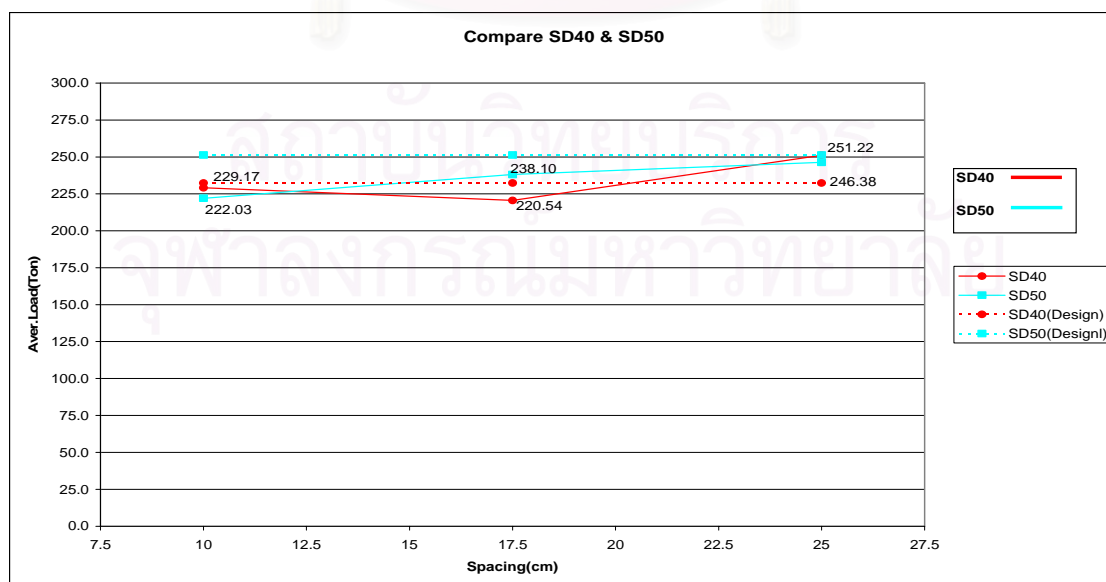
\* คำนวณได้จากสมการความชันจากรูปที่ 3.93 คือ  $y = 0.50658x + 339.12$

\*\* คำนวณได้จาก  $P_0 = 0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + F_y A_{st}$ ; โดยที่  $F_y$  = specified yield strength (กำลังครากระบุ)

\*\*\* คำนวณได้จาก  $P_{core^*} = K_s 0.85 f'_c (A_{core} - A_{st}) + f_y A_{st}$ ; โดย  $K_s$  คำนวณจากสมการที่ 1.17 และ

$f_y$  = actual yield strength (กำลังครากจริง)

เมื่อเปรียบเทียบกำลังการรับแรงอัดสูงสุดระหว่างการทดสอบกับการคำนวณจะได้ผลดังรูปที่ 3.91



รูปที่ 3.91 แสดงการเปรียบเทียบกำลังการรับแรงอัดสูงสุดของตัวอย่างระหว่างการทดสอบกับการคำนวณ

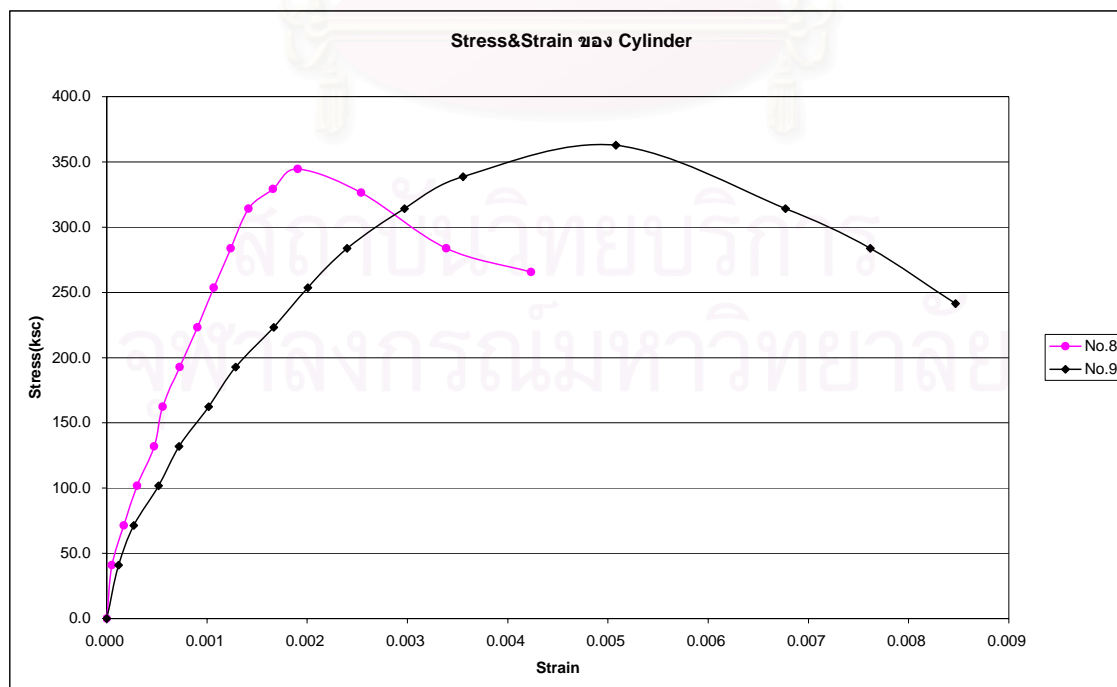
### ● ผลการทดสอบลูกปุ่น

ลูกปุ่นมีทั้งหมด 12 ตัวอย่าง ได้มีการแบ่งการทดสอบออกเป็น 4 ชุดการทดสอบ โดยในการทดสอบทำเพื่อกำลั้สูงสุดของคอนกรีต และมีการทดสอบตัวอย่าง 2 ตัวอย่างที่ต่างจากตัวอย่างอื่นๆ คือการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ strain เพิ่มขึ้นจากการทดสอบเพียงแต่กำลั้สูงสุด โดยในการทดสอบมีการทดสอบได้เพียง 11 ตัวอย่างเนื่องจากมี 1 ตัวอย่างไม่สามารถทดสอบได้ ในการทดสอบสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงข้อมูลการทดสอบลูกปุ่น

ลำดับ	วันที่	อายุคอนกรีต(วัน)	Diameter(ซม.)	Area(ซม. <sup>2</sup> )	Max.Load(kg)	Stress(ksc)
1	29/11/2549	31	15.06	178.19	56000	314.27
2	29/11/2549	31	14.99	176.56	54000	305.85
3	29/11/2549	31	14.99	176.53	50000	283.24
4	8/12/2549	39	15.00	176.71	62000	387.03
5	8/12/2549	39	15.00	176.71	60500	377.92
6	8/12/2549	39	15.00	176.71	65000	405.24
7	14/12/2549	45	15.00	176.71	58000	362.74
8	14/12/2549	45	15.00	176.71	55000	344.52
9	14/12/2549	45	15.00	176.71	58000	362.74
10	3/1/2550	68	15.00	176.71	60000	374.88
11	3/1/2550	68	15.00	176.71	58000	362.74

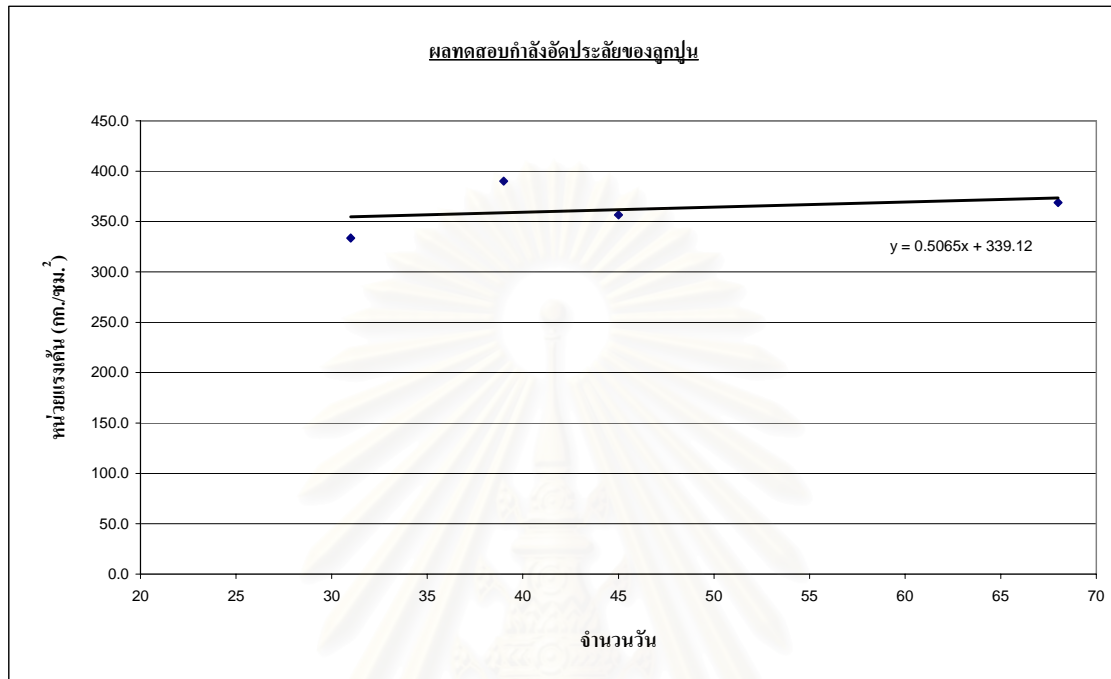
ทดสอบลูกปุ่นเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ strain แสดงดังรูปที่ 3.92



