



ประสิทธิภาพทางโครงสร้างของเสาคอนกรีตเสริมวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยภายใต้
แรงกระทำตรงศูนย์

**Structural Performance of FRP Reinforced Concrete Short Column under
Axial Loads**

อรรถวิทย์ แสงศรีจันทร์

Athawit Sangsrijun

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ ประสิทธิภาพทางโครงสร้างของเสาคอนกรีตเสริมวัสดุพอลิเมอร์เสริม
กำลังด้วยเส้นใยภายใต้แรงกระทำตรงศูนย์

ผู้เขียน นายอรรถวิทย์ แสงศรีจันทร์

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสวี)

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ถิ่นกตัญญู)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ ชันดิยวิชัย)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์ดารา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพทางโครงสร้างของเสาคอนกรีตเสริมวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยภายใต้แรงกระทำตรงศูนย์
ผู้เขียน	นายอรรถวิทย์ แสงศรีจันทร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (FRP) เป็นที่ยอมรับและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายสำหรับโครงสร้างคอนกรีตในปัจจุบัน เนื่องจากวัสดุชนิดนี้สามารถทนต่อแรงดึงได้สูงและมีความสามารถในการเสริมแรงโดยการติด ฟันฟู หรือทดแทนวัสดุเสริมกำลังในโครงสร้างคอนกรีตได้ โดยวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยชิ้นนี้เพื่อมุ่งเน้นทำการศึกษาประสิทธิภาพของเสาคอนกรีตที่ถูกเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว (GFRP) เนื่องจากวัสดุเสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วมีความทนทานต่อการกัดกร่อนที่สูง และน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กเสริมทั่วไป ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยการใส่เสาสั้นที่มีลักษณะแตกต่างกันจำนวน 12 ชุด ทำการทดสอบเสาตัวอย่างทั้งหมดภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน เพื่อมุ่งเน้นศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมในการรับแรงอัดตามแนวแกนกับตัวแปรที่ต้องการศึกษา 4 ตัวแปรดังต่อไปนี้ 1) รูปร่างของหน้าตัด (หน้าตัดเหลี่ยมและหน้าตัดกลม) 2) วัสดุเสริมกำลังหลัก (มีและไม่มี GFRP rebars) 3) วัสดุเสริมกำลังทางด้านข้าง (ปลอกเดี่ยวและปลอกเกลียว) และ 4) คอนกรีตที่ใช้หุ้มเหล็กปลอก ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุเสริมกำลัง GFRP จะรับน้ำหนักได้ประมาณร้อยละ 20-25 ของกำลังประลัยของเสาคอนกรีต ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเสนอตัวประกอบลดกำลัง (ψ) ของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ได้มาจากการทดสอบของเสาตัวอย่างทั้งหมดเพื่อวัตถุประสงค์ในการออกแบบและใช้งาน สำหรับรูปแบบการวิบัติของเสาพบว่ามีพฤติกรรมแบบเหนียวและเกิดการแตกหักของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย

คำหลัก : วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว, คอนกรีต, เสา, แรงอัดตามแนวแกน

Thesis Title	Structural Performance of FRP Reinforced Concrete Short Column under Axial Loads
Author	Mr. Athawit Sangsrijun
Major Program	Civil Engineering
Academic Year	2011

Abstract

Fiber Reinforced Polymer (FRP) composites are widely accepted in concrete structural applications due to high performance and potential for use in reinforcement, retrofit, rehabilitation and replacement. The main objective of this research is focused on structural performance of concrete columns internally reinforced with glass fiber reinforced polymer (GFRP) rebars. Glass fiber reinforced polymer materials provides non corrosion, high tensile strength, and light weight comparing with conventional steel. The concrete columns internally reinforced with GFRP rebars were studied using experimental and analytical investigations. To evaluate structural behavior and performance, twelve different series of short column specimens were conducted under axial compressive loading. All column specimens were tested to failure. For experimental investigation, there are four parameters of column specimens as follows: 1) cross section (square and circular), 2) main reinforcement (GFRP rebars), 3) lateral reinforcement (tied and spiral) and 4) concrete cover. The effects of the mentioned parameters were comprehensively discussed herein. The experimental results presented that GFRP rebars contributed to 20-25 % of the ultimate concrete column strength. It was also found that column failure mode was classified as ductile failure with rupture of GFRP rebars. For preliminary design purpose, the FRP reduction factor (ψ) and column ductility based on this experimental study were determined and compared with the previous research data.

Keywords : Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP), Concrete, Column, Axial load

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสรี ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ การสนับสนุนช่วยเหลือในการศึกษาค้นคว้าวิจัยและข้อเสนอแนะในการแก้ปัญหา ตลอดจนตรวจสอบเนื้อหาและรูปแบบของวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ลิ้มกัตถัญญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ ชันติวิชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำเพื่อใช้ในการแก้ไขและปรับปรุงให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัยที่ได้สนับสนุนทุนในการวิจัย ตลอดจนคณาจารย์และบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ทั้งในด้านของคำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยด้วยดีเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ และคุณแม่ ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนทุนการศึกษา ขอขอบคุณพี่และน้อง เพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจและคอยให้คำปรึกษาตลอดมา

อรรณวิทย์ แสงศรีจันทร์

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(9)
รายการภาพประกอบ	(10)
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและแรงจูงใจของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 กระบวนการวิจัย	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวข้อง	
2.1 พฤติกรรมของเสาคอนกรีต	6
2.2 ผลของประเภทการเสริมกำลังทางด้านข้าง	8
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
3 ตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง	
3.1 รายละเอียดของเสาตัวอย่าง	18
3.2 การเตรียมตัวอย่าง	19
3.3 การติดตั้งอุปกรณ์วัด	25
3.4 ขั้นตอนการหล่อตัวอย่าง	27
3.5 เตรียมทดสอบ	30
3.6 การทดสอบวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	32
4 ผลการทดสอบ	
4.1 ผลการทดสอบภายใต้แรงอัดตามแนวแกน	35
4.2 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่1	38

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 2	41
4.4 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 3	43
4.5 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 4	46
4.6 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 5	49
4.7 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 6	52
4.8 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 7	55
4.9 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 8	58
4.10 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 9	61
4.11 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 10	64
4.12 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 11	67
4.13 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 12	70
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาและการวิบัติของเสา	73
5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ	
5.1 ผลของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย	77
5.2 ผลของเหล็กปลอกเมื่อรับแรงกระทำตามแนวแกน	81
5.3 ผลของคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก	83
5.4 การประเมินตัวคูณปรับลดกำลัง	90
5.5 เปรียบเทียบการทำนายกำลังอัดประลัย	95
6 สรุปผลการทดสอบ	
6.1 สรุปผลการศึกษา	100
6.2 ข้อเสนอแนะ	101
บรรณานุกรม	103
ภาคผนวก ก.	105
ภาคผนวก ข.	144
การเผยแพร่วิทยานิพนธ์	151
ประวัติผู้เขียน	158

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สัญลักษณ์แสดงแทนเสาตัวอย่าง	18
3.2 รายละเอียดตัวอย่าง	21
3.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดประลัยของตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐาน	27
4.1 กำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา	36
5.1 กำลังรับแรงอัดประลัยสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	92
5.1 ตารางแสดงตัวคูณปรับลดกำลังของเสาตัวอย่าง	94
5.2 เปรียบเทียบกำลังอัดประลัยตามแนวแกน	96
5.3 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดประลัยกับผลการทดลองของ Ehab	99

รายการรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเปลี่ยนรูปของเสาคอนกรีต	7
2.2	แสดงแผนภาพวัตถุอิสระของแรงที่บีบรัดของหน้าตัดประเภทต่างๆ	8
2.3	ลักษณะการจัดเรียงเหล็กปลอกในงานวิจัยของ Ahmed	14
2.4	การจัดเรียงเหล็กปลอกในการทดสอบของ Ehab	16
3.1	หน้าตัดของแบบไม้ที่ใช้ในการหล่อตัวอย่าง	22
3.2	โครงเหล็ก เสาตัวอย่าง และแบบไม้ที่ใช้หล่อ	22
3.3	รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ	23
3.4	ก๊ีบที่ใช้ยึดติดระหว่างเหล็กปลอกกับแบบหล่อ	24
3.5	การวางเหล็กปลอกในกรณีไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก	24
3.6	ตำแหน่งของสเตรนเกจวัดความเครียดในโครงเหล็ก	25
3.7	การติดตั้งสเตรนเกจที่เหล็กปลอกในเสา	26
3.8	โครงเหล็กที่แบบต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย	28
3.9	ตัวอย่างที่หล่อเพื่อเตรียมทดสอบกำลังอัด	28
3.10	รูปตอนเทคอนกรีตลงแบบหล่อ	29
3.11	การบ่มตัวอย่างเสาในงานวิจัย	29
3.12	เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine	30
3.13	การเตรียมการทดสอบตัวอย่าง	31
3.14	เครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger) รุ่น EDX 100 ยี่ห้อ KYOWA	31
3.15	วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer – FRP) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร	33
3.16	แป๊ปเหล็กที่ใช้กาวแรงยึดสูงยึดติดกับวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย	33
3.17	การทดสอบหาแรงดึงของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย	34
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุเสา SFsc	38
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา SFsc	39

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.3	การวิบัติของเสากลุ่ม SFsc	40
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุเสา SNsc	41
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา SNsc	42
4.6	การวิบัติของเสากลุ่ม SNsc	43
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุเสา SFsn	44
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา SFsn	44
4.9	การวิบัติของเสากลุ่ม SFsn	46
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุเสา SNsn	47
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา SNsn	47
4.12	การวิบัติของเสากลุ่ม SNsn	49
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุเสา CFsc	50
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา CFsc	50
4.15	การวิบัติของเสากลุ่ม CFsc	52
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุเสา CNsc	53
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา CNsc	53
4.18	การวิบัติของเสากลุ่ม CNsc	55
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุเสา CFsn	56
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา CFsn	56
4.21	การวิบัติของเสากลุ่ม CFsn	58
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุเสา CNsn	59
4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา CNsn	59
4.24	การวิบัติของเสากลุ่ม CNsn	61
4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุเสา SFtc	62
4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา SFtc	62
4.27	การวิบัติของเสากลุ่ม SFtc	64

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุเสา SNtc	65
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา SNtc	65
4.30 การวิบัติของเสากลุ่ม SNtc	67
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุเสา SFtn	68
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา SFtn	68
4.33 การวิบัติของเสากลุ่ม SFtn	70
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุเสา SNtn	71
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา SNtn	71
4.36 การวิบัติของเสากลุ่ม SNtn	73
4.38 การแบ่งพื้นที่ในการคำนวณความเหนียวของเสา	75
4.39 เปรียบเทียบความเหนียวของเสาตัวอย่าง	78
5.1 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาเหลี่ยมปลอกเกลียว	79
5.2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสากลมปลอกเกลียว	80
5.3 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาเหลี่ยมปลอกเดี่ยว	80
5.4 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาเหลี่ยม	82
5.5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปของเสาเหลี่ยมปลอกเกลียว	83
5.6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปของเสาเหลี่ยมปลอกเกลียว	85

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.7	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปของเสากลม ปลูกเกลียว	86
5.8	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปของเสากลม ปลูกเกลียว	87
5.9	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปของเสาเหลี่ยม ปลูกเดี่ยว	88
5.10	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปของเสาเหลี่ยม ปลูกเดี่ยว	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและแรงจูงใจของงานวิจัย

โครงสร้างขององค์อาคารส่วนใหญ่ในปัจจุบันมักทำการก่อสร้างจากวัสดุวิศวกรรมดั้งเดิม(Conventional Engineering Materials) เช่น เหล็ก คอนกรีต ซึ่งเกิดปัญหาที่คล้ายกันคือโครงสร้างเกิดการกัดกร่อนขึ้น สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปแล้วอายุการใช้งานของโครงสร้างประเภทนี้จะมีอายุการใช้งานเฉลี่ยอยู่ที่ 50 ปี ขึ้นอยู่กับสถานที่ตั้งและสภาพแวดล้อมของบริเวณ โดยรอบโครงสร้างนั้นๆ แต่หากโครงสร้างดังกล่าวตั้งอยู่ในบริเวณที่มีสภาพแวดล้อมรุนแรงก็จะก่อให้เกิดการกัดกร่อนตามมาหลังจากผ่านการใช้งานไปแล้วระยะเวลาไม่นานนัก ปัญหาการกัดกร่อนเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ โดยมากมักจะเกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมที่มีความรุนแรงหลากหลายรูปแบบตั้งแต่เขตเมือง บริเวณชายฝั่งทะเล แหล่งโรงงาน อุตสาหกรรมเคมี โรงบำบัดน้ำเสียและมลพิษต่างๆ การกัดกร่อนจะสร้างความเสียหายและลดอายุการใช้งานของโครงสร้างตลอดจนทำให้เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพการใช้งานลงอย่างมาก โดยโครงสร้างจะมีแนวโน้มในการเสื่อมสภาพเร็วขึ้น

สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งเป็นประเภทโครงสร้างของอาคารส่วนใหญ่ในประเทศไทยและประเทศกำลังพัฒนาต่างๆ การกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีต ก่อให้เกิดการแตกร้าวของคอนกรีตโดยรอบซึ่งส่งผลกระทบต่อกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างคอนกรีต เนื่องจากการเกิดสนิมจะทำให้เกิดแรงดันต่อคอนกรีตบริเวณรอบๆ เหล็กเสริม เมื่อเหล็กเสริมเกิดการกัดกร่อนเป็นสนิมทำให้น้ำตืดของเหล็กลดลงเนื่องจากสนิมเหล็กจะมีปริมาณมากขึ้น ทำให้คอนกรีตเกิดการหลุดร่อน (Delamination) และการกะเทาะ (Spalling) จากผลดังกล่าวย่อมทำให้กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลง และเกิดการวิบัติอย่างฉับพลันได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการโค้งตัวและสติฟเนส (Stiffness) ของโครงสร้างจะมีค่าลดลง

จากการศึกษาในอดีตที่ผ่านมาพบว่าการแตกร้าวและการกะเทาะของคอนกรีตเนื่องจากการกัดกร่อนของวัสดุเสริมประเภทโลหะในคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น กำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (Concrete Tensile Strength) คุณภาพของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม แรงยึด

เหนียวหรือสภาพของผิวสัมผัสของเหล็กเสริมกับคอนกรีต เส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเสริมกำลัง และ เปอร์เซ็นต์ของการกัดกร่อน โดยน้ำหนักของวัสดุเสริมกำลัง เป็นต้น

สำหรับองค์อาคารเสา เนื่องจากเสาเป็นส่วนที่สำคัญของโครงสร้างซึ่งทำหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุกจากองค์อาคารอื่นๆ (คานและแผ่นพื้นในชั้นต่างๆ) โดยทำหน้าที่ส่งถ่ายน้ำหนักบรรทุกลงสู่ฐานราก ซึ่งหากเสาดันใดต้นหนึ่งเกิดการวิบัติแล้วก็จะอาจทำให้ห้องค์อาคารต่างๆ ของโครงสร้างซึ่งมีความเกี่ยวเนื่องกันเกิดความเสียหายขึ้นหรืออาจจะส่งผลทำให้โครงสร้างทั้งหมดเกิดการพังทลายลงมาได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าปัญหาการกัดกร่อนของวัสดุเสริมกำลังประเภทโลหะในเสา โครงสร้าง เป็นปัญหาที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในงานทางด้านวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างพื้นฐาน ถึงแม้ในปัจจุบันการใช้เทคโนโลยีในการป้องกันการกัดกร่อนและการซ่อมบำรุงอยู่อย่างเสมอจะสามารถช่วยบรรเทาปัญหาดังกล่าวไปได้บ้าง อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวเป็นเพียงแต่การชะลอเวลาการกัดกร่อนออกไปและมีความสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการดูแลและบำรุงรักษาตลอดอายุการใช้งานโครงสร้างเป็นมูลค่าสูง ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว จึงมีการนำเอาแนวคิดการใช้วัสดุประกอบ (Composite Materials) ประเภทวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer - FRP) มาใช้เป็นวัสดุเสริมกำลังหลักแทนวัสดุเสริมกำลังประเภทโลหะดั้งเดิม โดยทั่วไปแล้ววัสดุประกอบประเภทพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยมีความเหมาะสมในการใช้งานทางด้านวิศวกรรมโยธาโดยเฉพาะงานโครงสร้างคอนกรีต เนื่องจาก

- มีคุณสมบัติเชิงกลที่เหนือกว่าวัสดุวิศวกรรมดั้งเดิมหลายประการ เช่น มีค่าอัตราส่วน สติฟเนสและกำลัง (ต่อน้ำหนัก) สูงกว่าวัสดุวิศวกรรมดั้งเดิม
- มีความเสถียรเชิงรูปร่างขณะใช้งานที่อุณหภูมิสูง
- มีความทนทานต่อการกัดกร่อนจากสภาพแวดล้อมและสภาพอากาศได้ดีกว่าโลหะที่ใช้ งานโดยทั่วไป
- มีความเป็นฉนวนไฟฟ้า มีการดูดซับความชื้นต่ำ
- มีความทนทานต่อการกระแทกและแรงกระทำแบบวัฏจักรได้ดี
- ประหยัดพลังงานในกระบวนการผลิตมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่มาจากโลหะ

จากลักษณะเด่นของวัสดุประกอบพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้มีนักวิจัยเป็นจำนวนมากที่มีความสนใจในแนวคิดการนำเอาวัสดุประกอบพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยมาใช้ทดแทนวัสดุเสริมกำลังหลักภายในโครงสร้างคอนกรีต เช่น คาน และแผ่นพื้น เป็นต้น เพื่อลดปัญหาการกัดกร่อน เนื่องจากวัสดุเสริมกำลังประเภทดังกล่าวนี้มี

ความสามารถในการป้องกันการกักร่อนได้ดีมาก ทำให้อายุของโครงสร้างคอนกรีตยาวนานขึ้นกว่าโครงสร้างคอนกรีตที่เสริมวัสดุโลหะดั้งเดิม

อย่างไรก็ตามในส่วนของเขาโครงสร้างนั้น ความรู้ความเข้าใจในพฤติกรรมของเสาคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยยังไม่เป็นที่เข้าใจอย่างชัดเจนตลอดจนงานวิจัยในส่วนดังกล่าวที่ผ่านมามีจำนวนค่อนข้างจำกัด ซึ่งการประยุกต์ใช้งานวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังภายในเสายังจำกัดและอยู่ในช่วงการวิจัยเบื้องต้นเท่านั้น เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในสนามได้จริงตลอดจนเป็นการสนองตอบความต้องการการแก้ปัญหาการกักร่อนในงานโครงสร้างซึ่งจะช่วยลดภาระการดูแลรักษาและซ่อมแซมอย่างมหาศาลในอนาคต ตลอดจนเป็นการสร้างองค์ความรู้ทางวิศวกรรมใหม่ๆ จึงเป็นความจำเป็นอย่างยิ่งในการดำเนินการศึกษาวิจัยนี้

1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย

วัตถุประสงค์หลักของโครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นในการประเมินประสิทธิภาพทางโครงสร้างและศึกษาพฤติกรรมเสาคอนกรีตเสริมวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยภายใต้แรงกระทำตรงศูนย์โดยโครงการวิจัยนี้สามารถแบ่งวัตถุประสงค์ออกเป็นส่วนย่อยๆ ได้ดังต่อไปนี้

- เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมและความสามารถในการรับแรงของเสาตัวอย่าง
- เพื่อศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของเสาโครงสร้างภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนและลักษณะการวิบัติของเสาที่ใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลักแทนเหล็กยื่น โดยมีรูปแบบการเสริมกำลังด้านข้าง (Lateral Reinforcement) ที่แตกต่างกัน
- เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างของพฤติกรรมและความสามารถในการรับกำลังของเสาโครงสร้างซึ่งมีรูปแบบของหน้าตัด คอนกรีตหุ้มผิว ที่แตกต่างกัน
- เพื่อนำเสนอแนวทางการออกแบบและขอบเขตการใช้งานของเสาคอนกรีตเสริมวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองภายใต้แรงอัดตามแนวแกนของเสาซึ่งมีอัตราส่วนความชะลุดำอยู่ในเกณฑ์ของเสาสั้น (Short Column) โดยใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforce Polymer Rebar) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

เป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบไม้ในการทำแบบเตรียมหล่อเสาตัวอย่าง สำหรับแบบที่มีรูปหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีด้วยกันสองขนาดคือ

- 1) ขนาด 12.5x12.5 เซนติเมตร สำหรับเสาที่ปราศจากคอนกรีตหุ้มจำนวน 13 ตัวอย่าง
- 2) ขนาด 15x15 เซนติเมตร สำหรับเสาที่มีคอนกรีตหุ้ม จำนวน 13 ตัวอย่าง

ในส่วนของเสาน้ำตัดกลมจะดำเนินการทำแบบหล่อด้วยท่อพอลิไวนิลคลอไรด์ โดยมีหน้าตัดสองขนาดคือ

- 1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร สำหรับเสาซึ่งปราศจากผิวคอนกรีตหุ้ม จำนวน 7 ตัวอย่าง
- 2) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สำหรับเสาซึ่งมีผิวคอนกรีตหุ้ม จำนวน 7 ตัวอย่าง

เสาที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมดมีความสูงประมาณ 50 เซนติเมตร (รายละเอียดต่างๆของเสาได้แสดงไว้ในบทที่ 3) คอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยมีกำลังอัดเฉลี่ยประมาณ 270 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐาน) ที่อายุ 28 วันภายใต้การบ่มชื้นในห้องปฏิบัติการ การทดสอบและการวิเคราะห์ผลจะดำเนินการในห้องปฏิบัติการทางโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

1.4 กระบวนการวิจัย

เพื่อให้การศึกษาและวิเคราะห์ผลของโครงการวิจัยที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเป็นไปอย่างถูกต้องและเป็นระบบ ตลอดจนการนำเสนอผลที่ได้จากการทดลองเพื่อนำไปใช้งานในอนาคต กระบวนการวิจัยมีขั้นตอนต่างๆสามารถสรุปได้อย่างย่อๆ ดังต่อไปนี้

- ทำการศึกษาและรวบรวมบทความ งานวิจัย สิ่งพิมพ์ และผลของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการวางแผนและเปรียบเทียบผลจากการทำโครงการวิจัยตลอดจนการศึกษา ทฤษฎีและข้อกำหนดต่างๆ ที่จำเป็นต่อการดำเนินงานวิจัย
- ทำการออกแบบการทดสอบและจัดเตรียมเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ ตลอดจนการเตรียมแบบต่างๆ ที่ใช้ในการหล่อตัวอย่าง
- ทำการจัดเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการและเตรียมการทดสอบโดยการติดตั้งเครื่องมือวัดการตอบสนองต่างๆ ที่ตัวอย่างเสา

- ทำการทดสอบตัวอย่างและวิเคราะห์ผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ โดยการทดสอบตัวอย่างทั้งหมดดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการ โครงสร้างและวัสดุของภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- นำผลการทดสอบไปทำการวิเคราะห์และศึกษาความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องของตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบตลอดจนทำการสรุปผลการศึกษาและวิเคราะห์ เพื่อนำเสนอผลการวิจัยของโครงการ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยเกี่ยวข้อง

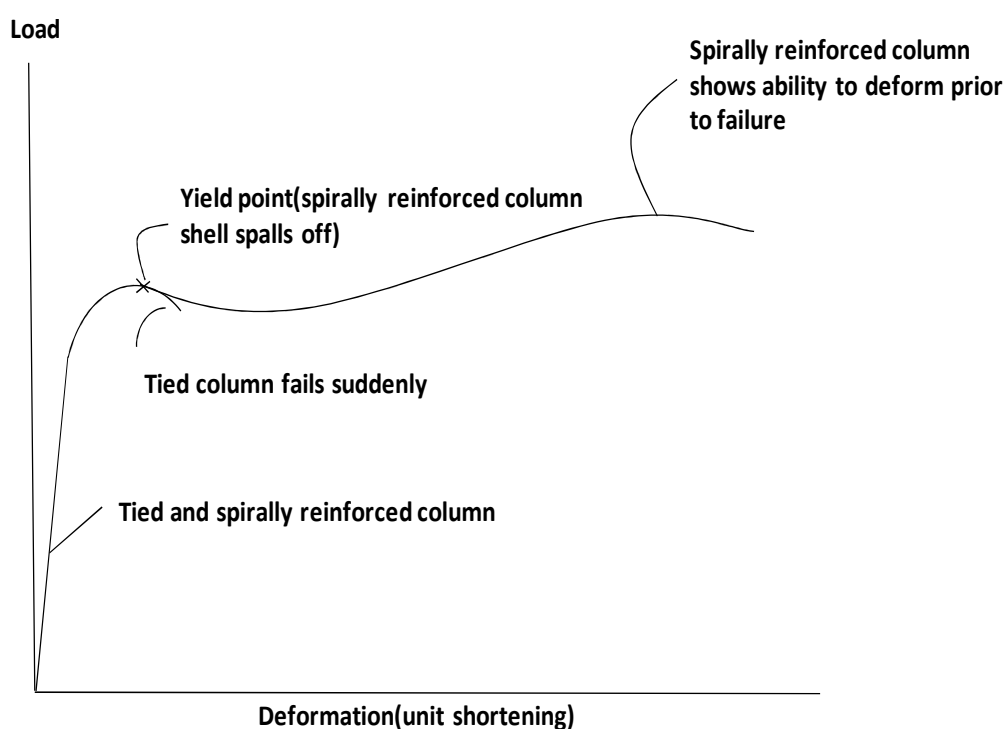
เสา (Column) หมายถึงองค์อาคารที่อยู่ในแนวดิ่งโดยทำหน้าที่รับแรงอัดตามแนวแกนเป็นหลัก ลักษณะหน้าตัดของเสามีหลายประเภท เช่น หน้าตัดกลม หน้าตัดจัตุรัส หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เป็นต้น สมาคมคอนกรีตแห่งสหรัฐอเมริกา (ACI) ได้แบ่งเสาคอนกรีตออกเป็นสองประเภทใหญ่คือ 1) เสาสั้น หมายถึง เสาที่มีอัตราส่วนความความชะลูด (Slenderness Ratio) ต่ำ โดยทั่วไปเสาสั้นจะมีพฤติกรรมการวิบัติเนื่องมาจากการวิบัติของวัสดุเป็นหลัก 2) เสายาว หมายถึง เสาที่มีอัตราส่วนความความชะลูด (Slenderness Ratio) สูง การวิบัติของเสายาวเกิดขึ้นเนื่องจากการโก่งเดาะทางด้านข้างก่อนที่วัสดุจะเกิดการวิบัติ ดังนั้นกำลังรับน้ำหนักของเสายาวจึงมีค่าน้อยกว่าเสาสั้นที่มีขนาดรูปหน้าตัดเช่นเดียวกัน ในบทนี้จะได้กล่าวถึงรายละเอียดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเสาคอนกรีตที่ถูกเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นดัดต่อไป

2.1 พฤติกรรมของเสาคอนกรีต

สำหรับเสาคอนกรีตสั้นที่ปราศจากเหล็กเสริมมีพฤติกรรมภายใต้แรงอัดตามแนวแกนคล้ายคลึงกับพฤติกรรมของการทดสอบแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐาน โดยมีการหดตัวตามแนวแกนและมีการขยายตัวออกทางด้านข้างอันเนื่องมาจากผลของอัตราส่วนปัวร์ซอง โดยทั่วไปหน่วยแรงอัดสูงสุดในเสาคอนกรีตสั้นมีค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 85 ของกำลังอัดประลัยสูงสุดของคอนกรีต (f_c') และมีลักษณะการวิบัติของเสาเป็นการปริแยกออกตามแนวแกนของเสาหรือแบบเนียนอกในระนาบเอียง

สำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีทั้งส่วนของคอนกรีตและเหล็กเสริมทำหน้าที่ในการรับน้ำหนักร่วมกัน สำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมเหล็กเฉพาะตามแนวแกนเท่านั้น เมื่อรับน้ำหนักกระทำจนกระทั่งวิบัติจะมีพฤติกรรมการวิบัติในลักษณะของวัสดุเปราะ (Brittle Materials) โดยการวิบัติที่เกิดขึ้นคล้ายคลึงกับกรณีของเสาคอนกรีตสั้น เมื่อเสาอยู่ภายใต้แรงกระทำจนกระทั่งคอนกรีตหุ้มผิวเหล็กตามแนวแกนแตกออก ทำให้เหล็กเสริมหลักตามแนวแกนเกิดการโก่งเดาะทางด้านข้างเนื่องจากผิวคอนกรีตหุ้มที่ยึดรั้งไว้ขาดหายไป ส่งผลให้เสาเกิดการวิบัติอย่างรวดเร็ว

จากสาเหตุดังกล่าวจึงจำเป็นต้องมีการเสริมเหล็กตามขวางหรือเหล็กปลอกเพื่อช่วยในการยึดรั้งเหล็กตามแนวแกนไว้ นอกจากนี้การเสริมเหล็กเสริมตามขวางทำให้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีพฤติกรรมแบบเหนียว (Ductile) ก่อนการวิบัติและยังมีส่วนช่วยในการยึดรั้งให้เหล็กตามแนวแกนอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการในขณะที่ทำการหล่อ สำหรับเหล็กเสริมตามขวางหรือเหล็กปลอกโดยทั่วไปมีด้วยกันสองประเภทคือ 1) เหล็กปลอกเดี่ยว และ 2) เหล็กปลอกเกลียว ในกรณีที่มีการเสริมเหล็กทางขวางที่แตกต่างกัน สำหรับเสาคอนกรีตที่มีขนาดและหน้าตัดของคอนกรีตตลอดจนปริมาณเหล็กเสริมที่เท่ากัน พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยการหดตัวกับน้ำหนักกระทำมีลักษณะเป็นเชิงเส้นในช่วงความเค้นในคอนกรีตมีค่าไม่เกิน $0.5f_c'$ โดยประมาณ อย่างไรก็ตามเมื่อเสารับน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น โดยความเค้นในคอนกรีตมีค่าสูงเกินกว่า $0.5f_c'$ ลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเป็นเส้นโค้ง และพบว่าเสาคอนกรีตที่มีการเสริมเหล็กปลอกเกลียวจะมีกำลังต้านทานแรงอัดและมีการเปลี่ยนแปลงรูปในช่วงการวิบัติสูงกว่าเนื่องมาจากผลของการบีบรัด (Confinement) จากเหล็กปลอกที่มีต่อเนื้อรอบแกนเสาตลอดความยาวดังแสดงในรูปที่ 2.1

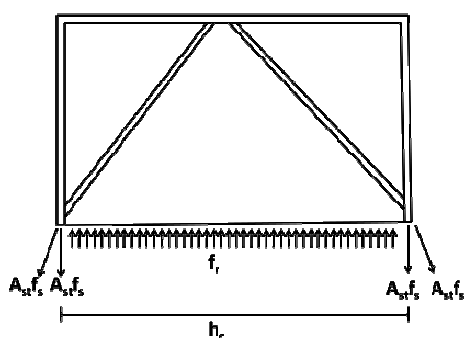


รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเปลี่ยนแปลงรูปของเสาคอนกรีต

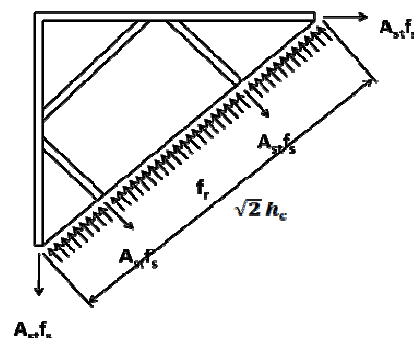
(MacGregor, 1997)

2.2 ผลของการเสริมกำลังทางด้านข้าง

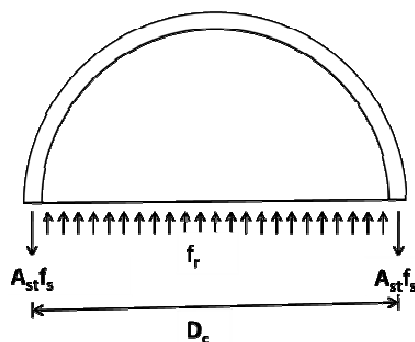
ในกรณีการรับแรงอัดของเสา โครงสร้างที่มีการโอบรัดด้วยเหล็กเสริมตามขวางจะทำให้ความเค้นบีบรัดกระทำต่อแกนเสา (Lateral Confining Pressure : f_r) ซึ่งความเค้นที่เกิดขึ้นนี้จะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปแบบการเสริมเหล็กทางด้านข้างและประเภทของหน้าตัดเสา



ก) แผนภาพวัตถุอิสระของเหล็กปลอกตามแนวขวางของเสาเหลี่ยม



ข) แผนภาพวัตถุอิสระของเหล็กปลอกตามแนวทแยงของเสาเหลี่ยม



ค) แผนภาพวัตถุอิสระของเหล็กปลอกตามแนวขวางของเสากลม

รูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพวัตถุอิสระของแรงที่บีบรัดเสาหน้าตัดประเภทต่างๆ (Manrique, 1979)

- ในกรณีเสาหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเสริมเหล็กทางด้านข้างดังแสดงในรูปที่ 2.2(ก) ความเค้นบีบรัดสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.1)

$$f_r = \frac{(2+\sqrt{2})A_{st}f_s}{h_c S} \quad (2.1)$$

- ในกรณีเสาหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเสริมเหล็กทางด้านข้างดังแสดงในรูปที่ 2.2(ข) ความเค้นบีบรัดสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.2)

$$f_r = \frac{(1+\sqrt{2})A_{st}f''_s}{h_c S} \quad (2.2)$$

- ในกรณีเสาหน้าตัดเป็นรูปวงกลมเสริมเหล็กทางด้านข้างดังแสดงในรูปที่ 2.2(ค) ความเค้นบีบอัดสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.3)

$$f_r = \frac{2A_{st}f''_s}{D_c S} \quad (2.3)$$

โดยที่ A_{st} คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมทางด้านข้าง h_c คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเสาสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งวัดถึงขอบนอกของเหล็กปลอก S คือ ระยะเรียงของเหล็กเสริมทางด้านข้าง f''_s คือ ความเค้นดึงในเหล็กเสริมทางด้านข้าง และ D_c คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสากลมโดยวัดจากขอบนอกของเหล็กเสริมทางด้านข้าง (Manrique, 1979)

อย่างไรก็ตามในกรณีของเสาคอนกรีตซึ่งเสริมเหล็กปลอกเกลียวจากการทดลองพบว่าความเค้นบีบอัดมีค่าเพิ่มมากขึ้นและเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังต้านทานเมื่อไม่เกิดความเค้นบีบอัด โดยมีค่าประมาณ 4.1 เท่าของความเค้นบีบอัดในสมการที่ (2.3)

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 1977 Vallenat และคณะ ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กดังต่อไปนี้ 1) เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีคอนกรีตหุ้มผิวโดยมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดความกว้าง 229 มิลลิเมตร และมีความยาวของเสา 762 มิลลิเมตร และ 2) เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีคอนกรีตหุ้มผิวโดยมีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดความกว้าง 254 มิลลิเมตร และมีความยาวของเสา 762 มิลลิเมตร จำนวนเสาคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด 14 ตัวอย่าง ซึ่งในการศึกษาดังกล่าวนี้ผู้วิจัยได้ทำการพิจารณาผลของเหล็กยื่น คอนกรีตหุ้ม และเหล็กเสริมตามขวางภายใต้การรับน้ำหนักแบบตรงศูนย์ ผลที่ได้ทำให้ทราบว่า การโค้งเดาะของเหล็กยื่นจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อความเครียดในคอนกรีตมีค่าอยู่ระหว่าง 0.023 - 0.030 และคอนกรีตหุ้มจะเริ่มหลุดร่อนเมื่อความเครียดในคอนกรีตมีค่าประมาณ 0.003 นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเหล็กเสริมตามขวางจะช่วยให้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนที่เสาจะเกิดการวิบัติ

ต่อมาในปี ค.ศ. 1979 Manrique และคณะ ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมและความสัมพันธ์ของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับน้ำหนักกระทำแบบตรงศูนย์ โดยมีตัวแปรหลักที่ทำการศึกษาในงานวิจัยดังกล่าวคือ 1) เหล็กยื่น 2) ลักษณะของเหล็กเสริมตามขวาง และ 3) ผลกระทบของเหล็กเสริมกำลังหลักหรือเหล็กยื่นที่มีผลต่อกำลังการรับน้ำหนักของเสาตัวอย่าง งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบเสาตัวอย่างจำนวน 30 ตัวอย่าง โดยมีลักษณะรูปทรงของเสาคอนกรีต

เสริมเหล็กที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบหลักๆ คือ เสาหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส และ เสาหน้าตัดกลม อย่างไรก็ตามรูปแบบดังกล่าวสามารถแบ่งย่อยได้ดังนี้

- เสาหน้าตัดจัตุรัสขนาด 25.4 เซนติเมตร มีคอนกรีตหุ้ม และเหล็กเสริมเป็นเหล็กปลอกเดี่ยว
- เสาหน้าตัดจัตุรัสขนาด 25.4 เซนติเมตร มีคอนกรีตหุ้ม และเหล็กเสริมเป็นเหล็กปลอกเกลียว
- เสาหน้าตัดจัตุรัสขนาด 22.9 เซนติเมตร ไม่มีคอนกรีตหุ้ม และเหล็กเสริมเป็นเหล็กปลอกเดี่ยว
- เสาหน้าตัดจัตุรัสขนาด 22.9 เซนติเมตร ไม่มีคอนกรีตหุ้ม และเหล็กเสริมเป็นเหล็กปลอกเกลียว
- เสาหน้าตัดกลมขนาด 27.9 เซนติเมตร มีคอนกรีตหุ้ม และเหล็กเสริมเป็นเหล็กปลอกเกลียว
- เสาหน้าตัดกลมขนาด 25.4 เซนติเมตร ไม่มีคอนกรีตหุ้ม และเหล็กเสริมเป็นเหล็กปลอกเกลียว

โดยที่เสาตัวอย่างทั้งหมดมีความสูง 76.2 เซนติเมตร จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่า ลักษณะรูปแบบของเหล็กปลอกมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตและมีส่วนช่วยทำให้เสา คอนกรีตเสริมเหล็กมีพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนการวิบัติเช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Vallenat และคณะ

ในปี ค.ศ. 1992 Monti และ Nuti ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมและความสัมพันธ์ของการรับแรงอัดกับการโก่งคาะภายใต้การรับแรงอัดในทิศทางเดียว ซึ่งได้ทำการทดสอบโดยการใช้เหล็กเสริมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง จำนวน 3 ขนาด ดังต่อไปนี้คือ 16 มิลลิเมตร 20 มิลลิเมตร และ 24 มิลลิเมตร ซึ่งกำหนดให้ค่าอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กเสริม (ความยาว/ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง) มีค่าเท่ากับ 5, 8 และ 11 ตามลำดับ ผลการทดสอบพบว่าเหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนความชะลูดมากกว่า 5 จะเกิดการโก่งคาะขึ้นขณะรับแรงอัด อย่างไรก็ตามเหล็กเสริมที่มีอัตราส่วนความชะลูดน้อยกว่า 5 ไม่พบว่าการโก่งคาะในขณะรับแรงอัด

ต่อมาในปี 2001 Bayrak และ Sheikh ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักของเสา คอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการทดสอบภายใต้แรงกระทำในแนวตั้ง โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กยื่น ซึ่งในการทดสอบได้ทำการกำหนดอัตราส่วนความชะลูดของเหล็กยื่นให้อยู่ระหว่าง 4 ถึง 10 และมีจำนวนเสาตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบทั้งสิ้น 56 เสา โดยเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดสอบเป็นเหล็กชนิด 20M-Grade 400 จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเหล็กยื่นที่มีอัตราส่วนความชะลูดน้อยกว่า 6 และมีค่าอัตราส่วนการเยื้องศูนย์กลางต่อความลึกของหน้าตัดมีค่าระหว่าง 0 - 0.1 จะไม่เกิดการโก่งคาะขึ้นในขณะรับแรงอัด นอกจากนี้ในการศึกษาดังกล่าวได้พิจารณาความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กยื่น รูปแบบการจัดเรียงเหล็กปลอก และระยะห่างของเหล็กปลอกด้วย ซึ่งเมื่อเสา คอนกรีตเสริมเหล็กอยู่ภายใต้แรงอัดจะส่งผลทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดของเหล็กเสริมลดลง เนื่องจากการโก่งคาะของเหล็ก

เสริมตลอดจนผลของระยะห่างของเหล็กปลอก โดยการวิจัยนี้อยู่ภายใต้สมมติฐานซึ่งเหล็กเสริมจะเกิดการวิบัติในช่วงของปลอกเหล็กเท่านั้น

ในปีถัดมา (ค.ศ. 2002) Dhakal และ Meakawa ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดแบบวัฏจักรและการวิบัติของเหล็กเสริมโดยทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์ ซึ่งในการวิเคราะห์ได้ทำการสมมติค่าอัตราส่วนความชะลูดและกำลังครากของเหล็กเสริมที่อัตราส่วนต่างๆกัน เพื่อวัตถุประสงค์ในการพิจารณาความสามารถในการรับแรงอัดของเหล็กเสริมซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเกิดการโก่งเดาะขึ้น ผลการวิเคราะห์พบว่าการวิบัติของเหล็กเสริมจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความชะลูดและกำลังครากของเหล็กเสริม ซึ่งสอดคล้องกับสมการของ Giuffre (1996) และคณะ นอกจากนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงอัดโดยมีสมมติฐานซึ่งเหล็กเสริมเกิดการโก่งเดาะภายในช่วงปลอกเหล็ก เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Bayrak และ Sheikh

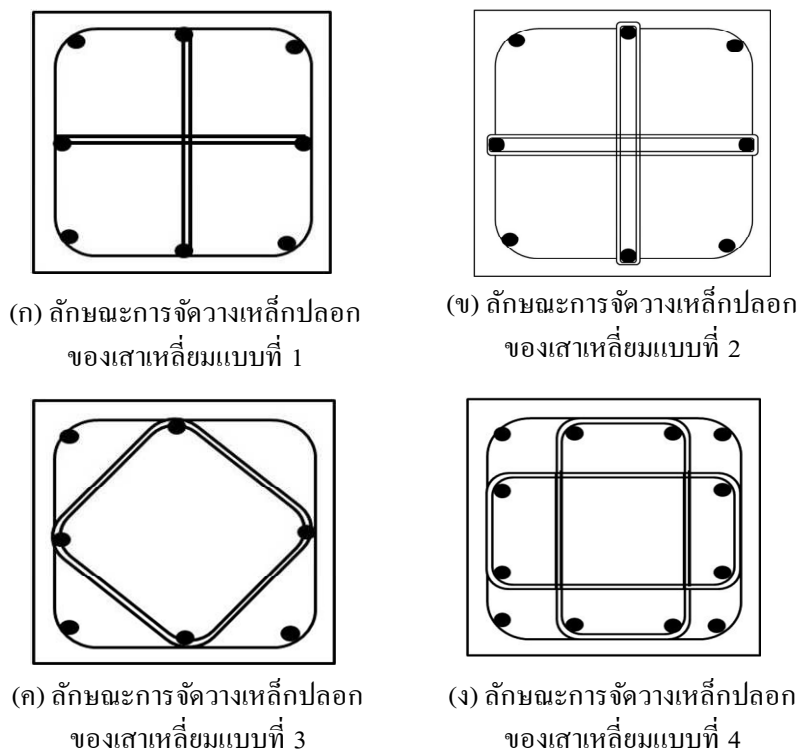
ต่อมาในปี ค.ศ. 2006 Choo และคณะ ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตที่ใช้วัสดุเสริมกำลังหลักสองประเภท คือ เหล็กเกรด 60 (Grade 60 Steel) และวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแบบแท่ง โดยใช้ข้อกำหนดในการออกแบบตามมาตรฐาน ACI 318-05 และวิธีเชิงตัวเลขในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและความเครียดตามแนวแกนของวัสดุแต่ละชนิด ผลการวิจัยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและความเครียดตามแนวแกนของเสาคอนกรีตซึ่งเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น ก่อนที่จะเกิดการแตกหักหรือเกิดการวิบัติ ซึ่งในการทดสอบยังพบว่าข้อกำหนดตามมาตรฐาน ACI 318-05 ไม่เพียงพอในการนำมาใช้ออกแบบเสาในกรณีที่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมกำลังหลักได้ สืบเนื่องมาจากการวิบัติที่เกิดขึ้นมีลักษณะแตกหักแบบเปราะเนื่องจากแรงดึง

ในปี ค.ศ. 2009 Luca และคณะ ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของกำลังรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตโดยมีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วเป็นวัสดุเสริมกำลังหลักแทนเหล็กเสริมดั้งเดิม ซึ่งเสาคอนกรีตในงานวิจัยนี้มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 60x60 เซนติเมตร และมีความสูงประมาณ 300 เซนติเมตร จำนวนทั้งหมด 5 ตัวอย่าง การออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ACI 318-05 การออกแบบจะออกแบบโดยการใช้อัตราส่วนวัสดุเสริมกำลังหลักและระยะห่างของเหล็กปลอกให้น้อยที่สุด โดยพื้นที่ของวัสดุเสริมกำลังหลักเมื่อเทียบกับพื้นที่รับแรงจะมีอัตราส่วนอยู่ที่ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ สำหรับตัวอย่างที่หนึ่งซึ่งเป็นตัวอย่างของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้ใช้เหล็กเส้น No.8 (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25.4 เซนติเมตร) เป็นวัสดุเสริมกำลังหลักจำนวน 8 เส้น และใช้เหล็กเส้น No.4

(เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12.7 เซนติเมตร) เป็นเหล็กปลอก โดยมีระยะห่างระหว่างปลอกประมาณ 16 นิ้ว (406 มิลลิเมตร) เพื่อใช้เป็นเสาตัวอย่างควบคุม ในขณะที่เสาตัวอย่างอื่นๆ จำนวน 4 ตัวอย่าง เป็นเสาที่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วเป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก โดยตัวอย่างเสาทั้ง 4 ตัวอย่าง ได้ถูกแบ่งย่อยออกเป็น 2 ชุดทดลอง แต่ละชุดทดลองจะใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ถูกผลิตจากโรงงานที่แตกต่างกัน ชุดทดลองแรก ถูกเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยทั้งในส่วนของวัสดุเสริมกำลังหลักและในส่วนของปลอก โดยมีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25.4 มิลลิเมตร จำนวน 8 เส้น เป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก และใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12.7 มิลลิเมตร ในส่วนของปลอก โดยมีระยะห่างระหว่างปลอกประมาณ 12 นิ้ว (305 มิลลิเมตร) ในชุดตัวอย่างที่สอง ใช้วัสดุเสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลักและในส่วนของปลอก เช่นเดียวกับชุดตัวอย่างที่หนึ่ง โดยมีความแตกต่างกันที่วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ใช้ในตัวอย่างชุดที่สองผลิตจากโรงงานที่แตกต่างจากตัวอย่างชุดที่หนึ่ง และมีระยะห่างของปลอกประมาณ 3 นิ้ว (76 มิลลิเมตร) ผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการพบว่าเสาคอนกรีตเสริมกำลังภายในด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว มีพฤติกรรมในการรับน้ำหนักบรรทุกที่คล้ายคลึงกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป ในการทดสอบสำหรับเสาซึ่งมีระยะห่างของปลอกประมาณ 30 เซนติเมตร พบว่าเสาคอนกรีตจะเกิดการวิบัติแบบเปราะโดยปราศจากสัญญาณล่วงหน้าใดๆ ในขณะที่เสาคอนกรีตซึ่งมีระยะห่างของปลอกประมาณ 7.5 เซนติเมตร จะมีพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนการเกิดวิบัติ ซึ่งในการวิจัยนี้ได้สรุปว่าการใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วแทนที่เหล็กยื่นภายในเสาจะไม่มีผลเสียต่อประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักของเสาคอนกรีต

ในปี ค.ศ. 2009 Ahmed และคณะ ได้ทำการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงอัดตามแนวแกนเสาเสาคอนกรีตหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจำนวน 8 ตัวอย่าง ที่มีการเสริมกำลังทางด้านข้างด้วยเหล็กปลอกประเภทปลอกเดี่ยว โดยมีเสาขนาด 350 x 350 x 1400 มิลลิเมตร (13.78 x 13.78 x 51.1 นิ้ว) โดยเสาตัวอย่างที่หนึ่ง เป็นเสาคอนกรีตล้วนที่มีขนาดหน้าตัดดังกล่าวข้างต้น ตัวอย่างที่สองและตัวอย่างที่สาม เป็นเสาที่มีเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร (M15) จำนวน 8 เส้น เป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก และมีเหล็ก M10 (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 11.3 มิลลิเมตร) เป็นเหล็กปลอก โดยมีระยะห่างของเหล็กปลอกของเสาตัวอย่างที่สองคือ 120 มิลลิเมตร และตัวอย่างที่สามมีระยะห่างของเหล็กปลอกคือ 330 มิลลิเมตร สำหรับตัวอย่างของเสาอีกห้าตัวอย่างที่เหลือ เป็นเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังด้วยเส้นใยทั้งในส่วนของวัสดุเสริมกำลังหลักและปลอก ตัวอย่างที่สี่และตัวอย่างที่ห้า เป็นเสาที่มีวัสดุเสริมกำลังด้วยเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร

(N19) จำนวน 8 เส้น เป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก โดยมีการจัดเรียงของเหล็กปลอกดังได้แสดงในรูปที่ 2.3(ก) และ 2.3(ข) ตามลำดับ และมีระยะห่างระหว่างปลอก 120 มิลลิเมตร ตัวอย่างที่หก เป็นเสาที่มีวัสดุเสริมกำลังด้วยเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร (N19) จำนวน 8 เส้น เป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก โดยมีระยะห่างระหว่างปลอก 120 มิลลิเมตร โดยมีการจัดเรียงเหล็กปลอกดังแสดงในรูปที่ 2.3(ค) ตัวอย่างที่เจ็ดและตัวอย่างที่แปด เป็นเสาที่มีวัสดุเสริมกำลังด้วยเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร จำนวน 8 เส้น เป็นวัสดุเสริมกำลังหลักและมีระยะห่างของปลอก 120 มิลลิเมตร สำหรับเสาตัวอย่างที่เจ็ด และมีระยะห่างระหว่างปลอก 80 มิลลิเมตร สำหรับเสาตัวอย่างที่แปด โดยทั้งสองตัวอย่างมีการจัดเรียงของปลอกดังแสดงในรูปที่ 2.3(ง) และเสาอย่างที่ตั้งี่ถึงเสาตัวอย่างที่แปดมีวัสดุเสริมกำลังด้วยเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตร (N13) ถูกใช้เป็นปลอกแทนที่ในส่วนเหล็กปลอกเดิม สำหรับการทดสอบนี้ ได้ใช้ตัวประกอบลดกำลังของวัสดุเสริมกำลังด้วยเส้นใยเท่ากับ 0.35 ที่ถูกนำเสนอโดย Kobayashi และ Fujisaki (1995) Mallick (1998) และ Wu (1990) ในการคำนวณกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาตามข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบของ ACI 318-08 ผลการทดสอบพบว่า สูตรการคำนวณกำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของเสาตามมาตรฐาน ACI 318-08 ที่ใช้ตัวประกอบปรับลดกำลังเท่ากับ 0.35 สามารถใช้ในการทำนายหาค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดที่เหมาะสมของเสาเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ นอกจากนี้ผลการทดสอบยังพบอีกว่าการเพิ่มปริมาณเหล็กปลอกยังมีส่วนช่วยในการเสริมแรงในการโอบรัดแกนเสาทำให้เสามีพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนการวิบัติ



รูปที่ 2.3 ลักษณะการจัดเรียงเหล็กปลอกในงานวิจัยของ Ahmed (Ahmed,2009)

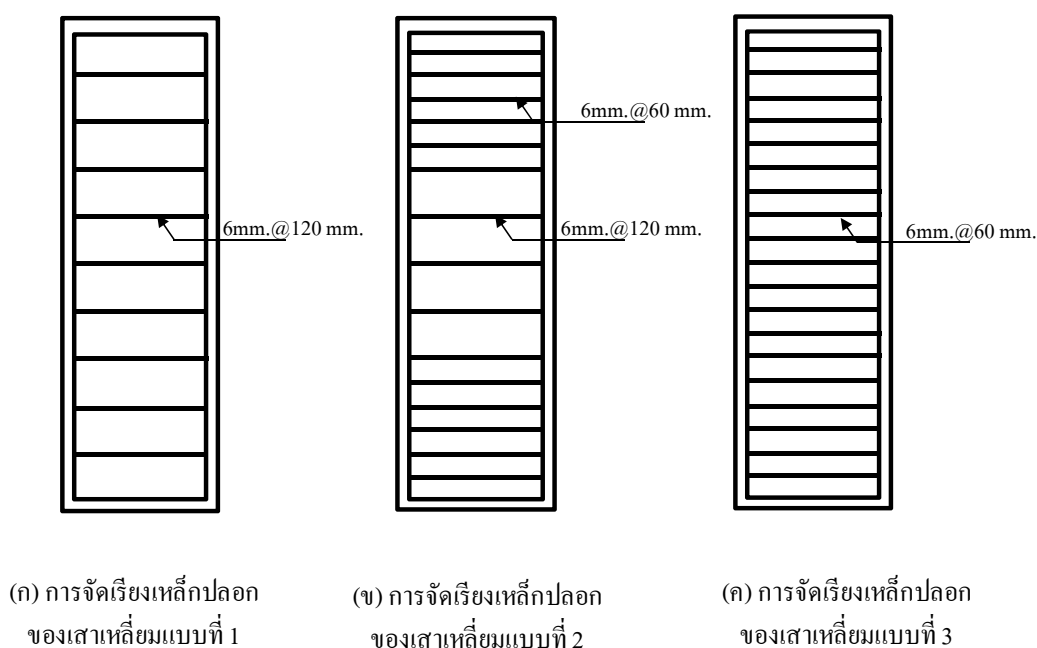
ต่อมาในปี ค.ศ. 2010 G. Dhinakaran และคณะได้ทำการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมในการรับแรงอัดของเสาที่มีขนาดหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 150 x 150 มิลลิเมตร จำนวนเสาดตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบทั้งสิ้น 24 ตัวอย่าง โดยเสาที่ใช้ในการทดสอบมีส่วนสูง 3 ขนาดคือ ตัวอย่างที่ 1 ถึง 6 เป็นตัวอย่างเสาที่มีความสูง 900 มิลลิเมตร ทำให้อัตราส่วนความชะลูดของเสาเท่ากับ 6 ตัวอย่างที่ 7 ถึง 12 เป็นตัวอย่างเสาที่มีความสูง 1200 มิลลิเมตร มีอัตราส่วนความชะลูดของเสาเท่ากับ 8 ตัวอย่างที่ 12 ถึง 18 เป็นตัวอย่างเสาที่มีความสูง 1500 มิลลิเมตร มีอัตราส่วนความชะลูดของเสาเท่ากับ 10 และตัวอย่างที่ 13 ถึง 18 เป็นตัวอย่างเสาที่มีความสูง 1800 มิลลิเมตร มีอัตราส่วนความชะลูดของเสาเท่ากับ 12 โดยทุกตัวอย่างจะมีวัสดุเสริมกำลังหลักเป็นวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยและเป็นเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร 12 มิลลิเมตร และ 14 มิลลิเมตร อย่างละ 1 ตัวอย่าง โดยเสาที่ถูกเสริมกำลังหลักด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยหรือเหล็กเส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จะมีอัตราส่วนของวัสดุเสริมกำลังหลักเทียบกับหน้าตัดที่รับแรงของเสาเป็นร้อยละ 1.4 และร้อยละ 2.0 สำหรับวัสดุเสริมกำลังหลักที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร และร้อยละ 3.5 สำหรับวัสดุเสริมกำลังหลักที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ผลการทดสอบทำให้ทราบว่า การเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาที่มีการเสริมวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลัง

ด้วยเส้นใยมีค่ามากกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปประมาณร้อยละ 33 โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความชะลูดของเสาตัวอย่างนั้นๆ และอัตราการเปลี่ยนรูปทางด้านข้างของเสาที่ถูกเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังด้วยเส้นใยจะมีค่ามากกว่าการเปลี่ยนรูปของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปประมาณร้อยละ 40

ในปี ค.ศ. 2010 Ehab และคณะได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดตามแนวแกนของเสา โดยทำการศึกษาตัวอย่างเสาหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 250 x 250 x 1250 มิลลิเมตร จำนวนตัวอย่างเสาที่ใช้ในการทดสอบ 8 ตัวอย่าง โดยได้แบ่งเสาตัวอย่างทั้งหมดออกเป็น 4 กลุ่ม คือ

- เสากลุ่มที่ 1 ที่ใช้ในการทดสอบจำนวน 3 ตัวอย่าง โดยเสาแต่ละตัวอย่างมีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 12 มิลลิเมตร จำนวน 4 เส้น 6 เส้น และ 8 เส้น ตามลำดับ ทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก โดยมีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 มิลลิเมตร ทำหน้าที่แทนในส่วนของปลอก ตัวอย่างทั้งหมดจะมีลักษณะของปลอกเป็นประเภทปลอกเดี่ยว และมีระยะห่างระหว่างปลอก 120 มิลลิเมตร โดยใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 25 MPa ตัวอย่างทั้งหมดได้มีการจัดเรียงตัวของปลอกดังแสดงในรูปที่ 2.4(ก)
- เสากลุ่มที่ 2 ที่ใช้ในการทดสอบจำนวน 1 ตัวอย่าง เป็นเสาที่มีการเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยขนาด 12 มิลลิเมตร เป็นวัสดุเสริมกำลังหลักจำนวน 4 เส้น มีปลอกเป็นวัสดุเสริมกำลังด้วยเส้นใยเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และมีระยะห่างระหว่างปลอก 120 มิลลิเมตร โดยใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 25 MPa และมีการจัดเรียงปลอกดังแสดงในรูปที่ 2.4(ก)
- เสากลุ่มที่ 3 ที่ใช้ในการทดสอบจำนวน 2 ตัวอย่าง เสากลุ่มนี้มีลักษณะของวัสดุเสริมกำลังหลักและการจัดวางตัวของปลอกเหมือนกับเสาในกลุ่มที่สองทุกประการ โดยใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 30 MPa สำหรับเสาตัวอย่างแรกของเสาในกลุ่มนี้ และใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 35 MPa สำหรับเสาตัวอย่างที่สองของเสาในกลุ่มนี้
- เสากลุ่มที่ 4 ที่ใช้ในการทดสอบจำนวน 2 ตัวอย่าง เสากลุ่มนี้มีขนาดของวัสดุเสริมกำลังหลักและปลอกเหมือนกับเสาตัวอย่างในกลุ่มที่สองและกลุ่มที่สาม แต่จะมีระยะห่างของปลอกเท่ากับ 60 มิลลิเมตร ในการทดสอบใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 25 MPa โดยจะมีหนึ่งตัวอย่างที่มีการจัดวางปลอกดังแสดงในรูป 2.4(ข) และอีกหนึ่งตัวอย่างมีการจัดเรียงของปลอกดังแสดงในรูป 2.4(ค)

ผลการทดสอบ พบว่า เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดสอบจะมีความเหนียวมากกว่าเสาที่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของปลอกและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่เพิ่มสูงขึ้นยังมีส่วนช่วยให้เสาที่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยมีพฤติกรรมแบบเหนียวเพิ่มมากขึ้น โดยปริมาณอัตราส่วนระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดสำหรับงานวิจัยนี้จะอยู่ที่ประมาณ 0.723 ถึง 1.08 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.4 การจัดเรียงเหล็กปลอกในการทดสอบของ Ehab (Ehab,2010)

ต่อมาในปีเดียวกัน Ehab และคณะ ยังได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในห้องปฏิบัติการกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยการใช้โปรแกรม ANSYS ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมด 10 ตัวอย่าง โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง 8 ตัวอย่าง ในลักษณะเดียวกับเสาที่ถูกทดสอบในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์เพิ่มเติมอีก 2 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างแรกเป็นเสาที่มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมขนาด 250 x 250 x 1250 มิลลิเมตร มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลักขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร จำนวน 4 เส้น มีปลอกเป็นวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 มิลลิเมตร เป็นประเภทปลอกเดี่ยวและมีระยะห่างระหว่างปลอก 120 มิลลิเมตร และตัวอย่างที่ 2 เป็นเสาที่มีขนาดหน้าตัด ขนาดของปลอก และการจัดเรียงของปลอกเหมือนกับตัวอย่างที่ 1 แต่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตร จำนวน 4 เส้น เป็นวัสดุ

เสริมกำลังหลัก โดยตัวอย่างทั้งสองใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 25 MPa และมีการจัดเรียงของปลอกคังแสดงในรูป 2.4(ก) ผลการวิเคราะห์พบว่า การเพิ่มขึ้นของปลอกและวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นที่เป็นวัสดุเสริมกำลังหลักมีส่วนช่วยให้เสาเกิดพฤติกรรมแบบเหนียวมากขึ้น และอัตราส่วนของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเทียบกับพื้นที่หน้าตัดรับแรงอัดของเสาที่เหมาะสมและให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 0.723 ถึง 1.20 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ Ehab ยังเสนอสมการเพื่อทำนายกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาที่เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยอีกด้วย

บทที่ 3

ตัวอย่างและการเตรียมการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ตัวอย่างเสาคอนกรีตจะถูกทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับแรงอัดกับตัวแปรต่างๆเพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและใช้งานเสาคอนกรีตซึ่งมีวัสดุเสริมกำลังหลักด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย ซึ่งรายละเอียดเกี่ยวกับตัวอย่างเสาคอนกรีตและการทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยจะถูกแสดงอย่างละเอียดภายในบทนี้

3.1 รายละเอียดของเสาตัวอย่าง

เสาที่ใช้ในการทดสอบมีหน้าตัดสองประเภทคือ หน้าตัดสี่เหลี่ยม และหน้าตัดกลม โดยตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะของเหล็กปลอกที่แตกต่างกัน ซึ่งมีตัวอย่างในการทดสอบทั้งหมด 12 ประเภท รวมตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 36 ตัวอย่าง โดยมีรายละเอียดของตัวอย่างต่างๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 3.1 ซึ่งชื่อที่ใช้เรียกตัวอย่างและสัญลักษณ์ที่ใช้แทน แสดงดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์แสดงแทนเสาตัวอย่าง

