

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ใยหิน
ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

นายสร้อย กำจัดโรค

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-533-344-1

**REINFORCED CONCRETE COLUMNS ENCASED WITH
ASBESTOS CEMENT PIPES SUBJECTED TO
AXIALLY COMPRESSIVE LOADS**

Mr.Saran Kumjadrok

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering**

Suranaree University of Technology

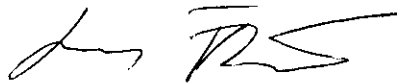
Academic Year 2004

ISBN 974-533-344-1

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ใยหินภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

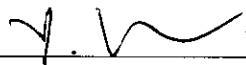
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.มงคล จีรวังษเดช)

ประธานกรรมการ



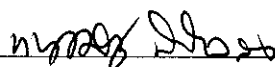
(ผศ. ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



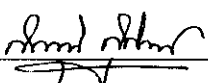
(รศ. ดร.อำนาจ อภิชาติวัลลภ)

กรรมการ



(อ. ดร.ทองศักดิ์ พิศาลสิน)

กรรมการ



(รศ. น.ท. ดร.สรวิฐ ฤทธิจักร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ



(รศ. น.อ. ดร.วรพงษ์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศรัณย์ กำจัดโรค : เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ใยหินภายใต้แรงกดอัด
ในแนวแกน (REINFORCED CONCRETE COLUMNS ENCASED WITH
ASBESTOS CEMENT PIPES SUBJECTED TO AXIALLY COMPRESSIVE
LOADS) อ.ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 75 หน้า ,
ISBN 974-533-344-1

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนและลักษณะการ
วิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ใยหินและคำนวณหาอัตราส่วนความ
ปลอดภัยด้วยการเปรียบเทียบกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดกับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัย ตัวแปรที่ใช้ใน
การศึกษานี้ได้แก่ ปริมาณเหล็กเสริมและอัตราส่วนความชะลูด (L/r)

ในการศึกษานี้ตัวอย่างทดสอบมีทั้งหมด 48 ตัวอย่างซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ เสา
สั้นและเสายาวมีปริมาณเหล็กเสริมระหว่าง 1.50-3.84% ของพื้นที่หน้าตัดเสา ตัวอย่างทดสอบแต่ละ
ตัวอย่างจะถูกยึดโดยการรองรับที่ปลายทั้งสองข้างของเสาเป็นแบบหมุนและถูกแรงกดอัดใน
แนวแกนจนวิบัติ

ผลการศึกษาพบว่าเสาโดยส่วนใหญ่มีพฤติกรรมการรับแรงกดอัดเป็นแบบเชิงเส้นตรงถึง
ประมาณ 80-90% ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด หลังจากนั้นพฤติกรรมจะเป็นแบบไร้เชิงเส้นและ
เกิดรอยแตกร้าวในแนวแกนบริเวณปลายเสาทั้งสองข้างอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดการวิบัติในที่สุด
การวิบัติของตัวอย่างทดสอบทุกตัวอย่างจะมีลักษณะการวิบัติแบบเสาสั้น คือ เกิดการครากในเหล็ก
เสริมและเกิดการอัดแตกในคอนกรีตและท่อซีเมนต์ใยหิน กำลังรับแรงกดอัดของเสาจะมีค่าเพิ่มขึ้น
ตามปริมาณเหล็กเสริมและจะมีค่าลดลงเมื่อเสามีค่าอัตราส่วนความชะลูดเพิ่มขึ้นนอกจากนี้แล้วผู้
วิจัยได้เสนอสมการสำหรับออกแบบเสาโดยดัดแปลงจากสมการออกแบบเสาของ ว.ส.ท. ด้วย สม
การนี้ให้อัตราส่วนความปลอดภัยระหว่าง 3.20-4.49

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา _____

ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

SARAN KUMJADROK : REINFORCED CONCRETE COLUMNS
ENCASED WITH ASBESTOS CEMENT PIPES SUBJECTED TO
AXIALLY COMPRESSIVE LOADS : ASSIST. PROF. SITTICHAIR
SEANGATITH, Ph.D., 75 PP. ISBN 974-533-344-1

REINFORCED CONCRETE COLUMN/ASBESTOS CEMENT PIPE
COMPRESSIVE LOAD

The objectives of this research are to study the behavior of reinforced concrete columns encased with asbestos cement pipes under axial load and the failure modes and to derive the factor of safety. The parameters include percent of steel reinforcement and the slenderness ratio (L/r).

The study design covers short and long columns with steel reinforcement varying from 1.50% to 3.84%. Forty-eight sample columns were constructed and loaded axially to the point of failure using pinned supports at both ends.

The test results showed that most of the columns behave linearly up to 80-90% of their ultimate strength after that they behave nonlinearly with cracking at both ends until failure. All columns behave as short columns when failed that is the steel yielded and the concrete and the asbestos cement pipe cracked. The strength increased as the steel reinforcement increased and decreased as the slenderness ratio increased. Furthermore, an equation for the allowable load modified from that given by the EIT's design code. The allowable load gives a factor of safety between 3.20 to 4.49.

School of Civil Engineering
Academic Year 2004

Student's Signature _____
Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิทธิชัย แสงอาทิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
- รองศาสตราจารย์ ดร. อำนวย อภิชาติวัลลภ อ.ดร. ทนงศักดิ์ พิศาลสิน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มงคล จิรวรรณเดช อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- คุณดิงศักดิ์ เหลืองเจริญทิพย์ คุณจิระ วงศ์พรหม คุณสวัสดิ์ เกตุสระน้อย คุณวิชาญ วีระชัยสุนทร และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำมาโดยตลอด
- คุณอมรรัตน์ สุริยวิจิตรเสรณี คุณพรพิไล กิตติรัตนตระกูล คุณสิทธิชัย เลิศวิชัย คุณอดิวัฒน์ วิมุตสูงวิริยะ คุณประสิทธิ์ ศรีภิรมย์ คุณศิวฤทธิ์ หิรัญเรืองที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา
- คุณเกียรติพงษ์ ศรีสว่าง คุณกรรณ คำลือ คุณจักขดา ชำรงวุฒิ คุณธนาพร บุญมี คุณยิ่งลักษณ์ ภูมิสง่า ที่ให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา
- ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลในครอบครัวทุกคนที่ให้การอุปการะเลี้ยงดู และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมา ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ ความสามารถ มีจิตใจที่เข้มแข็งตลอดจนมีกำลังใจที่จะต่อสู้ต่ออุปสรรคที่เกิดขึ้นให้ผ่านพ้นไปด้วยดี

ศรัณย์ กำจัดโรค

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
2 ปรัชญ่วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 ท่อซีเมนต์ใยหิน	4
2.2.1 ท่อซีเมนต์ใยหินชนิดทนความดัน	4
2.2.2 ท่อซีเมนต์ใยหินสำหรับงานระบายน้ำ	4
2.3 ปรัชญางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.4 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	7
2.4.1 พฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสา	8
2.4.2 ข้อกำหนดทั่วไปของการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	13
3 วิธีดำเนินงานวิจัย	15
3.1 บทนำ	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 การออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหิน	16
3.3 การทดสอบกำลังรับแรงกดอัดประลัยของคอนกรีต	18
3.4 การทดสอบแรงดึงของเหล็ก	20
3.5 การทดสอบกำลังรับแรงกดอัดประลัยของวัสดุซีเมนต์ไยหิน	22
3.6 การทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหิน	23
4 ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล	27
4.1 บทนำ	27
4.2 ผลการทดสอบวัสดุ	27
4.3 ผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหิน	
ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน	28
4.3.1 ตัวอย่างกลุ่มที่ 1 เสาสั้น	28
4.3.2 ตัวอย่างกลุ่มที่ 2 เสายาว	32
4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนกับการโก่งตัวทางด้านข้าง	
ณ กึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทดสอบ	34
4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดกับอัตราส่วนความชะลุด	35
4.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดสูงสุดกับปริมาณเหล็กเสริม	36
5 สรุปผลการวิจัย	39
5.1 สรุปผลการศึกษา	39
5.1.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกน	39
5.1.2 ลักษณะการวิบัติของเสา	39
5.1.3 ผลของอัตราส่วนความชะลุดต่อกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด	40
5.1.4 ผลของปริมาณเหล็กเสริมต่อกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด	40
5.1.5 สมการที่ใช้ในการออกแบบ	40
5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย	40

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3 ข้อเสนอแนะที่ได้จากการวิจัย.....	40
เอกสารอ้างอิง.....	42
ภาคผนวก.....	44
ภาคผนวก ก ผลการสอบเทียบ Hydraulic Ram.....	44
ภาคผนวก ข คอนกรีตและเหล็กเสริม.....	46
ภาคผนวก ค วิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดสอบเสา.....	58
ภาคผนวก ง แผนภูมิแสดงขั้นตอนการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดปลอกเดี่ยว ที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ใยหินภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน.....	64
ภาคผนวก จ บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	66
ประวัติผู้เขียน.....	75

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตัวอย่างเสาที่ใช้ในการทดสอบ	26
4.1 สรุปผลการทดสอบวัสดุพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย.....	27
4.2 กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดจากการทดสอบกับน้ำหนักบรรทุกตลอดภัย และค่าอัตราส่วนความปลอดภัย.....	38
ข1 คุณสมบัติทางกลของเหล็กเสริมตามมาตรฐาน มอก. 20-2527	57

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การก่อสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหิน	2
2.1 รูปตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	8
2.2 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาปลอกเดี่ยวและปลอกเกลียว	10
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริม	11
3.1 แผนภูมิแสดงการดำเนินงานวิจัย	16
3.2 รูปตัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหิน	17
3.3 เครื่องทดสอบแรงกดอัดของคอนกรีต	19
3.4 การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีตเข้ากับเครื่องทดสอบ	20
3.5 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM)	21
3.6 Extensometer	21
3.7 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (SHIMADZU รุ่น UH-Series) และการทดสอบตัวอย่างวัสดุซีเมนต์ไยหิน	22
3.8 เหล็กเสริมหลักในเสาและระยะห่างของเหล็กปลอก	24
3.9 การติดตั้งตัวอย่างเสาในการทดสอบแรงกดอัดในแนวแกน	25
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของตัวอย่างกลุ่มที่ 1	31
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของตัวอย่างกลุ่มที่ 2	33
4.3 ตัวอย่างการวัดของเสา	33
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดกับการโก่งตัวทางด้านข้างของเสา	34
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดกับอัตราส่วนความชะลูด	35
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังที่ทดสอบได้ต่อกำลังรับ กับอัตราส่วนความชะลูด	36
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังของเสาต่อผลคูณตัวคูณลดกำลังและ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดกับปริมาณเหล็กเสริม	37
ก1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่ได้จากเครื่อง UTM กับความดันที่ได้จาก Hydraulic Ram	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข1	ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต.....50
ข2	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดกับความเครียดกดอัดของคอนกรีต.....51
ข3	การหาโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต.....52
ข4	กำลังและความเหนียวของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีหน่วยแรงกระทำรอบข้าง.....54
ข5	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดของเหล็กเสริม.....56
ค1	ตัวอย่างของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีต.....59
ค2	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีตภายใต้แรงกดอัด.....60
ค3	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุซีเมนต์ไยหิน.....61
ค4	ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างวัสดุซีเมนต์ไยหินภายใต้แรงกดอัด.....61
ค5	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีต และวัสดุซีเมนต์ไยหิน.....62
ค6	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็ก SD30.....63
ค7	ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของเหล็กภายใต้แรงดึง.....63
ง1	แผนภูมิแสดงขั้นตอนการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดปลอกเดี่ยวที่ถูก ห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหิน.....65

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่หน้าตัด
A_{abs}	=	พื้นที่หน้าตัดของท่อซีเมนต์ใยหิน
A_c	=	พื้นที่หน้าตัดสุทธิของเสาคอนกรีต
A_g	=	พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา
A_s	=	พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมหลัก
A_{st}	=	พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมหลักในเสา
d_b	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริมหลักในเสา
D	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสา
E	=	โมดูลัสยืดหยุ่น
E_c	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
E_s	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม
E_t	=	โมดูลัสสัมผัส
f'_{abs}	=	กำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของท่อซีเมนต์ใยหิน
f'_c	=	กำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีต
f_c^*	=	กำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเมื่อมีแรงดันรอบข้าง
f_h	=	แรงดันรอบข้างที่กระทำต่อเสาคอนกรีต
f_s	=	หน่วยแรงที่ยอมให้ในเหล็กเสริมหลักในเสามีค่าเท่ากับ 0.4 เท่าของกำลังครากของเหล็กเสริม
f_{sy}	=	กำลังจุดครากของเหล็กปลอกเกลียวแต่ต้องไม่เกิน 400 MPa
f_y	=	กำลังจุดครากของเหล็กเสริม
I	=	โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัด
L	=	ความยาวของเสา
P	=	แรงกระทำ
P_c	=	แรงวิกฤต
P_n	=	แรงที่ยอมให้
P_o	=	กำลังต้านทานแรงกดอัดสูงสุดในแนวแกน
R	=	ตัวคูณลดกำลัง
r	=	รัศมีไจเรชั่น
S_1	=	หน่วยแรงที่ตัวอย่างทดสอบเกิดความเครียดกดอัดเท่ากับ 50×10^{-6}

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

S_2	=	หน่วยแรงที่มีค่าประมาณ 40% ของหน่วยแรงกดอัดสูงสุด
w	=	หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต
ε_2	=	ความเครียดกดอัดที่เกิดจากหน่วยแรง S_2
ε_y	=	ความเครียดที่จุดคราก
ρ	=	ปริมาณเหล็กเสริมหลักในเสา
ρ_s	=	อัตราส่วนของเหล็กปลอกเกลียว
σ	=	หน่วยแรง
ϕ	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจัดได้ว่าเป็นโครงสร้างที่ได้รับความนิยมในงานก่อสร้างมากที่สุด เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้นำเอาข้อดีของคอนกรีต คือ มีความสามารถในการรับแรงกดอัดได้ดี และเหล็กเสริม ซึ่งมีความสามารถในการรับแรงดึงได้ดี มารวมเข้าด้วยกันซึ่งข้อดีของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีอยู่มากมาย เช่น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจัดเป็นโครงสร้างที่ทนไฟ และมีอายุการใช้งานมากกว่าโครงสร้างประเภทอื่นๆ อีกทั้งยังดูแลรักษาได้ง่ายราคาไม่แพง และยังสามารถออกแบบให้มีลักษณะขนาดและรูปร่างต่างๆ ได้ตามต้องการ เป็นต้น แต่ในการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก จำเป็นจะต้องใช้แบบหล่อ (Formwork) เพื่อเป็นแบบสำหรับเทคอนกรีต ถ้าลักษณะของโครงสร้างที่จะทำการก่อสร้างนั้นมีลักษณะรูปร่างพิเศษ เช่น รูปทรงที่ไม่เป็นไปตามลักษณะทางเรขาคณิต เป็นต้น ก็จะทำให้แบบหล่อคอนกรีตนั้นทำได้ยากเป็นผลให้ราคาก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูงขึ้น

ปัจจุบันเทคโนโลยีในการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กได้มีการพัฒนาไปอย่างมาก ทำให้การก่อสร้างทำได้สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากการผลิตชิ้นส่วนของโครงสร้างเป็นชิ้นส่วนสำเร็จรูป ซึ่งสามารถนำไปติดตั้งในสถานที่ก่อสร้างได้ทันที เช่น แผ่นพื้นสำเร็จรูป และผนังคอนกรีตสำเร็จรูป เป็นต้น อย่างไรก็ตามเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปยังไม่เป็นที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน เนื่องจากเสาเป็นชิ้นส่วนของโครงสร้างที่มีความสำคัญมาก หากมีการวิบัติเกิดขึ้นอาจทำให้อาคารทั้งชั้นหรือทั้งหลังเกิดการวิบัติได้ทำให้เกิดการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินเป็นจำนวนมาก ดังนั้นในการก่อสร้างเสาของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจึงนิยมใช้เสาแบบหล่อในที่มากกว่า

ปัจจุบันมีการนำเอาท่อซีเมนต์ไยหินที่ใช้ในงานสุขาภิบาลมาใช้เป็นแบบหล่อของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กดังที่แสดงในรูปที่ 1.1 เสาประเภทนี้ได้มีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายในประเทศไทยมาเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้ว ข้อดีของการใช้ท่อซีเมนต์ไยหินเป็นแบบหล่อเสาลักษณะดังกล่าวคือ มีความสะดวกและรวดเร็วในการก่อสร้าง มีความสวยงามและมีราคาถูกเนื่องจากไม่ต้องเสียค่าจัดทำแบบหล่อเสา จากการค้นคว้าข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มียานวิจัยใดได้ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรงกดอัด กำลังรับแรงกดอัดรวมไปถึงลักษณะการวิบัติของเสา

ดังกล่าวเอาไว้เลย งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดและกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนรวมไปถึงลักษณะการวิบัติของเสาและเปรียบเทียบกำลังรับแรงกดอัดที่ได้จากการทดสอบกับสมการที่ถูกดัดแปลงให้เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหินต่อไป



รูปที่ 1.1 การก่อสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหิน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1) เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรงกดอัด กำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนและลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหินภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน
- 1.2.2) เพื่อนำกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบไปคำนวณค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเมื่อออกแบบตามสมการออกแบบเสาที่เหมาะสม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1) คอนกรีตผสมตามส่วนผสมที่ออกแบบส่วนผสมตามมาตรฐานของสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา (American Concrete Institute) โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และมีกำลังรับแรงกดอัดประลัยของคอนกรีตเฉลี่ยประมาณ 20MPa

- 1.3.2) เหล็กเสริมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเหล็กข้ออ้อยและเหล็กกลมผิวเรียบตามมาตรฐาน มอก. 24-2536 ชั้นคุณภาพ SD30 และ มอก. 20-2527 ชั้นคุณภาพ SR24 ตามลำดับ
- 1.3.3) ตัวอย่างเสาเป็นเสากลมปลอกเดี่ยวมีปริมาณเหล็กเสริมหลักในเสาไม่มากกว่า 4% ของพื้นที่หน้าตัดเสา ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ 0.12 m และมีอัตราส่วนความชะลูด (Slenderness Ratio) ไม่มากกว่า 80
- 1.3.4) ตัวอย่างเสาถูกทดสอบโดยแรงกดอัดในแนวแกนที่อายุ 28 วันนับจากวันที่หล่อเสา โดยมีการรองรับแบบหมุนที่ปลายทั้งสองข้างของตัวอย่างทดสอบ

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1.4.1) ทราบและเข้าใจถึงพฤติกรรมการรับแรงกดอัดและกำลังรับแรงกดอัดรวมไปถึงลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ใยหิน
- 1.4.2) ได้สมการคำนวณออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ใยหินที่เหมาะสมในเชิงวิศวกรรม
- 1.4.3) ได้รูปแบบการก่อสร้างเสาที่รวดเร็วและยังมีผลทางอ้อมต่อการลดการตัดไม้ทำลายป่าอีกด้วย

บทที่ 2

ปรัทศนัววรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาของท่อซีเมนต์ใยหิน กรรมวิธีการผลิตตลอดจนการนำท่อซีเมนต์ใยหินไปใช้งาน จากนั้นจะกล่าวถึงงานวิจัยที่ผ่านมาที่มีส่วนคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่กำลังศึกษา สุดท้ายจะกล่าวถึงเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสา คอนกรีตเสริมเหล็ก สมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กและข้อกำหนดทั่วไปของการออกแบบเสา คอนกรีตเสริมเหล็ก ส่วนวัสดุพื้นฐานที่เป็นส่วนประกอบของเสา คอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งได้แก่ คอนกรีตและเหล็กเสริมจะกล่าวถึงในภาคผนวก ข

2.2 ท่อซีเมนต์ใยหิน

ท่อซีเมนต์ใยหิน (Asbestos Cement Pipe) จัดได้ว่าเป็นวัสดุผสมเสริมเส้นใย (Fiber-Reinforced Composite) ท่อซีเมนต์ใยหินที่มีขายตามท้องตลาดมี 2 ประเภท ได้แก่ ท่อซีเมนต์ใยหินชนิดทนความดันและท่อซีเมนต์ใยหินสำหรับงานระบายน้ำ

2.2.1 ท่อซีเมนต์ใยหินชนิดทนความดัน

ท่อซีเมนต์ใยหินชนิดทนความดันผลิตขึ้นจากการผสมน้ำปูนซีเมนต์เข้มข้น (Slurry Portland Cement) ประมาณ 80-85% กับแร่ใยหิน (Asbestos Fiber) ประมาณ 15-20% เมื่อผสมได้ก็จะเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว ของเหลวดังกล่าวจะถูกดึงน้ำออกโดยใช้ Rotary Sieve Cylinder และถูกอัดเป็นชั้นบางๆ หลังจากนั้นจะถูกนำไปพันรอบแกนยึดภายใต้แรงดันจนกระทั่งได้ขนาดตามที่ได้ออกแบบไว้ เมื่อได้ขนาดของท่อตามที่ต้องการแล้วตัวแกนยึดจะถูกดึงออกแล้วนำท่อซีเมนต์ใยหินที่ได้ไปป่นด้วยไอน้ำจนครบตามระยะเวลาที่กำหนด

2.2.2 ท่อซีเมนต์ใยหินสำหรับงานระบายน้ำ

ท่อซีเมนต์ใยหินสำหรับงานระบายน้ำผลิตขึ้นจากวัสดุชนิดเดียวกันกับท่อซีเมนต์ใยหินชนิดทนความดันต่างกันที่อัตราส่วนผสม ส่วนผสมที่ผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันจะถูกนำมาโรยบนแบบเหล็กที่มีรูพรุนและพันผ้าไว้โดยรอบจนได้ความหนาตามที่กำหนดจากนั้นจะถูกยกไปทำการอัดให้เนื้อท่อแน่นขณะที่ทำการอัดท่ออยู่นั้นน้ำบางส่วนจะถูกดูดออกผ่านรูที่แบบเหล็กด้วยระบบสูญญากาศ เมื่อท่อมีความแน่นดีแล้วจะนำไปเข้าเครื่องถอดแบบเพื่อเอาเนื้อท่อออกแล้วนำไปวางฝั่ง

ลมไว้งั้นแข็งตัวพอจึงนำไปตัดตามความยาวที่ต้องการและนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 7 วัน ท่อซีเมนต์ใยหินสำหรับงานระบายน้ำมีน้ำหนักเบา ไม่เป็นสนิมหรือถูกกัดกร่อนได้ง่าย ทนต่อการเสียดสี ซึ่งในประเทศไทยได้นำเอาท่อซีเมนต์ใยหินประเภทนี้ไปใช้เป็นที่ระบายน้ำทั้งภายในและภายนอกอาคาร เช่น ท่อระบายน้ำฝนจากหลังคา ท่อระบายน้ำทิ้ง ท่อระบายน้ำจากห้องน้ำห้องส้วม ตลอดจนท่อระบายน้ำจากอาคารลงสู่บ่อพักน้ำ เป็นต้น นอกจากนั้นแล้วในงานก่อสร้างได้นำเอาท่อดังกล่าวไปเป็นแบบหล่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็กอีกด้วย ซึ่งช่วยทำให้การก่อสร้างสะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น

2.3 ปริทัศน์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการสืบค้นงานวิจัยที่ผ่านมา ปรากฏว่าไม่มีงานวิจัยใดที่ได้เสนอวิธีคำนวณออกแบบและศึกษาเกี่ยวกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ใยหินมีเพียงงานวิจัยบางชิ้นที่ใกล้เคียงกับหัวข้อที่กำลังศึกษา ดังนี้

Amir Mirmiran and Mohsen Shahawy (1997) ได้ทำการศึกษากำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยเส้นใยพลาสติก (Fiber Reinforced Plastic) โดยทดสอบตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 152 mm สูง 305 mm จำนวน 30 ตัวอย่าง 6 ตัวอย่างเป็นคอนกรีตธรรมดาและอีก 24 ตัวอย่าง เป็นคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยแผ่น FRP โดยแปรผันจำนวนชั้นของแผ่น FRP จากการศึกษพบว่าแผ่น FRP ที่ห่อหุ้มคอนกรีตด้านนอกมีส่วนทำให้เกิด Confinement เป็นผลให้กำลัง (Strength) และความเหนียว (Ductility) ของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น โดยกำลังและความเหนียวของคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาหรือจำนวนชั้นของแผ่น FRP ที่เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะเห็นได้จากการที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดมีค่ากำลังรับแรงกดอัดและพื้นที่ใต้เส้นกราฟมากขึ้น นอกจากนั้นแล้วยังพบอีกว่าการเกิดรอยแตกในแผ่น FRP ที่ห่อหุ้มคอนกรีตอยู่รอบนอกเปรียบเสมือนเครื่องเค้นการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

Ben Young and Wibisono Hartono (2002) ได้ทำการศึกษาแรงกดอัดของเสาเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดกลมกลวง (Stainless Steel Circular Hollow Section) โดยยึดครั้งที่ปลายทั้งสองข้างของเสา (Both-End Fixed Supports) ตัวอย่างที่นำมาทดสอบทำมาจากแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel Sheets) ที่นำมาม้วนเป็นท่อกลม โดยแปรผันอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของเสากับความหนาของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ผลการทดสอบพบว่าที่ค่าอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของเสากับความหนาของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมต่ำๆ การวิบัติของเสาจะเป็นแบบ Local Buckling ของท่อเหล็กกล้าไร้สนิมและที่ค่าอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของเสากับความหนาของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมสูงๆ การวิบัติจะเป็นแบบ Flexural Buckling ส่วนค่าอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของเสากับความหนาของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่อยู่ระหว่างค่าทั้งสองการวิบัติจะเป็นแบบผสมกันระหว่าง Local Buckling และ Flexural Buckling

Jinan Chung, Keigo Tsuda and Chiaki Matsui (1999) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตกำลังสูง (High-Strength Concrete) ที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อเหล็ก (Steel Tube) โดยการทดสอบภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนและเยื้องศูนย์ ตัวอย่างทดสอบเป็นเสาคอนกรีตซึ่งมีกำลังรับแรงกดอัดประลัยเท่ากับ 60 MPa ที่ถูกห่อหุ้มด้วยเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า จำนวน 18 ตัวอย่าง โดยแปรผันค่า Buckling Length-Section Depth Ratio และ Eccentricity จากผลการทดสอบพบว่าเสาสั้นที่มีค่า Buckling Length-Section Depth Ratio น้อยกว่า 12 จะมีพฤติกรรมแบบ Full Plastic Strength นั่นคือเสาจะวิบัติโดยเนื้อวัสดุ (Material Failure) ส่วนเสายาวที่มีค่า Buckling Length-Section Depth Ratio มากกว่า 18 จะไม่วิบัติโดยเนื้อวัสดุ แต่จะวิบัติโดยการสูญเสียเสถียรภาพของโครงสร้าง (Instability)