รูปที่ 3.92 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ strain ของลูกปุ่นหมายเลข 8-9



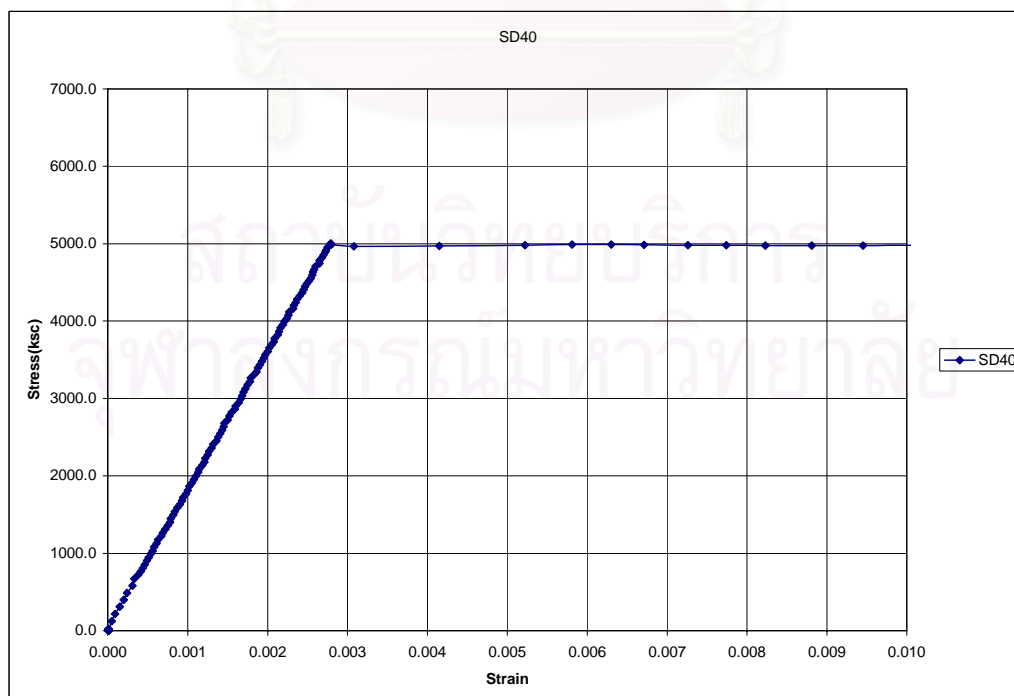
เมื่อพิจารณาค่ากำลังสูงสุดเฉลี่ยของลูกปูนแต่ละอายุจะมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.93



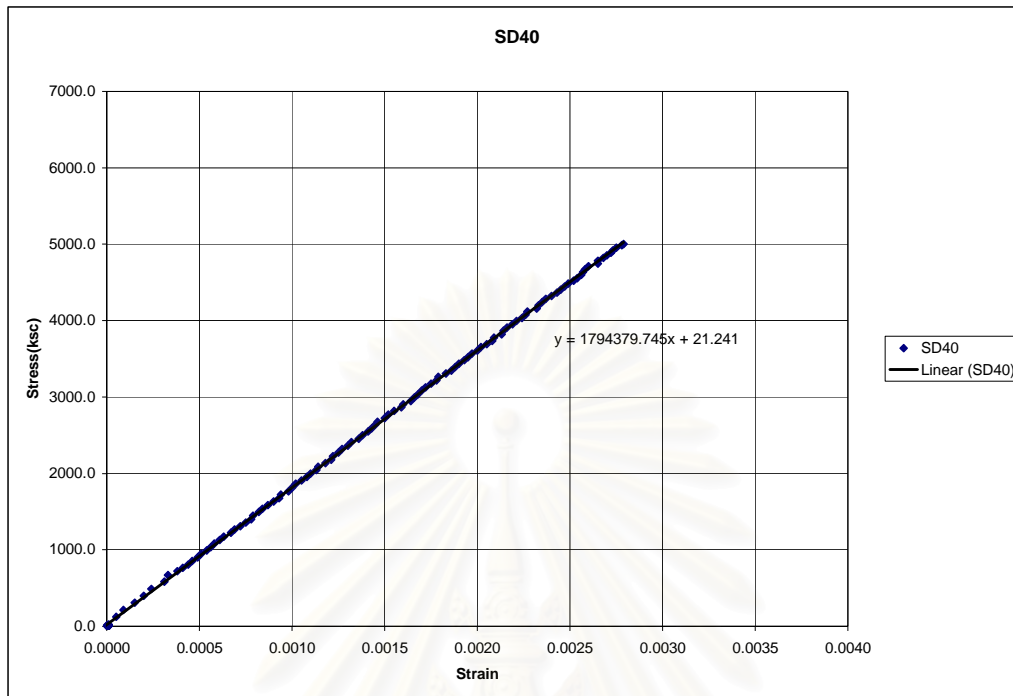
รูปที่ 3.93 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Strength และอายุของลูกปูน

### ผลการทดสอบเหล็ก

จากการทดสอบเหล็กเส้นข้ออ้อยธรรมดาขนาด 20 มม. (SD40 DB 20) ได้ผลดังรูปที่ 3.94 และ 3.95

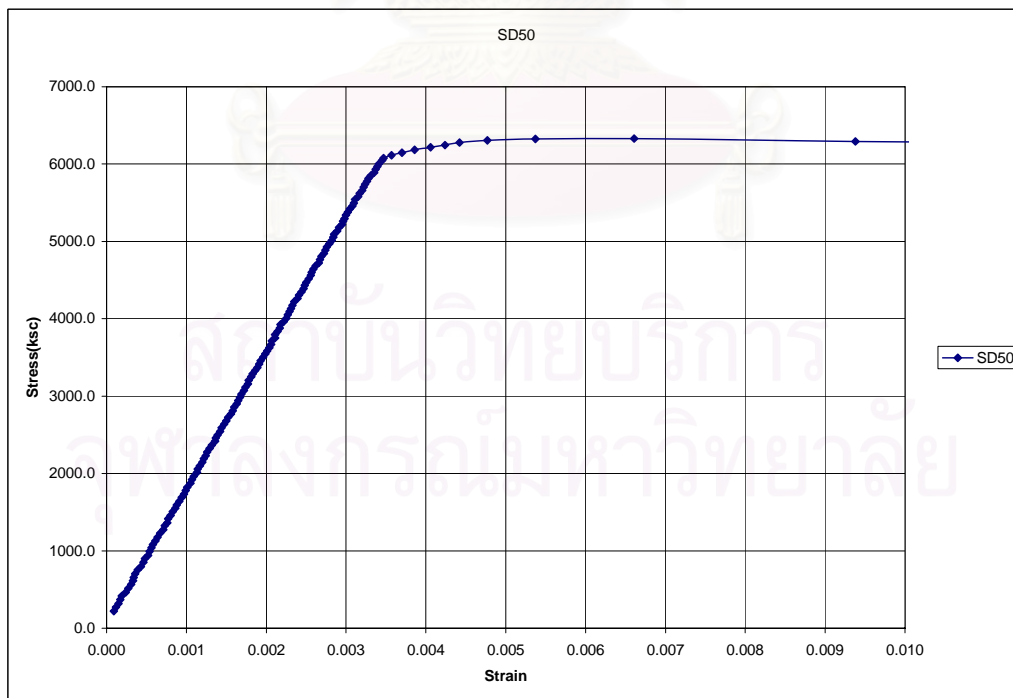


รูปที่ 3.94 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ strain ของเหล็กเส้นข้ออ้อยธรรมดา