สัญลักษณ์ ใช้เรียก แทนเสา	ประเภท ของหน้า ตัด	ชนิดของ เหล็ก ปลอก	ขนาดหน้าตัด	วัสดุเสริม กำลังหลัก	จำนวน เสา ทดสอบ
SFsc	สี่เหลี่ยม (S)	ปลอก เกลียว (s)	15x15 cm.	FRP	3
SNsc			15x15 cm.	-	3
SFsn			12.5x12.5 cm.	FRP	3
SNsn			12.5x12.5 cm.	-	3

ตารางที่ 3.1(ต่อ) สัญลักษณ์แสดงแทนเสาตัวอย่าง

สัญลักษณ์ ใช้เรียก แทนเสา	ประเภท ของหน้า ตัด	ชนิดของ เหล็ก ปลอก	ขนาดหน้าตัด	วัสดุเสริม กำลังหลัก	จำนวน เสา ทดสอบ
CFsc	กลม (C)	ปลอก เกลียว (s)	เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm.	FRP	3
CNsc			เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm.	-	3
CFsn			เส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 cm.	FRP	3
CNsn			เส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 cm.	-	3
SFtc	เหลี่ยม (S)	ปลอก เดี่ยว (t)	15x15 cm.	FRP	3
SNtc			15x15 cm.	-	3
SFtn			12.5x12.5 cm.	FRP	3
SNtn			12.5x12.5 cm.	-	3

หมายเหตุ

- สัญลักษณ์ตัวที่ 1 ; S หมายถึง เสาหน้าตัดสี่เหลี่ยม
C หมายถึง เสาหน้าตัดกลม
- สัญลักษณ์ตัวที่ 2 ; F หมายถึง เสาตัวอย่างที่มีวัสดุเสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุ
เสริมกำลังหลัก
N หมายถึง เสาตัวอย่างที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุ
เสริมกำลังหลัก
- สัญลักษณ์ตัวที่ 3 ; s หมายถึง เสาตัวอย่างที่มีเหล็กเสริมประเภทปลอกเกลียว
t หมายถึง เสาตัวอย่างที่มีเหล็กเสริมประเภทปลอกเดี่ยว
- สัญลักษณ์ตัวที่ 4 ; c หมายถึง เสาตัวอย่างที่มีคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก
n หมายถึง เสาตัวอย่างที่ไม่มีคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก

3.2 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างทดสอบ โดยเริ่มจากการเตรียมแบบเพื่อใช้ในการหล่อแบบเสา
ตัวอย่างโดยมีรายละเอียดดังนี้

ในส่วนของเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะดำเนินการทำแบบหล่อโดยใช้แบบไม้

- ขนาด 12.5x12.5 เซนติเมตร สำหรับเสาซึ่งปราศจากผิวคอนกรีตหุ้ม จำนวน 13 ตัวอย่าง
- ขนาด 15x15 เซนติเมตร สำหรับเสาซึ่งมีผิวคอนกรีตหุ้มแกนเสา จำนวน 13 ตัวอย่าง

เสาหน้าตัดกลมจะดำเนินการทำแบบหล่อโดยใช้ท่อพอลิไวนิลคลอไรด์

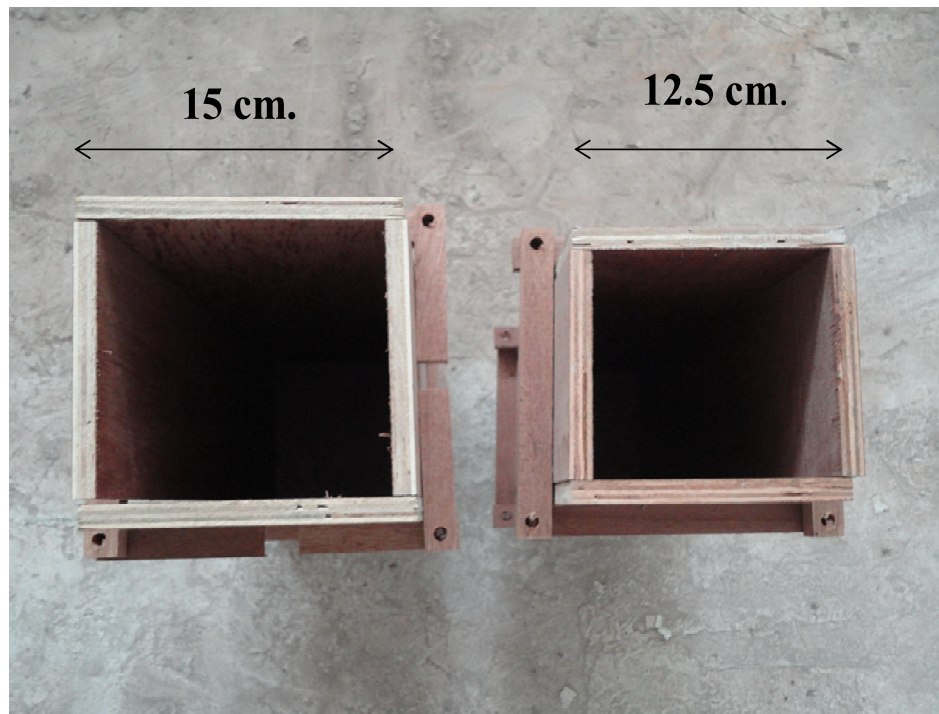
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร สำหรับเสาซึ่งปราศจากผิวคอนกรีตหุ้ม จำนวน 7 ตัวอย่าง
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สำหรับเสาซึ่งมีผิวคอนกรีตหุ้ม จำนวน 7 ตัวอย่าง

ในขั้นตอนต่อไปจะเป็นในส่วนของการเตรียมเหล็กปลอก เหล็กที่ใช้ในการทำเหล็กปลอกเป็นเหล็กกลมผิวเรียบมาตรฐาน SR24 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร คัดเป็นโครงให้มีรูปทรงสองแบบคือ สี่เหลี่ยม และกลม สำหรับเหล็กปลอกสี่เหลี่ยมกำหนดให้มีขนาด 12.5x12.5 เซนติเมตร และเหล็กปลอกกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และรูปที่ 3.2

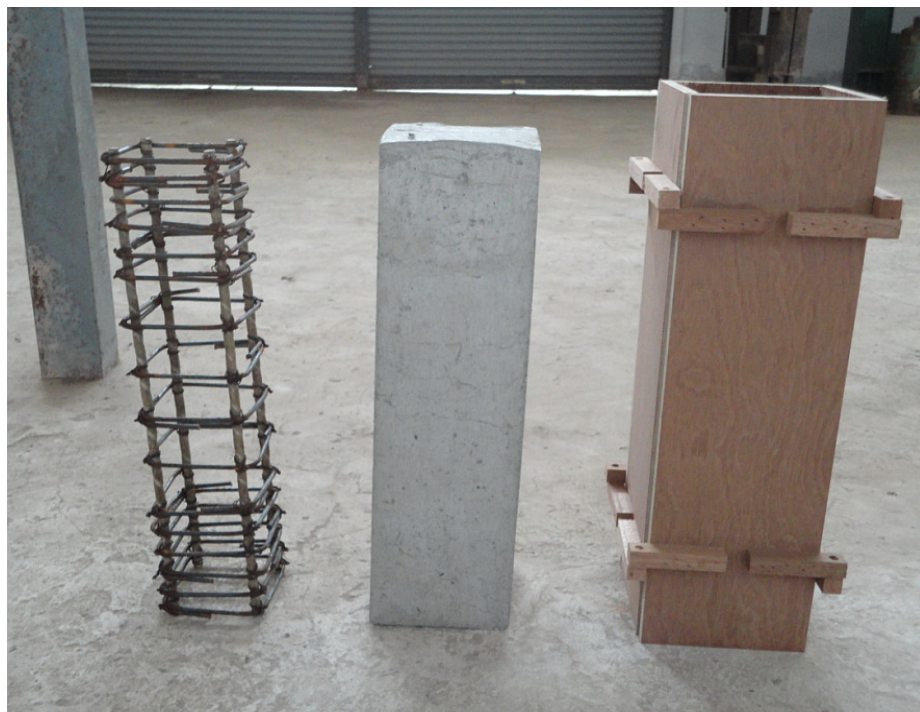
สำหรับหน้าตัดเหลี่ยม เหล็กปลอกที่ใช้จะมีด้วยกันสองประเภท 1) ปลอกเดี่ยว 2) ปลอกเกลียว สำหรับเสากลมจะมีปลอกเหล็กเพียงประเภทเดียว คือ ปลอกเกลียว เสาตัวอย่างทั้งหมดสูงประมาณ 50 เซนติเมตร โครงเหล็กจะถูกผูกติดไว้กับวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 4 เส้น ด้วยลวดผูกเหล็ก โดยในระยะ 12.5 เซนติเมตร วัดจากส่วนปลายสุดของเสา จะทำการมัดโครงเหล็กให้มีระยะเรียงของปลอกเหล็กเท่ากับ 2.5 เซนติเมตร จำนวน 5 ปลอก เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงปัญหาการแตกร้าวตรงบริเวณส่วนปลายของเสา ตัวอย่างทั้งสองปลายของตัวอย่าง ในขณะที่ระยะตั้งแต่ 12.5-37.5 เซนติเมตร จะทำการมัดโครงเหล็กให้มีระยะเรียงของปลอกเหล็ก 5 เซนติเมตร จำนวน 5 ปลอก ซึ่งเมื่อเตรียมตัวอย่างโครงเหล็กเสร็จแล้ว เสาตัวอย่างที่เป็นเสาเหลี่ยมจะมีพื้นที่ของแกนเสาที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กปลอกประมาณ 156.25 ตารางเซนติเมตร เสากลมจะมีพื้นที่ของแกนเสาที่ถูกโอบรัดด้วยเหล็กปลอกประมาณ 122.71 ตารางเซนติเมตร นอกจากนี้เสาตัวอย่างทั้งหมดยังมีอัตราส่วนของเหล็กปลอกเทียบกับพื้นที่หน้าตัดเสาเท่ากับ 0.011 และมีอัตราส่วนของวัสดุเสริมกำลังด้วยเส้นใยเทียบกับหน้าตัดเสาประมาณ 0.0142 ในกรณีของเสาเหลี่ยมที่มีคอนกรีตหุ้ม และ 0.0191 สำหรับเสากลมที่มีคอนกรีตหุ้ม โดยในกรณีที่ไม่มีคอนกรีตหุ้ม อัตราส่วนระหว่างวัสดุเสริมกำลังด้วยเส้นใยเทียบกับพื้นที่หน้าตัดเสาจะเป็น 0.0205 สำหรับเสาเหลี่ยม และ 0.0263 สำหรับเสากลม โดยเมื่อทำการหล่อเสาตัวอย่างแล้วเสร็จ สำหรับตัวอย่างที่มีคอนกรีตหุ้มจะมีระยะห่างของคอนกรีตหุ้มอีกด้านละ 1.25 เซนติเมตร ดังได้แสดงรายละเอียดไว้ในรูปที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดตัวอย่าง

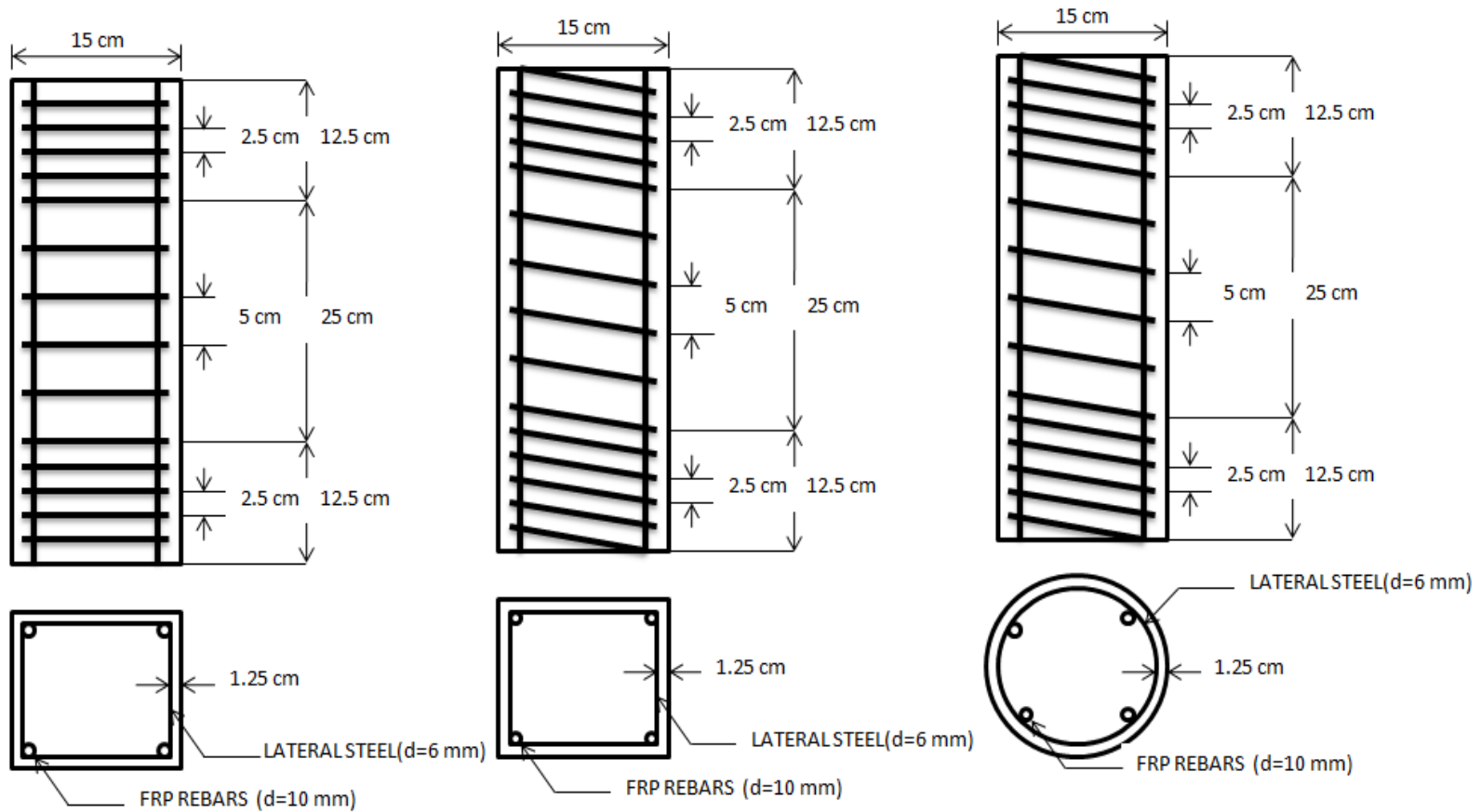
		FRP เป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก						ไม่มี FRP เป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก					
		คอนกรีตหุ้มผิว			ไม่มีคอนกรีตหุ้มผิว			มีคอนกรีตหุ้ม			ไม่มีคอนกรีตหุ้ม		
		เสาเหลี่ยม ปลอกเกลียว (SFsc)	เสากลม ปลอก เกลียว (CFsc)	เสาเหลี่ยม ปลอก เดี่ยว (SFtc)	เสาเหลี่ยม ปลอก เกลียว (SFsn)	เสากลม ปลอก เกลียว (CFsn)	เสาเหลี่ยม ปลอกเดี่ยว (SFtn)	เสาเหลี่ยม ปลอก เกลียว (SNsc)	เสากลม ปลอก เกลียว (CNsc)	เสาเหลี่ยม ปลอก เดี่ยว (SNTc)	เสาเหลี่ยม ปลอกเกลียว (SNSn)	เสากลม ปลอก เกลียว (CNsn)	เสาเหลี่ยม ปลอกเดี่ยว (CNTn)
เสาคอนกรีต	ความสูง h (cm.)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	ความกว้าง b (cm.)	15	15	15	12.5	12.5	12.5	15	15	15	12.5	12.5	12.5
	คอนกรีตหุ้ม (cm.)	1.25	1.25	1.25	-	-	-	1.25	1.25	1.25	-	-	-
	พื้นที่หน้าตัด A_s (cm ² .)	221.86	173.57	221.86	153.11	119.58	152.11	221.86	173.57	221.86	153.11	119.58	152.11
	พื้นที่หน้าตัดสุทธิ A_c (cm ² .)	225	176.57	225	156.25	122.71	156.25	225	176.57	225	156.25	122.71	156.25
เหล็กปลอก	ขนาด d_s (cm.)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
	พื้นที่หน้าตัด A_s (cm ² .)	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282	0.282
	อัตราส่วน ρ_s'	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011
	f_c' (ksc)	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270
	ระยะห่าง S (cm.)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
FRP	ขนาด d_f (mm.)	10	10	10	10	10	10						
	พื้นที่หน้าตัด A_f (cm ² .)	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14	3.14						
	ρ_s	0.0142	0.0191	0.0142	0.0205	0.0263	0.0205						



รูปที่ 3.1 หน้าตัดของแบบไม้ที่ใช้ในการหล่อตัวอย่าง



รูปที่ 3.2 โครงเหล็ก เสาคylinder และแบบไม้ที่ใช้หล่อ



รูปที่ 3.3 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

สำหรับการจัดเรียงเหล็กปลอกในส่วนของเสาตัวอย่างในกรณีของเสาที่ไม่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก ในโครงการวิจัยนี้ได้ใช้ก๊ีบติดกับแบบไม้เพื่อเป็นวัสดุช่วยในการมัดผูกติดเหล็กปลอก ไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ในขั้นตอนของการเทคอนกรีตลงแบบหล่ออีกทั้งยังเป็นตัวช่วยในการจัดระยะของเหล็กปลอกให้เป็นไปตามที่ต้องการดังแสดงดังรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5



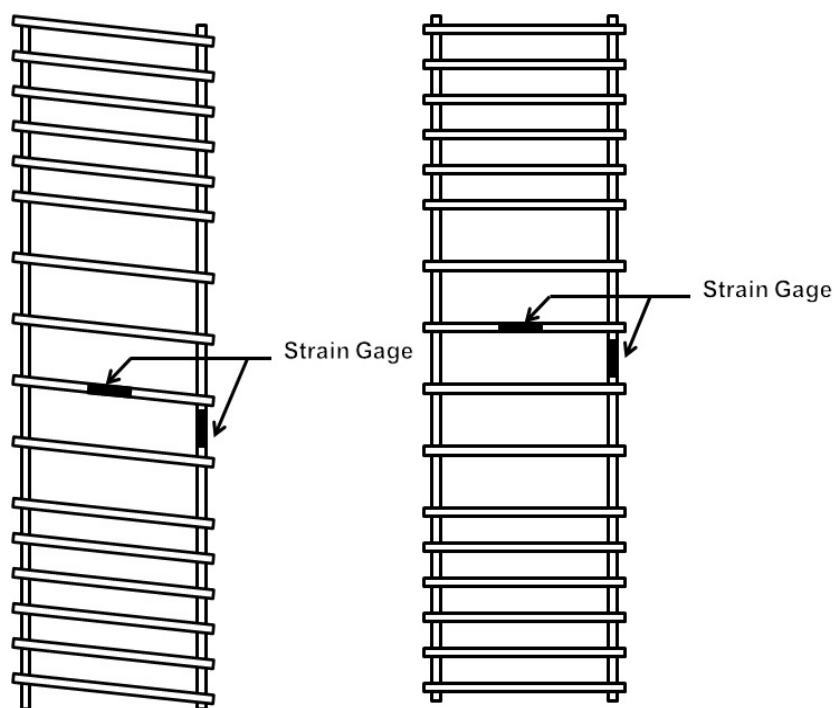
รูปที่ 3.4 ก๊ีบที่ใช้ยึดติดระหว่างเหล็กปลอกกับแบบหล่อ



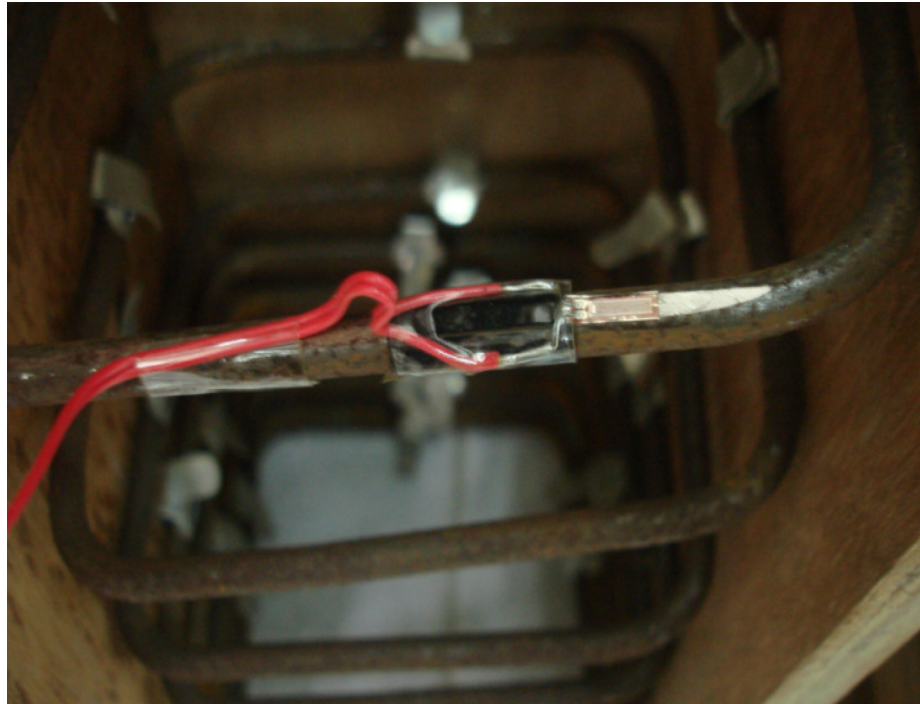
รูปที่ 3.5 การวางเหล็กปลอกในกรณีไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก

3.3 การติดตั้งอุปกรณ์วัด

การติดตั้งอุปกรณ์วัดเพื่อใช้วัดค่าการเคลื่อนตัวต่างๆสำหรับเสาตัวอย่างทดสอบในโครงการวิจัยนี้ ใช้สเตรนเกจ (Strain Gages) รุ่น KFG-5-120-C1-11 L5M2R ของ KYOWA สำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงรูปของเหล็กปลอก วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย และคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก การติดตั้งสเตรนเกจเริ่มด้วยการเชื่อมสเตรนเกจติดกับสายไฟที่เตรียมไว้ สำหรับการติดตั้งที่เหล็กปลอกและวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย เริ่มจากการใช้เครื่องเจียรเหล็กทำความสะอาดผิวของเหล็กหรือวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยก่อนเพื่อกำจัดสนิมเหล็กและเพื่อให้ผิวสัมผัสเรียบเสมอกัน โดยทำการติดตั้งสเตรนเกจด้วยการติดกาวเพื่อให้สเตรนเกจติดกับเหล็กปลอกหรือวัสดุเสริมกำลังด้วยเส้นใยโดยระมัดระวังไม่ให้สายไฟที่เชื่อมต่อกับสเตรนเกจสัมผัสกับเหล็กปลอกเพราะอาจทำให้เกิดการลัดวงจรจนอ่านค่าสเตรนเกจไม่ได้ หลังการติดตั้งสเตรนเกจจะต้องทำการตรวจเช็ค โดยการใช้โอห์มมิเตอร์ (Ohm Meter) เพื่อตรวจสอบความต้านทานไฟฟ้า กาวที่ใช้เป็นกาวเฉพาะในการติดสเตรนเกจซึ่งหลังจากติดสเตรนเกจกับพื้นที่ผิวที่ต้องการจะต้องกดสเตรนเกจไว้ เพื่อให้สเตรนเกจติดกับพื้นผิวได้ดียิ่งขึ้น หลังการติดตั้งจะทำการพอกสเตรนเกจด้วยวัสดุเคลือบผิว (Coating Agent) อีกชั้นหนึ่งเพื่อป้องกันความเสียหายของ สเตรนเกจอันเนื่องมาจากขั้นตอนของการหล่อตัวอย่าง ตำแหน่งในการติดตั้งสเตรนเกจจะทำการติดตั้งบริเวณกลางเสา โดยจะติดตั้งสเตรนเกจที่ปลอกเหล็กจำนวน 2 ตัว และที่วัสดุเสริมกำลังหลักอีก 2 ตัว ดังได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งของสเตรนเกจวัดความเครียดใน โครงเหล็ก



(ก) ตำแหน่งการติดสเตรนเกจที่เหล็กปลอก



(ข) สเตรนเกจที่พอกด้วยวัสดุเคลือบผิว Coating Agent

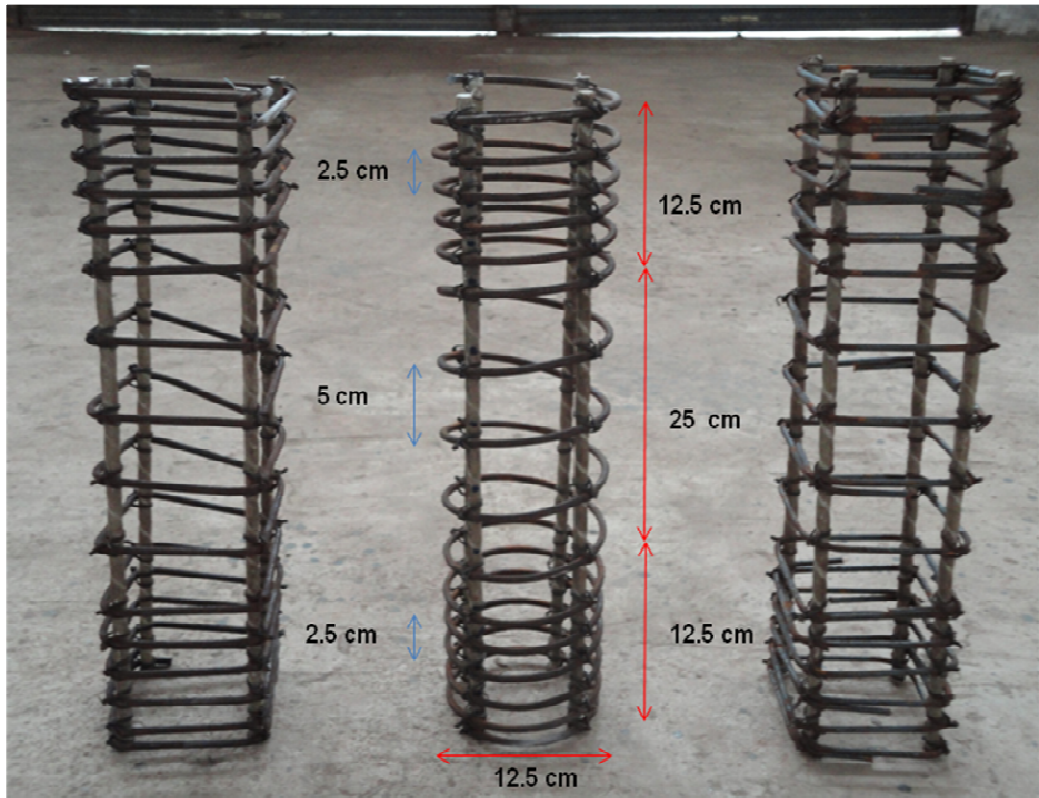
รูปที่ 3.7 การติดตั้งสเตรนเกจที่เหล็กปลอกในเสา

3.4 ขั้นตอนการหล่อตัวอย่าง

ภายหลังจากการติดตั้งสเตรนเกจวัดค่าความเครียด ในขั้นตอนต่อไปโครงสร้าง (โครงที่ใช้ในงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.8) จะถูกบรรจุลงในแบบหล่อที่ได้ทำความสะอาดและทาน้ำมันเตรียมไว้เพื่อให้ง่ายต่อการถอดแบบ ในขั้นตอนต่อไปคอนกรีตจะถูกเทลงไปในแบบหล่อและกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งเพื่อให้ลดช่องว่างในเสาคอนกรีต ระหว่างการหล่อเสาคอนกรีตในห้องปฏิบัติการจะดำเนินการเก็บตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานจำนวน 3 ตัวอย่างเพื่อนำไปบ่มและทดสอบกำลังอัดต่อไปดังแสดงในรูปที่ 3.9 ตัวอย่างเสาทั้งหมดจะถูกหล่อในทิศทางแนวตั้ง ตัวอย่างเสาทั้งหมดจะถูกหล่อขึ้นในเวลาเดียวกัน คอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยเป็นคอนกรีตซึ่งมีกำลังอัดเฉลี่ยประมาณ 270 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังแสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 3.2 และเมื่อหล่อเสาตัวอย่างเสร็จสิ้นจะทำการทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง (ขั้นตอนการหล่อตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.10) จึงทำการถอดแบบหล่อออกเพื่อนำเสาคอนกรีตตัวอย่างทั้งหมดไปทำการบ่มโดยการใส่กระสอบป่านคลุมและราดน้ำจนเปียกชื้นเป็นระยะเวลา 28 วัน (รูปที่ 3.11) แล้วจึงนำไปเตรียมเพื่อทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แรงอัดเฉลี่ย

ตารางที่ 3.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐาน

ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm.)	ความ สูง (cm.)	แรงอัด เฉลี่ย (kg)	น้ำหนัก (kg)	ความ หนาแน่น (kg/m ³)	อายุ คอนกรีต (Day)	กำลังอัด เฉลี่ย (kg/cm ²)
1	15.2	30.2	49,000	12.6	2314	28	270.1
2	15.0	30.0	47,500	12.9	2434	28	268.8
3	15.2	30.3	50,000	13.1	2406	28	275.5
ค่าเฉลี่ยกำลังอัดเฉลี่ย (กก./ซม ²)							271.4



รูปที่ 3.8 โครงเหล็กที่แบบต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างที่หล่อเพื่อเตรียมทดสอบกำลังอัด



รูปที่ 3.10 รูปตอนเทคอนกรีตลงแบบหล่อ



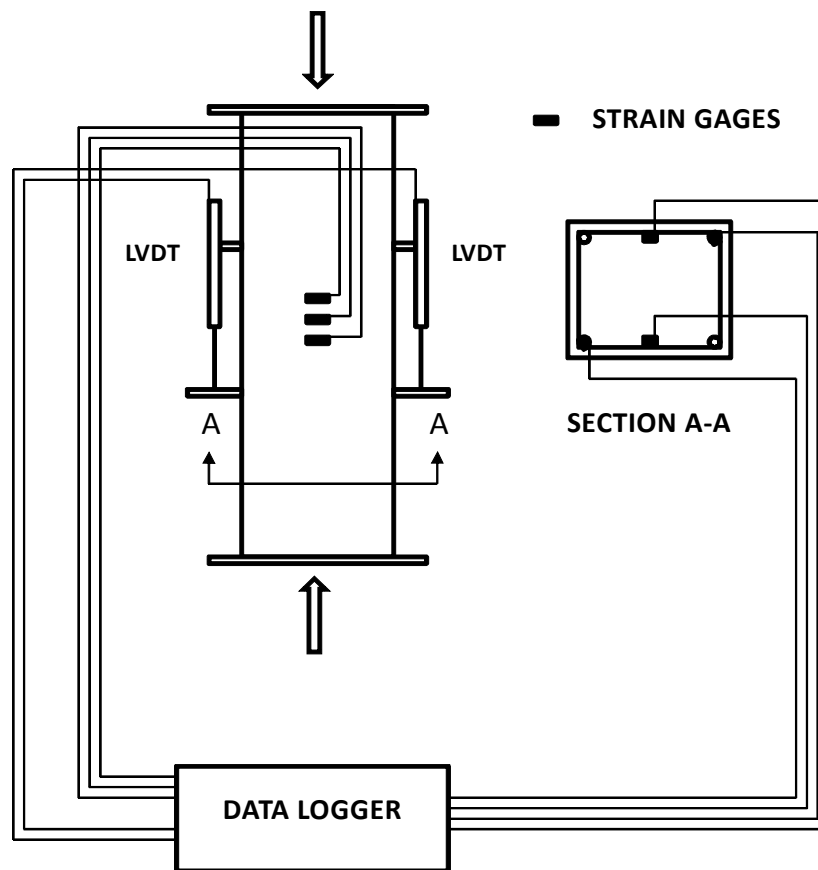
รูป 3.11 การบ่มตัวอย่างเสาในงานวิจัย

3.5 เตรียมทดสอบ

ในการทดสอบเสาคอนกรีตตัวอย่าง เสาคอนกรีตดังกล่าวจะถูกจัดวางให้อยู่บนแท่งเหล็กที่รองรับของเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (Controls ขนาดกำลังอัดสูงสุด 300 ตัน) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยปลายเสาคอนกรีตตัวอย่างทั้งสองด้านวางอยู่บนที่รองรับที่มีแผ่นเหล็กหนาด้านละประมาณ 1 นิ้ว รองรับตรงส่วนปลายของเสาตัวอย่าง โดยมีแผ่นยางอีลาสโตเมอร์ (Elastomers) วางอยู่ระหว่างแผ่นเหล็กและผิวคอนกรีต เสาคอนกรีตจะทำการติดตั้งเครื่องมือวัดระยะ Linear Variable Differential Transformer (LVDT) บริเวณด้านข้างของเสาตัวอย่างที่ระยะประมาณ 17.5 เซนติเมตร วัดจากส่วนบนสุดของเสา (เพื่อกำหนดช่วงความยาวในการวัดระยะ) นอกจากนี้สเตรนเกจจะถูกติดตั้งบริเวณผิวด้านนอกของเสาคอนกรีต ที่ระยะ 20, 25 และ 30 เซนติเมตร ตามลำดับ (โดยวัดจากส่วนบนสุดของเสา) ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.13 อุปกรณ์วัดระยะ LVDT และสเตรนเกจจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger) ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งจะทำการแปลงสัญญาณแล้วส่งเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะมีโปรแกรมในการประมวลผลเพื่อเก็บค่าข้อมูลในการทดสอบ โดยจะดำเนินเก็บข้อมูลโดยตลอดช่วงการให้น้ำหนักที่กดลงบนเสาตัวอย่าง



รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine



รูปที่ 3.13 การเตรียมการทดสอบตัวอย่าง



รูปที่ 3.14 เครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger) รุ่น EDX 100 ยี่ห้อ KYOWA

จนกระทั่งเสาตัวอย่างเกิดการวิบัติ ขณะทดสอบจะทำการสังเกตการแตกร้าวและการเปลี่ยนแปลงรูปของเสาตัวอย่าง รวมทั้งลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นและในภายหลังจะนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไปทำการวิเคราะห์ต่อไป

3.6 การทดสอบวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.6.1 ทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กปลอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ยาว 1.5 เมตร จำนวนที่ใช้ในการทดสอบทั้งสิ้น 3 ตัวอย่าง เพื่อหาคุณสมบัติทางกล ได้แก่ หน่วยแรงคราก (Yielding Stress) หน่วยแรงดึงสูงสุด โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8-98 โดยทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง UTM ยี่ห้อ Autocump รุ่น 50-C4013

3.6.2 ทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ แท่งคอนกรีตที่ใช้ทดสอบเป็นแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูงประมาณ 30 เซนติเมตร จำนวนที่ใช้ในการทดสอบทั้งสิ้น 3 ตัวอย่าง ซึ่งหลังจากการหล่อตัวอย่างทดสอบแล้วได้ทำการทิ้งตัวอย่างทดสอบไว้ในที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนทำการถอดแบบแล้วนำไปบ่มโดยการใส่กระสอบปูนคลุมแล้วรดน้ำให้ชุ่มอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 28 วัน ก่อนทำการทดสอบหาลำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C-39

3.6.3 ทดสอบกำลังรับแรงดึงของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer : FRP) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ภายใต้เครื่องหมายการค้าของบริษัท เด็กซ์ตรา แมนูแฟกเจอร์ริง จำกัด (Dextra Manufacturing) โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 50 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ก่อนทำการทดสอบแรงดึง จะต้องทำการเตรียมตัวอย่างโดยนำวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยมาทากาวที่ใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงสูงที่ระยะ 10 เซนติเมตร วัดจากส่วนบนสุดของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยและที่ระยะ 10 เซนติเมตร วัดจากส่วนปลายสุดของวัสดุเสริมกำลังด้วยเส้นใย นำท่อแป๊ปเหล็กที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.24 เซนติเมตร ที่ผ่าครึ่งแล้วมาประกบตรงปลายทั้งสองข้างที่ทากาวแล้วของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย ใช้ลวดรัดให้แน่นทิ้งไว้ประมาณ 2 วัน (ดังแสดงในรูปที่ 3.16) จากนั้นจึงนำไปทดสอบเพื่อหาหน่วยแรงดึงสูงสุดของวัสดุเสริมกำลังด้วยเส้นใยตามมาตรฐาน ASTM E8-98 ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.15 วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer – FRP) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.16 แป๊ปเหล็กที่ใช้กาวแรงยึดสูงยึดติดกับวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย



รูปที่ 3.17 การทดสอบหาแรงดึงของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

ในบทนี้ผลการทดสอบของตัวอย่างเสาที่ภายใต้แรงอัดตามแนวแกนจะถูกนำเสนอ โดยทำการพิจารณากำลังรับน้ำหนักสูงสุดและพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนจนกระทั่งเสาเกิดการพิบัติ โดยตัวอย่างเสาทั้งหมดที่ถูกทำการทดสอบได้ทำการแบ่งออกเป็น 12 กลุ่มตัวอย่าง ดังได้แสดงรายละเอียดในบทที่ 3 ซึ่งผลการทดสอบดังกล่าวถูกนำเสนอ ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบภายใต้แรงอัดตามแนวแกน

เสาตัวอย่างทั้ง 12 กลุ่ม แต่ละกลุ่มจะมีตัวอย่างเสาที่ใช้ในการทดสอบกลุ่มละ 3 ตัวอย่าง รวมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด 36 ตัวอย่าง และเสาตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวอย่างควบคุมซึ่งเป็นตัวอย่างเสาคอนกรีตล้วนหน้าตัดขนาดต่างๆ 4 ตัวอย่าง ตัวอย่างทั้งหมดทดสอบภายใต้แรงอัดตามแนวแกน โดยเสาตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีลักษณะหน้าตัด 2 ประเภท คือ หน้าตัดกลม และหน้าตัดเหลี่ยม นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งย่อยเป็นตัวอย่างเสาที่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก และประเภทที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก โดยเสาจะมีพื้นที่หน้าตัด 225 ตารางเซนติเมตร สำหรับเสาเหลี่ยมที่มีคอนกรีตหุ้มและมีพื้นที่หน้าตัด 156.25 ตารางเซนติเมตร สำหรับเสาเหลี่ยมที่ไม่มีคอนกรีตหุ้ม สำหรับเสากลมที่มีคอนกรีตหุ้มจะมีพื้นที่หน้าตัดขนาด 176.71 ตารางเซนติเมตร และพื้นที่หน้าตัด 122.71 ตารางเซนติเมตร สำหรับเสากลมที่ไม่มีคอนกรีตหุ้ม นอกจากนี้ เสาตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบในกรณีที่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่หน้าตัดจะมีปริมาณวัสดุเสริมกำลังหลักคิดเป็นร้อยละ 0.0142 สำหรับกรณีของเสาเหลี่ยมที่มีคอนกรีตหุ้ม และร้อยละ 0.0205 สำหรับกรณีของเสาเหลี่ยมที่ปราศจากคอนกรีตหุ้ม ในกรณีของเสากลมที่มีคอนกรีตหุ้มจะมีปริมาณวัสดุเสริมกำลังหลักเมื่อเทียบกับพื้นที่หน้าตัดเป็นร้อยละ 0.0191 สำหรับเสาที่มีคอนกรีตหุ้ม และอัตราส่วนของวัสดุเสริมกำลังหลักเทียบกับพื้นที่หน้าตัดประมาณร้อยละ 0.0263 สำหรับเสากลมที่ปราศจากคอนกรีตหุ้ม นอกจากนี้เหล็กเสริมที่ใช้เป็นเหล็กปลอกมีด้วยกัน 2 ชนิด คือ เหล็กปลอกเกลียว และเหล็กปลอกเดี่ยว โดยเสาทั้งหมดมี

ระยะเรียงของเหล็กปลอก 5 เซนติเมตร และมีความสูงประมาณ 50 เซนติเมตร มีคอนกรีตที่ใช้หุ้มเหล็กปลอกหนา 1.25 เซนติเมตร โดยกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาตัวอย่าง ค่าความเค้นสูงสุดของเสา และหน่วยการยืดหดตัวที่กำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา ถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 กำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา

กลุ่มเสาตัวอย่าง		พื้นที่หน้าตัด (cm. ²)	ชนิดของเหล็กปลอก	ปริมาณวัสดุเสริมกำลังหลัก (%)	กำลังอัดสูงสุด (kN)	ค่าความเค้นที่กำลังอัดสูงสุด (kN/cm. ²)	หน่วยการยืดหดตัวที่กำลังอัดสูงสุด (mm./mm.)
SFsc	1-SFsc	225	เกลียว	0.0142	380	1.69	0.005
	2-SFsc	225		0.0142	340	1.51	0.004
	3-SFsc	225		0.0142	390	1.73	0.007
SNsc	1-SNsc	225	เกลียว	-	420	1.87	0.004
	2-SNsc	225		-	330	1.47	0.005
	3-SNsc	225		-	310	1.38	0.005
SFsn	1-SFsn	156.25	เกลียว	0.0205	360	2.30	0.004
	2-SFsn	156.25		0.0205	370	2.37	0.004
	3-SFsn*	156.25		0.0205	-	-	-
SNsn	1-SNsn	156.25	เกลียว	-	240	1.54	0.005
	2-SNsn	156.25		-	285	1.82	0.006
	3-SNsn	156.25		-	285	1.82	0.006
CFsc	1-CFsc	176.71	เกลียว	0.0191	320	1.81	0.006
	2-CFsc*	176.71		0.0191	-	-	-
	3-CFsc	176.71		0.0191	370	2.15	0.007
CNsc	1-CNsc	176.71	เกลียว	-	280	1.58	0.003
	2-CNsc	176.71		-	270	1.53	0.006
	3-CNsc	176.71		-	250	1.41	0.007

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) รายละเอียดและกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา

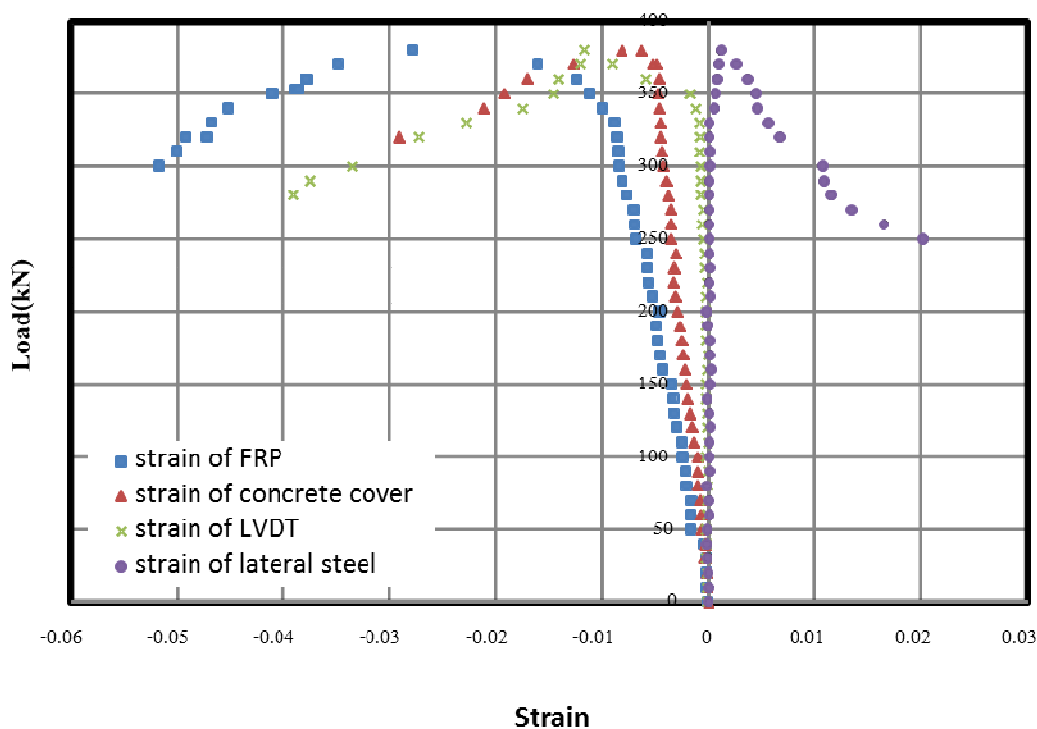
กลุ่มเสาตัวอย่าง		พื้นที่หน้าตัด (cm. ²)	ชนิดของเหล็ก ปลอก	ปริมาณวัสดุเสริม กำลังหลัก (%)	กำลังอัด สูงสุด (kN)	ค่าความ เค้นที่กำลัง อัดสูงสุด (kN/cm. ²)	หน่วยการยึด หดตัวที่กำลัง อัดสูงสุด (mm./mm.)
CFsn	1-CFsn	122.71	เกลียว	0.0263	310	2.53	0.004
	2-CFsn*	122.71		-	-	-	
	3-CFsn	122.71		0.0263	320	2.61	0.004
CNsn	1-CNsn*	122.71	เกลียว	-	-	-	-
	2-CNsn	122.71		-	250	2.04	0.003
	3-CNsn	122.71		-	260	2.12	0.005
SFtc	1-SFtc	225	เดี่ยว	0.0142	360	1.60	0.003
	2-SFtc	225		0.0142	375	1.67	0.004
	3-SFtc	225		0.0142	400	1.78	0.004
SNtc	1-SNtc	225	เดี่ยว	-	320	1.42	0.006
	2-SNtc	225		-	320	1.42	0.004
	3-SNtc	225		-	310	1.38	0.005
SFtn	1-SFtn	156.25	เดี่ยว	0.0205	410	2.62	0.004
	2-SFtn	156.25		0.0205	375	2.40	0.007
	3-SFtn	156.25		0.0205	360	2.30	0.006
SNtn	1-SNtn	156.25	เดี่ยว	0.0205	277	1.77	0.003
	2-SNtn	156.25		0.0205	250	1.60	0.016
	3-SNtn	156.25		0.0205	270	1.72	0.007

หมายเหตุ

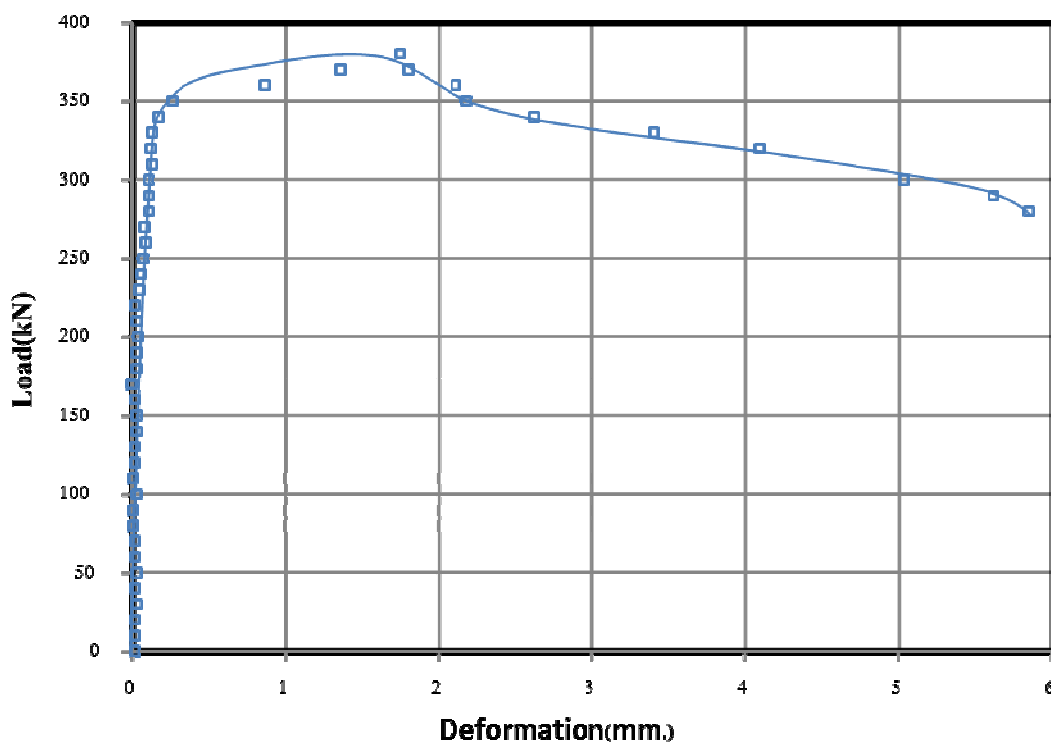
* หมายถึง เสาตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกทำการทดสอบ

4.2 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 1

เสาคอนกรีตตัวอย่างกลุ่มที่ 1 (SFsc) เป็นเสาคอนกรีตที่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 4 เส้น เป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก เสามีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 15x15 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร โดยมีเหล็ก SR24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เป็นเหล็กปลอกประเภทปลอกเกลียว มีระยะห่างระหว่างปลอก 5 เซนติเมตร และมีคอนกรีตส่วนที่หุ้มเหล็กปลอก (Concrete Cover) หนา 1.25 เซนติเมตร จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบในกลุ่มนี้มีทั้งสิ้น 3 ตัวอย่าง ทำการทดสอบภายใต้แรงกระทำในแนวแกน โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุแสดงในรูปที่ 4.1 และความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนของเสาในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา SFsc



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา SFsc

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา พบว่า ในขณะที่เสารับแรงอัดตามแนวแกน เสาคอนกรีตจะค่อยๆเกิดเปลี่ยนแปลงรูปทางด้านข้าง ทำให้เหล็กปลอกเกิดการขยายตัวและเกิดแรงต้านในการช่วยยึดรั้งไม่ให้เสาเกิดการปริแตก ดังนั้นค่าการยืดหดตัวของเหล็กปลอกจึงมีแรงที่เกิดขึ้นเป็นแรงดึง พฤติกรรมการรับแรงของวัสดุนี้จะดำเนินไปจนกระทั่งแรงอัดเพิ่มมากขึ้นถึงประมาณ 350 กิโลนิวตัน สำหรับเหล็กปลอกพบว่า การยืดหดตัวช่วงก่อนแรงอัดประมาณ 350 กิโลนิวตัน เหล็กปลอกมีหน่วยการยืดหดตัวน้อยมากเนื่องจากคอนกรีตและวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยทำหน้าที่ในการรับแรงเป็นส่วนใหญ่ ทำให้แกนเสา คอนกรีตยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทางด้านข้าง จนกระทั่งเสาด้อย่างรับแรงอัดจนเกินค่ารับแรงอัด 350 กิโลนิวตัน เหล็กปลอกจึงเริ่มมีการขยายตัวออกทางด้านข้าง นอกจากนี้การขยายตัวของปลอกเหล็กยังทำให้เกิดรอยแตกร้าวที่ผิวคอนกรีตด้านนอกและเสาคอนกรีตเริ่มสูญเสียกำลังในการรับแรงอัดในเวลาต่อมา แต่เมื่อสังเกตจากความสัมพันธ์ในการรับแรงตามแนวแกนและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกน เสาคอนกรีตยังคงแสดงพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนการวิบัติและวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยจะไม่เกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสาดังแสดง ในรูปที่ 4.1 ค่าของการเปลี่ยนแปลงรูปของคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกขณะที่เสารับแรงสูงสุดมี

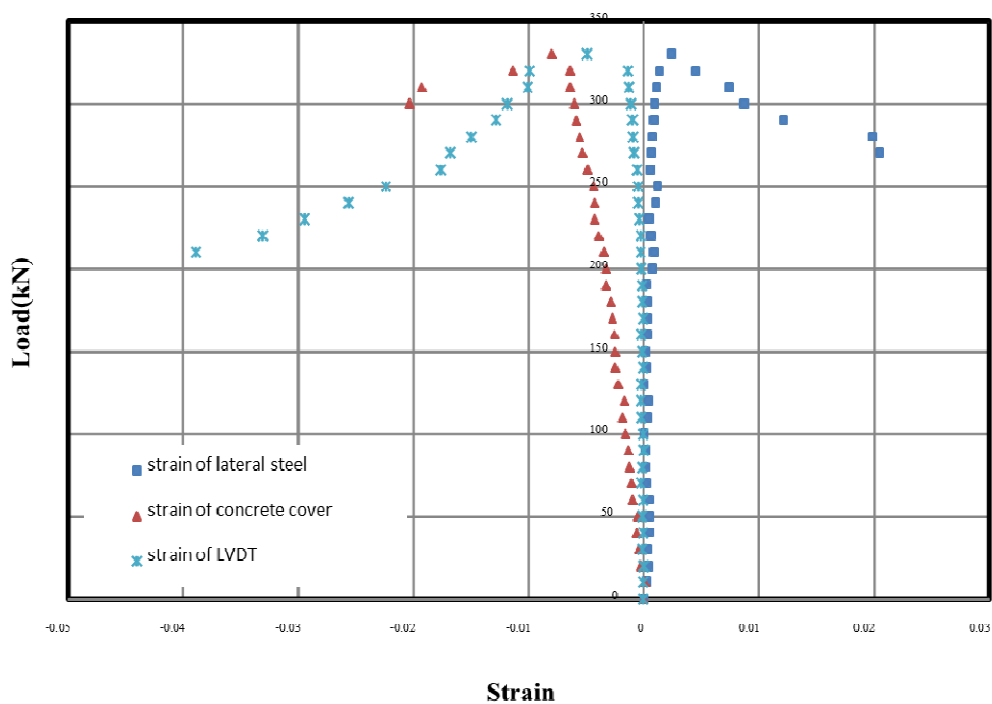
ค่าประมาณ 0.007 มม./มม. และค่าการเปลี่ยนแปลงรูปของเสาขณะที่เรารับแรงอัดสูงสุดอยู่ที่ 0.005 มม./มม. ค่าการเปลี่ยนรูปที่ได้แสดงให้เห็นว่า คอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกได้เกิดการวิบัติก่อนที่เสาจะรับแรงอัดสูงสุด เนื่องจาก ค่าการเปลี่ยนรูปของคอนกรีตหุ้มที่ได้มีค่ามากกว่า 0.003 มม./มม. ดังนั้น คอนกรีตหุ้มจึงเกิดการวิบัติก่อนที่เสาจะรับแรงอัดสูงสุด นอกจากนี้ค่าเปลี่ยนรูปของเหล็กปลอกที่เกิดขึ้นขณะที่เสาคอนกรีตรับแรงอัดสูงสุดมีค่าประมาณ 0.001 มม./มม. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าเปลี่ยนแปลงรูปของคอนกรีตหุ้ม จากรูปที่ 4.3 แสดงการวิบัติในส่วนของวัสดุเสริมกำลังหลัก ซึ่งพบว่าการวิบัติของวัสดุเสริมกำลังหลักในกลุ่มนี้ ไม่ได้เกิดจากการวิบัติเนื่องจากการรับแรงของตัวของวัสดุเอง แต่เกิดจากการ โกงตัวอันเนื่องมาจากแรงดึงที่เกิดขึ้นของเหล็กปลอกในขณะที่เรารับแรงอัด ทั้งนี้เนื่องจากในขณะที่ทดสอบแกนเสาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปออกทางด้านข้างทำให้เหล็กปลอกจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปตามไปด้วย ส่งผลให้วัสดุเสริมกำลังหลักที่ผูกติดกับเหล็กปลอกเกิดการ โกงตัว ซึ่งเมื่อเรารับแรงอัดมากขึ้นเรื่อยๆ วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยจึงเกิดการเกิดการวิบัติตามมา



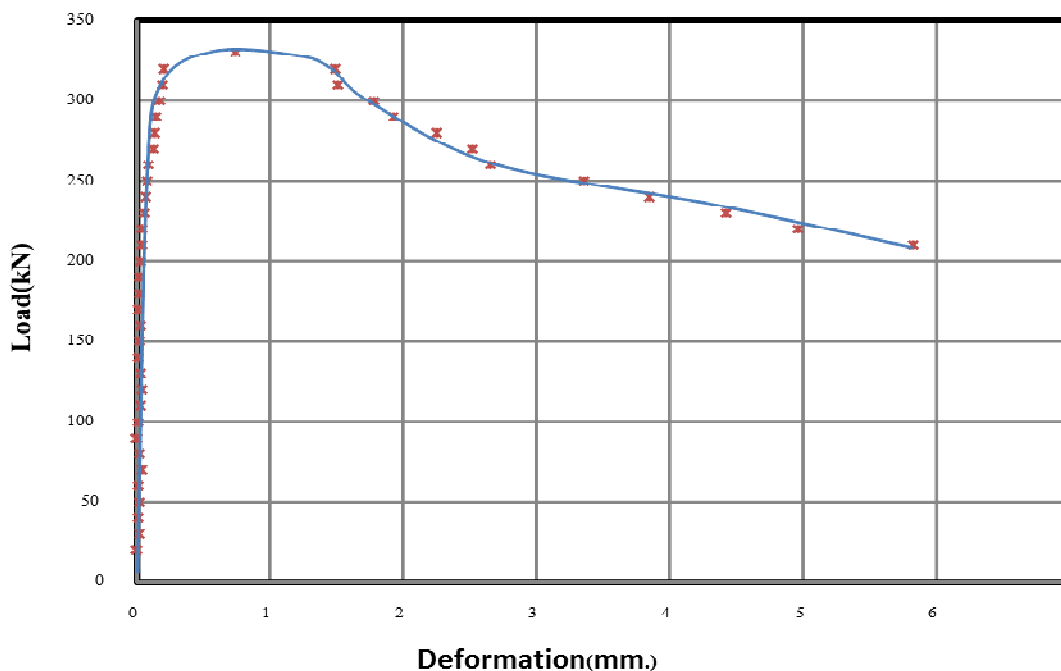
รูปที่ 4.3 การวิบัติของเสากลุ่ม SFsc

4.3 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 2

เสาคอนกรีตกลุ่มที่ 2 (SNsc) นั้นเป็นเสาคอนกรีตที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส เช่นเดียวกับกับเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 1 (SFsc) โดยมีเหล็กเส้นขนาด 6 มิลลิเมตร เป็นเหล็กประเภท ปลอกเกลียว มีระยะห่างระหว่างปลอก 5 เซนติเมตร และมีคอนกรีตหนา 1.25 เซนติเมตร เป็น คอนกรีตที่ใช้หุ้มเหล็กปลอก โดยเสาตัวอย่างสูงประมาณ 50 เซนติเมตร จะมีส่วนที่แตกต่างกับเสา กลุ่มที่ 1 (SFsc) คือ ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก จำนวนเสาตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีด้วยกันทั้งสิ้น 3 ตัวอย่าง เสาถูกทดสอบภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนโดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงตาม แนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุถูกแสดงในรูปที่ 4.4 และความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการ เปลี่ยนรูปตามแนวแกนของเสาแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา SNsc



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา SNsc

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุเสา พบว่าเมื่อเสาตัวอย่างเริ่มรับแรงกระทำจนกระทั่งถึงกำลังรับแรงอัดที่ประมาณ 300 กิโลนิวตัน ลักษณะของหน่วยการยึดหดตัวของเหล็กปลอกมีค่าน้อยมาก สังเกตได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้น (Linear) ที่มีความชันมาก เนื่องจากในช่วงแรกของการรับแรงอัดตามแนวแกนเสาคอนกรีตตัวอย่างยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปหรือเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้าง อย่างไรก็ตามเมื่อแรงอัดมากขึ้นจนกระทั่งเสารับแรงอัดสูงกว่า 300 กิโลนิวตัน เสาตัวอย่างจะเริ่มเกิดการปริแตกที่ผิวด้านนอก ในขณะเดียวกันหน่วยการยึดหดตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากจนทำให้เสาเกิดการวิบัติอย่างช้าๆ อย่างไรก็ตามเสาตัวอย่างยังคงแสดงพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนการวิบัติทั้งนี้ เป็นผลมาจากการโอบรัดเนื่องจากเหล็กปลอกมีส่วนช่วยให้เสามีพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนการวิบัติ

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุดังแสดงในรูปที่ 4.4 ในขณะที่เสารับแรงอัดสูงสุด ค่าของการเปลี่ยนแปลงรูปที่เกิดขึ้นบริเวณผิวด้านนอกของคอนกรีตหุ้มมีค่าประมาณ 0.006 มม./มม. และค่าการเปลี่ยนแปลงรูปที่เกิดขึ้นกับเสาขณะที่เสารับแรงอัดสูงสุดมีค่าประมาณ 0.005 มม./มม. ค่าการเปลี่ยนแปลงรูปที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตเกิดการวิบัติก่อนที่เสาจะรับแรงอัดสูงสุด นอกจากนี้ค่าการเปลี่ยนรูปของเสาในขณะที่เสารับแรงอัดสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.004 มม./มม. การวิบัติของเสาในกลุ่มนี้ จะเริ่มจากการหดตัวตามแนวแกนของเสาและจะตามมาด้วยการแตกร้าวของคอนกรีตหุ้มอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปทางด้านข้าง

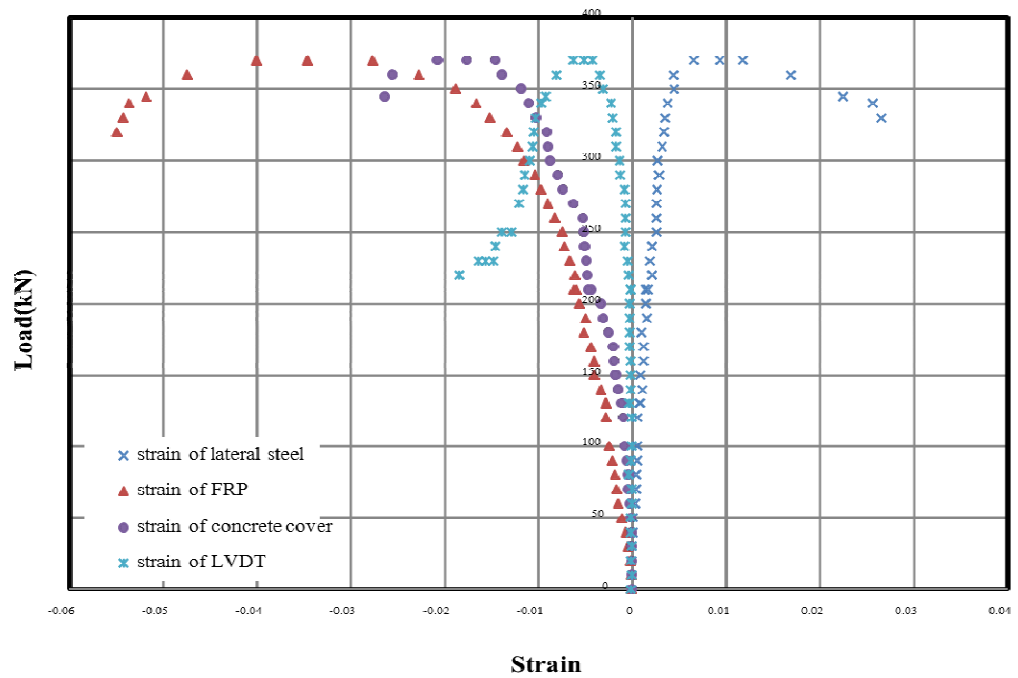
ของเหล็กปลอก โดยเมื่อเสารับแรงอัดเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆคอนกรีตหุ้มก็จะเกิดการกะเทาะและจะค่อยๆ เกิดการวิบัติของเสาอย่างช้าๆ ดังแสดงการวิบัติของเสาในกลุ่มนี้ในรูปที่ 4.6