กฤษณะ เผ่าภกะ ศุภกิจ สายประเสริฐและณัฐพล ทองขาว (2543) ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดและลักษณะการวิบัติของท่อซีเมนต์ไยหินในแนวแกนซึ่งตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเป็นท่อซีเมนต์ไยหินและท่อซีเมนต์ไยหินหล่อคอนกรีตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 และ 0.20 m สูง 0.30 m ผลการทดสอบพบว่าท่อซีเมนต์ไยหินมีพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนเป็นแบบ Linear Elastic และมีลักษณะการวิบัติเป็นแบบเปราะ (Brittle) คือการแตกหักแบบทันทีทันใด ส่วนท่อซีเมนต์ไยหินหล่อคอนกรีตมีพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกกราฟมีความชันสูงซึ่งเป็นส่วนที่แสดงกำลังของท่อซีเมนต์ไยหินหล่อคอนกรีตหลังจากนั้น เมื่อทำการเพิ่มน้ำหนักต่อไป Displacement ที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงมากเพราะเกิด Series Microscopic Crack ในเนื้อคอนกรีตภายในท่อซีเมนต์ไยหิน เนื่องจากการทดสอบท่อซีเมนต์ไยหินและคอนกรีต Strain ที่เกิดการวิบัติของคอนกรีตมีค่ามากกว่า ทำให้กำลังของวัสดุมีค่าลดลง และค่า Ultimate Strength ของท่อซีเมนต์ไยหินหล่อคอนกรีตจะอยู่ระหว่างค่า Ultimate Strength ของท่อซีเมนต์ไยหินเปล่าและคอนกรีต แต่มีค่าใกล้เคียงกับค่า Ultimate Strength ของคอนกรีต เนื่องจากพื้นที่รับแรงกดอัดของคอนกรีตมีค่ามากกว่าพื้นที่รับแรงกดอัดของท่อซีเมนต์ไยหิน

จากปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นพอที่จะสรุปได้ว่า คอนกรีตหรือเสาคอนกรีตเมื่อถูกห่อหุ้มด้วยวัสดุคนละชนิดกันแล้ว วัสดุที่ห่อหุ้มจะมีส่วนช่วยให้คอนกรีตหรือเสาคอนกรีตมีกำลังรับแรงกดอัดและความเหนียวเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากวัสดุที่ห่อหุ้มอยู่นอกมีส่วนทำให้เกิด Confinement กล่าวคือ วัสดุที่ห่อหุ้มจะช่วยจำกัดการขยายตัวออกทางด้านข้างของคอนกรีตที่อยู่ภายในทำให้กำลังและความเหนียวมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำเอาท่อซีเมนต์ไยหินมาห่อหุ้มเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการนำท่อซีเมนต์ไยหินมาใช้เป็นแบบหล่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำเสาประเภทนี้ไปใช้อย่างแพร่หลายทั้งๆ ที่ยังไม่มีหลักการหรือทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบเสาประเภทนี้โดยตรง ดังนั้นเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนและเพื่อให้เป็นงานอย่างมีประสิทธิภาพและประสิทธิผลตามหลักวิศวกรรมในปัจจุบัน จึงเห็นสมควรที่ต้องทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนว

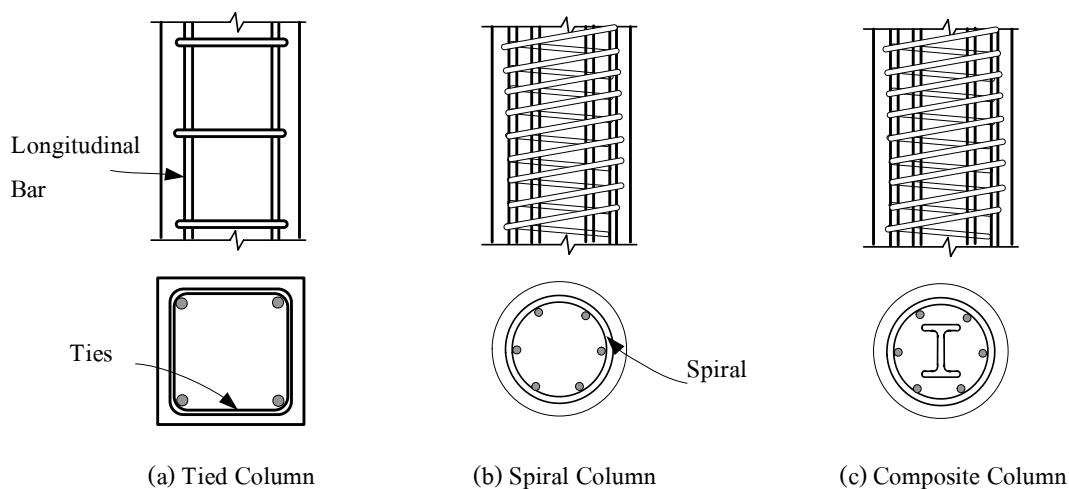
แกนรวมไปถึงลักษณะการวิบัติของเสาและนำค่าที่ได้จากการทดสอบไปคำนวณหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัย (Factor of Safety) กับสมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหินที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบเสาดังกล่าวต่อไป

2.4 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เสาเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างอาคารที่อยู่ในแนวตั้ง ทำหน้าที่รับแรงกดอัด หรือทั้งแรงกดอัดและแรงดัดร่วมกันซึ่งได้มาจากการถ่ายน้ำหนักบรรทุกของคานหรือแผ่นพื้นในชั้นต่างๆ แล้วจึงถ่ายน้ำหนักบรรทุกนั้นลงสู่ดินโดยฐานราก หากเสาต้นใดต้นหนึ่งวิบัติ ก็จะทำให้ส่วนของโครงสร้างที่ยึดติดต่อเนื่องกันเกิดการชำรุดเสียหาย จนอาจทำให้โครงสร้างทั้งหมดถึงกับพังลงมาได้ ดังนั้น ในการคำนวณออกแบบเสาจึงต้องให้ความสำคัญเป็นพิเศษเกี่ยวกับแรงกดอัดและโมเมนต์ดัดที่เสาต้องรองรับ

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กอาจมีรูปตัดกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีเหล็กเสริมชนิดเหล็กเสริมหลักใช้ช่วยคอนกรีตรับน้ำหนักและมีเหล็กเสริมทางขวางชนิดปลอกเกลียวซึ่งพันต่อเนื่องกันรอบเหล็กเสริมหลักที่อยู่บนเส้นรอบวงของวงกลม เรียกว่าเสาปลอกเกลียว (Spiral Column) เหล็กเสริมทางขวางอาจเป็นชนิดปลอกเดี่ยวพันรอบเหล็กเสริมหลักที่วางในตำแหน่งขอบของรูปสี่เหลี่ยมและเว้นเป็นระยะๆ เรียกว่า เสาปลอกเดี่ยว (Tied Column) เหล็กเสริมทางขวางช่วยให้เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก รับน้ำหนักได้มากขึ้น และทำให้เสามีพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนเกิดการวิบัติ ในบางครั้งอาจใช้เหล็กรูปพรรณหรือเหล็กหล่อเสริมเพิ่มที่แกนกลางของเสาซึ่งเรียกว่าเสาคอนกรีตเชิงประกอบ (Composite Column) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.1

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีสองประเภท คือ เสาสั้นและเสายาว เสาสั้น (Short Column) หมายถึง เสาที่มีอัตราส่วนความชะลูด (Slenderness Ratio) น้อย ไม่เกินพิกัดที่จะทำให้เสานั้นวิบัติโดยการโก่งเดาะทางด้านข้าง มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. กำหนดว่าเสาสั้นต้องมีอัตราส่วนระหว่างความสูงของเสาต่อต้านแคบของเสารูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสารูปตัดกลมไม่เกินกว่า $15 \left(\frac{L}{D} \leq 15 \right)$ กำลังรับแรงกดอัดของเสาสั้นจะขึ้นอยู่กับกำลังของวัสดุที่ใช้และขนาดรูปตัดของเสา ส่วนเสายาว (Slender Column) หมายถึง เสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดมาก $\left(\frac{L}{D} > 15 \right)$ ความสามารถในการรับแรงกดอัดของเสายาวจะน้อยกว่าเสาสั้นที่มีขนาดรูปตัดอย่างเดียวกัน เพราะเสายาวเกิดการโก่งเดาะทางด้านข้างก่อน



รูปที่ 2.1 รูปตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

(Nawy, G. W., 2000)

2.4.1 พฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสา

พฤติกรรมและกำลังของเสาสั้นรับแรงกดอัดในแนวแกน
เสาคอนกรีตล้วน

จากการทดสอบเสาคอนกรีตล้วนที่ปราศจากเหล็กเสริม ซึ่งได้พิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ที่จะมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงกดอัดของเสา เช่น ขนาดรูปร่างของเสา คุณภาพของคอนกรีต อัตราการให้แรงกดอัด ความชื้นของเสา ตลอดจนลักษณะของการหล่อเสาตัวอย่างที่อาจหล่อในแนวตั้ง หรือในแนวนอน พบว่าพฤติกรรมการรับแรงกดอัดของเสาคอนกรีตล้วนคล้ายกับพฤติกรรมการรับแรงกดอัดของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก กล่าวคือ ขณะที่มีการหดตัวในแนวที่รับแรงกดอัดก็จะเกิดการขยายตัวออกทางข้างซึ่งเป็นไปตามหลักการของปัวซองส์ ลักษณะการวิบัติเป็นแบบปริแตกหรือฉีกออก (Splitting) ตามแนวยาวของเสาหรือเป็นแบบเฉือนขนานในระนาบเอียง หน่วยแรงกดอัดสูงสุดในเสาคอนกรีตล้วนมีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ $0.85f'_c$ (ACI Committee 105, April 1930) ดังนั้น ถ้าเสาคอนกรีตล้วนมีพื้นที่หน้าตัดสุทธิเท่ากับ A_c และมีกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกเท่ากับ f'_c จะได้ กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดในแนวแกนของเสาคอนกรีตล้วนดังสมการ

$$P_o = 0.85f'_c A_c \quad (2.1)$$

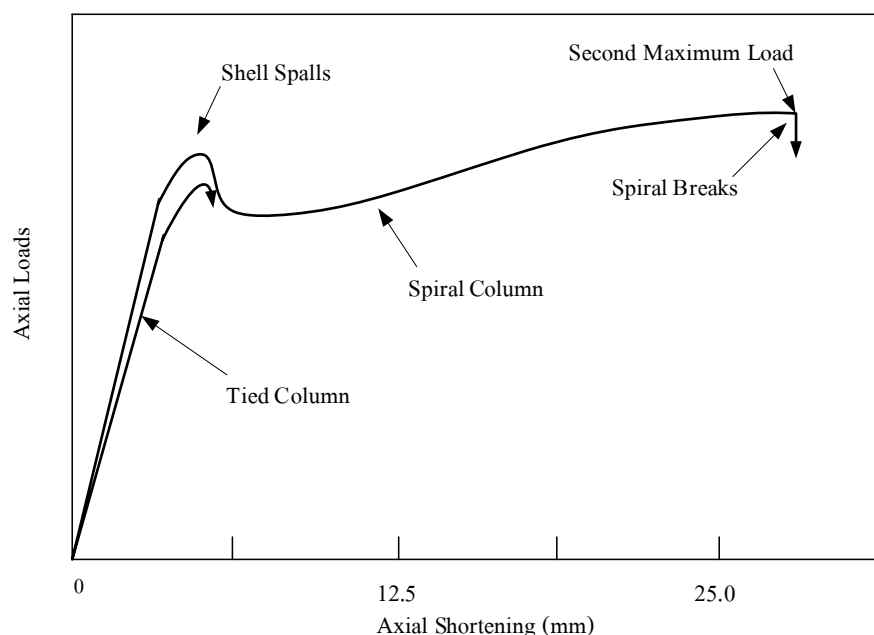
เมื่อ P_o คือ กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดในแนวแกน

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดสุทธิของเสาคอนกรีต

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวและปลอกเกลียว

เสาคอนกรีตที่เสริมเฉพาะเหล็กเสริมหลักอย่างเดียวจะมีพฤติกรรมแบบเปราะ (Brittle) และการวิบัติค่อนข้างคล้ายกับการวิบัติของเสาคอนกรีตล้วน กล่าวคือ พื้นที่ที่คอนกรีตส่วนที่หุ้มเหล็กเสริมหลักถูกอัดแตก หลุดและร่อนออก ซึ่งจะเหลือให้เห็นแต่เหล็กเสริมหลัก เหล็กเสริมหลักก็จะถูกกดอัดและวิบัติจากการโก่งเดาะ แต่เมื่อเสาคอนกรีตดังกล่าวเสริมด้วยเหล็กปลอกเกลียวหรือเหล็กปลอกเดี่ยว เหล็กปลอกจะช่วยโอบรัดแกนคอนกรีตภายในไว้หลังจากที่คอนกรีตหุ้มถูกอัดแตก ทำให้เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก นั้นมีกำลังรับน้ำหนักหรือแรงกดอัดเพิ่มขึ้นอีกบ้างและช่วยให้เสามีพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนที่จะเกิดการวิบัติ อนึ่งนอกจากเหล็กปลอกจะช่วยทำให้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีพฤติกรรมแบบเหนียวแล้วยังช่วยยึดเหล็กเสริมหลักให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการขณะหล่อเสาคอนกรีตอีกด้วย

พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาปลอกเกลียวและเสาปลอกเดี่ยวแสดงไว้ในรูปที่ 2.2 ถ้าเสาปลอกเกลียวและเสาปลอกเดี่ยวมีขนาดพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตและมีปริมาณเหล็กเสริมหลักเท่ากันและสมมติว่าเหล็กเสริมหลักมีกำลังจุดครากไม่สูงมากนัก (SD30 หรือ SD40) จะพบว่า ก่อนที่คอนกรีตส่วนที่หุ้มเหล็กเสริมจะถูกอัดแตก ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดกับการหดตัวในแนวแกนของเสาปลอกเกลียวและเสาปลอกเดี่ยวค่อนข้างจะเหมือนกัน โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นเส้นตรงในช่วงที่แรงกดอัดน้อยๆ ซึ่งทั้งหน่วยแรงกดอัดในคอนกรีตและในเหล็กเสริมมีค่าอยู่ในช่วงอิลาสติก แต่เมื่อเสารับแรงกดอัดมากขึ้นจนหน่วยแรงกดอัดในคอนกรีตมีค่าสูงเกินกว่า $0.5f'_c$ (โดยประมาณ) ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง เมื่อแรงกดอัดสูงจนหน่วยแรงกดอัดในเหล็กเสริมถึงจุดครากซึ่งค่อนข้างจะพอดีกับหน่วยแรงกดอัดในคอนกรีตมีค่าสูงสุด คอนกรีตส่วนที่หุ้มเหล็กเสริมจะเริ่มแตกถ้าระยะห่างของเหล็กปลอกเดี่ยวมีค่ามากเกินไป เมื่อคอนกรีตหุ้มถูกอัดแตกเสาจะวิบัติทันทีเพราะเหล็กเสริมหลักที่อยู่ระหว่างเหล็กปลอกเดี่ยวจะถูกกดอัดและโก่งเดาะทางข้างทันทีเช่นกัน ทำให้เสามีพฤติกรรมแบบเปราะ ถ้าเหล็กปลอกเดี่ยวมีระยะห่างน้อยๆ กำลังรับแรงกดอัดของเสาจะค่อยๆ ลดลงภายหลังจากที่คอนกรีตหุ้มถูกอัดแตกทำให้เสามีพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนที่จะเกิดการวิบัติ อย่างไรก็ดี ในทางทฤษฎีถือว่าเสานั้นไม่เหมาะที่จะใช้งานอีกต่อไปเมื่อคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมหลักถูกอัดแตก



รูปที่ 2.2 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาปลอกเดี่ยวและปลอกเกลียว

(MacGregor, J. G., 1997)

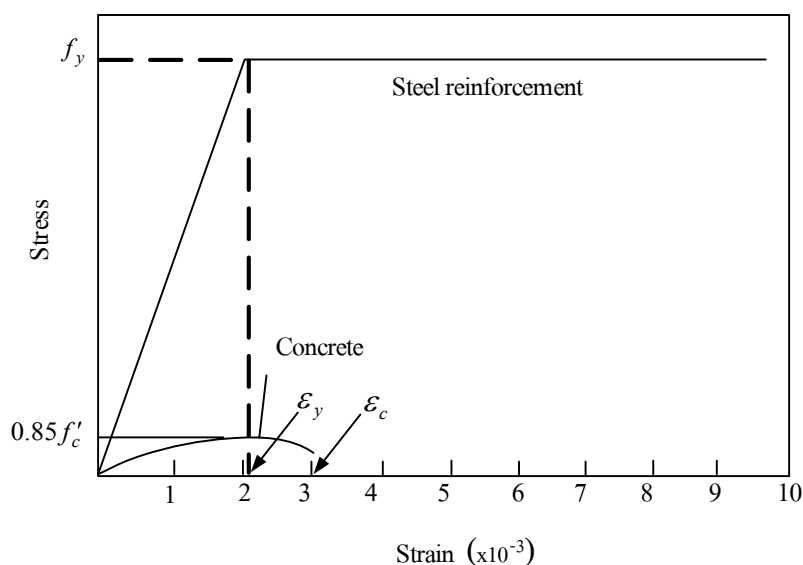
การวิเคราะห์หาค่าล้งรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาต้นจะพิจารณาได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียด (Stress-Strain Curve) ทั้งของคอนกรีตและเหล็กเสริมดังรูปที่ 2.3 โดยกำหนดให้คอนกรีตมีหน่วยแรงกดอัดสูงสุดเท่ากับ $0.85f'_c$ ที่ความเครียดกดอัดเท่ากับ 0.002 mm/mm และให้คอนกรีตมีความเครียดกดอัดสูงสุดก่อนวิบัติเท่ากับ 0.003 mm/mm

สำหรับหาค่าล้งรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาปลอกเดี่ยวและเสาปลอกเกลียว (ก่อนที่คอนกรีตหุ้มจะถูกอัดแตก) จะมีค่าเท่ากับผลรวมของค่าล้งรับแรงกดอัดที่ได้จากคอนกรีตและเหล็กเสริมหลัก เมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดทั้งของคอนกรีตและเหล็กเสริม ดังรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าเมื่อใช้เหล็กเสริมที่มีหน่วยแรงที่จุดคราก (f_y) อยู่ระหว่าง 300-400 MPa เหล็กเสริมนั้นจะมีความเครียดที่จุดคราก (ϵ_y) เท่ากับ $0.0015-0.002 \text{ mm/mm}$ นั้นหมายความว่า เหล็กเสริมหลักในเสาจะถูกอัดถึงจุดครากก่อนที่คอนกรีตจะถูกอัดจนถึงหน่วยแรงกดอัดสูงสุดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้น ก่อนที่คอนกรีตหุ้มจะถูกอัดแตกหน่วยแรงกดอัดของคอนกรีตจะมีค่าสูงสุดเท่ากับ $0.85f'_c$ และหน่วยแรงกดอัดของเหล็กเสริมจะมีค่าเท่ากับหน่วยแรงที่จุดคราก f_y ดังนั้นรับแรงกดอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ

$$P_o = 0.85f'_c(A_g - A_s) + f_y A_s \quad (2.2)$$

เมื่อ A_g คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา

A_s คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมหลัก



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริม
(วินิต ช่อวิเชียร , 2540)

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งานขึ้นในปี พ.ศ. 2534 เรียกว่า มาตรฐาน ว.ส.ท. 1007-34 ซึ่งกำหนดให้กำลังรับแรงกดอัดปลอดภัยในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เหล็กปลอกเดี่ยวสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P = 0.2125f'_c A_g + 0.85f_s A_s \quad (2.3)$$

เมื่อ f_s คือ หน่วยแรงที่ยอมให้ในเหล็กเสริมซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.4 เท่าของกำลังครากของเหล็กเสริม

พฤติกรรมและกำลังของเสายาวที่รับแรงกดอัดในแนวแกน

เสายาว (Slender Column) หมายถึง เสาที่มีอัตราส่วนระหว่างความสูงของเสาต่อต้านแคบของเสารูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสารูปตัดกลมมากกว่า 15 กำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดของเสายาวจะถูกลดลงไปจากค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.3)

เนื่องจากผลของความชะลูด โดยมีค่าอัตราส่วนความชะลูด (Slenderness Ratio) ใช้สัญลักษณ์เป็น $\frac{L}{r}$ เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย โดยที่ r เป็นรัศมีจอร์เจชันของหน้าตัดเสา ซึ่งมีค่าเท่ากับ $0.3h$ และ $0.25D$ สำหรับเสารูปตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าและเสารูปตัดกลมตามลำดับ เมื่อ h เป็นความลึกของด้านที่รับโมเมนต์ดัดของเสารูปตัดสี่เหลี่ยมและ D เป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสารูปตัดกลม ดังนั้นเสาขาวถือเป็นเสาที่มีอัตราส่วน $\frac{L}{r} > 60$ กำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาจะลดลงเมื่ออัตราส่วนความชะลูดของเสามีค่าสูงขึ้นและการวิบัติของเสาจะเกิดจากการโก่งคดทางด้านข้างโดยเฉพาะเมื่อเสาต้องรับแรงกดอัดและโมเมนต์ดัดที่มีค่ามากขึ้น

ปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาขาว ได้แก่

- 1) อัตราส่วนระหว่างความยาวของเสาต่อความลึกของรูปตัด ระยะเยื้องศูนย์กลางหรือโมเมนต์ดัดเริ่มแรกที่กระทำ ตลอดจนทิศทางของโมเมนต์ดัดที่ปลายทั้งสองของเสา
- 2) การยอมให้ปลายเสาเคลื่อนที่ได้หรือไม่ (Sidesway or Nonsidesway) กำลังรับแรงกดอัดของเสาที่ยอมให้ปลายเสาเคลื่อนที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าเสาที่ไม่ยอมให้ปลายเสาเคลื่อนที่
- 3) การยึดปลายเสากับคาน ถ้าคานมีความเกร็งมากกำลังรับน้ำหนักของเสาจะสูงขึ้น
- 4) ปริมาณของเหล็กเสริมหลักและกำลังของวัสดุ
- 5) ระยะเวลาของการรับแรงกดอัด กำลังรับแรงกดอัดของเสาจะน้อยลงเมื่อต้องรับแรงกดอัดเป็นเวลานานทั้งนี้เพราะคอนกรีตเกิดการล้านั่นเอง

เสาขาวที่รับแรงกดอัดในแนวแกนจะวิบัติเนื่องจากการโก่งคด (Buckling) ซึ่งต่างจากเสาสั้นที่วิบัติเนื่องจากคอนกรีตถูกอัดแตก (Crushing) กำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาขาว สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.4) ซึ่งมีรูปสมการดังต่อไปนี้

$$P = (0.2125 f'_c A_g + 0.85 f_s A_s) \times R \quad (2.4)$$

เมื่อ R คือ ตัวคูณลดกำลังของเสาขาวซึ่งหาได้จากสมการ

$$R = 1.07 - 0.008 \left(\frac{L}{r} \right) \quad (2.5)$$

2.4.2 ข้อกำหนดทั่วไปของการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

มาตรฐาน ว.ศ.ท. ให้ข้อกำหนดต่างๆ เกี่ยวกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กดังนี้

- 1) พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กเสริมหลักในเสา (A_{st}) ต้องไม่น้อยกว่า 0.01 และต้องไม่เกินกว่า 0.08 ของพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา (A_g) เสาปลอกเดี่ยวต้องมีเหล็กเสริมหลักอย่างน้อย 4 เส้นและเสาปลอกเกลียวต้องมีเหล็กเสริมอย่างน้อย 6 เส้น
- 2) ระยะช่องว่างระหว่างเหล็กเสริมหลักของเสาต้องไม่น้อยกว่า 1.5 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กนั้น หรือ 1.34 เท่าของขนาดโตสุดของหินหรือ 40 mm
- 3) คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมหลักที่หล่อเป็นเนื้อเดียวกับแกนคอนกรีตของเสาปลอกเกลียวและเสาปลอกเดี่ยว ต้องมีความหนาอย่างน้อย 35 mm หรือ 1.34 เท่าของขนาดโตสุดของหิน
- 4) เสาปลอกเดี่ยวต้องใช้เหล็กปลอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เล็กกว่า 6 mm สำหรับเหล็กเสริมหลักที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่ใหญ่กว่า 20 mm และใช้เหล็กปลอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เล็กกว่า 9 mm สำหรับเหล็กเสริมหลักที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 25 ถึง 32 mm โดยมีระยะห่างไม่เกิน 16 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริมหลัก หรือ 48 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กปลอกหรือไม่เกินกว่าด้านแคบของเสา
- 5) อัตราส่วนของเหล็กปลอกเกลียว ρ_s ต้องไม่น้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จาก

$$\rho_s = 0.45 \left[\frac{A_g}{A_c} - 1 \right] \frac{f'_c}{f_{sy}} \quad (2.6)$$

เมื่อ ρ_s คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเหล็กปลอกเกลียวกับปริมาตรของแกนเสาวัดที่ขอบนอกของเหล็กปลอกเกลียว

f_{sy} คือ หน่วยแรงที่จุดครากของเหล็กปลอกเกลียว แต่ต้องไม่เกิน 400 MPa

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนคอนกรีตที่วัดถึงขอบนอกของเหล็กปลอกเกลียว

A_g คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสาปลอกเกลียว

- 6) ต้องพันเหล็กปลอกเกลียวต่อเนื่องสม่ำเสมอและมีระยะห่างไม่เกิน 75 mm แต่ไม่น้อยกว่า 25 mm หรือ 1.34 เท่าของขนาดโตสุดของหิน ทั้งนี้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กปลอกเกลียวต้องไม่น้อยกว่า 9 mm
- 7) เสาปลอกเดี่ยวที่มีพื้นที่หน้าตัดใหญ่กว่าที่ต้องการในการรับแรงกดอัดมากๆ การหาปริมาณเหล็กเสริมน้อยที่สุดและกำลังที่ใช้ออกแบบ ยอมให้ใช้ค่า A_g เพียงครั้งเดียว
- 8) การต่อเหล็กเสริมหลักในเสาอาจต่อโดยวิธีทาบ (เมื่อขนาดเหล็กเสริมหลักไม่โตกว่า 36 mm) หรือโดยวิธีเชื่อมแบบต่อชนหรือใช้ข้อต่อทางกล การต่อเหล็กเสริมหลักให้ต่อที่พื้นที่ชั้นล่างของชั้นนั้นๆ
- 9) เมื่อต้องคัดเหล็กเอียงกัน (คู้งเหล็ก) ที่รอยต่อ ความลาดเอียงต้องไม่เกิน 1 ต่อ 6 เมื่อเทียบกับแกนของเสา เหล็กส่วนบนและล่างของส่วนที่คู้งต้องขนานกับแกนเสา และต้องมีเหล็กปลอกเดี่ยวหรือเหล็กปลอกเกลียวยึดทางขวางอย่างพอเพียง
- 10) หากหน้าตัดเสาด้านใดด้านหนึ่งมีระยะเอียงกันตั้งแต่ 75 mm ขึ้นไป ห้ามต่อเหล็กที่หน้าเสานั้นโดยวิธีคู้งเหล็ก แต่ให้ต่อโดยวิธีทาบด้วยการเสริมเหล็กเฉียง
- 11) ความยาวของระยะต่อทาบของเหล็กข้ออ้อยที่รับแรงกดอัดมีค่าเท่ากับ $0.007d_b f_y$ สำหรับเหล็กเสริมหลักที่มีกำลังจุดครากไม่เกิน 400 MPa (นั่นคือเท่ากับ $28d_b$) หรือมีค่าเท่ากับ $(0.013f_y - 24)d_b$ สำหรับเหล็กเสริมหลักที่มีกำลังจุดครากเกินกว่า 400 MPa แต่ทั้งนี้ความยาวของระยะต่อทาบต้องไม่น้อยกว่า 0.30 m และให้เพิ่มระยะทาบอีกหนึ่งในสามเมื่อกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตมีค่าน้อย