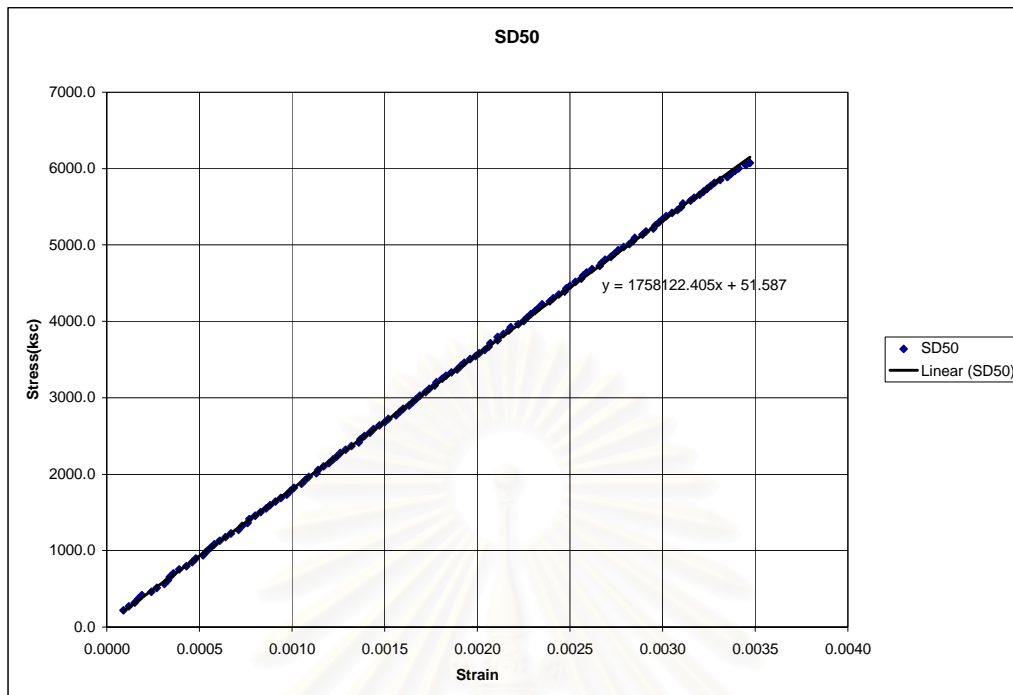


รูปที่ 3.95 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ strain ของเหล็กเส้นข้ออ้อยธรรมดาในช่วงอีลาสติก

การทดสอบเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูงขนาด 20 มม. (SD50 DB 20) ได้ผลดังรูปที่ 3.96 และ 3.97



รูปที่ 3.96 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ strain ของเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง



รูปที่ 3.97 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ strain ของเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูงในช่วงอีลาสติก

ในการทดสอบเหล็กข้ออ้อยนั้นได้ใช้ strain gauge วัดค่า strain ดังนั้นในผลการทดสอบจึงไม่สามารถที่จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง stress และ strain จนถึงจุดที่เหล็กวิบัติได้

ผลการทดสอบเหล็กเส้นข้ออ้อยธรรมดาได้ค่า Yield Strength = 5002 ksc Yield strain = 0.00279 ค่า Modulus of Elasticity =  $1.794 \times 10^6$  ksc และ ค่า Tensile Strength = 6110 ksc

ในส่วนของการทดสอบเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูงได้ค่า Yield Strength = 6075 ksc Yield strain = 0.00347 ค่า Modulus of Elasticity =  $1.758 \times 10^6$  ksc และ ค่า Tensile Strength = 7849 ksc

### 3.3.2 การผสมเส้นใยเหล็ก ในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง

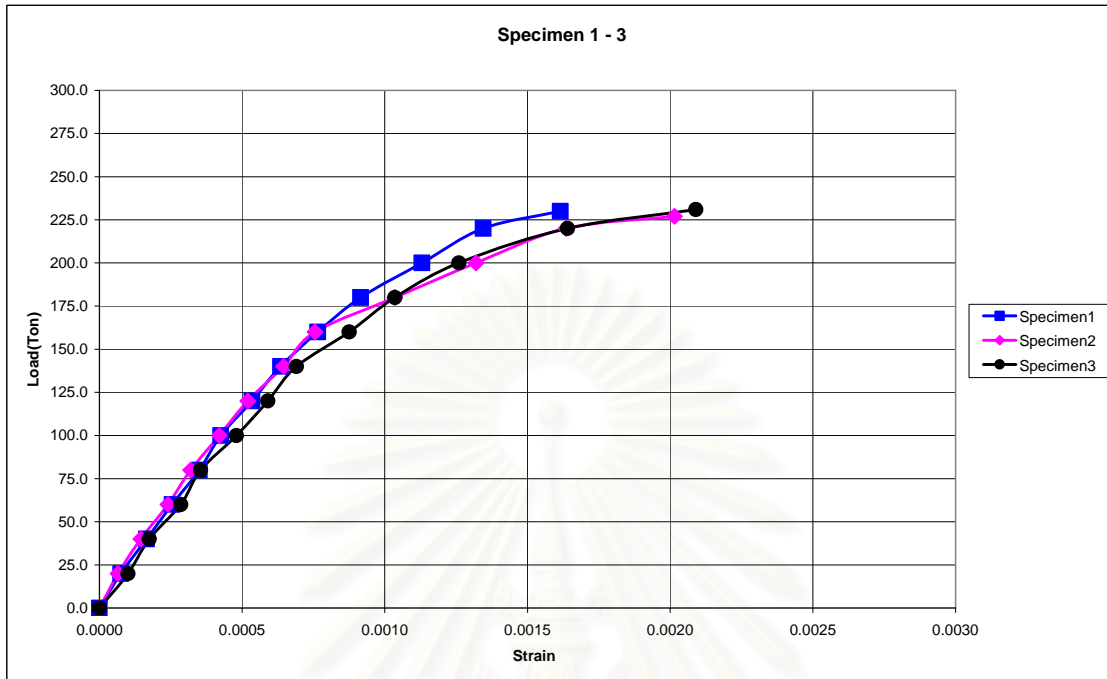
#### ● ผลการทดสอบเสาตัวอย่าง

การแสดงผลการทดสอบนั้นจะแสดงผลการทดสอบด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการรับแรงอัดของเสาตัวอย่างกับหน่วยการยืดหด โดยจะแสดงเป็นกลุ่มๆ ซึ่งแบ่งตามชนิดของคอนกรีต สามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มดังนี้

1. ใช้คอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก 1.5% โดยปริมาตร ระยะห่างเหล็กปลอก 17.5 ซม. (หมายเลข 1-3)
2. ใช้คอนกรีตธรรมดา ระยะห่างเหล็กปลอก 17.5 ซม. (หมายเลข 4-6)

โดยผลที่แสดงนั้นจะแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ strain ของแต่ละตัวอย่าง ซึ่ง strain ที่แสดงนั้นจะเป็นค่าที่ได้จากเฉลี่ยของ strain gauge สองเส้นที่ได้ทำการติดในเสาตัวอย่างในด้านที่อยู่ตรงกันข้ามกันเป็นเส้นทแยงมุม

กลุ่มที่ 1 ตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 1-3 มีความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ดังรูปที่ 3.98



รูปที่ 3.98 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 1-3

ใช้การผสมเส้นใยเหล็ก 1.5% โดยปริมาตร ระยะห่างเหล็กปลอก 17.5 ซม.

ตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 1-3 เกิดการวิบัติดังรูปที่ 3.99 ถึง รูปที่ 3.104



รูปที่ 3.99 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 3.100 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 3.101 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 2



รูปที่ 3.102 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 2



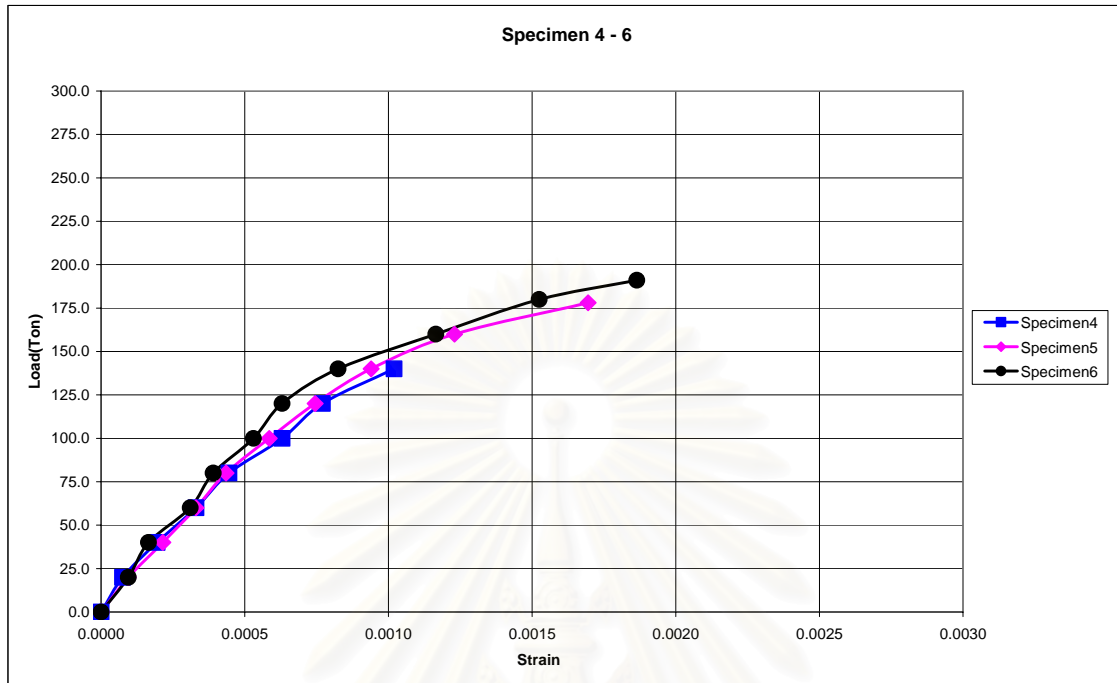
รูปที่ 3.103 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 3



รูปที่ 3.104 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 3



กลุ่มที่ 2 ตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 4-6 มีความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ดังรูปที่ 3.105



รูปที่ 3.105 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 1-3 ใช้คอนกรีตธรรมดา ระยะห่างเหล็กปลอก 17.5 ซม.