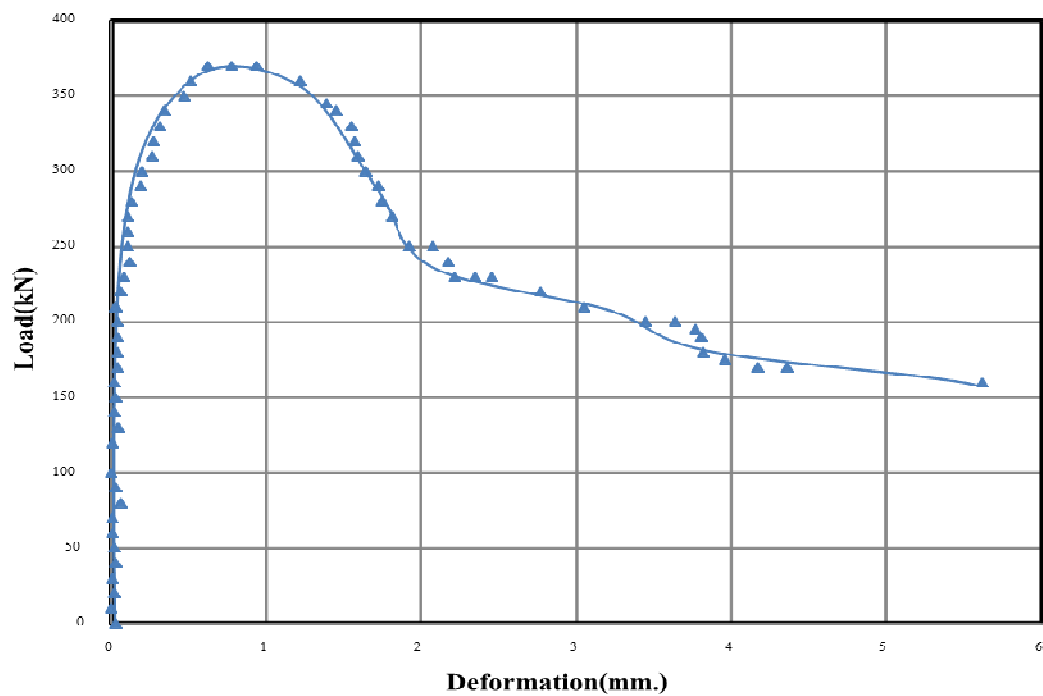
รูปที่ 4.6 การวิบัติของเสาในกลุ่ม SNsc

4.4 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 3

เสาตัวอย่างในกลุ่มที่ 3 (SFsn) เป็นเสาสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีหน้าตัดขนาด 12.5x12.5 เซนติเมตร มีเส้นเหล็ก SR24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เป็นเหล็กปลอกประเภทปลอกเกลียวมีระยะห่างระหว่างปลอก 5 เซนติเมตร มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 4 เส้น เป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก อย่างไรก็ตามเสาตัวอย่างในกลุ่มนี้ จะไม่มีคอนกรีตที่ใช้ในการหุ้มเหล็กปลอก ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีด้วยกันทั้งสิ้น 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างเสาถูกทดสอบภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนโดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุแสดงในรูปที่ 4.7 และความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา SFsn



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา SFsn

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุ พบว่า ขณะที่เสารับแรงอัดตามแนวแกน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและหน่วยการยืดหดตัวของผิวคอนกรีตในแนวเดียวกับแรงอัดมีค่าเป็นลบ ซึ่งค่าที่ได้จะมีค่ามากเมื่อเทียบกับเสาตัวอย่างประเภทที่มีคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (เสาในกลุ่มที่ 1) ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องมือวัดหน่วยการยืดหดตัว (Strain gages) อยู่ในแนวระดับเดียวกับขอบนอกของเหล็กปลอก การที่เสาคอนกรีตในกลุ่มนี้ไม่มีคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกทำให้ในขณะที่รับแรงอัด ปลอกเหล็กจะบีบรัดแกนของเสา คอนกรีตโดยตรง การเปลี่ยนแปลงรูปของเหล็กปลอกในช่วงก่อนที่เสาจะรับแรงอัดถึง 350 กิโลนิวตัน พบว่ามีค่าน้อยมากซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปทางด้านข้างของเสาที่ยังเกิดขึ้นน้อย แต่เมื่อเสารับแรงอัดเกินกว่า 350 กิโลนิวตัน การเปลี่ยนแปลงรูปที่เกิดในเหล็กปลอกจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเสาเกิดการหดตัวตามแนวแกนมากขึ้นทำให้แกนเสาเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงรูปทางด้านข้างส่งผลให้เหล็กปลอกต้องทำหน้าที่ในการช่วยโอบรัดไม่ให้แกนของเสา คอนกรีตเกิดการขยายตัวออก การหดตัวของเสาตามแนวแกนยังส่งผลทำให้อุปกรณ์วัดระยะ (LVDT) เกิดการหดตัวซึ่งทำให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวที่ได้มีค่าน้อยและมีความชันมากในช่วงก่อนถึงกำลังรับแรงอัดที่ประมาณ 350 กิโลนิวตัน เนื่องจากเสายังรับแรงอัดไม่มาก แต่เมื่อแรงอัดเพิ่มมากขึ้นต่อไปเรื่อยๆ ค่าของหน่วยการยืดหดตัวจะเริ่มไม่เป็นเชิงเส้น

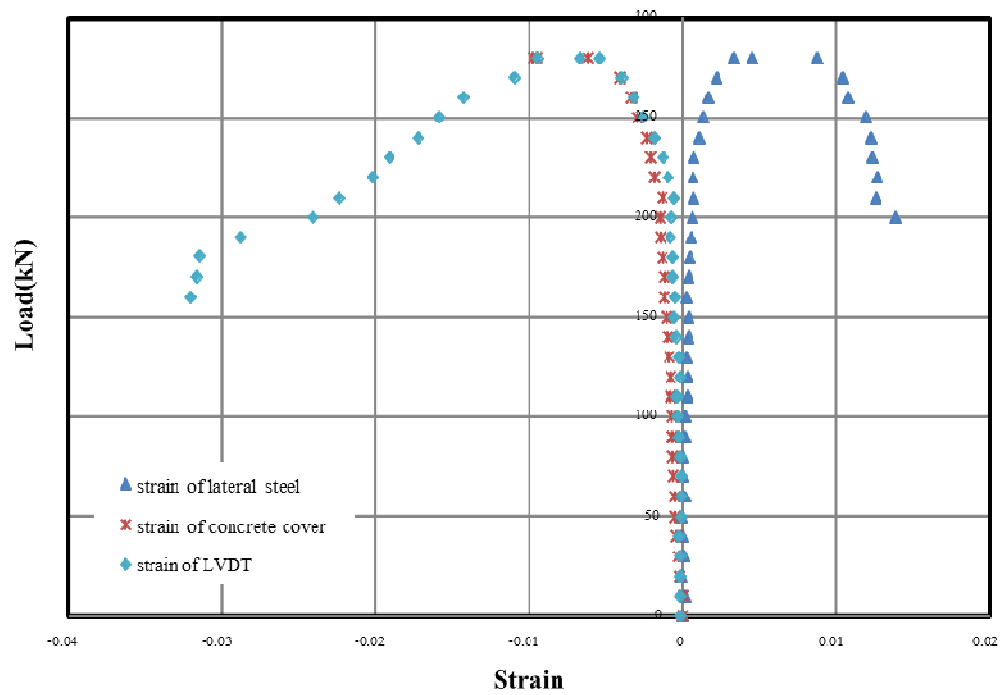
ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุตั้งในรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าขณะที่เสารับแรงอัดสูงสุด ค่าการเปลี่ยนแปลงรูปที่ผิวคอนกรีตหุ้มมีค่าประมาณ 0.02 มม./มม. เสาในกลุ่มนี้ไม่มีคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก ค่าการเปลี่ยนแปลงรูปที่ได้จึงมากกว่าเสาในกลุ่มเดียวกันที่มีคอนกรีตหุ้ม (SFsc) เนื่องจากสเตรนเกจอยู่ในแนวระดับเดียวกับปลอก ค่าการเปลี่ยนแปลงรูปของคอนกรีตหุ้มไม่ได้เกิดจากแรงอัดของเสาเพียงอย่างเดียว แต่ยังรวมไปถึงการบีบรัดของเหล็กปลอกที่ติดกับแกนเสาคด้วย ในขณะที่เสารับแรงอัดสูงสุด การเปลี่ยนแปลงรูปของเสาจะมีค่าประมาณ 0.004 มม./มม. ในเหล็กปลอกจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงรูปประมาณ 0.006 มม./มม. สำหรับการวิบัติที่เกิดขึ้นในส่วนของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่เป็นวัสดุเสริมกำลังหลักของเสาในกลุ่มนี้ เกิดจากการบิดตัวของเหล็กปลอกในขณะที่รับแรงอัด เนื่องจากขณะที่รับแรงอัดเสา จะเกิดการหดตัว ส่งผลทำให้แกนเสาเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้าง เหล็กปลอกจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปตามแกนเสาเพื่อยึดรั้งไม่ให้แกนเสาเปลี่ยนแปลงรูป การบิดตัวของเหล็กปลอกส่งผลทำให้วัสดุเสริมกำลังหลักที่ผูกติดกับเหล็กปลอกเกิดการ โกงตัว และเมื่อเสารับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น วัสดุเสริมกำลังหลักจึงจะเกิดการวิบัติดังแสดงในรูปที่ 4.9



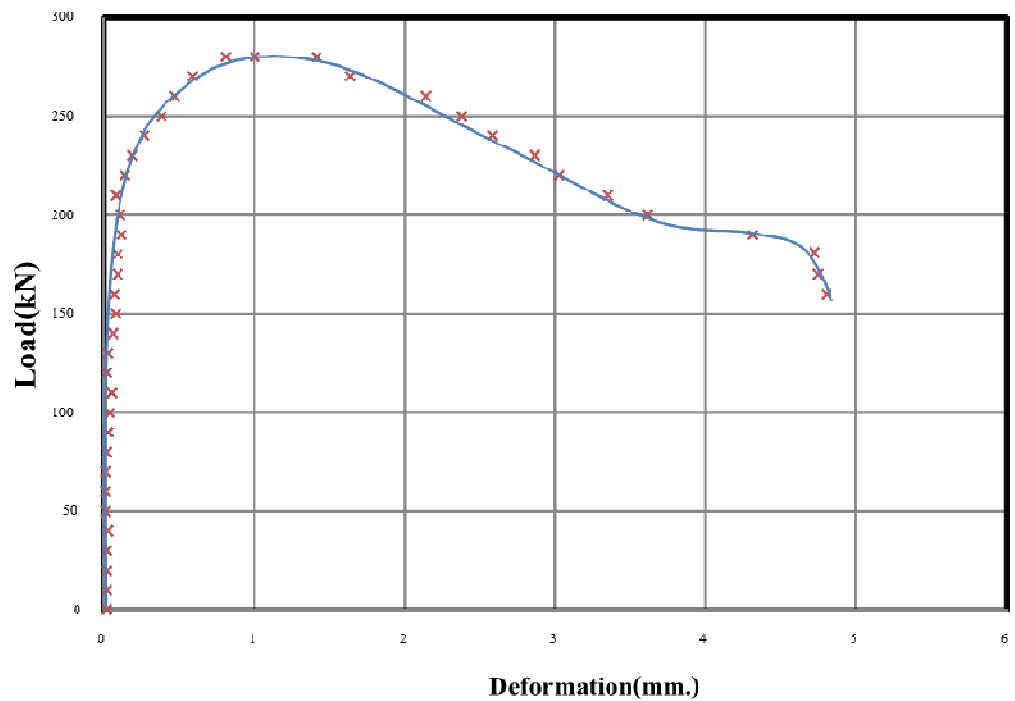
รูปที่ 4.9 การวิบัติของเสาในกลุ่ม SFsn

4.5 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 4

เสาตัวอย่างในกลุ่มที่ 4 (SNsn) เป็นเสาสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีหน้าตัดขนาด 12.5x12.5 เซนติเมตร มีเส้นเหล็ก SR24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เป็นเหล็กปลอกประเภทปลอกเกลียว มีระยะห่างระหว่างปลอก 5 เซนติเมตร เสาตัวอย่างกลุ่มนี้จะไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลักและไม่มีคอนกรีตที่ใช้ในการหุ้มเหล็กปลอก ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีด้วยกันทั้งสิ้น 3 ตัวอย่าง เสาตัวอย่างถูกทดสอบภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุแสดงในรูปที่ 4.10 และความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุของเสา SNsn



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา SNsn

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า เมื่อเสาตัวอย่างรับแรงกระทำจนกระทั่งแรงอัดมีค่าประมาณ 150 กิโลนิวตัน หน่วยการยืดหดตัวของวัสดุที่ได้มีความใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากแรงที่กระทำกับเสามีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงอัดสูงสุด แต่เมื่อเสารับแรงอัดเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่า 150 กิโลนิวตัน หน่วยการยืดหดตัวของวัสดุทั้งหมดในเสาตัวอย่างจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยหน่วยการยืดหดตัวที่เกิดขึ้นในเหล็กปลอกจะมีค่าเป็นบวก ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเสารับแรงอัด เหล็กปลอกจะเป็นตัวช่วยในการรับแรงของเสาคอนกรีตไม่ให้เกิดการยืดตัวออกทางด้านข้าง เป็นผลทำให้เหล็กปลอกเกิดแรงดึงขึ้นในเหล็กปลอกทำให้ค่าหน่วยการยืดหดตัวที่ได้ของเหล็กปลอกเป็นบวกในกรณีของหน่วยการยืดหดตัวที่เกิดขึ้นที่ผิวคอนกรีตและที่อุปกรณ์วัดระยะ (LVDT) หน่วยการยืดหดตัวที่ได้จะมีค่าเป็นลบ เนื่องจากเสาตัวอย่างเมื่อรับแรงอัดจะเกิดการหดตัวในแนวแกนทำให้อุปกรณ์วัดระยะ (LVDT) หดตัวตามไปด้วย สำหรับค่าหน่วยการยืดหดตัวที่เกิดขึ้นที่ผิวของคอนกรีตที่วัดได้จากสเตรนเกจ ค่าที่ได้มีค่าเป็นลบเช่นกันซึ่งบ่งบอกว่าที่ผิวของคอนกรีตเกิดการหดตัวตามแนวแกน ค่าการเปลี่ยนแปลงรูปที่อ่านได้จะมีค่ามากเมื่อเทียบกับเสาตัวอย่างประเภทเดียวกันแต่มีคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (SNsc) ซึ่งเกิดจากการที่ปลอกเหล็กบีบรัดสเตรนเกจที่ถูกติดตั้งในแนวระดับเดียวกับเหล็กปลอกโดยตรงขณะทดสอบ เนื่องจากตำแหน่งที่ติดตั้งของสเตรนเกจต้องไปติดตั้งในแนวระดับเดียวกันกับเหล็กปลอกเนื่องจากเสาในตัวอย่างนี้ไม่มีคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก อย่างไรก็ตามเสาตัวอย่างในกลุ่มนี้แสดงให้เห็นว่า เสาที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลักแต่มีเฉพาะเหล็กปลอกก็ยังสามารถแสดงพฤติกรรมแบบเหนียวได้ก่อนการวิบัติ

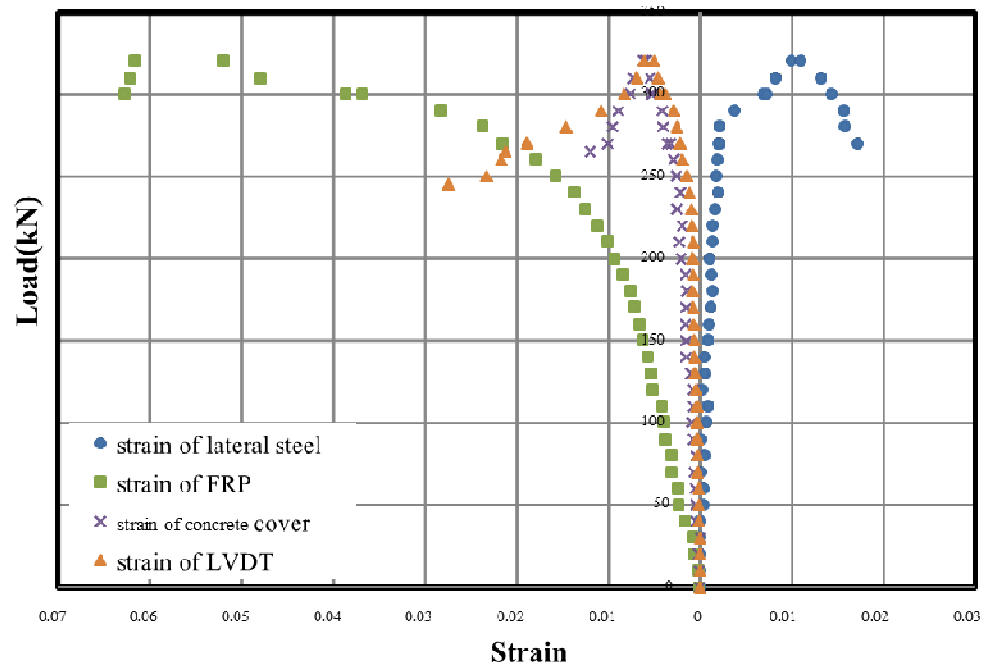
จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวสำหรับวัสดุของเสา กลุ่ม SNsn แสดงให้เห็นว่า ขณะที่เสารับแรงอัดสูงสุดการเปลี่ยนแปลงรูปของคอนกรีตของเสาในกลุ่มนี้มีค่าประมาณ 0.009 มม./มม. และการเปลี่ยนแปลงรูปมีค่าประมาณ 0.006 มม./มม. แต่เนื่องจากเสาในกลุ่มนี้เป็นเสาที่ไม่มีคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก ค่าการเปลี่ยนแปลงรูปที่ได้จึงมีค่ามากกว่าเสาประเภทเดียวกันที่มีคอนกรีตหุ้ม (SNsc) โดยรูปการวิบัติของเสาในกลุ่มนี้ได้แสดงในรูปที่ 4.12



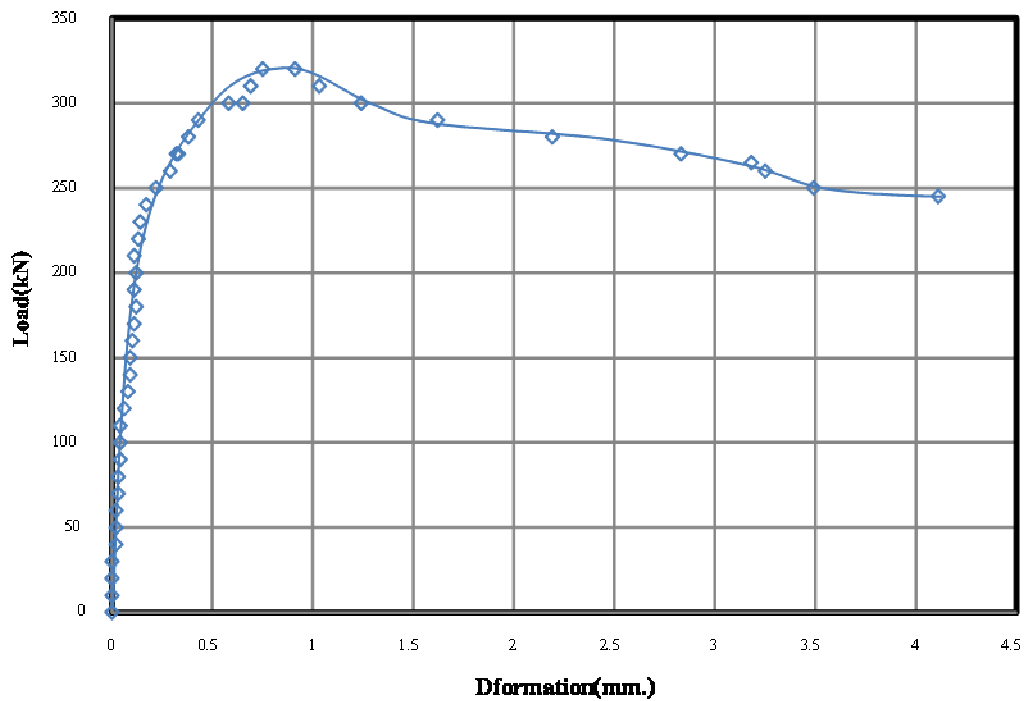
รูปที่ 4.12 การวิบัติของเสาในกลุ่ม SNsn

4.6 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 5

เสาตัวอย่างกลุ่มที่ 5 (CFsc) เป็นเสาตัวอย่างที่มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15 เซนติเมตร มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เป็นวัสดุเสริมกำลังหลักจำนวน 4 เส้น โดยเหล็กเส้น SR 24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เป็นเหล็กปลอกเกลียว และมีระยะห่างระหว่างปลอก 5 เซนติเมตร คอนกรีตที่ใช้หุ้มปลอกเหล็กหนา 1.25 เซนติเมตร และเสาตัวอย่างมีความสูงประมาณ 50 เซนติเมตร ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างเสาถูกทดสอบภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนโดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุแสดงในรูปที่ 4.13 และความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาแสดงในรูป 4.14



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุของเสา CFsc



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา CFsc

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุ พบว่า ภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนเสาตัวอย่างในกลุ่มนี้มีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 1 (SFsc) ที่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก กล่าวคือความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการยืดหดตัวที่ได้ในช่วงตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงกำลังรับแรงอัดประมาณ 350 กิโลนิวตัน จะมีลักษณะแบบเชิงเส้น และมีการเปลี่ยนรูปมากขึ้นเมื่อเสาตัวอย่างรับแรงอัดมากขึ้น สำหรับหน่วยการยืดหดตัวในช่วงการรับแรงอัดของเสาตัวอย่างก่อน 250 กิโลนิวตัน หน่วยการยืดหดตัวของเหล็กปลอกและค่าการเปลี่ยนแปลงรูปของอุปกรณ์วัดระยะ (LVDT) มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากเสาตัวอย่างยังคงรับแรงอัดที่น้อยเมื่อเทียบกับกำลังอัดสูงสุดของเสา แต่เมื่อเสาตัวอย่างรับแรงอัดจนเกินกว่า 350 กิโลนิวตัน หน่วยการยืดหดตัวที่ได้จะเริ่มไม่เป็นเชิงเส้น

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย พบว่า การยืดหดตัวของเสาตัวอย่างเมื่อรับแรงอัดตามแนวแกน ในช่วงเริ่มต้นของการทดสอบจนกระทั่งแรงอัดมีค่าประมาณ 200 กิโลนิวตัน การยืดหดตัวที่เกิดขึ้นกับวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยในช่วงนี้มีค่าน้อยมาก แต่เมื่อเสาตัวอย่างรับแรงอัดมากกว่า 200 กิโลนิวตัน การเปลี่ยนแปลงรูปที่เกิดขึ้นในวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลมาจากการหดตัวที่เกิดขึ้นในเสาตัวอย่างหลังจากรับแรงอัด นอกจากนี้การหดตัวที่เกิดขึ้นในเสาตัวอย่างยังส่งผลทำให้เหล็กปลอกเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้าง เนื่องจากแกนของเสาเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปออกทางด้านข้างส่งผลทำให้เหล็กปลอกทำหน้าที่ในการยึดรั้งเพื่อทำให้แกนของเสาไม่เกิดการขยายตัว ผลที่ได้ทำให้เกิดแรงดึงขึ้นในเหล็กปลอก การขยายตัวของแกนเสายังส่งผลไปถึงคอนกรีตที่ใช้หุ้มเหล็กปลอกด้วย เนื่องจากการขยายตัวของแกนเสาทำให้เหล็กปลอกขยายตัวตามเพื่อยึดรั้งแกนเสา ทำให้คอนกรีตที่ทำหน้าที่หุ้มเหล็กปลอกเกิดการแตกร้าวและเริ่มมีการหลุดร่อนเมื่อแกนเสาเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปออกทางด้านข้างมากขึ้นเนื่องจากการหดตัวตามแนวแกนของเสา

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุสำหรับเสา กลุ่ม CFsc การเปลี่ยนแปลงรูปขณะที่เสารับแรงอัดสูงสุดของเสาในกลุ่มนี้จะมีค่าประมาณ 0.006 มม./มม. และคอนกรีตหุ้มจะมีค่าประมาณ 0.005 มม./มม. และเหล็กปลอกจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงรูปขณะที่เสารับแรงอัดสูงสุดประมาณ 0.011 มม./มม. จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตได้เกิดการวิบัติก่อนที่เสาจะรับแรงอัดสูงสุด การวิบัติที่เกิดขึ้นในส่วน of วัสดุเสริมกำลังหลักมีการวิบัติโดยเมื่อรับแรงอัดเสาจะเกิดการหดตัวส่งผลทำให้เหล็กปลอกจะเกิดการบิดตัวตามแนวแกน เกิดแรงดึงทำให้วัสดุเสริมกำลังหลักเกิดการบิดตัวตามเหล็กปลอก ซึ่งเมื่อเสารับแรงอัดมากขึ้นเรื่อยๆ วัสดุ

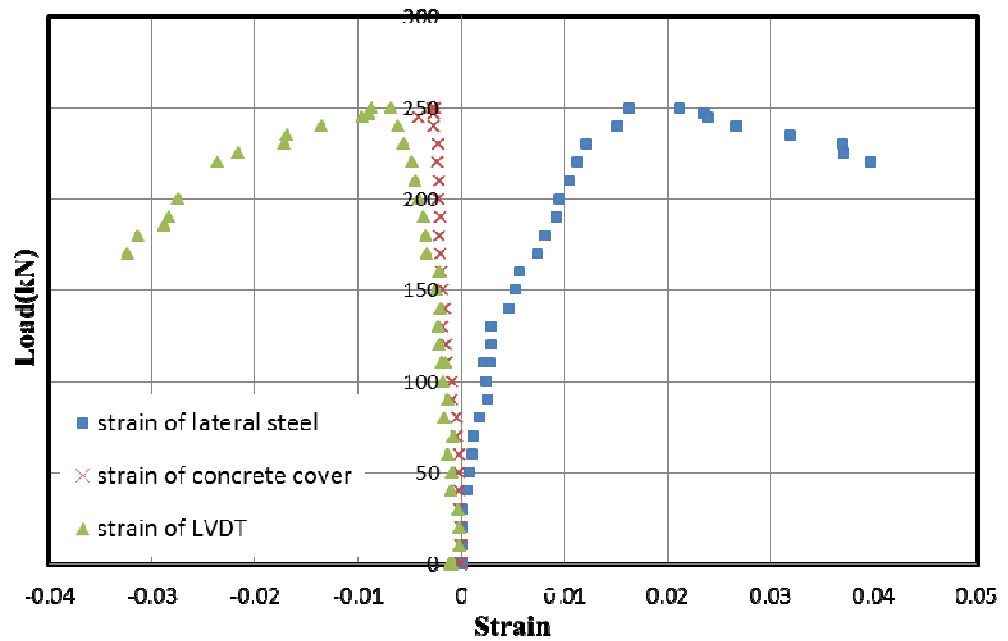
เสริมกำลังหลักจะเกิดการ โกงตัวและจะค่อยๆ วิบัติอย่างช้าๆ การวิบัติเนื่องจากแรงอัดของวัสดุเสริมกำลังหลักจะเกิดขึ้นภายในหนึ่งช่วงเหล็กปลอกเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.15



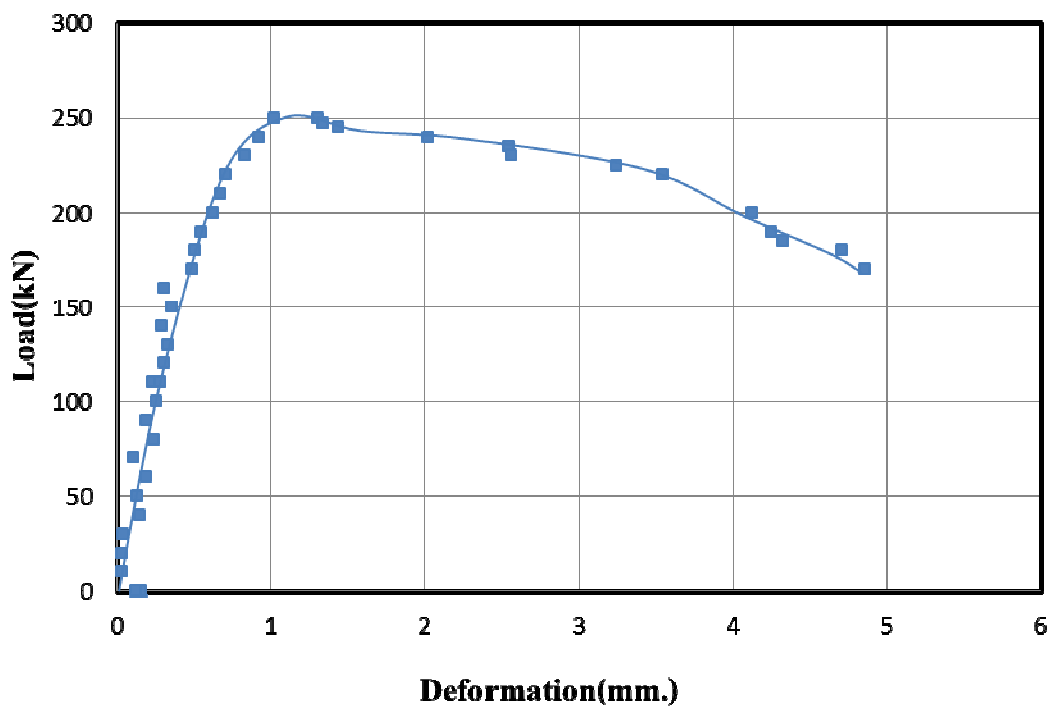
รูปที่ 4.15 การวิบัติของเสากลุ่ม CFsc

4.7 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 6

เสาตัวอย่างกลุ่มที่ 6 (CNsc) เป็นเสาตัวอย่างที่มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 12.5 เซนติเมตร มีเหล็กเส้น SR 24 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เป็นเหล็กปลอกเกลียว โดยมีระยะห่างระหว่างปลอก 5 เซนติเมตร และมีคอนกรีตที่ใช้หุ้มเหล็กปลอกหนา 1.25 เซนติเมตร สำหรับเสาตัวอย่างในกลุ่มนี้จะไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบในกลุ่มนี้มีทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างเสาถูกทดสอบภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดยาวตัวของวัสดุถูกแสดงในรูปที่ 4.16 และความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุของเสา CNsc



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา CNsc

ในกรณีของเสาตัวอย่างหน้าตัดกลมที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก พบว่าค่าหน่วยการยืดหดตัวที่เกิดขึ้นทั้งในส่วนของเหล็กปลอกและที่ผิวคอนกรีต คล้ายกับตัวอย่างในกลุ่มที่ 2 (SNsc) คือเมื่อเสาตัวอย่างรับแรงอัดตั้งแต่เริ่มต้นการทดสอบจนถึงแรงอัดประมาณ 200 กิโลนิวตัน ความสัมพันธ์ของหน่วยการยืดหดตัวและแรงกระทำที่ได้จะเป็นไปในลักษณะของเชิงเส้น และเมื่อเสาตัวอย่างรับน้ำหนักมากกว่า 200 กิโลนิวตัน ลักษณะความสัมพันธ์และแรงกระทำจะไม่เป็นเชิงเส้น ทั้งนี้เกิดจากการที่เสาเริ่มมีการหดตัวตามแนวแกนมากขึ้น อีกทั้งเสายังเริ่มมีการปริแตกที่ผิวด้านนอกที่เป็นส่วนของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กปลอก ทั้งนี้เกิดจากการที่เหล็กปลอกภายในเสากเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้างเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปของแกนเสา เสาตัวอย่างจะรับแรงอัดต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสากัดรอยร้าวและตามมาด้วยเหล็กปลอกเกิดการขยายตัวออกทางด้านข้างเป็นผลทำให้ส่วนที่เป็นคอนกรีตหุ้มเกิดกะเทาะแยกออกจากเหล็กปลอกในที่สุด ทำให้หน่วยการยืดหดตัวที่เกิดขึ้นจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งหลังจากเสารับแรงอัดสูงสุดจะเกิดการวิบัติอย่างช้าๆ

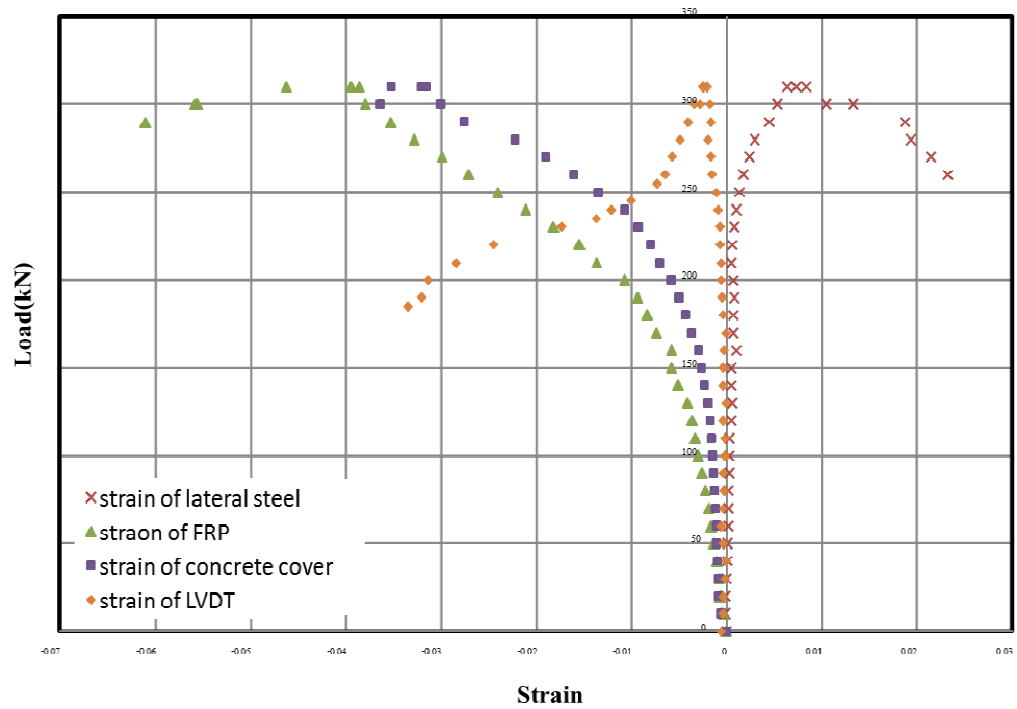
จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุสำหรับเสา CNsc ทำให้ทราบว่าขณะที่เสารับแรงอัดสูงสุด ค่าการเปลี่ยนแปลงรูปของคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกมีค่าประมาณ 0.003 มม./มม. สำหรับในเหล็กปลอกจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงรูปอยู่ที่ประมาณ 0.012 มม./มม. จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่าคอนกรีตจะเกิดการวิบัติขณะที่เสารับแรงอัดสูงสุดพอดี และเนื่องจากขณะรับแรงอัดสูงสุด เหล็กปลอกเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปค่อนข้างมาก สาเหตุเนื่องจากแกนของเสากเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปออกทางด้านข้าง โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงรูปของเสาขณะรับแรงอัดสูงสุดมีค่าประมาณ 0.006 มม./มม. การวิบัติของเสาในกลุ่มนี้คอนกรีตจะเกิดรอยแตกร้าวตามแนวขวางที่บริเวณกลางเสา หลังจากนั้นรอยแตกร้าวจะเริ่มขยายวงกว้างและเมื่อเสารับแรงอัดต่อไปเรื่อยๆ คอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกเริ่มหลุดร่อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปทางด้านข้างของเหล็กปลอก ดังแสดงในรูปที่ 4.18



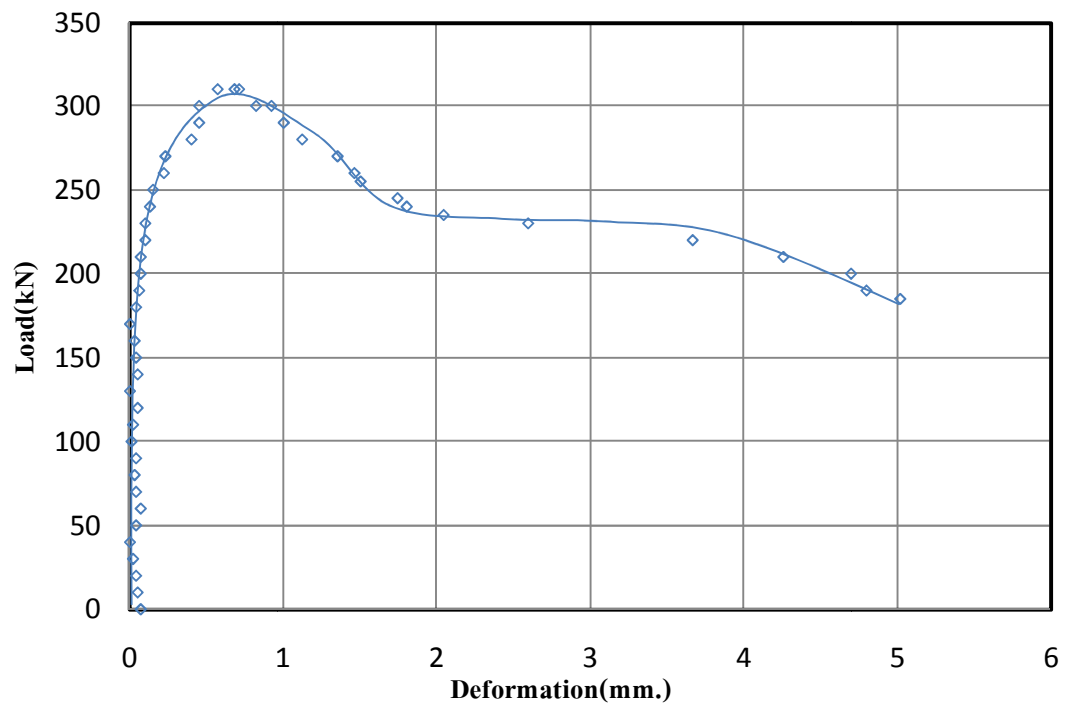
รูปที่ 4.18 การวิบัติของเสากลุ่ม CNsc

4.8 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 7

เสาตัวอย่างกลุ่มที่ 7 เป็นเสาตัวอย่างที่มีหน้าตัดเป็นวงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร มีเหล็กเส้น SR24 ขนาด 6 มิลลิเมตร เป็นเหล็กปลอกประเภทปลอกเกลียว มีระยะห่างของปลอก 5 เซนติเมตร โดยเสาในกลุ่มนี้จะไม่มียอนกรีตที่ใช้หุ้มเหล็กปลอก และใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 4 เส้น เป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ทำการทดสอบภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุแสดงในรูป 4.19 ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาแสดงในรูปที่ 4.20



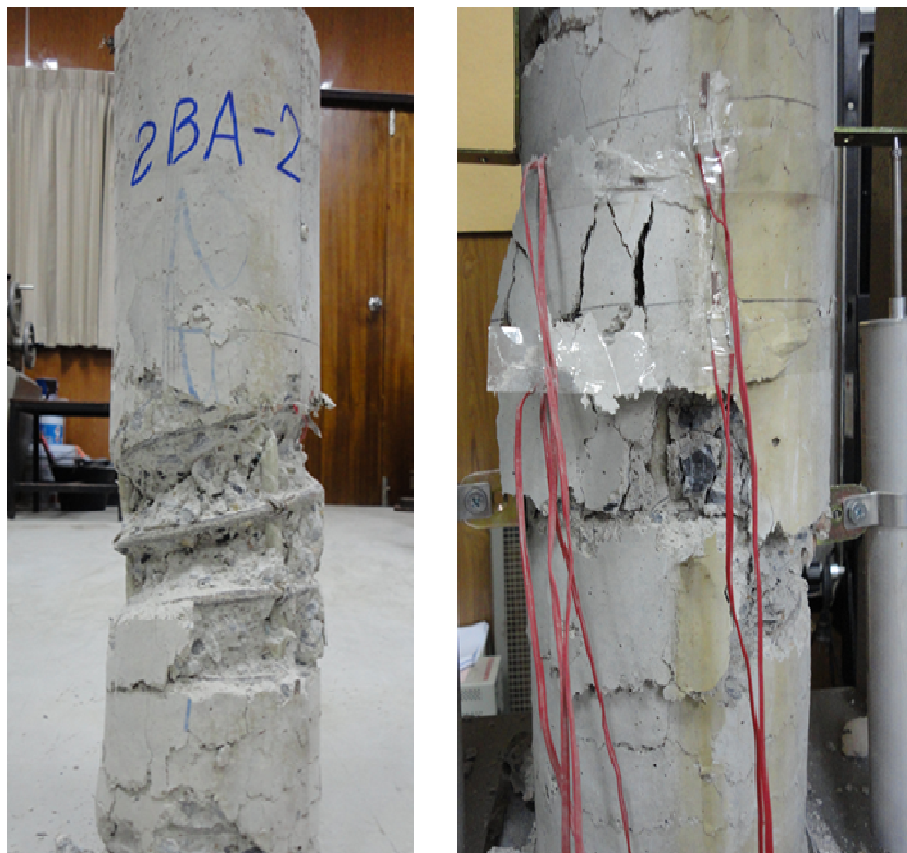
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุของเสา CFsn



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา CFsn

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการยืดหดตัวของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย พบว่า ค่าการยืดหดตัวที่เกิดขึ้นในส่วนของเหล็กปลอกและอุปกรณ์วัดระยะ (LVDT) ในขณะที่เสาตัวอย่างรับแรงอัดประมาณ 250 กิโลนิวตัน จะมีค่าต่ำและใกล้เคียงกันมาก โดยที่ลักษณะความสัมพันธ์ของค่าการยืดหดตัวและแรงกระทำที่ได้มีลักษณะเป็นเชิงเส้น จนเมื่อเสาตัวอย่างรับแรงอัดถึงประมาณ 260 กิโลนิวตัน ความสัมพันธ์ของหน่วยการยืดหดตัวและแรงกระทำของเหล็กปลอกและอุปกรณ์วัดระยะ LVDT จะมีค่ามากขึ้นทั้งนี้เกิดจากการที่เสาเกิดการหดตัวตามแนวแกนมากขึ้น ส่งผลให้วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยหดตัวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้การหดตัวที่เกิดขึ้นของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ใช้เป็นวัสดุเสริมกำลังหลักแล้วแรงอัดตามแนวแกนยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทางด้านข้างของแกนเสา ส่งผลให้เหล็กปลอกที่ถูกมัดติดกับวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยทำหน้าที่ในการโอบรัดไม่ให้แกนของเสาเกิดการขยายตัว ผลการโอบรัดของเหล็กปลอกทำให้เกิดแรงดึงภายในเหล็กปลอก นอกจากนี้การขยายตัวออกทางด้านข้างของเหล็กปลอกยังส่งผลทำให้คอนกรีตที่ใช้หุ้มเหล็กปลอกเกิดการแตกร้าวและเมื่อเสารับแรงอัดสูงสุดคอนกรีตที่หุ้มเหล็กปลอกจะเกิดการหลุดร่อน โดยหลังจากนั้นเสาตัวอย่างจะค่อยๆ เกิดการวิบัติอย่างช้าๆ

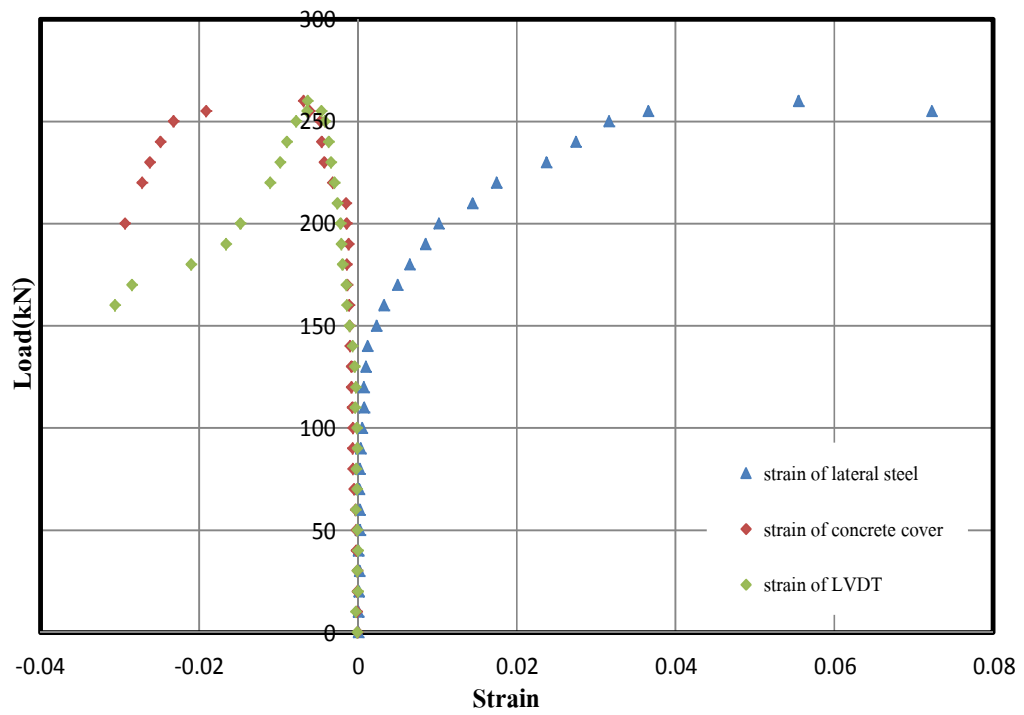
จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุสำหรับเสา กลุ่ม CFsn พบว่าเสาในกลุ่มนี้มีค่าการเปลี่ยนแปลงรูปของคอนกรีตขณะที่เสารับแรงอัดสูงสุดมีค่าประมาณ 0.033 มม./มม. และมีค่าการเปลี่ยนรูปของเสาในขณะที่รับแรงอัดสูงสุดประมาณ 0.004 มม./มม. ค่าการเปลี่ยนแปลงรูปที่ได้จากคอนกรีตจะมีค่ามากกว่าเสาในกลุ่มเดียวกันที่มีคอนกรีตหุ้ม (CFsc) เนื่องจากค่าการเปลี่ยนแปลงรูปของคอนกรีตหุ้มของเสาในกลุ่มนี้ไม่ได้เกิดขึ้นจากแรงอัดที่มีต่อคอนกรีตเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีแรงที่เกิดจากการบีบรัดของเหล็กปลอกที่กระทำต่อสเตรนเกจที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงรูปของผิวคอนกรีตด้วย สำหรับการวิบัติของเสาในกลุ่มนี้จะเริ่มมีการแตกร้าวของคอนกรีตหุ้มตามขวาง โดยจะเริ่มเกิดการแตกร้าวที่บริเวณกลางเสา เนื่องจากเสามีการหดตัวส่งผลทำให้แกนเสาเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปออกทางด้านข้าง และเสาจะค่อยๆ เกิดการวิบัติอย่างช้าๆ เมื่อรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.21 สำหรับการวิบัติของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่เป็นวัสดุเสริมกำลังหลักมีลักษณะการวิบัติจะมีความคล้ายคลึงกับเสาในกลุ่ม SFsn กล่าวคือ เมื่อเสามีการหดตัวเนื่องจากแรงตามแนวแกน เหล็กปลอกจะเริ่มเกิดการบิดตัว ทำให้วัสดุเสริมกำลังหลักเกิดการโค้งตัวและจะเกิดการวิบัติเมื่อเสารับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น



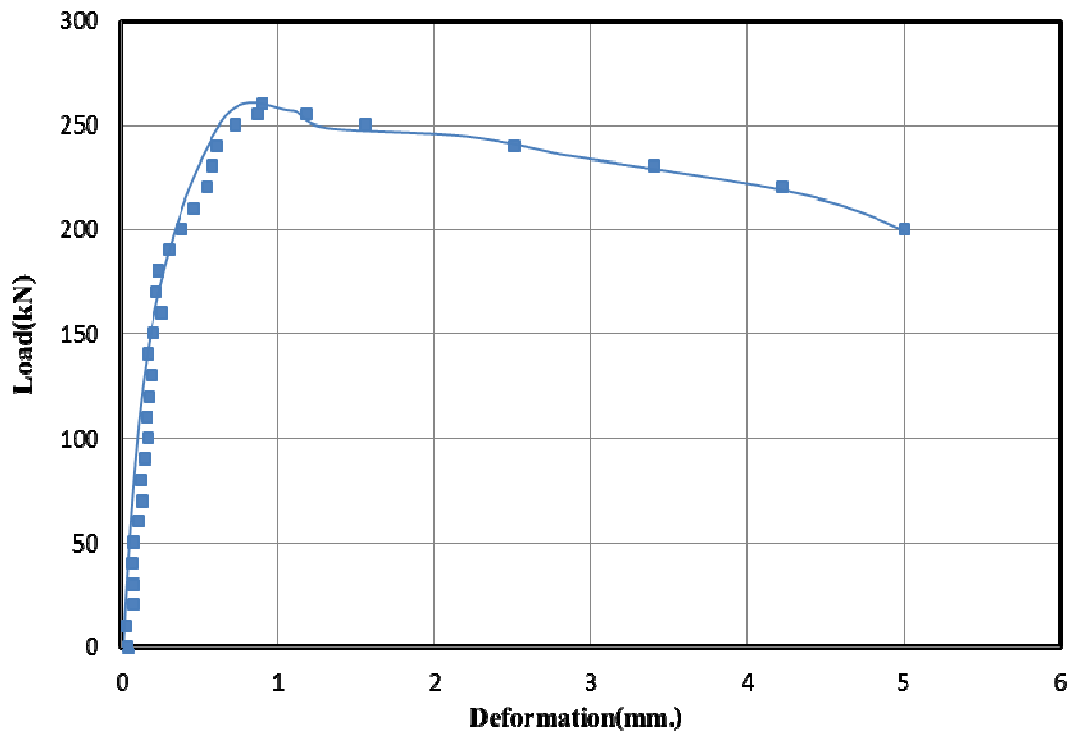
รูปที่ 4.21 การวิบัติของเสากลุ่ม CFsn

4.9 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 8

เสาตัวอย่างกลุ่มที่ 8 เป็นเสาตัวอย่างที่มีหน้าตัดเป็นวงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร มีเหล็กเส้น SR24 ขนาด 6 มิลลิเมตร เป็นเหล็กปลอกประเภทปลอกเกลียว มีระยะห่างของปลอก 5 เซนติเมตร เสาในกลุ่มนี้จะไม่มีคอนกรีตที่ใช้หุ้มเหล็กปลอก และไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ทำการทดสอบภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนโดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุแสดงในรูป 4.22 และความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนของเสาแสดงในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา CNsn



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา CNsn

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของเสาตัวอย่าง พบว่า ตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนเสารับแรงอัดประมาณ 150 กิโลนิวตัน หน่วยการยืดหดตัวที่เกิดขึ้นของวัสดุมีค่าน้อยและค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกันมาก โดยลักษณะของหน่วยการยืดหดตัวเป็นลักษณะเชิงเส้นเนื่องจากเสาตัวอย่างยังรับแรงอัดในระหว่างการทดสอบที่น้อยอยู่ โดยเมื่อเพิ่มแรงอัดมากขึ้นจนเสารับแรงอัดเกินกว่า 150 กิโลนิวตัน ลักษณะความสัมพันธ์ของหน่วยการยืดหดตัวที่ได้จึงเริ่มไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อเสาตัวอย่างเริ่มมีการหดตัวตามแนวแกนเนื่องจากแรงอัดที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเสาตัวอย่างในกลุ่มนี้ไม่มีส่วนของวัสดุเสริมกำลังหลัก ดังนั้นเมื่อเกิดแรงอัดขึ้นในเสาแกนของเสาคอนกรีตจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปออกทางด้านข้าง เหล็กปลอกซึ่งอยู่บริเวณโดยรอบของแกนเสาจึงทำหน้าที่ยึดรั้งไม่ให้แกนเสาเกิดการเปลี่ยนแปลงรูป ผลที่ตามมาคือเหล็กปลอกเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทางด้านข้างเช่นเดียวกันกับเสาคอนกรีต ทำให้คอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกเกิดการรอยแตกร้าว และเมื่อเสาตัวอย่างรับแรงมากขึ้นก็จะเกิดการหลุดร่อนตามมา ค่าหน่วยการยืดหดตัวที่อ่านได้จากสเตรนเกจที่ติดตั้งไว้ที่เหล็กปลอกมีค่าเป็นบวกเนื่องจากแรงดึงที่เกิดจากการยึดรั้งแกนเสาต่างจากคอนกรีตที่ใช้หุ้มเหล็กปลอกที่พบค่าจากสเตรนเกจที่ติดตั้งบริเวณของผิวคอนกรีตด้านนอกมีค่าเป็นลบ ซึ่งผลที่ได้เกิดจากการหดตัวของเสาคอนกรีตตามแนวแกนทำให้คอนกรีตบริเวณผิวเกิดการหดตัวตามไปด้วย และจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนทำให้ทราบว่าถึงแม้เสาตัวอย่างจะไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลักแต่ก็ยังมีเหล็กปลอกเป็นส่วนช่วยทำให้เสาแสดงพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนการวิบัติ

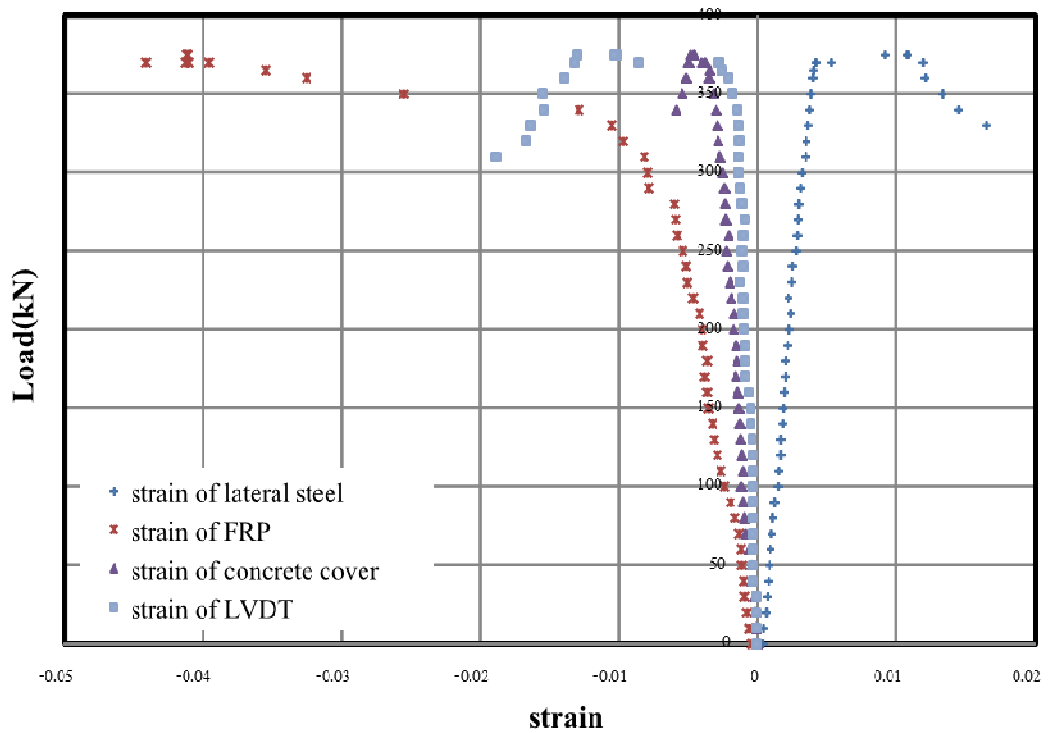
จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุสำหรับเสา กลุ่ม CNsn ทำให้ทราบว่า การเปลี่ยนแปลงรูปของเสาในกลุ่มนี้ในขณะที่รับแรงอัดสูงสุดจะมีค่าประมาณ 0.006 มม./มม. ในขณะที่คอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกมีค่าการเปลี่ยนแปลงรูปประมาณ 0.006 มม./มม. จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตเกิดการวิบัติก่อนที่เสาจะรับแรงอัดสูงสุด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปของคอนกรีตสูงสุดก่อนการวิบัติจะอยู่ที่ประมาณ 0.003 มม./มม. สำหรับเสาในกลุ่มนี้ไม่มีคอนกรีตหุ้ม ดังนั้นเมื่อเสารับแรงตามแนวแกนและเกิดการหดตัว เหล็กปลอกจะบีบรัดคอนกรีตที่อยู่ระหว่างปลอก ส่งผลทำให้เกิดการแตกร้าวของคอนกรีตและจะค่อยๆ หลุดร่อนออกเมื่อเสารับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงรูปการวิบัติของเสาในกลุ่มนี้ในรูปที่ 4.24



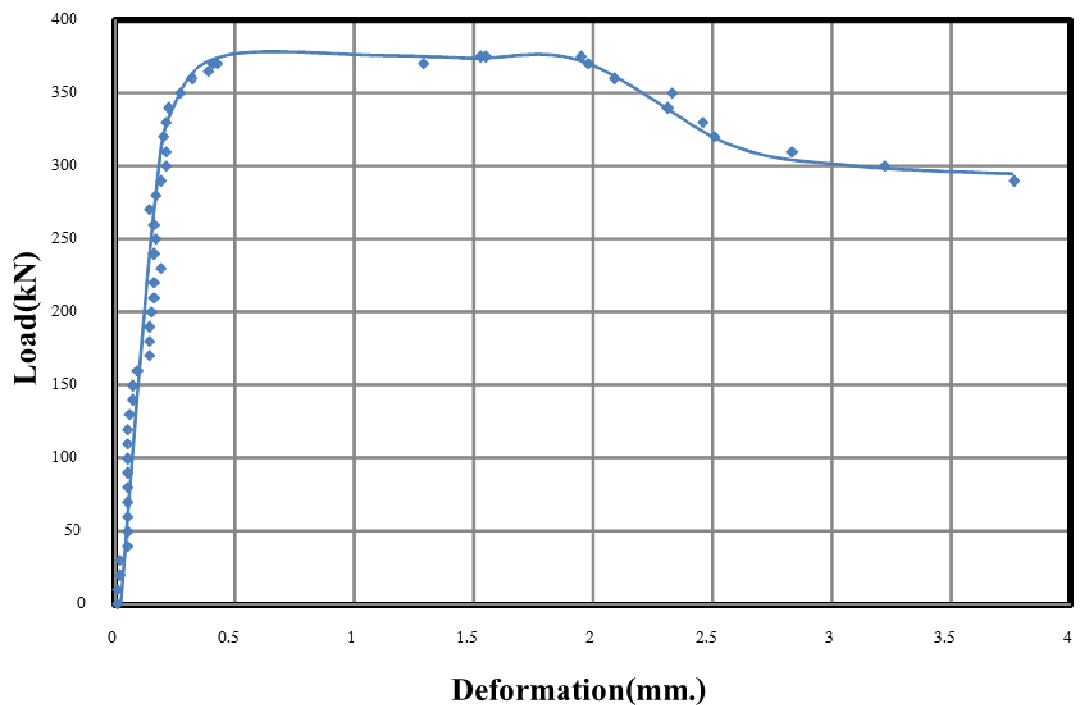
รูปที่ 4.24 การวิบัติของเสากลุ่ม CNsn

4.10 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 9

เสาตัวอย่างในกลุ่มที่ 9 เป็นเสาสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีหน้าตัดขนาด 15x15 เซนติเมตร มีเหล็กเส้น SR24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เป็นเหล็กปลอกประเภทปลอกเดี่ยวโดยมีระยะห่างระหว่างปลอก 5 เซนติเมตร มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 4 เส้น เป็นวัสดุเสริมกำลังหลักและมีคอนกรีตหนา 1.25 เซนติเมตร เป็นคอนกรีตที่ใช้ในการหุ้มเหล็กปลอก ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีด้วยกันทั้งหมด 3 ตัวอย่าง เสาตัวอย่างถูกทดสอบภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุแสดงในรูปที่ 4.25 และความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา SFtc



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา SFtc

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัว พบว่า ก่อนที่เสาจะรับแรงอัดประมาณ 350 กิโลนิวตัน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ค่าหน่วยการยืดหดตัวของวัสดุเสามีจะมีค่าน้อยมากเนื่องจากเสาดังกล่าวยังรับแรงอัดที่น้อยเมื่อเทียบกับแรงอัดสูงสุด โดยที่ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและหน่วยการยืดหดตัวของวัสดุจะเริ่มไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อแรงอัดมีค่าเกิน 350 กิโลนิวตัน ขณะที่แรงอัดเพิ่มมากขึ้นเสาดังกล่าวก็จะเกิดการหดตัวตามแนวแกนมากขึ้นเรื่อยๆ การหดตัวตามแนวแกนของเสาที่เกิดขึ้นทำให้วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมกำลังหลักในเสาดังกล่าวเกิดการหดตัวตามไปด้วย ในทำนองเดียวกันค่าหน่วยการยืดหดตัวของผิวคอนกรีตด้านนอกของเสาดังกล่าวมีค่าเป็นลบด้วย เนื่องจากการหดตัวของเสาทำให้คอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกด้านนอกเกิดการหดตัวตามเช่นเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเหล็กปลอกส่งผลทำให้เกิดรอยแตกกว้างขึ้นในส่วนของคอนกรีตที่ใช้หุ้มเหล็กปลอก รอยร้าวจะเริ่มมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเสาดังกล่าวรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้น การหลุดร่อนของคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกที่เกิดขึ้นจะเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งเสาเกิดการวิบัติ