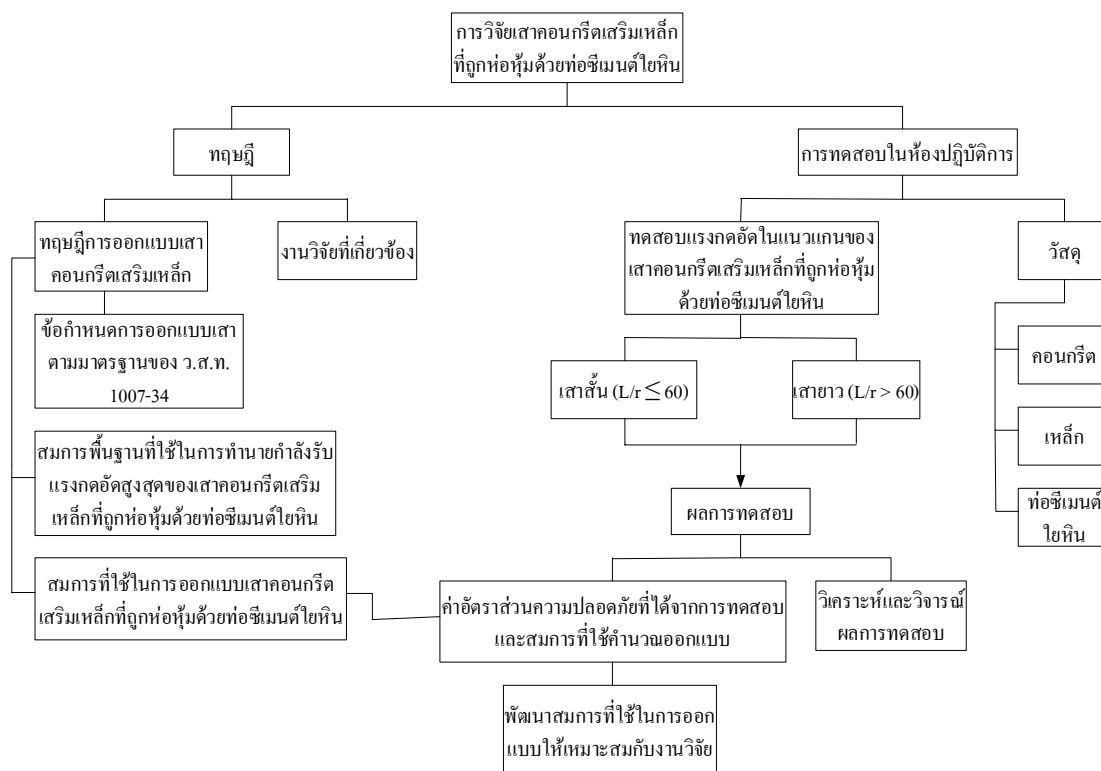
บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

เพื่อให้งานวิจัยสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้แล้ว เราจะแบ่งวิธีดำเนินงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ในส่วนของทฤษฎีและส่วนของการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในส่วนของทฤษฎีนั้นจะทำการศึกษาทฤษฎีการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กพร้อมทั้งศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมไปถึงศึกษาข้อกำหนดของการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐานของ ว.ส.ท. และพัฒนาคัดแปลงสมการที่ใช้ในการทำนายกำลังรับแรงกดอัดและสมการที่ใช้ในการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหิน ส่วนในการทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้นจะเริ่มต้นจากการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่จะนำมาก่อสร้างตัวอย่างเสาซึ่งได้แก่ คอนกรีต เหล็กและท่อซีเมนต์ไยหิน จากนั้นจะทำการทดสอบแรงกดอัดในแนวแกนของตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหิน โดยตัวอย่างเสาจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ เสาสั้น ($\frac{L}{r} \leq 60$) และเสายาว ($\frac{L}{r} > 60$) ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ท่อซีเมนต์ไยหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 และ 0.20 m มีความยาวที่ผลิตและจำหน่าย 1.0, 2.0, 2.5 และ 3.0 m ทำให้ตัวอย่างเสาที่ใช้ในการทดสอบมีอัตราส่วนความชะลูดตั้งแต่ 15-75 ส่วนปริมาณเหล็กเสริมในเสานั้นตามมาตรฐาน ของ ว.ส.ท. กำหนดให้ปริมาณเหล็กเสริมในเสามีได้ไม่เกิน 8% ของพื้นที่หน้าตัดเสาและเพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้จำนวนเหล็กเสริมหนาแน่นเกินไปจนทำให้คอนกรีตไม่สามารถเทลงแบบหล่อได้ งานวิจัยนี้จึงกำหนดให้ปริมาณเหล็กเสริมในเสามีได้ไม่เกิน 4% ของพื้นที่หน้าตัดเสา โดยใช้เหล็กข้ออ้อย (Deformed Bar) ขนาด 10 และ 12 mm จำนวนเหล็กเสริมเท่ากับ 6DB10, 8DB10 และ 6DB12 ซึ่งจะทำให้ปริมาณเหล็กเสริมในเสามีค่า 1.50-3.84% ของพื้นที่หน้าตัดเสา แผนการศึกษาสามารถแสดงเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 3.1

ในบทนี้จะกล่าวถึงสมการคำนวณออกแบบและสมการที่ใช้ในการทำนายกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหินซึ่งสมการดังกล่าวได้มาจากการคัดแปลงสมการคำนวณออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐานของ ว.ส.ท. 1007-34 หลังจากนั้นจะกล่าวถึงการทดสอบวัสดุที่จะนำมาใช้ในการก่อสร้างตัวอย่างทดสอบ สุดท้ายจะกล่าวถึงการทดสอบแรงกดอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหินรวมไปถึงการเตรียมตัวอย่างทดสอบและรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบด้วย



รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงการดำเนินงานวิจัย

3.2 การออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหิน

ในบทที่ 2 เราได้กล่าวถึงทฤษฎีการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ข้อกำหนดของการออกแบบเสาตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (มาตรฐาน ว.ส.ท. 1007-34) มาแล้ว ในที่นี้จะกล่าวถึงการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหิน มาตรฐาน ว.ส.ท. ได้กำหนดให้กำลังรับแรงกอดอัดปลอดภัยของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เหล็กปลอกเดี่ยวที่ถูกแรงกระทำในแนวแกนสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.3)

$$P = 0.2125f'_c A_g + 0.85f_s A_s \quad (2.3)$$

สำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหินมีส่วนช่วยในการรับแรงกดอัดในแนวแกนอยู่บ้างและเนื่องจากวัสดุซีเมนต์ไยหินมีกำลังรับแรงกดอัดประลัยและความแกร่งต่ำกว่าคอนกรีตค่อนข้างมาก ดังนั้นท่อซีเมนต์ไยหินที่ห่อหุ้มเสาคอนกรีตอยู่รอบนอกจึงไม่ทำให้คอนกรีตที่อยู่ภายในเกิด Confinement กล่าวคือ ท่อซีเมนต์ไยหินไม่สามารถต้านทานการขยายตัวของคอนกรีตที่อยู่ภายในเมื่อมีแรงกดอัดมากกระทำได้ ซึ่งแตกต่างจากเสาคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วย

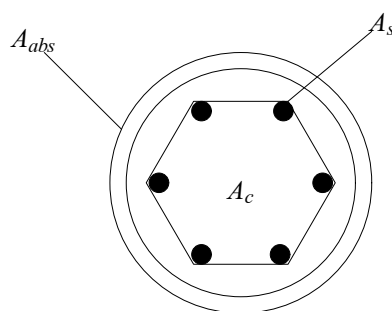
ท่อเหล็ก เมื่อมีแรงกดอัดมากกระทำต่อเสาดังกล่าว เสาจะเกิดการหดตัวในแนวแกนและคอนกรีตที่อยู่ภายในท่อจะเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้าง ซึ่งการขยายตัวของคอนกรีตนี้จะถูกจำกัดไว้โดยท่อเหล็กที่ห่อหุ้มคอนกรีตอยู่รอบนอก ทำให้คอนกรีตที่อยู่ภายในเสมือนถูกกระทำโดยแรงกดอัดสามทิศทาง (Triaxials Stress) หรือเกิด Confinement นั่นเอง ดังนั้นเสาคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อเหล็กจึงมีกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดมากกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป

อย่างไรก็ตามเมื่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหินรับแรงกดอัดในแนวแกนแล้ว ท่อซีเมนต์ไยหิน คอนกรีตและเหล็กเสริมจะร่วมกันรับแรง ดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณออกแบบเสาของ ว.ส.ท. จึงควรถูกดัดแปลงโดยการเพิ่มเทอมที่เกี่ยวข้องกับท่อซีเมนต์ไยหิน นอกจากนี้แล้วคุณสมบัติทางกลของวัสดุซีเมนต์ไยหินมีการแปรผันน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีต เนื่องจากท่อซีเมนต์ไยหินมักถูกผลิตจากโรงงานที่มีขั้นตอนการผลิตที่แน่นอนและค่าความเครียดที่กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของวัสดุซีเมนต์ไยหินมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตคือ 0.003 ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยและความสะดวกในการใช้สมการ เทอมที่เกี่ยวข้องกับท่อซีเมนต์ไยหินจึงควรถูกคูณด้วยสัมประสิทธิ์ที่มีค่าเท่ากับเทอมที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีต ซึ่งจะทำให้สมการดัดแปลงสำหรับออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหินอยู่ในรูป

$$P = 0.2125(f'_c A_c + f'_{abs} A_{abs}) + 0.85 f_s A_s \quad (3.1)$$

เมื่อ f'_{abs} คือ กำลังรับแรงกดอัดประลัยของท่อซีเมนต์ไยหิน

A_{abs} คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อซีเมนต์ไยหิน



รูปที่ 3.2 รูปตัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหิน

รูปที่ 3.2 แสดงรูปตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหินพร้อมทั้งตัวแปรต่างๆในสมการที่ (3.1) ซึ่งใช้หาค่าหน้าบรรทุกทุกปลอดภัย (Allowable Load) ของเสาคอนกรีต

เสริมเหล็กที่ถูกรื้อด้วยท่อซีเมนต์โยหินกรณีเสาสั้น ส่วนกรณีของเสาขาวน้ำหนักบรรทุกออกแบบต้องคูณด้วยตัวคูณลดกำลัง (Strength Reduction Factor) R ตามสมการที่ (3.2) ดังนี้

$$P = [0.2125(f'_c A_c + f'_{abs} A_{abs}) + 0.85 f_s A_s] \times R \quad (3.2)$$

โดยที่ R ได้จากสมการที่ (2.5)

$$R = 1.07 - 0.008 \left(\frac{L}{r} \right) \quad (2.5)$$

สมการที่ (3.1) และ (3.2) อาจรวมเป็นสมการเดียวเพื่อหาน้ำหนักบรรทุกของเสาที่อัตราส่วนความชะลูดใดๆ ประเด็นนี้จะกล่าวต่อไปในบทที่ 4 เมื่อมีผลการทดสอบ

3.3 การทดสอบกำลังรับแรงกดอัดประลัยของคอนกรีต

ใช้วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39-93 (Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens)

อุปกรณ์ที่ใช้

- 1) เครื่องทดสอบแรงกดอัดของคอนกรีตดังที่แสดงในรูปที่ 3.3
- 2) เครื่องหล่อฝา (Capping) ทับขึ้นตัวอย่างรูปทรงกระบอก
- 3) Dial Gauge
- 4) เครื่องชั่ง

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ก่อนที่จะเริ่มหล่อตัวอย่างทดสอบ ต้องทำความสะอาดแบบหล่อทรงกระบอกให้เรียบร้อย แบบด้านในที่สัมผัสกับคอนกรีตจะต้องทาน้ำมันให้ทั่วเพื่อไม่ให้คอนกรีตเกาะหรือน้ำปูนรั่วไหลออกมาตามรอยต่อได้

การหล่อตัวอย่างทดสอบ จะเทคอนกรีตลงในแบบหล่อคราวละหนึ่งในสามของความสูงแบบหล่อแล้วกระทุ้งด้วยเหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 mm ยาว 0.60 m ปลายกลมมน 25 ครั้ง

เมื่อหล่อตัวอย่างทดสอบเรียบร้อยแล้ว ให้ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงถอดแบบออก เขียนหมายเลขและวันที่หล่อคอนกรีตแล้วนำไปบ่มขึ้น โดยห่อด้วยถุงพลาสติกชนิดหนาเป็นเวลา

28 วัน แล้วจึงนำมาทดสอบ ก่อนการทดสอบควรหล่อฝา (Capping) ทับขึ้นตัวอย่างรูปทรงกระบอกด้วยกัมมะถันเพื่อให้ผิวราบเรียบ



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบแรงกดอัดของคอนกรีต

วิธีการทดสอบ

- 1) วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาว พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักของตัวอย่างทดสอบ
- 2) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบแรงกดอัดของคอนกรีตในทิศทางที่กำหนดไว้ดังรูปที่ 3.4
- 3) ติดตั้งและปรับค่า Dial Gauge ไปที่ศูนย์
- 4) เพิ่มแรงกดอัดอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราน้อยๆ บันทึกค่าแรงและการหดตัวเป็นช่วงๆ จนกว่าตัวอย่างทดสอบจะวิบัติ



รูปที่ 3.4 การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีตเข้ากับเครื่องทดสอบ

3.4 การทดสอบแรงดึงของเหล็ก

ในการศึกษานี้ใช้เหล็กเสริมที่มีความยาวไม่มากนักซึ่งจะมีพฤติกรรมการรับแรงกดอัดและพฤติกรรมการรับแรงดึงคล้ายคลึงกันและการทดสอบแรงดึงของเหล็กเสริมทำได้ง่ายกว่าการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดจึงจะทดสอบแรงดึงเพื่อหาค่ากำลังรับแรงดึงที่จุดคราก กำลังรับแรงดึงสูงสุด ค่าการยืดตัวและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมภายใต้แรงดึงโดยใช้วิธีการตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 24-2536)

อุปกรณ์ที่ใช้

- 1) เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) ดังที่แสดงในรูปที่ 3.5
- 2) Extensometer ดังที่แสดงในรูปที่ 3.6
- 3) Verneer Caliper
- 4) ตัวอย่างทดสอบมาตรฐานได้แก่ เหล็กข้ออ้อย DB10 และ DB12 อย่างละ 3 ตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัดเหล็กเส้นที่ต้องการจะทดสอบให้ได้ความยาว 0.6 m จำนวน 3 ตัวอย่าง กำหนดระยะพิกัด (Gauge Length) เพื่อใช้ในการวัดหาการยืดตัวของตัวอย่างทดสอบ เนื่องจากข้อจำกัดของ Extensometer ในที่นี้ใช้ค่าระยะพิกัดเท่ากับ 25 mm



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM)



รูปที่ 3.6 Extensometer

วิธีการทดสอบ

- 1) วัดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของตัวอย่างทดสอบเพื่อหาค่าเริ่มต้นของพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ
- 2) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบให้แน่นหนาและวัดความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างทดสอบระหว่างหัวจับตัวอย่างทดสอบ พร้อมทั้งติดตั้ง Extensometer
- 3) เพิ่มแรงดึงให้กับตัวอย่างทดสอบช้าๆ จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบมีระยะยืดตัวเท่ากับ 3 mm ให้นำ Extensometer ออก จากนั้นเพิ่มแรงดึงต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ

- 4) นำตัวอย่างทดสอบออกจากเครื่องทดสอบ นำชิ้นส่วนของตัวอย่างทดสอบที่วิบัติมาต่อกันให้สนิท วัดค่าเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของตัวอย่างทดสอบที่จุดวิบัติและวัดความยาวของตัวอย่างทดสอบเมื่อวิบัติ โดยวัดระยะระหว่างจุดที่ใช้วัดความยาวเริ่มต้น

3.5 การทดสอบกำลังรับแรงกดอัดประลัยของวัสดุซีเมนต์ไยหิน

อุปกรณ์ที่ใช้

- 1) เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (SHIMADZU รุ่น UH-Series) ดังรูปที่ 3.7
- 2) Dial Gauge

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตัดท่อซีเมนต์ไยหินให้ได้ขนาดกว้าง 30 mm ยาว 60 mm หนา 12 mm ตกแต่งผิวให้เรียบในที่นี้เลือกใช้ความยาว 60 mm เพราะเป็นความยาวที่ตัวอย่างทดสอบจะไม่วิบัติโดยการโก่งเคาะ และมีความยาวเพียงพอที่จะติดตั้ง Dial Gauge เพื่อวัดค่าการหดตัว

วิธีการทดสอบ

- 1) วัดความกว้าง ยาว และความสูงของตัวอย่างทดสอบ
- 2) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับเครื่องทดสอบ
- 3) ติดตั้งและปรับค่า Dial Gauge ไปที่ศูนย์
- 4) เพิ่มน้ำหนักอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราน้อยๆ บันทึกค่าแรงและการหดตัวเป็นช่วงๆ จนกว่าตัวอย่างทดสอบจะวิบัติ



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (SHIMADZU รุ่น UH-Series)
และการทดสอบตัวอย่างวัสดุซีเมนต์ไยหิน

3.6 การทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหิน

จุดประสงค์ของการทดสอบ

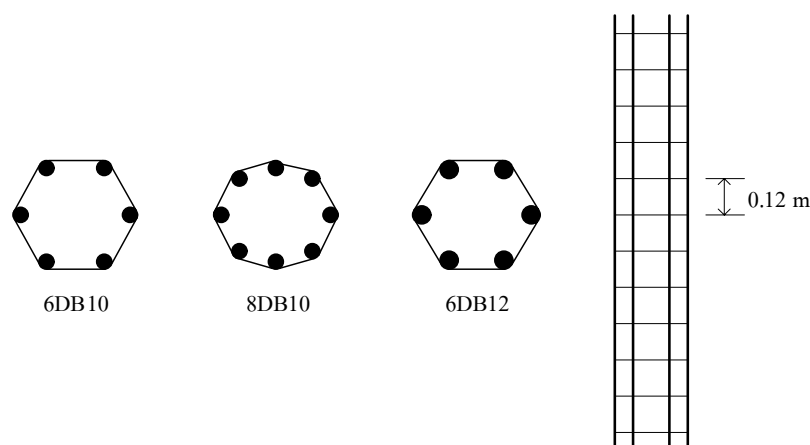
- 1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกน กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดตลอดจนลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหิน
- 2) เพื่อศึกษาผลของการแปรผันปริมาณเหล็กเสริมและอัตราส่วนความชะลุดต่อการรับแรงกดอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหิน

อุปกรณ์ที่ใช้

- 1) โครงเฟรมที่ใช้ในการทดสอบ (Loading Frame)
- 2) Hydraulic Ram Capacity 500 kN
- 3) ท่อซีเมนต์ไยหินขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 m และ 0.20 mm ที่มีความยาว 0.75, 1.75, 2.30 และ 2.80 m จำนวนทั้งสิ้น 48 ตัวอย่าง
- 4) ชุดฐานรองรับแบบหมุน (Pinned Support) จำนวน 2 ชุด
- 5) เหล็กเสริมขนาด RB6 , DB10 และ DB12
- 6) Dial Gauge

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

- 1) นำท่อซีเมนต์ไยหินที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 และ 0.20 m มาตัดให้ได้ความยาว 0.75, 1.75, 2.30 และ 2.80 m ความยาวละ 6 ท่อน ซึ่งจะได้ท่อซีเมนต์ไยหินที่ใช้เป็นแบบหล่อเสาจำนวน 48 ท่อน
- 2) ทำการผูกเหล็กเสริมให้ได้จำนวนเหล็กเท่ากับ 6DB10, 8DB10 และ 6DB12 ซึ่งคิดเป็น 2.64, 3.53 และ 3.84% ของพื้นที่หน้าตัดเสาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 m และคิดเป็น 1.50, 2.00 และ 2.16% ของพื้นที่หน้าตัดเสาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.20 m ตามลำดับ โดยมีการเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวขนาด RB6 ทุกระยะ 0.12 m ตลอดความยาวของเสา ดังรูปที่ 3.8

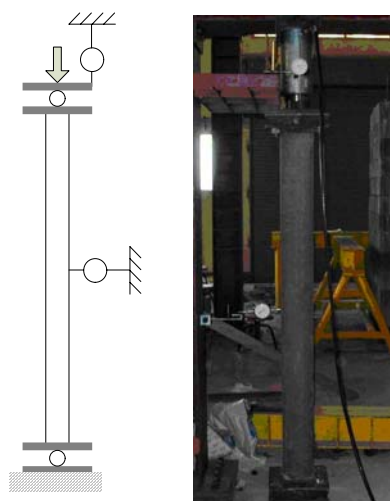


รูปที่ 3.8 เหล็กเสริมหลักในเสาและระยะห่างของเหล็กปลอก

- 3) ติดตั้งแบบหล่อพร้อมทั้งประกอบค้ำยันสำหรับเทคอนกรีตลงในแบบหล่อเสา
- 4) ผสมและเทคอนกรีตที่ได้ออกแบบส่วนผสมให้มีกำลังรับแรงกดอัดประลัยโดยเฉลี่ยเท่ากับ 20 MPa
- 5) บ่มตัวอย่างทดสอบจนเป็นเวลา 28 วัน

วิธีการทดสอบ

- 1) ปรับฐานรองรับตัวอย่างทดสอบให้เรียบเสมอกันทั้งสองด้าน
- 2) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับ Loading Frame โดยให้การรองรับที่ปลายทั้งสองข้างเป็นแบบหมุนดังรูปที่ 3.9
- 3) ติดตั้ง Dial Gauge ที่ตำแหน่งกึ่งกลางความสูงและที่ปลายด้านบนของตัวอย่างทดสอบ
- 4) เพิ่มแรงกดอัดโดยผ่านทาง Hydraulic Ram อย่างช้าๆ พร้อมทั้งบันทึกค่าแรงกดอัด การหดตัวในแนวแกนและการโก่งตัวทางด้านข้างเป็นช่วงๆจนกว่าตัวอย่างทดสอบวิบัติ



รูปที่ 3.9 การติดตั้งตัวอย่างเสาในการทดสอบแรงกดอัดในแนวแกน

การทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหินใช้ตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 48 ตัวอย่าง ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ โดยแปรผันอัตราส่วนความชะลูดของเสา (Slenderness Ratio) และปริมาณเหล็กเสริม (Steel Reinforcement)

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างเสาที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่าง	จำนวน (ต้น)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (m)	ความสูง (m)	$\frac{L}{r}$	จำนวน เหล็ก	ปริมาณเหล็ก (%)
15C-75-2.64	2	0.15	0.75	20	6DB10	2.64
15C-75-3.53	2	0.15	0.75	20	8DB10	3.53
15C-75-3.84	2	0.15	0.75	20	6DB12	3.84
20C-75-1.50	2	0.20	0.75	15	6DB10	1.50
20C-75-2.00	2	0.20	0.75	15	8DB10	2.00
20C-75-2.16	2	0.20	0.75	15	6DB12	2.16
15C-1.75-2.64	2	0.15	1.75	46.67	6DB10	2.64
15C-1.75-3.53	2	0.15	1.75	46.67	8DB10	3.53
15C-1.75-3.84	2	0.15	1.75	46.67	6DB12	3.84
20C-1.75-1.50	2	0.20	1.75	35	6DB10	1.50
20C-1.75-2.00**	2	0.20	1.75	35	8DB10	2.00
20C-1.75-2.16*	2	0.20	1.75	35	6DB12	2.16
15C-2.30-2.64	2	0.15	2.30	61.3	6DB10	2.64
15C-2.30-3.53	2	0.15	2.30	61.3	8DB10	3.53
15C-2.30-3.84	2	0.15	2.30	61.3	6DB12	3.84
20C-2.30-1.50	2	0.20	2.30	46	6DB10	1.50
20C-2.30-2.00	2	0.20	2.30	46	8DB10	2.00
20C-2.30-2.16	2	0.20	2.30	46	6DB12	2.16
15C-2.80-2.64	2	0.15	2.80	75	6DB10	2.64
15C-2.80-3.53	2	0.15	2.80	75	8DB10	3.53
15C-2.80-3.84	2	0.15	2.80	75	6DB12	3.84
20C-2.80-1.50	2	0.20	2.80	56	6DB10	1.50
20C-2.80-2.00	2	0.20	2.80	56	8DB10	2.00
20C-2.80-2.16	2	0.20	2.80	56	6DB12	2.16

หมายเหตุ : * ตัวอย่างที่ไม่ได้ทดสอบเนื่องจาก Loading Frame ชำรุด

** ตัวอย่างที่ทดสอบได้ตัวอย่างเดียว

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

4.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบวัสดุที่นำมาใช้ก่อสร้างตัวอย่างทดสอบ จากนั้นจะกล่าวถึงผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหิโนภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน โดยนำเสนอในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนกับการหดตัวในแนวแกนและแรงกดอัดในแนวแกนกับการโก่งตัวทางด้านข้าง ณ กึ่งกลางความสูงของเสา จากนั้นจะกล่าวถึงผลของอัตราส่วนความชะลูดและการแปรผันปริมาณเหล็กเสริมหลักต่อกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของเสา โดยนำเสนอในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกำลังของเสาต่อกำลังที่แท้จริงกับอัตราส่วนความชะลูดและอัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดต่อผลคูณของตัวคูณลดกำลังและพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดกับปริมาณเหล็กเสริม จากนั้นจะเสนอสมการที่ใช้ในการออกแบบเสาโดยดัดแปลงจากสมการออกแบบเสาของ ว.ส.ท. และคำนวณหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อไป

4.2 ผลการทดสอบวัสดุ

เมื่อทดสอบวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ตามหัวข้อ 3.3 ถึง 3.5 สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 4.1 ส่วนการวิเคราะห์และวิจารณ์ผลของการทดสอบวัสดุรวมถึงพฤติกรรมการรับแรงกดอัดของคอนกรีตและวัสดุซีเมนต์ไยหิโน พฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กตลอดจนลักษณะการวิบัติ จะกล่าวอยู่ในภาคผนวก ก.

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการทดสอบวัสดุพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุ	หน่วยแรงครากเฉลี่ย (MPa)	หน่วยแรงสูงสุดเฉลี่ย (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ย (GPa)
คอนกรีต	-	21.5	19.7
เหล็ก	412.2	541.1	203.9
ซีเมนต์ไยหิโน	-	13.2	6.1

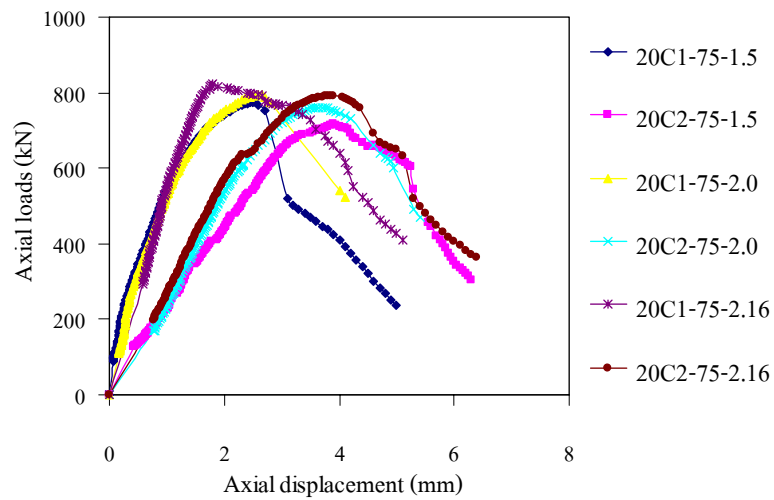
4.3 ผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยห็นภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

การทดสอบกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาใช้ตัวอย่างทดสอบจำนวนทั้งสิ้น 48 ตัวอย่าง สามารถจัดกลุ่มของตัวอย่างทดสอบได้เป็น 2 กลุ่มตามมาตรฐาน ว.ส.ท 1007-34 คือ กลุ่มที่ 1 เป็นเสาสั้น ($\frac{L}{D} \leq 15$ หรืออัตราส่วนความชะลูด $\frac{L}{r} \leq 60$) กลุ่มที่ 2 เป็นเสายาว ($\frac{L}{D} > 15$ หรืออัตราส่วนความชะลูด $\frac{L}{r} > 60$) ผลการทดสอบจะแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดกับการหดตัวในแนวแกนและในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดกับการโก่งตัวทางด้านข้างที่กึ่งกลางความสูงของเสา โดยมีผลการทดสอบตัวอย่างเสาในแต่ละกลุ่มดังนี้

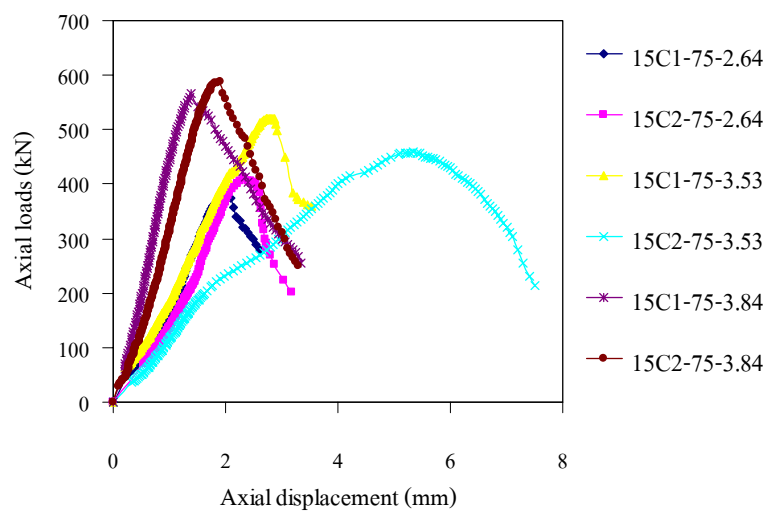
4.3.1 ตัวอย่างกลุ่มที่ 1 เสาสั้น

สำหรับตัวอย่างกลุ่มที่ 1 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนและค่าการหดตัวในแนวแกน กราฟช่วงแรกเป็นกราฟเชิงเส้นตรงถึงประมาณ 80% ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด จากนั้นกราฟจะมีลักษณะเป็นแบบไร้เชิงเส้นจนถึงแรงกดอัดสูงสุดแล้วแรงกดอัดจะลดลงอย่างรวดเร็วก่อนที่จะตัวอย่างจะเกิดการวิบัติ ดังรูปที่ 4.1

จากกราฟสามารถอธิบายได้ว่า ช่วงแรกกราฟค่อนข้างเป็นแบบเชิงเส้นตรง ซึ่งเกิดจากคอนกรีต เหล็กและท่อซีเมนต์ไยห็นร่วมกันรับแรงกดอัดจนกระทั่งเหล็กเสริมมีความเครียดถึงจุดคราก ซึ่งมีค่าประมาณ 80% ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด จากนั้นกราฟจะเป็นแบบไร้เชิงเส้น ซึ่งเกิดจากค่าแรงกดอัดที่เพิ่มขึ้นหลังจากเหล็กมีความเครียดถึงจุดครากจะถูกรองรับโดย คอนกรีตและท่อซีเมนต์ไยห็น เมื่อแรงกดอัดมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งคอนกรีตและท่อซีเมนต์ไยห็นมีความเครียดเท่ากับ Ultimate Strain แล้วท่อซีเมนต์ไยห็นจะเกิดการแตกร้าวอย่างรวดเร็วที่บริเวณปลายทั้งสองข้างของตัวอย่างทดสอบ เมื่อกำลังรับแรงกดอัดของเสามีค่าสูงสุดท่อซีเมนต์ไยห็นจะเกิดการแตกร้าวอย่างเห็นได้ชัดจนยิ่งขึ้น จากนั้นกำลังรับแรงกดอัดของเสาจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยการหดตัวในแนวแกนและรอยแตกร้าวที่เกิดในท่อซีเมนต์ไยห็นจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดการวิบัติอย่างทันทีทันใดในที่สุด

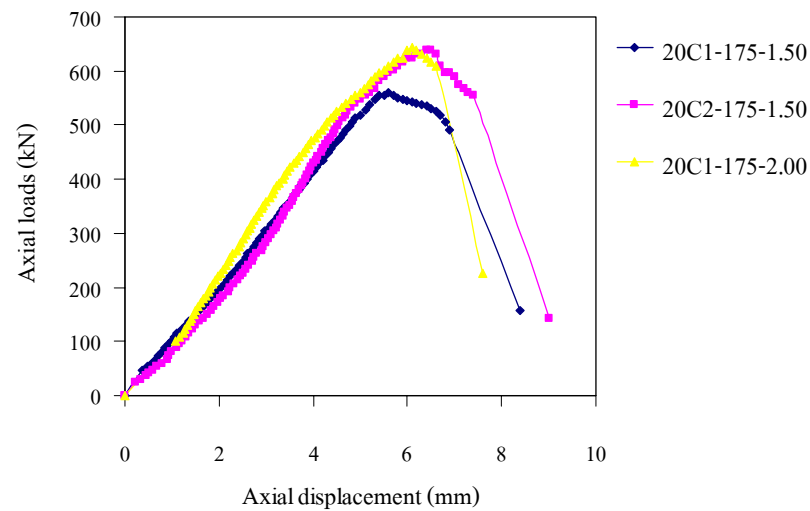


(a) ตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 15 ที่ปริมาณเหล็กเสริมต่างๆ

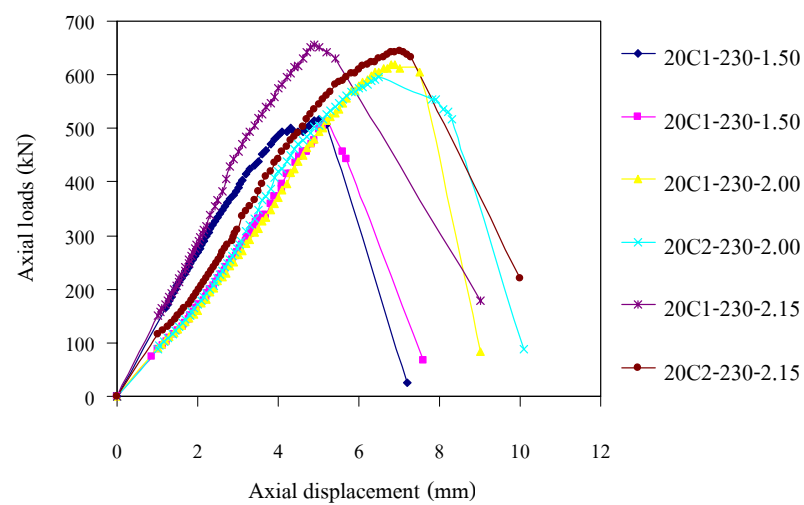


(b) ตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 20 ที่ปริมาณเหล็กเสริมต่างๆ

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของตัวอย่างกลุ่มที่ 1

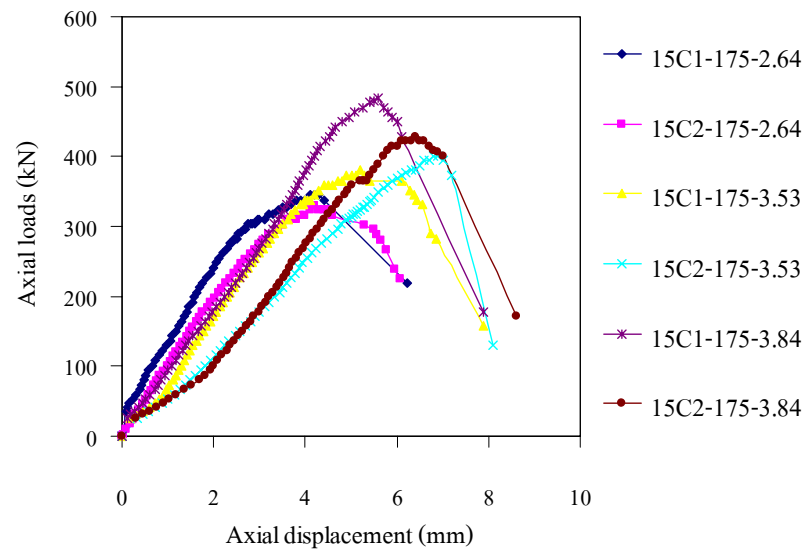


(c) ตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 35 ที่ปริมาณเหล็กเสริมต่างๆ

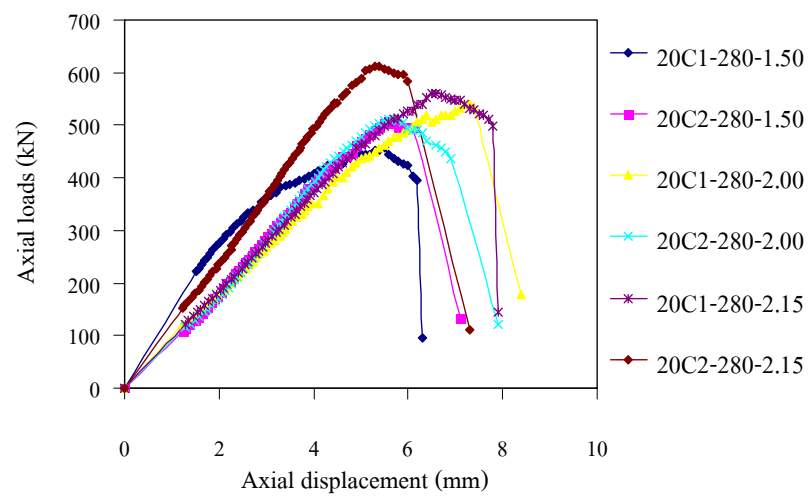


(d) ตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 46 ที่ปริมาณเหล็กเสริมต่างๆ

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของตัวอย่างกลุ่มที่ 1 (ต่อ)



(e) ตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 46.67 ที่ปริมาณเหล็กเสริมต่างๆ



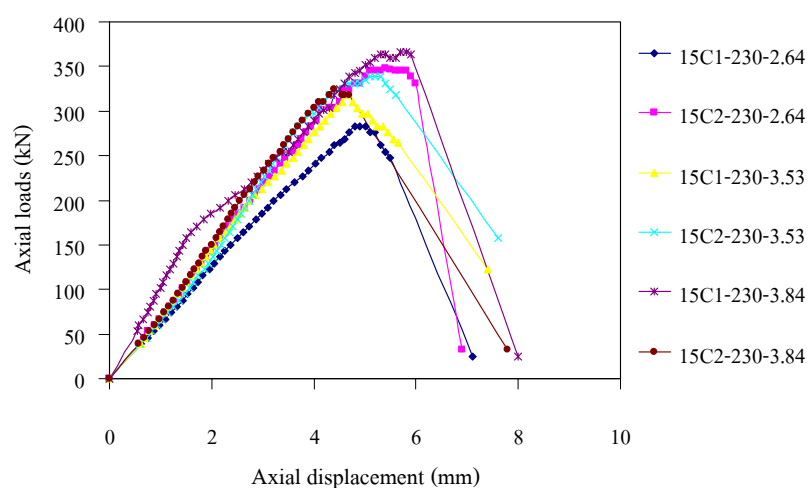
(f) ตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 56 ที่ปริมาณเหล็กเสริมต่างๆ

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของตัวอย่างกลุ่มที่ 1 (ต่อ)

4.3.2 ตัวอย่างกลุ่มที่ 2 เสายาว

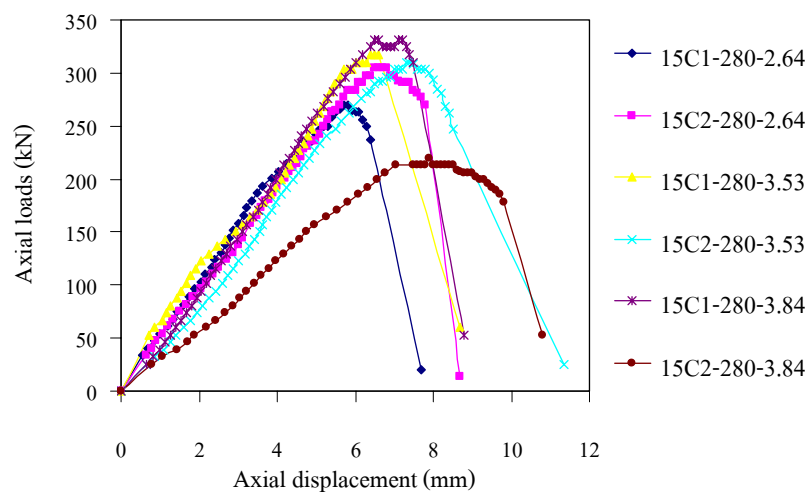
สำหรับตัวอย่างกลุ่มที่ 2 พบว่า กราฟช่วงแรกเป็นเส้นตรงจนถึงประมาณ 90% ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด จากนั้นกราฟจะเป็นแบบไร้เชิงเส้นและเสาจะเริ่มเกิดรอยแตกร้าวบริเวณปลายทั้งสองข้าง จนกระทั่งเสามีกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดจะเห็นรอยแตกร้าวได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จากนั้นแรงกดอัดจะลดลงอย่างรวดเร็วและวิบัติอย่างทันทีทันใด ดังที่แสดงในรูปที่ 4.2

จากรูป 4.3(b) จะเห็นได้ว่าการวิบัติของเสาในกรณีนี้เกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอตลอดหน้าตัดของเสา โดยการวิบัติจะเกิดขึ้นทางซีกซ้ายมือของหน้าตัดอย่างรุนแรงมากกว่าทางซีกขวาของหน้าตัดเสาทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการติดตั้งเสาที่มีความสูงมากๆ ให้อยู่ในแนวตั้งทำให้ยากกว่าเสาสั้นๆ ทำให้เสาถูกกระทำโดยแรงกดอัดเอียงศูนย์เกิดหน่วยแรงไม่สม่ำเสมอและวิบัติในส่วนที่หน่วยแรงสูงกว่าก่อน



(a) ตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วนความชะลูดเท่ากับ 61.3 ที่ปริมาณเหล็กเสริมต่างๆ

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของตัวอย่างกลุ่มที่ 2

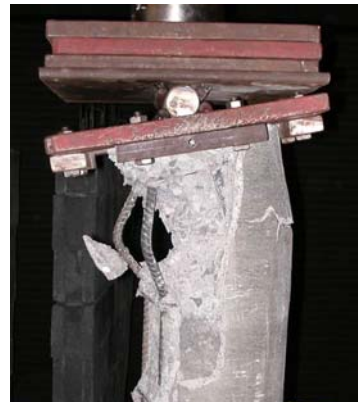


(b) ตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วนความชะลุดเท่ากับ 75 ที่ปริมาณเหล็กเสริมต่างๆ

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดและการหดตัวในแนวแกนของตัวอย่างกลุ่มที่ 2 (ต่อ)



(a) เสาที่มีความสูง 0.75 เมตร



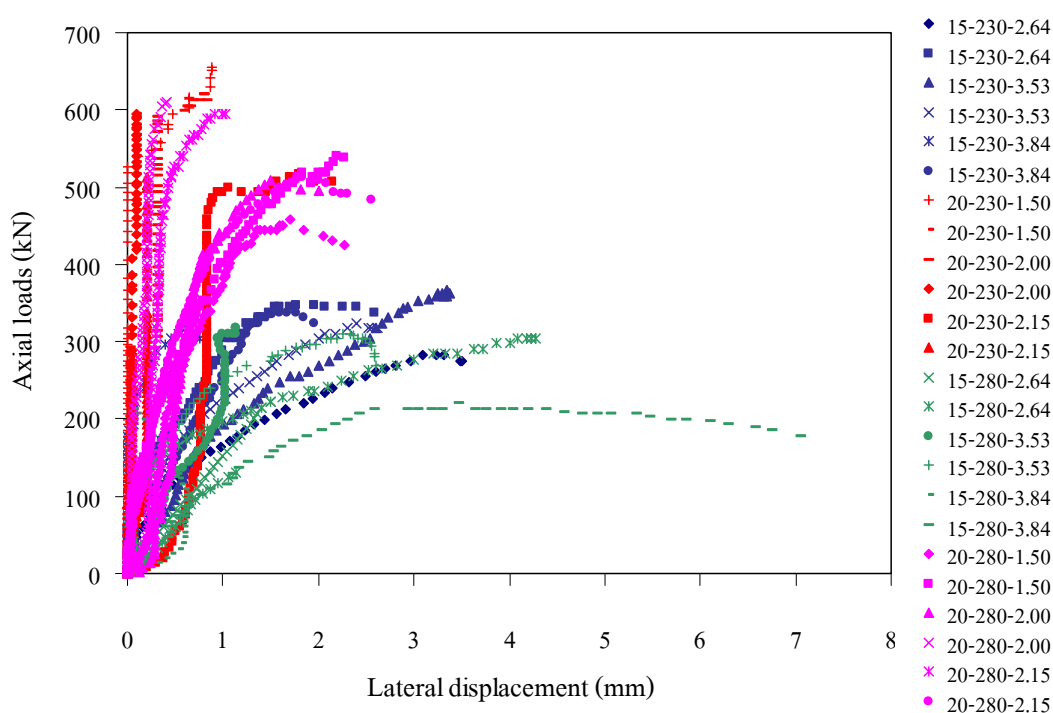
(b) เสาที่มีความสูง 2.80 เมตร

รูปที่ 4.3 ตัวอย่างการวิบัติของเสา

จากผลการทดสอบตัวอย่างเสาทั้ง 2 กลุ่มสรุปได้ว่ากราฟแรงกดอัดในแนวแกนของเสา คอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหินสัมพันธ์กับการหดตัวในแนวแกนจะเป็นแบบ เชิงเส้นตรงจนกระทั่งกำลังรับแรงกดอัดของเสามีค่าประมาณ 80-90% ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด จากนั้นจะเป็นแบบไร้เชิงเส้นจนกระทั่งเสาเกิดการวิบัติในที่สุด เสาทุกต้นวิบัติแบบเสาสั้นคือ เกิด การร้าวในเหล็กเสริมและเกิดการอัดแตกในคอนกรีตและท่อซีเมนต์ไยหินบริเวณปลายของตัว อย่างทดสอบ

4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนกับการโก่งตัวทางด้านข้าง ณ กึ่งกลางความสูงของ ตัวอย่างทดสอบ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนกับการโก่งตัวทางด้านข้าง (Lateral Displacement) ตรงกึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทดสอบแสดงในรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าเมื่อแรงในแนวแกนสูงถึงค่าหนึ่ง เสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดสูงจะมีค่าการโก่งตัวทางด้านข้างมากกว่าเสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดที่น้อย โดยค่าการโก่งตัวทางด้านข้างสูงสุดที่เกิดขึ้นในตัวอย่างเสาเมื่อเสาเกิดการวิบัติมีค่าค่อนข้างน้อยคือ ไม่เกิน 7 mm ซึ่งทำให้ค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้างมีค่าน้อยมากและเกิดการวิบัติแบบเสาสั้นตามที่กล่าวไปแล้วในทุกอัตราส่วนความชะลูดที่ศึกษา

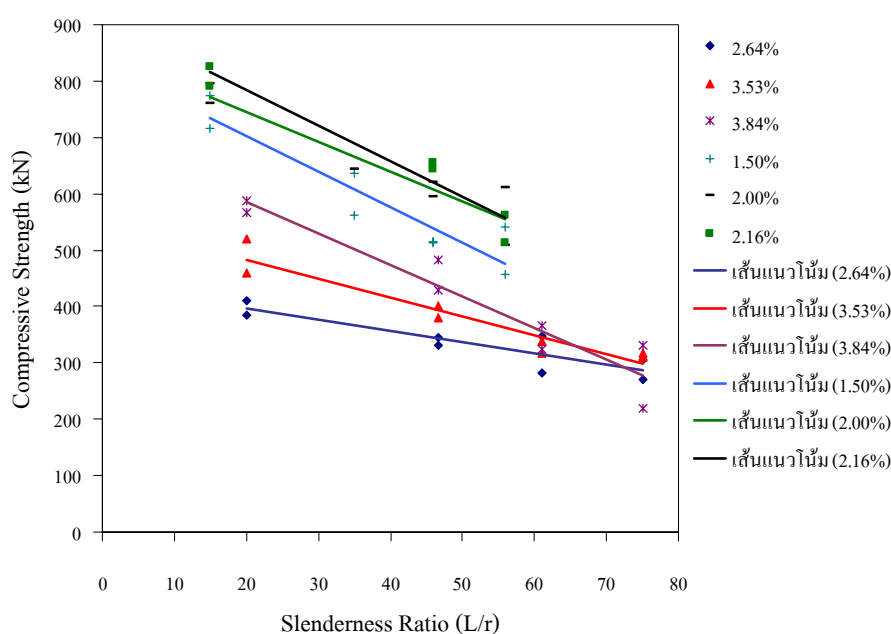


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดกับการโก่งตัวทางด้านข้างของเสา

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกนกับการโก่งตัวทางด้านข้าง ณ กึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทดสอบสามารถสรุปได้ว่าตัวอย่างทดสอบทุกตัวอย่างจะมีการโก่งตัวทางด้านข้างน้อยมาก และมีการวิบัติแบบเสาสั้น

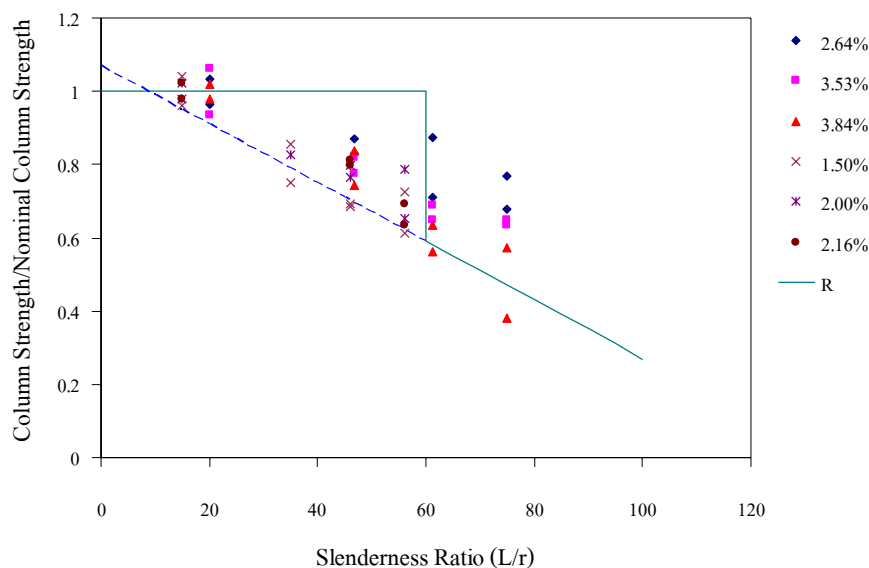
4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดกับอัตราส่วนความชะลูด

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดกับอัตราส่วนความชะลูด (Slenderness Ratio) แสดงในรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดต่ำจะมีกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดสูงกว่าเสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดสูง เนื่องจากเสายาวหน้าตัดเสาจะเอียงได้ง่าย ทำให้การกระจายของหน่วยแรงบนหน้าตัดเสาไม่สม่ำเสมอและเสาเกิดการวิบัติในส่วนที่มีหน่วยแรงสูงๆ ก่อน



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดกับอัตราส่วนความชะลูด

จากสมการดัดแปลงของ ว.ส.ท. พบว่าอัตราส่วนความชะลูดปรากฏใน เทอมตัวคูณลดกำลัง (Strength Reduction Factor) ซึ่งอยู่ในรูป $(1.07 - 0.008 \frac{L}{r})$ ดังนั้นเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังที่ทดสอบได้ของเสา (Observe Column Strength) ต่อกำลังของเสาที่มีความสูง 0.75 m ซึ่งจะเรียกว่ากำลังระบุ (Nominal Strength) กับอัตราส่วนความชะลูด ในที่นี้จะใช้กำลังจะได้ผลดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังที่ทดสอบได้ต่อกำลังระบุ
กับอัตราส่วนความชะลูด

รูปที่ 4.6 สามารถอธิบายในเทอมของตัวคูณลดกำลังกล่าวคือ สมการออกแบบเสาของ ว.ส.ท. กำหนดให้ใช้ 1.0 เป็นตัวคูณลดกำลังสำหรับเสาสั้น ($\frac{L}{r} \leq 60$) และใช้ $(1.07 - 0.008 \frac{L}{r})$ เป็นตัวคูณลดกำลังสำหรับเสายาว ($\frac{L}{r} > 60$) ซึ่งแสดงเป็นเส้นเต็ม แต่ข้อมูลจากการทดสอบเสนอแนะให้ใช้ $(1.07 - 0.008 \frac{L}{r})$ เป็นตัวคูณลดกำลังสำหรับเสาทุกขนาดซึ่งแสดงเป็นเส้นประ

จากการวิเคราะห์ข้างต้นสามารถพัฒนาสมการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ใยหินได้ดังสมการที่ (4.1)

$$P = [0.2125(f'_c A_c + f'_{abs} A_{abs}) + 0.85 f_s A_s] \left(1.07 - 0.008 \frac{L}{r} \right) \quad (4.1)$$

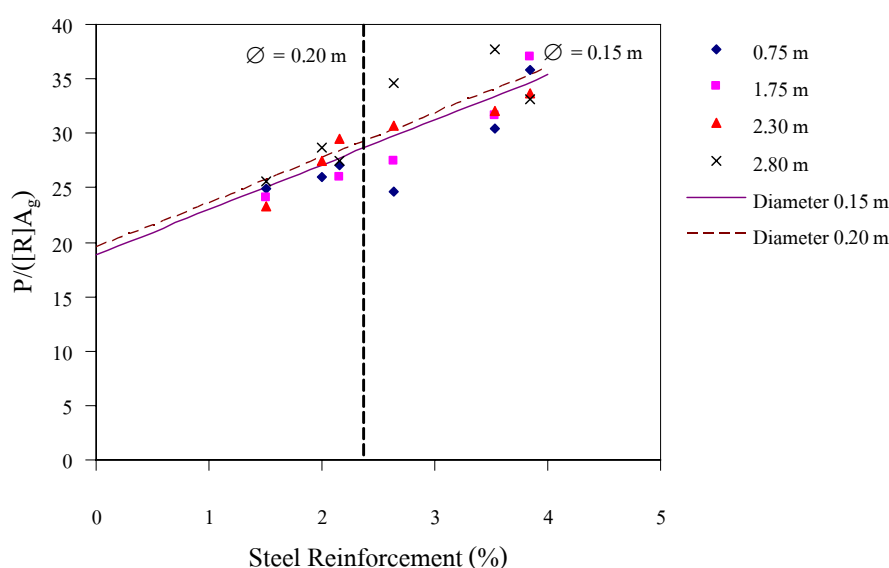
4.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดกับปริมาณเหล็กเสริม

จากหัวข้อที่ 4.3.4 เราทราบแล้วว่าอัตราส่วนความชะลูดมีผลเป็นตัวคูณลดกำลัง ดังนั้นในการหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงกดอัดกับปริมาณเหล็กเสริมสามารถแยกผลของ

อัตราส่วนความชะลูดโดยหารด้วยตัวคูณลดกำลังและพื้นที่หน้าตัดเสา ($\frac{P}{A_g[R]}$) แล้วเขียนกราฟ

$\frac{P}{A_g[R]}$ สัมพันธ์กับปริมาณเหล็กเสริม (Steel Reinforcement) ดังรูปที่ 4.7

จากกราฟจะเห็นได้ว่า ($\frac{P}{A_g[R]}$) จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเหล็กเสริมเป็นแบบเชิงเส้นตรงและกราฟสำหรับเสา 0.15 และ 0.20 m สอดคล้องกับกำลังที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังของเสาต่อผลคูณตัวคูณลดกำลังและพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดกับปริมาณเหล็กเสริม

จากสมการที่ (4.1) ถ้าใช้กำลังประลัยของวัสดุในทอมข้างขวาจะได้กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดตามสมการที่ (4.2) ซึ่งสามารถเขียนเป็นเส้นกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ (4.7)

$$P = (f'_c A_c + f'_{abs} A_{abs} + f_s A_s) \left(1.07 - 0.008 \frac{L}{r} \right) \quad (4.2)$$

ตารางที่ 4.2 แสดงกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของเสาที่ได้จากการทดสอบกับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยหรือสมการที่ (4.1) และค่าอัตราส่วนความปลอดภัย จะเห็นว่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าอยู่ระหว่าง 3.20 ถึง 4.49 ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปใช้ในการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหิน

ตารางที่ 4.2 กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดจากการทดสอบกับน้ำหนักบรรทุกทุกปลอดภัยและค่าอัตราส่วนความปลอดภัย

ตัวอย่าง	เส้นผ่าศูนย์กลาง (m)	L/r	กำลังสูงสุด (kN)	น้ำหนักบรรทุกทุกปลอดภัย (kN)	อัตราส่วนความปลอดภัย
15C-75-2.64	0.15	20	397.5	124.04	3.20
15C-75-3.53	0.15	20	489.8	144.10	3.40
15C-75-3.84	0.15	20	577.0	151.09	3.82
20C-75-1.50	0.20	15	745.8	186.37	4.00
20C-75-2.00	0.20	15	778.0	207.30	3.75
20C-75-2.16	0.20	15	808.0	213.99	3.78
15C-1.75-2.64	0.15	46.67	337.6	101.60	3.32
15C-1.75-3.53	0.15	46.67	390.4	110.32	3.54
15C-1.75-3.84	0.15	46.67	455.8	115.67	3.94
20C-1.75-1.50	0.20	35	599.1	154.98	3.87
20C-1.75-2.00	0.20	35	-	172.38	-
20C-1.75-2.16	0.20	35	644.4	177.95	3.62
15C-2.30-2.64	0.15	61.3	315.2	79.00	3.99
15C-2.30-3.53	0.15	61.3	327.8	91.78	3.57
15C-2.30-3.84	0.15	61.3	345.2	96.24	3.59
20C-2.30-1.50	0.20	46	514.2	137.72	3.73
20C-2.30-2.00	0.20	46	607.5	153.18	3.97
20C-2.30-2.16	0.20	46	649.9	158.13	4.11
15C-2.80-2.64	0.15	75	287.4	64.06	4.49
15C-2.80-3.53	0.15	75	313.9	74.43	4.22
15C-2.80-3.84	0.15	75	275.6	78.04	3.53
20C-2.80-1.50	0.20	56	498.9	122.03	4.09
20C-2.80-2.00	0.20	56	559.5	135.72	4.12
20C-2.80-2.16	0.20	56	536.5	140.11	3.83

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการศึกษา

ท่อซีเมนต์ใยหินที่ใช้ในงานสุขาภิบาลสามารถนำมาใช้เป็นแบบและหล่อติดถาวรกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กช่วยให้ลดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและไม่มีผลเสียต่อกำลังของเสา จากการศึกษานวัตกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ใยหินโดยแปรผันปริมาณเหล็กเสริมและอัตราส่วนความชะลุดสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 พฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกน

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ใยหินมีพฤติกรรมการรับแรงกดอัดเป็นแบบเชิงเส้นตรง (Linear) จนกระทั่งแรงกดอัดของเสามีค่าประมาณ 80-90% ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด จากนั้นพฤติกรรมการรับแรงกดอัดจะเริ่มเป็นแบบไร้เชิงเส้นกระทั่งคอนกรีตและซีเมนต์ใยหินมีค่าความเครียดเท่ากับ Ultimate Strain แล้วซีเมนต์ใยหินจะเกิดการแตกร้าวอย่างรวดเร็วที่บริเวณปลายทั้งสองข้างของเสา เมื่อแรงกดอัดของเสามีค่าสูงสุดท่อซีเมนต์ใยหินจะเกิดการแตกร้าวอย่างเห็นได้ชัดจนยิ่งขึ้น หลังจากนั้นกำลังรับแรงกดอัดของเสาจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยการหดตัวในแนวแกนและรอยแตกร้าวในท่อซีเมนต์ใยหินจะมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดการวิบัติอย่างทันทีทันใดในที่สุด

5.1.2 ลักษณะการวิบัติของเสา

เสาทุกต้นจะมีลักษณะการวิบัติแบบเสาสั้น โดยเกิดการคราก (Yielding) ในเหล็กเสริมและเกิดการอัดแตก (Crushing) ในคอนกรีตและท่อซีเมนต์ใยหินที่บริเวณปลายทั้งสองข้างของเสา เสาที่มีค่าอัตราส่วนความชะลุดสูงการวิบัติดังกล่าวจะเกิดขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของเสา เพราะเสายาวแกนเสาจะไม่อยู่ในแนวตั้งทำให้การกระจายของหน่วยแรงบนหน้าตัดเสาไม่สม่ำเสมอเสาที่มีค่าอัตราส่วนความชะลุดต่ำจึงมีกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนสูงกว่าเสาที่มีอัตราส่วนความชะลุดที่สูง โดยที่คอนกรีตและท่อซีเมนต์ใยหินมี Ultimate Strain ใกล้เคียงกันแต่มีลักษณะการวิบัติต่างกัน กล่าวคือ ท่อซีเมนต์ใยหินมีลักษณะการวิบัติแบบเปราะ ส่วนคอนกรีตมีลักษณะการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป ดังนั้นรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นที่ท่อซีเมนต์ใยหินจึงเปรียบเสมือนเป็นเครื่องเตือนการวิบัติของเสา

5.1.3 ผลของอัตราส่วนความชะลูดต่อกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด

เสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดต่ำจะมีกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดสูงกว่าเสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดสูง

5.1.4 ผลของปริมาณเหล็กเสริมต่อกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด

กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดจะแปรผันตามปริมาณเหล็กเสริมแบบเชิงเส้นตรง

5.1.5 สมการที่ใช้ในการออกแบบ

น้ำหนักบรรทุกทุกออกแบบสำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่กล่าวไว้ในมาตรฐาน ว.ส.ท. 1007-34 ควรดัดแปลงให้รวมท่อซีเมนต์ไยหินในรูปของสมการที่ (4.1)

$$P = [0.2125(f'_c A_c + f'_{abs} A_{abs}) + 0.85 A_s f_s] \left(1.07 - 0.008 \frac{L}{r} \right) \quad (4.1)$$

ซึ่งจะให้อัตราส่วนความปลอดภัยระหว่าง 3.20-4.49

5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

อัตราส่วนความชะลูดในช่วงเสายาวมีเพียง 2 ค่าคือ 61.3 และ 75 ซึ่งอาจน้อยเกินไปทำให้ผลการทดสอบไม่ครอบคลุมในช่วงเสายาวเท่าที่ควร

5.3 ข้อเสนอแนะที่ได้จากงานวิจัย

- 5.3.1) ท่อซีเมนต์ไยหินที่วางจำหน่ายอยู่ทั่วไปยังไม่ได้รับรองโดยมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ดังนั้นก่อนใช้งาน ควรศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงกลเบื้องต้น เช่น กำลังรับแรงกดอัดประลัย ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ลักษณะการวิบัติ เป็นต้น
- 5.3.2) ควรมีการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกดอัดแบบเอียงศูนย์และการรับแรงกระทำแบบพลศาสตร์ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหินด้วย
- 5.3.3) ในการหล่อเสาควรออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตให้มีความสามารถเทได้ที่เหมาะสมโดยที่เสาที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.15 และ 0.20m อาจให้มีการยุบตัว (Slump) เท่ากับ 0.10 และ 0.07 m ตามลำดับ และอาจต้องมีวิธีการทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นสม่ำเสมอที่เหมาะสม
- 5.3.4) ในการตัดท่อซีเมนต์ไยหินเพื่อให้ได้ความยาวตามต้องการนั้นควรมีการป้องกันฝุ่นละอองที่เกิดจากการตัดด้วย เนื่องจากแร่ใยหินที่กระจายปะปนไปกับฝุ่นละออง

เป็นวัสดุอันตรายซึ่งเมื่อเข้าไปสู่ร่างกายโดยทางลมหายใจแล้วอาจทำให้เป็นมะเร็ง
ในปอดได้

เอกสารอ้างอิง

- กฤษณะ เฝือกะ, สุภกิจ สายประเสริฐ, ญัฐพล ทองขาว (2543). **เสาท่อซีเมนต์ใยหินรับแรงอัดตามแนวแกน**. ปรินูญานิพนธ์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร (2542). **คอนกรีตเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด.
- ณรงค์ กุหลาบ (2544). **การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก**. พิมพ์ครั้งที่ 5 : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- วินิต ช่อวิเชียร (2529). **คอนกรีตเทคโนโลยี**. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- วินิต ช่อวิเชียร (2545). **การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (2540). **มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (2544). **ศัพท์วิทยาการวิศวกรรมโยธา**. แก้ไขปรับปรุงครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
- สมศักดิ์ คำปลิว (2545). **การออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก**. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน)
- American Society for Testing Materials (1998). **1998 Annual Book of ASTM Standards**. West Conshohocken, PA: Easton.
- Chung, J., Tsuda, K., Matsui, C. (1999). **High-Strength Concrete-Filled Square Tube Columns Subjected To Axial Loading**. The Seventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction. Kochi, Japan.
- Gere, J. M., Timoshenko, S. P. (1997). **Mechanics of Materials**. Fourth edition. Boston : PWS Publishing Company.
- MacGregor, J. G. (1997). **Reinforced Concrete Mechanics and Design**. Third Edition. New Jersey : Prentice-Hall Inc. McCormac, J. C. (1998). **Design of Reinforced Concrete**. Fourth Edition. Menlo Park : Addison Wesley Longman Inc.

- Mirmiran, A., Shahaway, M. (1997). **Behavior of Concrete Columns Confined by Fiber Composites**. J. Structural Engineering : 583-590.
- Nawy, E. G. (2000). **Reinforced Concrete a Fundamental Approach**. Fourth Edition. New Jersey : Prentice-Hall Inc.
- Nilson, A. H. (1997). **Design of Concrete Structures**. Twelfth Edition. United States of America : McGraw-Hill.
- Young, B., Hartono, W. (2002). **Compression Tests of Stainless Steel Tubular Members**. J. Structural Engineering : 754-761.

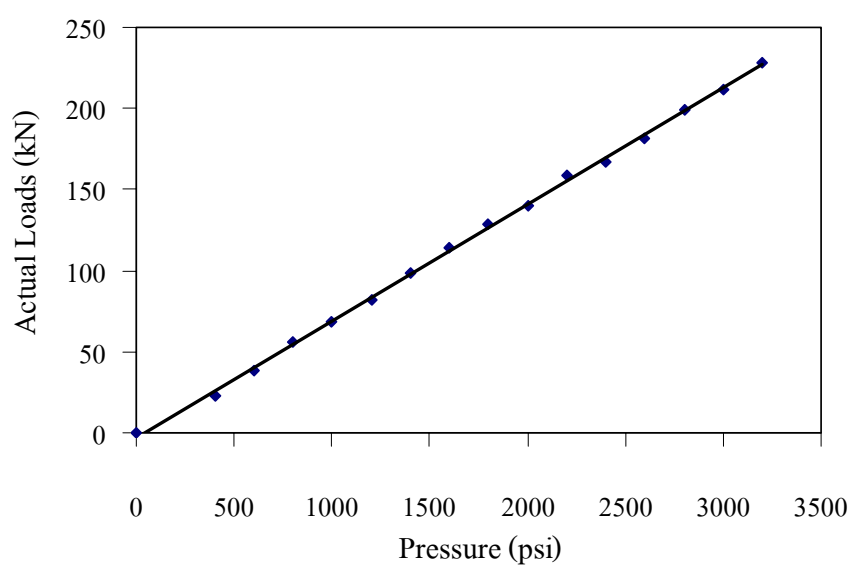
ภาคผนวก ก

ผลการสอบเทียบ Hydraulic Ram

ผลการสอบเทียบ Hydraulic Ram

การสอบเทียบ Hydraulic Ram กับเครื่องกด UTM พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความดันสำหรับ Hydraulic Ram เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นดังรูป ก1 ภาคผนวกนี้ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{Actual Loads (kN)} = 0.0719 (\text{Pressure, psi}) - 2.739$$



รูปที่ ก1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความดันของ Hydraulic Ram

ภาคผนวก ข

คอนกรีตและเหล็กเสริม

ข.1 คอนกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุผสม (Composite Material) ที่ได้จากการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มวลรวม (Aggregates) ได้แก่ ทรายและหินหรือกรวด และน้ำเข้าด้วยกัน โดยที่น้ำจะทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้เป็นซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน ซึ่งจะแทรกตามเม็ดทรายและหินและหุ้มเม็ดทรายและหินทั้งหมดให้เกาะรวมตัวจับเป็นก้อนแข็ง คอนกรีตจะแข็งตัวเมื่ออายุประมาณ 24 ชั่วโมง และเมื่อได้รับการบ่มขึ้นจะสามารถพัฒนากำลังรับแรงกดอัดได้ดีขึ้นเรื่อยๆ ตามอายุ ทั้งนี้ความแข็งแรงและความทนทานของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของการผสมที่ใช้

ข.1.1 วัสดุสำหรับคอนกรีต

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องมีคุณภาพตรงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก. 15-2532) คือ เป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ที่เมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ ตามมาตรฐานทั่วไป ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement)

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement)

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (High Early Strength Portland Cement)

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement)

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulphate Resistance Portland Cement)

ซึ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในแต่ละประเภทจะมีคุณสมบัติพิเศษแตกต่างกันทำให้การนำไปใช้งานแตกต่างกันด้วย เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็วจะเหมาะสำหรับการทำคอนกรีตที่ต้องการจะใช้งานเร็วหรือถอดไม้แบบในเวลาอันสั้น เป็นต้น และเพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานจริงของการก่อสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกหล่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหิน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในการหล่อเสาดังกล่าว

มวลรวม (Aggregates)

มวลรวมที่ใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต ได้แก่ ทรายและหินหรือกรวด ซึ่งต้องแข็งแรง ทนทาน สามารถรับแรงกดอัดได้ดี ไม่ขยายตัวมากและไม่มีสารเคมีเจือปน นอกจากนี้มวลรวมต้องมีขนาดใหญ่-เล็กกละกันดีตามมาตรฐาน American Society for Testing Materials (ASTM C33-97) เพื่อช่วยให้ได้คอนกรีตที่มีเนื้อแน่นสม่ำเสมอ มีช่องว่างระหว่างก้อนน้อยทำให้ใช้ซีเมนต์เพสต์น้อยลงและราคาของคอนกรีตก็ถูกลง

น้ำ (Water)

น้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต ต้องสะอาดมีความขุ่นได้ไม่เกิน 2000 ppm (ส่วนในล้าน) ปราศจากกรด ด่าง น้ำมัน สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์อื่นๆ ในปริมาณที่จะเป็นอันตรายต่อคอนกรีตหรือเหล็กเสริม

สารผสมเพิ่ม (Admixture)

สารผสมเพิ่ม หมายถึง สารใดๆที่ใช้เติมลงไปในส่วนผสมของคอนกรีตไม่ว่าจะก่อนหรือหลังผสม เพื่อปรับปรุงหรือเพิ่มประสิทธิภาพคอนกรีตขณะยังเหลวอยู่หรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการเพื่อให้สอดคล้องกับสภาพของวัสดุ สิ่งแวดล้อม และสภาพการทำงาน วัตถุประสงค์ทั่วไปของการใช้น้ำยาผสมคอนกรีตก็คือ ปรับปรุงความสามารถได้ แรงหรือหน่วงเวลาการก่อตัว ควบคุมหรือตัดแปลงการพัฒนากำลังอัด ปรับปรุงคุณสมบัติด้านการต้านทานการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน การทนต่อกรดและซัลเฟต เป็นต้น สารผสมเพิ่มที่ผลิตออกจำหน่ายทั่วไปสามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้ 4 กลุ่ม คือ

- 1) สารกักกระจายฟองอากาศ (Air-Entraining Agent)
- 2) สารเคมีผสมคอนกรีต (Chemical Admixture) เช่น สารลดปริมาณน้ำ
- 3) สารประกอบแร่ธาตุผสมเพิ่ม (Mineral Admixture) เช่น เถ้าลอย (Fly Ash)
- 4) สารผสมเพิ่มอื่นๆ เช่น สารป้องกันซึม (Waterproofing)

ข.1.2 การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต

วัตถุประสงค์ในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต คือ เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลัง (Strength) รับแรงได้ตามต้องการ เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีความชื้นเหลว (Consistency) และสะดวกต่อการทำงาน (Workability) สามารถไหลลงแบบหล่อและหุ้มเหล็กเสริมได้ดีโดยไม่เกิดการแยกตัวหรือคายน้ำมากเกินไป

สำหรับในงานวิจัยนี้การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตจะออกแบบตามมาตรฐานสถาบันคอนกรีตแห่งอเมริกา (American Concrete Institute) ซึ่งได้เสนอแนะไว้ใน Standard Practice for Normal, Heavyweight and Mass Concrete (ACI 211.1-91) ซึ่งมีขั้นตอนในการออกแบบส่วนผสมดังที่แสดงในรูปที่ ข1

ข.1.3 คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

กำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีต

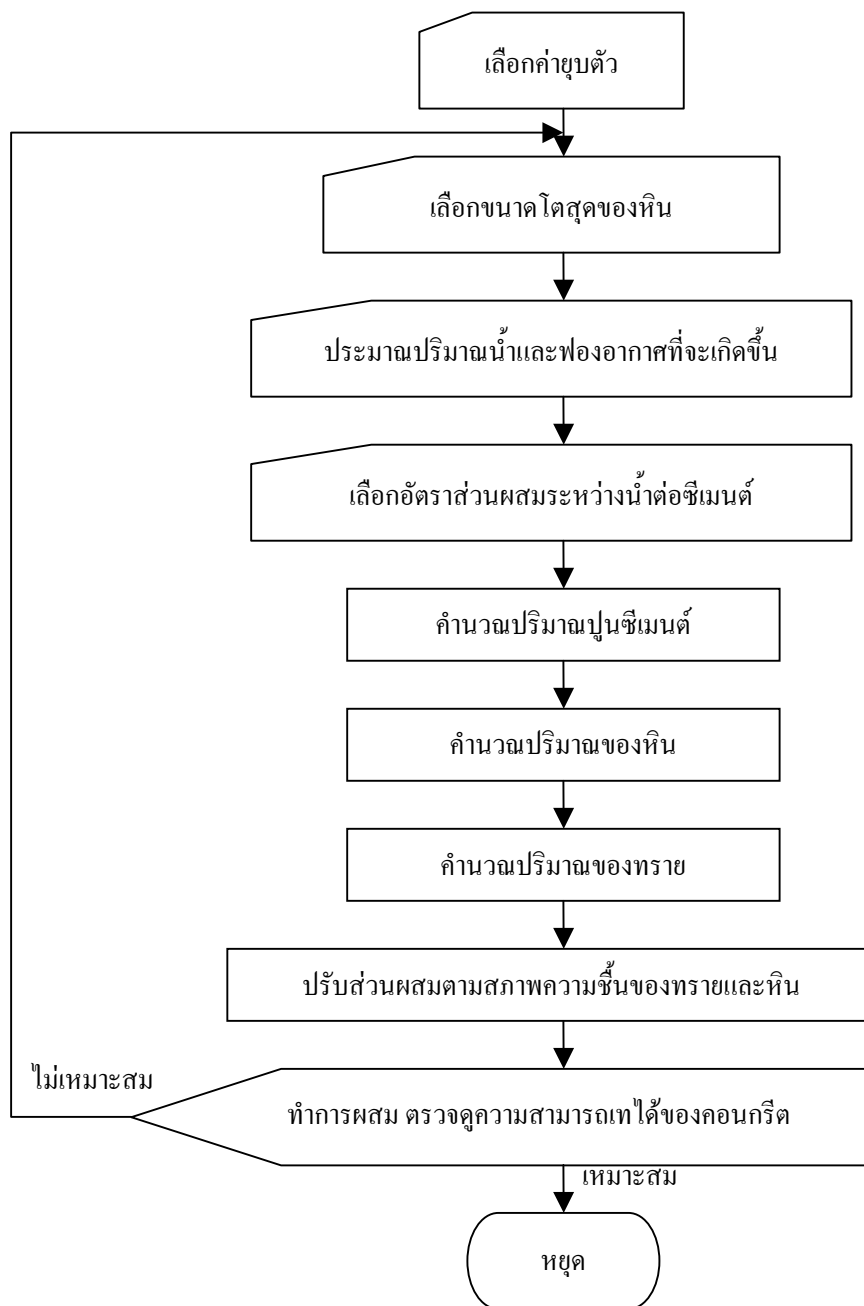
กำลังรับแรงกดอัด (Compressive Strength) ของคอนกรีตเป็นคุณสมบัติที่ต้องการมากที่สุดในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากกำลังต้านทานของคอนกรีตต่อแรงกระทำแบบอื่น เช่น กำลังรับแรงดึง กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงเฉือนและกำลังยึดเหนี่ยว ล้วนเป็นสัดส่วนเทียบได้กับกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตทั้งสิ้น นั่นหมายความว่า เมื่อคอนกรีตมีกำลังรับแรงกดอัดสูง กำลังต้านทานแรงอย่างอื่นหรือความทนทานก็จะสูงตามไปด้วย

กำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆดังนี้ อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ถ้าคอนกรีตมีค่าอัตราส่วนดังกล่าวสูงกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตจะมีค่าต่ำ อายุของแท่งทดสอบถ้าแท่งทดสอบมีอายุน้อยกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตจะมีค่าต่ำ การบ่มถ้าคอนกรีตสูญเสียน้ำเนื่องจากการบ่มไม่ดีกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตจะมีค่าต่ำ

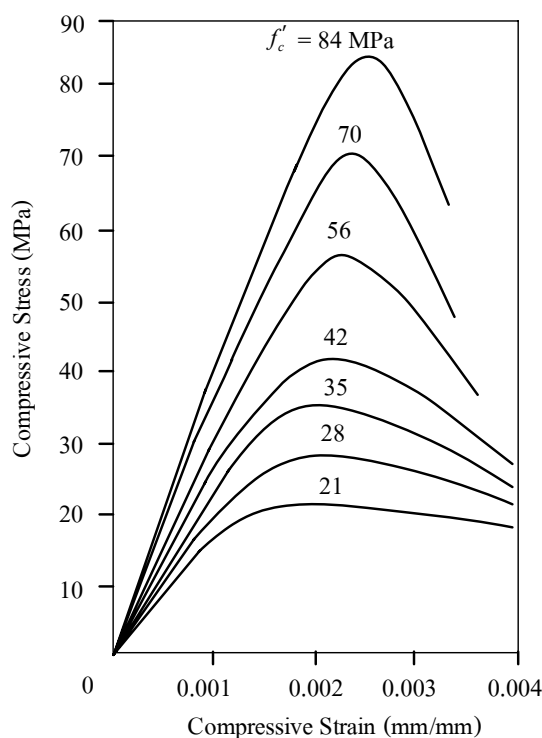
การทดสอบหาลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตให้ปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM C39-93 โดยการกดหรืออัดแรงในแนวแกนของตัวอย่างทดสอบมาตรฐานอย่างช้าๆ จนกระทั่งคอนกรีตถูกอัดแตก เมื่อน้ำแรงกดอัดสูงสุดที่ได้ไปหารเนื้อที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ จะได้เป็นค่าหน่วยแรงกดอัดสูงสุดของตัวอย่างคอนกรีตนั้น

กำลังของคอนกรีตจะถือเป็นที่ยอมรับได้เมื่อผลเฉลี่ยกำลังรับแรงกดอัดของการทดสอบ 3 ครั้งต่อเนื่องกันให้ค่าเท่ากับหรือมากกว่ากำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตที่กำหนด โดยที่กำลังรับแรงกดอัดของการทดสอบแต่ละครั้งให้ค่าต่ำกว่าที่กำหนดได้ไม่เกิน 3.5 MPa

รูปที่ ข2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัด (Compressive Stress) กับความเครียดกดอัด (Compressive Strain) ของแท่งคอนกรีตมาตรฐานที่มีกำลังรับแรงกดอัดต่างๆ กัน เมื่อรับแรงกดอัดในแนวแกนอย่างเดียว (Uniaxial Stress) จนกระทั่งคอนกรีตถูกอัดแตก จะเห็นว่าจากจุดเริ่มต้นที่คอนกรีตรับแรงกดอัดจนกระทั่งหน่วยแรงกดอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมีค่าประมาณ 40-50 % ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นเส้นโค้งเล็กน้อย อย่างไรก็ตามทางปฏิบัติเมื่อคอนกรีตรับแรงกดอัดอยู่ในช่วงใช้งานและกระทำในช่วงระยะเวลาสั้นๆ มักจะสมมติว่าคอนกรีตมีความเครียดกดอัดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยแรงกดอัดที่กระทำ



รูปที่ ข1 ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสมคอนกรีต



รูปที่ ข2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดกับความเครียดกดอัดของคอนกรีต

เมื่อหน่วยแรงกดอัดเพิ่มสูงขึ้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นเส้นโค้งคล้ายพาราโบลา ซึ่งพบว่าที่หน่วยแรงกดอัดสูงสุด คอนกรีตจะมีความเครียดกดอัดประมาณ 0.002-0.003 mm/mm และคอนกรีตยังสามารถรับแรงกดอัดต่อไปได้ในขณะที่ความเครียดกดอัดมีค่าเพิ่มมากขึ้น แต่หน่วยแรงกดอัดจะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งคอนกรีตวิบัติที่ความเครียดกดอัดสูงสุดประมาณ 0.003-0.004 mm/mm (มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. กำหนดให้ใช้ความเครียดกดอัดสูงสุดของคอนกรีตเท่ากับ 0.003 mm/mm)

โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

โมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ของคอนกรีตเป็นตัวแสดงถึงความต้านทานต่อการเสียรูป (Deformation) ของคอนกรีตเมื่อมีแรงกดอัดมากระทำ จากการทดสอบพบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีต หน่ว้น้ำหนัก ตลอดจนขนาดและระยะเวลาที่รับน้ำหนักบรรทุก เมื่อคอนกรีตรับแรงกดอัดอยู่ในช่วงใช้งานและกระทำในช่วงเวลาสั้นๆ เราจะสมมติให้คอนกรีตเป็นวัสดุยืดหยุ่น (Elastic Material) ได้โดยมีความเครียดกดอัดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยแรงกดอัดที่กระทำ แต่เมื่อคอนกรีตรับแรงกดอัดคงค้างเป็นเวลานานๆ จะต้องพิจารณาความเครียดกดอัดแบบพลาสติก (Plastic Strain) ด้วยเพราะโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะลดลงทำให้คอนกรีตเกิดการเสียรูปมากขึ้น

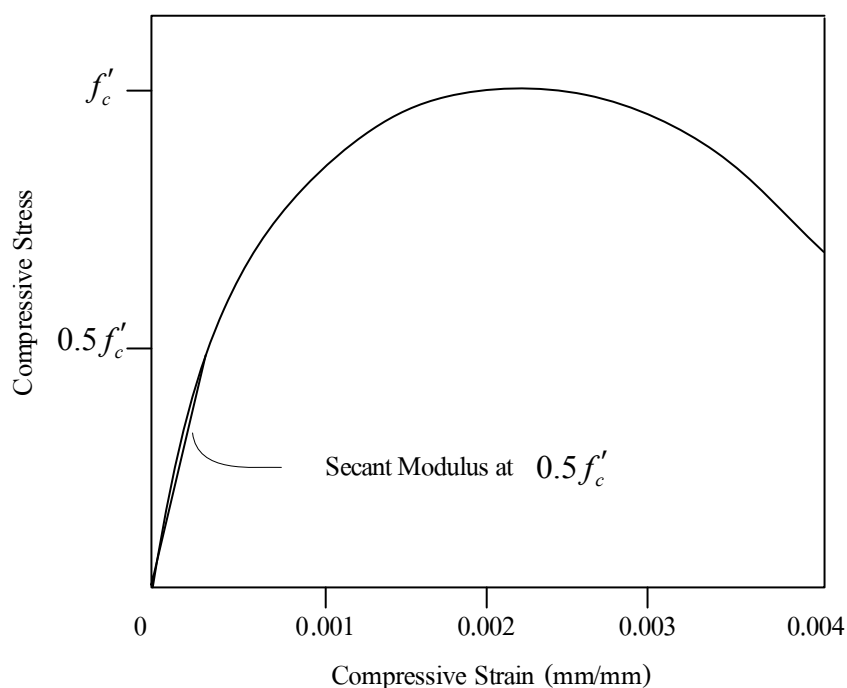
โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตหาได้จากอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงกดอัดกับความเครียดกดอัดบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและความเครียดกดอัดของคอนกรีตในช่วงที่คอนกรีตมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) ซึ่งได้จากการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตซึ่งมาตรฐาน ASTM C469-94 ได้กำหนดสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตไว้ดังนี้

$$E_c = (S_2 - S_1) / (\epsilon_2 - 0.00005) \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ S_1 คือ หน่วยแรงที่ตัวอย่างทดสอบเกิดความเครียดกดอัดเท่ากับ 50×10^{-6}

S_2 คือ หน่วยแรงที่มีค่าประมาณ 40% ของหน่วยแรงกดอัดสูงสุด

ϵ_2 คือ ความเครียดกดอัดที่เกิดจากหน่วยแรง S_2



รูปที่ ข3 การหาโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

(Wang, C.K., Salmon, C.G., 1992)

มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. กำหนดสมการสำหรับหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต โดยให้ขึ้นกับกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดและหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต ดังสมการ

$$E_c = 0.043w^{1.5}\sqrt{f'_c} \quad , \text{ MPa} \quad (\text{ข.2})$$

เมื่อ E_c คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต , MPa

w คือ หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต , kg/m^3

f'_c คือ กำลังรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกเมื่ออายุ 28 วัน , MPa

ฉะนั้น สำหรับคอนกรีตธรรมดา (หน่วยน้ำหนัก $w = 2323 \text{ kg/m}^3$) จะได้

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad , \text{ MPa} \quad (\text{ข.3})$$

กำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตเมื่อรับแรงกระทำหลายแกน

กำลังรับแรงกดอัดของคอนกรีตที่กล่าวมาข้างต้นเป็นกำลังของคอนกรีตที่รับแรงกระทำเพียงแกนเดียวเท่านั้น (Uniaxial Stress) แต่ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก คอนกรีตอาจต้องรับแรงกระทำประเภทต่างๆ พร้อมกัน อย่างไรก็ตามเราสามารถหาลำดับรับแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีตเมื่อมีแรงกระทำในหลายทิศทางได้ โดยอาศัยการเขียนวงกลมของ Mohr และพิจารณาประกอบกับผลการทดสอบ ซึ่งจะพบว่า เมื่อคอนกรีตรับแรงกระทำสองทิศทาง (Biaxial Stress) ที่ตั้งฉากกัน ถ้าแรงทั้งสองเป็นแรงกดอัด ลำดับรับแรงกดอัดของคอนกรีตจะมีค่าสูงขึ้นและมีความเหนียวมากขึ้น กล่าวคือ เมื่อแรงกดอัดที่กระทำในแต่ละทิศทางมีค่าเท่ากันจะได้ลำดับรับแรงกดอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 16% และเมื่อแรงกดอัดที่กระทำในแต่ละทิศทางมีอัตราส่วนเท่ากับ 0.6 จะได้ลำดับรับแรงกดอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นประมาณ 27%

เมื่อคอนกรีตรับแรงกดอัดสามทิศทาง (Triaxial Stress) ที่ตั้งฉากกันและกระทำพร้อมกัน ผลจากการทดสอบพบว่าคอนกรีตมีความเหนียวและมีลำดับรับแรงกดอัดมากขึ้นเมื่อเทียบกับการที่คอนกรีตรับแรงกดอัดแกนเดียว (รูปที่ ข4) ทั้งนี้เพราะแรงกดอัดรอบข้างจะมีส่วนช่วยลดการแตกร้าวในเนื้อคอนกรีตและช่วยจำกัดการขยายตัวออกทางด้านข้างของคอนกรีต ก่อนที่แท่งคอนกรีตจะเกิดการวิบัติ

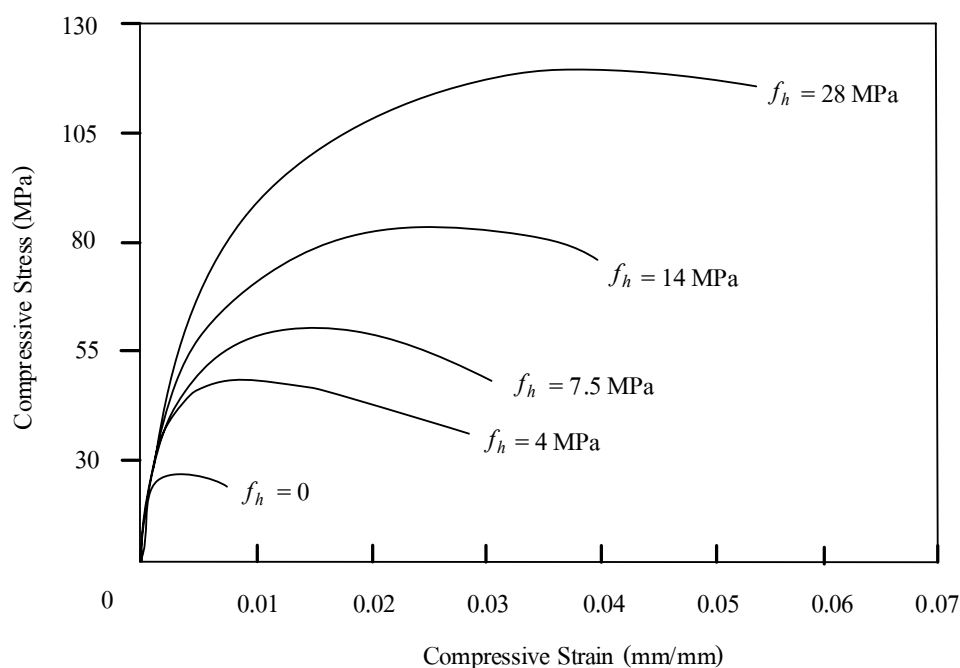
ลำดับรับแรงกดอัดของคอนกรีตในกรณีนี้หาได้จากสมการ

$$f_c^* = f'_c + 4.1f_h \quad (\text{ข.4})$$

เมื่อ f_c^* คือ ลำดับรับแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเมื่อมีหน่วยแรงกระทำรอบข้าง

f'_c คือ ลำดับรับแรงกดอัดในแนวแกนของคอนกรีตเมื่อไม่มีหน่วยแรงกระทำรอบข้าง

f_h คือ หน่วยแรงรอบข้างที่กระทำ



รูปที่ ข4 กำลังและความเหนียวของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีหน่วยแรงกระทำรอบข้าง

(MacGregor, J. G., 1997)

2.2 เหล็กเสริม

เหล็กเสริม (Reinforcing Bars) ในงานก่อสร้างทั่วไปจะเป็นเหล็กกล้าละมุน (Mild Steel) ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ต่ำ (ประมาณ 0-0.3%) เหล็กเสริมที่ใช้ในงานก่อสร้างมีทั้งแบบหน้าตัดกลมผิวเรียบซึ่งเรียกว่า เหล็กกลมแบบผิวเรียบ (Round Bars) และแบบหน้าตัดกลมแต่มีบั้งหรือปล้องที่ผิวตามแนวยาวของเหล็กเรียกว่า เหล็กกลมแบบข้ออ้อย (Deformed Bars) เหล็กเส้นที่ผลิตออกมาจะมีความหนาแน่นประมาณ 7850 kg/m^3 มีความยาวมาตรฐาน 10 และ 12 m

เหล็กกลมแบบผิวเรียบ (Round bars) เป็นเหล็กเส้นที่มีหน้าตัดกลมมีผิวเรียบตลอดความยาวของเหล็กมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 6 mm ถึง 25 mm มาตรฐาน มอก.20-2527กำหนดให้เหล็กกลมแบบผิวเรียบมีชั้นคุณภาพเดียว คือ SR24 ซึ่งหมายถึง มีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กไม่น้อยกว่า 240 MPa ส่วนการเรียกชื่อให้ใช้สัญลักษณ์ RB แล้วตามด้วยตัวเลขแสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น mm เหล็กเส้นชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้ในงานก่อสร้างขนาดเล็กและขนาดกลาง เพราะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตไม่ดีเท่าที่ควร

เหล็กกลมแบบข้ออ้อย (Deformed Bars) เป็นเหล็กเส้นที่มีหน้าตัดกลม แต่ที่ผิวตามแนวยาวของเหล็กมีลักษณะเป็นบั้งหรือปล้อง ซึ่งผลิตตามที่มาตรฐานกำหนด เหล็กกลมแบบข้ออ้อยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 10 mm ถึง 32 mm มาตรฐาน มอก. 24-2536 กำหนดให้เหล็กข้อ

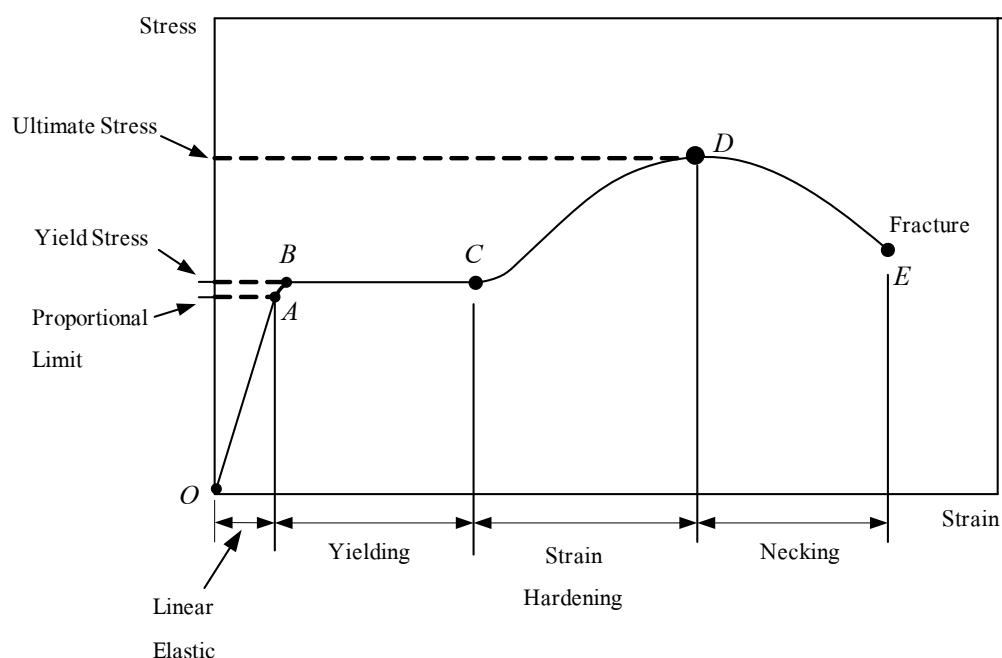
อ้อยมี 3 ชั้นคุณภาพ คือ SD30 SD40 และ SD50 ซึ่งหมายถึง มีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็ก ไม่น้อยกว่า 300 , 400 และ 500 MPa ตามลำดับ ส่วนการเรียกชื่อขนาดให้ใช้สัญลักษณ์ DB แล้ว ตามด้วยตัวเลขแสดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเป็น mm เหล็กเส้นชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้ในงานก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ต้องการความแข็งแรงเป็นพิเศษ เนื่องจากมีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากสูง และมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมมากกว่าเหล็กกลมแบบผิวเรียบ

ในการคำนวณออกแบบจะต้องพิจารณาเลือกใช้เหล็กเสริมตามชั้นคุณภาพ และเมื่อนำเหล็กเสริมหรือลวดเหล็กมาใช้งานก่อสร้างควรทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางกลด้วยว่าเหล็กเสริมหรือลวดเหล็กนั้นมีคุณสมบัติถูกต้องตรงตามที่ได้กำหนดไว้หรือไม่ คุณสมบัติทางกลที่ควรตรวจสอบได้แก่

- 1) กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (Yield Strength)
- 2) กำลังรับแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)
- 3) โมดูลัสยืดหยุ่น
- 4) ความยืดตัว (Elongation)

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบอย่างน้อยขนาดละ 3 ตัวอย่าง นำมาวัดหาขนาดเฉลี่ยของเส้นผ่าศูนย์กลาง และทำการทดสอบหาลำกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมตามวิธีการมาตรฐาน มอก. 24-2536 โดยการดึงอย่างต่อเนื่องครั้งเดียวจนถึงจุดวิบัติ

เมื่อนำผลการทดสอบมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับความเครียดของเหล็กเสริม จะได้ดังที่แสดงในรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าขณะที่หน่วยแรงดึงยังอยู่ในช่วงยืดหยุ่น หน่วยแรงดึงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียดของเหล็กเสริมตามกฎของฮุกจนกระทั่งถึงหน่วยแรงที่เหล็กเสริมเริ่มคราก เหล็กเสริมจะเริ่มถูกดึงยืดออกขณะที่แรงดึงที่กระทำมีค่าค่อนข้างคงที่ เรียกหน่วยแรง ณ. จุดนี้ว่า หน่วยแรงที่จุดคราก (Yield Stress) ความเครียดของเหล็กเสริมในช่วงนี้แสดงถึงความเหนียวของเหล็กเสริมซึ่งปกติมีค่าประมาณ 10-12 เท่าของความเครียดที่จุดคราก แต่เมื่อเหล็กเสริมมีหน่วยแรงที่จุดครากสูงขึ้นการยืดตัวในช่วงนี้จะลดน้อยลงตามลำดับ หลังจากเหล็กเสริมสิ้นสุดการครากแล้วเหล็กเสริมจะมีพฤติกรรมใหม่ซึ่งสามารถรับแรงดึงเพิ่มได้อีก และมีการยืดตัวเพิ่มขึ้นแต่หน่วยแรงดึงและความเครียดไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงเหมือนกับในช่วงยืดหยุ่น เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงการแข็งตัวเพิ่ม (Strain Hardening) เมื่อเหล็กเสริมรับแรงดึงจนกระทั่งถึงหน่วยแรงสูงสุดของเหล็กเสริมนั้น (Ultimate Tensile Strength) หน่วยแรงดึงจะค่อยๆ ลดลงและหน้าตัดของเหล็กเสริมเริ่มมีคอคอดเกิดขึ้นซึ่งสังเกตได้ค่อนข้างชัดเจนจนกระทั่งถึงจุดที่เหล็กเสริมถูกดึงขาดออกจากกัน เรียกหน่วยแรงที่จุดนี้ว่า หน่วยแรงดึงประลัย (Fracture Stress)



รูปที่ ข5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและความเครียดของเหล็กเสริม

(Timoshenko, S. P., 1997)

ค่าความชันของเส้นความสัมพันธ์หรืออัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงดึงต่อความเครียดในช่วงอีลาสติกกำหนดให้เป็นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นใช้สัญลักษณ์เป็น E_s สำหรับเหล็กเสริมทุกชั้นคุณภาพจะมีค่า E_s ก่อนข้างจะคงที่เท่ากับ 200 MPa อนึ่งเมื่อเหล็กเสริมต้องรับแรงกดอัดจะถือว่าเหล็กเสริมมีกำลังรับแรงกดอัดเท่ากับกำลังรับแรงดึง โดยมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเมื่อรับแรงกดอัดเท่ากับค่าที่รับแรงดึง

เมื่อเหล็กเสริมมีหน่วยแรงที่จุดครากสูงมากและเกินกว่า 400 MPa ตำแหน่งของจุดครากอาจไม่ปรากฏชัดเจน มาตรฐาน ACI และ ว.ส.ท. กำหนดให้พิจารณาหาหน่วยแรงที่จุดครากของเหล็กเสริมนั้นจากจุดที่เหล็กมีความเครียดเท่ากับ 0.0035 mm/mm (เรียกว่า 0.35% Off-Set) นั่นคือ ตรงจุดที่หน่วยการยืดตัวมีค่าเท่ากับ 0.0035 mm/mm ให้ลากเส้นขนานกับความชันของเส้นกราฟในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นไปตัดกับเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับความเครียด จุดตัดที่ได้จะถือเป็นหน่วยแรงที่จุดครากของเหล็กเสริมนั้น

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 20-2527 ให้ข้อกำหนดที่ต้องการทางด้านคุณสมบัติทางกลของเหล็กกลมแบบผิวเรียบและแบบข้ออ้อยตามชั้นคุณภาพต่างๆ ดังตารางที่ ข1

ตารางที่ ข1 คุณสมบัติทางกลของเหล็กเสริมตามมาตรฐาน มอก. 20-2527

ชนิดของเหล็กเสริม	ชั้นคุณภาพ	หน่วยแรงที่ จุดคราก MPa (kg/cm ²) ไม่น้อยกว่า	หน่วยแรงดึง ประลัย MPa (kg/cm ²) ไม่น้อยกว่า	ความยืด % ไม่น้อย กว่า	มอดุลโค้ง ยื่น องศา
เหล็กกลมผิวเรียบ	SR24	240 (2400)	380 (3800)	21	180
เหล็กข้ออ้อย	SD30	300 (3000)	480 (4800)	17	180
	SD40	400 (4000)	560 (5600)	15	180
	SD50	500 (5000)	620 (6200)	13	90

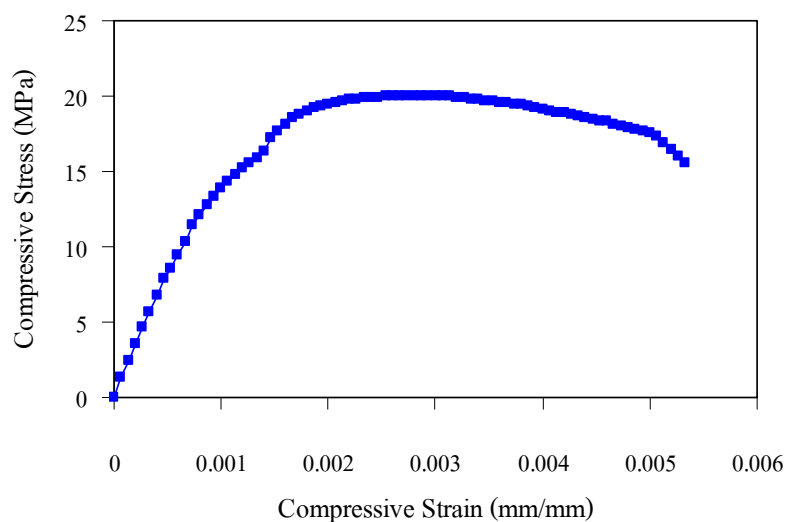
ภาคผนวก ค

วิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดสอบวัสดุ

ค.1 ผลการทดสอบแรงกดอัดของคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้มีกำลังรับแรงกดอัดประลัย (Ultimate Compressive Strength) และโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) โดยเฉลี่ยเท่ากับ 21.5 MPa และ 19.7 GPa ตามลำดับ โดยมีกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัด (Compressive Stress) และความเครียดกดอัด (Compressive Strain) ดังแสดงในรูปที่ ค1

จากกราฟในรูปที่ ค1 จะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการรับแรงกดอัดของคอนกรีตจะเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) จนกระทั่งหน่วยแรงกดอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมีค่าประมาณ 50% ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด หลังจากนั้นจะเริ่มเกิดรอยแตกร้าว (Microcrack) ในตัวอย่างทดสอบอย่างต่อเนื่องทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและความเครียดกดอัดมีลักษณะเป็นแบบไร้เชิงเส้น (Nonlinear) โดยมีความชันของเส้นกราฟลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์เมื่อหน่วยแรงกดอัดมีค่าสูงสุด จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะเกิดการแตกร้าวแบบต่อเนื่องอย่างเห็นได้ชัด ส่งผลให้หน่วยแรงกดอัดของตัวอย่างทดสอบลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะเห็นได้จากการที่เส้นกราฟค่อยๆ ตกลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งคอนกรีตเกิดการวิบัติ ซึ่งมีลักษณะการวิบัติเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป (Progressive Failure) ดังที่แสดงในรูปที่ ค2



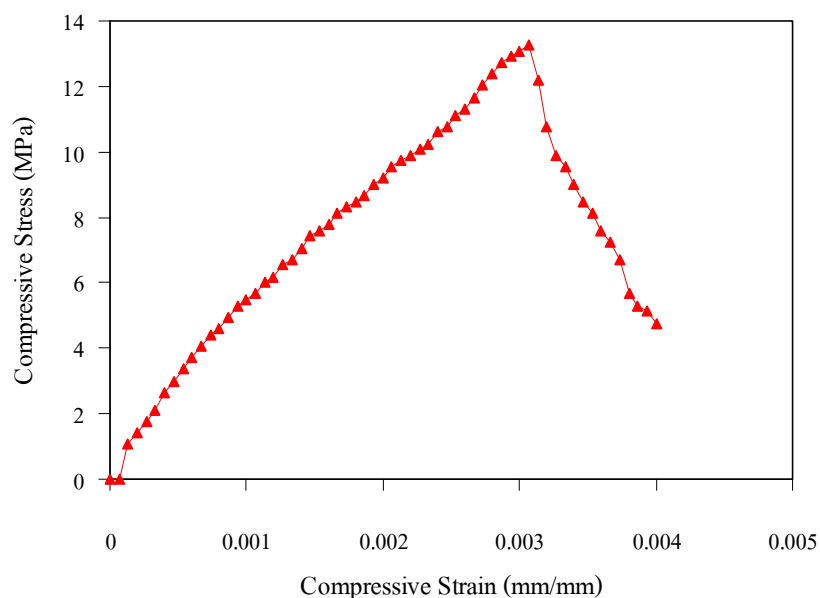
รูปที่ ค1 ตัวอย่างของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีต



รูปที่ ค2 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีตภายใต้แรงกดอัด

ค.2 ผลการทดสอบแรงกดอัดของวัสดุซีเมนต์ไยหิน

ตัวอย่างวัสดุซีเมนต์ไยหินที่ใช้ในการศึกษานี้มีกำลังรับแรงกดอัดสูงสุดและโมดูลัสยืดหยุ่นโดยเฉลี่ยเท่ากับ 13.2 MPa และ 6.1 GPa ตามลำดับ โดยมีกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและความเครียดกดอัดดังแสดงในรูปที่ ค3 จากกราฟจะเห็นได้ว่าพฤติกรรมการรับแรงกดอัดของวัสดุซีเมนต์ไยหินจะเป็นแบบเชิงเส้นตรงจนกระทั่งหน่วยแรงกดอัดที่เกิดขึ้นในวัสดุซีเมนต์ไยหินมีค่าสูงสุดซึ่งค่าความเครียดกดอัด ณ จุดดังกล่าวมีค่าประมาณ 0.003 mm/mm หลังจากนั้นแล้ววัสดุซีเมนต์ไยหินจะเกิดการแตกร้าวและวิบัติอย่างทันทีทันใด ดังจะเห็นได้จากการที่เส้นกราฟตกลงอย่างรวดเร็วหลังจากที่วัสดุซีเมนต์ไยหินมีค่าหน่วยแรงกดอัดถึงจุดสูงสุดแล้ว ซึ่งลักษณะการวิบัติของวัสดุซีเมนต์ไยหินจะแสดงในรูปที่ ค4 ซึ่งมีลักษณะการวิบัติเป็นแบบแตกแยกออกเนื่องจากวัสดุซีเมนต์ไยหินมีเนื้อวัสดุเป็นชั้นๆ เรียงกันจึงทำให้เกิดลักษณะการวิบัติดังกล่าว



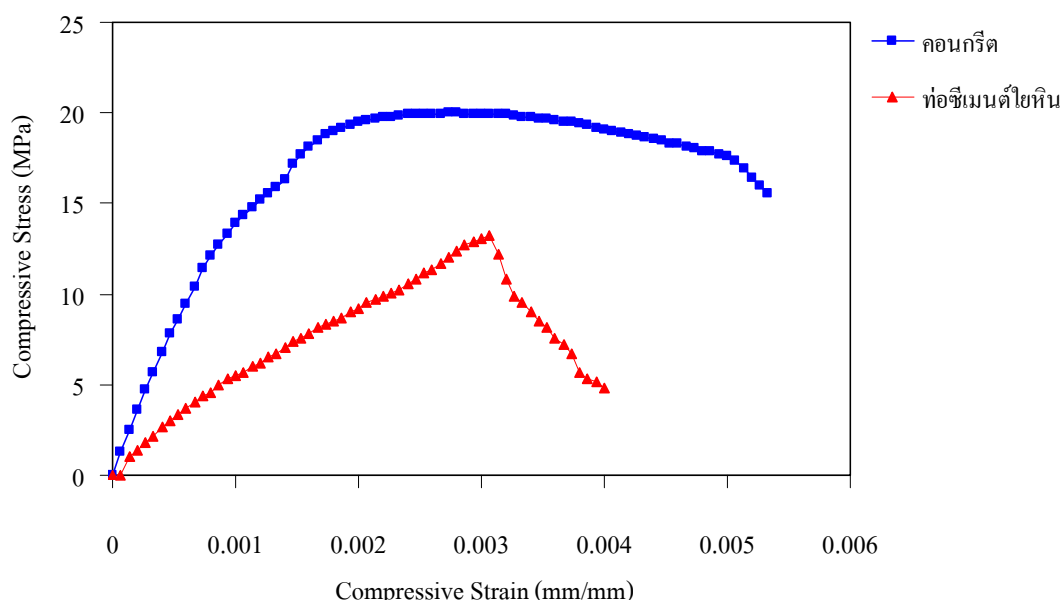
รูปที่ ค3 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุซีเมนต์ไยหิน



รูปที่ ค4 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของตัวอย่างวัสดุซีเมนต์ไยหินภายใต้แรงกดอัด

เมื่อนำผลการทดสอบแรงกดอัดของคอนกรีตและวัสดุซีเมนต์ไยหินมาเปรียบเทียบกัน โดยนำมาเขียนไว้ในกราฟเดียวกันดังรูปที่ ค5 แล้วพบว่า พฤติกรรมการรับแรงกดอัดของวัสดุซีเมนต์ไยหินค่อนข้างแตกต่างจากคอนกรีต กล่าวคือ วัสดุซีเมนต์ไยหินมีพฤติกรรมการรับแรงกดอัดแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนกระทั่งถึงจุดหน่วยแรงกดอัดสูงสุด หลังจากนั้นวัสดุซีเมนต์ไยหินจะเกิดการแตกร้าวอย่างรวดเร็วซึ่งลักษณะการวิบัติแบบนี้จะเป็นการวิบัติแบบเปราะ (Brittle Failure) นอกจาก นั้นแล้ว

ยังพบอีกด้วยว่า คอนกรีตและวัสดุซีเมนต์ไยหินที่ใช้ในการศึกษานี้มีค่าความเครียด ณ จุดที่เกิดหน่วยแรงกดอัดสูงสุดที่ใกล้เคียงกัน แต่มีลักษณะการวิบัติที่แตกต่างกันตามที่กล่าวไปแล้วข้างต้น



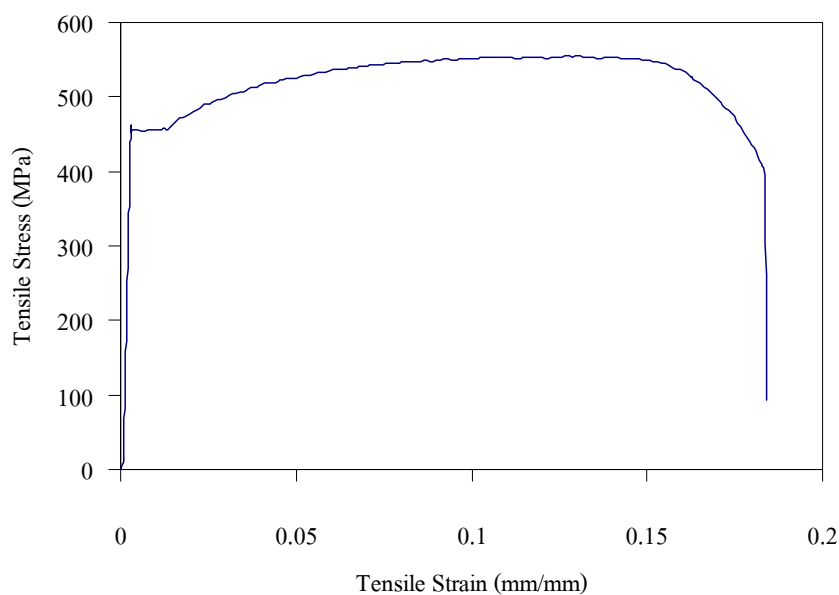
รูปที่ ๔5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตและวัสดุซีเมนต์ไยหิน

๓.3 ผลการทดสอบแรงดึงของเหล็ก

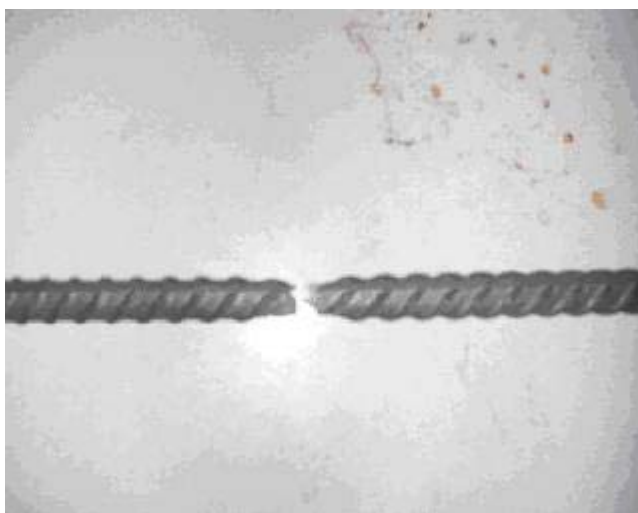
เหล็กที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นเหล็กข้ออ้อย (Deform Bar) ชั้นคุณภาพ SD30 มีกำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (Yield Strength) กำลังรับแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) และโมดูลัสยืดหยุ่น โดยเฉลี่ยแล้วเท่ากับ 412.2 MPa, 541.1 MPa และ 203.9 GPa ตามลำดับ โดยมีกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึง (Tensile Stress) และความเครียดดึง (Tensile Strain) ดังรูปที่ ๓๖

จากรูปจะเห็นว่าพฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็ก SD30 จะเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนกระทั่งหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กถึงจุดคราก (Yield Point) ซึ่งมีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ 412 MPa และมีค่าความเครียดที่จุดครากประมาณ 0.0012 mm/mm หลังจากนั้นแล้วเหล็กจะเข้าสู่ช่วง Yielding โดยจะมีค่าความเครียดดึงอยู่ในช่วง 0.0012-0.0025 mm/mm ซึ่งในช่วงนี้เหล็กจะมีค่าความเครียดเพิ่มขึ้นโดยที่หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กมีค่าเท่าเดิม เมื่อหมดช่วง Yielding แล้วเหล็กจะสามารถรับแรงได้อีกครั้งจะเห็นได้จากการที่กราฟมีความชันเพิ่มขึ้นและจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งความชันของกราฟมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กมีค่าสูงสุดซึ่งมีค่าโดยเฉลี่ย

ประมาณ 540 MPa หลังจากนั้นกำลังรับแรงดึงของเหล็กจะค่อยๆ ลดลง ซึ่งจะเห็นได้จากการที่เส้นกราฟตกลงเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการวิบัติในที่สุด ซึ่งลักษณะการวิบัติของเหล็ก SD30 จะเป็นดังรูปที่ ค7



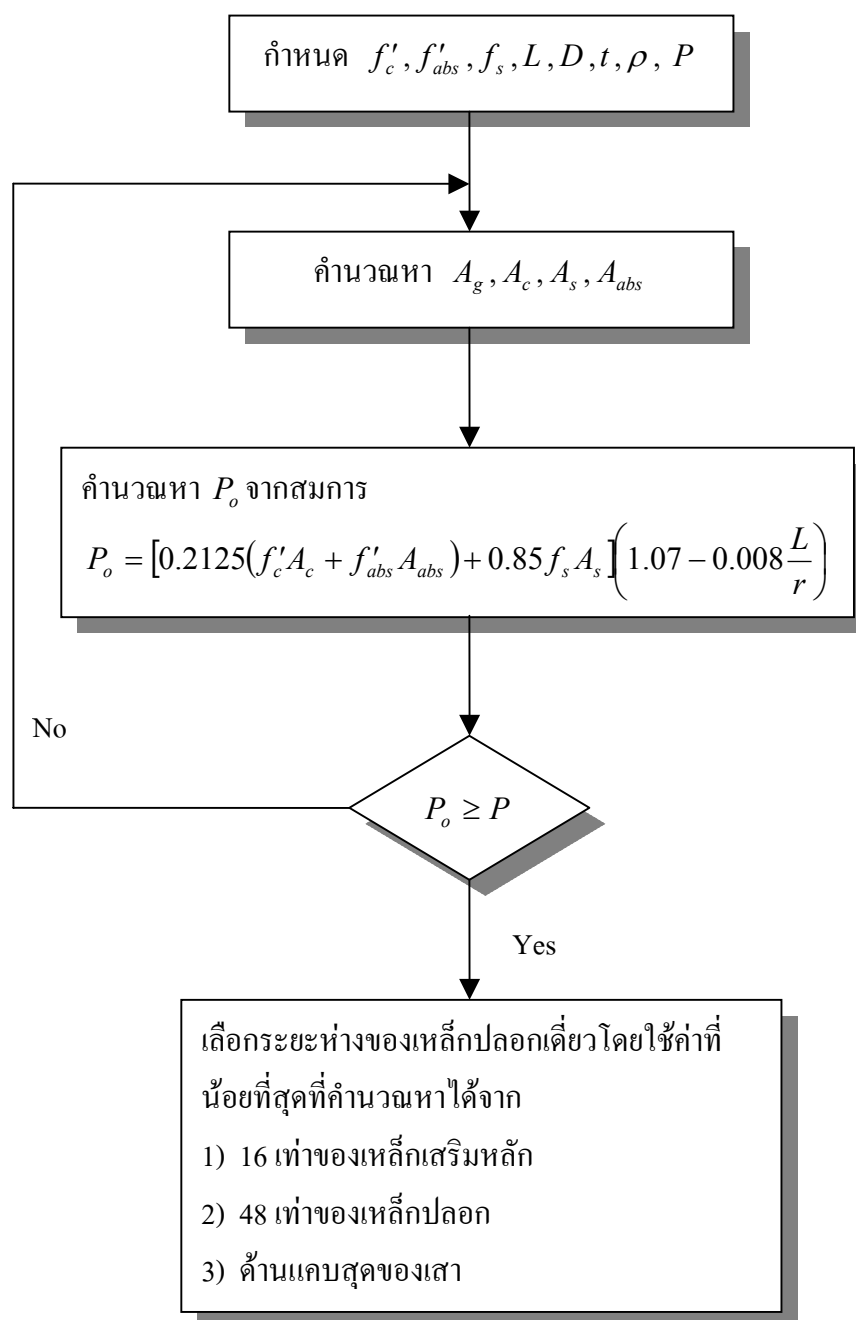
รูปที่ ค6 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริม SD30



รูปที่ ค7 ตัวอย่างลักษณะการวิบัติของเหล็กภายใต้แรงดึง

ภาคผนวก ง

แผนภูมิแสดงขั้นตอนการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดปลอกเดี่ยวที่ถูก
ห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ใยหินภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน



รูปที่ ง1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวที่ถูกห่อหุ้มด้วย
ท่อซีเมนต์ใยหินภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน

ภาคผนวก จ

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

“เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ใยหินภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน”,
นวัตกรรมทางวิศวกรรมสำหรับการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน, การประชุมวิชาการ 40 ปี คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 23-24 มกราคม 2547.

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ใยหินภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน REINFORCED CONCRETE COLUMNS ENCASED WITH ASBESTOS CEMENT PIPES SUBJECTED TO AXIALLY COMPRESSIVE LOADS

ศรัณย์ กำจัดโรค

นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

สิทธิชัย แสงอาทิตย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ใยหินภายใต้แรงกดอัดในแนวแกนและเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับสมการออกแบบเสาของ ว.ส.ท. ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 และ 0.20 เมตร ความยาว 0.75, 2.30 และ 2.80 เมตร โดยมีปริมาณเหล็กเสริม 1.5, 2.0, 2.15, 2.64, 3.53 และ 3.84% ของพื้นที่หน้าตัดเสา ซึ่งผลการทดสอบพบว่าเสาโดยส่วนใหญ่มีพฤติกรรมการรับแรงกดอัดและค่าการหดตัวเป็นแบบเชิงเส้นตรง (linear) ถึงประมาณ 80% ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด จากนั้น พฤติกรรมการรับแรงจะเป็นแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) จนถึงจุดรับแรงกดอัดสูงสุด โดยท่อซีเมนต์ใยหินและคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวเพิ่มขึ้นมากและค่าแรงกดอัดลดลงอย่างรวดเร็ว โดยลักษณะการวิบัติของเสาจะเป็นแบบเสาสั้น เกิดการครากที่เหล็กเสริมและเกิดการแตกร้าวที่คอนกรีตและท่อซีเมนต์ใยหิน นอกจากนั้นแล้วยังพบอีกว่า อัตราส่วนความปลอดภัยของเสามีค่าลดลง เมื่อค่าอัตราส่วนความชะลูดมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสาที่มีความยาวในช่วงใช้งานมีค่าอยู่ระหว่าง 1.71 ถึง 2.53

ABSTRACT: The objectives of this research work are to study the behaviors and modes of failure of reinforced concrete columns encased with asbestos cement pipe and to compare the test results with EIT's columns design equation. The test specimens with diameters of 0.15 and 0.20 meters, length of 0.75, 2.30 and 2.80 meters, and steel reinforcements of 1.5, 2.0, 2.15, 2.64, 3.53 and 3.84% of the column's cross sectional area were used. From the test, it was found that the columns exhibited a linear behavior up to the approximately 80% of the ultimate compressive loads. Then, the behavior of columns was nonlinear up to the ultimate compressive loads. At this point, cracks in the asbestos cement pipe and concrete started to increased drastically and the compressive load decreased significantly. The mode of failure of all the test specimens was in the form of short column. At the failure point, the steel reinforcement yielded and the asbestos cement pipe and concrete cracked. In addition, it was found that the factor of safety of the columns decreased when the slenderness ratio of the column increased and the factor of safety of the columns having the practical lengths was in the range of 1.71 and 2.53.

KEYWORDS: REINFORCED CONCRETE COLUMN, ASBESTOS CEMENT PIPE, COMPRESSIVE LOAD

1. บทนำ

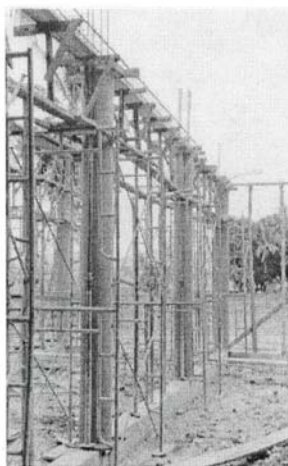
ในประเทศไทย โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่ได้รับความนิยมมาก เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีความคงทน แข็งแรง ประหยัด มีกำลังสูง และสามารถหล่อให้เป็นรูปแบบใดๆ ได้ง่าย โดยทั่วไปแล้ว ในการก่อสร้างโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจำเป็นต้องมีแบบหล่อคอนกรีตเพื่อเป็นแบบสำหรับเทคอนกรีตให้เป็นรูปทรงที่ต้องการ แต่การทำแบบหล่อจะต้องใช้ช่างที่มีความชำนาญและเสียเวลาในการทำแบบหล่อ ส่งผลให้ค่าก่อสร้างมีราคาสูง ในปัจจุบัน เทคโนโลยีการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กได้มีการพัฒนาไปเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการใช้แบบหล่อคอนกรีตสำเร็จรูป ที่มักใช้ในการก่อสร้างอาคารขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ เนื่องจากแบบหลอดังกล่าวมักจะทำด้วยเหล็กและมีราคาค่อนข้างสูง ทำให้ไม่เหมาะสมในการใช้งานในอาคารขนาดเล็ก เช่น บ้านพัก เป็นต้น และการผลิตชิ้นส่วนของโครงสร้างเป็นชิ้นส่วนสำเร็จรูป เช่น แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปและคานคอนกรีตสำเร็จรูป เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เสาคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปยังไม่เป็นที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน เนื่องจากเสาเป็น

ชิ้นส่วนของโครงสร้างที่มีความสำคัญมาก หากมีการวิบัติเกิดขึ้นอาจทำให้อาคารทั้งชั้นหรือทั้งหลังเกิดการวิบัติได้ และอาจก่อให้เกิดการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินเป็นจำนวนมาก ดังนั้นในการก่อสร้างเสาของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจึงนิยมใช้เสาแบบหล่อในที่มากกว่า

ในปัจจุบัน ได้มีการนำท่อซีเมนต์ใยหินมาใช้เป็นแบบหล่อของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบบถาวร ดังที่แสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเสาประเภทนี้เริ่มมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายตามภูมิภาคต่างๆ ของประเทศไทย ข้อดีของการใช้ท่อซีเมนต์ใยหินเป็นแบบหล่อเสาในลักษณะดังกล่าวคือ มีความสะดวกและรวดเร็วในการก่อสร้าง มีความสวยงาม และมีราคาถูก เนื่องจากไม่ต้องเสียค่าจัดทำแบบหล่อเสา โดยเฉพาะในกรณีของเสาน้ำตดกลม ซึ่งแบบหล่อของเสาดังกล่าวจะมีราคาค่อนข้างสูง

โดยทั่วไป เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ท่อซีเมนต์ใยหินเป็นแบบหล่อเสาแบบถาวรมักจะถูกออกแบบโดยใช้สมการออกแบบตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (working stress design) ของวิศวกรรมสถาน

แห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) โดยพิจารณาให้พื้นที่หน้าตัดของเสา ส่วนที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กทำหน้าที่รับแรงเป็นหลัก ส่วนท่อ ซีเมนต์ไยหินทำหน้าที่เป็นแบบหล่อและถือว่ารับน้ำหนักได้น้อย มาก จึงมักไม่ถูกนำมาพิจารณา ซึ่งถือว่าปลอดภัยแต่ไม่ประหยัด โดยเฉพาะในเสาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยๆ เนื่องจากท่อซีเมนต์ ไยหินมีความสามารถในการรับแรงได้อู้อย่างบางส่วน



รูปที่ 1 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหิน

2. จุดประสงค์

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้ม ด้วยท่อซีเมนต์ไยหิน โดยเสาดังกล่าวถูกกระทำโดยแรงกดอัดใน แนวแกนของเสา (axial compressive load) โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกน กำลังรับ แรงกดอัด และลักษณะการวิบัติของเสาดังกล่าว และเพื่อ เปรียบเทียบกำลังรับแรงกดอัดของเสาที่ทดสอบได้กับสมการ การออกแบบเสาของ ว.ส.ท. โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน ที่ถูก คัดแปลงให้เหมาะสมกับเสาที่ศึกษา ในการศึกษาครั้งนี้ ตัวอย่างเสาที่ นำมาใช้ในการทดสอบมีความสูง 3 ค่าคือ 0.75, 2.30 และ 2.80 เมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ค่าคือ 0.15 และ 0.20 เมตร และมีการเสริมเหล็กข้ออ้อย SD30 ตามมาตรฐาน มอก.24-2536 6 ค่าคือ 1.50, 2.00, 2.15, 2.64, 3.53 และ 3.84% ของ พื้นที่หน้าตัดเสา

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการค้นคว้าข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใด ได้กล่าวถึงพฤติกรรมการรับแรงกดอัดในแนวแกน กำลังรับแรง กดอัด และลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูก ห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหินเลย อย่างไรก็ตาม มีงานวิจัยจำนวน หนึ่งที่ได้ทำการศึกษาเสาคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อเหล็ก [Chung et.al., 1999] และเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยแผ่น FRP หรือแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย (fiber reinforced plastic plate) [Mirmiran and Shahaway, 1997] ซึ่งโดยสรุปแล้ว พบว่า เสา คอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อเหล็กหรือถูกรัดด้วยแผ่น FRP ซึ่งมีกำลังและความแข็งแรงสูงกว่าคอนกรีต จะมีกำลัง (strength) และความเหนียว (ductility) สูงขึ้น เนื่องจากคอนกรีต

ในเสาถูกรัดรอบ (confine) ด้วยวัสดุดังกล่าว โดยที่ตัวอย่าง ทดสอบเสาที่มีค่าอัตราส่วนความชะลุดต่ำจะมีการวิบัติโดยเนื้อ วัสดุ (material failure) และเสาที่มีค่าอัตราส่วนความชะลุดสูงจะ มีการวิบัติโดยการเสถียรภาพของเสา (stability failure)

จากการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุซีเมนต์ไยหินภายใต้แรงกดอัด ในเบื้องต้น [กฤษณะ, ศุภกิจ และ ณัฐพล, 2544] พบว่า ซีเมนต์ไย หินเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมการรับแรงแบบเชิงเส้นตรง (linear) จนกระทั่งถึงจุดรับแรงกดอัดสูงสุด จากนั้น ตัวอย่างทดสอบจะ เกิดการวิบัติแบบเปราะ (brittle) แบบทันทีทันใด วัสดุซีเมนต์ไย หินเป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงกดอัดประลัย (ultimate compressive stress) ประมาณ 17.5 MPa ซึ่งใกล้เคียงกับกำลังรับแรงกดอัด ประลัยของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสม 1:2:4 โดยปริมาตร และมี ค่า modulus of elasticity ประมาณ 5.0 GPa ซึ่งต่ำกว่าค่า modulus of elasticity ของคอนกรีตประมาณ 4 เท่า นอกจากนั้นแล้ว จาก การทดสอบแรงกดอัดในแนวแกนของท่อซีเมนต์ไยหินที่กรอก คอนกรีต ซึ่งมีความสูง 0.30 เมตรและเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 และ 0.20 เมตร พบว่า ท่อซีเมนต์ไยหินดังกล่าวมีกำลังรับแรงกด อัดต่ำกว่าแท่งคอนกรีตที่มีลักษณะเดียวกันเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าท่อซีเมนต์ไยหินไม่ทำให้คอนกรีตเกิด confinement และ ท่อซีเมนต์ไยหินดังกล่าวมีความแข็งแรงประมาณ 14.0 MPa ซึ่งเป็น ค่าที่อยู่ระหว่างความแข็งแรงของคอนกรีตและวัสดุซีเมนต์ไยหิน

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (ว.ส.ท.) ได้กำหนด มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้ งานขึ้นในปี พ.ศ. 2534 เรียกว่า มาตรฐาน ว.ส.ท. 1007-34 ซึ่ง กำหนดให้น้ำหนักปลอดภัยในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริม เหล็กที่ใช้เหล็กปลอกเดี่ยวและถูกกระทำโดยแรงในแนวแกน สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P = 0.2125 f'_c A_g + 0.85 f_s A_s \quad (1)$$

โดยที่ P คือ น้ำหนักปลอดภัยในแนวแกนของเสา f'_c คือ กำลัง อัดของคอนกรีต A_g คือ พื้นที่หน้าตัดเสาทั้งหมด f_s คือ หน่วย แรงที่ยอมให้ในเหล็กเสริมตามแนวตั้งของเสามีค่าเท่ากับ 0.4 เท่า ของกำลังคราก (yielding stress) ของเหล็กเสริม A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม

4. สมการการออกแบบเสาของ ว.ส.ท. ที่ถูกดัดแปลง

ในการศึกษานี้ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะถูกห่อหุ้มด้วยท่อ ซีเมนต์ไยหิน และเนื่องจากวัสดุซีเมนต์ไยหินมีกำลังรับแรงกด อัดและความแข็งแรงต่ำกว่าคอนกรีตค่อนข้างมาก ดังนั้น ท่อ ซีเมนต์ไยหินจึงไม่ทำให้คอนกรีตที่อยู่ภายในเกิด confinement ในลักษณะเช่นเดียวกับที่เกิดในคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อเหล็ก หรือคอนกรีตที่ถูกโอบรัดด้วยแผ่น FRP และสมการการ ออกแบบเสาของ ว.ส.ท. ควรถูกดัดแปลงโดยการเพิ่มเทอมที่ เกี่ยวข้องกับท่อซีเมนต์ไยหินเท่านั้น นอกจากนั้นแล้ว ค่า ความเครียด (strain) สูงสุดที่จุดแตกหักวัสดุซีเมนต์ไยหินมีค่า ใกล้เคียงกับค่าความเครียดที่กำลังรับแรงสูงสุดของคอนกรีตคือ 0.003 ดังนั้น เพื่อความปลอดภัยและความง่ายในการใช้สมการ เทอมที่เกี่ยวข้องกับท่อซีเมนต์ไยหินจึงควรถูกคูณด้วย สัมประสิทธิ์ที่มีค่าเท่ากับเทอมที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีต ซึ่งจะหา

ให้สมการการออกแบบเสาของ ว.ศ.ท. สำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหินอยู่ในรูป

$$P = 0.2125(f'_c A_c + f'_{abs} A_{abs}) + 0.85 f_s A_s \quad (2)$$

โดยที่ A_c คือ พื้นที่หน้าตัดเสาที่เป็นคอนกรีตและเหล็กเสริม f_{abs} คือกำลังรับแรงกดอัดของท่อซีเมนต์ไยหิน และ A_{abs} คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อซีเมนต์ไยหิน

5. การทดสอบ

ในการเปรียบเทียบผลทดสอบกำลังรับแรงกดอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กกับสมการออกแบบเสาสมการที่ (1) หรือสมการที่ (2) นั้น จำเป็นต้องรู้ถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่จะนำมาใช้ในการทำตัวอย่างทดสอบ ในงานวิจัยนี้ คอนกรีตถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 เหล็กเสริมถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8 ส่วนในการทดสอบกำลังรับแรงกดอัดของท่อซีเมนต์ไยหินนั้น เนื่องจากยังไม่มีข้อกำหนดมาตรฐานการทดสอบ ดังนั้น ในการศึกษานี้ ตัวอย่างทดสอบจะถูกตัดมาจากท่อซีเมนต์ไยหินตามความยาวท่อ โดยมีขนาดกว้าง 30 มม. สูง 60 มม. หน้า 15 มม. จากนั้น ตัวอย่างทดสอบจะถูกทำการทดสอบโดยการกดอัดโดยใช้เครื่องทดสอบ UTM (universal testing machine) และทำการวัดค่าแรงและค่าการหดตัวในแนวแกนเพื่อนำมา plot กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด

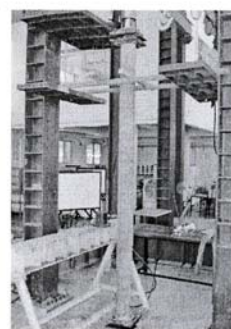
ตารางที่ 1 รายละเอียดตัวอย่างเสาที่ใช้ในการทดสอบและผลการทดสอบ

ตัวอย่างเสา	d (m)	L (m)	% เหล็ก	L/r	ค่าเฉลี่ยของแรง กดอัดสูงสุด (kN)
15-75-2.64	0.15	0.75	2.64	20	515
15-75-3.84	0.15	0.75	3.84	20	512
20-75-1.50	0.20	0.75	1.50	15	751
20-75-2.15	0.20	0.75	2.15	15	808
15-230-2.64	0.15	2.30	2.64	61.3	312
15-230-3.53	0.15	2.30	3.53	61.3	332
15-230-3.84	0.15	2.30	3.84	61.3	347
20-230-1.50	0.20	2.30	1.50	46	520
20-230-2.00	0.20	2.30	2.00	46	610
20-230-2.15	0.20	2.30	2.15	46	645
15-280-2.64	0.15	2.80	2.64	75	292
15-280-3.53	0.15	2.80	3.53	75	320
15-280-3.84	0.15	2.80	3.84	75	340
20-280-1.50	0.20	2.80	1.50	56	500
20-280-2.00	0.20	2.80	2.00	56	535
20-280-2.15	0.20	2.80	2.15	56	555

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดตัวอย่างทดสอบของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ไยหินและผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบแรงกดอัดในแนวแกน ในการศึกษานี้ ตัวอย่างทดสอบเป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดทรงกลมที่ใช้ท่อซีเมนต์ไยหินเป็นแบบหล่อเสาแบบถาวร ตัวอย่างเสาจะถูก

ทดสอบ 2 ดันต่อ 1 รูปแบบของตัวอย่างทดสอบ โดยตัวอย่างเสา มีความสูง 3 ค่าคือ 0.75, 2.30 และ 2.80 เมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัด 2 ค่าคือ 0.15 และ 0.20 เมตร และมีการเสริมเหล็กข้ออ้อย SD30 ตามมาตรฐาน มอก.24-2536 ทั้งสิ้น 6 ค่า คือ 1.50, 2.00, 2.15, 2.64, 3.53 และ 3.84% ของพื้นที่หน้าตัดเสา สัญลักษณ์ที่ใช้เรียกตัวอย่างทดสอบเสาเรียงตามเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) – ความสูงของเสา (L) – เปอร์เซ็นต์เหล็กเสริมในแนวแกน เช่น 15-75-2.64 คือ เสาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตร ความสูงของเสา 0.75 เมตร และเปอร์เซ็นต์เหล็กเสริมในแนวแกน 2.64% เป็นต้น โดยจากการวางจะเห็นได้ว่า เสาที่ใช้ในการทดสอบมีค่าอัตราส่วนความชะลูด (L/r) ทั้งสิ้น 6 ค่า ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 15.0 ถึง 75.0

รูปที่ 2 แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเสา โดยจุ่มรองรับที่ปลายบนและปลายล่างของเสาจะเป็นแบบหมุด (pin) เมื่อเสาถูกติดตั้งให้อยู่ในแนวตั้งโดยการตรวจสอบโดยใช้ลูกดิ่งและทำการจัดวางจุ่มรองรับให้แรงกระทำกระทำผ่านจุด centroid ของหน้าตัดของเสาแล้ว ทำการ preload ให้แรงกระทำต่อเสาประมาณ 1 kN เพื่อให้เสาอยู่ในสภาวะพร้อมทดสอบ จากนั้น ทำการติดตั้ง dial gauge ที่ปลายด้านบนของเสาและที่จุดกึ่งกลางความยาวของเสา เพื่อวัดค่าการหดตัว (contraction) ในแนวแกนและค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (lateral displacement) ของเสาตามลำดับ สุดท้าย ทำการให้แรงกระทำต่อเสาโดยใช้ hydraulic pumpอัดน้ำมันไฮดรอลิกไปยัง hydraulic ram อย่างช้าๆ และอ่านค่าแรงและค่าการเปลี่ยนตำแหน่ง และทำการทดสอบไปอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเสาเกิดการวิบัติ



รูปที่ 2 การติดตั้งเสาในการทดสอบแรงกดอัดในแนวแกน

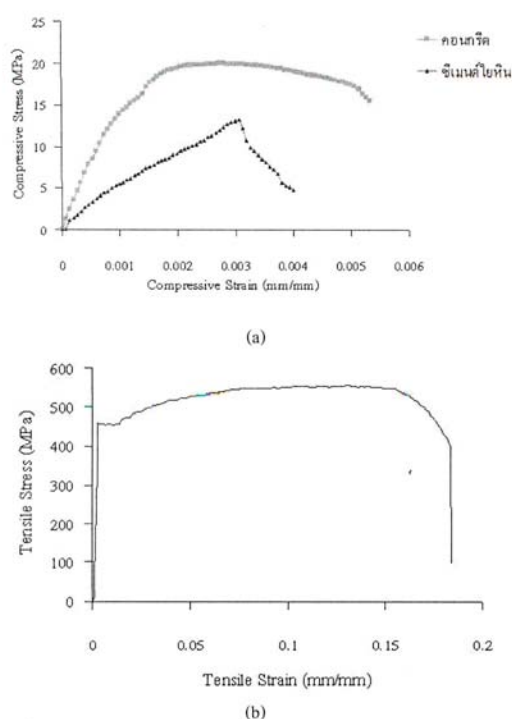
6. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

จากผลการทดสอบวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ พบว่าวัสดุต่างๆมีคุณสมบัติทางกล ดังที่แสดงในตารางที่ 2 โดยมีกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีต ซีเมนต์ไยหินและเหล็กเสริม SD30 ดังแสดงในรูปที่ 3

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุ	กำลังครากเฉื่อย (MPa)	กำลังสูงสุดเฉื่อย (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่น เฉื่อย (MPa)
คอนกรีต	-	21.5	19.7×10^3
เหล็ก	412.2	541.1	203.9×10^3
ซีเมนต์ไยหิน	-	13.2	6.1×10^3

จากการทดสอบและจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัด (compressive stress) และความเครียดกดอัด (compressive strain) ของคอนกรีต ดังที่แสดงในรูปที่ 3(a) พบว่า คอนกรีตมีพฤติกรรมก่อนข้างเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) ถึงประมาณ 50% ของหน่วยแรงสูงสุด (ultimate stress) จากนั้น จะมีรอยร้าว (microcrack) เกิดขึ้นในคอนกรีตอย่างต่อเนื่อง ทำให้กราฟความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดมีลักษณะเป็นแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) โดยมีความชันลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีค่าเท่ากับศูนย์ที่จุด ultimate stress และความเครียดที่จุดดังกล่าวโดยประมาณเท่ากับ 0.0025 มม./มม. สุดท้าย กราฟจะค่อยๆ มีความชันเป็นลบอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งคอนกรีตเกิดการวิบัติ ซึ่งเป็นการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure)

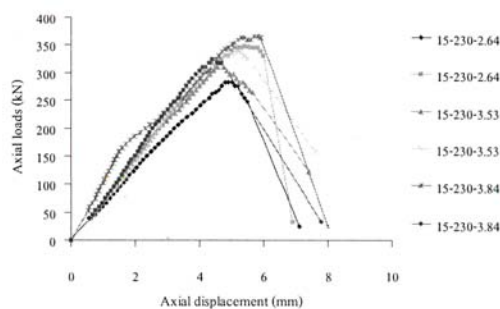


รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง stress และ strain ของคอนกรีต ซีเมนต์ใยหิน และเหล็กเสริมที่ใช้ในการศึกษา

นอกจากนั้นแล้ว จากการทดสอบและจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดและความเครียดกดอัดของซีเมนต์ใยหิน ดังที่แสดงในรูปที่ 3(a) พบว่า พฤติกรรมการรับแรงกดอัดของวัสดุซีเมนต์ใยหินก่อนข้างแตกต่างจากคอนกรีตกล่าวคือ วัสดุซีเมนต์ใยหินมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนกระทั่งถึงจุด ultimate stress จากนั้น วัสดุซีเมนต์ใยหินจะเกิดการแตกร้าวอย่างรวดเร็วดังที่เห็นได้จากการที่เส้นกราฟตกลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งลักษณะการวิบัติแบบนี้จะเป็นการวิบัติแบบเปราะ (brittle failure) นอกจากนั้นแล้วยังพบอีกด้วยว่า คอนกรีตและซีเมนต์ใยหินที่ใช้ในการศึกษานี้มีค่า ultimate strain ที่ใกล้เคียงกัน แต่มีลักษณะการวิบัติที่แตกต่างกันตามที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เราสามารถสังเกตเห็นการวิบัติของเสา

คอนกรีตเสริมเหล็กที่ห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ใยหินได้อย่างชัดเจน จากการแตกร้าวของท่อซีเมนต์ใยหิน ดังนั้น การแตกร้าวของท่อซีเมนต์ใยหินดังกล่าวทำหน้าที่เป็นเสมือนเครื่องเตือนการวิบัติของเสา

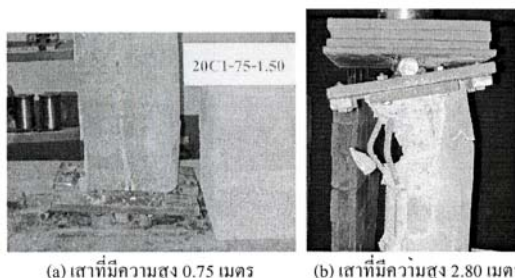
จากการทดสอบแรงดึงของเหล็กเสริมและจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึง (tensile stress) และความเครียดดึง (tensile strain) ในรูปที่ 3(b) พบว่าพฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเสริม SD30 จะเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนกระทั่งหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นถึงจุดคราก (yield point) ซึ่งมีค่าประมาณ 412 MPa และมีค่าความเครียดที่จุดครากประมาณ 0.0012 มม./มม. หลังจากนั้นแล้ว เหล็กจะเข้าสู่ช่วง yielding โดยจะมีค่าความเครียดเพิ่มขึ้น โดยที่หน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในเหล็กมีค่าเท่าเดิม เมื่อหมดช่วง yielding ที่ค่าความเครียดประมาณ 0.0200 มม./มม. แล้ว เหล็กจะสามารถรับแรงได้อีกครั้งจะเห็นได้จากการที่กราฟมีความชันเพิ่มขึ้นและจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งความชันของกราฟมีค่าเป็นศูนย์เมื่อหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กมีค่าสูงสุด (ultimate stress) ซึ่งในที่นี่มีค่าประมาณ 540 MPa หลังจากนั้นกำลังรับแรงดึงของเหล็กจะค่อยๆ ลดลงซึ่งจะเห็นได้จากการที่เส้นกราฟตกลงเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดการวิบัติ



รูปที่ 4 ตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง axial loads และ axial displacement ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกน (axial loads) และค่าการหดตัวในแนวแกน (axial displacement) ที่ได้จากการทดสอบเสาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตร และมีความสูง 2.30 เมตร ที่มีการเสริมเหล็กในปริมาณที่ต่างกัน จากกราฟจะเห็นได้ว่า ในช่วงแรก พฤติกรรมของเสาจะค่อนข้างเป็นแบบเชิงเส้นตรง (linear) โดยเหล็กเสริม คอนกรีต และซีเมนต์ใยหินจะร่วมกันรับแรงกดอัดจนกระทั่งกำลังรับแรงกดอัดของเสามีค่าประมาณ 80% ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด ซึ่งเหล็กเสริมจะมีความเครียดถึงจุด yielding strain 0.0012 มม./มม. แล้ว จากนั้น ค่าแรงกดอัดที่เพิ่มมากขึ้นจะถูกรองรับโดยคอนกรีตและซีเมนต์ใยหิน เนื่องจากคอนกรีตและซีเมนต์ใยหินมีค่า ultimate strain สูงกว่าเหล็กเสริมประมาณ 2 เท่า และพฤติกรรมของเสาจะเริ่มเป็นแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) จากนั้น เมื่อแรงกดอัดมีค่าเพิ่มขึ้นอีกจนกระทั่งทำให้คอนกรีตและซีเมนต์ใยหินมีความเครียดเท่ากับ ultimate strain 0.0025 มม./มม. แล้ว ซีเมนต์ใยหินจะเกิดการแตกร้าวอย่างรวดเร็วที่บริเวณปลายทั้งสองข้างของเสา เนื่องจากเป็นวัสดุเปราะ แต่คอนกรีตจะมีการแตกร้าวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

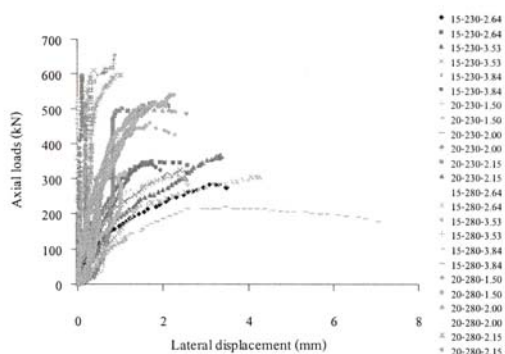
เนื่องจากมีพฤติกรรมแบบวัสดุเหนียว เมื่อกำลังรับแรงกดอัดของเสามีค่าสูงสุดที่ข้อซีเมนต์โยหินจะเกิดการแตกร้าวอย่างเห็นได้ชัดจนยิ่งขึ้น หลังจากนั้น กำลังรับแรงกดอัดของเสาจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนและรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นที่ข้อซีเมนต์โยหินจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดการวิบัติอย่างทันทีทันใด โดยมีลักษณะการวิบัติโดยเกิด yielding ในเหล็กเสริมและเกิด crushing ในคอนกรีตและข้อซีเมนต์โยหินที่บริเวณปลายของตัวอย่างทดสอบ ดังที่แสดงในรูปที่ 5(a) ซึ่งแสดงตัวอย่างการวิบัติของเสาที่มีความสูง 0.75 เมตร รูปที่ 5(b) แสดงตัวอย่างการวิบัติของเสาที่มีความสูง 2.80 เมตร จากรูปจะเห็นได้ว่า การวิบัติของเสาในกรณีนี้เกิดขึ้นไม่พร้อมกันตลอดหน้าตัดของเสา โดยการวิบัติจะเกิดขึ้นทางซีกซ้ายมือของหน้าตัดอย่างรุนแรงมากกว่าทางซีกขวามือของหน้าตัดเสา ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก การติดตั้งเสาที่มีความสูงมาก โดยเฉพาะเสาที่มีความสูง 2.30 และ 2.80 เมตรให้อยู่ในแนวตั้งทำได้ยากกว่าเสาที่มีความสูง 0.75 เมตร ทำให้เสาดังกล่าวถูกกระทำโดยแรงกดอัดเอียงศูนย์และทำให้เกิดการวิบัติดังที่กล่าวข้างต้น ซึ่งค่อนข้างแตกต่างจากการวิบัติของเสาสั้น



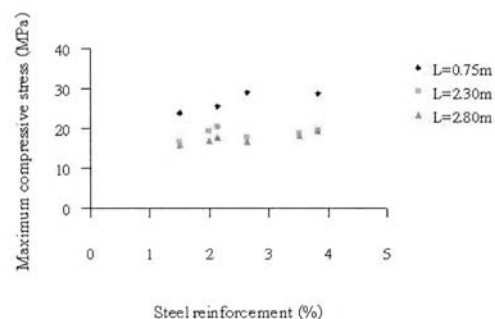
รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างการวิบัติของเสา

รูปที่ 6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดอัดในแนวแกน (axial loads) และการเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้าง (lateral displacement) ตรงกึ่งกลางความสูงของตัวอย่างทดสอบ ซึ่งจากการจะเห็นได้ว่า เมื่อแรงในแนวแกนมีค่าๆ หนึ่งแล้ว เสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดมากจะมีการเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้างมากกว่าเสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดน้อย โดยค่าการเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้างสูงสุดที่เกิดขึ้นในตัวอย่างเป็นเมื่อเสาเกิดการวิบัติมีค่าค่อนข้างน้อยคือ ไม่เกิน 7 มม. ซึ่งทำให้ค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้างมีค่าน้อยมาก และเสาจึงเกิดการวิบัติแบบเสาสั้น ตามที่ได้กล่าวไปแล้ว ในทุกอัตราส่วนความชะลูดที่ศึกษา

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดสูงสุดและปริมาณของเหล็กเสริม (steel reinforcement) ของเสา จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่อเสามีความสูงค่าๆ หนึ่งแล้ว หน่วยแรงกดอัดสูงสุดของเสาจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเหล็กเสริมที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม หน่วยแรงกดอัดสูงสุดที่เพิ่มขึ้นไม่เป็นอัตราส่วน โดยตรงกับปริมาณเหล็กเสริมที่เพิ่มขึ้นและความสัมพันธ์ดังกล่าวมีแนวโน้มที่ไม่ชัดเจน นอกจากนั้นแล้ว เมื่อเสาที่มีปริมาณของเหล็กเสริมค่าๆ หนึ่งแล้ว หน่วยแรงกดอัดสูงสุดของเสาจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเสามีความสูงลดลง



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Axial loads และ Lateral displacement

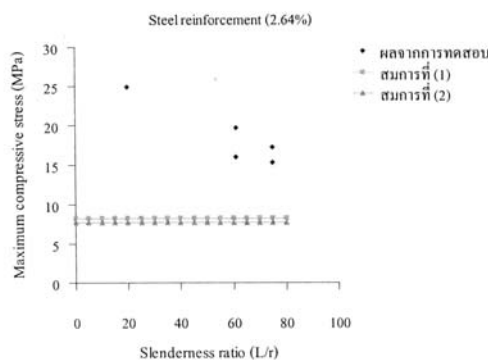


รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง maximum compressive stress และ steel reinforcement

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดสูงสุด (maximum compressive stress) และอัตราส่วนความชะลูด (slenderness ratio) ของเสาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตรและมีปริมาณเหล็กเสริม 2.64% ของพื้นที่หน้าตัดของเสา จากรูปจะเห็นได้ว่า เสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดต่ำจะมีหน่วยแรงกดอัดสูงสุดสูงกว่าเสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดที่สูงกว่า ในลักษณะเดียวกับที่สังเกตเห็นในรูปที่ 7 ทั้งนี้เนื่องมาจาก การติดตั้งเสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดสูงให้อยู่ในแนวตั้งทำได้ยากกว่าเสาที่มีอัตราส่วนความชะลูดต่ำทำให้เสาดังกล่าวถูกกระทำโดยแรงกดอัดเอียงศูนย์และเกิดการวิบัติดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

เมื่อนำค่าหน่วยแรงกดอัดสูงสุดที่คำนวณได้จากสมการของ ว.ส.ท. สำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังที่แสดงในสมการที่ (1) มาเปรียบเทียบกับค่าดังกล่าวที่คำนวณได้จากสมการของ ว.ส.ท. ที่ถูกดัดแปลง สำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์โยหิน ดังที่แสดงในสมการที่ (2) แล้ว จะพบว่า ในกรณีตัวอย่างเสาข้างต้น เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีค่าหน่วยแรงกดอัดสูงสุดมากกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์โยหินประมาณ 7.2% ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุซีเมนต์โยหินมีหน่วยแรงกดอัดสูงสุดต่ำกว่าหน่วยแรงกดอัดสูงสุดของคอนกรีต ดังนั้น เมื่อนำท่อซีเมนต์โยหินมาแทนคอนกรีตบางส่วนของหน้าตัดเสาแล้ว เสาดังกล่าวจึงมีหน่วยแรงกดอัดสูงสุดลดลง ดังนั้น สมการที่ (2) จึงเป็นสมการที่สอดคล้องกับ

การใช้งานเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยท่อซีเมนต์ใยหินมากกว่าสมการที่ (1)



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกดอัดสูงสุด และอัตราส่วนความชะลูดของเสาที่มีปริมาณเหล็กเสริม 2.64% ของพื้นที่หน้าตัดเสา

ตารางที่ 3 หน่วยแรงกดอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบกับค่าที่ได้จากสมการของ ว.ศ.ท. และค่า factor of safety ที่คำนวณได้

ตัวอย่างเสา	L/r	max. comp. stress (MPa)	ค่าจากสมการที่ (2) (MPa)	F.S.
15-75-2.64	20	24.67	9.09	3.20
15-75-3.84	20	24.53	10.77	2.61
20-75-1.50	15	21.07	7.31	3.38
20-75-2.15	15	22.67	8.22	3.17
15-230-2.64	61.3	14.95	9.09	1.94
15-230-3.53	61.3	15.90	10.34	1.77
15-230-3.84	61.3	16.62	10.77	1.77
20-230-1.50	46	14.59	7.31	2.34
20-230-2.00	46	17.11	8.01	2.47
20-230-2.15	46	18.09	8.22	2.53
15-280-2.64	75	13.99	9.09	1.81
15-280-3.53	75	15.33	10.34	1.71
15-280-3.84	75	16.28	10.77	1.73
20-280-1.50	56	14.03	7.31	2.25
20-280-2.00	56	15.01	8.01	2.16
20-280-2.15	56	15.57	8.22	2.18

จากตารางที่ 3 เมื่อนำค่าหน่วยแรงกดอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบหารด้วยค่าที่ได้จากสมการของ ว.ศ.ท. ตามสมการที่ (2) แล้ว จะได้ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสา ซึ่งพบว่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสามีค่าอยู่ระหว่าง 1.71 ถึง 3.38 โดยเสามีค่าอัตราส่วนความชะลูดต่ำๆ จะมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากกว่าเสามีอัตราส่วนความชะลูดที่สูงกว่า และมี

แนวโน้มลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนความชะลูดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปแล้ว เมื่อพิจารณาเสาที่มีความยาวในช่วงใช้งาน คือ 2.30 และ 2.80 เมตรแล้ว จะพบว่า อัตราส่วนความปลอดภัยที่คำนวณได้ มีค่าอยู่ระหว่าง 1.71 ถึง 2.53 ซึ่งน่าจะเพียงพอในการใช้งานจริง

7. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

- ในช่วงแรกพฤติกรรมของเสาจะค่อนข้างเป็นแบบเชิงเส้นตรง (linear) จนกระทั่งกำลังรับแรงกดอัดของเสามีค่าประมาณ 80% ของกำลังรับแรงกดอัดสูงสุด จากนั้น พฤติกรรมของเสาจะเริ่มเป็นแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) และเมื่อแรงกดอัดมีค่าเพิ่มขึ้นอีกจนกระทั่งทำให้คอนกรีตและซีเมนต์ใยหินมีค่าความเครียดเท่ากับ ultimate strain แล้ว ซีเมนต์ใยหินจะเกิดการแตกร้าวอย่างรวดเร็วที่บริเวณปลายทั้งสองข้างของเสา เมื่อกำลังรับแรงกดอัดของเสามีค่าสูงสุดแล้ว ท่อซีเมนต์ใยหินจะเกิดการแตกร้าวอย่างเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้น หลังจากนั้น กำลังรับแรงกดอัดของเสาจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยการเปลี่ยนตำแหน่งในแนวแกนและรอยแตกร้าวที่เกิดในท่อซีเมนต์ใยหินจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดการวิบัติอย่างทันทีทันใด
- ในการศึกษานี้ เสาทุกช่วงความยาวและทุกขนาดหน้าตัดมีพฤติกรรมการวิบัติแบบเสาสั้น โดยมีลักษณะการวิบัติที่เกิดการ yielding ในเหล็กเสริมและเกิด crushing ในคอนกรีตและท่อซีเมนต์ใยหินที่บริเวณปลายของตัวอย่างทดสอบ อย่างไรก็ตาม เมื่อเสามีความยาวมาก การวิบัติดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างไม่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของเสา เนื่องจากการติดตั้งทำได้ยาก และเป็นสาเหตุทำให้เสามีอัตราส่วนความชะลูดค่ามีหน่วยแรงกดอัดในแนวแกนสูงสุดสูงกว่าเสามีอัตราส่วนความชะลูดที่สูงกว่า
- เมื่อเสามีความสูงค่าๆ หนึ่งแล้ว หน่วยแรงกดอัดสูงสุดของเสาจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเหล็กเสริมที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม หน่วยแรงกดอัดสูงสุดที่เพิ่มขึ้น ไม่เป็นอัตราส่วนโดยตรงกับปริมาณเหล็กเสริมที่เพิ่มขึ้น
- เสามีค่าอัตราส่วนความชะลูดต่ำๆ จะมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมากกว่าเสามีอัตราส่วนความชะลูดที่สูงกว่า และมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนความชะลูดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเสามีความยาวในช่วงใช้งานมีค่าอยู่ระหว่าง 1.71 ถึง 2.53

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพมหานคร, 2540
- [2] Chung, J., Tsuda, K., Matsui, C. High-strength concrete filled square tube columns subjected to axial loading. *The seventh East Asia-Pacific conference on structural engineering & construction*, Kochi, Japan, 1999
- [3] Mirmiran, A., Shahawy, M. Behavior of concrete columns confined by fiber composites. *J. structural engineering*: 583-590, 1997
- [4] กฤษณะ เถาภะ, สุภกิจ สายประเสริฐ และ วัชรพล ทองขาว, เสาท่อซีเมนต์ใยหินรับแรงกดอัดตามแนวแกน, วิทยานิพนธ์นักศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2544

- [5] ASTM C39 Standard Test Methods for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.
- [6] ASTM E8 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.
- [7] James G. MacGregor., *Reinforced concrete mechanics and design.*, Second edition, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1992

9. ชื่อและที่อยู่ของผู้แต่ง

Saran Kumjadrok, School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakornratchasima 30000, Tel 044-224220-1

Asst. Prof. Dr. Sittichai Seangatith, School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakornratchasima 30000, Tel 044-224326

ประวัติผู้เขียน

นายศรัณย์ กำจัดโรค เกิดเมื่อวันที่ 22 พฤษภาคม พ.ศ. 2523 จบการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยนเรศวร จ. พิษณุโลก เมื่อปี พ.ศ. 2544 เนื่องจากมีความสนใจที่จะศึกษาหาความรู้เพิ่มเติมในสาขาวิชาที่ได้ศึกษามา จึงได้ตัดสินใจศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ในสาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2544 และในขณะที่ศึกษาอยู่ได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนและวิจัยในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยได้นำประสบการณ์ความรู้ที่ได้จากการเป็นผู้ช่วยสอนและวิจัยมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดีและจากการทำวิจัยนี้ทำให้ผู้วิจัยมีความเชี่ยวชาญทางด้านการทดสอบวัสดุ การออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นอย่างดี