ตัวอย่างเสาคอนกรีตหมายเลข 4-6 เกิดการวิบัติดังรูปที่ 3.106 ถึงรูปที่ 3.111



รูปที่ 3.106 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 4



รูปที่ 3.107 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 4



รูปที่ 3.108 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 5



รูปที่ 3.109 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 5



รูปที่ 3.110 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 6



รูปที่ 3.111 แสดงการวิบัติของเสาตัวอย่างที่ 6

นอกจากนี้ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงข้อมูลการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีต

Group	No.	$f_y$ (ksc)	Fiber (by volume)	Area (ksc)	* $f'_c$ (ksc)	** $P_0$ (Design) (Ton)	Max. Load (Ton)	***Difference (%)	strain at Max. Load
1	1	5000	1.5%	633.82	377.44	262.12	230.00	13.96	0.001615
	2			626.28	377.44	259.70	227.00	14.40	0.002015
	3			628.79	377.44	260.50	231.00	12.77	0.002090
2	4	5000	0%	625.02	275.53	206.24	140.00	47.31	0.001020
	5			627.12	275.53	206.73	178.00	16.14	0.001695
	6			627.12	275.53	206.73	191.00	8.24	0.001865

\* คำนวณจาก Stress Average จากตารางที่ 3.6

\*\* คำนวณได้จาก  $P_0 = 0.85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}$  ;

\*\*\* คำนวณได้จาก  $\text{Difference} = [(P_0 - \text{Max. Load}) / \text{Max. Load}] \times 100$

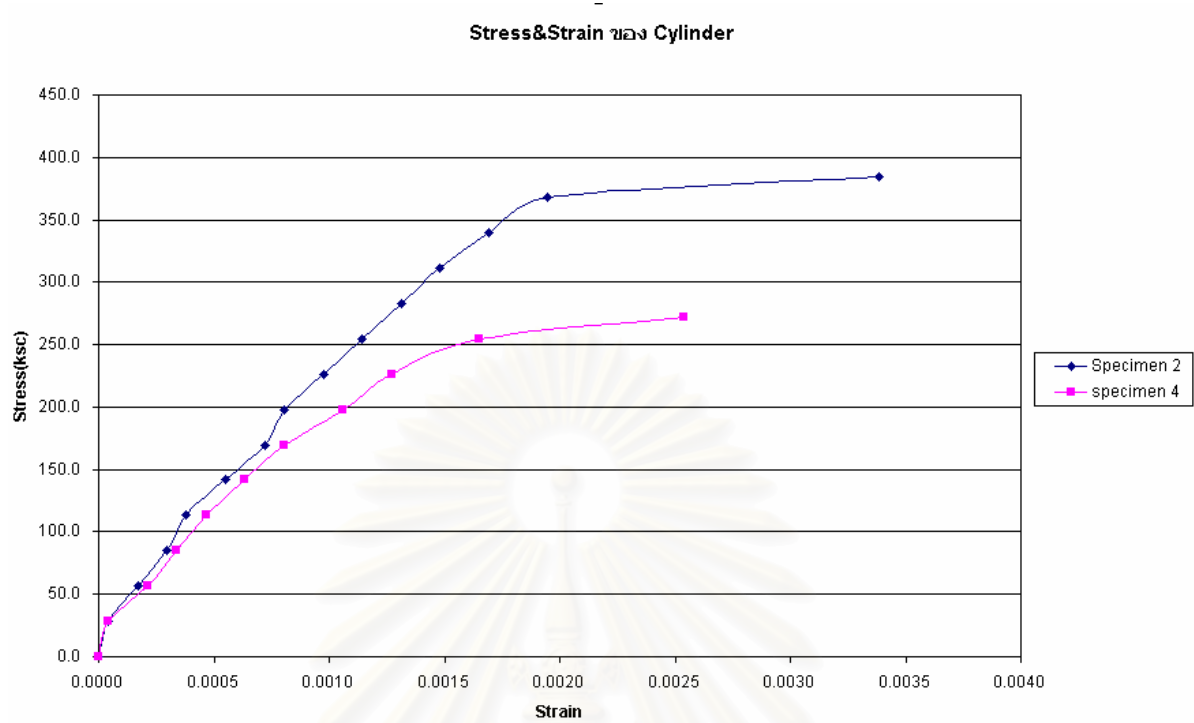
### ● ผลการทดสอบลูกปูน

ลูกปูนมีทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ได้มีการแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ชุดการทดสอบ โดยในการทดสอบทำเพื่อหาค่ากำลังอัดสูงสุดของคอนกรีต และมีการทดสอบตัวอย่าง 2 ตัวอย่าง ( ตัวอย่างที่ 2 กับ 4 ) ที่ต่างจากตัวอย่างอื่นๆ คือการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ strain เพิ่มขึ้นจากการทดสอบเพียงแต่หาค่ากำลังสูงสุด ในการทดสอบสามารถแสดงผลได้ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แสดงข้อมูลการทดสอบลูกปูน

Group	N0.	Concrete Type	Area(cm. <sup>2</sup> )	Max.Load(kg)	Strength(ksc)	Stress Avg.(ksc)	strain Max.
1	1	Steel Fiber	176.63	64000	362.34	377.44	-
	2	1.5%	176.63	68000	384.99		0.0034
	3	By Volume	176.63	68000	384.99		-
2	4	Normal	176.63	48000	271.75	275.53	0.0025
	5		176.63	49000	277.42		-
	6		176.63	49000	277.42		-

ลูกปูนที่มีการหาทดสอบความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ strain แสดงดังรูปที่ 3.112



รูปที่ 3.112 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ strain ของลูกป้อนหมายเลข 2 และหมายเลข 4

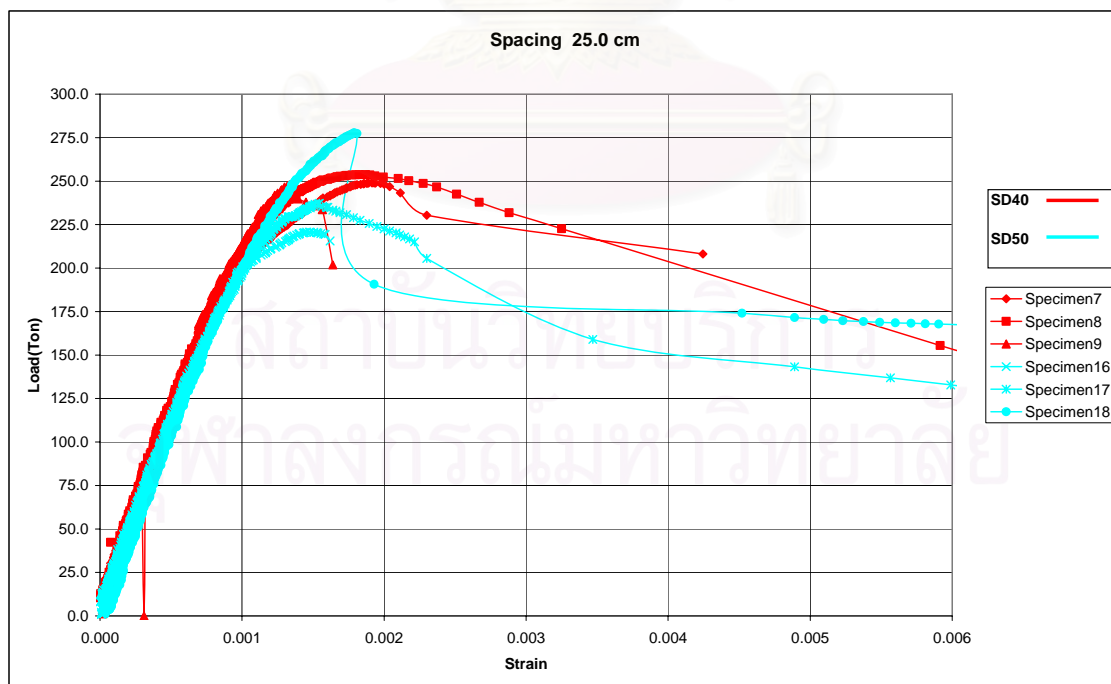
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