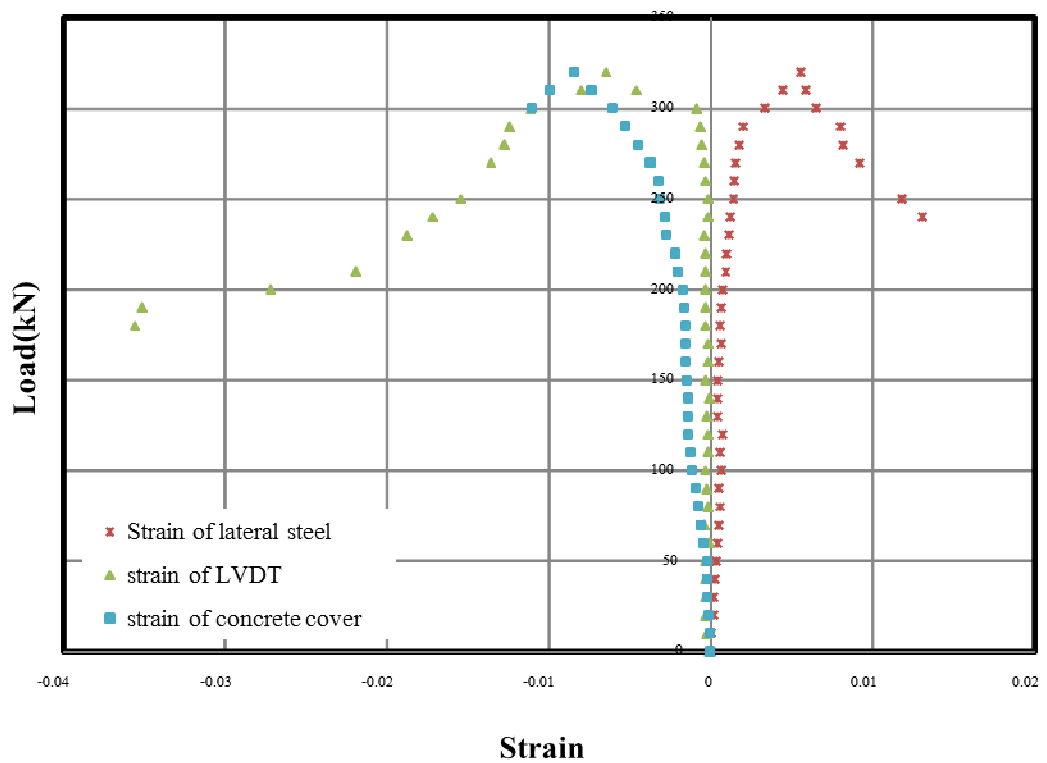
จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุสำหรับเสา กลุ่ม SFtc ค่าการเปลี่ยนแปลงรูปของคอนกรีตขณะที่เสารับแรงสูงสุดมีค่าประมาณ 0.003 มม./มม. และการเปลี่ยนแปลงรูปของเสามีค่าประมาณ 0.004 มม./มม. ในขณะที่เหล็กปลอกมีค่าเปลี่ยนแปลงรูปขณะที่เสารับแรงอัดสูงสุดประมาณ 0.01 มม./มม. จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตเกิดการวิบัติขณะที่เสากำลังรับแรงอัดสูงสุด และการวิบัติของเสาโดยรวมยังคงคล้ายคลึงกับเสาในกลุ่ม SFsc กล่าวคือ เสาจะเริ่มมีการปริแตกของคอนกรีตหุ้มที่บริเวณกลางเสา เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปของแกนเสา ส่งผลให้เหล็กปลอกเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างออกทางด้านข้าง ทำให้เกิดการแตกร้าวที่บริเวณคอนกรีตหุ้ม และรอยแตกจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเสารับแรงอัดเพิ่มขึ้น ในที่สุดเสาจะเกิดการหลุดร่อนของคอนกรีตหุ้มจนเหลือเฉพาะแกนของเสา สำหรับการวิบัติของวัสดุเสริมกำลังหลัก เนื่องจากวัสดุเสริมกำลังหลักมีคุณสมบัติ คือ มีความแข็งแรง ดังนั้นเมื่อเหล็กปลอกเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างออกทางด้านข้าง วัสดุเสริมกำลังหลักที่ผูกติดกับเหล็กปลอกจึงถูกดึงออกทางด้านข้าง ส่งผลให้เกิดการโก่งคดและวิบัติในที่สุด ดังแสดงการวิบัติของเสาในรูปที่ 4.27



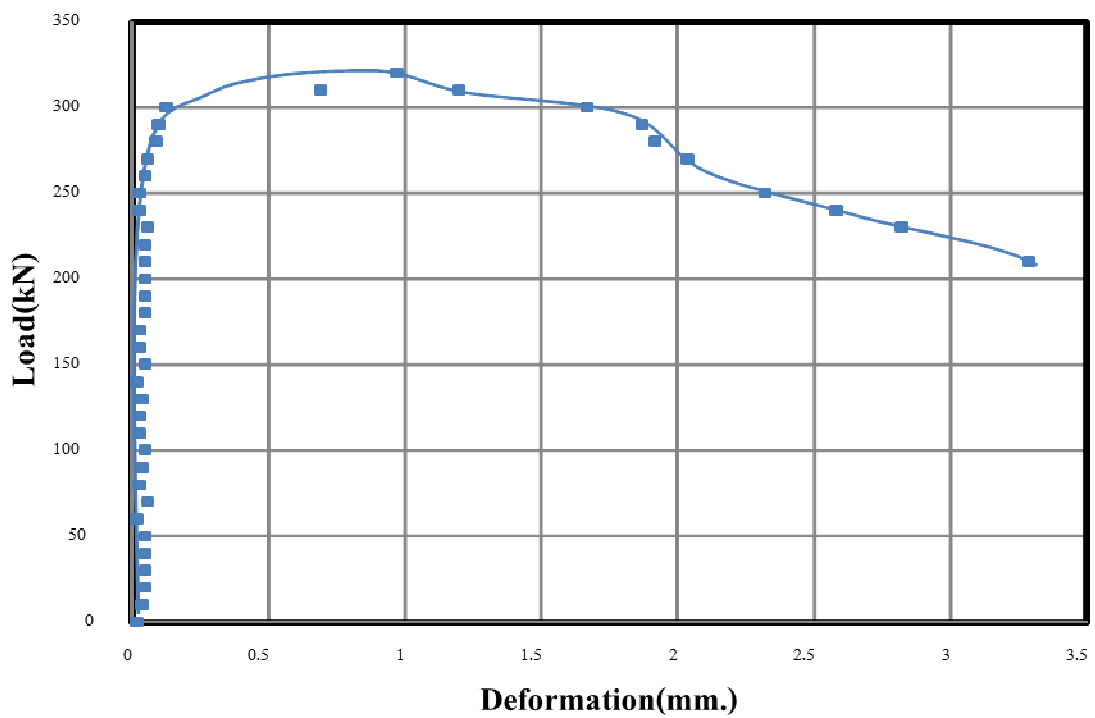
รูปที่ 4.27 การวิบัติของเสาในกลุ่ม SFtc

4.11 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 10

เสาคอนกรีตที่นำมาใช้ในการทดสอบในกลุ่มที่ 10 เป็นเสาคอนกรีตที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเช่นเดียวกับเสาตัวอย่างประเภทที่ 1 (SNsc) โดยมีเหล็กเส้นขนาด 6 มิลลิเมตร เป็นเหล็กปลอกประเภทเหล็กปลอกเดี่ยวมีระยะห่างระหว่างปลอก 5 เซนติเมตร และมีคอนกรีตหนา 1.25 เซนติเมตร เป็นคอนกรีตที่ใช้หุ้มเหล็กปลอก โดยเสาตัวอย่างสูง 50 เซนติเมตร อย่างไรก็ตามเสาในกลุ่มที่ 10 นี้ไม่มีของวัสดุเสริมกำลังหลัก จำนวนเสาตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีด้วยกันทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างเสาถูกทดสอบภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุเสาแสดงในรูปที่ 4.28 และความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาแสดงในรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา SNtc



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา SNtc

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุที่เกิดขึ้น ตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนถึงแรงอัดประมาณ 250 กิโลนิวตัน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกน และหน่วยการยืดหดตัวมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้น โดยเมื่อเสารับแรงอัดมากกว่า 250 กิโลนิวตัน ลักษณะความสัมพันธ์ของหน่วยการยืดหดตัวจะเริ่มไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากเสาตัวอย่างในกลุ่มนี้ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก ดังนั้นเสาในกลุ่มนี้จึงรับแรงได้น้อยเมื่อเทียบกับเสาที่มีหน้าตัดขนาดเดียวกัน ที่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก (เสาในกลุ่ม SFtc) เหล็กปลอกทำหน้าที่ในการยึดรั้งไม่ให้แกนเสาเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปทางด้านข้าง การเปลี่ยนแปลงรูปทางด้านข้างของเหล็กปลอกทำให้เกิดการแตกร้าวตรงบริเวณผิวคอนกรีตด้านนอกและเกิดการวิบัติอย่างช้าๆ จากความสัมพันธ์ในการรับแรงตามแนวแกนและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาแสดงให้เห็นว่าเสาที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก แต่มีเฉพาะเหล็กปลอกก็ยังคงแสดงพฤติกรรมแบบเหนียวได้เช่นเดียวกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทั่วไป แต่จะรับแรงได้น้อยกว่าเนื่องจากไม่มีวัสดุเสริมกำลังกลไกมาช่วยเสริมในการรับแรง

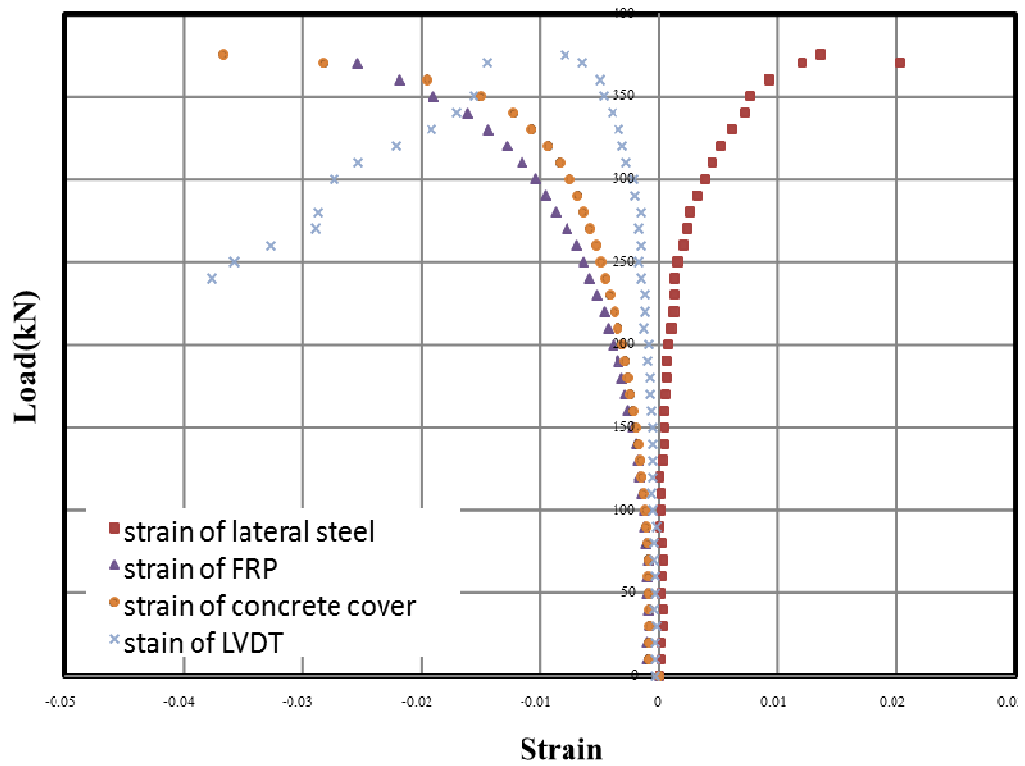
จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุพบว่า เสา กลุ่ม SNtc ผิวคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกมีค่าการเปลี่ยนแปลงรูปที่เกิดขึ้นขณะที่เสารับแรงอัดสูงสุด ประมาณ 0.007 มม./มม. ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงรูปของเสาและเหล็กปลอกที่เสารับแรงอัดสูงสุด ประมาณ 0.006 มม./มม. และ 0.005 มม./มม. ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นทำให้ทราบได้ว่า คอนกรีตได้เกิดการวิบัติก่อนที่เสาจะรับแรงอัดสูงสุด สำหรับการวิบัติของเสาในกลุ่มนี้ จะเริ่มมีการแตกร้าวที่บริเวณคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกด้านนอก และเมื่อเสารับแรงอัดเพิ่มมากขึ้นรอยร้าวจะค่อยๆ ขยายไปยังหัวเสา และจะใหญ่ขึ้นเมื่อเสารับแรงอัดมากขึ้น หลังจากนั้นคอนกรีตหุ้มจะค่อยๆ เกิดการหลุดร่อนออกจนกระทั่งเหลือเฉพาะแกนเสา ดังแสดงการวิบัติของเสาในกลุ่มนี้ในรูปที่ 4.30



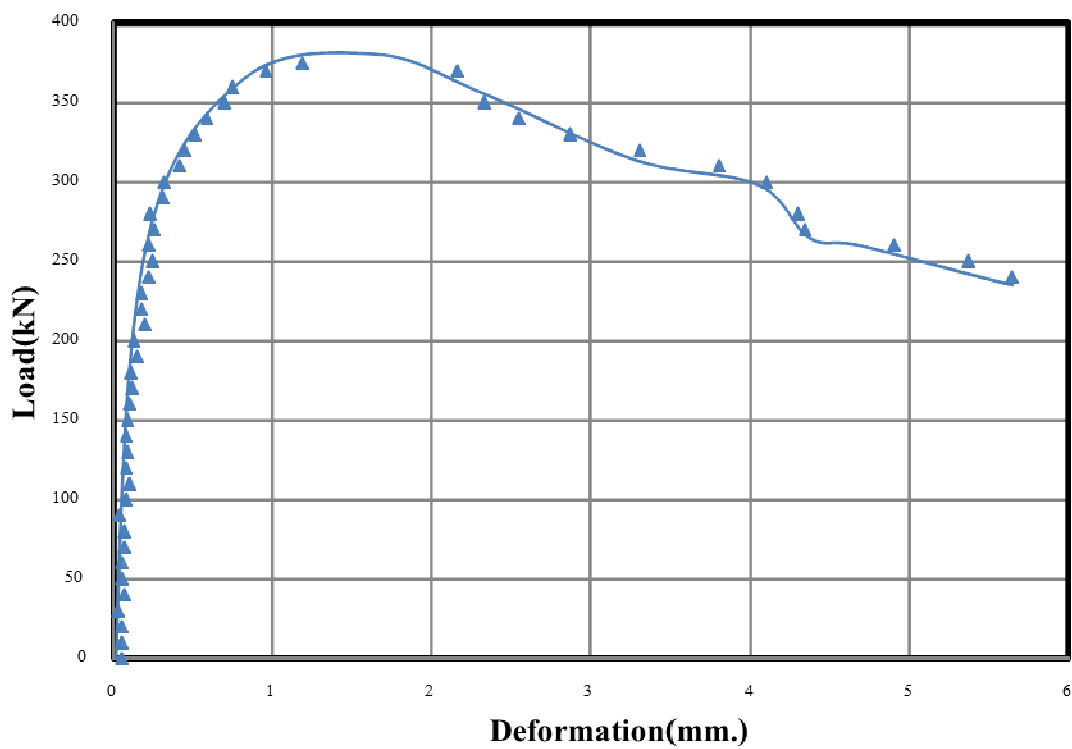
รูปที่ 4.30 การวิบัติของเสากลุ่ม SNtc

4.12 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 11

เสาตัวอย่างกลุ่มที่ 11 เป็นเสาเหลี่ยมที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 12.5x12.5 เซนติเมตร มีเหล็กเส้น SR24 ขนาด 6 มิลลิเมตร เป็นเหล็กปลอกประเภทปลอกเดี่ยว มีระยะห่างของปลอก 5 เซนติเมตร เสาในกลุ่มนี้จะไม่มีคอนกรีตที่ใช้หุ้มเหล็กปลอก และใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 4 เส้น เป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 3 ตัวอย่าง ทำการทดสอบภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุแสดงในรูป 4.31 และความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนแสดงในรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุ SFtn



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา SFtn

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยการยึดหดตัวและแรงกระทำแบบเชิงเส้นจนถึงแรงอัดประมาณ 350 กิโลนิวตัน หลังจากนั้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุที่ได้จะเริ่มไม่เป็นเชิงเส้น หน่วยการยึดหดตัวที่อ่านได้ของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแสดงให้เห็นว่าตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบหน่วยการยึดหดตัวของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เกิดจากการหดตัวที่เกิดขึ้นของเสาในขณะที่เสารับแรงอัดส่งผลให้วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยทำหน้าที่เป็นวัสดุเสริมกำลังหลักเกิดการหดตัว หน่วยการยึดหดตัวที่เกิดขึ้นที่ผิวคอนกรีตของเสาในกลุ่มนี้จะมีค่ามากกว่าเสาในกลุ่มอื่นที่มีส่วนของคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก ทั้งนี้เนื่องจากตำแหน่งที่ติดตั้งสเตรนเกจของเสาในกลุ่มนี้อยู่ในแนวเดียวกับเหล็กปลอก ส่งผลให้เมื่อทำการทดสอบเหล็กปลอกจะบีบรัดสเตรนเกจโดยตรง เนื่องจากตำแหน่งของเหล็กปลอกและสเตรนเกจอยู่ในแนวระดับเดียวกัน ทำให้ค่าของหน่วยการยึดหดตัวของเสาในกลุ่มนี้มีค่ามากเมื่อเทียบกับเสาที่ประเภทเดียวกันที่มีคอนกรีตหุ้ม

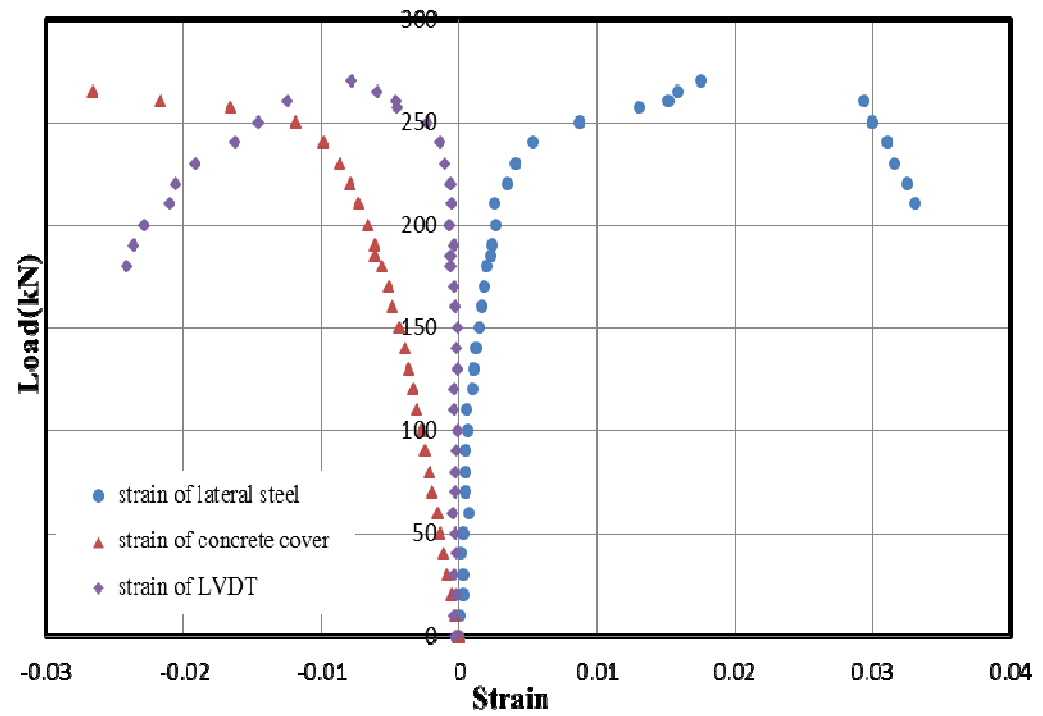
จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยึดหดตัวของวัสดุเสากลุ่ม SFm ค่าของหน่วยการเปลี่ยนแปลงรูปของคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกขณะที่เสารับแรงอัดสูงสุดจะมีค่าประมาณ 0.03 มม./มม. โดยที่เสามีค่าการเปลี่ยนแปลงรูปประมาณ 0.007 มม./มม. และเหล็กปลอกมีค่าการเปลี่ยนแปลงรูปประมาณ 0.02 มม./มม. จากผลการทดสอบสังเกตได้ว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงรูปของคอนกรีตหุ้มจะมีค่ามากกว่าเสาประเภทเดียวกันที่มีคอนกรีตหุ้ม (SFtc) เนื่องจากการหดตัวที่เกิดขึ้น ไม่ได้มีเฉพาะแรงอัดตามแนวแกนที่เกิดขึ้นเพียงอย่างเดียว แต่ยังรวมไปถึงแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการบีบรัดตัวของเหล็กปลอกต่อสเตรนเกจ ค่าการเปลี่ยนแปลงรูปที่ได้จึงมีค่าสูง จากรูปที่ 4.33 การวิบัติของเสาในกลุ่มนี้เกิดจากการที่เสารับแรงอัดตามแนวแกน ส่งผลให้เสาหดตัวและเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปออกทางด้านข้างของแกนเสา ทำให้เหล็กปลอกเกิดการขยายตัวและดึงเอาวัสดุเสริมกำลังหลักให้เกิดการโก่งเดาะ ทำให้เมื่อเสารับแรงตามแนวแกนมากขึ้นวัสดุเสริมกำลังหลักจะเกิดการวิบัติตามมา



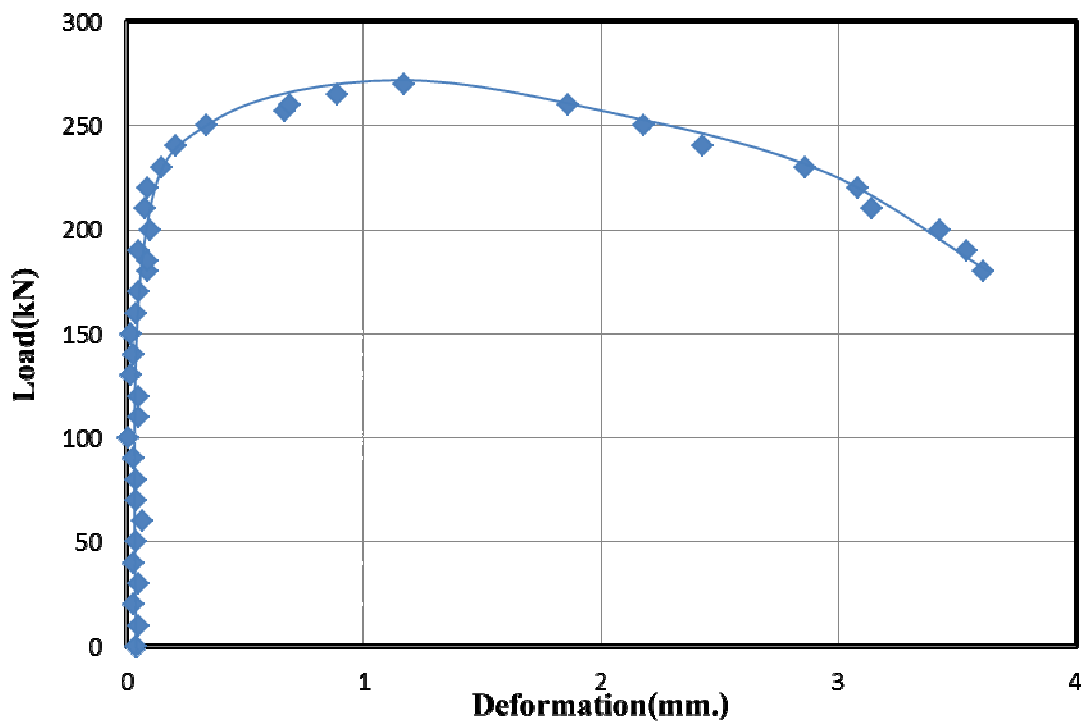
รูปที่ 4.33 การวิบัติของเสากลุ่ม SFsn

4.13 พฤติกรรมของเสาตัวอย่างกลุ่มที่ 12

เสาตัวอย่างในกลุ่มที่ 12 เป็นเสาสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีหน้าตัดขนาด 12.5x12.5 เซนติเมตร มีเส้นเหล็ก SR24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เป็นเหล็กปลอกประเภทปลอกเดี่ยวและมีระยะห่างระหว่างปลอก 5 เซนติเมตร เสาตัวอย่างนี้จะไม่มีส่วนเสริมกำลังหลักและไม่มีคอนกรีตที่ใช้ในการหุ้มเหล็กปลอก ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีด้วยกันทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยเสาถูกทดสอบภายใต้แรงกระทำตามแนวแกน โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสาแสดงในรูปที่ 4.34 และความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนแสดงในรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา SNtn



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา SNtn

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุในกรณีเสาเสาคอนกรีตที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลักแต่ยังคงมีปลอกเหล็กเป็นตัวช่วยในการโอบรัดแกนเสา เมื่อพิจารณาแต่ละวัสดุจะสังเกตได้ว่าหน่วยการยืดหดตัวของวัสดุที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมากในช่วงตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนถึงแรงอัดที่ประมาณ 100 กิโลนิวตัน ลักษณะความสัมพันธ์ของหน่วยการยืดหดตัวและแรงกระทำอยู่ในรูปแบบเชิงเส้น ทั้งนี้เนื่องจากเสายังรับแรงอัดน้อยมากเมื่อเทียบกับกำลังอัดสูงสุดของเสา แต่เมื่อเสารับแรงอัดเกินกว่า 100 กิโลนิวตัน เสาจะเกิดการหดตัวตามแนวแกน การเปลี่ยนแปลงรูปทางด้านข้างของแกนเสาเกิดมากขึ้น ส่งผลให้เหล็กปลอกซึ่งทำหน้าที่ในการยึดรั้งแกนของเสาไม่ให้เคลื่อนตัวออกทางด้านข้าง ค่าหน่วยการยืดหดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากเหล็กปลอกจะมีค่าเป็นบวก ซึ่งแตกต่างกับหน่วยการยืดหดตัวที่วัดจากสเตรนเกจตรงบริเวณผิวด้านนอกของคอนกรีตที่มีค่าเป็นลบ เนื่องจากการหดตัวของเสาทำให้คอนกรีตบริเวณผิวด้านนอกเกิดการหดตัวตามไปด้วย ค่าหน่วยการยืดหดตัวที่ได้จะมีค่ามากกว่าเสาตัวอย่างที่มีหน้าตัดและชนิดของปลอกที่เป็นประเภทเดียวกันแต่มีส่วนของคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก ทั้งนี้เนื่องจากเสาในกลุ่มนี้เป็นเสาที่ไม่มีในส่วนคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก ตำแหน่งในการติดตั้งสเตรนเกจจึงไปอยู่ในแนวระดับเดียวกับเหล็กปลอก ซึ่งเมื่อเสารับแรงอัดตามแนวแกนขณะทดสอบส่งผลทำให้เสาเกิดการหดตัวทำให้เหล็กปลอกบีบรัดสเตรนเกจโดยตรงค่าของหน่วยการยืดหดตัวจึงมีค่ามากตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามเสาคอนกรีตที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก แต่ยังมีเหล็กปลอกเป็นตัวช่วยในการบีบรัดแกนเสาซึ่งยังคงมีส่วนช่วยแสดงพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนการวิบัติให้กับเสา และยังสามารถรับแรงอัดได้สูงกว่าเสาคอนกรีตล้วนทั่วไป

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุสำหรับเสา กลุ่ม SN_m พบว่า ขณะที่เสารับแรงอัดสูงสุด ค่าการเปลี่ยนแปลงรูปของเสาจะมีค่าประมาณ 0.007 มม./มม. ค่าการเปลี่ยนแปลงรูปของคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกมีค่าประมาณ 0.028 มม./มม. และในเหล็กปลอกมีค่าการเปลี่ยนแปลงรูปขณะที่เสารับแรงอัดสูงสุดประมาณ 0.033 มม./มม. ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ค่าการเปลี่ยนแปลงรูปของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบมีค่ามากกว่าเสาประเภทเดียวกันที่มีคอนกรีตหุ้ม การวิบัติที่เกิดขึ้นในเสาในกลุ่มนี้ มีลักษณะการวิบัติคล้ายกับเสาเสา กลุ่ม SN_{sn} คือจะเริ่มเกิดการแตกร้าวเนื่องจากการขยายตัวของเหล็กปลอกที่บริเวณกลางเสาและจะขยายมากขึ้นจนกระทั่งเสาเกิดการวิบัติ ดังแสดงในรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 การวิบัติของเสากลุ่ม SNtn

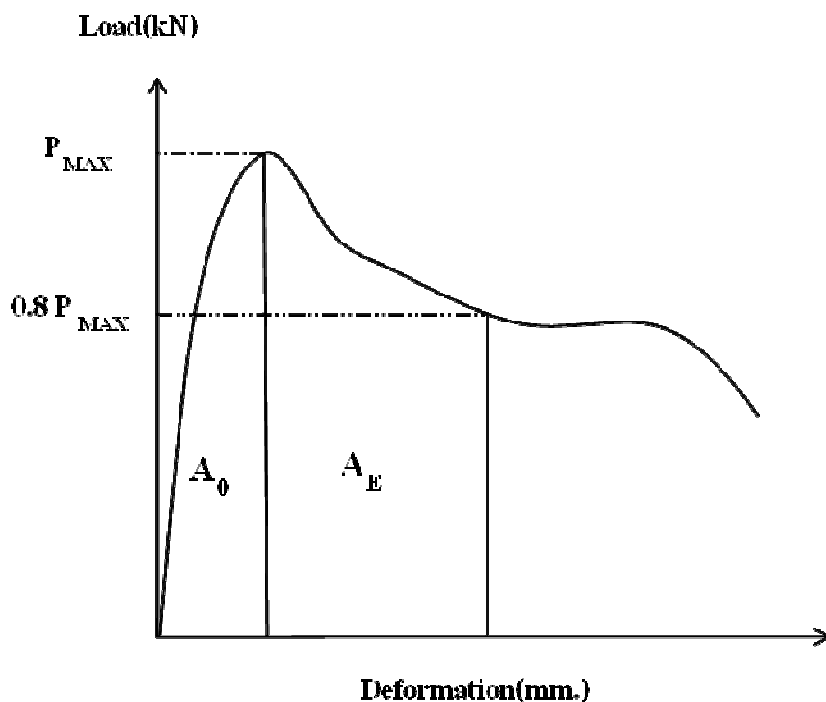
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาและการวิบัติของเสา

จากพฤติกรรมระหว่างการรับแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปของเสาตัวอย่างทั้ง 12 กลุ่มดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างต้น คุณสมบัติอีกประการหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับเสาคอนกรีตโดยทั่วไปคือ ความเหนียวของเสาคอนกรีตเสริมกำลัง (Ductility of Reinforced Concrete Columns) เนื่องจากความเหนียวมีความสำคัญอย่างมากต่อพฤติกรรมการวิบัติของเสา คอนกรีตเสริมกำลัง ลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมกำลังในสถานะที่เสารับน้ำหนักบรรทุกจนกระทั่งคอนกรีตหุ้มแตกและหลุดล่อนออกไปแล้ว ซึ่งต่อมาวัสดุเสริมกำลังหลักจะทำหน้าที่ในการแบกรับน้ำหนักบรรทุกที่มาจากแรงหลุดร่อนของคอนกรีตหุ้ม ดังนั้นหากแกนของเสาคอนกรีตมีการโอบรัดที่ไม่ดีก็จะทำให้เกิดการขยายตัวออกอย่างรวดเร็วในส่วนของแกนของเสาคอนกรีต เนื่องจากอัตราส่วนปัวรซ์ของ โดยเสาคอนกรีตเสริมกำลังที่มีการโอบรัดที่ไม่ดีก็จะส่งผลทำให้เสาเกิดการวิบัติแบบเปราะ (Brittle) แต่หากมีการเรียงเหล็กปลอกที่มีส่วนในการโอบรัดแกนเสาเป็นอย่างดี ก็จะทำให้เกิดแรงต้านด้านข้างเพื่อต้านทานการขยายตัวที่เกิดขึ้นกับแกนของเสาคอนกรีต ซึ่งผลจากแรงต้านทางด้านข้างที่ได้จะทำให้เสารับน้ำหนักบรรทุกไปได้อีกระยะหนึ่ง ก่อนที่เสาจะเกิดการวิบัติ โดยที่เสาจะแสดงพฤติกรรมแบบเหนียวและเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปที่มากขึ้นก่อนการวิบัติ

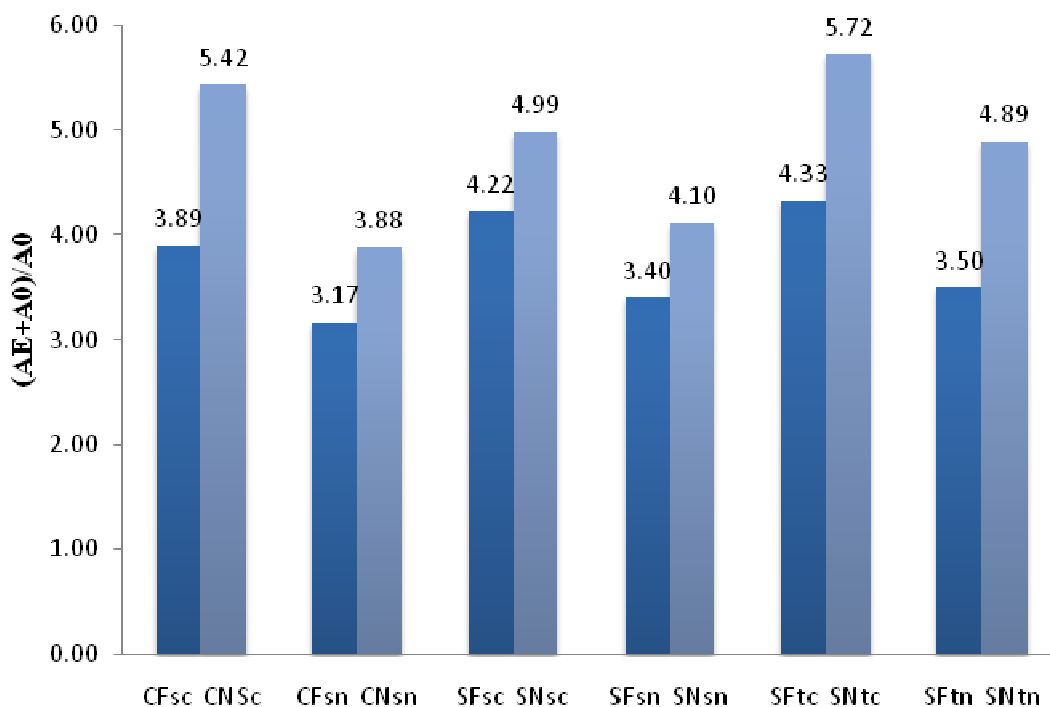
และการเปลี่ยนแปลงรูปที่มากขึ้นเป็นสัญญาณเตือนว่าโครงสร้างไม่มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน ซึ่งเป็นการเพิ่มความปลอดภัยให้แก่โครงสร้างอีกทางหนึ่ง

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาและเปรียบเทียบถึงคุณสมบัติในเรื่องความเหนียวของเสาประเภทต่างๆ โดยคำนวณหาพื้นที่ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนรูปของเสาตัวอย่าง ทั้ง 12 กลุ่ม พื้นที่ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนรูปจะเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปหรือความเหนียวของเสาแต่ละประเภท โดยหากเสาตัวอย่างต้นใดมีพื้นที่ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนรูปมากเสาดังนั้นก็จะมีพฤติกรรมแบบเหนียวมากตามไปด้วย สำหรับตัวแปรที่สำคัญและมีผลต่อการศึกษาความเหนียวในหัวข้อนี้มีด้วยกัน 4 ตัวแปร ประกอบไปด้วย 1) ชนิดของเหล็กปลอก 2) วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ทำหน้าที่ในส่วนของวัสดุเสริมกำลังหลัก 3) ประเภทของหน้าตัด และ 4) คอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก

สำหรับการเปรียบเทียบความเหนียวของเสาแต่ละชนิดจะใช้อัตราส่วนพื้นที่ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนรูปเป็นเครื่องมือในการพิจารณา โดยแบ่งพื้นที่ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนรูปออกเป็นสองช่วง ช่วงแรกเป็นพื้นที่ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปของเสาตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งเสารับกำลังอัดสูงสุด โดยสมมติให้พื้นที่ได้ความสัมพันธ์ในช่วงนี้คือ A_0 และช่วงที่สองจะเป็นพื้นที่ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปของเสาที่กำลังอัดสูงสุดจนกำลังอัดของเสาลดลงจนเหลือ 80% ของกำลังอัดสูงสุด โดยสมมติให้พื้นที่ในช่วงนี้คือ A_E ดังแสดงในรูปที่ 4.37 โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการอินทิเกรตเชิงตัวเลข (Numerical Integration) ในการหาพื้นที่ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูป เมื่อได้พื้นที่ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนแปลงรูปของทุกตัวอย่างแล้วทำการเปรียบเทียบความเหนียวของเสาแต่ละตัวอย่างโดยการใช้พื้นที่ได้ความสัมพันธ์ของช่วงตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบจนถึงช่วงที่กำลังรับแรงอัดของเสาลดลงจนเหลือ 80% ของกำลังอัดสูงสุด ($A_E + A_0$) หาค่าด้วยพื้นที่ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปของช่วงตั้งแต่เริ่มการทดสอบจนกระทั่งถึงกำลังอัดสูงสุด (A_0) ดังแสดงผลการเปรียบเทียบในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.37 การแบ่งพื้นที่ในการคำนวณความเหนียวของเสา



รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบความเหนียวของเสาตัวอย่าง

จากพื้นที่ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูป ดังแสดงในรูปที่ 4.38 ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าเสาตัวอย่างทุกกลุ่มที่ไม่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลักจะแสดงพฤติกรรมแบบเหนียวมากกว่าเสาที่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก สังเกตได้จากค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบความเหนียวของเสาตัวอย่างที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลักจะมีค่ามากกว่าเสาที่มีวัสดุเสริมกำลังหลักในทุกตัวอย่าง เนื่องจากพื้นที่ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปเป็นเครื่องมือแสดงถึงพฤติกรรมแสดงความเหนียวของเสา ก่อนที่เสาจะเกิดการวิบัติ โดยค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบความเหนียวของเสาตัวอย่างของเสาที่ยิ่งมากแสดงว่าเสาเหล่านั้นยังมีการแสดงพฤติกรรมแบบเหนียวหลังจากเสารับกำลังอัดสูงสุดแล้ว ได้มาก แสดงให้เห็นว่าเสาที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลักแต่การเสริมเฉพาะวัสดุเสริมกำลังทางด้านข้างเพียงอย่างเดียวก็ยังคงมีความสามารถในการรับแรงอัดและยังคงแสดงพฤติกรรมแบบเหนียวได้ ซึ่งเป็นผลมาจากการแรงที่เหล็กปลอกโอบรัดแกนของเสาคอนกรีตเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงรูปออกทางด้านข้างของแกนเสา ทำให้เสาที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลักแต่มีเฉพาะวัสดุเสริมกำลังทางด้านข้างยังคงแสดงพฤติกรรมแบบเหนียวได้ก่อนการวิบัติ แตกต่างกับตัวอย่างเสาคอนกรีตที่ถูกเสริมกำลังหลักด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่จะแสดงพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนการวิบัติได้น้อยกว่าเสาที่มีเฉพาะเหล็กปลอก เนื่องจากเสาที่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลักจะมีการวิบัติของเสาตัวอย่างเมื่อรับแรงอัดสูงสุดแล้ว โดยการแตกหักของตัววัสดุเสริมกำลังหลัก ทำให้เสาหลังจากรับแรงอัดสูงสุดจะแสดงพฤติกรรมแบบเหนียวได้น้อยกว่าเสาที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก แต่อย่างไรก็ตามเสาที่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลักก็มีส่วนช่วยให้เสารับแรงอัดได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับเสาที่ไม่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก

บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

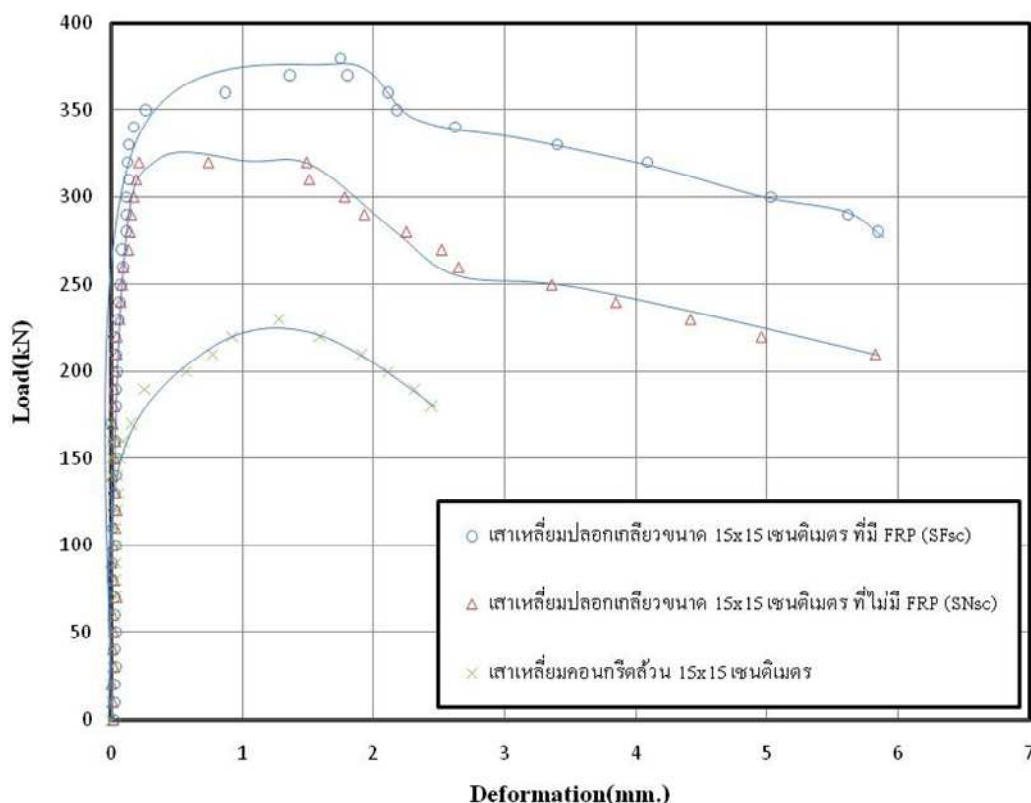
ในบทนี้ผลการทดสอบของเสาตัวอย่างที่ได้ในบทที่ 4 จะถูกทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบพฤติกรรมของเสา โดยมุ่งเน้นเพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ในการรับแรงอัดตามแนวแกนของเสาเทียบกับตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษาในบทนี้ด้วยกัน 4 ตัวแปรคือ 1) วัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย 2) เหล็กปลอกเมื่อเสารับแรงกระทำตามแนวแกน 3) คอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก และ 4) ประเภทของหน้าตัด ซึ่งรายละเอียดผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบถูกนำเสนอดังต่อไปนี้

5.1 ผลของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย

การทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดตามแนวแกนเพื่อศึกษาพฤติกรรมของเสาที่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแทนที่ในส่วนของวัสดุเสริมกำลังหลักเปรียบเทียบกับเสาที่ไม่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุ ซึ่งได้จากการทดสอบถูกนำมาทำการศึกษาเปรียบเทียบโดยใช้ตัวอย่างเสาที่มีหน้าตัดสองแบบ คือ 1) เสาเหลี่ยม และ 2) เสากลม

เสาเหลี่ยมที่ใช้ในการทดสอบเป็นเสาที่มีหน้าตัดขนาด 15x15 เซนติเมตร และสูงประมาณ 50 เซนติเมตร โดยมีประเภทของเหล็กปลอกที่ใช้ในเสามีด้วยกันสองประเภทคือ 1) เหล็กปลอกเกลียว และ 2) เหล็กปลอกเดี่ยว ซึ่งเสาที่ใช้ในการเปรียบเทียบจะมีเสาซึ่งมีวัสดุเสริมกำลังหลัก และเสาที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก อย่างไรก็ตามเสาทั้งสองประเภทที่กล่าวมาข้างต้นจะมีเหล็กปลอกประเภทเดียวกัน นอกจากนี้พฤติกรรมของเสาเหลี่ยมทั้งหมดจะทำการเปรียบเทียบกับพฤติกรรมการรับแรงของเสาคอนกรีตล้วนที่มีหน้าตัดและส่วนสูงเดียวกัน โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาเหลี่ยมปลอกเกลียวดังได้แสดงในรูปที่

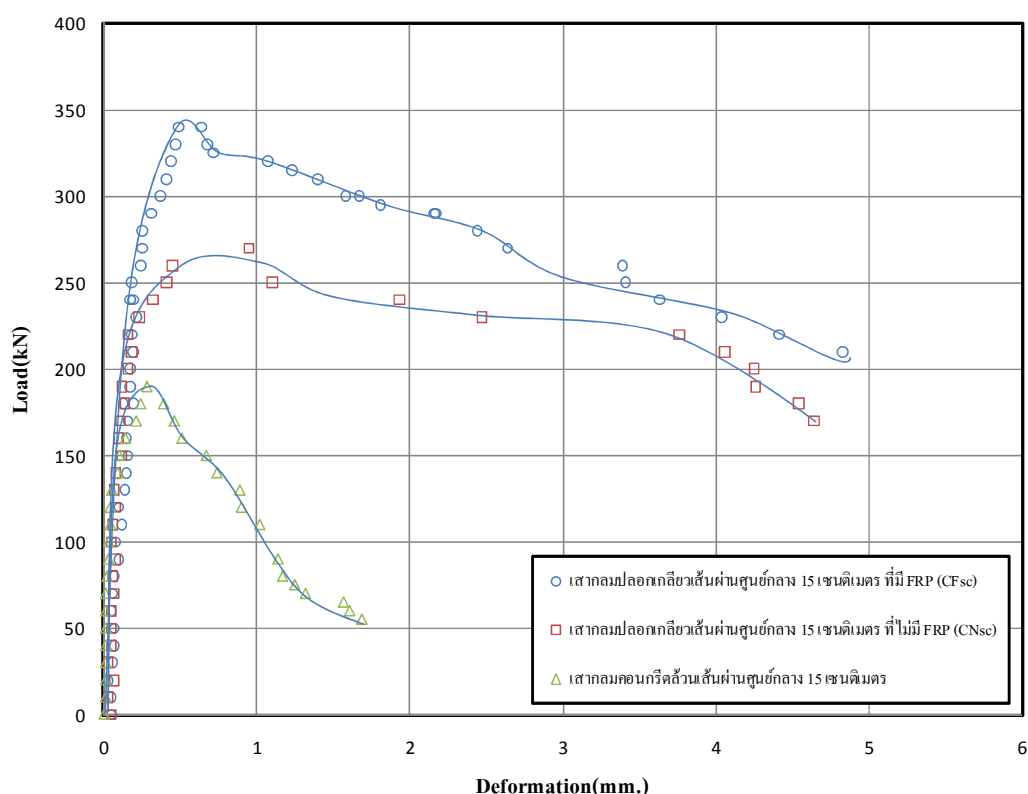
5.1



รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาเหลี่ยมปลอกเกลียว

สำหรับเสาที่เป็นหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีหน้าตัดขนาด 15x15 เซนติเมตร ที่มีเหล็กเสริมประเภทเหล็กปลอกเกลียวและมีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก (SFsc) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาประเภทนี้มีค่าประมาณ 390 กิโลนิวตัน ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ได้มีค่ามากกว่าเสาประเภทเดียวกันแต่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก (SNsc) อยู่ประมาณ 80 กิโลนิวตัน หรือประมาณร้อยละ 25 และมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าเสาเหลี่ยมคอนกรีตล้วนประมาณร้อยละ 70 เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของเสาจะเห็นว่าเสาที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลักแต่มีเพียงเฉพาะเหล็กปลอกเป็นวัสดุเสริมกำลังทางด้านข้างยังคงแสดงพฤติกรรมแบบเหนียวเช่นเดียวกับเสาที่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก ดังนั้นจากรูปที่ 5.1 เสาที่มีวัสดุเสริมกำลังหลักเป็นวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยมีส่วนช่วยในการรับแรงอัดสูงสุดของเสาให้มีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงรูปในช่วงดังกล่าวยังมีความคล้ายคลึงกับพฤติกรรมของเสาที่ไม่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลักแต่มีเฉพาะการเสริมกำลังทางด้านข้าง

เสาในกลุ่มที่ 2 เป็นเสากลม ตัวอย่างเสากลมที่ใช้ในการทดสอบเป็นเสากลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูงประมาณ 50 เซนติเมตร เหล็กปลอกที่ใช้เป็นเหล็กปลอกประเภทเหล็กปลอกเกลียว มีคอนกรีตหนา 1.25 เซนติเมตร เป็นคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก และได้ทำการทดสอบโดยการรับแรงตามแนวแกนเช่นเดียวกับเสาตัวอย่างในกลุ่มแรกที่เป็นเสาเหลี่ยม โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนของเสากลมปลอกเกลียวดังได้แสดงในรูปที่ 5.2

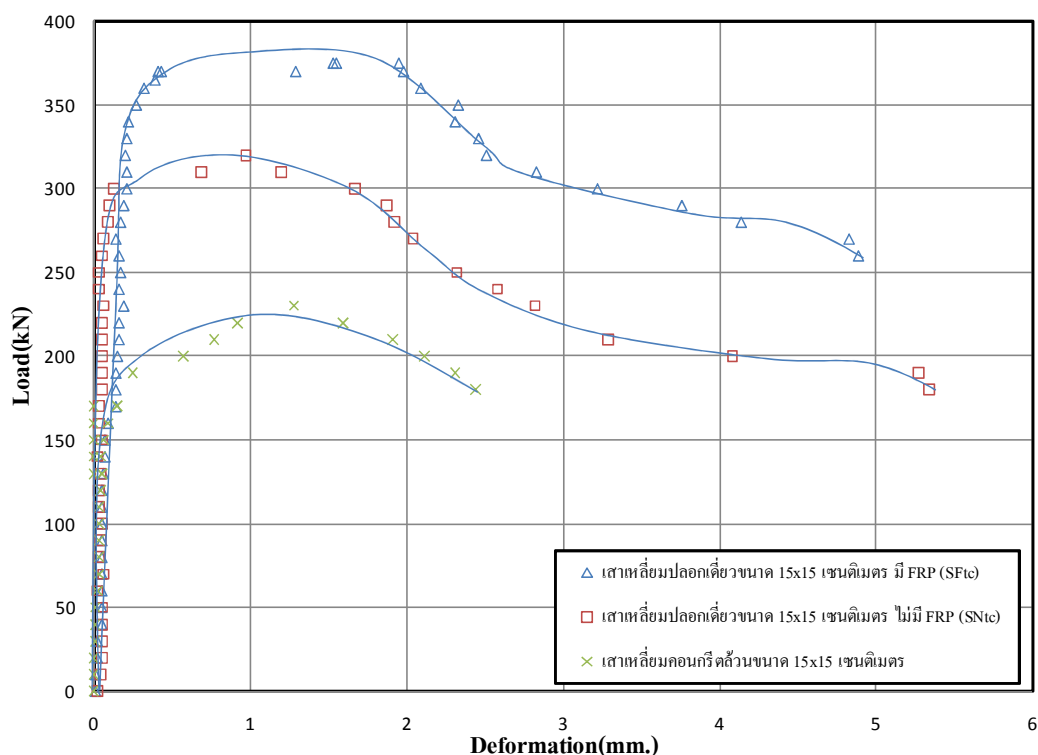


รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสากลมปลอกเกลียว

การทดสอบเสากลมปลอกเกลียวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร และมีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก ได้ทำการทดสอบรับแรงอัดตามแนวแกนเช่นเดียวกับเสาเหลี่ยมปลอกเกลียวที่มีและไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก (ชื่อที่ใช้เรียกแทนเสาตัวอย่างคือ SFsc และ SNsc ตามลำดับ) ผลการเปรียบเทียบพฤติกรรมของเสาพบว่ามีความคล้ายคลึงกัน คือ เสาตัวอย่างในกลุ่มที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลักเมื่อรับแรงตามแนวแกนก็ยังคงแสดงพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนการวิบัติเช่นเดียวกับเสากลมปลอกเกลียวที่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก โดยกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสากลมปลอกเกลียวที่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก

(CFsc) จะอยู่ที่ประมาณ 340 กิโลนิวตัน และกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสากลมปลอกเกลียวที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลักอยู่ที่ประมาณ 270 กิโลนิวตัน (CNsc) ซึ่งแรงอัดสูงสุดของเสากลมปลอกเกลียวที่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยมีค่ามากกว่าประมาณร้อยละ 25 และจะมากกว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสากลมคอนกรีตล้วนประมาณร้อยละ 79

สำหรับเสาตัวอย่างในกลุ่มที่ 3 เป็นเสาเหลี่ยมที่มีเหล็กปลอกเป็นประเภทปลอกเดี่ยว หน้าตัดขนาด 15x15 เซนติเมตร มีคอนกรีตหนา 1.25 เซนติเมตร หุ้มเหล็กปลอก ซึ่งมีเสาตัวอย่างด้วยกันสองประเภทคือ 1) แบบมีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก (SFtc) และ 2) แบบไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก (SNtc) การทดสอบเป็นการทดสอบให้เสารับแรงตามแนวแกน โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาเหลี่ยมปลอกเดี่ยวดังแสดงในรูปที่ 5.3

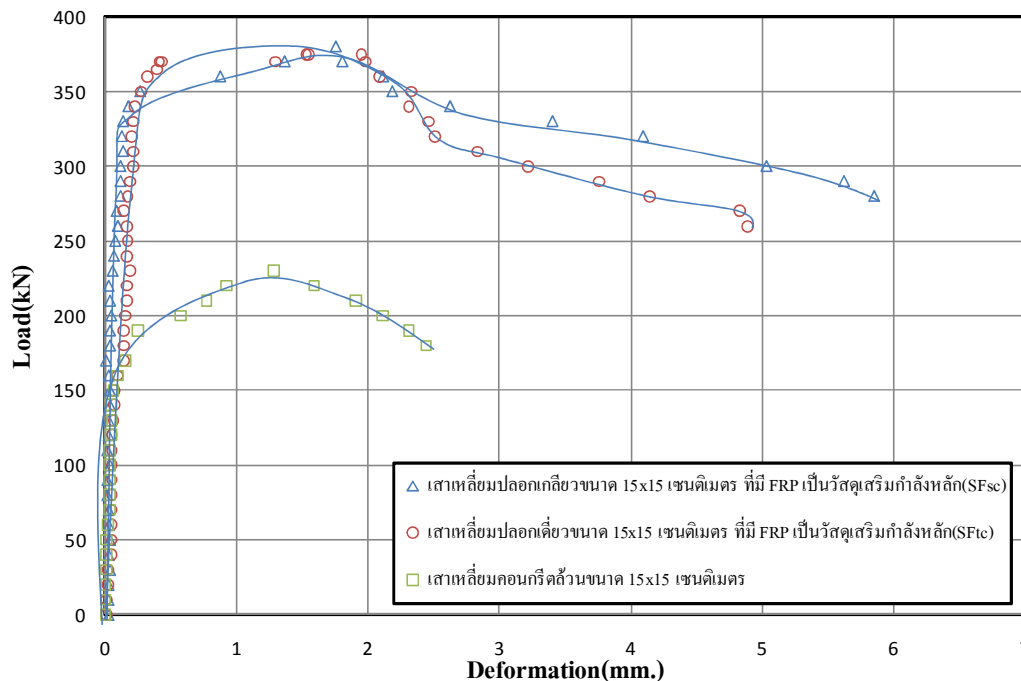


รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาเหลี่ยมปลอกเดี่ยว

จากผลการทดสอบ พบว่า กำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาเหลี่ยมปลอกเดี่ยวที่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลักจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 375 กิโลนิวตัน ซึ่งมากกว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาเหลี่ยมปลอกเดี่ยวประเภทที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลักอยู่ประมาณ 65 กิโลนิวตัน หรือประมาณร้อยละ 21 แต่เมื่อพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงรูปของเสาที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก แสดงให้เห็นว่ามีพฤติกรรมแบบเหนียวเช่นเดียวกับเสาที่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก ทั้งนี้เนื่องจากเสาที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลักยังคงมีการเสริมแรงด้วยเหล็กปลอกเดี่ยวเป็นหลักเสริมที่ช่วยในการโอบรัดแกนของเสา ทำให้เสายังคงแสดงพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนการวิบัติ และถึงแม้แรงอัดสูงสุดจะมีค่าน้อยกว่าเสาที่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก แต่เสาที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลักก็ยังคงรับแรงได้มากกว่าเสาคอนกรีตล้วนที่มีหน้าตัดประเภทเดียวกันอยู่ประมาณร้อยละ 43

5.2 ผลของเหล็กปลอกเมื่อรับแรงกระทำตามแนวแกน

การศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากเหล็กปลอกเมื่อเสาตัวอย่างรับแรงอัดตามแนวแกนได้ทำการศึกษาจากเสาประเภทของเสาเหลี่ยมที่มีหน้าตัดขนาด 15x15 เซนติเมตร และมีความสูงของเสา 50 เซนติเมตร โดยมีเหล็กปลอกที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบด้วยกันสองประเภทคือเหล็กปลอกเกลียว และเหล็กปลอกเดี่ยว โดยเสาทั้งสองประเภทมีคอนกรีตหนา 1.25 เซนติเมตร เป็นคอนกรีตที่ใช้หุ้มเหล็กปลอก และมีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนของเสาเหลี่ยมปลอกเกลียวดังได้แสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาเหลี่ยม

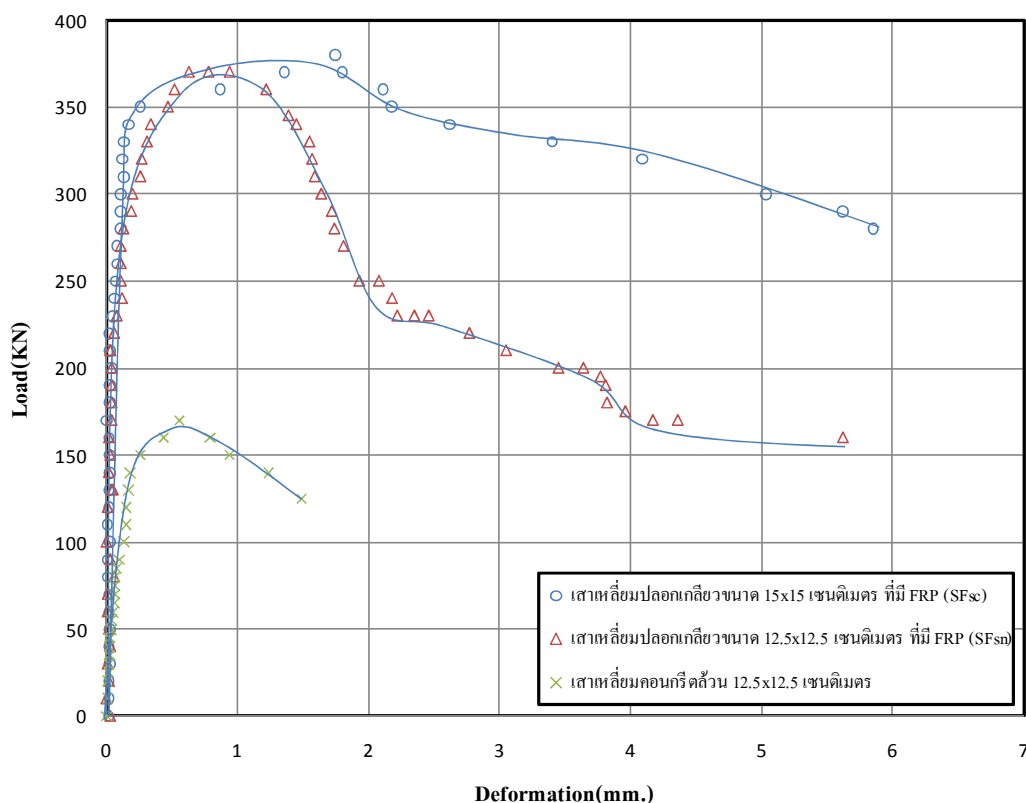
จากผลการทดสอบ พบว่า พฤติกรรมของเสาคอนกรีตที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดหน้าตัด 15x15 เซนติเมตร ที่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลักและมีเหล็กปลอกประเภทปลอกเกลียว (SFsc) เทียบกับเสาที่มีหน้าตัดประเภทเดียวกันแต่มีเหล็กปลอกเป็นประเภทเหล็กปลอกเดี่ยว (SFtc) จะมีลักษณะของแรงกระทำและการเปลี่ยนแปลงรูปคล้ายกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป คือมีลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยการยืดหดตัวและแรงกระทำเป็นลักษณะเชิงเส้นและเมื่อรับแรงอัดต่อไปเรื่อยๆ เสาจะเกิดการหลุดร่อนที่ผิวของคอนกรีต ซึ่งจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเปลี่ยนแปลงรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อเสารับแรงกระทำต่อไปเรื่อยๆ เสายังคงสามารถแสดงพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนที่เสาจะเกิดการวิบัติ ซึ่งเมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดสูงสุดตามแนวแกนของเสา SFsc เทียบกับเสา SFtc และเสาคอนกรีตล้วนที่มีขนาดและพื้นที่หน้าตัดและส่วนสูงเท่ากัน ทำให้ทราบว่า กำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา SFsc มีค่าประมาณ 380 กิโลนิวตัน ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา SFtc มีค่าประมาณ 370 กิโลนิวตัน และกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตล้วนที่มีขนาดและหน้าตัดและส่วนสูงของเสาเท่ากันมีค่าประมาณ 230 กิโลนิวตัน โดยเมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา SFsc มีค่ามากกว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา SFtc เพียงประมาณ 10 กิโลนิวตัน หรือประมาณร้อยละ 3 ซึ่งถือว่าเสาทั้งสองมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ใกล้เคียงกันมากแม้ว่าเสาทั้งสองประเภทจะมีชนิด

ของเหล็กปลอกที่แตกต่างกัน โดยเสาทั้งสองชนิดก็ยังคงมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดมากกว่าเสาเหล็มนคอนกรีตล้วนอยู่ประมาณร้อยละ 65

5.3 ผลของคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก

การศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมและกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาจากผลของคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกเมื่อรับแรงกระทำตามแนวแกนของเสา ทำการเปรียบเทียบโดยใช้เสาที่มีหน้าตัดต่างกันสองแบบคือ เสาที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมและเสาที่มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลม

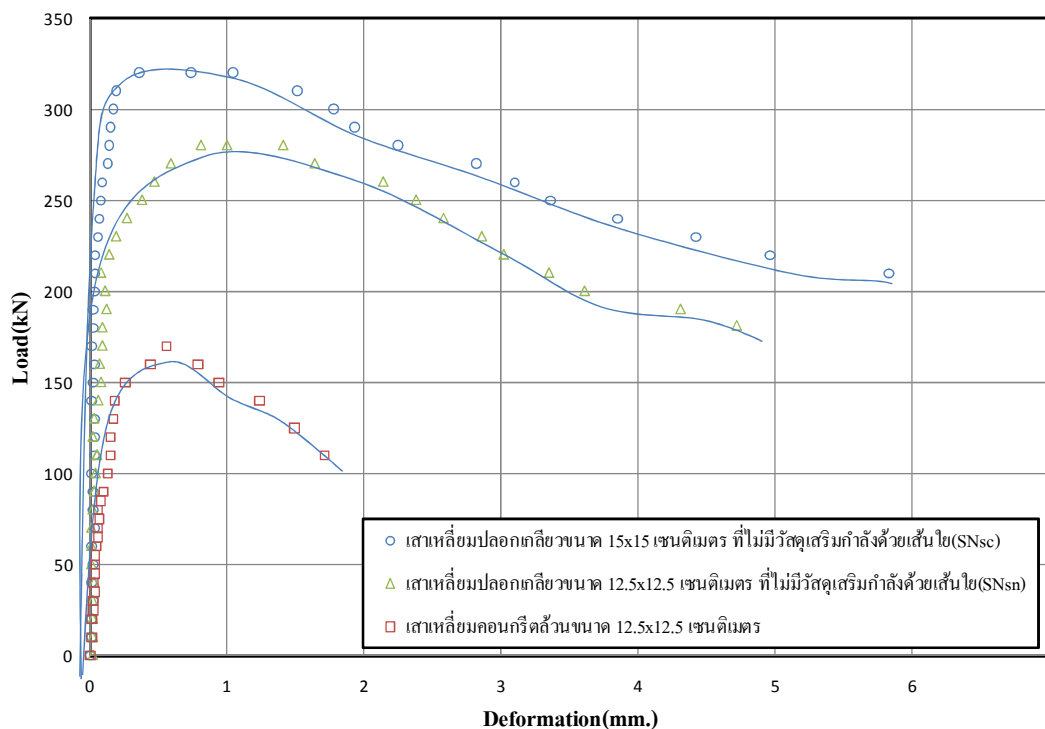
สำหรับเสาเหลี่ยมที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบพฤติกรรมและกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนที่เกิดจากผลของคอนกรีตหุ้ม ประกอบไปด้วยเสาเหลี่ยมหน้าตัดขนาด 15x15 เซนติเมตร สำหรับตัวอย่างที่มีคอนกรีตหุ้มและขนาดหน้าตัด 12.5x12.5 เซนติเมตร สำหรับตัวอย่างที่ปราศจากคอนกรีตหุ้ม ซึ่งเสาตัวอย่างที่ใช้มีเหล็กปลอกด้วยกันสองประเภท คือ เหล็กปลอกเกลียวและเหล็กปลอกเรียบ นอกจากนี้เสาแต่ละประเภทยังมีทั้งเสาที่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลักและไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก โดยความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนของเสาเหลี่ยมปลอกเกลียวที่มีวัสดุเสริมกำลังหลักซึ่งพิจารณาผลของคอนกรีตหุ้มดังได้แสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปของเสาเหลี่ยมปลอกเกลียว

จากความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาเหลี่ยมปลอกเกลียวที่มีวัสดุเสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลักและมีคอนกรีตหุ้ม (SFsc) เทียบกับความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาเหลี่ยมปลอกเกลียวที่มีวัสดุเสริมกำลังหลักแต่ปราศจากคอนกรีตหุ้ม (SFsn) พบว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา SFsc มีค่าประมาณ 380 กิโลนิวตัน และกำลังรับแรงอัดของเสา SFsc ค่าประมาณ 370 กิโลนิวตัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเสา SFsc มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุด มากกว่าเสา SFsn ประมาณ 10 กิโลนิวตัน หรือมากกว่าประมาณร้อยละ 4 ซึ่งมีค่าน้อยและถือว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกันมาก แม้ว่าพื้นที่ในการรับแรงของเสา SFsc จะมีถึง 225 ตารางเซนติเมตร ซึ่งมากกว่าพื้นที่หน้าตัดของเสา SFsn ที่มีพื้นที่ในการรับแรงเพียง 156.25 ตารางเซนติเมตร ถึง 68.75 ตารางเซนติเมตร แต่พื้นที่ในการรับแรงของเสา SFsc ที่เพิ่มขึ้นมาจากพื้นที่ที่ได้จากคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอกก็ไม่ได้มีส่วนช่วยให้เสารับแรงอัดได้เพิ่มขึ้นมากนัก เนื่องจากก่อนที่เสาจะรับแรงอัดสูงสุด คอนกรีตหุ้มจะเกิดการหลุดร่อนออกจากแกนเสาทำให้เมื่อเสารับแรงอัดสูงสุด แกนเสาจะทำหน้าที่ในการรับแรงเป็นส่วนใหญ่ ดังจะเห็นได้จากการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดสูงสุดในตอนต้น โดยเสา SFsc ก็ยังคงมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดมากกว่าเสาเหลี่ยมคอนกรีตล้วนที่มีหน้าตัดขนาด 12.5x12.5 เซนติเมตร ที่มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดประมาณ 170 กิโลนิวตัน อยู่ประมาณร้อยละ 123

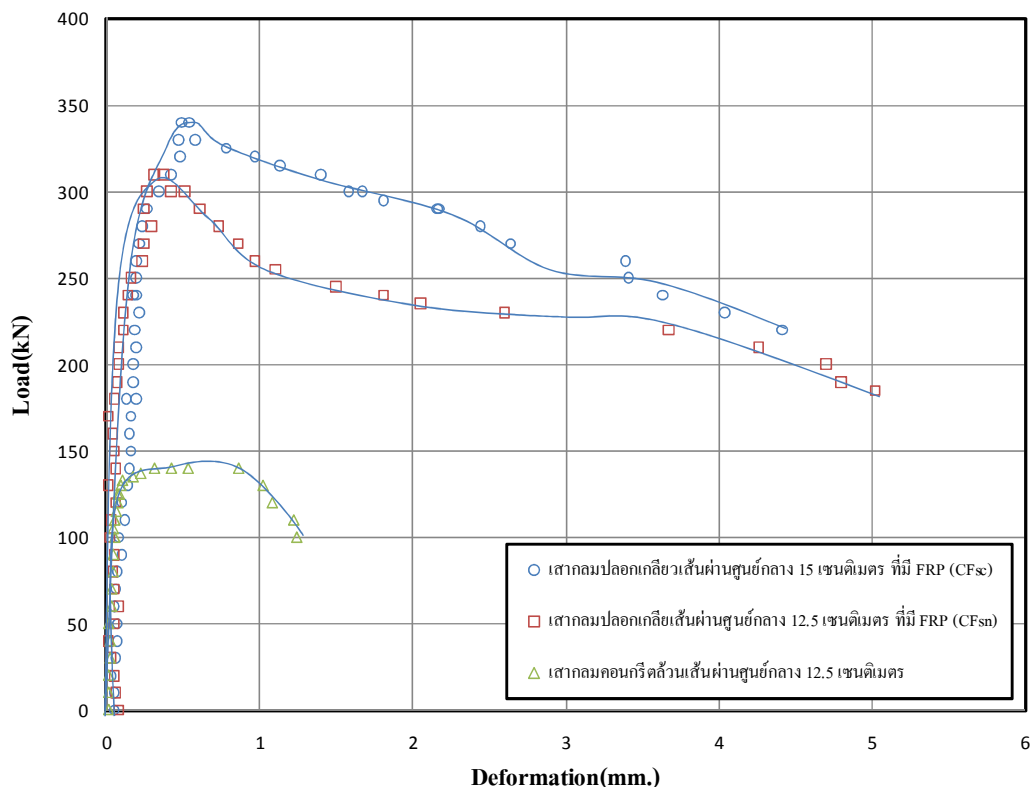
การเปลี่ยนรูปตามแนวแกนของเสาเหลี่ยมปลอกเกลียวที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก แต่มีในส่วนของคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (SNsc) เทียบกับการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาเหลี่ยมปลอกเกลียวที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลักและไม่มีคอนกรีตหุ้มเหล็กปลอก (SNsn) เสาทั้งหมดถูกทดสอบโดยการรับแรงตามแนวแกน โดยการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาเหลี่ยมปลอกเกลียวที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลักดังได้แสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปของเสาเหล็มปลอกเกลียว

จากความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนของเสาเหล็มปลอกเกลียวที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก พบว่า กำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาในกลุ่ม SNsc มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดประมาณ 310 กิโลนิวตัน และกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาตัวอย่างกลุ่ม SNsn มีค่าประมาณ 285 กิโลนิวตัน โดยเมื่อเปรียบเทียบกับเสาเหล็มคอนกรีตล้วนที่มีหน้าตัดขนาด 12.5x12.5 เซนติเมตร มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดประมาณ 170 กิโลนิวตัน พบว่า กำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาในกลุ่ม SNsc มีมากกว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาในกลุ่ม SNsn ประมาณร้อยละ 8 และมีกำลังรับแรงอัดมากกว่าเสาเหล็มคอนกรีตล้วนขนาดหน้าตัด 12.5x12.5 เซนติเมตร ประมาณร้อยละ 94

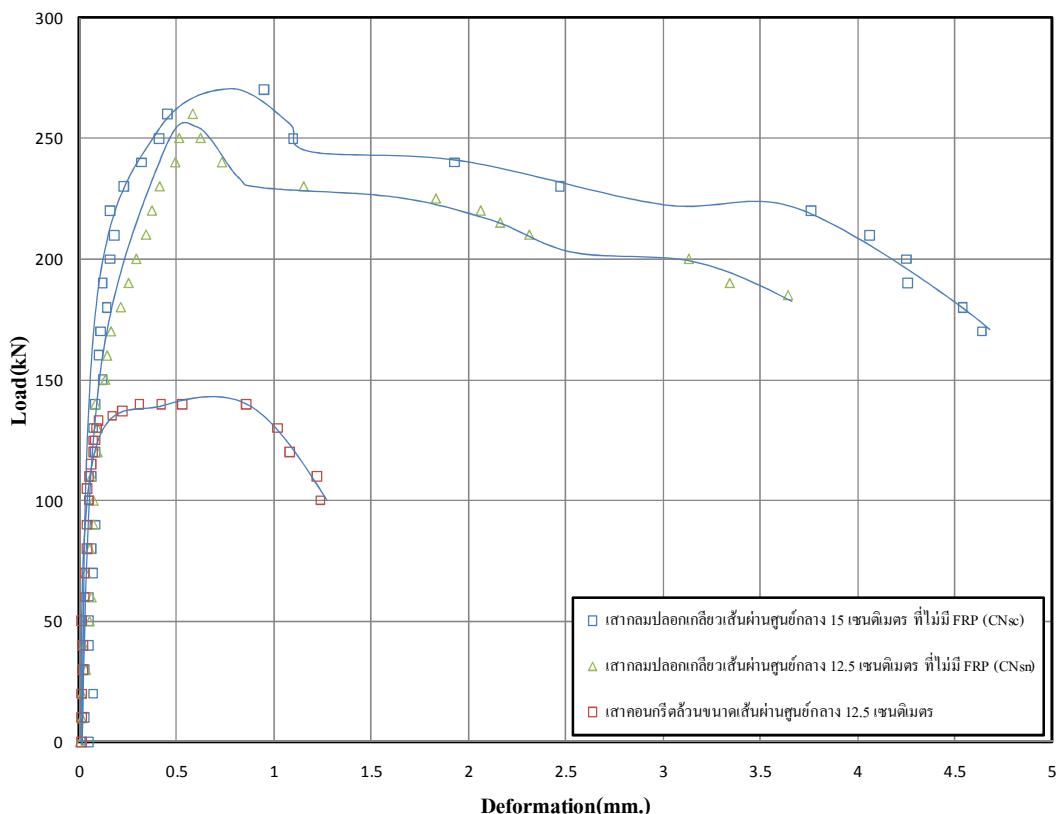
ในส่วนของเสากลมที่มีเหล็กปลอกประเภทปลอกเกลียวที่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาสองขนาดคือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สำหรับเสากลมที่มีคอนกรีตหุ้ม (CFsc) และเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร สำหรับเสากลมที่ปราศจากคอนกรีตหุ้ม (CFsn) เปรียบเทียบพฤติกรรมและกำลังรับแรงอัดสูงสุดกับเสากลมคอนกรีตล้วนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร โดยการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสากลมปลอกเกลียวที่มีวัสดุเสริมกำลังหลักดังได้แสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปของเสากลมปลอกเกลียว

จากความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสากลมปลอกเกลียวที่มีวัสดุเสริมกำลังหลักที่มีและไม่มีคอนกรีตหุ้ม พบว่า กำลังรับแรงอัดสูงสุดในกลุ่มของเสา CFsc มีค่าประมาณ 340 กิโลนิวตัน ซึ่งมีค่ามากกว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาในกลุ่ม CFsn ที่มีค่าประมาณ 310 กิโลนิวตัน ประมาณร้อยละ 9 และเสาในกลุ่ม CFsc ยังมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดมากกว่าเสากลมคอนกรีตล้วนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร ประมาณร้อยละ 142

ในส่วนของเสากลมที่มีเหล็กปลอกประเภทปลอกเกลียวแต่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาสองขนาด คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สำหรับเสากลมที่มีคอนกรีตหุ้ม (CNsc) และเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร สำหรับเสากลมที่ปราศจากคอนกรีตหุ้ม (CNsn) เปรียบเทียบพฤติกรรมและกำลังรับแรงอัดสูงสุดกับเสากลมคอนกรีตล้วนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร ตัวอย่างทั้งหมดถูกทดสอบโดยการรับแรงอัดตามแนวแกน โดยการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสากลมปลอกเกลียวที่มีวัสดุเสริมกำลังหลักแสดงในรูปที่ 5.8

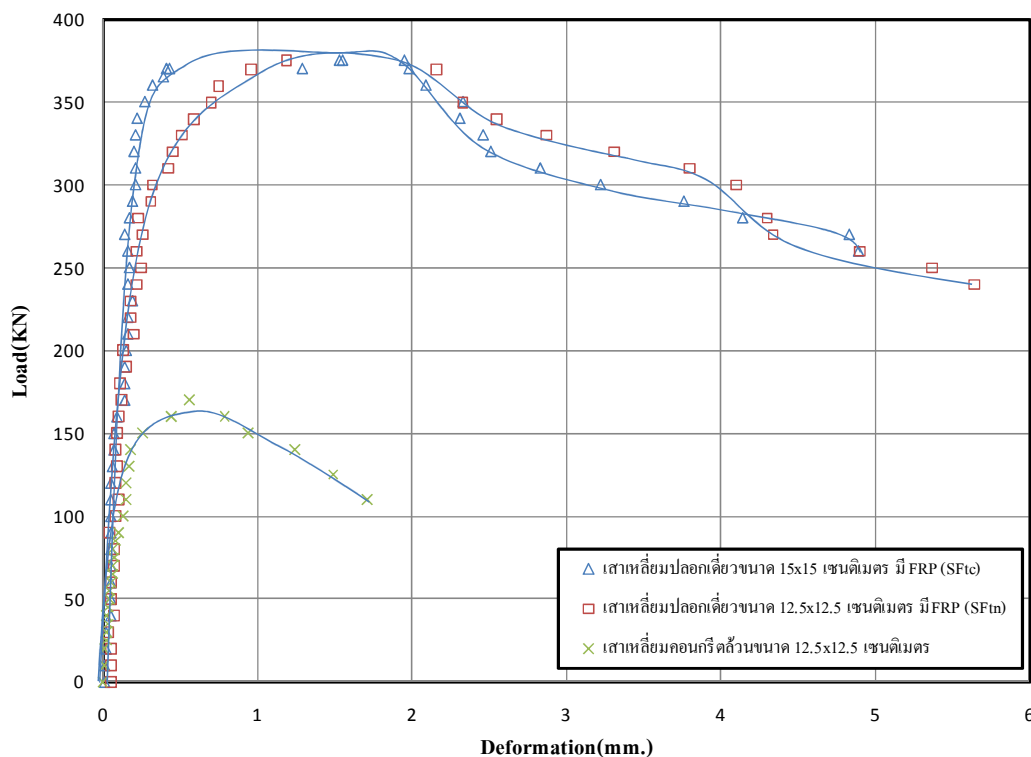


รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปของเสากลมปลอกเหล็ก

จากความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสากลมปลอกเหล็กที่ไม่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลักแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสากลมปลอกเหล็กที่มีคอนกรีตหุ้ม (CNsc) มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดประมาณ 270 กิโลนิวตัน ซึ่งเสาในกลุ่ม CNsc มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดตามแนวแกนมากกว่าเสาในกลุ่ม CNsn ประมาณ 10 กิโลนิวตัน หรือประมาณร้อยละ 4 และมากกว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสากลมคอนกรีตล้วนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร อยู่ประมาณร้อยละ 92 ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาในกลุ่ม CNsc กับเสาในกลุ่ม CNsn พบว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาทั้งสองกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกันมาก แม้ว่าพื้นที่ในการรับแรงของเสาในกลุ่ม CNsc จะมากกว่าเนื่องจากมีพื้นที่เพิ่มขึ้นจากในส่วนของคอนกรีตหุ้ม แต่ก็ไม่สามารถเพิ่มกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาในกลุ่ม CNsc มากนักเมื่อเทียบกับเสาในกลุ่ม CNsn แม้ว่าพื้นที่ที่เพิ่มขึ้นจากคอนกรีตหุ้มจะมีมากขึ้นถึง 49 ตารางเซนติเมตร ก็ตาม

ตัวอย่างในกลุ่มสุดท้าย เป็นตัวอย่างของเสาเหลี่ยมที่มีเหล็กปลอกเป็นประเภทเหล็กปลอกเดี่ยวที่มีหน้าตัดสองขนาดคือ ขนาด 15x15 เซนติเมตร สำหรับตัวอย่างที่มีคอนกรีตหุ้มและขนาด 12.5x12.5 เซนติเมตร สำหรับตัวอย่างที่ปราศจากคอนกรีตหุ้ม และตัวอย่างในกลุ่มนี้ยังมี

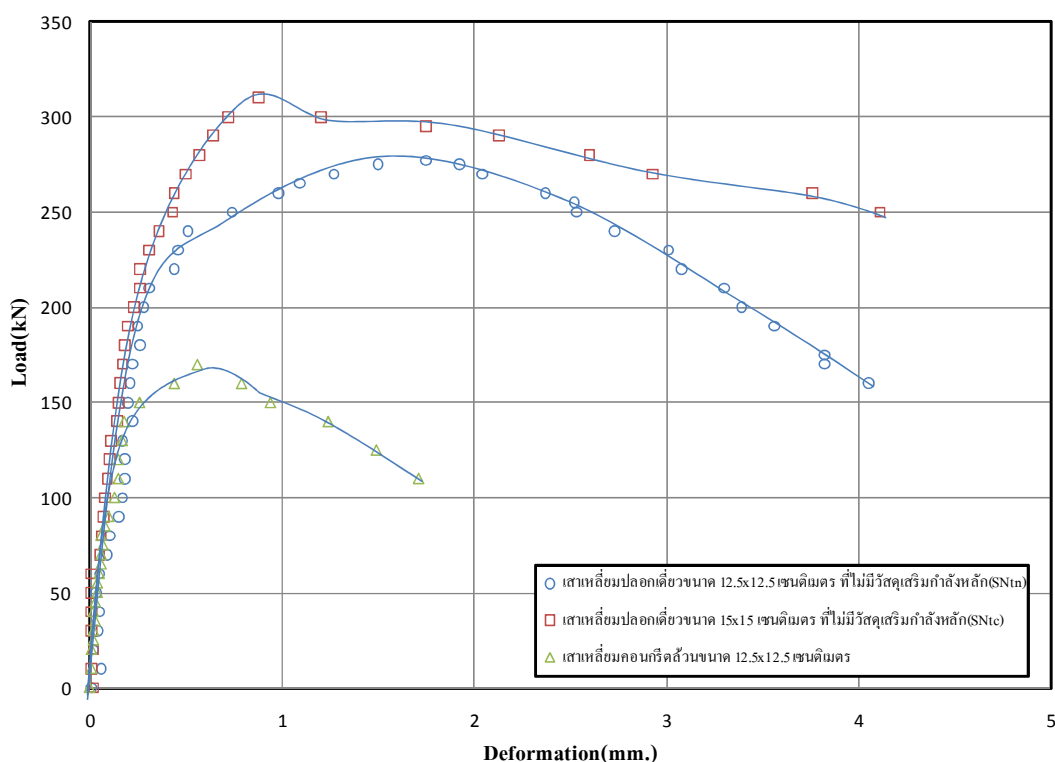
ทั้งตัวอย่างที่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก และตัวอย่างที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก โดยตัวอย่างทั้งหมดจะทำการทดสอบโดยการรับอัดตามแนวแกน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงตามแนวแกนของเสาเหลี่ยมปลอกเดี่ยวที่มีวัสดุเสริมกำลังหลักดังได้แสดงในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปของเสาเหลี่ยมปลอกเดี่ยว

จากความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาเหลี่ยมปลอกเดี่ยวที่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก (SFtc) ที่มีคอนกรีตหุ้มและเสาที่ไม่มีคอนกรีตหุ้ม (SFtm) แสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาในกลุ่ม SFtc มีกำลังรับแรงอัดประมาณ 370 กิโลนิวตัน ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้มีค่าเท่ากับกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาในกลุ่ม SFtm แม้ว่าเสาในกลุ่ม SFtc จะมีพื้นที่ในการรับแรงอัดมากกว่าเสาในกลุ่ม SFtm ก็ตาม จากกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ได้ แสดงให้เห็นว่า พื้นที่ที่เพิ่มขึ้นของเสาในกลุ่ม SFtc เนื่องจากคอนกรีตหุ้มไม่ได้มีส่วนช่วยให้เสารับแรงอัดได้เพิ่มมากขึ้นสำหรับเสาในกลุ่มนี้ แต่อย่างไรก็ตามเสาในกลุ่ม SFtc และเสาในกลุ่ม SFtm ยังคงรับแรงอัดตามแนวแกนได้มากกว่าเสาเหลี่ยมคอนกรีตล้วนที่มีหน้าตัดขนาด 12.5x12.5 เซนติเมตร ที่มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ประมาณ 170 กิโลนิวตัน ประมวลร้อยละ 117 และเสาทั้งสองชนิดยังคงแสดงพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนการวิบัติเหมือนกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป

ในส่วนของเสาเหลี่ยมปลอกเดี่ยวที่ปราศจากวัสดุเสริมกำลังหลักที่มีหน้าตัดสองขนาดคือ 12.5x12.5 เซนติเมตร สำหรับเสาที่ไม่มีคอนกรีตหุ้ม และหน้าตัดขนาด 15x15 เซนติเมตร สำหรับเสาที่มีคอนกรีตหุ้ม โดยเสาทั้งหมดถูกทดสอบโดยการรับแรงอัดตามแนวแกน การเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาเหลี่ยมปลอกเดี่ยวที่ปราศจากวัสดุเสริมกำลังหลักดังแสดงในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนรูปของเสาเหลี่ยมปลอกเดี่ยว

จากความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาเหลี่ยมปลอกเดี่ยวที่ปราศจากวัสดุเสริมกำลังหลักของเสาที่มีคอนกรีตหุ้ม (SNtc) และเสาตัวอย่างที่ไม่มีคอนกรีตหุ้ม (SNtm) เปรียบเทียบกับเสาเหลี่ยมคอนกรีตล้วนที่มีหน้าตัดขนาด 12.5x12.5 เซนติเมตร พบว่า กำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตกลุ่ม SNtc มีค่ากำลังอัดสูงสุดประมาณ 310 กิโลนิวตัน ซึ่งมีค่ามากกว่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาในกลุ่ม SNtm ที่มีค่าประมาณ 280 กิโลนิวตัน เมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ เสาในกลุ่ม SNtc จะมีค่ากำลังอัดสูงสุดมากกว่าเสาในกลุ่ม SNtm ประมาณร้อยละ 10 ทั้งนี้ กำลังอัดสูงสุดของเสาในกลุ่ม SNtc ที่มีค่ามากกว่าเสาในกลุ่ม SNtm แต่อย่างไรก็ตาม เสาในกลุ่ม SFtc และเสาในกลุ่ม SNtm ก็ยังคงมีกำลังรับแรงอัดมากกว่าเสาเหลี่ยมคอนกรีตล้วนหน้าตัด 12.5x12.5

เซนติเมตร โดยเสาในกลุ่ม Stsc มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดมากกว่าเสาเหลี่ยมคอนกรีตล้วนประมาณ 170 กิโลนิวตัน หรือประมาณร้อยละ 82 และเสาในกลุ่ม SN₃ มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดมากกว่าเสาเหลี่ยมคอนกรีตล้วนประมาณ 110 กิโลนิวตัน หรือประมาณร้อยละ 65

จากผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่เกิดจากผลของคอนกรีตหุ้มพบว่า คอนกรีตหุ้มมีผลต่อกำลังรับแรงอัดสูงสุดตามแนวแกนของเสาไม่มากนัก โดยตัวอย่างที่มีคอนกรีตหุ้มเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ปราศจากคอนกรีตหุ้ม กำลังรับแรงอัดสูงสุดจะมีค่าต่างกันไม่เกินร้อยละ 10 ในทุกตัวอย่าง และจะมีผลมากในเสาในกลุ่มที่ไม่มีคอนกรีตหุ้ม เนื่องจากก่อนที่เสาตัวอย่างจะรับแรงอัดสูงสุด แกนของเสาคอนกรีตจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปออกทางด้านข้าง ส่งผลให้เหล็กปลอกเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปออกทางด้านข้างตามไปด้วย เป็นผลทำให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กปลอกเกิดการหลุดร่อนออกจากเสาตัวอย่าง โดยในขณะที่เสารับแรงอัดสูงสุด แกนของเสาคอนกรีตที่ถูกเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมกำลังหลักและโอบรัดด้วยเหล็กปลอกจะทำหน้าที่ในการรับแรงอัดตามแนวแกนเป็นส่วนใหญ่ แต่การหลุดร่อนของคอนกรีตหุ้มก่อนที่เสาจะรับแรงอัดสูงสุดจะมีน้อยกว่าในส่วน of เสาในกลุ่มที่ไม่มีวัสดุเสริมกำลังหลัก จากข้อสังเกตข้างต้น ทำให้ทราบว่าคอนกรีตหุ้มมีส่วนช่วยรับแรงไม่มากนักสำหรับเสาคอนกรีตเสริมที่ถูกเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย เนื่องจากจะเกิดการหลุดร่อนของคอนกรีตหุ้มก่อนที่เสาตัวอย่างจะรับแรงอัดสูงสุด

5.4 การประเมินตัวคูณปรับลดกำลัง

ในหัวข้อนี้เป็นการประมาณค่าตัวคูณปรับลดกำลัง (Reduction Factor) ของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ทำหน้าที่แทนวัสดุเสริมกำลังหลักในเสา ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำทฤษฎีในการประมาณค่ากำลังรับแรงอัดประลัยสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมาประยุกต์ใช้กับเสาที่มีวัสดุเสริมกำลังหลักเป็นวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ถูกโอบรัดด้วยวัสดุเสริมกำลังทางด้านข้างชนิดปลอกเกลียวและปลอกเดี่ยวเพื่อนำเสนอสมการเพื่อใช้ในการออกแบบ โดยการนำสมการการคำนวณเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปมาประยุกต์ใช้กับการคำนวณเพื่อประมาณค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของเสา ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

โดยทั่วไปเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะแบ่งการรับแรงออกเป็น 2 ส่วนคือ การรับแรงต้านทานเนื่องจากคอนกรีต (P_{conc}) และการรับแรงต้านทานเนื่องจากเหล็กยื่น (P_s) โดยกำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกนของเสา ACI (American Concrete Institute) กำหนดให้หน่วยแรงอัดของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ $0.85f'_c$ นั่นคือ

$$P_0 = P_{con} + P_s = 0.85f'_c A_c + f_s A_s \quad (5.1)$$

โดยที่	P_0	=	กำลังรับแรงอัดสูงสุดตามแนวแกน
	f'_c	=	กำลังรับแรงอัดประลัยสูงสุดของคอนกรีต
	A_c	=	พื้นที่หน้าตัดสุทธิของคอนกรีต
	f_s	=	ค่าความเค้นสูงสุดของเหล็กยื่น
	A_s	=	พื้นที่หน้าตัดสุทธิของเหล็กยื่น

เสาคอนกรีตที่มีเฉพาะเหล็กยื่นเพียงอย่างเดียวเมื่อเสารับแรง เสาจะมีการแสดงพฤติกรรมแบบเปราะ เนื่องจากเมื่อเสาคอนกรีตจะเกิดการหลุดร่อนของคอนกรีตหุ้มและตามมาด้วยการที่เหล็กยื่นเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทางด้านข้าง จนกระทั่งเกิดการวิบัติโดยการโก่งเดาะของเหล็กยื่น แต่เมื่อเสาดังกล่าวมีการโอบรัดแกนเสาด้วยเหล็กปลอกเกลียวหรือเหล็กปลอกเดี่ยวเหล็กปลอกจะช่วยโอบรัดแกนเสาหลังจากคอนกรีตหุ้มหลุดร่อนออกหมดทำให้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นสามารถรับแรงเพิ่มขึ้นได้บ้าง และยังส่งผลให้เสาสามารถแสดงพฤติกรรมแบบเหนียวได้ก่อนการวิบัติอีกด้วย นอกจากนี้ประโยชน์ของเหล็กปลอกอีกอย่างหนึ่งคือการยึดเหล็กยื่นให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการขณะทำการหล่อเสาอีกด้วย

อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงการหล่อเสาโดยทั่วไป เสาแต่ละต้นจะไม่ได้รับแรงอัดตามแนวแกนเสียทีเดียวโดยอาจมีการเอียงศูนย์บ้าง ดังนั้นในการคำนวณหาค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของเสา ACI ได้กำหนดให้ใช้การลดกำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกนของเสา โดยเสาที่มีเหล็กปลอกประเภทปลอกเดี่ยวและปลอกเกลียวจะมีค่ากำลังรับแรงอัดตามแนวแกนเพียง 80% และ 85% ตามลำดับของกำลังอัดเดิม ดังนั้น จะได้ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต ϕP_n ดังนี้

- กำลังรับแรงอัดประลัยตามแนวแกนของเสาปลอกเดี่ยว

$$\phi P_n = 0.80\phi [0.85f'_c(A_g - A_c) + f_s A_s] \quad (5.2)$$

- กำลังรับแรงอัดประลัยตามแนวแกนของเสาปลอกเกลียว

$$\phi P_n = 0.85\phi [0.85f'_c(A_g - A_c) + f_s A_s] \quad (5.3)$$

โดยที่ ϕ คือ ตัวคูณลดกำลังของเสา ซึ่งในกรณีของเสาปลอกเดี่ยวจะมีค่าเท่ากับ 0.7 และในกรณีของเสาปลอกเกลียวจะมีค่าตัวคูณปรับลดกำลังเท่ากับ 0.75 ซึ่งเมื่อนำสมการที่ (5.2) และ (5.3) มาใช้เพื่อคำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดตามแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีพื้นที่หน้าตัดและอัตราส่วนของปริมาตรวัสดุเสริมกำลังหลักเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ใช้ในการ

ทดสอบ โดยกำหนดให้เหล็กยื่นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 มิลลิเมตร จำนวน 4 เส้น ค่าความเค้นสูงสุดของเหล็กยื่นมีค่าประมาณ 735.5 MPa และมีเหล็ก SR24 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เป็นเหล็กปลอกทั้งประเภทปลอกเดี่ยวและปลอกเกลียว มีระยะห่างของเหล็กปลอก 5 เซนติเมตร โดยผลการทำนายกำลังรับแรงอัดประลัยสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 กำลังรับแรงอัดประลัยสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เสาตัวอย่าง	พื้นที่สุทธิของ เสา (cm. ²)	หน่วยแรงอัด ประลัยในคอนกรีต (MPa)	ความเค้นดึง สูงสุดของเหล็ก (MPa)	กำลังรับแรงอัด ประลัยสูงสุด (kN)
SFsc	221.86	26.48	735.5	466
CFsc	173.57	26.48	735.5	396
SFtc	221.86	26.48	735.5	410

จากผลการทดสอบที่นำเสนอมาแล้วในบทที่ 3 และบทที่ 4 ได้แสดงให้เห็นแล้วว่า เสาที่มีการแทนที่ในส่วนของวัสดุเสริมกำลังหลักด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer Rebar : FRP) นั้นสามารถช่วยให้เสารับแรงได้มากขึ้นและสามารถทำหน้าที่แทนเหล็กเสริมได้เนื่องจากเมื่อรับแรงอัดตามแนวแกน เสาที่ถูกเสริมกำลังหลักด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยจะไม่เกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด พฤติกรรมการรับแรงโดยรวมของเสามีลักษณะคล้ายคลึงกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป ดังนั้นในการวิเคราะห์เพื่อหาสมการที่ใช้ในการทำนายค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาที่เสริมกำลังหลักด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไปจึงมีความแตกต่างไม่มากนัก โดยอาศัยหลักในการวิเคราะห์เสาคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งสามารถนำมาประยุกต์เพื่อหากำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกนของเสาที่ถูกเสริมกำลังหลักด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย ดังนี้

กำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกนของเสาจะมีค่าเท่ากับกำลังต้านทานที่ได้จากคอนกรีต (P_{con}) บวกกับกำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (P_f) ดังสมการที่ (5.4)

$$P_o = P_{con} + P_f = f_c A_c + f_{fu} A_f \quad (5.4)$$

โดยที่ f_c และ f_{fu} คือ หน่วยแรงอัดสูงสุดในคอนกรีตและค่าความเค้นแตกหักสูงสุดของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยตามลำดับ A_c คือ พื้นที่หน้าตัดสุทธิของคอนกรีต ($A_g - A_f$ เมื่อ A_g คือ

พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของเสาคอนกรีต) และ A_f คือพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย ซึ่งเมื่อคอนกรีตรับแรงอัดสูงสุดมาตรฐานของ ACI (American Concrete Institute) กำหนดให้หน่วยแรงอัดของคอนกรีตมีค่าประมาณร้อยละ 85 ของกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต และในกรณีของเสาที่ถูกเสริมกำลังหลักด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย กำหนดให้ ψ_f เป็นตัวคูณปรับลดกำลัง (Reduction Factor) ของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย โดยสามารถเขียนสมการรับแรงอัดของเสาใหม่ดังแสดงในสมการที่ (5.5)

$$P_o = 0.85 f_c (A_g - A_f) + \psi_f f_{fu} A_f \quad (5.5)$$

เนื่องจากสมการที่ (5.5) เป็นสมการการการทำนายกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตที่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก ซึ่งมีสมมุติฐานมาจากเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐานของ ACI (American Concrete Institute) โดยใช้ข้อเสนอแนะเช่นเดียวกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป ซึ่งในกรณีของเสาปลอกเดี่ยวและเสาปลอกเกลียว มีค่ากำลังรับแรงอัดตามแนวแกนเพียง 80% และ 85% ตามลำดับของกำลังอัดเดิม และกำหนดให้ ϕ คือตัวคูณลดกำลังของเสา ซึ่งในกรณีของเสาปลอกเดี่ยวจะมีค่าเท่ากับ 0.7 และในกรณีของเสาปลอกเกลียวจะมีค่าตัวคูณปรับลดกำลังเท่ากับ 0.75 ดังแสดงในสมการที่ (5.6) และสมการที่ (5.7)

- กำลังรับแรงอัดประลัยตามแนวแกนของเสาปลอกเดี่ยว

$$\phi P_n = 0.80 \phi [0.85 f_c (A_g - A_f) + \psi_f f_{fu} A_f] \quad (5.6)$$

- กำลังรับแรงอัดประลัยตามแนวแกนของเสาปลอกเกลียว

$$\phi P_n = 0.85 \phi [0.85 f_c (A_g - A_f) + \psi_f f_{fu} A_f] \quad (5.7)$$

โดยการประยุกต์นำเอาสมการที่ใช้ในการหาลำลังรับแรงอัดประลัยสูงสุดตามแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อใช้ในการคำนวณหาตัวคูณปรับลดกำลัง (Reduction Factor) ในกรณีของเสาที่มีวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก โดยการนำกำลังรับแรงอัดประลัยสูงสุดที่ได้จากผลการทดสอบในบทที่ 4 มาแทนในสมการที่ (5.6) และ (5.7) เพื่อทำการคำนวณหาตัวคูณปรับลดกำลัง ผลการหาตัวคูณปรับลดกำลังจากตัวอย่างที่มีวัสดุเสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลักของเสาน้ำตัดชนิดต่างๆที่มีคอนกรีตหุ้ม ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงตัวคูณปรับลดกำลังของเสาตัวอย่าง

กลุ่มเสาตัวอย่าง		พื้นที่สุทธิ ของเสา (cm. ²)	กำลังรับแรงอัด ประลัยสูงสุด (kN)	หน่วยแรงอัด ในคอนกรีต (MPa)	หน่วยแรง แตกหักสูงสุด ของ FRP (MPa)	ตัวคูณ ปรับลด กำลัง (ψ)
SFsc	1-SFsc	221.86	380	26.48	735.5	0.41
	2-SFsc	221.86	340	26.48	735.5	0.15
	3-SFsc	221.86	390	26.48	735.5	0.48
CFsc	1-CFsc	173.57	320	26.48	735.5	0.48
	2-CFsc*	173.57	-	-	-	-
	3-CFsc	173.57	370	26.48	735.5	0.61
SFtc	1-SFtc	221.86	360	26.48	735.5	0.62
	2-SFtc	221.86	375	26.48	735.5	0.73
	3-SFtc	221.86	400	26.48	735.5	0.93

หมายเหตุ

* หมายถึง ตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกทำการทดสอบ

จากตารางที่ 5.2 แสดงให้เห็นว่าเสาที่มีการเสริมกำลังหลักด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเมื่อนำผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดประลัยสูงสุดตามแนวแกนจากบทที่ 4 เพื่อใช้ในการแก้สมการเพื่อหาค่าตัวคูณปรับลดกำลังจากตาราง สรุปได้ว่า ในกรณีของเสาเหลี่ยมปลอกเกลียวและเสากลมปลอกเกลียวจะมีตัวคูณปรับลดกำลังเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.45 และในกรณีของเสาเหลี่ยมปลอกเกลียวจะได้ค่าตัวคูณปรับลดกำลังจากการคำนวณประมาณ 0.65 สาเหตุที่ค่าตัวคูณปรับลดกำลังของเสาที่มีเหล็กปลอกแตกต่างกันมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากค่า ϕ ที่ใช้ในการคำนวณมีค่าไม่เท่ากันซึ่งส่งผลโดยตรงต่อกำลังรับแรงอัดประลัยที่ได้จากการคำนวณ

โดยเมื่อได้ค่าตัวคูณปรับลดกำลัง (Reduction Factor: ψ) จากตารางที่ 5.2 สามารถนำมาแทนค่าในสมการที่ (5.6) และสมการที่ (5.7) เพื่อจัดรูปแบบสมการในการทำนายกำลังรับแรงอัดประลัยตามแนวแกนของเสาคอนกรีตที่ถูกเสริมกำลังหลักด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในสมการที่ (5.8) และสมการที่ (5.9)

- กำลังรับแรงอัดประลัยตามแนวแกนของเสาปลอกเดี่ยว

$$P_U = 0.476f_c A_c + 0.364f_{fu} A_f \quad (5.8)$$

- กำลังรับแรงอัดประลัยตามแนวแกนของเสาปลอกเกลียว

$$P_U = 0.542f_c A_c + 0.287f_{fu} A_f \quad (5.9)$$

5.5 เปรียบเทียบการทำนายกำลังอัดประลัย

ในปี 2009 Ahmed(2009) และคณะ ได้ทำการทดสอบพฤติกรรมในการรับแรงอัดตามแนวแกนของเสาที่มีวัสดุเสริมกำลังหลักและวัสดุเสริมกำลังทางด้านข้างด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเป็นตัวอย่างเสาเหลี่ยมจำนวน 8 ตัวอย่าง โดยในการทำนายกำลังรับแรงอัดประลัยตามแนวแกนของเสา Ahmed ได้นำสมการการคำนวณกำลังรับแรงประลัยของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปตามข้อกำหนดมาตรฐานการออกแบบ ACI 318-08 มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณ โดยการใช้ตัวประกอบลดกำลัง (Reduction Factor: ψ_p) ที่ถูกนำเสนอโดย Mallick(1995) และ Wu (1990) มาประกอบในการคำนวณ ดังแสดงในสมการที่ (5.9)

$$P_o = 0.85 f_c (A_g - A_f) + \psi_p f_{fu} A_f \quad (5.9)$$

ตามข้อเสนอแนะในการออกแบบเสาคอนกรีตที่ถูกเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ถูกเสนอโดย Mallick(1995) และ Wu (1990) ได้กำหนดให้ใช้ตัวประกอบลดกำลังสำหรับของเสาคอนกรีตที่ถูกเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยภายใต้แรงอัดตามแนวแกนมีค่าเท่ากับ 35 เปอร์เซ็นต์ ของค่าความเค้นแตกหักสูงสุดของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยหรือเท่ากับ 0.35 โดยสามารถแทนลงในสมการที่ (5.9) และเขียนสมการได้ใหม่ดังแสดงในสมการที่ (5.10)

$$P_o = 0.85 f_c (A_g - A_f) + 0.35 f_{fu} A_f \quad (5.10)$$

เมื่อนำสมการที่ (5.10) ไปลดกำลังโดยการใช้ด้วยตัวประกอบปรับลดกำลังสำหรับเสาที่ได้รับการแนะนำโดย ACI ซึ่งกำหนดให้ใช้การลดกำลังต้านทานแรงอัดตามแนวแกนของเสา จะได้ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต ϕP_n ในกรณีของเสาปลอกเดี่ยวและเสาปลอกเกลียวดังนี้สมการที่ (5.11) และสมการที่ (5.12)

- กำลังรับแรงอัดประลัยตามแนวแกนของเสาปลอกเดี่ยว

$$\phi P_n = 0.80\phi[0.85f_c(A_g - A_f) + 0.35f_{fu}A_f] \quad (5.11)$$

- กำลังรับแรงอัดประลัยตามแนวแกนของเสาปลอกเดี่ยว

$$\phi P_n = 0.85\phi[0.85f_c(A_g - A_f) + 0.35f_{fu}A_f] \quad (5.12)$$

ต่อมาในปี 2010 (Ehab,2010) ได้ทำการเสนอแบบจำลองที่ได้จากการทดลองกับเสาตัวอย่างจำนวน 10 ตัวอย่าง ที่มีปริมาณวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุเสริมกำลังหลักที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน เพื่อใช้ในการทำนายหากำลังอัดประลัยสูงสุดตามแนวแกนของเสาโดยทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สมการทำนายการวิบัติของเสาคอนกรีตที่ถูกเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ Ehab นำเสนอดังแสดงไว้ในสมการที่ (5.13)

$$P_U = 0.4f_{cu}A_c + 0.75f_yA_s \quad (5.13)$$

โดยที่

P_U = กำลังรับแรงอัดประลัยสูงสุดตามแนวแกน

f_{cu} = กำลังรับแรงอัดประลัยสูงสุดของคอนกรีต

A_c = พื้นที่หน้าตัดสุทธิของคอนกรีต

f_y = ค่าความเค้นแตกหักสูงสุดของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย

A_s = พื้นที่หน้าตัดสุทธิของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย

เมื่อนำสมการการทำนายกำลังรับแรงอัดประลัยสูงสุดที่ถูกนำเสนอโดย Ahmed (Ahmed,2009) และ Ehab (Ehab,2010) และสมการทำนายการวิบัติที่ได้จากการใช้ข้อมูลการทดลองในงานวิจัยดังแสดงในสมการที่ (5.11) และ (5.12) เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลกำลังรับแรงอัดประลัยสูงสุดที่ได้จากผลการทดสอบจริงจากงานวิจัย แสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบกำลังอัดประลัยตามแนวแกน

กลุ่มเสา ตัวอย่าง	พื้นที่หน้าตัด A_c (cm ²)	\bar{P}_{exp} (kN)	P_U (kN)	P_{U1} (Ehab) (kN)	P_{U2} (Ahmed) (kN)	$\frac{P_U}{\bar{P}_{exp}}$	$\frac{P_{U1}}{\bar{P}_{exp}}$	$\frac{P_{U2}}{\bar{P}_{exp}}$
SFsc	221.86	37.71	384.80	411.65	369.98	1.04	1.11	1.00
CFsc	173.57	33.64	315.48	360.49	300.67	0.95	1.09	0.91
SFtc	221.86	38.73	363.81	411.65	345.31	0.96	1.08	0.91

ผลจากตารางที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดประลัยตามแนวแกนของเสา ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ (5.11) และ (5.12) และสมการที่ถูกลำเสนอโดย Ehab และ Ahmed ผลการเปรียบเทียบจากตารางที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยสูงสุดตามแนวแกนจากการคำนวณตามสมการที่ (5.11) และ (5.12) มีผลต่างของกำลังรับแรงอัดประลัยสูงสุดเทียบกับผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของเสาจากการทดลองประมาณร้อยละ 5 และสมการการทำนายการวิบัติของเสาที่ถูกลำเสนอโดย Ehab และ Ahmed เมื่อนำสมการของผู้วิจัยทั้งสองท่านไปทำการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบรับแรงอัดตามแนวแกนของเสาที่ได้จากการทดสอบ พบว่ามีผลต่างของกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ใกล้เคียงกันคือประมาณร้อยละ 8-10

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบความแม่นยำของสมการที่ใช้ข้อมูลจากผลการวิจัยมาประยุกต์ในการเขียนเป็นสมการสำหรับการทำนายกำลังรับแรงอัดประลัยตามแนวแกน จึงได้นำสมการ (5.11) และ (5.12) และสมการที่ถูกลำเสนอโดย Ahmed ไปใช้ในการทำนายกำลังรับแรงอัดประลัยตามแนวแกนจากการผลการทดลองของ Ehab โดย Ehab ได้ทำการทดสอบโดยใช้ FRP ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร เป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก จำนวน 5 ตัวอย่าง โดยแต่ละตัวอย่างจะมีปริมาณของ FRP ที่เป็นวัสดุเสริมกำลังหลักที่แตกต่างกัน โดย FRP มีหน่วยแรงแตกหักสูงสุดเท่ากับ 460 MPa เสาที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นเสาเหลี่ยมขนาด 250x250 มิลลิเมตร สูงประมาณ 1250 มิลลิเมตร โดยเสาแต่ละตัวอย่างจะมีระยะห่างของเหล็กปลอกและกำลังรับแรงอัดประลัยสูงสุดของคอนกรีตที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 5.3

ผลการเปรียบเทียบพบว่า สมการที่ใช้ทำนายกำลังรับแรงอัดประลัยตามแนวแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐานของ *ACI* (American Concrete Institute) จะมีผลต่างของกำลังรับแรงอัดตามแนวแกนที่ได้จริงจากการทดสอบเทียบผลจากการทำนายกำลังรับแรงอัดของ *ACI* ค่อนข้างมาก คือจะมีผลต่างประมาณร้อยละ 5 ถึงร้อยละ 13 และเมื่อมาดูผลการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดประลัยตามแนวแกนที่ได้จากการทดสอบจริงเทียบกับสมการที่ถูกลำเสนอโดย Ehab Ahmed และสมการการทำนายกำลังรับแรงอัดประลัยจากงานวิจัย พบว่า ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดที่เสารับได้จริงจากการทดสอบกับค่ากำลังรับแรงอัดจากการทำนายของสมการมีความใกล้เคียงกัน โดยผลต่างของกำลังรับแรงอัดประลัยสูงสุดของเสาจะอยู่ในเกณฑ์เดียวกัน คือประมาณร้อยละ 3 ถึงร้อยละ 8 ในทุกๆ ตัวอย่าง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า สมการที่ได้จากการทดสอบจากงานวิจัยดังแสดงในสมการที่ (5.11) และ (5.12) สามารถใช้ในการทำนายกำลังรับแรงอัดประลัยสูงสุดตามแนวแกนของเสาที่มีการเสริมวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุ

เสริมกำลังหลักได้ และผลจากการทำนายนายกำลังรับแรงอัดประลัยตามแนวแกนยังมีความสอดคล้อง
และใกล้เคียงกับผลการทำนายนายกำลังรับแรงอัดประลัยตามแนวแกนที่แนะนำให้ถูกนำเสนอโดยผู้วิจัยท่านอื่น

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดประลัยกับผลการทดลองของ Ehab

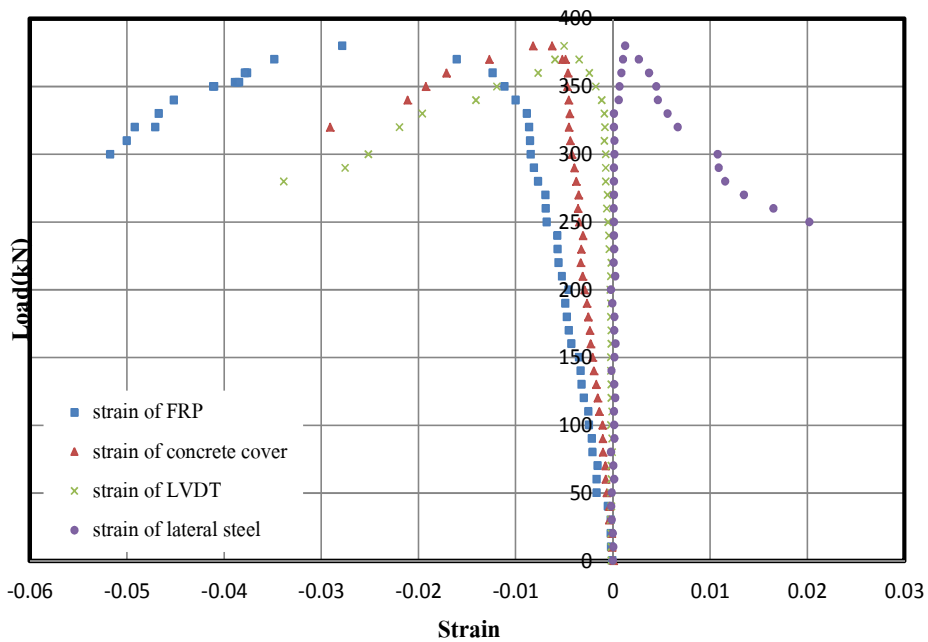
No.	ตัวอย่าง เสา	f'_c (N/mm. ²)	ปริมาณ FRP (%)	พื้นที่สุทธิ ของ FRP (mm. ²)	หน่วยแรง แตกหักของ FRP (N/mm. ²)	พื้นที่หน้า ตัดเสา (mm. ²)	ผลการทดสอบจริง (P_{EXP}) (kN)	กำลังอัดประลัยจากสูตรการคำนวณ				เปรียบเทียบกำลังอัดประลัย			
								ACI (P_{ACI}) (kN)	Ehab (P_{Ehab}) (kN)	Ahmed (P_{Ahm}) (kN)	สูตรจาก งานวิจัย (P_u) (kN)	$\frac{P_{Exp}}{P_{ACI}}$	$\frac{P_{Exp}}{P_{Ehab}}$	$\frac{P_{Exp}}{P_{Ahm}}$	$\frac{P_{Exp}}{P_U}$
1	C1	25	0.72	452	460	62500	760	758	781	785	819	1.13	1.03	1.03	1.08
2	C2	25	1.08	678	460	62500	870	818	859	805	857	1.06	0.99	0.93	0.99
3	C3	25	1.45	904	460	62500	920	878	937	825	895	1.06	1.02	0.90	0.97
4	C4	30	0.72	452	460	62500	960	884	906	933	968	1.05	0.94	0.97	1.01
5	C5	35	0.72	452	460	62500	1095	1011	1031	1082	1117	1.06	0.94	0.99	1.02

บรรณานุกรม

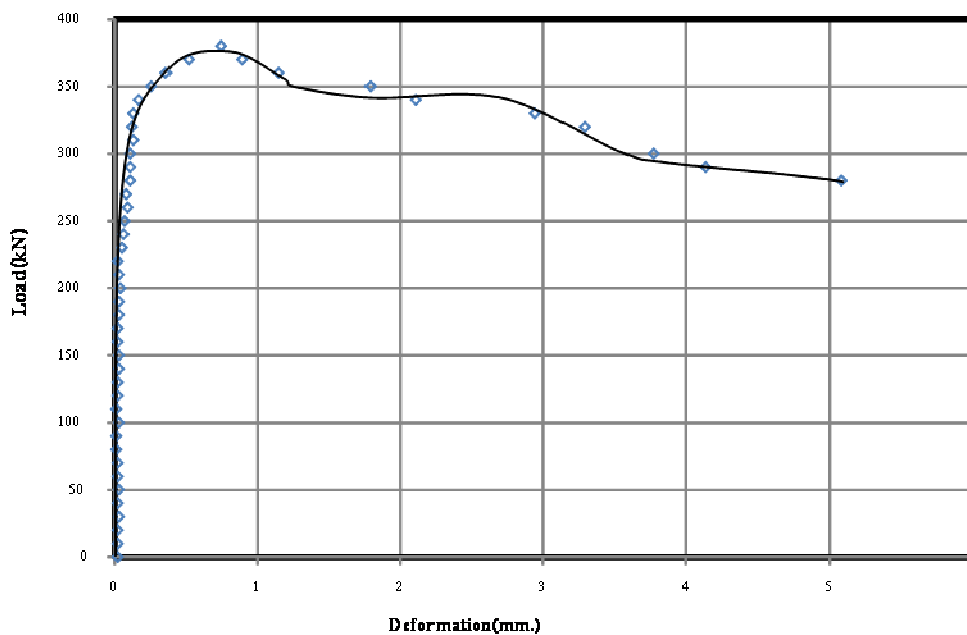
- Wight, J.K. and MacGregor, J.G. (2009). "Reinforced Concrete Mechanics & Design." Pearson International Edition, New Jersey.
- Manrique, M.A. Bertero, V.V. and Popov E.P. , (1979). "Mechanical Behavior of Lightweight Concrete Confined by Different Types of Lateral Reinforcement." Research Assistant, University of California, Berkeley.
- ACI Committee 318, 2005, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (318R-05)," American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 430 pp.
- Luca, A.D. Matta, A. and Nanni, A. , (1999). "Behavior of Full-Scale Concrete Columns Internally Reinforced with Glass FRP Bars under Pure Axial Load." American Composites Manufacturers Association, January 15-19.
- Monti, G. and Nuti, C., (1992). "Nonlinear Cyclic Behavior of Reinforcing Bars Including Buckling." Journal of Structural Engineering, Vol.118, No.12, January 8.
- Vallenas, J. Bertero, V.V. and Popov, E.P. , (1977). "Concrete Confined by Rectangular Hoops and Subjected to Axial Loads.", Research Assistant, University of California, Berkeley.
- Bayrak, O., and Sheikh, S.A. (2001). "Plastic Hinge Analysis." Journal of Structural Engineering, Vol. 127, No. 9, September.
- Choo, C.C. Harik, I.E. and Gesund, H. ,(2006). "Strength of Rectangular Concrete Columns Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars." ACI Structural Journal, V. 103, No. 3, May-June, pp. 452-459.
- Choo, C.C. Harik, I.E. and Gesund, H. ,(2006). "Minimum Reinforcement Ratio for Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Rectangular Columns." ACI Structural Journal, V. 103, No. 3, May-June, pp. 460-466.
- Dhakal, R.P. and Maekawa, K. , (2002). "Path-dependent Cyclic Stress–Strain Relationship of Reinforcing Bar Including Buckling" Engineering Structures 24, May, pp.1383–1396.
- Ahmed Farghaly, Hany Tobbi, and Brahim Benmokrane, (2009). "Concrete Columns Reinforced Longitudinally and Transversally by GFRP Bars." NSERC Research Chair in Innovative FRP Composite Materials for Infrastructures., December.

- G. Dhinakaran, K. Manoharan and C. Antony Jeyasehar (2010). "Load Deformation Characteristics of GFRP Reinforced HPC Square Columns.," Journal of Civil Engineering Research and Practice, Vol. 7 No.2, October 2010, pp. 23–38.
- Ehab M. Lotfy, (2010). "Behavior of Reinforced Concrete Short Columns with Fiber Reinforced Polymers Bars.," International Journal of Civil and Structural Engineering ,Volume 1, No 3, 2010 , pp. 545-557.
- Ehab M. Lotfy, (2011). "Nonlinear analysis of Reinforced Concrete Columns with Fiber Reinforced Polymer Bars.," International Journal of Civil and Structural Engineering ,Volume 1, No 4, 2011 , pp. 707-722.
- วินิต ช่อวิเชียร. (2550). "การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง" พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

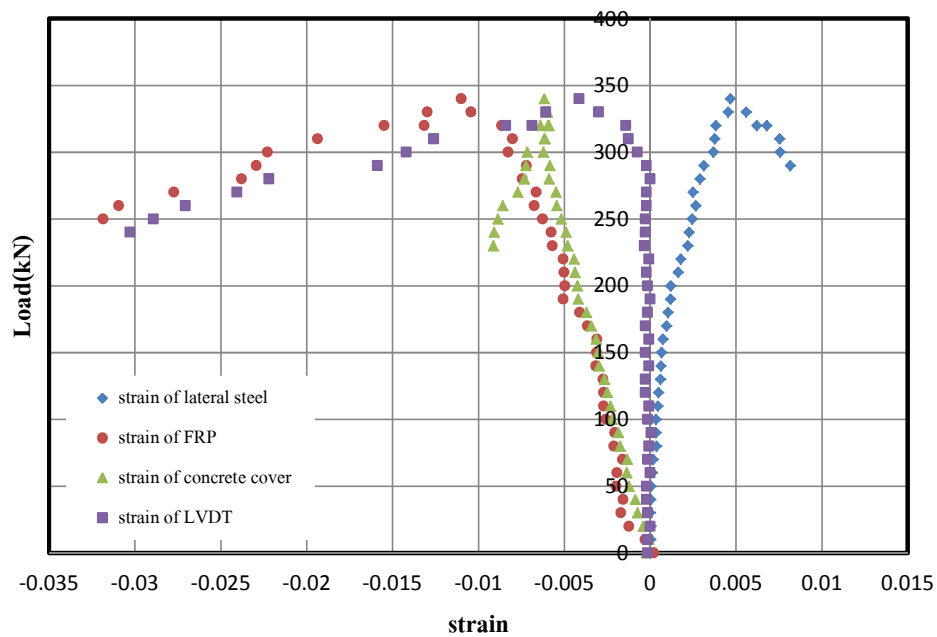
ภาคผนวก ก



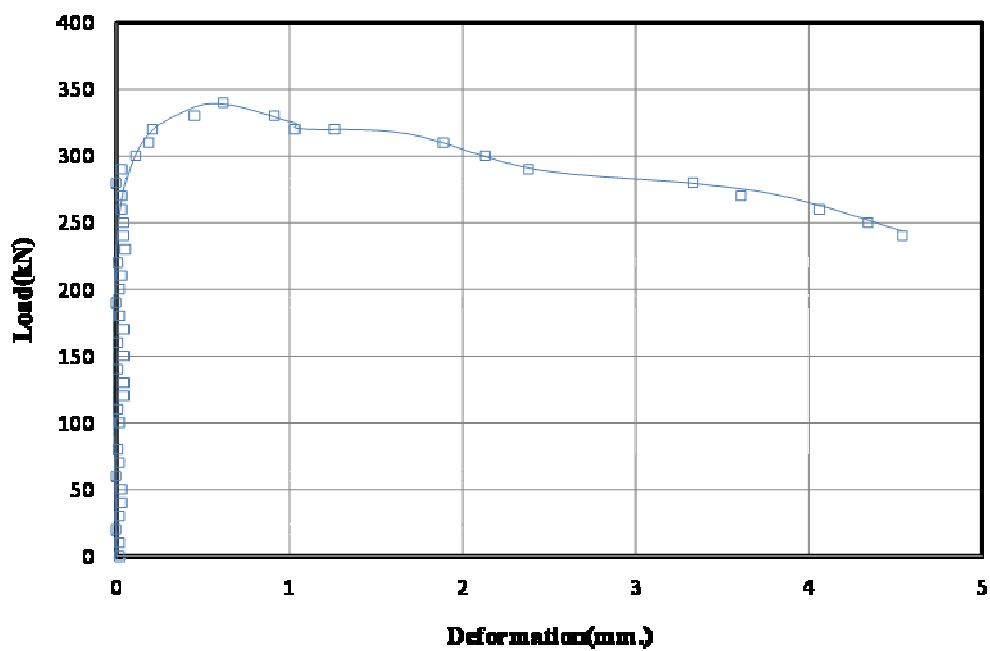
รูปที่ ก - 1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 1-SFsc



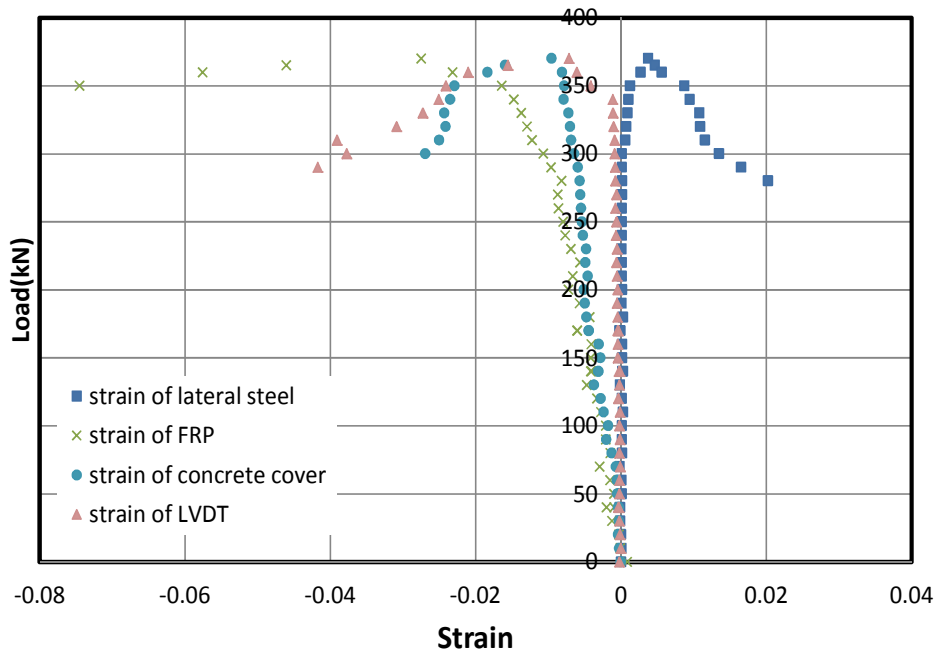
รูปที่ ก - 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนรูปร่างตามแนวแกนของเสา 1-SFsc



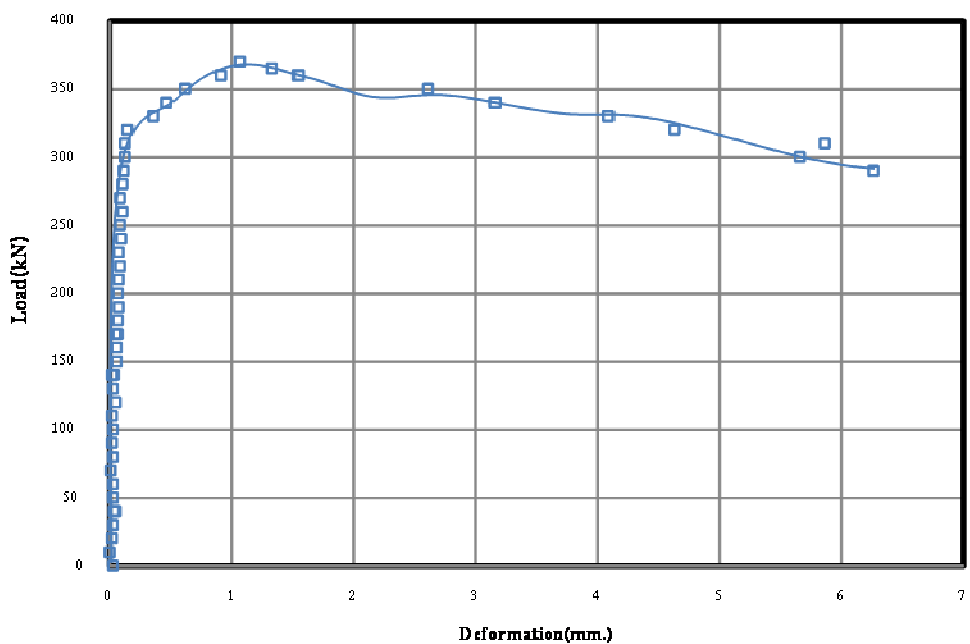
รูปที่ ก - 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 2-SFsc



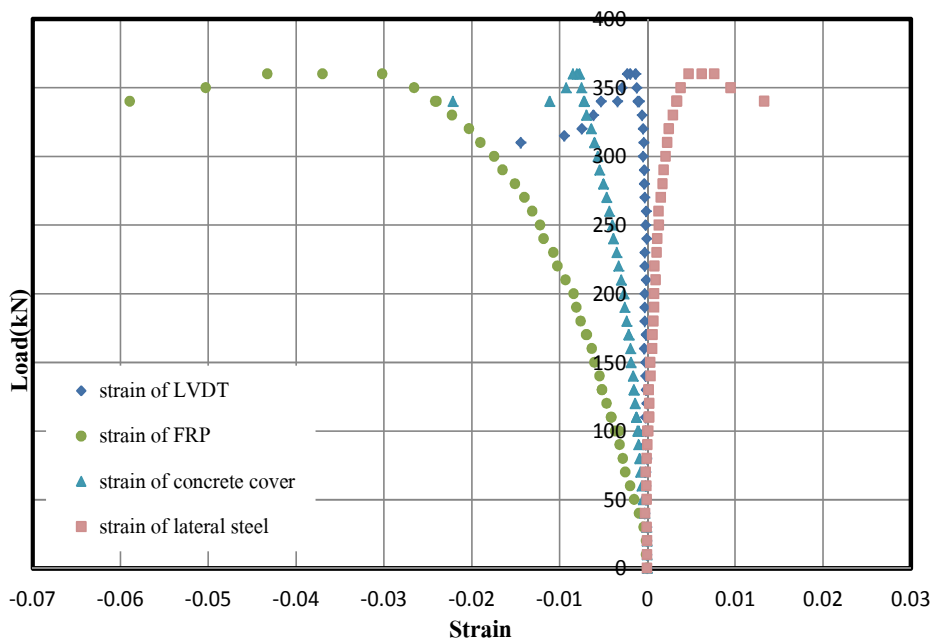
รูปที่ ก - 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 2-SFsc



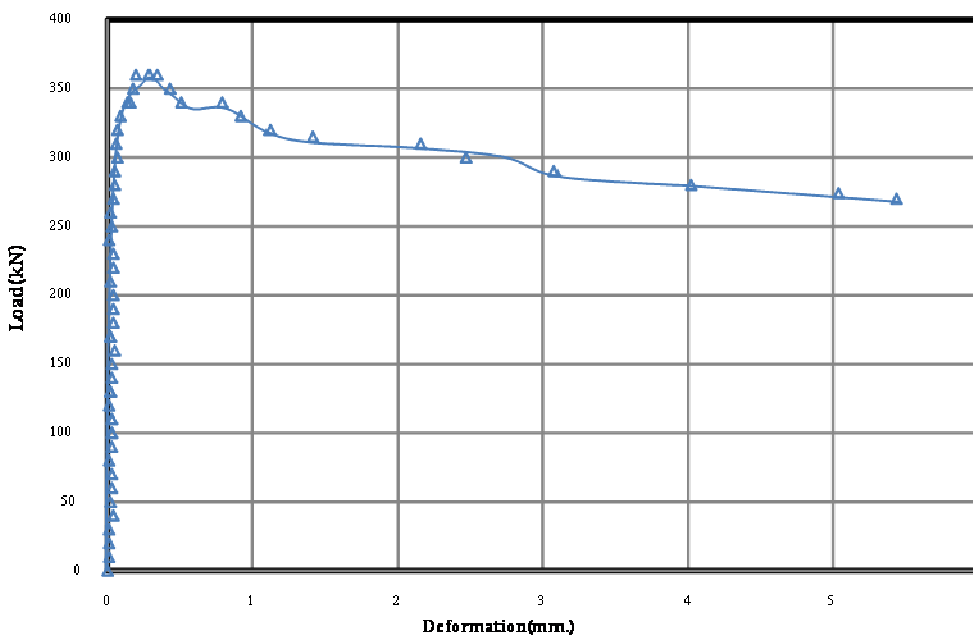
รูปที่ ก - 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 3-SFsc



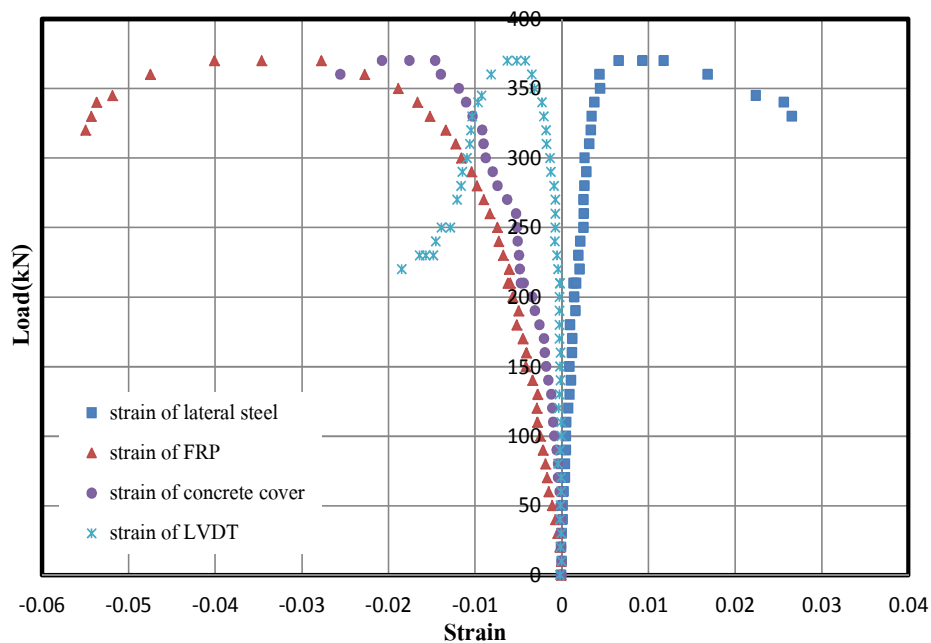
รูปที่ ก - 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 3-SFsc



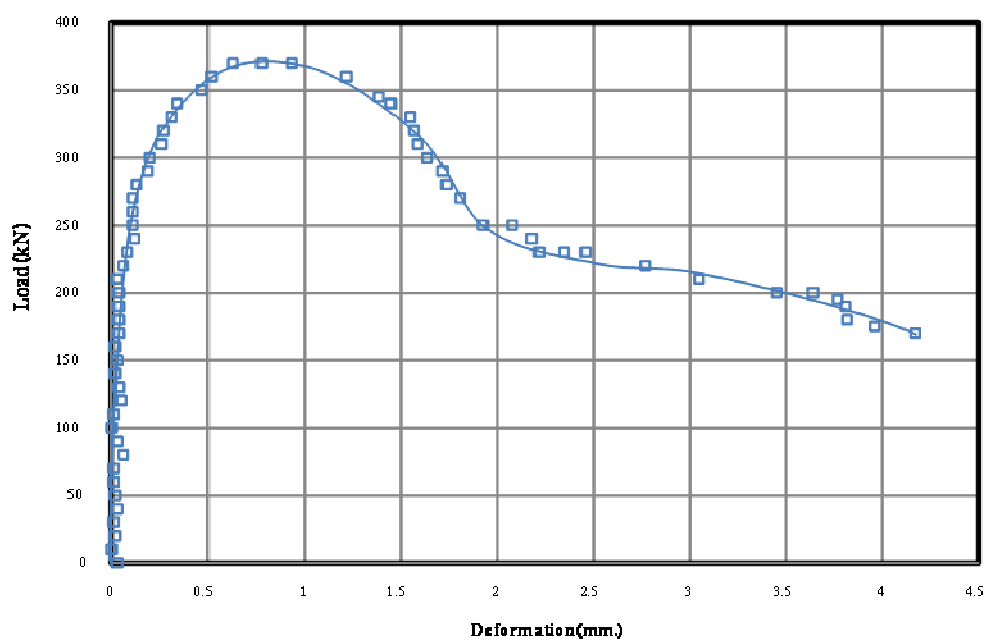
รูปที่ ก - 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 1-SFsn



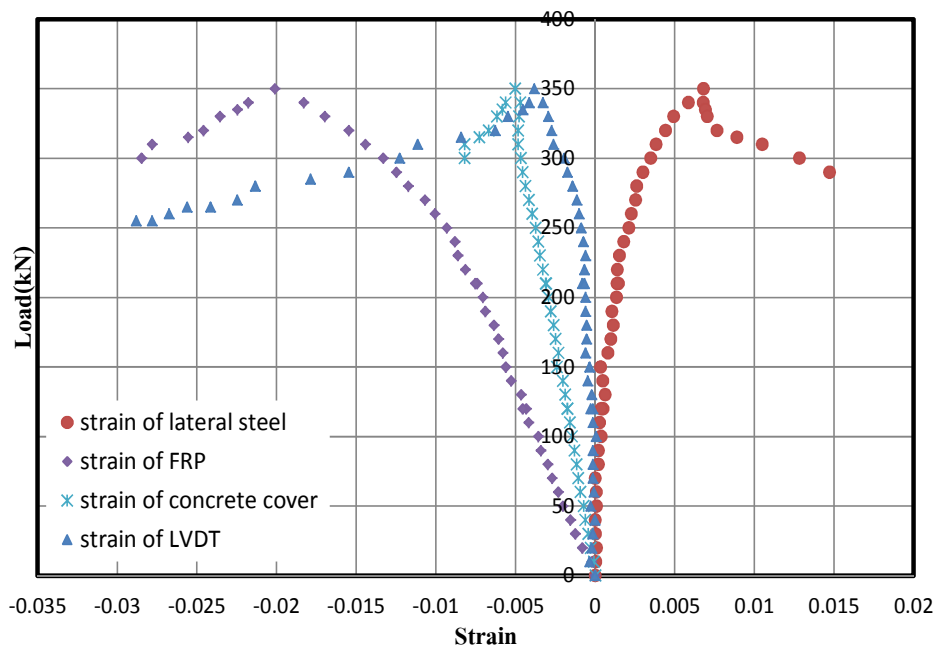
รูปที่ ก - 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปแปลงตามแนวแกนของเสา 1-SFsn



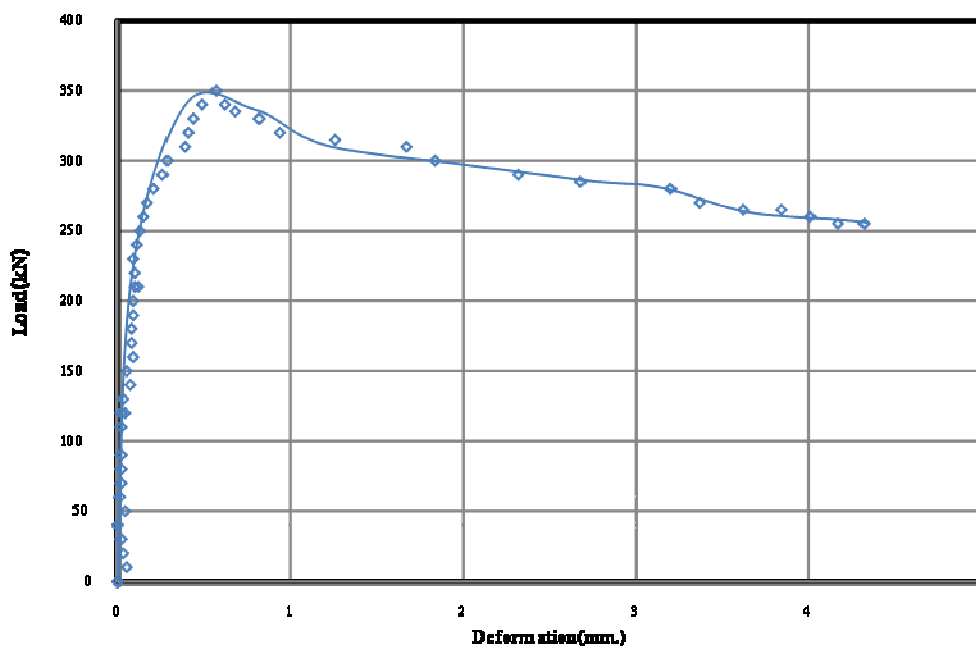
รูปที่ ก - 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 2-SFsn



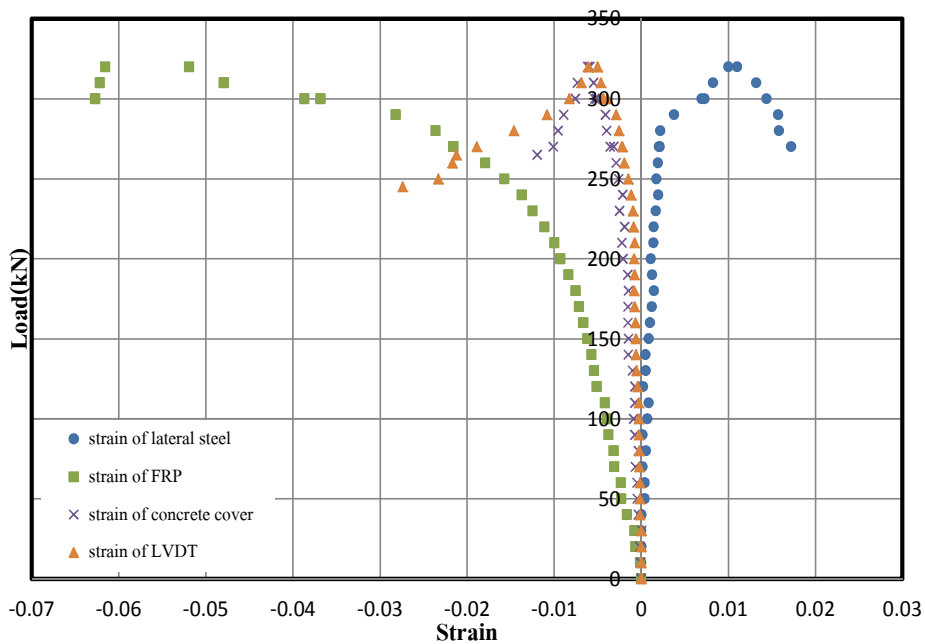
รูปที่ ก - 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 2-SFsn



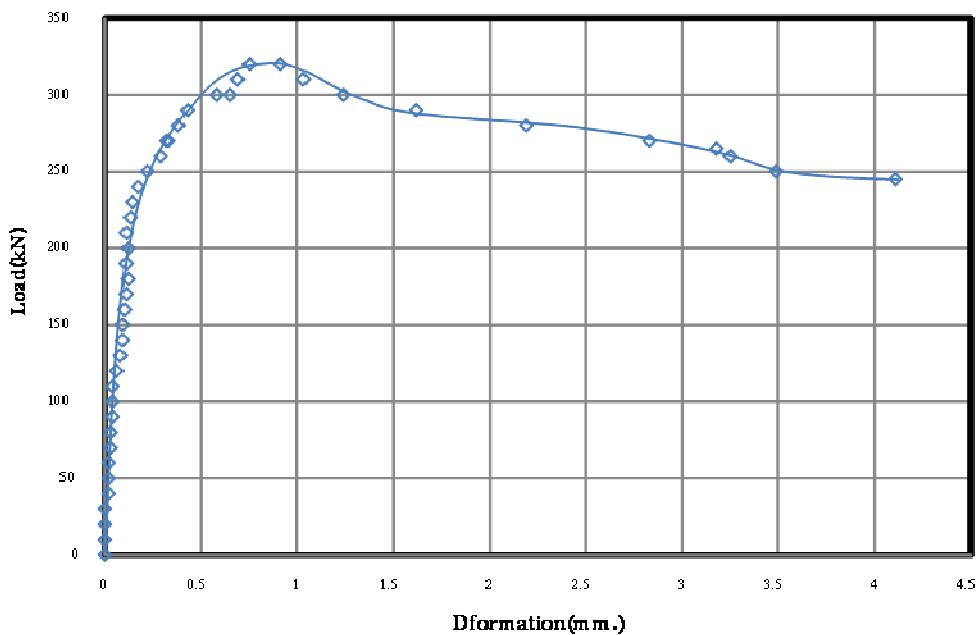
รูปที่ ก - 11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 3-SFsn



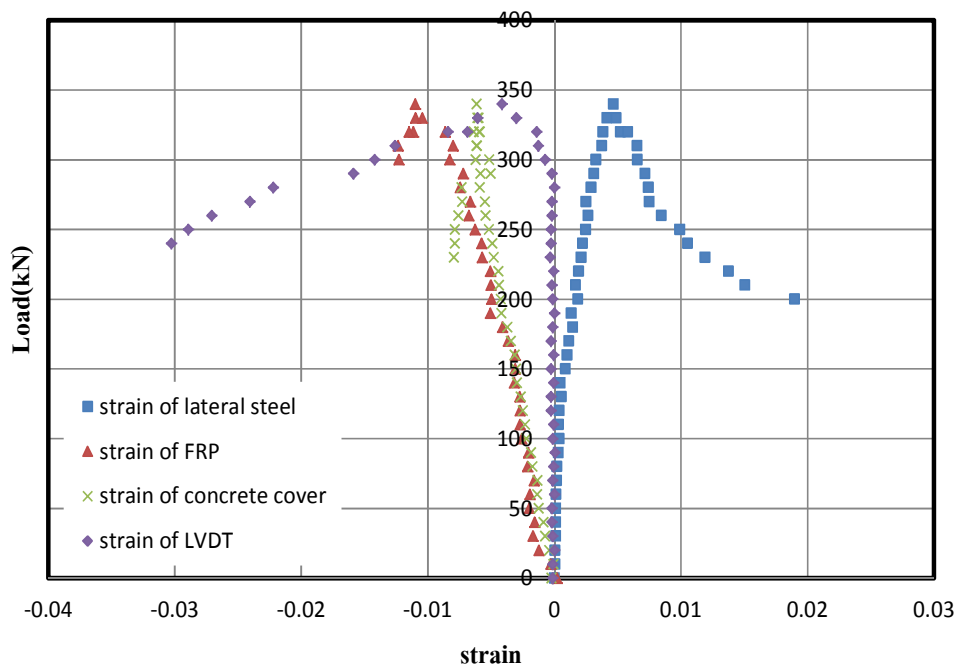
รูปที่ ก - 12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 3-SFsn



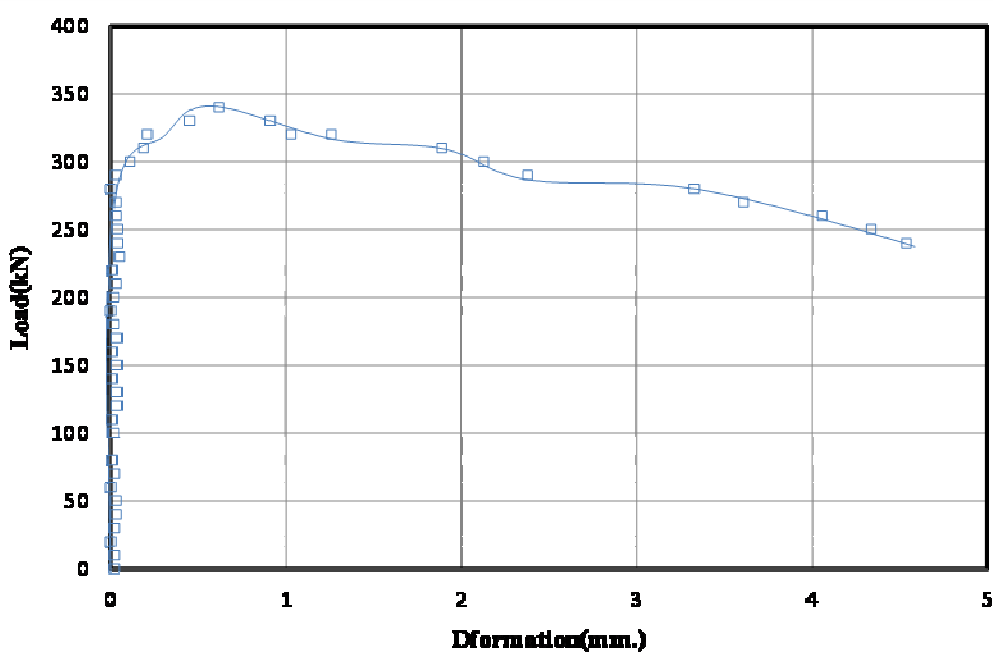
รูปที่ ก - 13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเส้า 1-CFsc



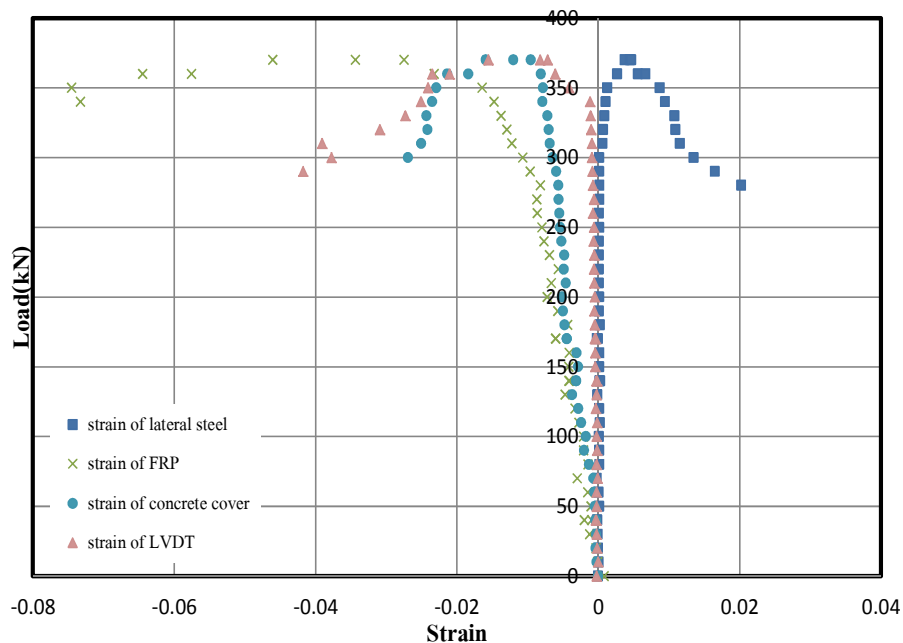
รูปที่ ก - 14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเส้า 1-CFsc



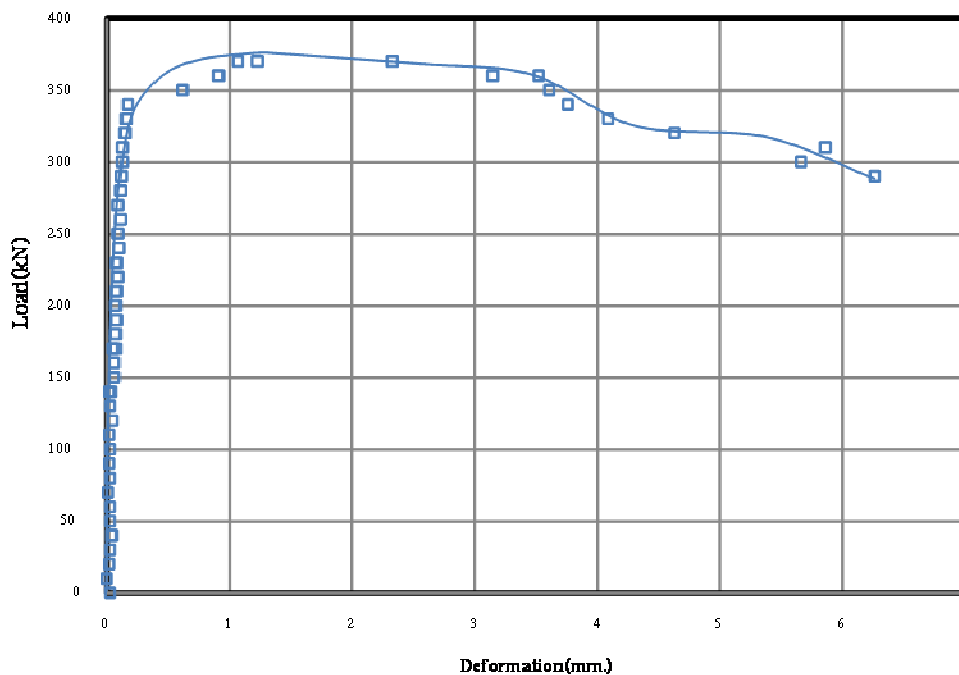
รูปที่ ก - 15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 2-CFsc



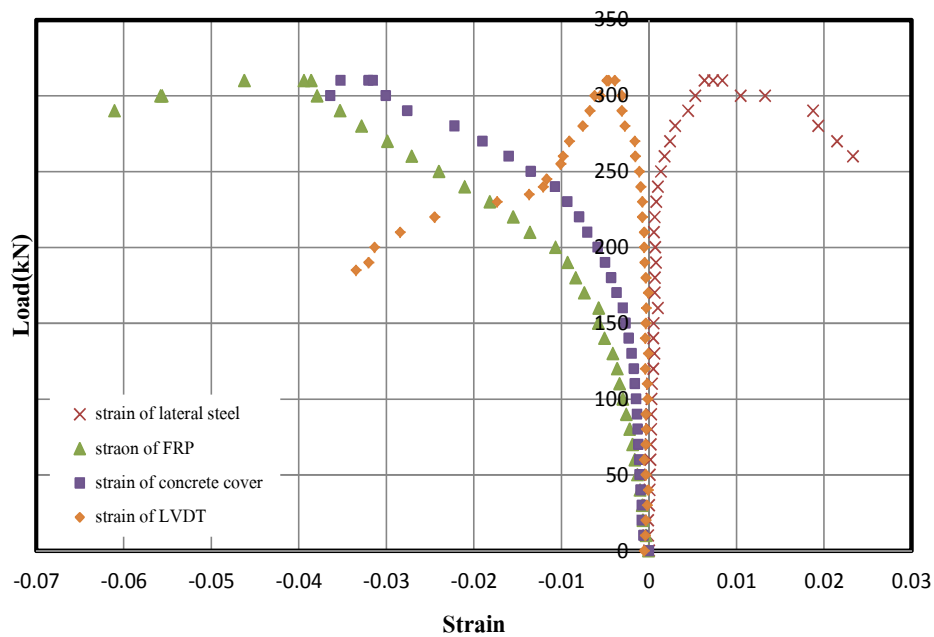
รูปที่ ก - 16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 2-CFsc



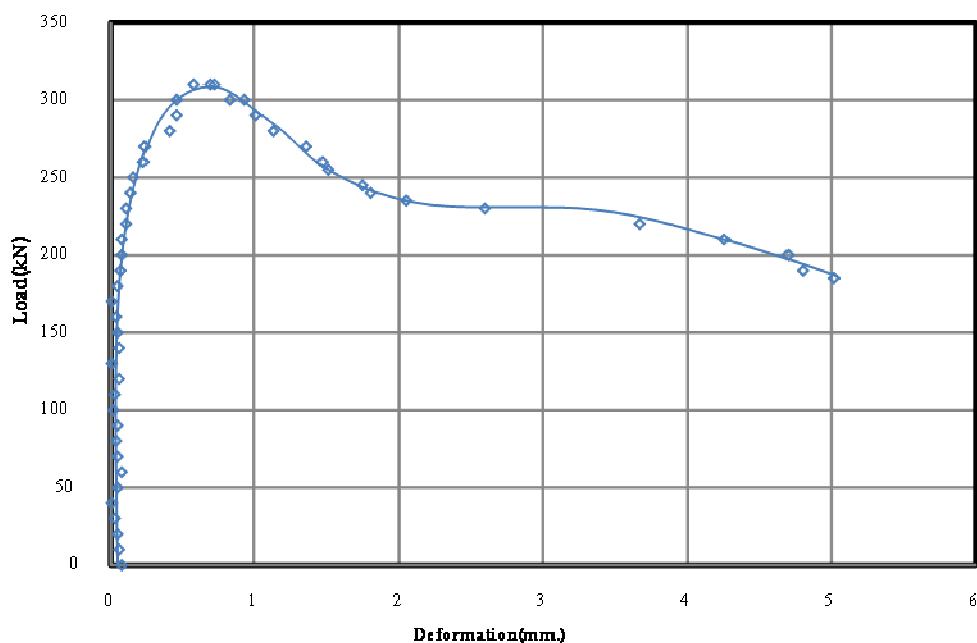
รูปที่ ก - 17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 3-CFsc



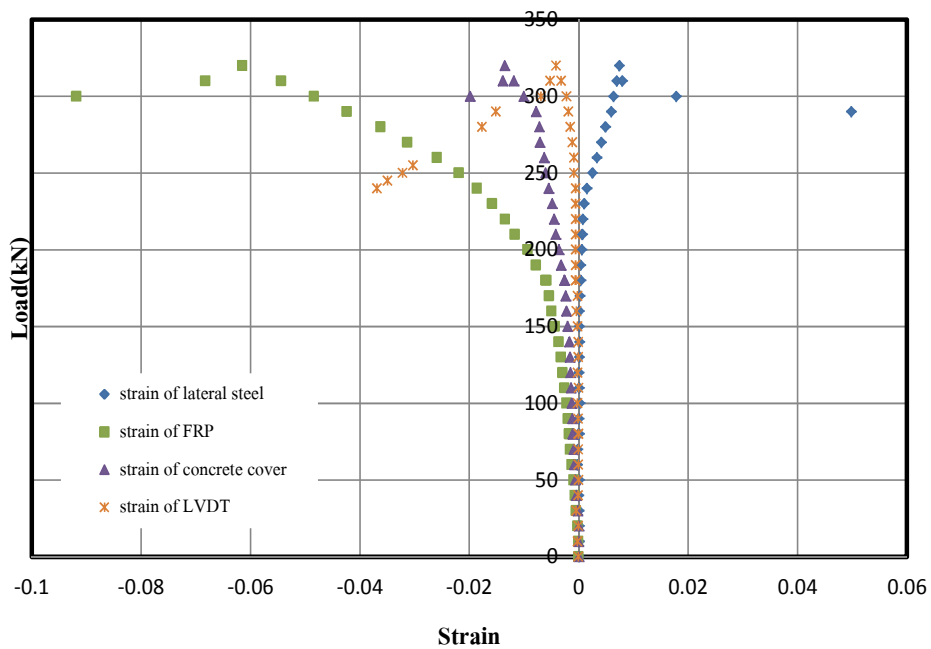
รูปที่ ก - 18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 3-CFsc



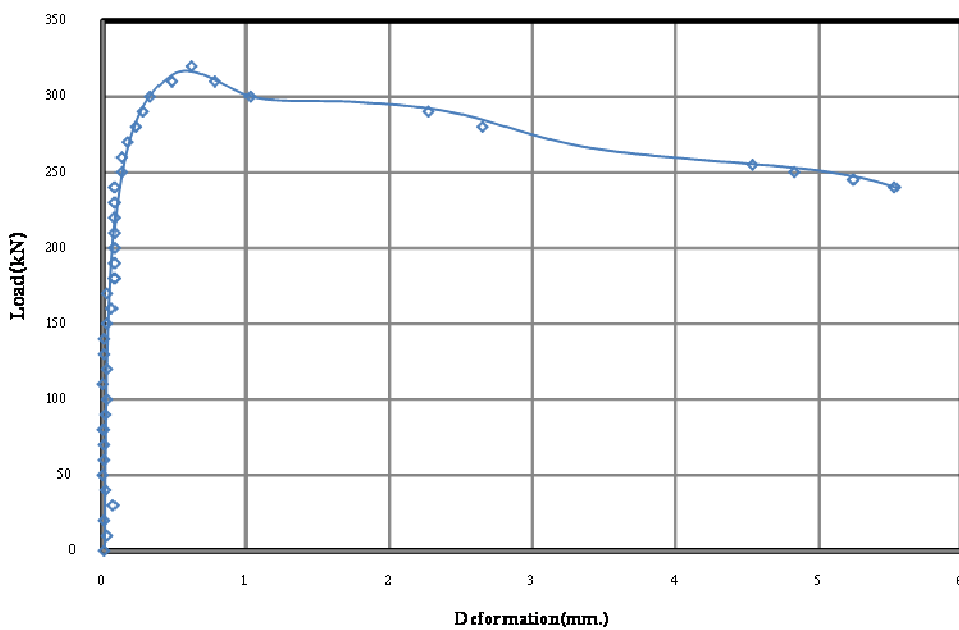
รูปที่ ก - 19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 1-CFsn



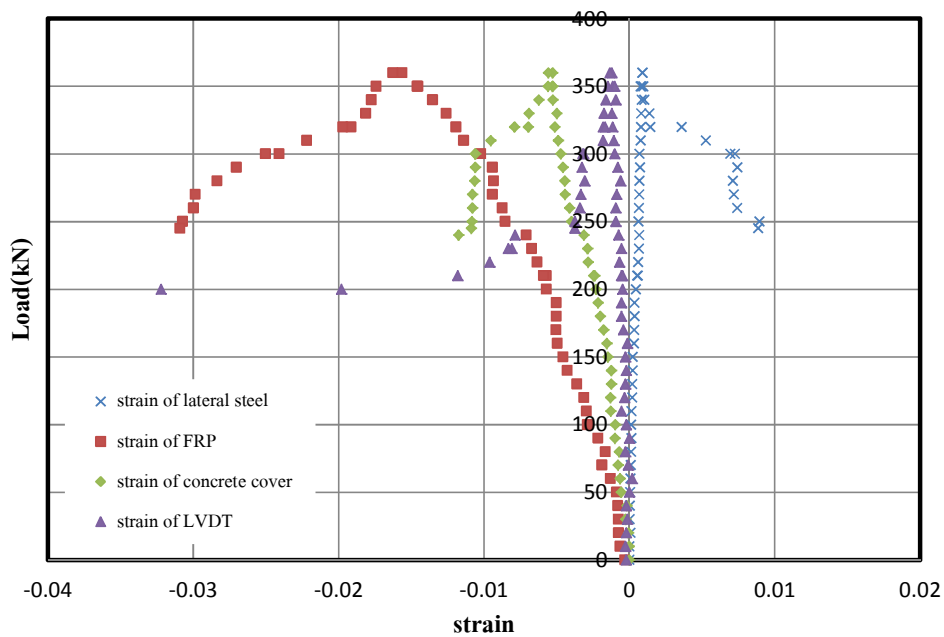
รูปที่ ก - 20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 1-CFsn



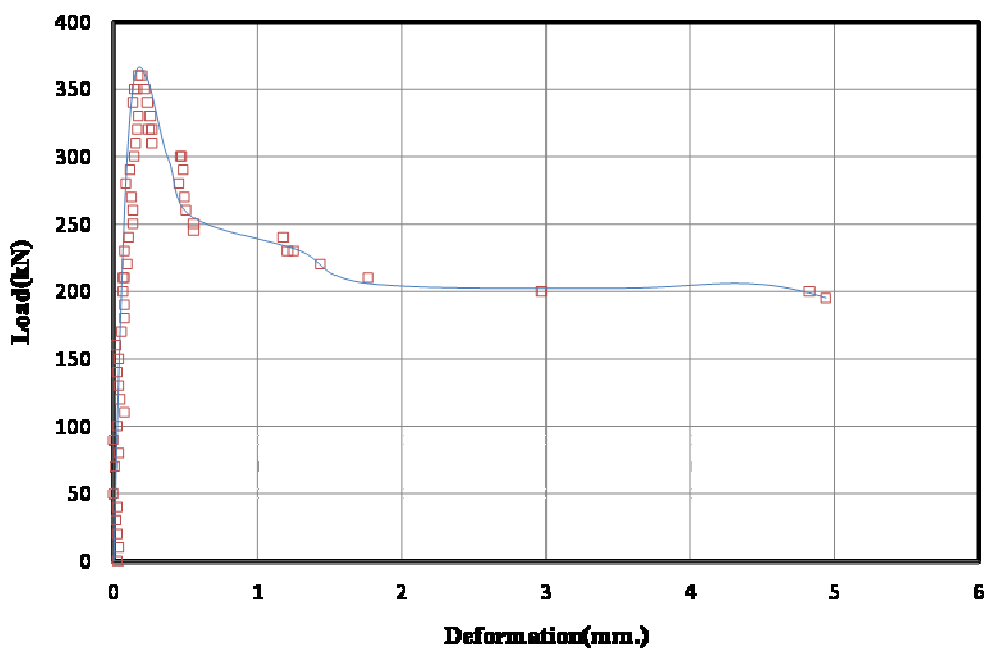
รูปที่ ก - 21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 3-CFsn



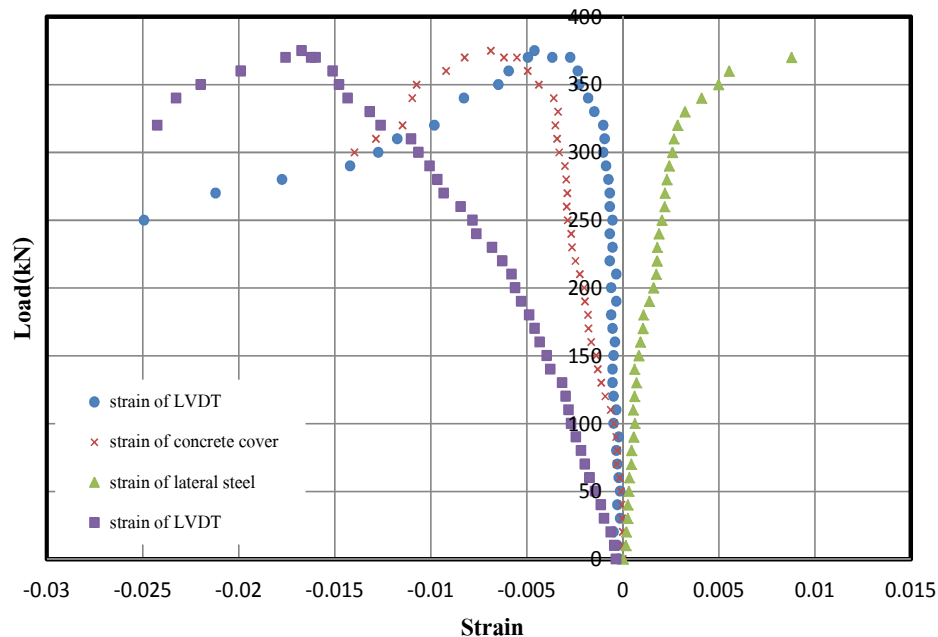
รูปที่ ก - 22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 3-CFsn



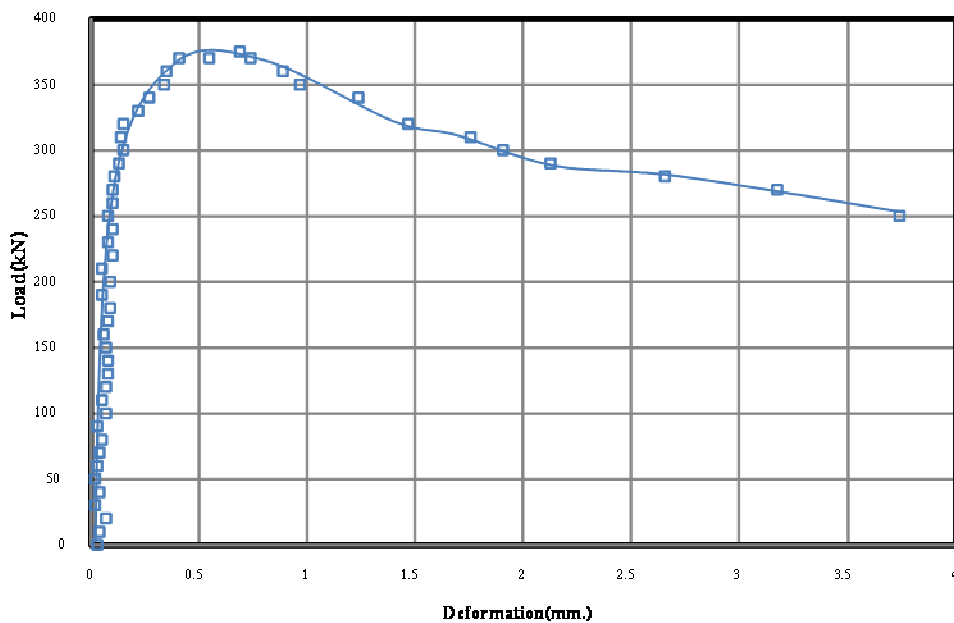
รูปที่ ก - 23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 1-SFtc



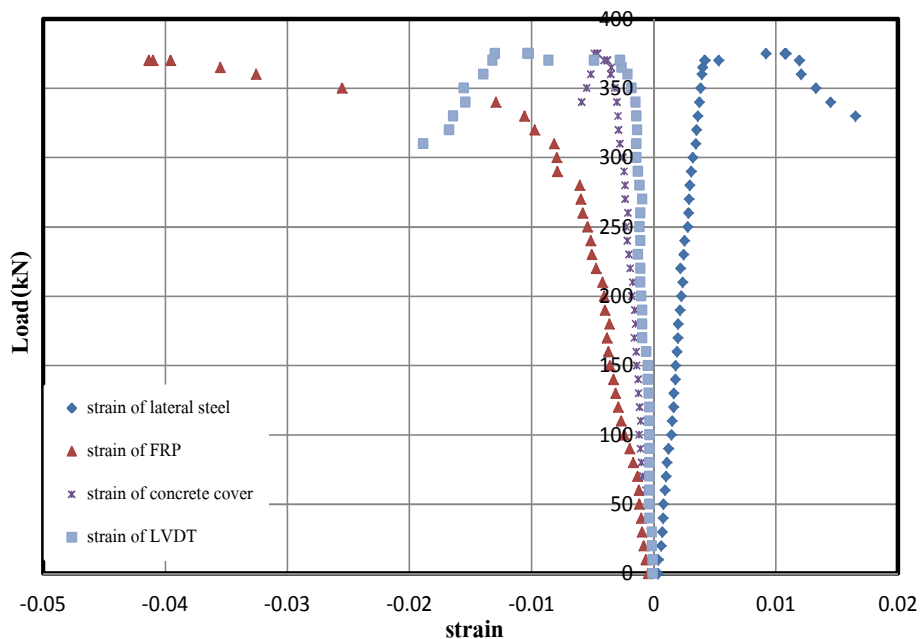
รูปที่ ก - 24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 1-SFtc



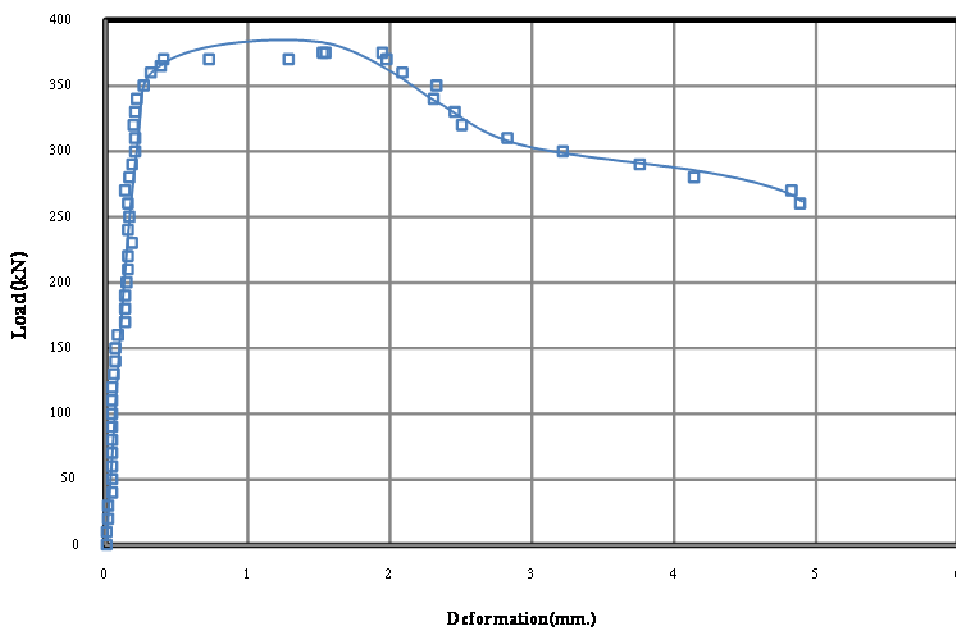
รูปที่ ก - 25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 2-SFtc



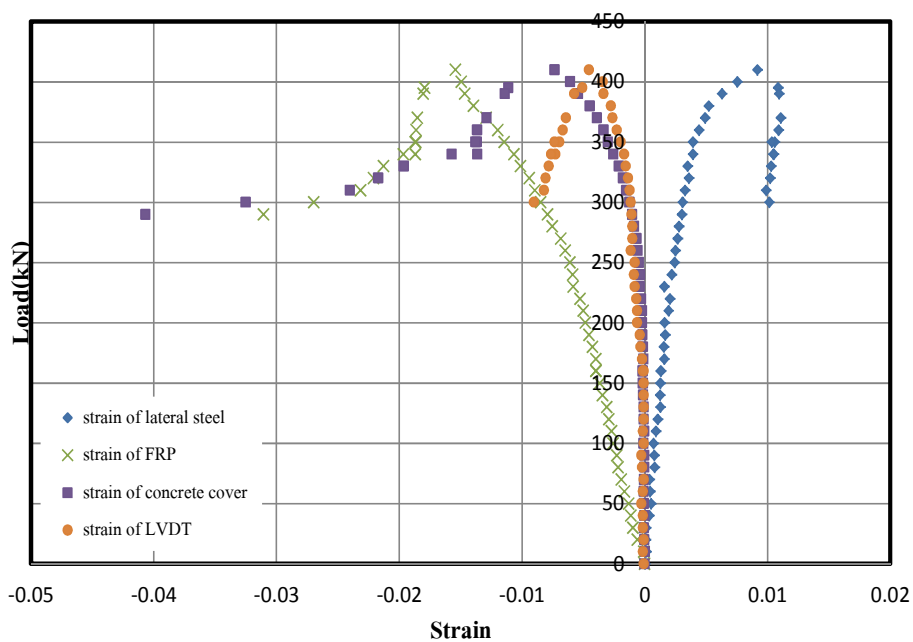
รูปที่ ก - 26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 2-SFtc



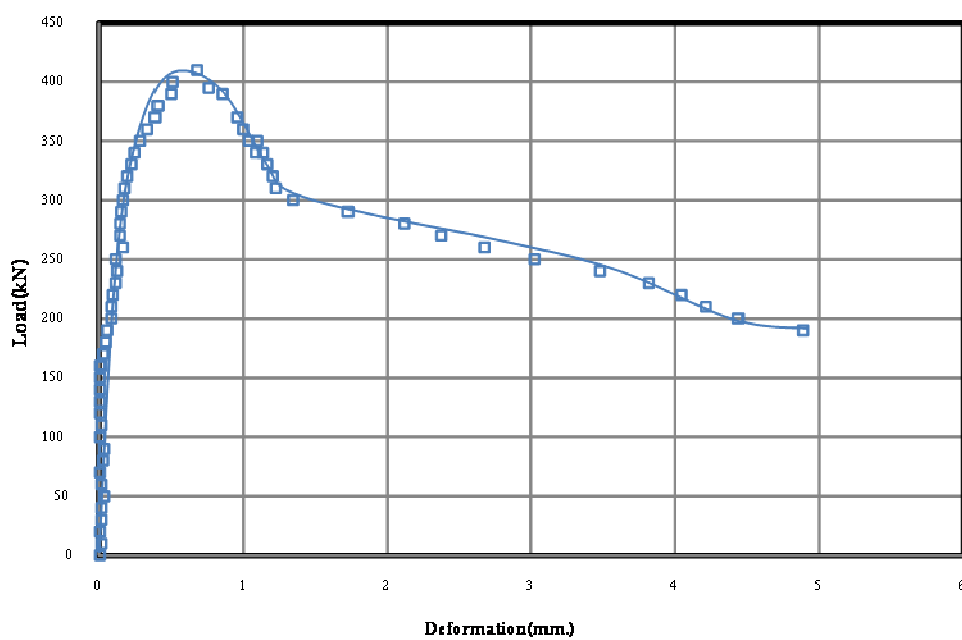
รูปที่ ก - 27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 3-SFtc



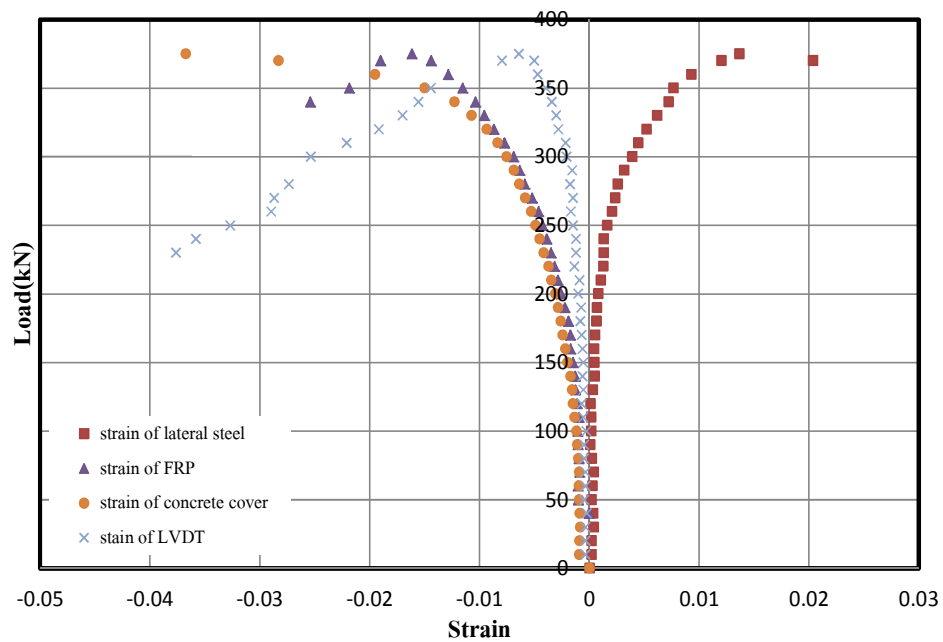
รูปที่ ก - 28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 3-SFtc



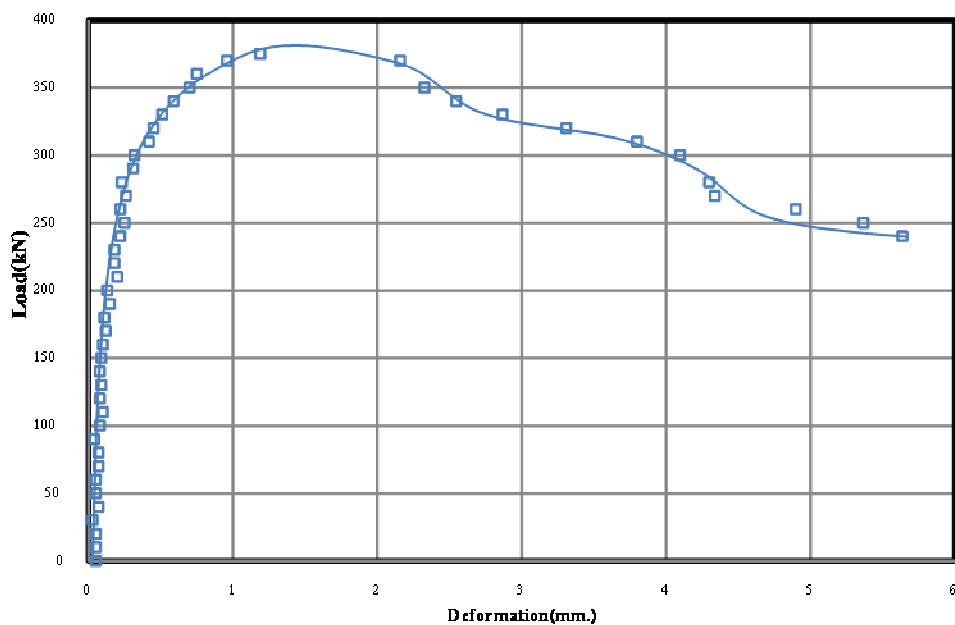
รูปที่ ก - 29 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 1-SFtn



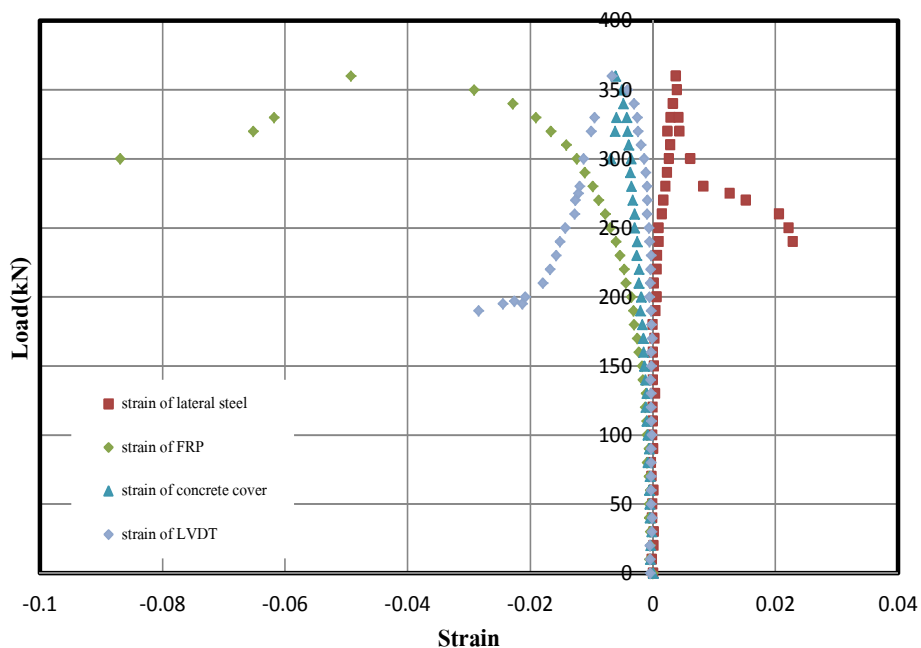
รูปที่ ก - 30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 1-SFtn



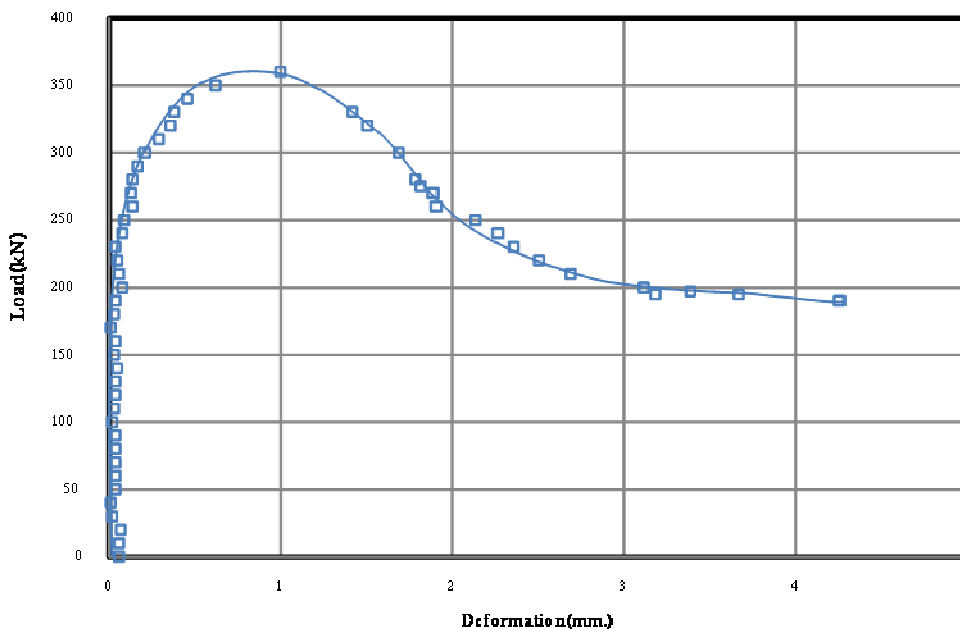
รูปที่ ก - 31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 2-SFtn



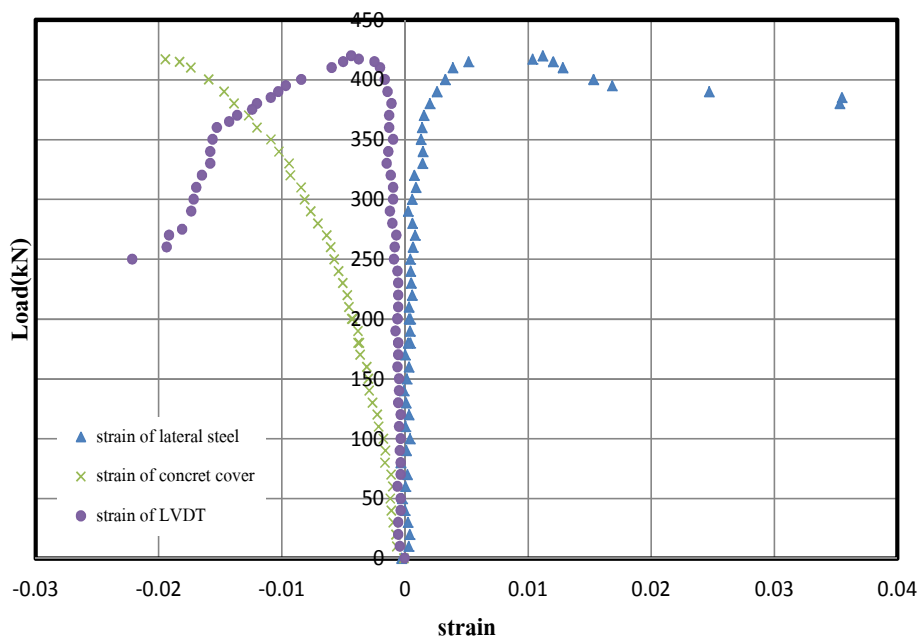
รูปที่ ก - 32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 2-SFtn



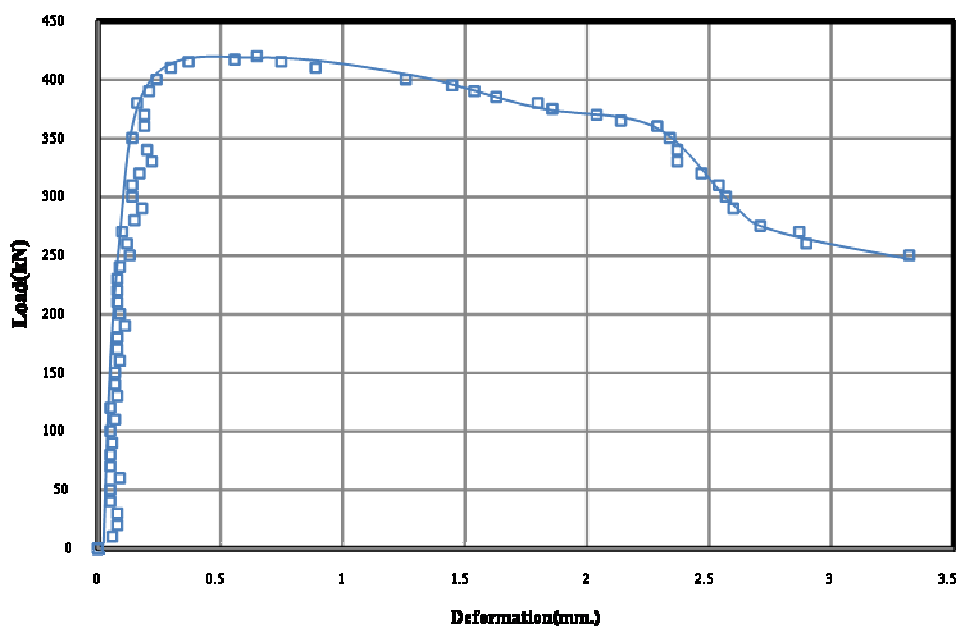
รูปที่ ก - 33 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 3-SFtn



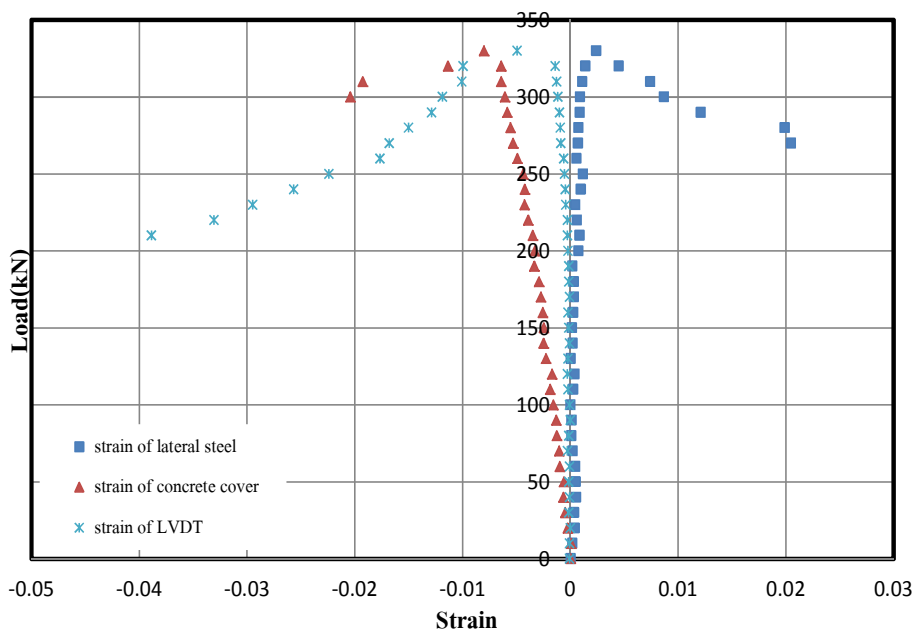
รูปที่ ก - 34 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 3-SFtn



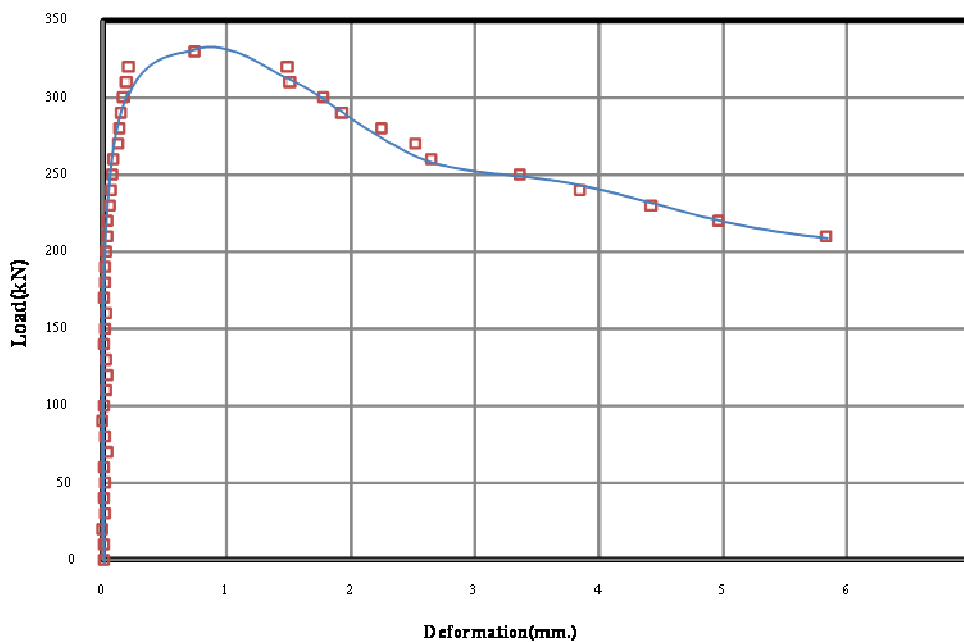
รูปที่ ก - 35 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 1-SNsc



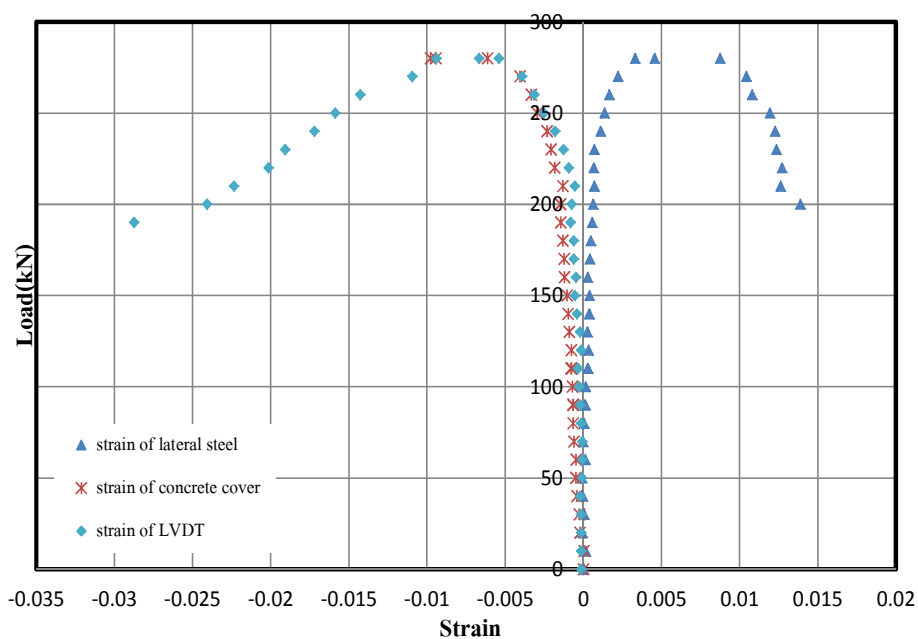
รูปที่ ก - 36 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 1-SNsc



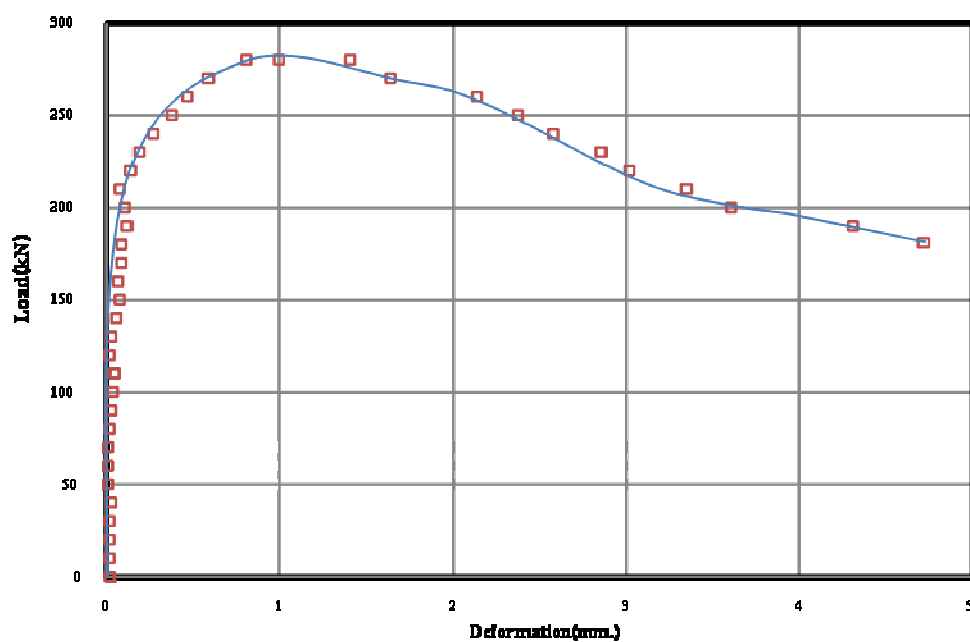
รูปที่ ก - 37 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 2-SNsc



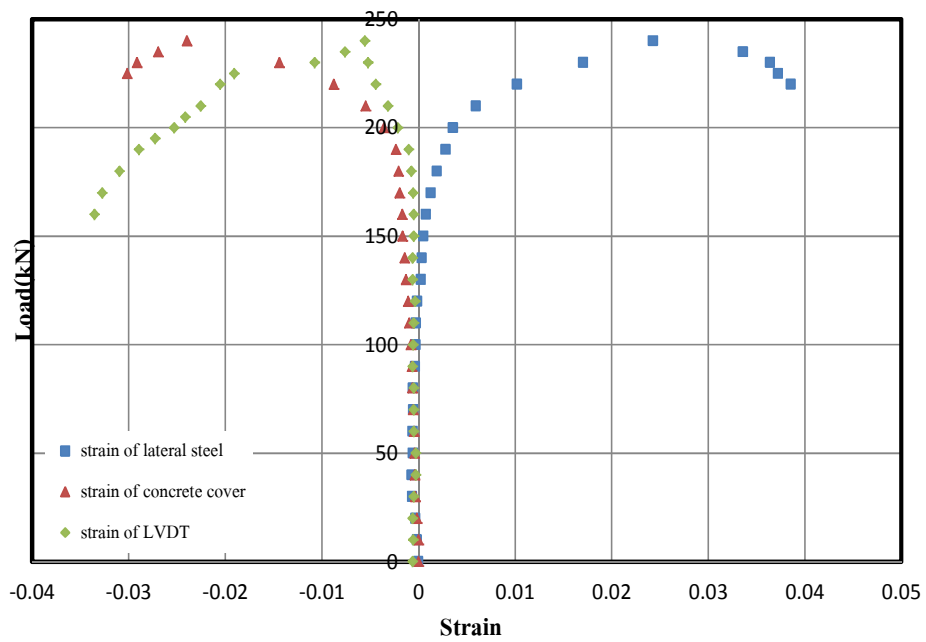
รูปที่ ก - 38 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 2-SNsc



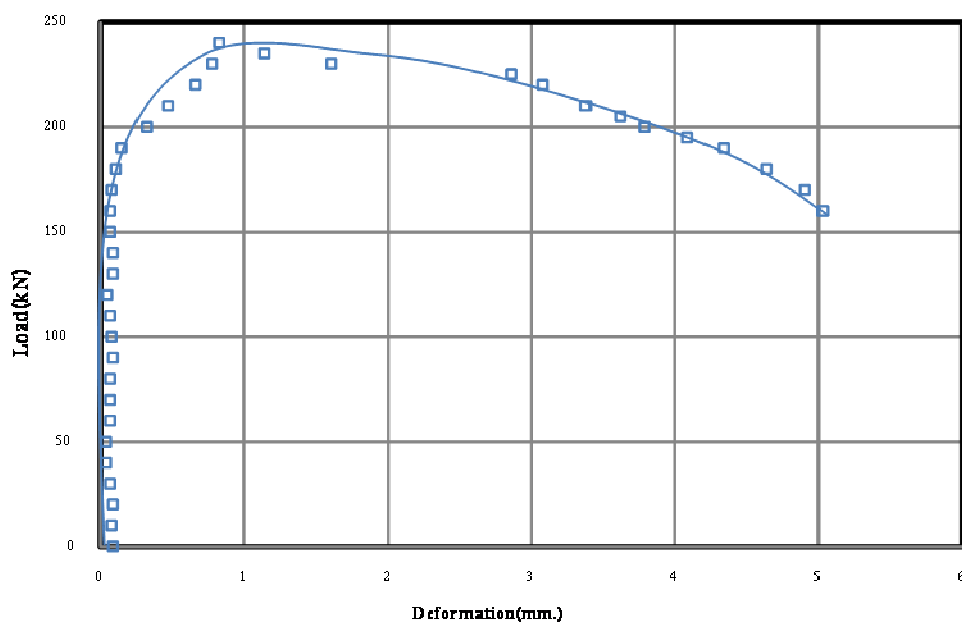
รูปที่ ก - 39 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 3-SNsc



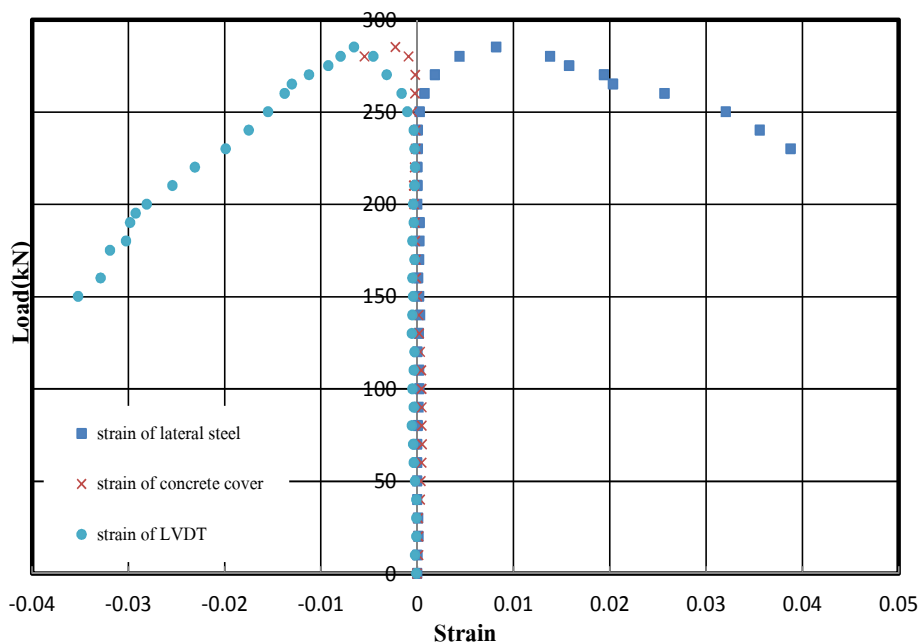
รูปที่ ก - 40 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 3-SNsc



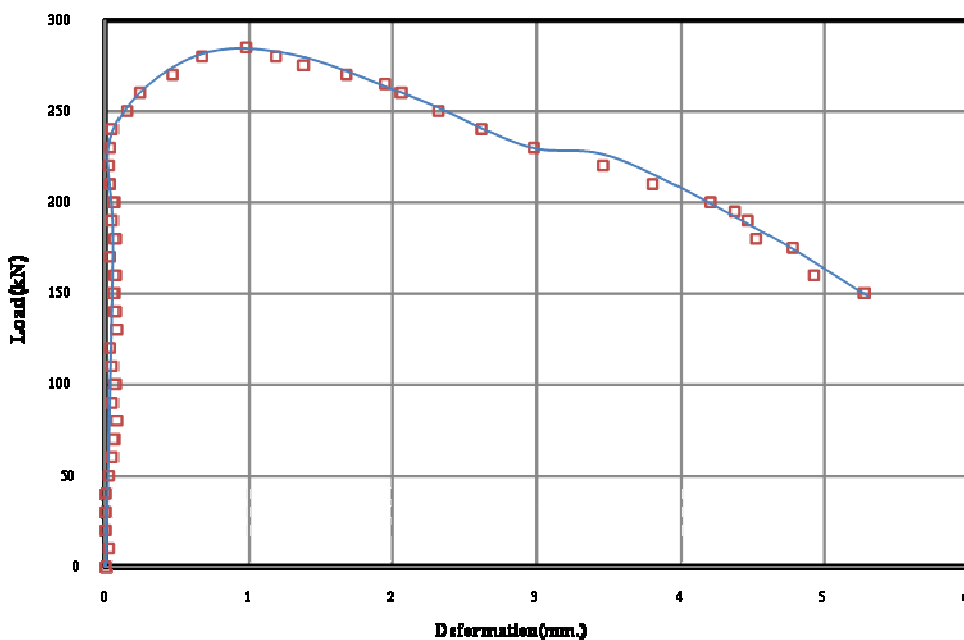
รูปที่ ก - 41 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 1-SNsn



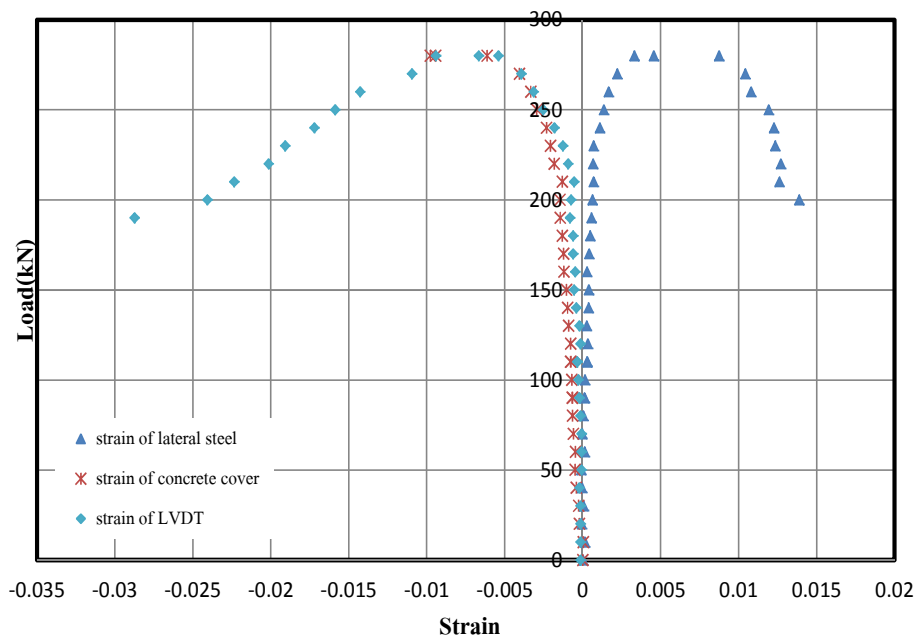
รูปที่ ก - 42 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 1-SNsn



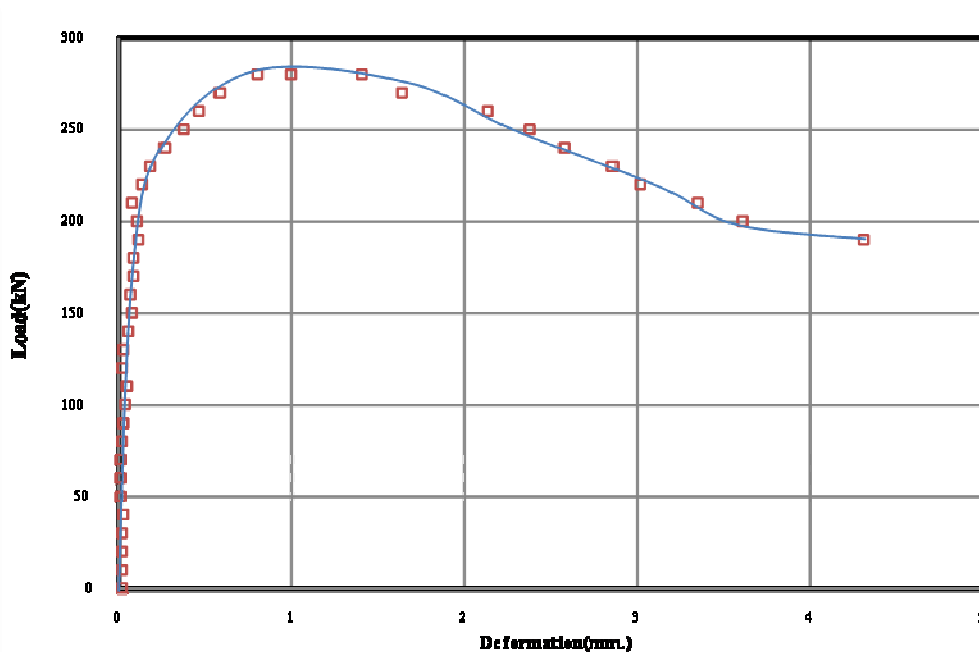
รูปที่ ก - 43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 2-SNsn



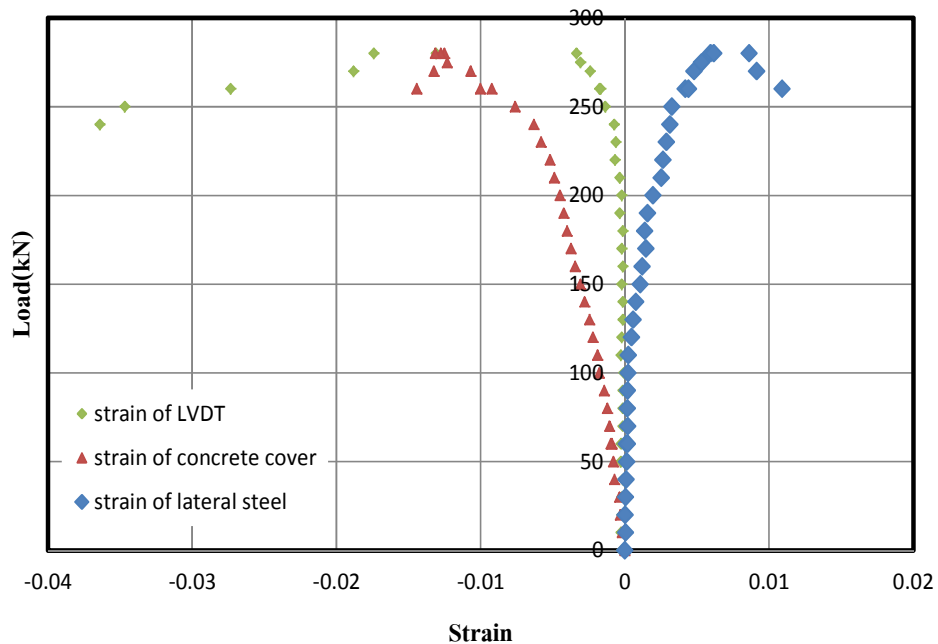
รูปที่ ก - 44 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 2-SNsn



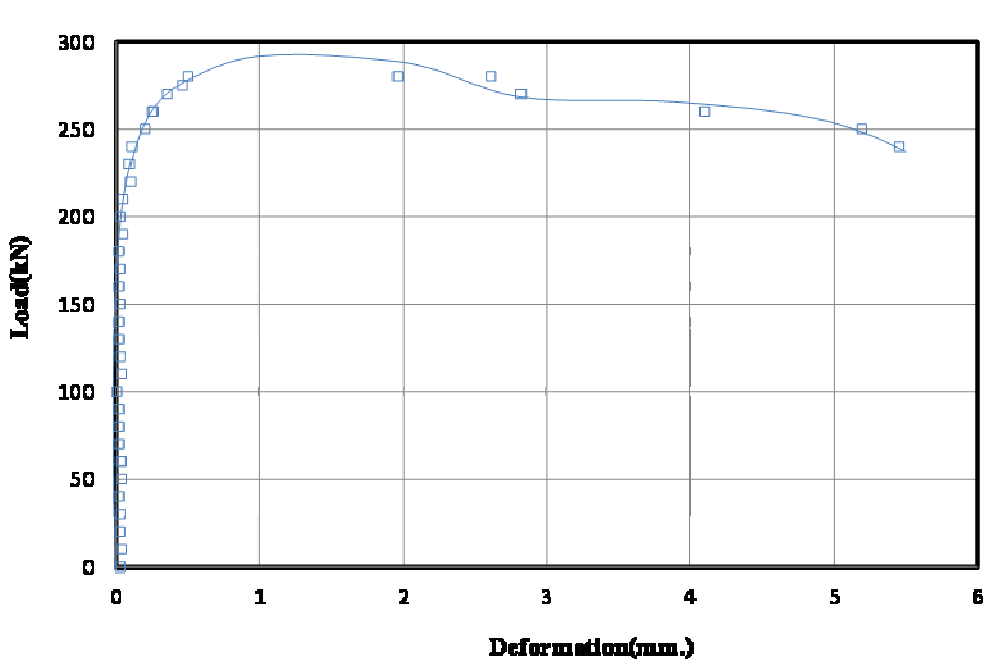
รูปที่ ก - 45 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 3-SNsn



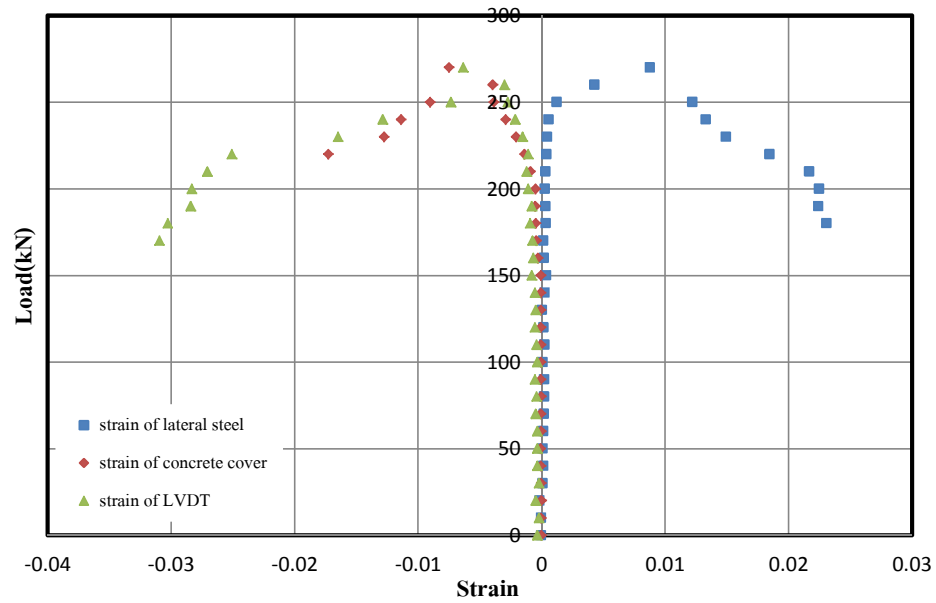
รูปที่ ก - 46 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 3-SNsn



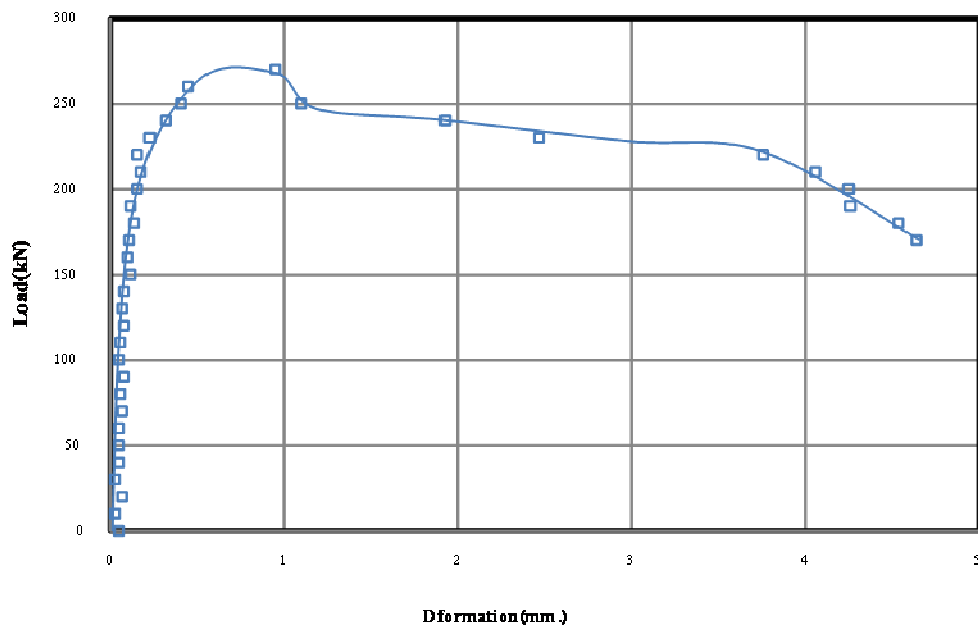
รูปที่ ก - 47 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 1-CNsc



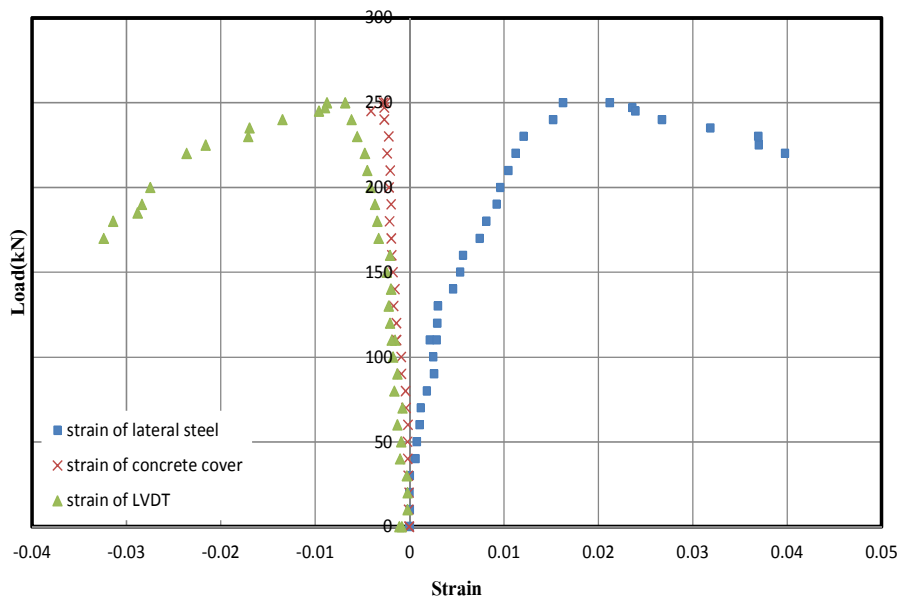
รูปที่ ก - 48 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 1-CNsc



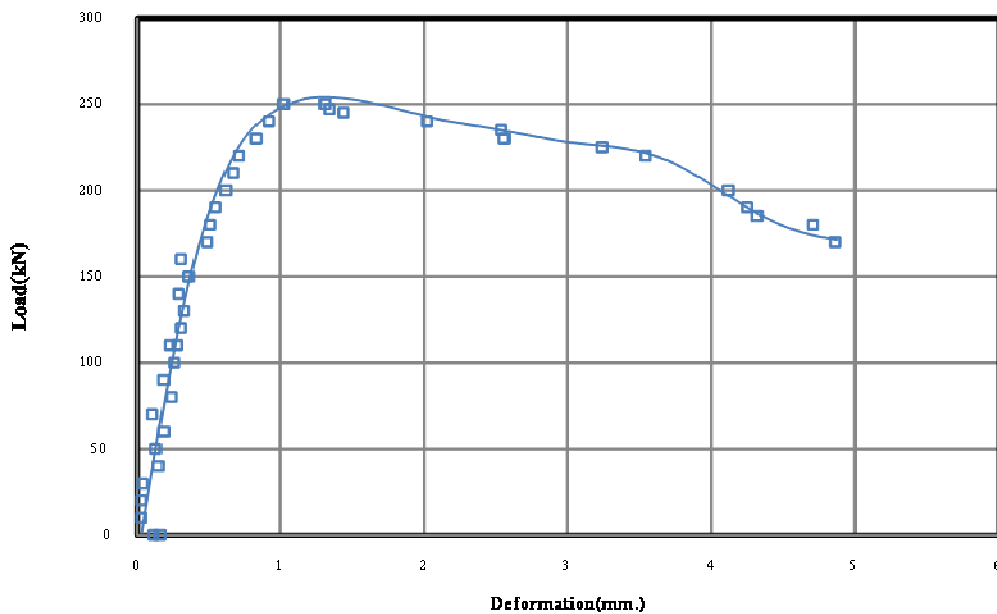
รูปที่ ก - 49 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 2-CNsc



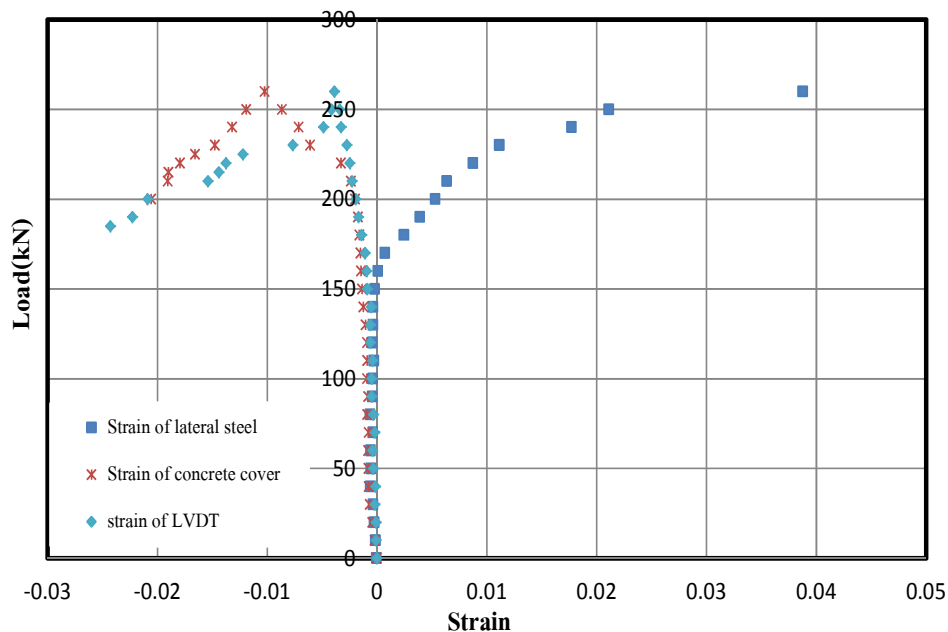
รูปที่ ก - 50 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 2-CNsc



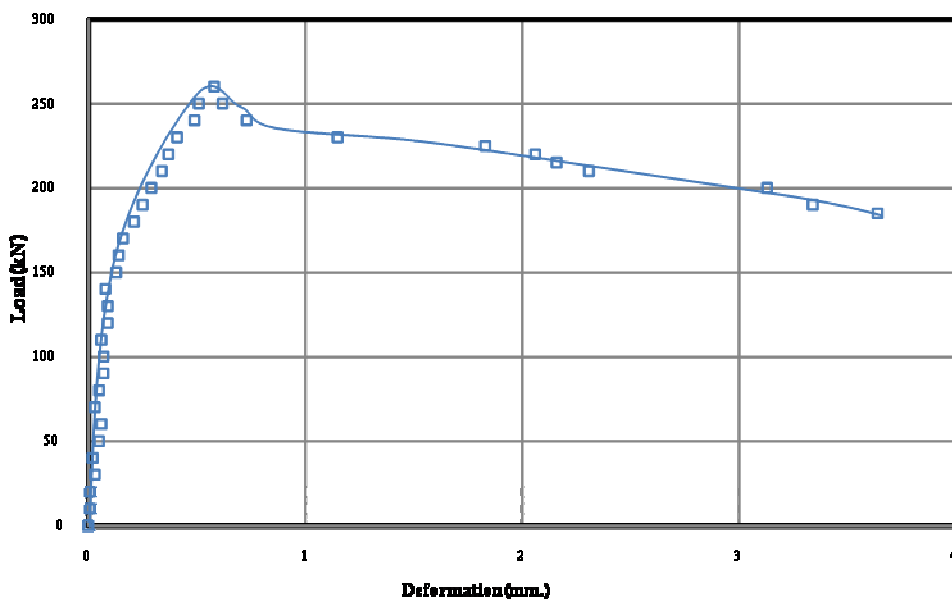
รูปที่ ก - 51 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 3-CNsc



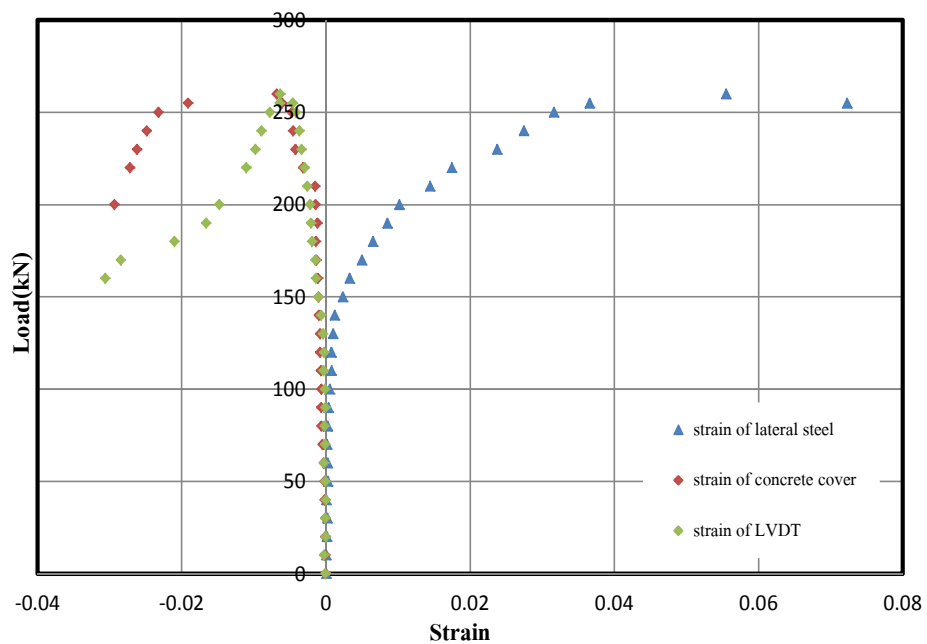
รูปที่ ก - 52 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 3-CNsc



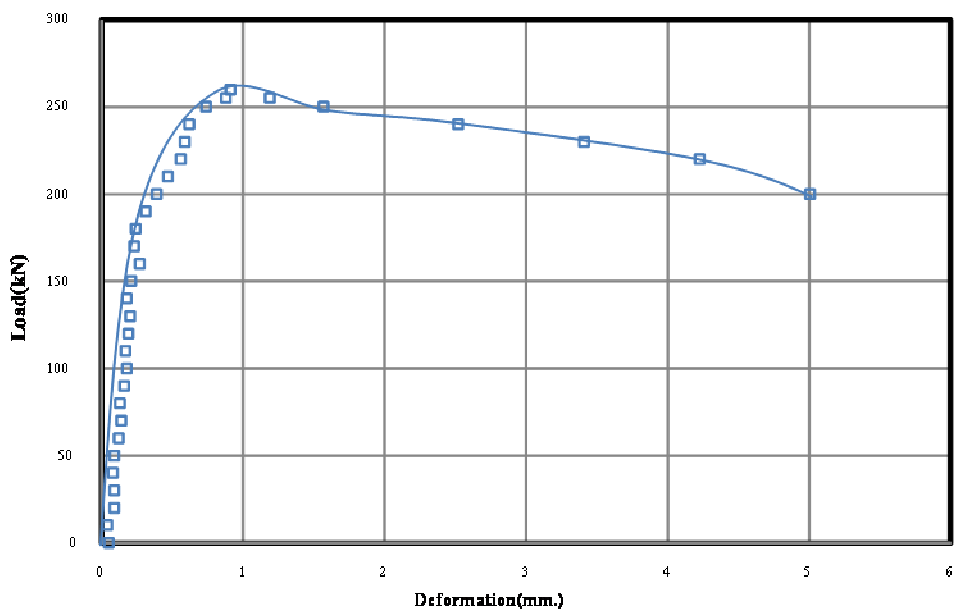
รูปที่ ก - 53 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 2-CNsn



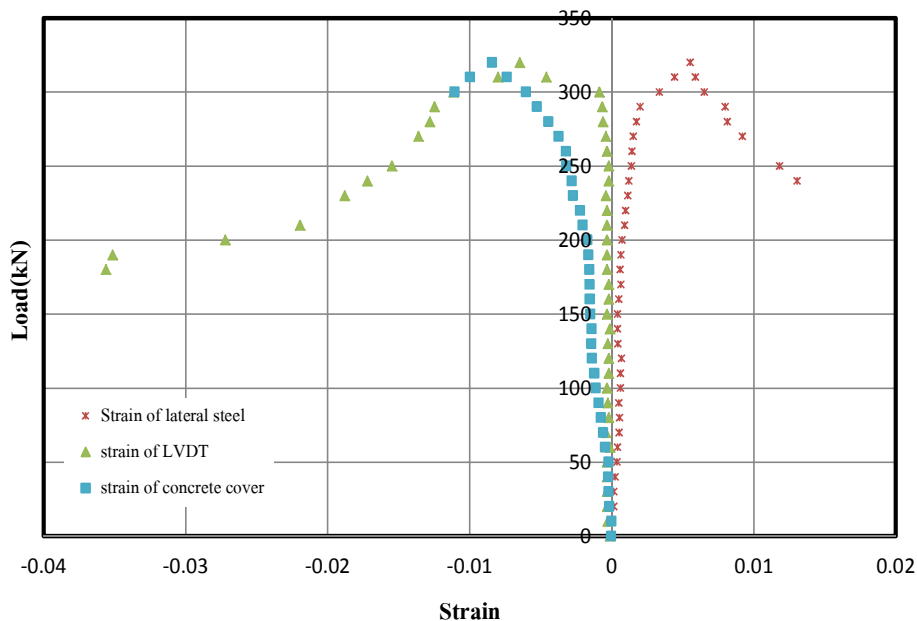
รูปที่ ก - 54 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 2-CNsn



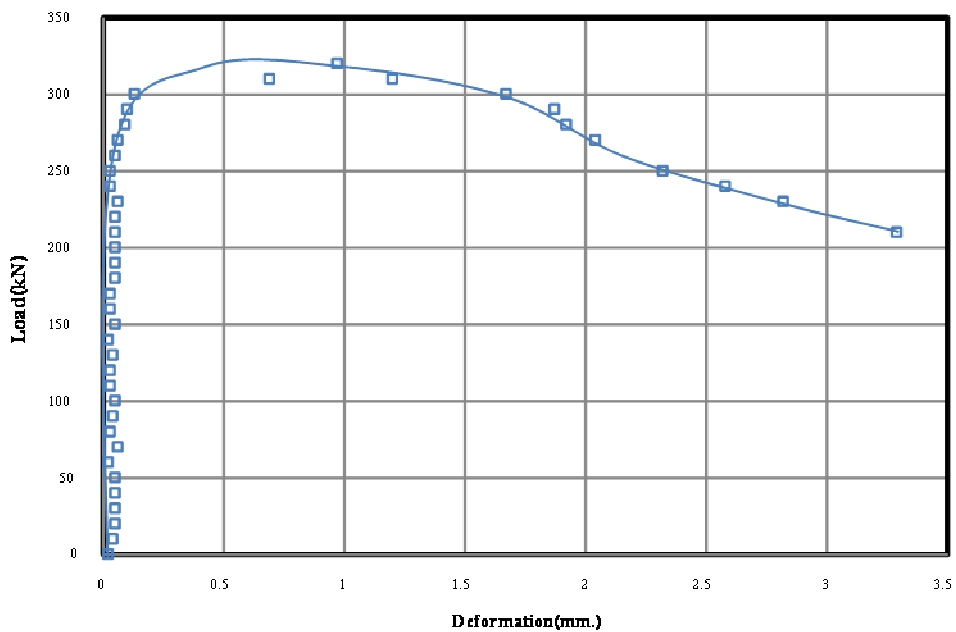
รูปที่ ก - 55 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 3-CNsn



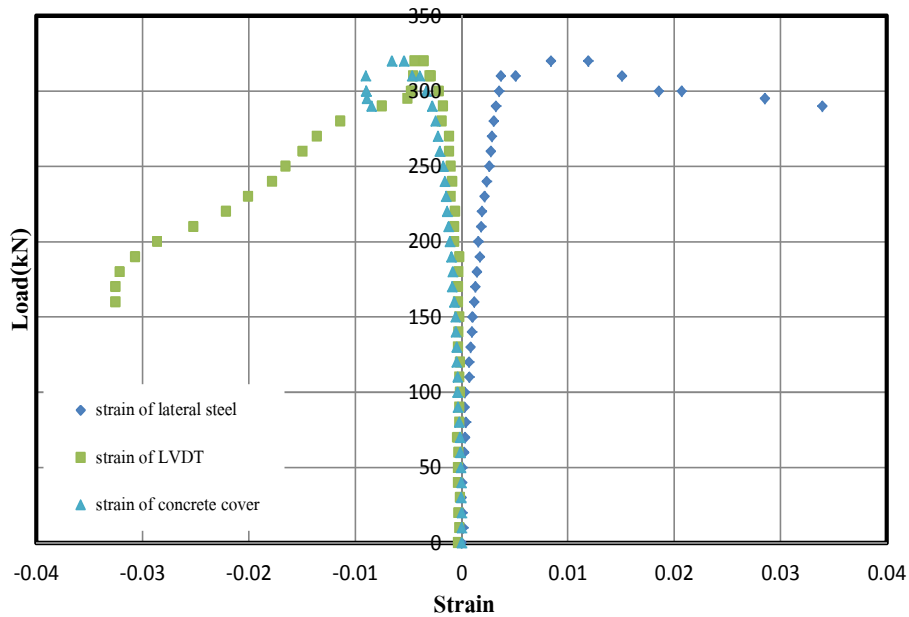
รูปที่ ก - 56 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 3-CNsn



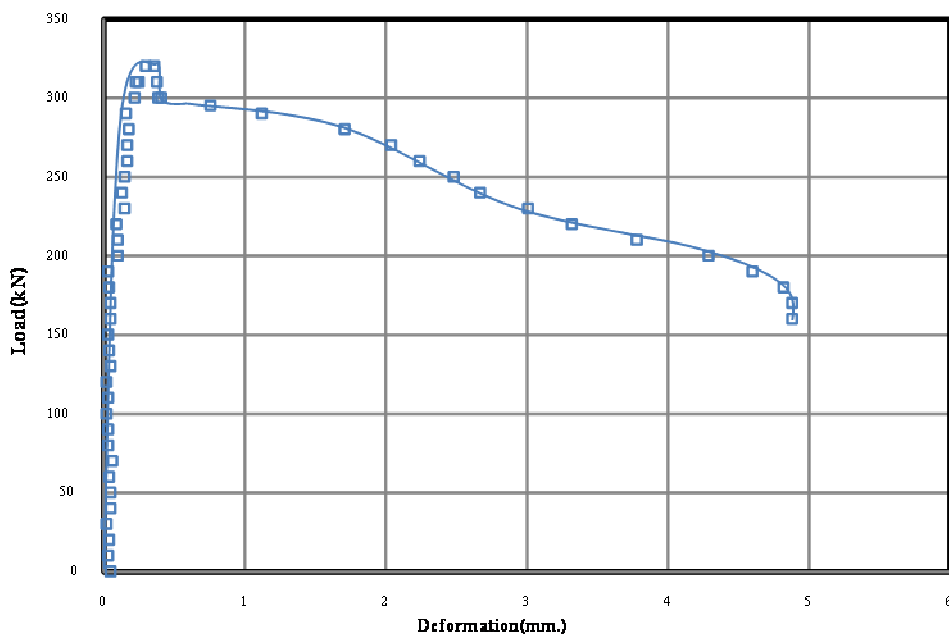
รูปที่ ก - 57 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 1-SNtc



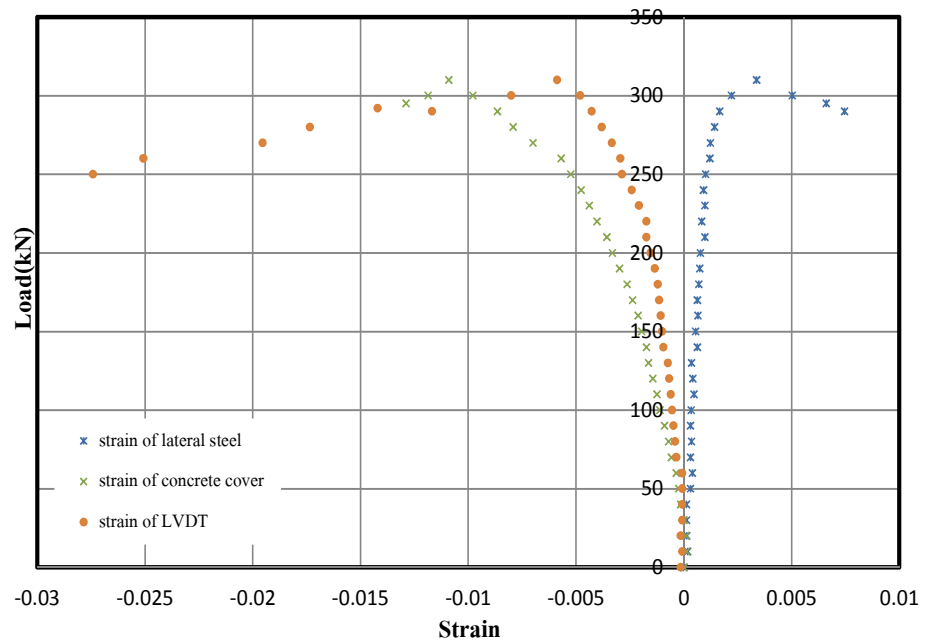
รูปที่ ก - 58 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 1-SNtc



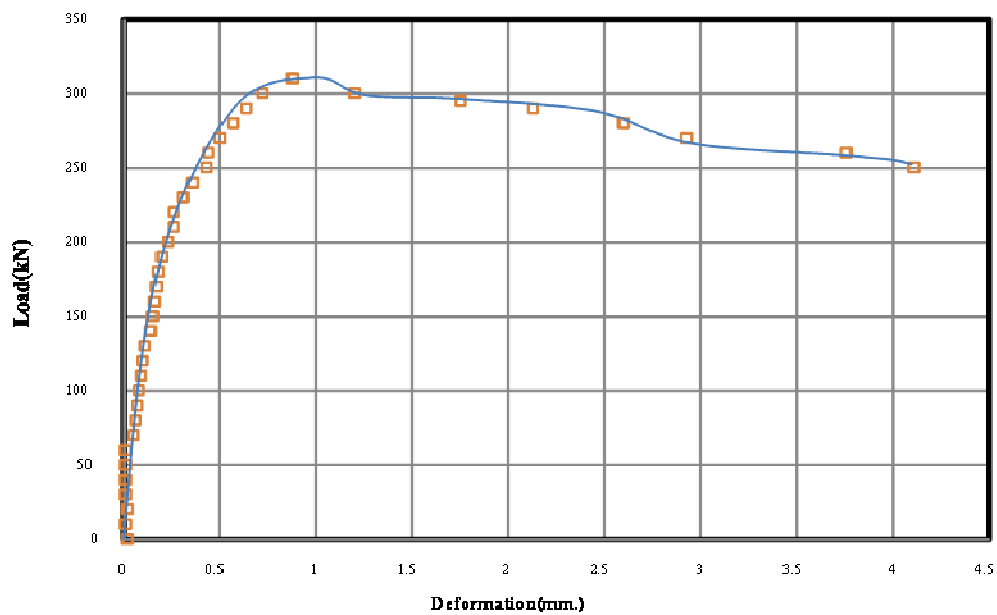
รูปที่ ก - 59 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 2-SNtc



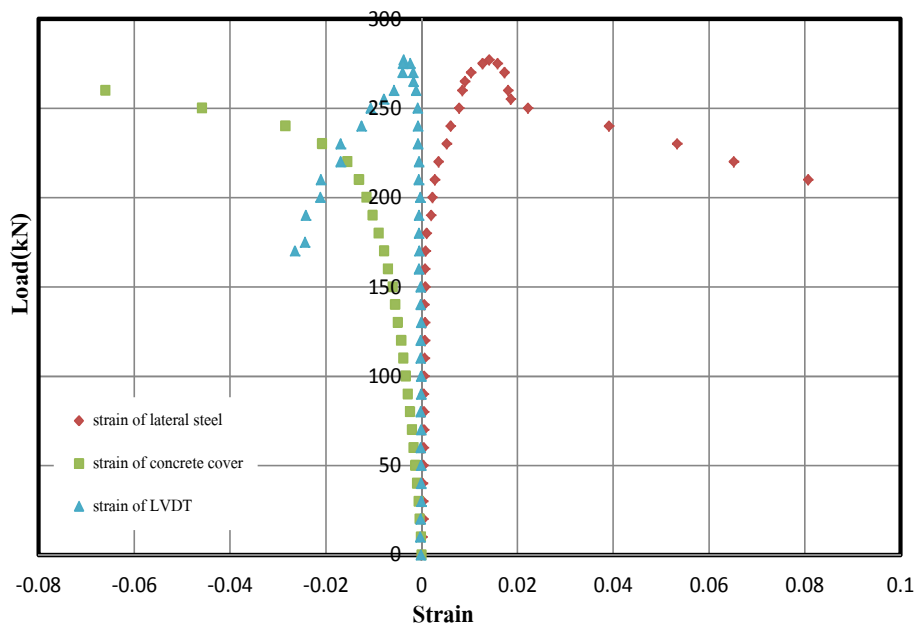
รูปที่ ก - 60 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 2-SNtc



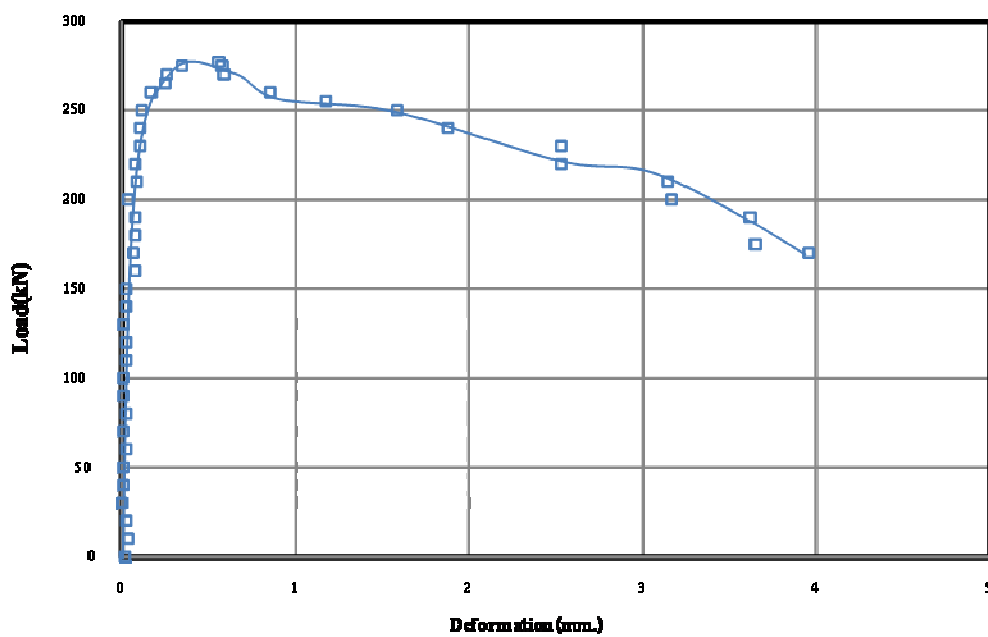
รูปที่ ก - 61 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 3-SNtc



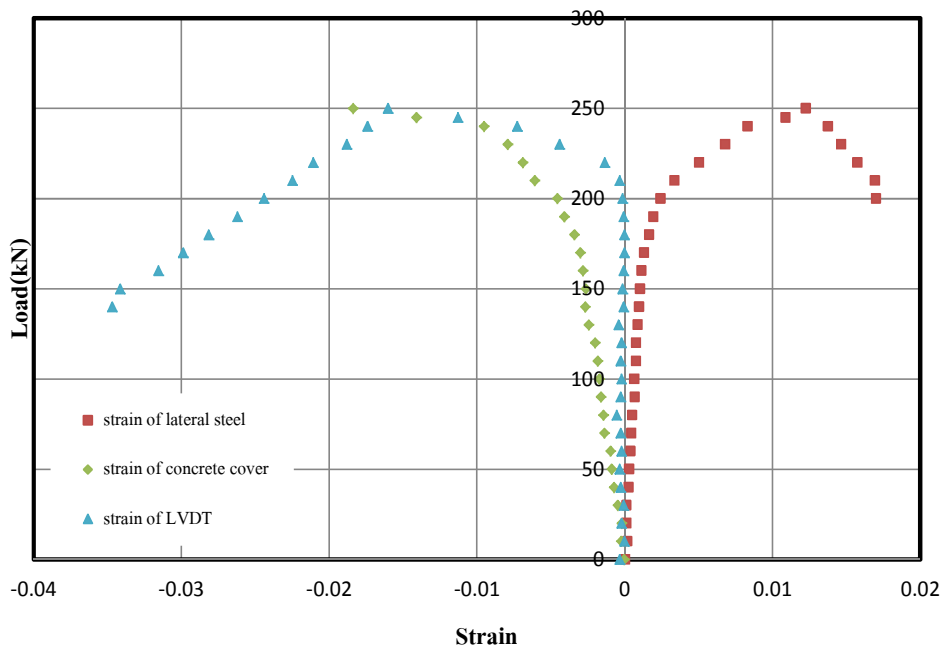
รูปที่ ก - 62 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 3-SNtc



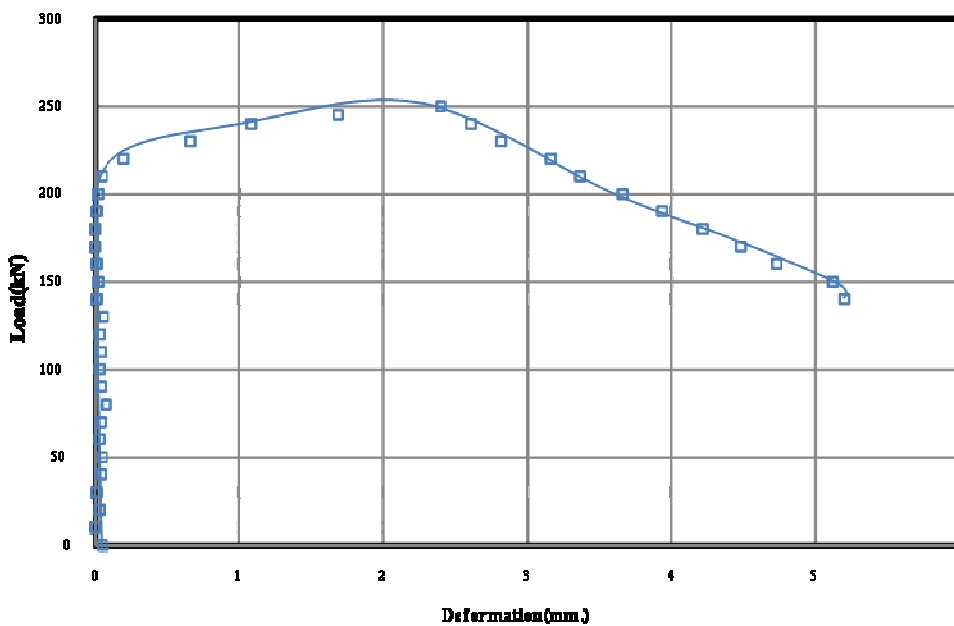
รูปที่ ก - 63 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 1-SNtn



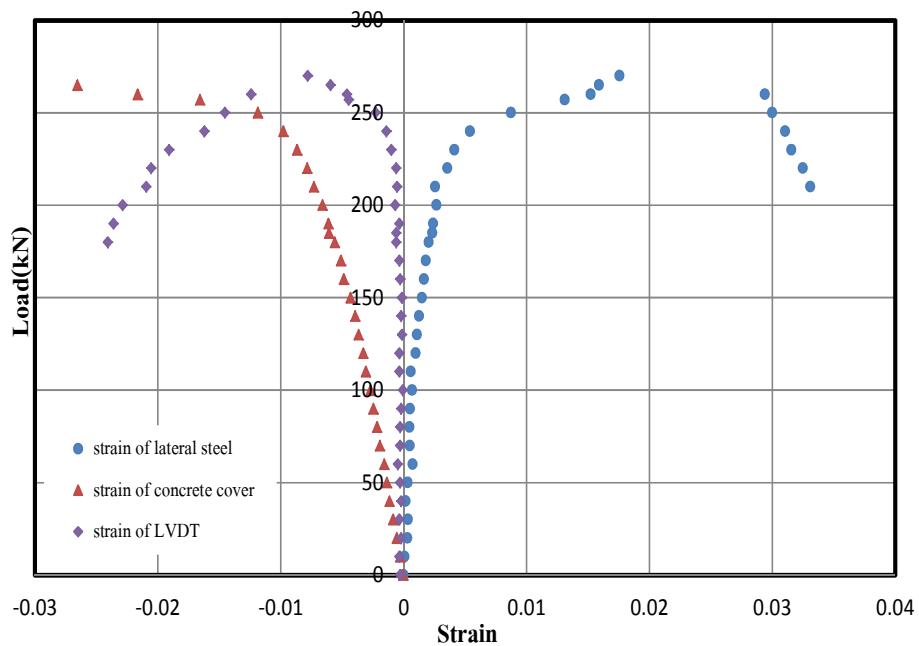
รูปที่ ก - 64 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 1-SNtn



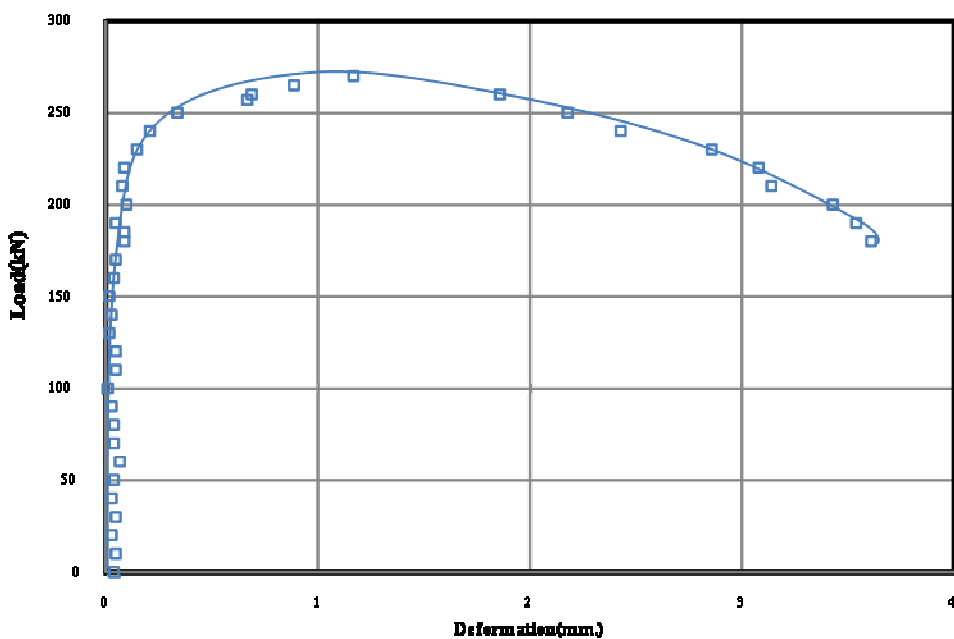
รูปที่ ก - 65 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 2-SNtn



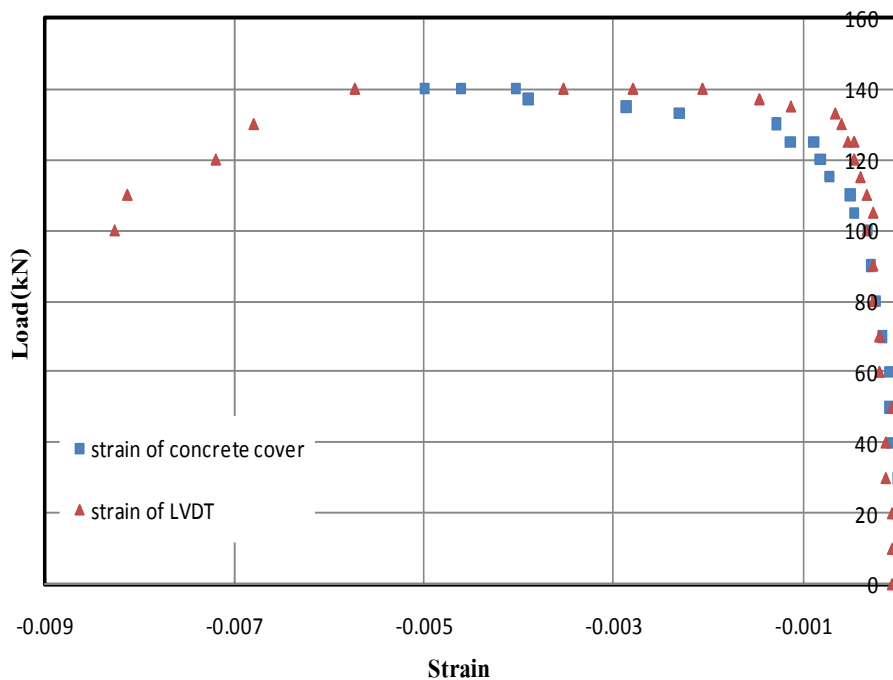
รูปที่ ก - 66 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 2-SNtn



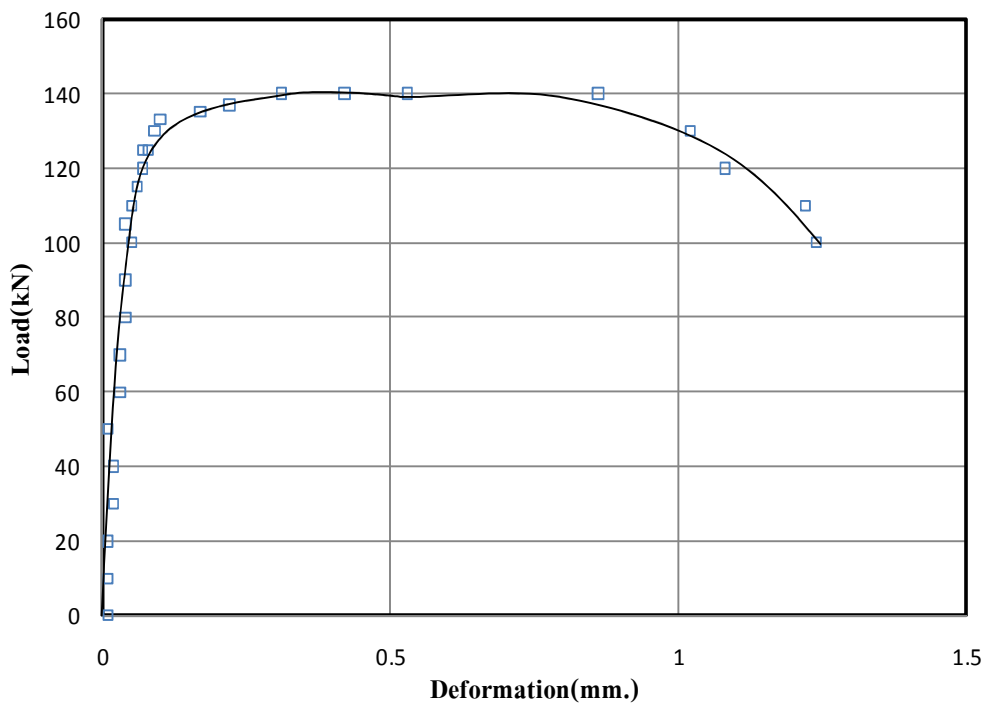
รูปที่ ก - 67 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา 3-SNtn



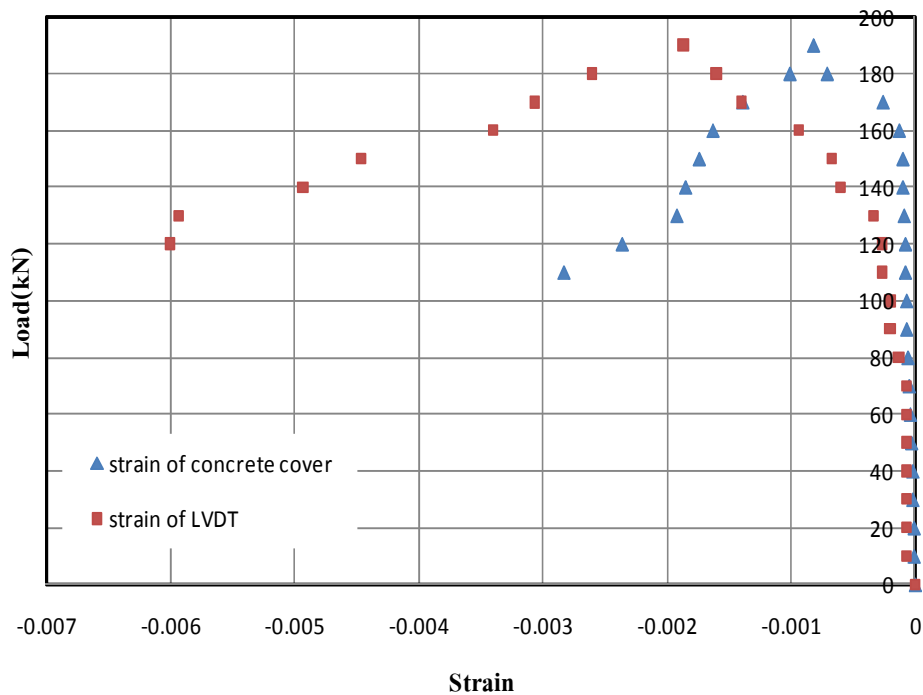
รูปที่ ก - 68 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสา 3-SNtn



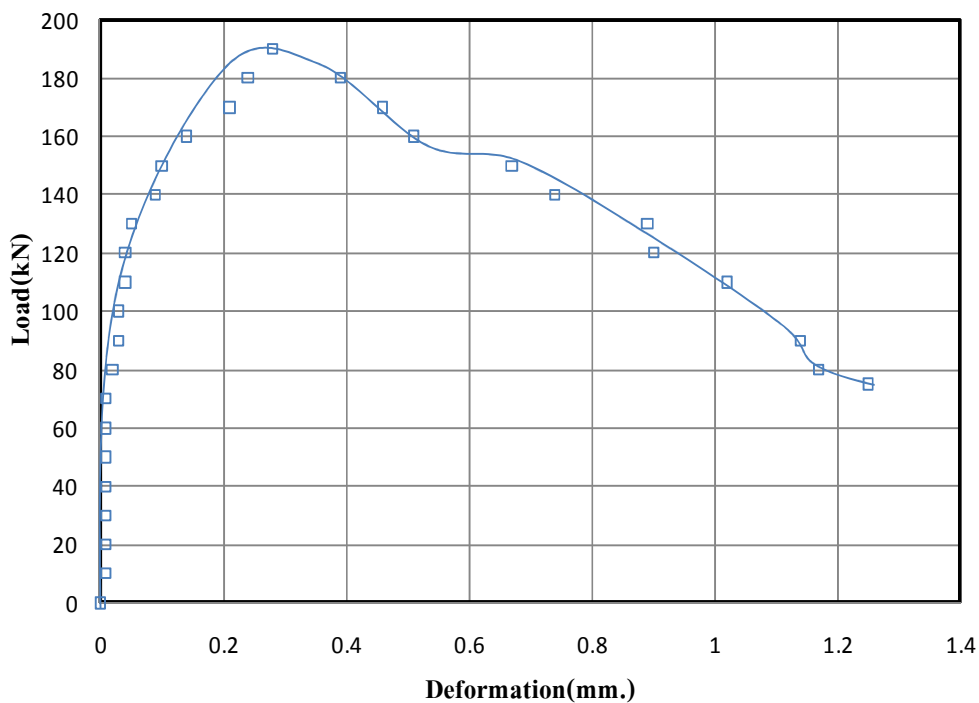
รูปที่ ก - 69 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสากลมคอนกรีต
 ล้วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร



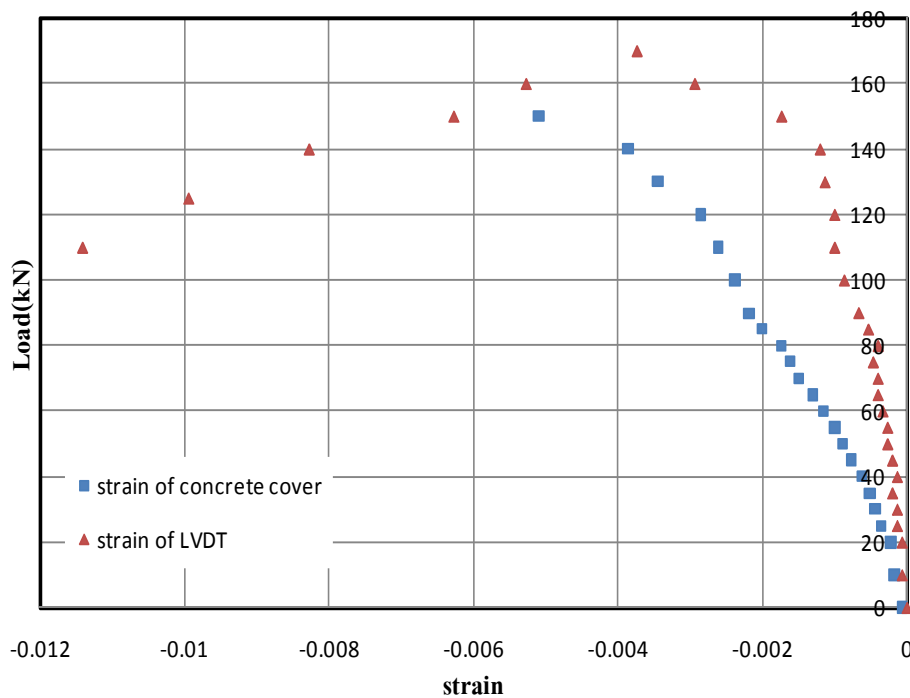
รูปที่ ก - 70 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสากลมคอนกรีต
 ล้วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 เซนติเมตร



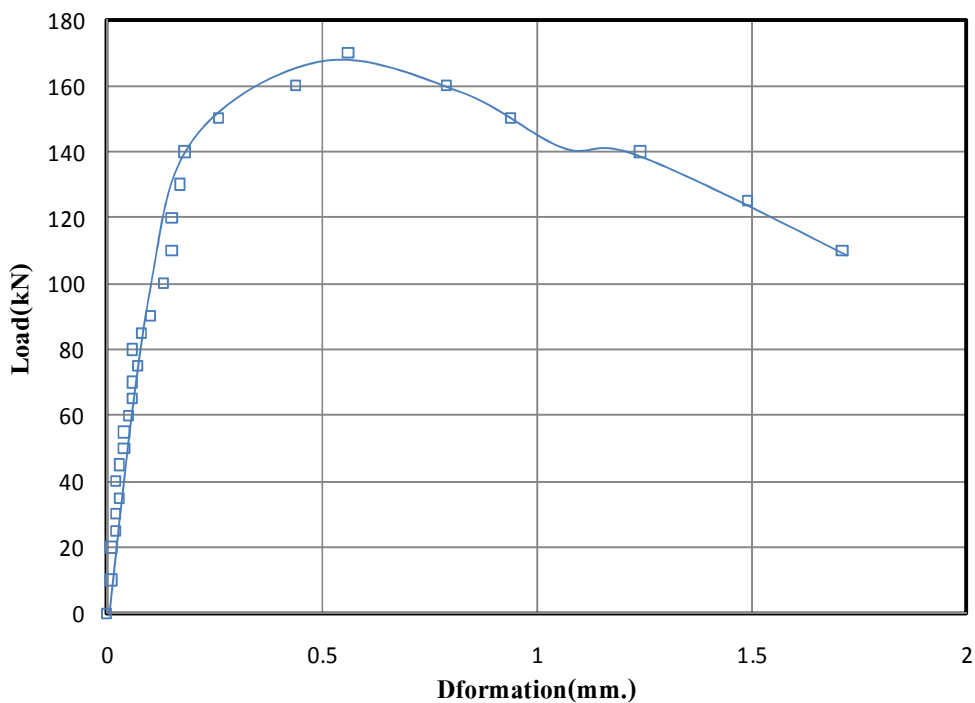
รูปที่ ก - 71 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสากลมคอนกรีต
 ล้วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร



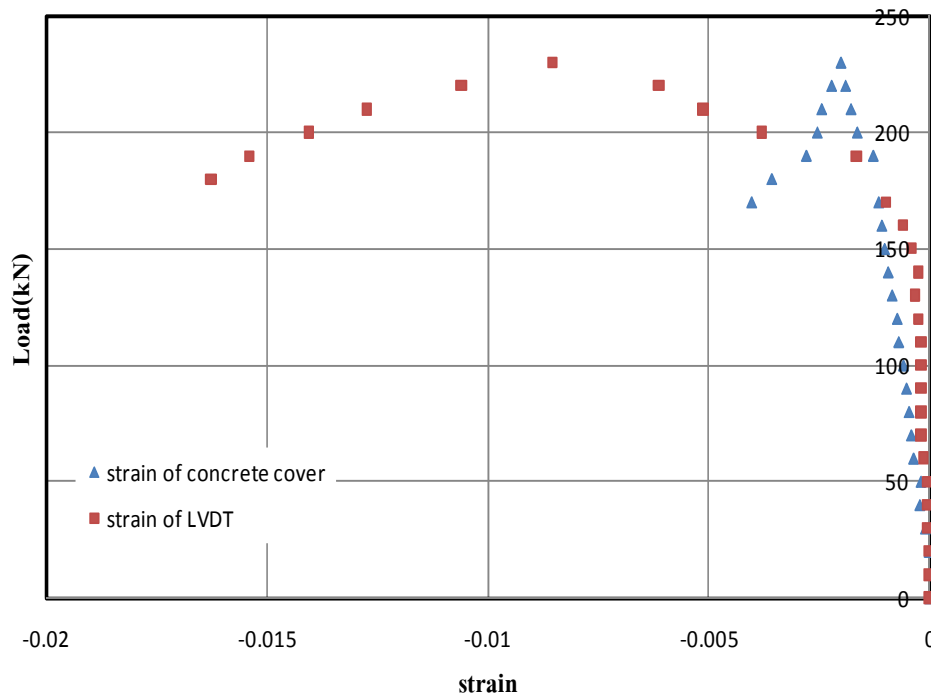
รูปที่ ก - 72 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสากลมคอนกรีต
 ล้วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร



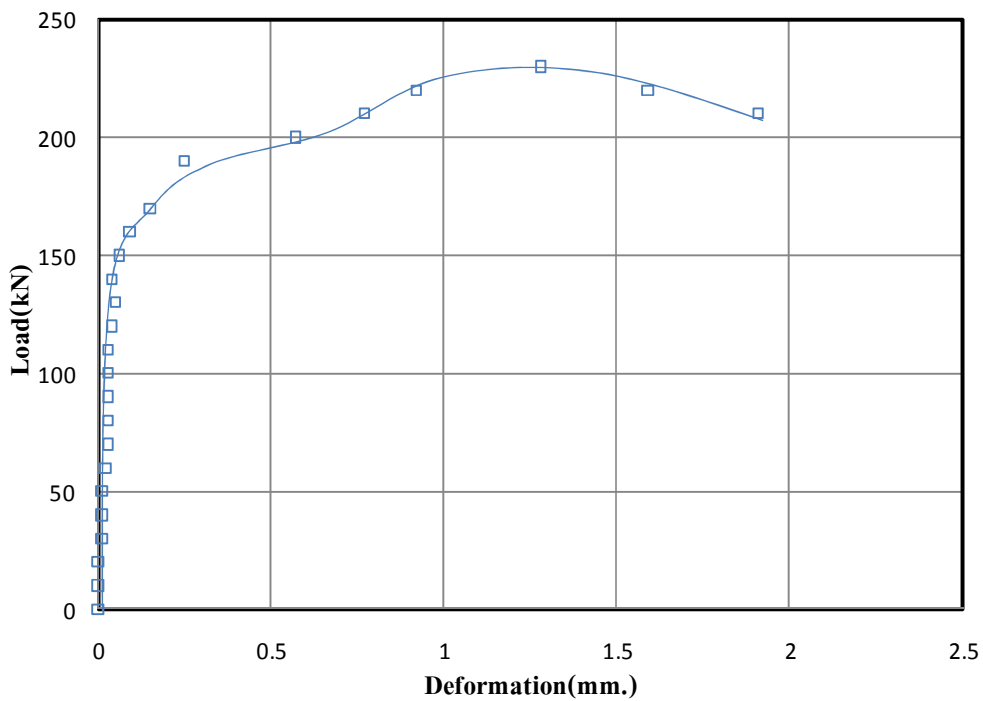
รูปที่ ก - 73 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสาเหลี่ยมคอนกรีต
 ล้วนขนาด 12.5x 12.5 เซนติเมตร



รูปที่ ก - 74 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาเหลี่ยม
 คอนกรีตล้วนขนาด 12.5x 12.5 เซนติเมตร



รูปที่ ก - 75 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและการยืดหดตัวของวัสดุเสา เหลี่ยม
คอนกรีตสี่เหลี่ยมขนาด 15x 15 เซนติเมตร

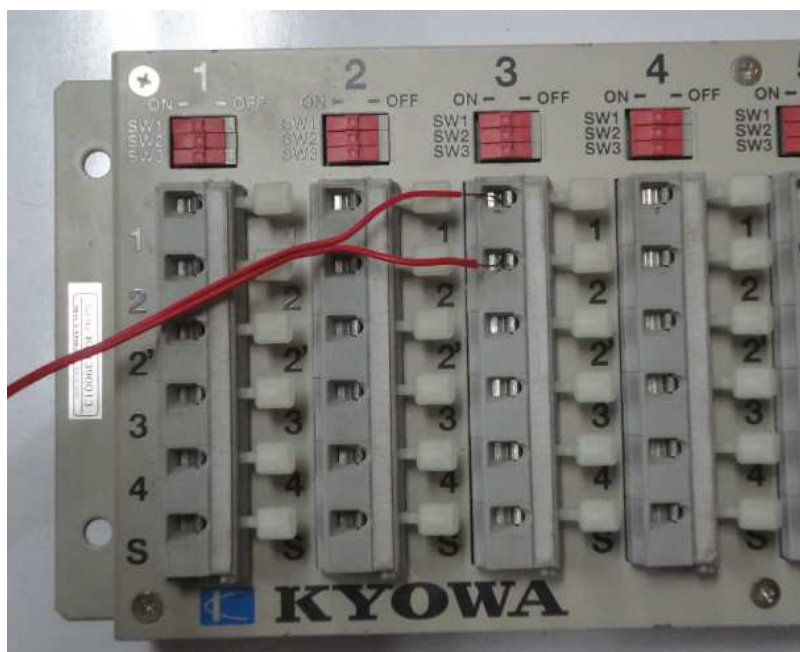


รูปที่ ก - 76 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเปลี่ยนแปลงรูปตามแนวแกนของเสาเหลี่ยม
คอนกรีตสี่เหลี่ยมขนาด 15x 15 เซนติเมตร

ภาคผนวก ข

วิธีใช้เครื่อง Data Logger

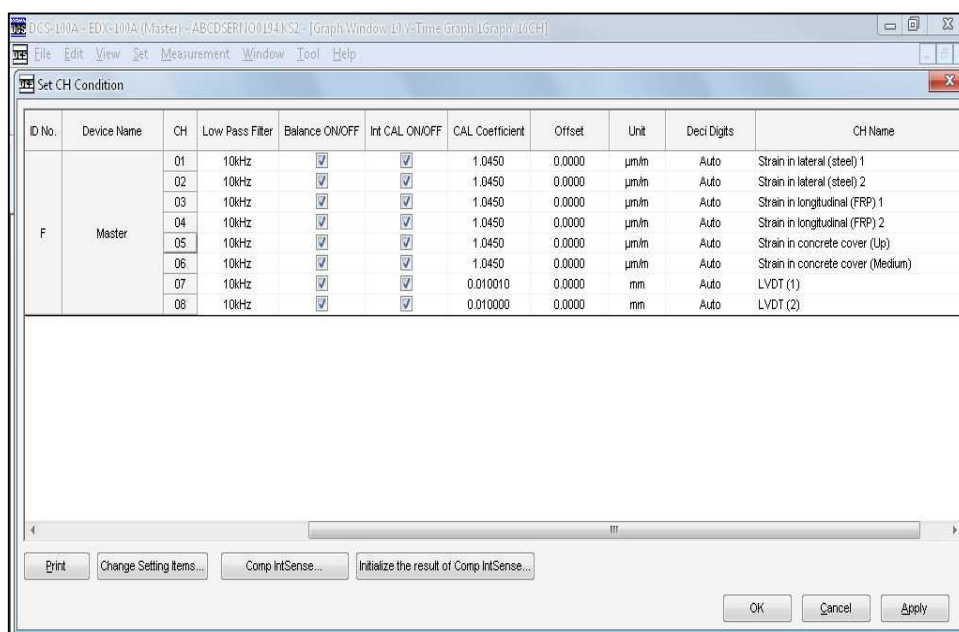
1. ประกอบ Bridge Box เข้ากับเครื่องบันทึกสัญญาณทางกล (Data Logger) พร้อมทั้งในขณะเดียวกันก็ติดตั้งสายดินโดยที่สายด้านหนึ่งต่อเข้าเครื่อง Data Logger ส่วนอีกด้านให้ต่อลงดิน
2. ต่อสายไฟที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain Gauge) เข้ากับ Bridge Box ที่ได้เชื่อมต่อกับเครื่อง Data Logger ดังแสดงในรูปที่ ข-1



รูปที่ ข-1 การเชื่อมต่อสายไฟอุปกรณ์วัดความเครียดเข้ากับ Bridge Box

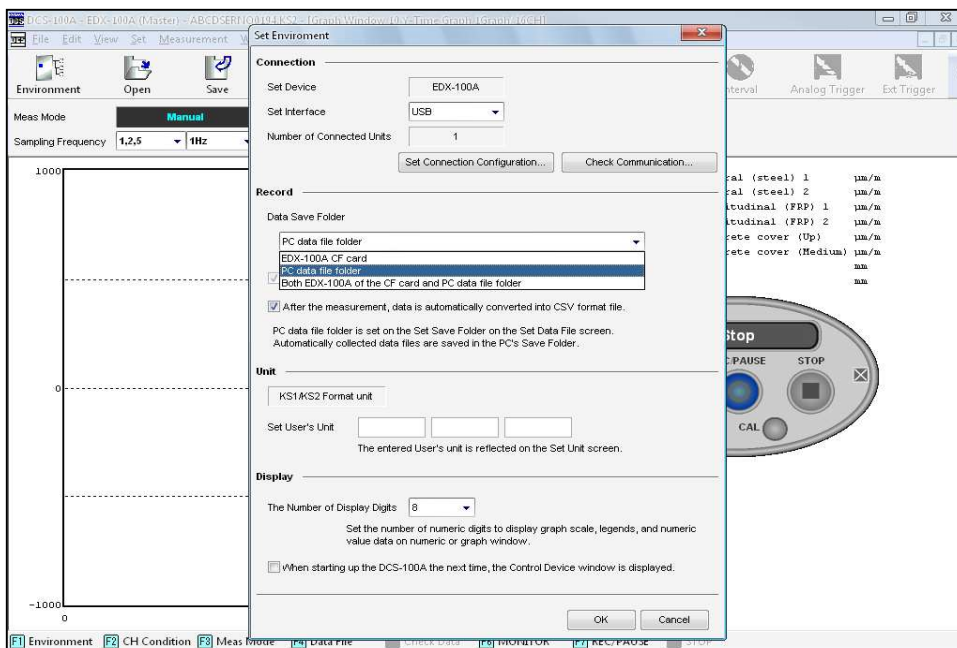
3. กดปุ่ม Power เพื่อเปิดเครื่อง
4. Set ค่าต่างๆ ของ Strain Gauge ที่ใช้ในการทดลองและค่าต่างๆที่ต้องการ โดยเริ่มจากการกดปุ่ม CH Condition จากนั้น Set ค่าต่างๆของเครื่องให้เหมาะสมกับ Strain Gages อัปเดตประกอบไปด้วย
 - ปรับค่า Mode เป็น Strain สำหรับรองรับ CH Condition ที่ต้องการอ่านค่าจาก Strain Gauge
 - Range คือ ค่าสูงสุดที่ต้องการให้ Strain Gages อ่านได้

- การตั้งค่า Cal Coefficient ให้เหมาะสมกับ Strain Gages แต่ละชุด โดยจากรูปที่ 2-ข ค่า Cal Coefficient ของ Strain Gages ที่อยู่ในช่วง CH 1-6 จะมีค่า 1.045 ซึ่งได้มาจากค่า Gage Factor ของ Strain Gages ที่มีค่าเท่ากับ 2.09 ที่ถูกระบุบนซองหาคด้วย 2 เนื่องจากค่าที่อ่านได้จากจริงจาก Strain Gages มีค่ามากกว่าค่าความเครียดที่เกิดขึ้นจริงสองเท่า
- การตั้งค่า Cal Coefficient สำหรับอุปกรณ์วัดระยะ LVDT โดยจะทำการตั้งค่าเช่นเดียวกับ Strain Gages แต่จะแตกต่างกันที่ Cal Coefficient ของ LVDT ที่อยู่ในช่วง CH 7-8 จะมีค่า 0.01001 และ 0.01 ตามลำดับ เนื่องจากเป็นค่า Gage Factor ของอุปกรณ์วัดระยะ LVDT ดังแสดงในรูปที่ ข-2



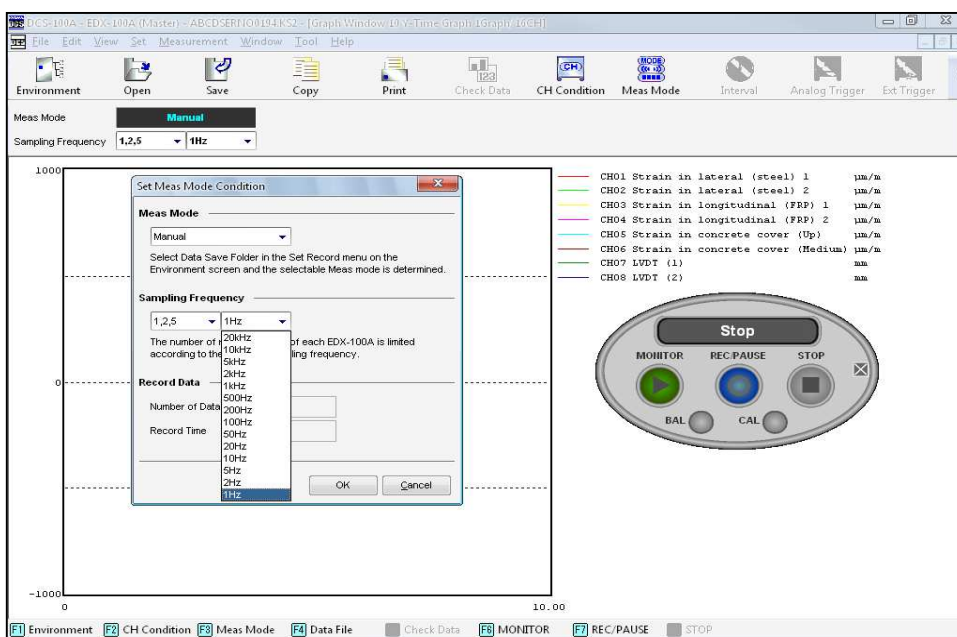
รูปที่ ข-2 การตั้งค่า Cal Coefficient ของ Strain Gages และ LVDT

5. ในการทดสอบ หากต้องการให้เครื่องบันทึกสัญญาณทางกล (Data Logger) จัดเก็บข้อมูลความเครียดหรือการเปลี่ยนแปลงรูปที่อ่านได้จาก Strain Gages หรือ LVDT ที่เกิดขึ้นขณะใดขณะหนึ่งเพียงจุดเดียว เช่น เมื่อต้องการเก็บค่าการเปลี่ยนแปลงรูปที่เกิดขึ้นขณะที่เสารับแรงอัดที่ 100 kN เพียงค่าเดียว ให้ทำการตั้งค่าเครื่อง Data Logger โดยการไปที่ File > Set Enviroment หลังจากนั้นให้ตั้งค่าเป็น PC Data File Folder ดังแสดงในรูปที่ ข-3



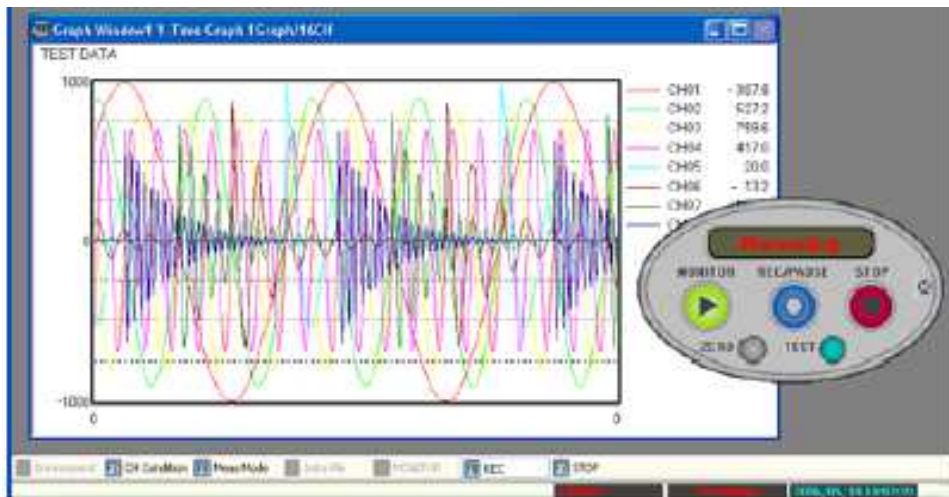
รูปที่ ข-3 การตั้งค่าเครื่องบันทึกสัญญาณทางกล (Data Logger)

6. ตั้งค่าความถี่ข้อมูลของเครื่องบันทึกสัญญาณทางกล (Data Logger) จำนวนข้อมูล ที่อ่านได้ในแต่ละวินาทีทำการตั้งค่าโดยไปที่ File > Set Meas Mode Condition แล้วเลือกความถี่ ของข้อมูลที่ต้องการเก็บตามต้องการ ดังแสดงในรูปที่ ข-4



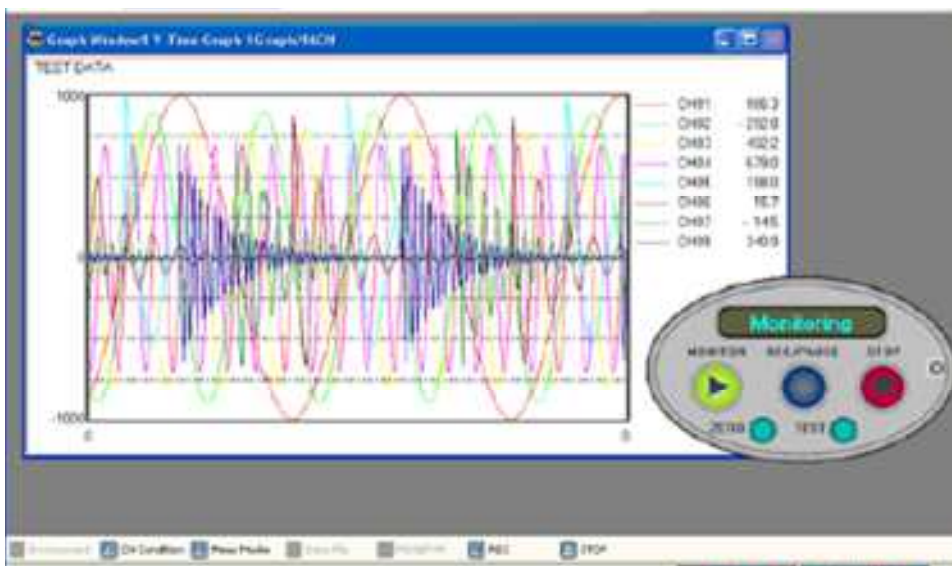
รูปที่ ข-4 การตั้งค่าความถี่ในการเก็บข้อมูลของเครื่องบันทึกสัญญาณทางกล (Data Logger)

7. เมื่อเริ่มทำการทดสอบ กดปุ่ม MONITOR เพื่อเริ่มเก็บข้อมูลขณะทดสอบ โดยจะแสดงข้อความ Recording หากเครื่อง Data Logger กำลังบันทึกข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ ข-5



รูปที่ ข-5 รูปขณะเครื่องบันทึกสัญญาณทางกล (Data Logger) กำลังบันทึกผลการทดสอบ

8. หากต้องการหยุดเก็บข้อมูลจากการทดสอบ กดปุ่ม REC/PAUSE เพื่อหยุดเก็บข้อมูลและกดปุ่ม STOP หากไม่ต้องการทำการทดสอบต่อดังแสดงในรูปที่ ข-6 โดยข้อมูลทั้งหมดที่บันทึกจากการทดสอบจะถูกบันทึกไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์และ CF CARD

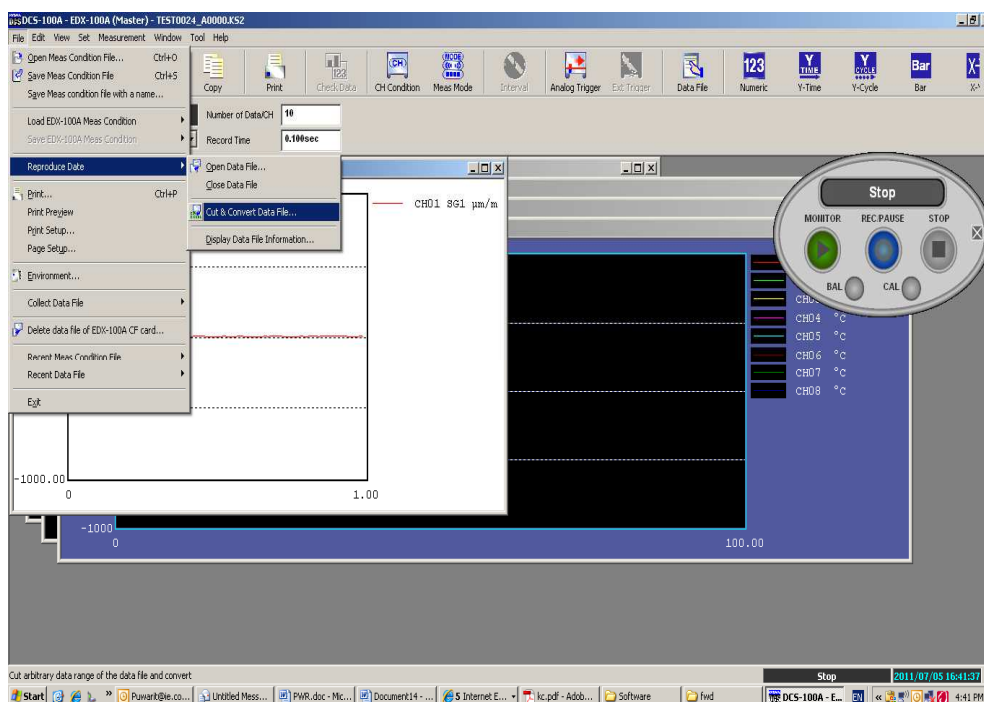


รูปที่ ข-6 รูปขณะเครื่องบันทึกสัญญาณทางกล (Data Logger) หยุดการทดสอบ

วิธีแปลงไฟล์ที่มีนามสกุล .ks2

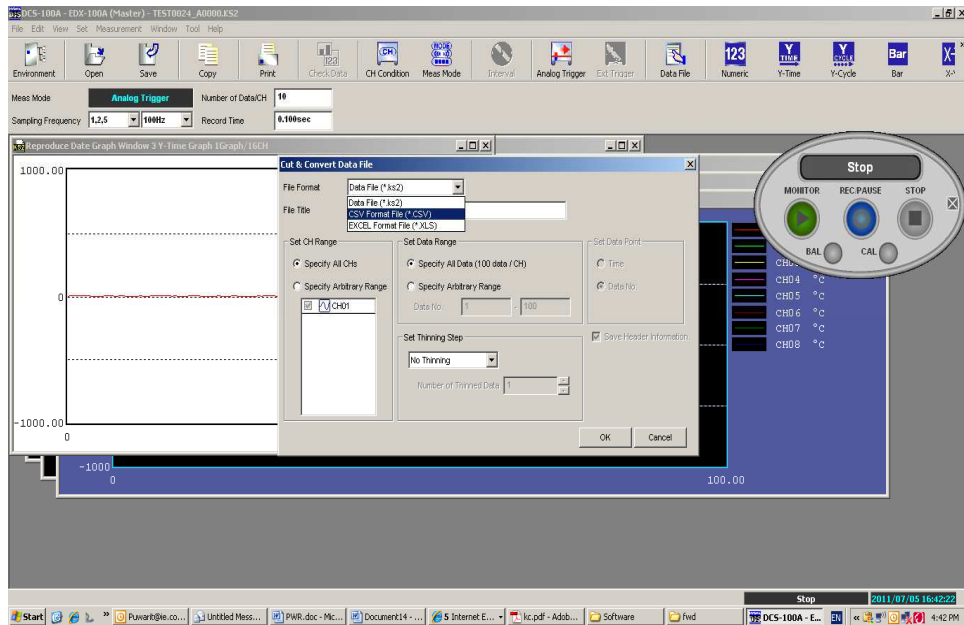
ในกรณีที่ข้อมูลการทดสอบที่ถูกบันทึกจากเครื่องบันทึกสัญญาณทางกล(Data Logger) ในเครื่องคอมพิวเตอร์เกิดการสูญหาย จึงต้องนำข้อมูลที่ถูกบันทึกจาก CF CARD มาทดแทน ตัวไฟล์ที่ได้จาก CF CARD จะไม่สามารถเปิดอ่านกับเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไปได้ เนื่องจากตัวไฟล์มีนามสกุลเป็น .ks2 ดังนั้นเพื่อให้สามารถอ่านได้กับคอมพิวเตอร์ทั่วไป จึงต้องทำการแปลงไฟล์จากนามสกุล .ks2 เป็นไฟล์ที่มีนามสกุล .XLS หรือ .CSV โดยมีขั้นตอนในการแปลงไฟล์ดังนี้

1. เปิดไฟล์ที่มีนามสกุล .ks2 ที่ต้องการแปลงก่อนโดยเข้าไปที่ File > Reproduce Date > Cut & Convert Data File ดังแสดงในรูปที่ ข-7



รูปที่ ข-7 ขั้นตอนการแปลงไฟล์ที่มีนามสกุล .ks2

2. เลือกชนิดไฟล์ที่ต้องการแปลง กด OK แล้วเลือกสถานที่จัดเก็บไฟล์เมื่อเสร็จสิ้นการแปลงไฟล์ ดังแสดงในรูปที่ ข-8



รูปที่ ข-8 ขั้นตอนการแปลงไฟล์ที่มีนามสกุล .ks2

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์

การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 7

(The Annual Concrete Conference ACC7)

โรงแรมระยอง รีสอร์ท อำเภอเมืองจังหวัดระยอง วันที่ 19-21 ตุลาคม 2554

**An Experimental Study of Reinforced Concrete Short Column with GFRP Reinforcing Bars
under Axial Load**

**การศึกษาเชิงทดลองของเสาคอนกรีตเสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วภายใต้แรง
กระทำในแนวแกน**

อรรถวิทย์ แสงศรีจันทร์ (Athawit Sangsrijun)¹

วรพจน์ ประชาเสรี (Woraphot Prachasaree)²

สุชาติ ลิ้มกัตัญญ (Suchart Limkatanyu)³

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Email: sangsrijun.a@gmail.com

²อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Email: pworaphot@eng.psu.ac.th

³อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Email: suchart.l@psu.ac.th

บทคัดย่อ : วัตถุประสงค์หลักของการวิจัยนี้เพื่อตรวจสอบประสิทธิผลและพฤติกรรมของเสาคอนกรีตที่ถูกเสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว (GFRP) ในการประเมิน ประสิทธิภาพของโครงสร้างและพฤติกรรมของ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กใช้ชุดเสาคอนกรีตทดสอบทั้งหมด 10 ตัวอย่าง เสาตัวอย่างถูกทดสอบภายใต้แรงกระทำตามแนวแกนจนกระทั่งเสาตัวอย่างเกิดการพินดี ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าวัสดุเสริมกำลัง GFRP จะรับน้ำหนักได้ประมาณ 20-25 เปอร์เซ็นต์ของกำลังประลัยของเสาคอนกรีต ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเสนอตัวประกอบลดกำลัง (ψ) ของแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเพื่อวัตถุประสงค์ในการออกแบบและใช้งาน สำหรับรูปแบบการพินดีของเสาพบว่ามีการพินดีแบบเหนียวและเกิดการแตกหักของแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว

ABSTRACT: The main objective of this paper is to investigate the effectiveness and behavior of reinforced concrete short columns with glass fiber reinforcement polymer bars (GFRP). To evaluate structural performance and behavior of reinforced concrete columns, a series of ten concrete column tests were conducted under compressive axial static loading. All concrete columns were tested to failure. The experimental results presented that GFRP reinforcing bars contributed to 20-25 % of the ultimate concrete column strength. In addition, the FRP reduction factor (ψ) based on this study was determined and proposed for design purpose. For reinforced concrete column failure mode, it was classified as ductile failure with GFRP bar rupture.

KEY WORDS: Fiber Reinforced Polymer (FRP), Concrete, Column, Axial load

1. บทนำ

การกักกร่อนเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นและพบเห็นได้ทั่วไปในโครงสร้างคอนกรีต ซึ่งมักจะพบภายหลังจากการก่อสร้างและผ่านการใช้งานไปได้ระยะเวลาหนึ่งแล้ว ปัญหาการกักกร่อนเกิดขึ้น ภายใต้ สภาพแวดล้อมที่มีความรุนแรงหลากหลายรูปแบบตั้งแต่เขตเมือง บริเวณชายฝั่งทะเล แหล่งโรงงานอุตสาหกรรมเคมี โรงบำบัดน้ำเสียและมลพิษต่างๆ เป็นต้น โดยการกักกร่อนจะสร้างความเสียหายและลดอายุการใช้งานของโครงสร้างตลอดจนทำให้เกิด การเสื่อมประสิทธิภาพในการใช้งานลงอย่างมาก ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ได้มีการนำเอาแนวคิดการใช้วัสดุประกอบ (Composite Materials) ประเภทแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer - GFRP) มาใช้เป็นวัสดุเสริมกำลังทดแทนวัสดุเสริมกำลังประเภทโลหะดั้งเดิม เนื่องจาก คุณสมบัติเด่นของวัสดุประเภทพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว คือ ทนการกักกร่อนจากสภาพแวดล้อมและสภาพอากาศ ได้ดีกว่า โลหะที่ใช้งานโดยทั่วไป

อย่างไรก็ตามในส่วนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมกำลังนั้น ความรู้ความเข้าใจในพฤติกรรมของเสาคอนกรีต ซึ่งใช้แท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วเป็นวัสดุเสริมกำลังหลัก (Main Reinforcement) แทนเหล็กเสริมแบบเดิม ยังไม่เป็นที่เข้าใจอย่างชัดเจน ตลอดจนงานวิจัยในส่วนดังกล่าวที่ผ่านมามีจำนวนค่อนข้างจำกัด [1-4] ซึ่งการประยุกต์ใช้แท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วย เส้นใยแก้ว ภายในเสายังมีความจำกัดอยู่

ดังนั้น เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ ในงานโครงสร้างคอนกรีต ได้อย่างแท้จริง ตลอดจนเป็นการสนองตอบความต้องการการแก้ปัญหาการกักกร่อนในงานโครงสร้างซึ่งจะช่วยลดภาระการดูแลรักษาและซ่อมแซมอย่างมหาศาลในอนาคต จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดงานวิจัยชิ้นนี้

2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

โครงการ วิจัย นี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อศึกษาพฤติกรรม มการตอบสนอง ของเสากายใต้แรงกระทำตามแนวแกน โดยตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นเสาคอนกรีต

หน้าตัดสี่เหลี่ยมซึ่งเสริมกำลังด้วย GFRP และใช้เหล็กปลอกทั้งแบบปลอกเกลียวและแบบปลอกเดี่ยว

3. ขอบเขตการวิจัย

สำหรับขอบเขตการวิจัย ในโครงการวิจัยนี้ประกอบไปด้วย

- อัตราส่วนความชะดูด (Slenderness Ratio) ของเสาตัวอย่างมีค่าค่อนข้างต่ำอยู่ในเกณฑ์ของเสาสั้น
- แท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer Rebar) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 มีค่ากำลังประลัย 5000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
- กำลังประลัยของคอนกรีตที่ใช้สำหรับหล่อเสาตัวอย่างมีค่าประมาณ 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (ตัวอย่างทรงกระบอกมาตรฐาน) ที่อายุ 28 วันภายใต้การบ่มชื้นในห้องปฏิบัติการ

4. เสาตัวอย่างและการทดสอบ

เสาคอนกรีตตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบมีความยาวโดยประมาณ 50 เซนติเมตร มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด

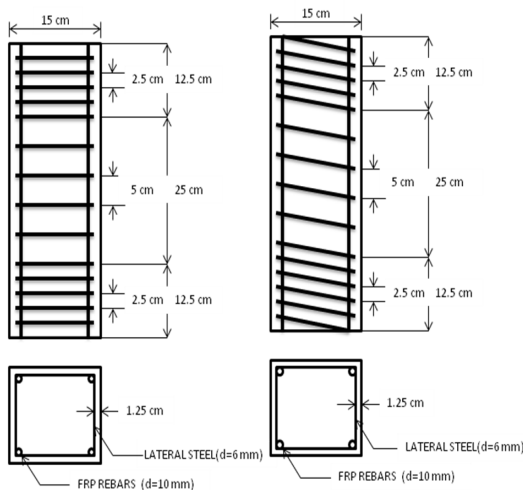


รูปที่ 1 แท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วที่ใช้ในการทดสอบ

15 เซนติเมตร โดยมีคอนกรีตหุ้มผิวด้านละ 1.25 เซนติเมตร มีปลอกทำด้วยเหล็กกลม (SR24) เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 6 มิลลิเมตร รายละเอียดตัวอย่างเสาตัวอย่างแสดงสรุปในตารางที่ 1 และ รูปที่ 2

ตารางที่ 1 รายละเอียดเสาตัวอย่าง

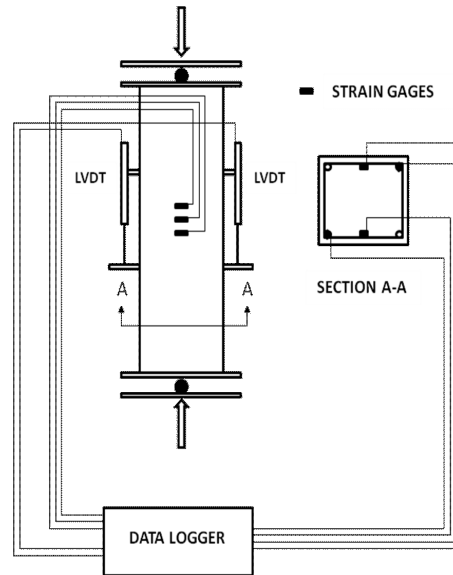
เสา	วัสดุเสริมกำลังหลัก	เหล็กปลอก	จำนวน
1A	4 GFRP ϕ 10 mm.	เกลียว	2
1B	ไม่มีวัสดุเสริมกำลัง	เกลียว	2
2A	4 GFRP ϕ 10 mm.	เดี่ยวน	2
2B	ไม่มีวัสดุเสริมกำลัง	เดี่ยวน	2
C	คอนกรีตล้วน	-	2



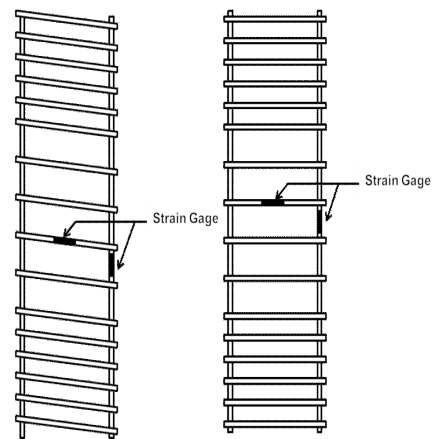
รูปที่ 2 เสาตัวอย่างในการทดสอบ

ในการทดสอบเสาคอนกรีตตัวอย่างจะถูกจัดวางให้อยู่บนที่แท่งเหล็กที่รองรับของเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine โดยปลายเสาคอนกรีตตัวอย่างทั้งสองด้านวางอยู่บนที่รองรับแบบหมุด (Pin Support) เสาคอนกรีตจะทำการติดตั้งเครื่องมือวัดระยะ (LVDT) บริเวณด้านข้างของเสาตัวอย่างที่ระยะประมาณ 17.5 เซนติเมตร วัดจากส่วนบนสุดของเสา (เพื่อกำหนดช่วงความยาวในการวัดระยะ) นอกจากนี้แก้วัดความเครียดจะถูกติดตั้งบริเวณผิวด้านนอกของเสาคอนกรีต ที่ระยะ 20, 25 และ 30 เซนติเมตรตามลำดับ (โดยวัดจากส่วนบนสุดของเสา) ดังแสดงในรูปที่ 3 อีกทั้งยังทำการติดตั้งแก้วัดในส่วนที่เป็นปลอกและส่วนของ GFRP โดยมีรายละเอียดในรูปที่ 4 อุปกรณ์วัด LVDT และแก้วัดความเครียด จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger) โดยในการทดสอบจะกำหนดอัตราการให้น้ำหนัก

ในลักษณะการเคลื่อนที่ของหัวกด และ จะดำเนินการจนกระทั่งเสาตัวอย่างเกิดการพิบัติ



รูปที่ 3 การเตรียมการทดสอบเสาตัวอย่าง

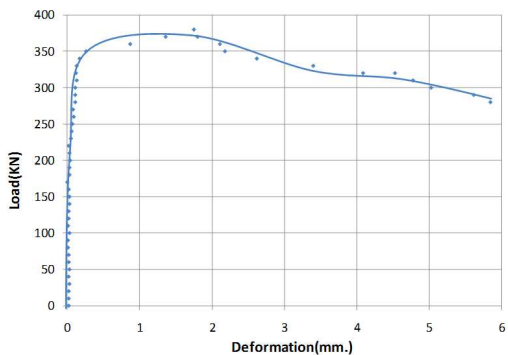


รูปที่ 4 การเตรียมการทดสอบเสาตัวอย่าง

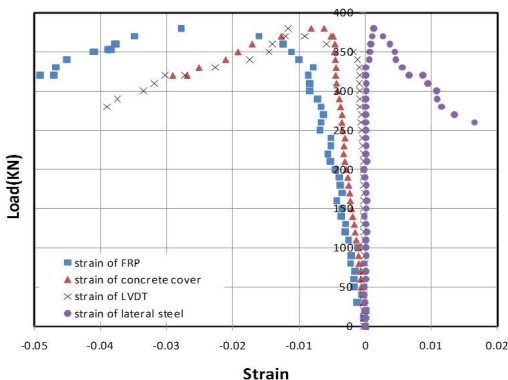
4. ผลการทดสอบและวิจารณ์

ผลการทดสอบเสาคอนกรีตตัวอย่างภายใต้แรงกระทำตรงศูนย์กลางในห้องปฏิบัติการพบว่า พฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริม GFRP ทั้งในกรณีที่มีปลอกเดี่ยวนและปลอก

เกลียว จะมีการลักษณะความสัมพันธ์ของแรงกระทำและการเปลี่ยนแปลงรูปคล้ายคลึงกับกรณีของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 5 (เสา 1A)



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเปลี่ยนแปลงรูป (เสา 1A)



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเปลี่ยนแปลงรูป (เสา 1A)

เสา มีพฤติกรรมเป็นลักษณะเชิงเส้นและเมื่อเสารับกำลังอัดต่อไปจะพบการแตกร้าวและหลุดร่อนของผิวหุ้ม ซึ่งการแตกร้าวที่เกิดขึ้นมีผลทำให้คอนกรีตที่ห่อหุ้มวัสดุเสริมกำลัง GFRP เสียหาย เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เสา ยังคงสามารถน้ำหนักกระทำดังกล่าวได้จนกระทั่งเกิดการแตกหักของวัสดุเสริมกำลังภายใน ทำให้กำลังรับน้ำหนักของเสาลดลงและเสาคอนกรีตเกิดการบิดเบี้ยวในที่สุด (รูปการบิดเบี้ยวแสดงในรูปที่ 6) โดยผลการทดสอบพบว่ารูปแบบการบิดเบี้ยวของวัสดุเสริมกำลังด้วย GFRP มีลักษณะแตกหักเนื่องจากการดึงและ โกงตัวของวัสดุดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8



รูปที่ 7 รูปแบบการบิดเบี้ยวของวัสดุเสริมกำลังด้วย GFRP

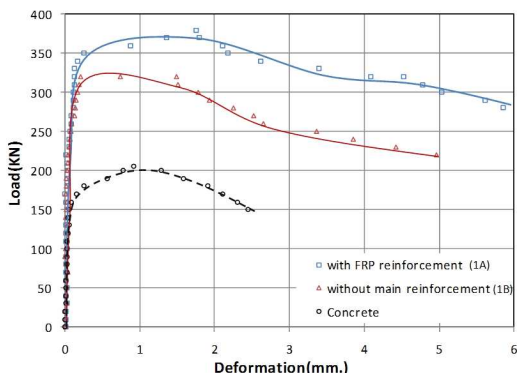


รูปที่ 8 รูปแบบการบิดเบี้ยวเนื่องจากการดึงและการโก่งตัวของวัสดุเสริมกำลังด้วย GFRP

สำหรับกำลังรับแรงอัดสูงสุดของเสา 1A (เสาคอนกรีตเสริมด้วย GFRP ประเภทปลอกเกลียว) มีค่าประมาณ 380 กิโลนิวตัน ซึ่งมีค่าสูงกว่ากำลังอัดของเสา 1B (เสาคอนกรีตประเภทปลอกเกลียว) ประมาณ 22-25 % ในขณะที่เสา 2A (เสาคอนกรีตเสริมด้วย GFRP ประเภทปลอกเดี่ยว) มีกำลังอัดสูงสุดประมาณ 375 กิโลนิวตัน ซึ่งมีค่าสูงกว่ากำลัง

อัดของเสา 2B (เสาคอนกรีตประเภทปลอกเดี่ยว) อยู่ในเกณฑ์เปอร์เซ็นต์เช่นเดียวกับเสา 1A ดังนั้นพบว่าประเภทของปลอกมีผลต่อกำลังอัดสูงสุดของเสาเสริมกำลังด้วย GFRP น้อยมากเช่นเดียวกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป

จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเปลี่ยนแปลงรูปของเสาตัวอย่าง 1A และ 1B ดังแสดงในรูปที่ 9 สามารถสังเกตเห็นได้ว่ากำลังรับน้ำหนักที่ในส่วนของวัสดุเสริมกำลัง GFRP มีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบจากสมการกำลังรับน้ำหนักของ ACI 318-05 [5] อย่างไรก็ตาม การใช้วัสดุ GFRP เสริมกำลังภายในเสาตัวอย่างในงานวิจัยนี้ การบิดของเสาโดยรวมยังคงแสดงรูปแบบการบิดแบบเหนียว และการเพิ่มปริมาณวัสดุเสริมกำลังหลัก GFRP ยังช่วยเพิ่มความเหนียวของเสาคอนกรีตโดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปได้มากขึ้นที่กำลังที่สูงขึ้น พฤติกรรมดังกล่าวข้างต้นพบในเสาตัวอย่างสำหรับกรณีเหล็กปลอกเดี่ยวเช่นเดียวกัน



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเปลี่ยนแปลงรูป

สำหรับกำลังรับแรงอัดที่ได้จากวัสดุเสริมกำลัง GFRP ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำนั้น อาจจะมีสาเหตุสืบเนื่องจากคุณสมบัติและธรรมชาติของแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยซึ่งเป็นวัสดุเปราะ เส้นใยรับแรงเกิดการเสียหายด้วยการโค้งทางด้านข้างได้ง่าย ซึ่งเป็นผลจากการมีระยะห่างของเหล็กปลอกไม่เหมาะสม หรือ เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของคุณสมบัติวัสดุเอง

ในการพิจารณาออกแบบเพื่อการใช้งาน จำเป็นจะต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อกำลังของวัสดุเสริมกำลัง

GFRP ที่ลดลงดังกล่าวมาแล้ว ดังนั้นตัวประกอบลดกำลัง (Reduction factor, ψ) จะถูกนำมาใช้ในสมการคำนวณกำลังรับแรงอัดประลัยดังสมการ (1) และ (2)

สำหรับเสาปลอกเกลียว [5]

$$\phi P_n = 0.85 \phi [0.85 f'_c (A_g - A_{frp}) + (\psi f_f A_{frp})] \tag{1}$$

สำหรับเสาปลอกเดี่ยว [5]

$$\phi P_n = 0.80 \phi [0.85 f'_c (A_g - A_{frp}) + (\psi f_f A_{frp})] \tag{2}$$

โดยที่ P_n = กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดตามแนวแกน

A_g = เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดของเสา

A_{frp} = พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของ GFRP

f_f = กำลังดึงแตกหักของ GFRP

ψ = ตัวประกอบลดกำลังของ GFRP

ϕ = ตัวประกอบลดกำลังของเสา

จากผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดของเสาตัวอย่างในงานวิจัยนี้ พบว่าค่าตัวประกอบลดกำลัง (Reduction factor, ψ) ที่เหมาะสม สำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวและเหล็กปลอกเกลียว โดยมีอัตราส่วนความชะลูดของวัสดุเสริมกำลัง GFRP ไม่เกิน 15 (โดยพิจารณาความยาวเท่ากับระยะห่างระหว่างปลอก) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.5-0.6 (สำหรับคอนกรีตเสริมเหล็ก $\psi = 1$)

4. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์ เสาคอนกรีตเสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย ในโครงการวิจัยนี้ นำไปสู่ข้อสรุปดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

- กำลังรับน้ำหนักประลัยสำหรับเสาซึ่งทำการเสริมด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยมีค่ากำลังเพิ่มขึ้นประมาณ 25% เมื่อเปรียบเทียบเสาคอนกรีตซึ่งปราศจากวัสดุเสริมกำลังหลัก และเป็นเสาคอนกรีตที่มีเหล็กปลอกชนิดเดียวกัน

- ประเภทของเหล็กปลอกที่แตกต่างกันมีผลต่อกำลังรับน้ำหนักประลัยของเสาคอนกรีตเสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยคอนกรีตน้อยแต่มีผลต่อความเหนียวของหน้าตัดเช่นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป
- รูปแบบการพิบัติที่เกิดขึ้นสำหรับเสาคอนกรีตเสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยพบว่าคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวที่ผิวและวัสดุเสริมกำลัง GFRP แตกหักภายในหนึ่งช่วงเหล็กปลอกเนื่องจากการดึงและการโก่งตัว
- สำหรับการพิจารณาออกแบบเพื่อใช้งาน ตัวประกอบลดกำลัง (Reduction factor, η) ของแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย มีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 0.6 โดยที่ตัวประกอบลดกำลังดังกล่าวนี้ พิจารณาผลของปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง

ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและการวิเคราะห์ต่างๆ ในบทความวิจัยฉบับนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งในโครงการวิจัย พฤติกรรมเสาคอนกรีตเสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย ซึ่งกำลังดำเนินการอยู่ โดยผลการวิจัยและข้อสรุปอย่างสมบูรณ์จะได้นำเสนอในภายหลัง

4. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และกลุ่มวิจัย STRuctural Engineering and Applied Mechanics (STREAM) ที่อนุเคราะห์ทุนอุดหนุนการวิจัย ENG-54-2-7-02-0138-S และคำแนะนำด้วยดีโดยตลอด โครงการวิจัยนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bayrak, O., and Sheikh, S.A. (2001). "Plastic Hinge Analysis." Journal of Structural Engineering, Vol. 127, No. 9, September.
- [2] Choo, C.C., Harik, I.E., and Gesund, H. (2006). "Strength of Rectangular Concrete Columns Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars" ACI Structural Journal, V. 103, No. 3, May-June, pp. 452-459.
- [3] Dhakal, R.P., and Maekawa, K. (2002). "Path-dependent Cyclic Stress-Strain Relationship of Reinforcing

Bar Including Buckling" Engineering Structures 24, May, pp.1383-1396.

[4] Luca, A.D., Matta, A., and Nanni, A. (1999). "Behavior of Full-Scale Concrete Columns Internally Reinforced with Glass FRP Bars under Pure Axial Load." American Composites Manufacturers Association, January 15-19

[5] ACI 318 Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary, Detroit, MI: American Concrete Institute, 2005.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	นายอรรถวิทย์ แสงศรีจันทร์		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5210120048		
วุฒิการศึกษา			
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา	
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2551	
วิศวกรรมโยธา			

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

อรรถวิทย์ แสงศรีจันทร์, วรพจน์ ประชาเสรี, สุชาติ ลิมกตัญญู. การศึกษาเชิงทดลองของเสาคอนกรีตเสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วภายใต้แรงกระทำในแนวแกน. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 7. 19-21 ตุลาคม 2554. หน้า STR 70 - STR 75.