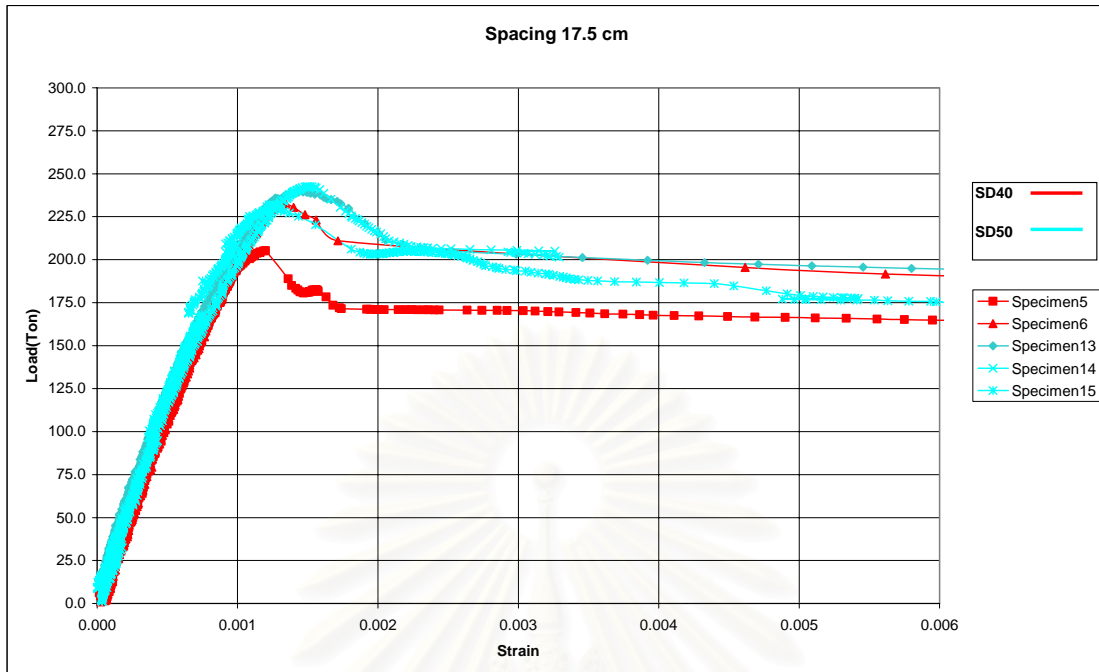
### 3.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

#### 3.4.1 การเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง

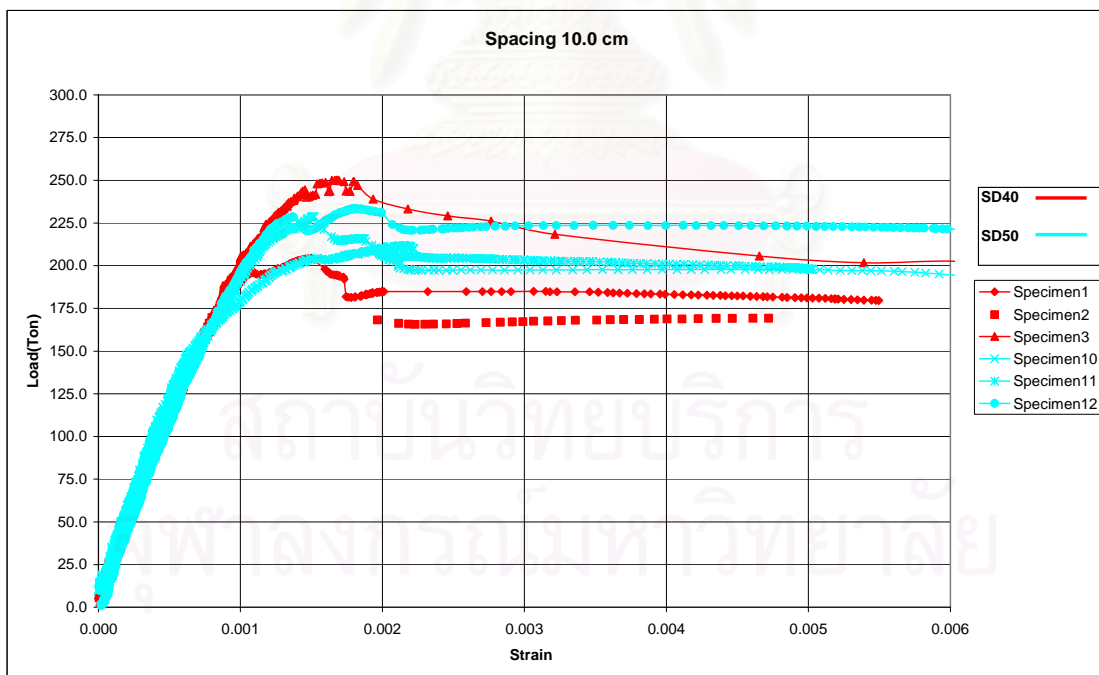
เมื่อพิจารณาถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Strain ของเสาตัวอย่างจากรูปที่ 3.81 ถึงรูปที่ 3.83 พบว่า ในช่วงแรกของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Strain กราฟมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ซึ่งก็คือยังอยู่ในช่วงอีลาสติก และรอยการแตกร้าวก็จะพบเพียงรอยแตกร้าวเล็กๆ เมื่อใกล้ถึงจุดที่เสาตัวอย่างรับแรงอัดบรรทุกสูงสุด ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ Strain จะเริ่มไม่เป็นเส้นตรง รอยแตกร้าวที่พบก็จะเริ่มมีรอยยาวมากขึ้น และมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น เมื่อผ่านจุดที่รับแรงอัดบรรทุกสูงสุดหรือจุดที่เสาตัวอย่างมีการ fail ก็จะพบว่ามีความแตกต่างของลักษณะกราฟในแต่ละระยะห่างของเหล็กปลอกที่มีการเสริม โดยเมื่อพิจารณาในรูปที่ 3.113 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟภายหลังค่ากำลังการรับแรงอัดสูงสุดจะมีลักษณะการตกแบบทันที คือ เสาตัวอย่างมีพฤติกรรมการวิบัติแบบทันทีเหมือนกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยว โดยทั่วไป ส่วนในกรณีของการเสริมเหล็กปลอกที่มีระยะห่าง 17.5 ซม. และ 10.0 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 3.114 และ รูปที่ 3.115 นั้นจะพบว่าลักษณะของเส้นกราฟภายหลังค่ากำลังการรับแรงอัดสูงสุด จะมีลักษณะที่ flat กล่าวคือ เรียบ ยาว คือ เสาตัวอย่างยังคงสามารถรับแรงอัดได้อีกต่อไป เนื่องเหล็กปลอกมีระยะห่างน้อยจะช่วยโอบรัดทางด้านข้าง ทำให้แกนคอนกรีตและเหล็กยื่นสามารถรับแรงอัดได้อีกระยะหนึ่งก่อนที่เสาจะวิบัติ ถึงแม้ว่าพื้นที่หน้าตัดของเสาตัวอย่างภายหลังรับแรงอัดสูงสุดนั้นจะลดลงอย่างมาก เนื่องจากคอนกรีตที่หุ้มแตกออกไป



รูปที่ 3.113 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ Strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีตที่มีระยะห่างของเหล็กปลอก 25.0 ซม.



รูปที่ 3.114 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ Strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีตที่มีระยะห่างของเหล็ก  
ปลอก 17.5 ซม.



รูปที่ 3.115 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ Strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีตที่มีระยะห่างของเหล็ก  
ปลอก 10.0 ซม.

แสดงให้เห็นว่าระยะห่างของเหล็กปลอกทั้ง 2 ระยะนี้ช่วยในการเพิ่มการรับแรงอัดให้แก่คอนกรีต ทำให้แกนคอนกรีตรับแรงอัดได้มากขึ้น มีผลให้เสายังคงสามารถรับแรงอัดได้ต่อไปอีกระยะหนึ่ง ถึงแม้ว่าหน้าตัดของเสาตัวอย่างจะเหลือเพียงประมาณ 50 % ของหน้าตัดทั้งหมด

และยังพบว่าลักษณะของการวิบัติของเสาทั้ง 18 ตัวอย่างมีลักษณะการวิบัติที่คล้ายกัน คือ เกิดการแตกหักในช่วงกลางเสา โดยขณะที่เสาวิบัติ เสาตัวอย่างที่มีระยะห่างเหล็กปลอก 25.0 ซม. เหล็กยื่นจะเกิดการโก่งเดาะระหว่างเหล็กปลอก ดังรูปที่ 3.116 ส่วนเสาตัวอย่างที่มีระยะห่างเหล็กปลอก 10.0 ซม. จะเห็นว่าเหล็กปลอกช่วยโอบรัดแกนคอนกรีตไม่ให้วิบัติและสามารถทำให้เสาสามารถรับแรงได้อีกระยะหนึ่ง ก่อนที่จะวิบัติดังแสดงในรูปที่ 3.117



รูปที่ 3.116 แสดงเหล็กยื่นในตัวอย่างที่ 18  
หลังทดสอบ



รูปที่ 3.117 แสดงเหล็กยื่นตัวอย่างที่ 1  
หลังทดสอบ

เมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบแล้ว จะพบว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของแต่ละกลุ่มตัวอย่างซึ่งมีระยะห่างของเหล็กปลอกต่างกันนั้น ไม่มีความแตกต่างของกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่สามารถเห็นได้อย่างชัดเจน ส่วนการที่มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดต่างกันเล็กน้อยก็อาจจะเนื่องมาจากเหตุผลดังนี้

- **พื้นที่หน้าตัด** เนื่องจากในแต่ละตัวอย่างนั้นมีขนาดของความกว้าง ความยาวของหน้าตัดไม่เท่ากันส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดในการรับแรงอัดไม่เท่ากัน ดังนั้นกำลังในการรับแรงอัดจึงแตกต่างกันไป
- **อายุของคอนกรีต** เนื่องจากการทดสอบนั้นมีจำนวนตัวอย่างในการทดสอบจำนวนมาก การทดสอบจึงไม่สามารถที่จะทดสอบให้เสร็จภายในระยะเวลาที่สั้นๆ ดังนั้นในการทดสอบซึ่งมีระยะเวลานานส่งผลต่อกำลังการรับแรงอัดของคอนกรีตซึ่งขึ้นกับอายุของคอนกรีต ทำให้กำลังการรับแรงอัดมีค่าแตกต่างกัน

ผลการทดสอบเสาตัวอย่าง สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.3 และเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 3.3 พบว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่เกิดขึ้นในเสาตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กยื่นด้วยเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูงและข้ออ้อยธรรมดา นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากstrainของเหล็กยื่น ณ จุดที่รับแรงอัดสูงสุดนั้น มีค่าไม่เกิน 0.002 ทำให้เหล็กข้ออ้อยแรงดึงสูง ไม่สามารถพัฒนาหน่วยแรงให้ถึงจุดครากได้ และทำให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาตัวอย่างที่เสริมเหล็กยื่นเป็นเหล็กข้ออ้อยแรงดึงสูง น้อยกว่าค่าที่คำนวณจากมาตรฐานอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กของ ว.ส.ท.

นอกจากนี้ผลการทดสอบยังทำให้เกิดประเด็นที่น่าสังเกตอีกหนึ่งประการเกี่ยวกับ ข้อกำหนดของระยะห่างเหล็กปลอกเดี่ยวตามมาตรฐาน ว.ส.ท. ซึ่งข้อกำหนดดังกล่าวคือ

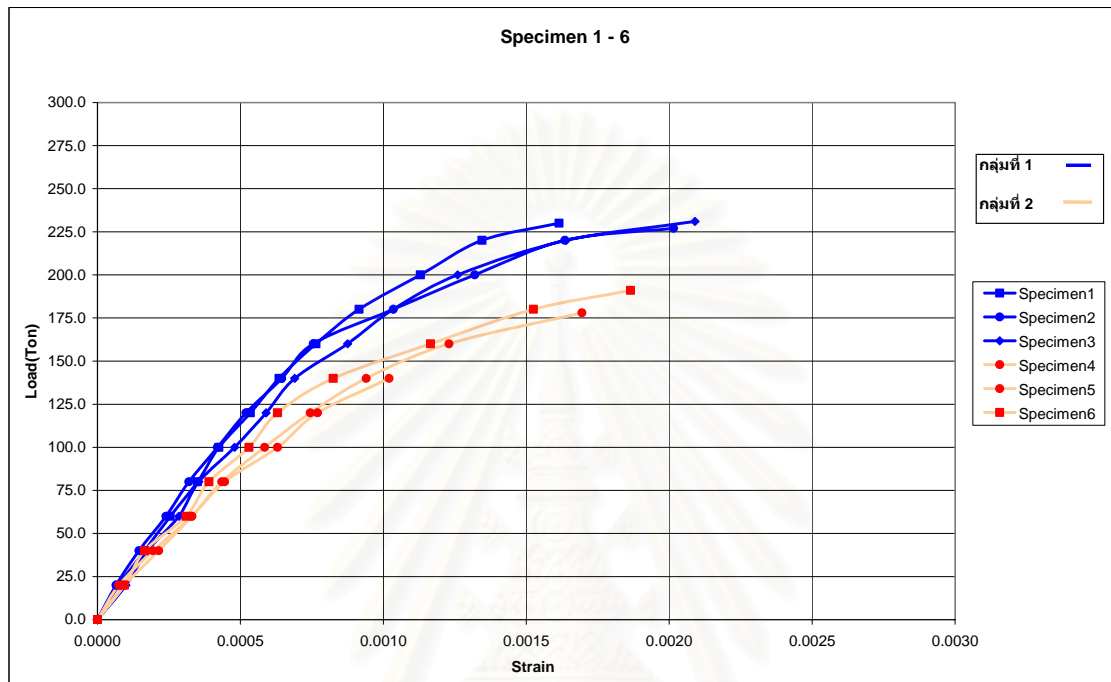
- ระยะห่างของเหล็กปลอกเดี่ยวต้องไม่มากกว่าค่าต่อไปนี้
  - 16 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กยื่น
  - 48 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กปลอกเดี่ยว
  - มิติที่เล็กที่สุดขององค์อาคารรับแรงอัด

โดยในการทดสอบนี้ ข้อกำหนดระยะห่างของเหล็กปลอกมีค่ามากที่สุดไม่เกิน 25.0 ซม. ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดข้อสุดท้ายของมาตรฐาน ว.ส.ท. คือ ระยะห่างของเหล็กปลอกเดี่ยวต้องไม่มากกว่ามิติที่เล็กที่สุดขององค์อาคารรับแรงอัด แต่เนื่องจากผลการทดสอบในการทำโครงงานครั้งนี้ได้พบว่า ค่าระยะห่างของเหล็กปลอกดังกล่าวคือ 25.0 ซม. นั้น เป็นค่าระยะห่างที่มากเกินไปที่ทำให้เสาตัวอย่างนั้นมีแรงโอบรัดด้านข้างเพียงพอ เมื่อคอนกรีตที่หุ้มถูกอัดแตกออก ความสามารถในการรับแรงอัดบรรทุกจะลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ไม่เหมาะสมในการใช้งาน แต่หากระยะห่างเป็น 17.5 ซม. จะพบว่าระยะห่างนี้นั้น จะทำให้เสามีความเหนียว มีแรงโอบรัดด้านข้างเพียงพอ เมื่อคอนกรีตที่หุ้มถูกอัดแตกและหลุดร่อนออก ความสามารถในการรับแรงอัดก็จะยังคงมีอยู่ต่อ เมื่อพิจารณาลึกลงไปอีกจะพบว่า ระยะห่างของเหล็กปลอกนี้ซึ่งก็คือ 17.5 ซม. นั้นมีค่าใกล้เคียงกับระยะที่ถูกเหล็กปลอกหุ้มอยู่ ซึ่งในการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 18 ซม. (ขนาดเสา 25 ลบระยะคอนกรีตที่หุ้ม = 3.5 ซม. จะได้ระยะระหว่างเหล็กปลอกคือ  $25 - 2 \times 3.5 = 18$  ซม.) ดังนั้นจากผลการทดสอบอาจจะทำให้สามารถตั้งข้อสังเกตได้ว่าข้อกำหนดเกี่ยวกับระยะห่างของเหล็กปลอกของ ว.ส.ท. ที่กล่าวว่าระยะห่างของเหล็กปลอกต้องมีค่าไม่มากกว่ามิติที่เล็กที่สุดขององค์อาคารรับแรงอัดนั้น มีค่าที่มากเกินไป ข้อกำหนดของระยะห่างเหล็กปลอกควรจะพิจารณาเพียงแค่ระยะห่างของเหล็กยื่น

### 3.4.2 การผสมเส้นใยเหล็ก ในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง

เมื่อพิจารณาถึงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ strain ของเสาตัวอย่างจากรูปที่ 3.118 พบว่า ในช่วงแรกของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ strain กราฟมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ซึ่งก็คือยังอยู่ในช่วงอีลาสติก โดยกราฟของเสาตัวอย่างที่มีเส้นใยเหล็กผสมในคอนกรีตจะมีความชันมากกว่า และเมื่อใกล้ถึงจุดที่เสาตัวอย่างรับแรงอัดสูงสุด ความสัมพันธ์ระหว่าง Load กับ strain จะเริ่มไม่เป็นเส้นตรง จนถึงจุดที่เสารับแรงอัดสูงสุด และเมื่อพิจารณาจากตารางที่ พบว่าเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 1 จะรับแรงอัดสูงสุดได้

มากกว่าเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 2 เนื่องจากคอนกรีตของเสาตัวอย่างทั้งสองกลุ่ม ผสมคอนกรีตที่ละครั้ง จึงทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะใช้สัดส่วนผสมเหมือนกัน โดยกำลังรับแรงอัดของลูกปูนคอนกรีตของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 2 มีค่ามากกว่า



รูปที่ 3.118 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Load และ strain ของตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็ก

และเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 3.6 เสาตัวอย่างที่เสาตัวอย่างกลุ่มที่ 1 ส่วนใหญ่ มีหน่วยการยืดหดตัว (strain) ณ จุดที่รับแรงอัดสูงสุดมากกว่าเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 2 เนื่องจากเมื่อเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 1 เริ่มคอนกรีตหุ้มเริ่มมีรอยแยกแล้วจะถ่ายแรงคั้นด้านข้างไปให้กับ เส้นใยเหล็กในคอนกรีต ซึ่งทำหน้าที่ยึดคอนกรีตที่หุ้มไว้ไม่ให้แยกออกจากกัน และเมื่อรับแรงมากขึ้นเส้นใยเหล็กก็จะยืดออก รอยแยกก็จะเพิ่มขึ้นทีละน้อย จนเส้นใยเหล็กหลุดออกจากคอนกรีตพร้อมกับคอนกรีตที่หุ้ม ซึ่งเป็นจุดที่เสาตัวอย่างรับแรงอัดได้สูงสุด

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.119 และรูปที่ 3.120 ลักษณะของหลังการวิบัติของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 2 คือเมื่อรับแรงอัดสูงสุดคอนกรีตที่หุ้มจะหลุดออกจากเสา ส่วนเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 1 พบว่าเมื่อเสารับแรงอัดสูงสุดนั้นคอนกรีตที่หุ้มจะไม่หลุดออกจากเสาแต่จะมีรอยแยกออก โดยมีเส้นใยเหล็กยึดไว้ไม่ให้คอนกรีตที่หุ้มหลุดออก เห็นได้ว่าเส้นใยเหล็กเป็นส่วนช่วยให้เสาสามารถพัฒนาหน่วยการยืดหดตัวได้มากขึ้น ณ จุดที่เสารับแรงอัดสูงสุด





รูปที่ 3.119 แสดงคอนกรีตหุ้มของเสา  
ตัวอย่างที่ 3 หลังการทดสอบ



รูปที่ 3.120 เสาตัวอย่างที่ 4  
หลังการทดสอบ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### สรุปผลการทดลอง

โครงการนี้จัดทำขึ้นเพื่อหาเหล็กปลอกที่เหมาะสมสำหรับเสาคอนกรีตเสริมด้วยเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูงแล้วสามารถรับแรงได้ตามต้องการ โดยทดสอบการรับแรงอัดบรรทุกของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง ( $f_y = 5000$  ksc) เปรียบเทียบกับการเสริมเหล็กเส้นธรรมดา ( $f_y = 4000$  ksc) โดยเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวระยะห่างต่างๆกัน ซึ่งเสาที่ใช้ในการพิจารณานั้นเป็นเสาสั้น รับแรงอัดในแนวแกนเพียงอย่างเดียว โดยในการทดลองนี้มีตัวแปรที่เปลี่ยนแปลง 2 อย่างคือ ระยะห่างเหล็กปลอกและกำลังของเหล็กยื่น จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเสริมเหล็กปลอกโดยมีระยะห่างของเหล็กปลอกที่ต่างกัน จะไม่มีผลต่อการรับแรงอัดสูงสุดของเสาตัวอย่าง แต่จะมีผลกับเสาดตัวอย่างภายหลังจากเสาดตัวอย่างรับแรงอัดสูงสุด คือ หลังจากที่เสาดตัวอย่างรับแรงอัดสูงสุดและคอนกรีตหุ้มแตกออกแล้ว เสาตัวอย่างจะไม่วิบัติทันที เนื่องจากเสาดตัวอย่างที่มีระยะห่างเหล็กปลอกน้อย จะช่วยเพิ่มแรงโอบรัดทางด้านข้าง ทำให้แกนคอนกรีตและเหล็กยื่นสามารถรับแรงอัดต่อไปได้อีกระยะหนึ่งแล้วเสาดตัวอย่างจึงจะวิบัติ ซึ่งพฤติกรรมการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวที่มีระยะห่างเหล็กปลอกน้อยนี้คล้ายกับการวิบัติในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเกลียว

2. เมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัดและหน่วยการยึดหดตัวของเสาดตัวอย่างภายหลังจากรับแรงอัดสูงสุดแล้ว พบว่าระยะห่างเหล็กปลอกที่สามารถโอบรัดแกนคอนกรีต จนมีผลให้แกนคอนกรีตสามารถรับแรงอัดได้ต่อไปอีกระยะหนึ่ง คือ 17.50 และ 10.00 ซม. ดังนั้นระยะห่างที่เหมาะสมของเหล็กปลอกที่มีผลทำให้เสามีความเหนียวและเกิดแรงโอบรัดด้านข้างเพียงพอ นั้นมีค่าโดยประมาณเท่ากับระยะห่างระหว่างเหล็กยื่น สำหรับการทดลองนี้คือ 17.50 ซม.

3. เมื่อพิจารณาค่ารับแรงอัดตามแนวแกนสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กยื่นเป็นเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูงและเหล็กเส้นข้ออ้อยธรรมดามีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากหน่วยการยึดหดตัวของเหล็กที่วัดได้จากการทดลองส่วนใหญ่มีค่าไม่เกิน 0.002 ซึ่งมีผลให้การพัฒนากำลังในเหล็กข้ออ้อยแรงดึงสูงนั้นไม่ถึงจุดคราก และทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาเสริมเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูงมีค่าน้อยกว่าสูตรที่คำนวณจากมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กของ ว.ส.ท.

และจากการวิจัยเพิ่มเติมสำหรับการหาค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมเส้นใยเหล็กและเสาคอนกรีตธรรมดา เสริมเหล็กข้ออ้อยแรงดึงสูง เมื่อพิจารณาจากผลการทดสอบพบว่าค่าหน่วยการยึดหดตัวขณะที่รับแรงอัดสูงสุด เสาตัวอย่างที่มีคอนกรีตเสริมใยเหล็กมีค่ามากกว่าเสาดตัวอย่างที่มีคอนกรีตธรรมดา เนื่องจากขณะที่คอนกรีตหุ้มเริ่มมีรอยแยกแล้วจะถ่ายแรงดันด้านข้าง ไปให้กับเส้นใยเหล็กในคอนกรีต ซึ่งทำหน้าที่ยึดคอนกรีตที่หุ้มไว้ไม่ให้แยกออกจากกัน และเมื่อรับแรงมากขึ้นเส้นใยเหล็กก็จะยึดออก รอยแยกก็จะเพิ่มขึ้นทีละน้อย จนเส้นใยเหล็กหลุดออกจากคอนกรีตพร้อมกับคอนกรีตที่หุ้ม ซึ่งเป็นจุดที่เสาดตัวอย่างรับแรงอัดได้สูงสุด และกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่เกิดขึ้นในเสาดตัวอย่างที่มีคอนกรีตเสริมใยเหล็ก

และคอนกรีตธรรมดา มีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณจากมาตรฐานอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กของ ว.ส.ท. เนื่องจากหน่วยการยึดหดตัวของเหล็กที่วัดได้จากการทดลองของเรามีค่าไม่เกิน 0.0022 ซึ่งมีผลให้การพัฒนากำลังในเหล็กข้ออ้อยแรงดึงสูงนั้นไม่ถึงจุดครากได้

จากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้นเราอาจแก้ไขได้โดยเพิ่มเส้นใยเหล็กในส่วนผสมของคอนกรีต หรือนำแผ่น Carbon Fiber มาพันรอบเสา ในการก่อสร้างเสาคอนกรีตที่ต้องการเสริมด้วยเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง เพื่อเพิ่มหน่วยการยึดหดตัวของคอนกรีต ทำให้เหล็กเส้นข้ออ้อยกำลังสูงสามารถพัฒนาหน่วยแรงได้ถึงจุดครากได้ ทั้งนี้ในการวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาผลจากการรับแรงอัดบรรทุกในระยะยาว ซึ่งอาจทำให้หน่วยการยึดหดตัวของคอนกรีตขณะรับแรงอัดสูงสุดมีค่ามากขึ้น เนื่องจากการล้าของคอนกรีต (Creep) จึงอาจทำให้เหล็กเสริมคอนกรีตสามารถพัฒนากำลังได้ถึงจุดครากได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] วัฒนชัย สมิททากร. กำลังรับแรงอัดบรรทุกของเสาคอนกรีตเสริมด้วยเหล็กเส้นข้ออ้อยแรงดึงสูง. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 1 : จ.ระยอง ตุลาคม พ.ศ.2548
- [2] สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. **มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง**. พิมพ์ครั้งที่ 5 : พฤศจิกายน พ.ศ.2548
- [3] Norman F. Somes. Compression Tests on Hoop-Reinforced Concrete. Journal of the Structural Division. ASCE 96 (1971) : 1495-1609.
- [4] Edwin G. Burdette and Hubert K. Hilsdorf. Behavior of Laterally Reinforced Concrete Columns. Journal of the Structural Division ASCE 97 (1971) : 587 – 602.
- [5] R. Park and T. Paulay. Reinforced Concrete Structures. : John Wiley & Sons,1974.
- [6] Shamim A. Sheikh and S. M. Uzumeri. Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Columns. Journal of the Structural Division ASCE 108 (1982) : 2703-2722.
- [7] Shamim A. Sheikh and S. M. Uzumeri. Strength and Ductility of Tied Concrete Columns. Journal of the Structural Division ASCE 106 (1980) : 1079-1102.
- [8] Nilson A. H., Darwin D. and Dolan C. W.. Design of concrete Structures. 13<sup>th</sup> Ed. : McGraw-Hill, 2003.
- [9] Yook-Kong Yong, Malakah G. Nour and Nawy G. Edward. Behavior of Confined High-strength Concrete under Axial Loads. Journal of the Structural Division ASCE 144 (1988) 332-351.
- [10] Shamim A. Sheikh and Murat T. Toklucu. Reinforced Concrete Columns Confined by Circular Spirals and Hoops. American Concrete Institute Journal 90 (1993) : 542-553.
- [11] Tirath Manojya Pallewatta, Paulus Irawan and Koichi Maekawa. Effectiveness of Laterally Arranged Reinforcement on The Confinement of Core Concrete. Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements (1995) : 297-308.
- [12] Teng-Hooi Tan and Woon-Kwong Yip. Behavior of Axially Loaded Concrete Columns Confined by Elliptical Hoops. American Concrete Institute Journal 96 (1999) : 967-971.
- [13] David A. Fanella and Antoine E. Naaman. Stress-Strain Properties of Fiber Reinforced Mortar in Compression. American Concrete Institute Journal ACI 82 (1985) : 475 – 483.

- [14] Lin Showmay Hsu and Cheng-Tzu Thomas Hsu. Stress-Strain Behavior of Steel-Fiber High-Strength Concrete under Compression. American Concrete Institute Journal ACI 91 (1994) : 448 – 457.
- [15] วินิต ช่อวิเชียร. การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 2 : พ.ศ. 2548
- [16] Nawy, E.G.. Reinforced Concrete: A Fundamental Approach. 5<sup>th</sup> Ed. : Prentice Hall, 2003.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

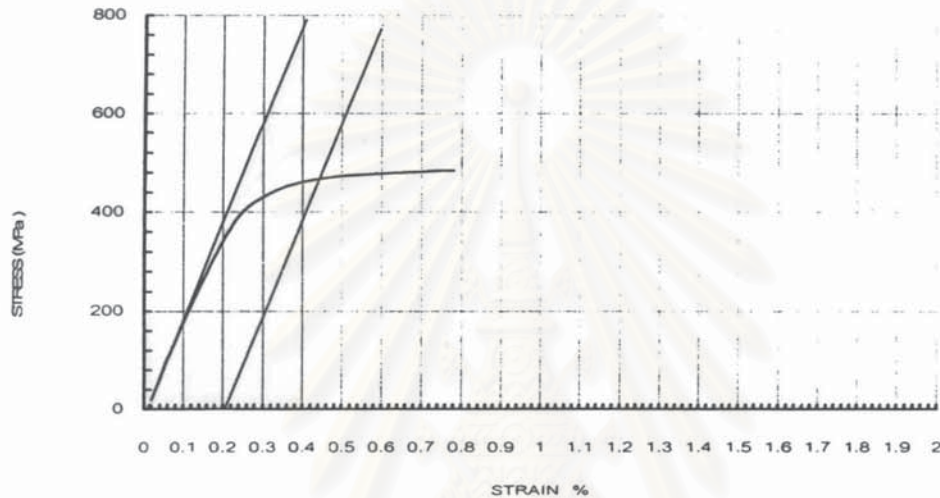


## BURAPA STEEL INDUSTRIES CO.,LTD.

1858/11-12 Nation Tower 5th Floor, Bangna-Trad Road, Bangna, Bangkok 10260 Thailand

Tel. (662) 7514001-5 Fax. (662) 7514006

### STRESS & STRAIN CURVE



CUSTOMER	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	
COMMODITY	DEFORMED BARS 20 GRADE SD40	
DATE	Apr 04, 2008	
NOMINAL BAR DIAMETER	20	mm.
NOMINAL CROSS SECTION AREA	314	mm. <sup>2</sup>
ACTUAL WEIGHT PER UNIT LENGTH	2.375	Kg/m.
PROOF LOAD AT 0.2 % OFFSET	148	kN
YIELD STRENGTH	470	N / mm. <sup>2</sup>
ULTIMATE LOAD	188	kN
TENSILE STRENGTH	600	N / mm. <sup>2</sup>
ELONGATION (5D)	25.7	%
MODULUS OF ELASTICITY	196,296	N / mm. <sup>2</sup>

Approved By

*U. Pramote*

(PRAMOTE UTHAI)

Inspection Section Manager

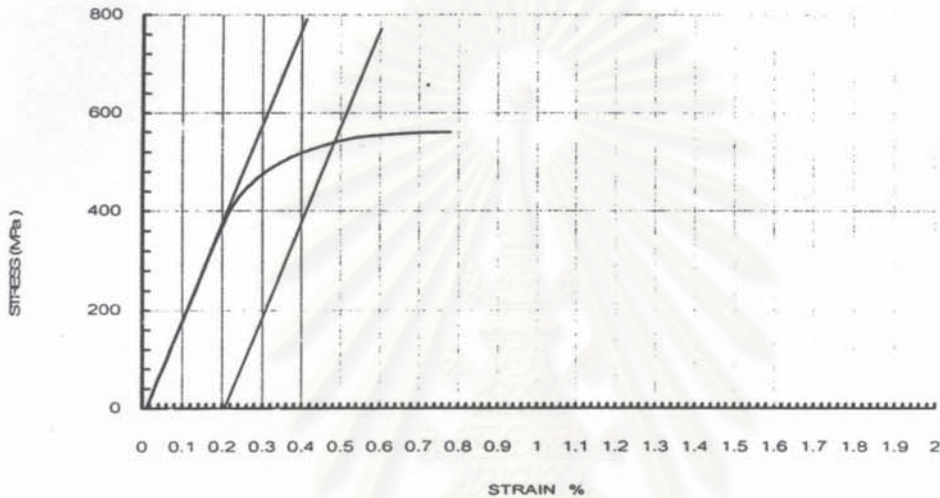


## BURAPA STEEL INDUSTRIES CO.,LTD.

1858/11-12 Nation Tower 5th Floor, Bangna-Trad Road, Bangna, Bangkok 10260 Thailand

Tel. (662) 7514001-5 Fax. (662) 7514006

### STRESS & STRAIN CURVE



CUSTOMER	ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	
COMMODITY	DEFORMED BARS 20 GRADE SD50	
DATE	Apr 04, 2008	
NOMINAL BAR DIAMETER	20	mm.
NOMINAL CROSS SECTION AREA	314	mm. <sup>2</sup>
ACTUAL WEIGHT PER UNIT LENGTH	2.426	Kg/m.
PROOF LOAD AT 0.2 % OFFSET	170	kN
YIELD STRENGTH	540	N / mm. <sup>2</sup>
ULTIMATE LOAD	208	kN
TENSILE STRENGTH	661	N / mm. <sup>2</sup>
ELONGATION (5D)	21.1	%
MODULUS OF ELASTICITY	192,857	N / mm. <sup>2</sup>

Approved By

*U. Pramote*

(PRAMOTE UTHAI)

Inspection Section Manager

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย พัฒนเทพ เครือชะเอม เกิดวันที่ 4 มกราคม พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2547



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย