

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
ทุนอุดหนุนการวิจัย งบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2554
สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

การประเมินกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก
วิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยปูนซีเมนต์ชนิดไม่หดตัว และวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว
Evaluation of Reinforced Concrete Columns Strengthened by Reinforced
Concrete, Non-Shrinkage Cement, and GFRP Jackets

0178042

A80110695

16 ก.ค. 2558

355592

โดย

ผศ. ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

เริ่มบริการ

๕-2 พ.ค. 2559

บทคัดย่อ

ประสิทธิภาพการเสริมกำลังรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีที่นิยมใช้ในประเทศไทย สามวิธีการ คือการเสริมกำลังเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว และการเสริมกำลังเสาด้วยวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน ถูกนำเสนอผ่านผลการศึกษานี้ด้วยการทดสอบตัวอย่างเสาในห้องปฏิบัติการ เตรียมตัวอย่างเสา ค.ส.ล. ทดสอบต้นแบบ (C) ขนาดหน้าตัด 15x15, 20x20, และ 25x25 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร จำนวนหน้าตัดละ 5 ตัวอย่าง เมื่อบ่มอายุคอนกรีตจนได้อายุ 28 วัน นำตัวอย่างเสา ค.ส.ล. ต้นแบบจำนวนหน้าตัดละ 4 ตัวอย่างมาทำการเสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (RCJ) 1 ตัวอย่าง ทำการเสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS) 1 ตัวอย่าง และทำการเสริมกำลังด้วยวิธีการพันรอบด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน 1 ชั้น (F1) จำนวน 1 ตัวอย่าง และ 2 ชั้น (F2) 1 ตัวอย่าง จากนั้นทำการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของเสาแต่ละหน้าตัดรวมทั้งหมดเป็น 15 ตัวอย่าง นำค่ามาวิเคราะห์เปรียบเทียบ พร้อมทั้งสังเกตพฤติกรรมการพังของเสา จากผลการทดสอบเสาสรุปได้ว่าการเสริมกำลังเสาทั้งสามวิธีช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ยกเว้นวิธีการเสริมกำลังด้วยการเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว นอกจากนั้นเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีนี้ยังมีพฤติกรรมการพังแบบเปราะ ดังนั้นการเสริมกำลังเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS) โดยใช้รายละเอียดเหล็กยึดที่มุมเสาและพันรอบด้วยลวดตะแกรง เป็นการเสริมกำลังที่ไม่มีประสิทธิภาพ ไม่สมควรนำไปใช้ในงานก่อสร้างจริง

คำสำคัญ: เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก, ค่าแรงอัด, ค่าการยุบตัว, การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก, การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว, การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน

Abstract

Effectiveness of three conventional practices to enhance the compressive strength of reinforced concrete columns in Thailand was presented in this study. Three column strengthening techniques widely used in Thailand namely as Reinforced Concrete Jacketing (RCJ), Non-shrinkage Concrete Jacketing (NS), and Carbon Fiber Reinforced Paper (F) were investigated through laboratory experiments. Five reinforced concrete specimen columns with a dimension of 15x15, 20x20, and 25x25 cm. and 40 cm. in heights were casted. After curing of 28 days, four of each specimen dimension were strengthened by RCJ, NS, F1, and F2 techniques, respectively. The results show that the columns strengthened by RCJ, F1, and F2 have the compressive force increased comparing to the control specimens. The NS columns, on the other hand, show an insignificant increasing of a compressive strength for all specimen dimensions. This indicates unsuccessful improvement of the compressive force by using the Non-shrinkage Concrete Jacketing technique with the details of four main reinforcing bars at the corners and wrapping around with the low-strength wire mesh. All techniques can also improve the deformation of columns, except the Non-shrinkage Concrete Jacketing. Therefore, it can conclude that Reinforced Concrete Jacketing and Carbon Fiber Reinforced Paper techniques can increase the compressive strengths of reinforced concrete columns. In contrast, Non-shrinkage Concrete Jacketing technique is not only ineffective for increasing of the column strength but also no use for improving of the column deformation. It should not be recommended in constructions unless it has a further study on the details of reinforcements.

Keywords: Reinforced Concrete Column, Compressive Force, Deformation, Reinforced Concrete Jacketing, Non-Shrinkage Concrete, Carbon Fiber Reinforced Paper

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัย เรื่องการประเมินกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยปูนซีเมนต์ชนิดไม่หดตัว และวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2554 จาก สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ. ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 พฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	4
2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย	6
2.3 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กหุ้มด้วยวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใยรับแรงอัดตามแนวแกน	7
2.4 การคำนวณค่ากำลังอัดของเสาที่เสริมกำลังด้วย	
วิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยปูนซีเมนต์ชนิดไม่หดตัว	
และวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์	8

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	9
บทที่ 3 การเตรียมตัวอย่างเสาทดสอบ	
3.1 วัสดุและขนาดตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กทดสอบ	12
3.2 การเตรียมตัวอย่างเสาต้นแบบ (C)	13
3.3 การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีการขยายหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก Reinforced Concrete Jacketing (RCJ)	14
3.4 การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีการเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว Non-Shrinkage Cement Jacketing (NS)	15
3.5 การเสริมกำลังด้วยวิธีการพันรอบด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน (F1 และ F2)	15
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล	
4.1 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัด 15x15 เซนติเมตร และการเสริมกำลังแบบต่างๆ	18
4.2 การเปรียบเทียบค่าแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัด 15x15 เซนติเมตร คำนวณตามสมการ ACI และค่าจากผลการทดสอบ	25
4.3 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัด 20x20 เซนติเมตร และการเสริมกำลังแบบต่างๆ	27
4.4 การเปรียบเทียบค่าแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัด 20x20 เซนติเมตร คำนวณตามสมการ ACI และค่าจากผลการทดสอบ	33
4.5 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัด 25x25 เซนติเมตร และการเสริมกำลังแบบต่างๆ	35

4.6 การเปรียบเทียบค่าแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัด 25x25 เซนติเมตร คำนวณตามสมการ ACI และค่าจากผลการทดสอบ	41
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา	42
เอกสารอ้างอิง	44
ภาคผนวก: บทความทางวิชาการ	45
การประเมินกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย วิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว และวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน	

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงสรุปรายละเอียดจำนวนตัวอย่างเสา ค.ส.ล. ที่ใช้ในการศึกษา	17
ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติวัสดุของเสาต้นแบบ (C15)	18
ตารางที่ 4.2 ค่าแรงอัดสูงสุดคำนวณจากสมการและ ผลการทดสอบเสาขนาด 15x15 เซนติเมตร	26
ตารางที่ 4.3 แสดงคุณสมบัติวัสดุของเสาต้นแบบ (C20)	27
ตารางที่ 4.4 ค่าแรงอัดสูงสุดคำนวณจากสมการและ ผลการทดสอบเสาขนาด 20x20 เซนติเมตร	34
ตารางที่ 4.5 แสดงคุณสมบัติวัสดุของเสาต้นแบบ (C25)	35
ตารางที่ 4.6 ค่าแรงอัดสูงสุดคำนวณจากสมการและ ผลการทดสอบเสาขนาด 25x25 เซนติเมตร	41

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 พฤติกรรมรับน้ำหนักตามแนวแกนของเสาสั้นเสริมเหล็กปลอกเดี่ยว	5
รูปที่ 2.2 ลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมด้วยเหล็กปลอกเดี่ยว	5
รูปที่ 3.1 แสดงการผูกเหล็กเสา (เหล็กยื่นและเหล็กปลอก)	13
รูปที่ 3.2 แสดงการประกอบแบบเหล็ก	13
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างเสาคอนกรีตต้นแบบ (C)	14
รูปที่ 3.4 รายละเอียดหน้าตัด เหล็กเสริม และการเสริมกำลัง สำหรับตัวอย่างเสาทดสอบ มิติเป็นมิลลิเมตร	16
รูปที่ 3.5 การทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	17
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบ ระหว่างเสา ต้นแบบ C15 และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธี RCJ15	19
รูปที่ 4.2 การทดสอบและลักษณะการวิบัติของเสาต้นแบบ C15	19
รูปที่ 4.3 ลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วย วิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (RCJ15)	20
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบ ระหว่างเสาต้นแบบ C15 และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธี NS jacketing (NS15)	22
รูปที่ 4.5 ลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วย วิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS15)	22

รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบ ระหว่างเสาต้นแบบ C15 และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีการพันด้วย แผ่นไฟเบอร์คาร์บอน 1 ชั้น (F15-1) และ 2 ชั้น (F15-2)	23
รูปที่ 4.7	ลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วยการพัน แผ่นไฟเบอร์คาร์บอน (F15-1 และ F15-2)	23
รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบ ระหว่างเสาต้นแบบ C15 และเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีทั้งสามวิธี	25
รูปที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบ ระหว่างเสาต้นแบบ C20 และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธี RCJ20	28
รูปที่ 4.10	การทดสอบและลักษณะการวิบัติของเสาต้นแบบ C20	28
รูปที่ 4.11	การทดสอบและลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลัง ด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก RCJ20	29
รูปที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบ ระหว่างเสาต้นแบบ C20 และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธี NS jacketing (NS20)	30
รูปที่ 4.13	ลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัด ด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว NS20	31
รูปที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบ ระหว่างเสาต้นแบบ C20 และเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีการพัน ด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน 1 ชั้น (F20-1) และ 2 ชั้น (F20-2)	31
รูปที่ 4.15	ลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน (F20-1 และ F20-2)	32

รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบ	
ระหว่างเสาต้นแบบ C20 และเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีทั้งสามวิธี	33
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบ	
ระหว่างเสาต้นแบบ C25 และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธี RCJ25	36
รูปที่ 4.18 การทดสอบและลักษณะการวิบัติของเสาต้นแบบ C25	36
รูปที่ 4.19 การทดสอบและลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลัง	
ด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (RCJ25)	37
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบ	
ระหว่างเสา ต้นแบบ C และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธี NS jacketing (NS25)	38
รูปที่ 4.21 ลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัด	
ด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS25)	38
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบ	
ระหว่างเสาต้นแบบ C25 และเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีการพัน	
ด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน 1 ชั้น (F25-1) และ 2 ชั้น (F25-2)	39
รูปที่ 4.23 ลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วย	
แผ่นไฟเบอร์คาร์บอน (F25-1 และ F25-2)	39
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบ	
ระหว่างเสาต้นแบบ C25 และเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีทั้งสามวิธี	40

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจในการทำงานวิจัย

สิ่งก่อสร้างภายในประเทศไทยส่วนใหญ่นิยมใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Structures) ทั้งโครงสร้างขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เช่น งานก่อสร้าง งานก่อสร้างอาคาร บ้านพักอาศัย เป็นต้น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กต่างๆข้างต้นได้จากการนำคอนกรีตและเหล็กเสริมมาหล่อรวมกันในแบบหล่อคอนกรีตในลักษณะที่ทำให้ได้ส่วนของโครงสร้างที่มีพฤติกรรมร่วมกันรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามต้องการ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความแข็งแรง ทนทานต่อสภาวะดินฟ้าอากาศได้ดีกว่าโครงสร้างประเภทอื่น เสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาน้อยกว่า เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่อยู่ในแนวตั้งทำหน้าที่รับแรงอัด หรือทั้งแรงอัดและแรงดัดร่วมกันซึ่งได้มาจากการถ่ายน้ำหนักบรรทุกของคานหรือแผ่นพื้นไว้คานในชั้นต่างๆ แล้วจึงถ่ายน้ำหนักบรรทุกนั้นลงสู่ดินโดยฐานราก หากเสาต้นใดต้นหนึ่งวิบัติก็จะทำให้ส่วนโครงสร้างที่ยึดต่อเนื่องเกิดการชำรุดเสียหาย จนอาจทำให้โครงสร้างทั้งหมดถึงกับพังลงมาได้ เสา(ค.ส.ล.) อาจมีรูปตัดกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีเหล็กเสริมชนิดเหล็กยื่นใช้ช่วยคอนกรีตรับน้ำหนักและมีเหล็กเสริมทางข้างชนิดบล็อกเกลียวซึ่งพันต่อเนื่องกันรอบเหล็กยื่นที่อยู่บนเส้นรอบวงของวงกลม เรียกว่าเสาบล็อกเกลียว (Spiral Column) เหล็กเสริมทางด้านข้างอาจเป็นชนิดบล็อกเดี่ยวพันรอบเหล็กยื่นที่วางในตำแหน่งขอบของรูปสี่เหลี่ยมและเว้นเป็นระยะๆ เรียกว่า เสาบล็อกเดี่ยว (Tied Column) เหล็กเสริมทางข้างช่วยให้เสา ค.ส.ล. รับน้ำหนักได้มากขึ้น และทำให้เสามีพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนเกิดการวิบัติ โดยผู้ออกแบบ ได้พิจารณาการออกแบบเสาให้สามารถรับแรงดังกล่าวได้ตามหลักการวิเคราะห์โครงสร้างและมาตรฐานที่มีอยู่ อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาผ่านไป จุดประสงค์การใช้งานของโครงสร้างนั้นๆ อาจเปลี่ยนไปเช่น ต้องการให้มีความสามารถในการรับกำลังเพิ่มขึ้น เพื่อรองรับการใช้งานที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้าง จึงต้องทำการเสริมกำลัง (Strengthening) แทนการทำลายทิ้งแล้วสร้างใหม่ทั้งหมด หรือเมื่อเวลาผ่านไปความแข็งแรง ความคงทน ตลอดจนความสามารถในการรับน้ำหนักของวัสดุที่ใช้สร้างโครงสร้างนั้นลดลง จึงต้องมีการปรับปรุงกำลังของโครงสร้าง หรือทำการซ่อมแซม (Repairing) โครงสร้างนั้นๆ ให้มีความสามารถในการรับแรงประเภทต่างๆ ตามวัตถุประสงค์ที่ได้ออกแบบไว้ตั้งแต่ต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดและความเหนียวของเสา ค.ส.ล. ที่ถูกเสริมกำลังด้วยวิธีการขยายหน้าตัดเสาแบบ Reinforced Concrete Jacketing (RCJ) และวิธีการขยายหน้าตัดเสาแบบ Non-shrinkage Concrete Jacketing (NS) และวิธีการพันรอบด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน CFRP Jacketing (FRP)
- 2) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลการเสริมกำลังของเสาด้วยวิธีทั้ง 3 วิธีการดังกล่าว
- 3) เพื่อแนะนำวิธีการเสริมกำลังเสา ค.ส.ล. ที่เหมาะสม และเกิดประโยชน์สูงสุด

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) สร้างตัวอย่างทดสอบเสา ค.ส.ล. ขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่เทียบเคียงเสาที่ใช้งานจริงในงานก่อสร้างทั่วไป
- 2) ปรับปรุง เสา ค.ส.ล. เสริมกำลังอัดเสาในข้อ 1 ด้วยวิธี วิธีการขยายหน้าตัดเสาแบบ Reinforced Concrete Jacketing, วิธีการขยายหน้าตัดเสาแบบ Non-shrinkage Cement Jacketing, วิธีการพันรอบด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว CFRP Jacketing ให้เป็นไปตามวิธีปฏิบัติที่ทำจริงในงานก่อสร้าง เช่นการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว จะใช้ช่างผู้ชำนาญการติดตั้งแผ่นไฟเบอร์จากบริษัทผู้ผลิตแผ่นไฟเบอร์ เป็นต้น
- 3) ทดสอบตัวอย่างในข้อ 1) และ 2) ด้วยเครื่องทดสอบ UTM ในห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยบูรพา
- 4) วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดสอบตัวอย่างทั้งหมด โดยประเมินจากความสามารถในการรับกำลังอัด ความเหนียว และลักษณะการพังของเสา
- 5) เสนอแนะแนวทางในการปรับปรุง และ/หรือเสริมกำลังอัดเสา ค.ส.ล. ที่สามารถนำไปปฏิบัติได้จริงในงานก่อสร้าง โดยคำนึงถึงความปลอดภัย ประหยัดและเกิดประโยชน์สูงสุด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมเสา ค.ส.ล. ที่ถูกปรับปรุงและ/หรือเสริมกำลังอัดด้วยวิธีการขยายหน้าตัดเสาแบบ Reinforced Concrete Jacketing และ Non-shrinkage Cement Jacketing และวิธีการพันรอบด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว GFRP Jacketing

- 2) ทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพการปรับปรุงกำลังอัดเสา ค.ส.ล. ด้วยวิธีการขยายหน้าตัดเสาแบบ Reinforced Concrete Jacketing และ Non-shrinkage Cement Jacketing และวิธีการพันรอบด้วยแผ่นไฟเบอร์ใยแก้ว GFRP Jacketing เมื่อขนาดหน้าตัดเสาใหญ่ขึ้น
- 3) ค่ากำลังอัดที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างเสาในห้องปฏิบัติการสามารถนำไปเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดที่ได้จากสมการการออกแบบตามมาตรฐาน ACI และ วสท ที่ใช้ในประเทศไทย
- 4) นำเสนอวิธีการปรับปรุงและ/หรือเสริมกำลังอัดเสา ค.ส.ล. ที่มีประสิทธิภาพ ปลอดภัย และประหยัดสูงสุด

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

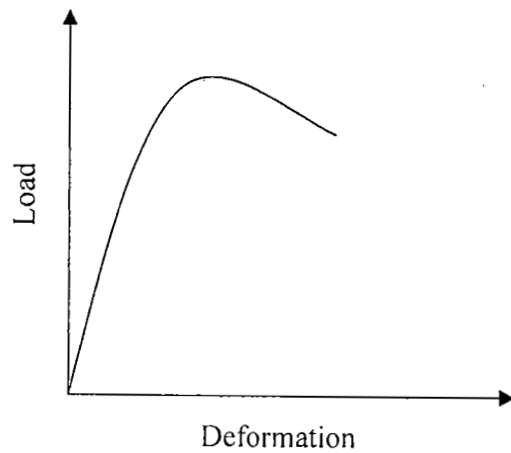
ปกติการเสริมกำลังของเสา ค.ส.ล. มีหลายวิธี เช่น 1) การเสริมภายนอกด้วยคอนกรีตกำลังสูง ซึ่งจะทำให้หน้าหน้ารวมและพื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างเพิ่มขึ้น อาจลดประโยชน์พื้นที่ใช้สอย 2) การเสริมเหล็กรูปพรรณภายนอกองค์อาคาร 3) การเสริมภายนอกด้วยการติดหรือรัดด้วยวัสดุเสริมกำลัง เช่น แผ่นไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังวิธีนี้ไม่ทำให้น้ำหนักเพิ่มขึ้นจากเดิม ไม่ทำให้รูปร่างของโครงสร้างเปลี่ยนไปจากเดิม และเพิ่มความยืดหยุ่นของเสาได้ด้วย แต่ต้องทำด้วยช่างผู้เชี่ยวชาญเท่านั้น ส่วนวิธีที่ 1) และ 2) สามารถทำได้โดยช่างทั่วไป

2.1 พฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

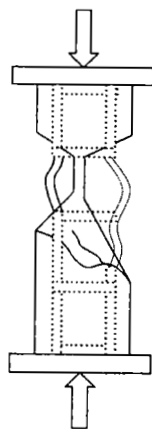
เสาคอนกรีตเสริมเหล็กทำหน้าที่ในการรับน้ำหนักร่วมกัน โดยในช่วงแรก ๆ เหล็กเสริมแกนและคอนกรีตจะมีพฤติกรรมการรับแรงไปในทางเดียวกัน เมื่อเสารับน้ำหนักมากขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่คอนกรีตเกิดการแตกร้าวจะทำให้เหล็กแกนและเนื้อคอนกรีตแยกออกจากกันซึ่งเป็นเหตุให้คอนกรีตและเหล็กแกนเริ่มมีพฤติกรรมการรับแรงไม่สัมพันธ์กันโดยการรับแรงจะเป็นไปตามคุณสมบัติของแต่ละวัสดุจะกระแทงเสาวิบัติ นอกจากนี้เสาคอนกรีตเสริมเหล็กยังมีเหล็กปลอกช่วยโอบรัดเพื่อป้องกันการขยายตัวทางด้านข้างช่วยให้เสารับน้ำหนักได้มากขึ้นและทำให้เสาไม่เกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด เนื่องจากขณะที่เสารับน้ำหนักตามแนวแกนจะมีการหดตัวในแนวการรับน้ำหนักไปด้วยและก็จะเกิดการแบ่งตัวออกทางด้านข้างทำให้เกิดแรงภายในซึ่งทำมุมตั้งฉากกับแนวน้ำหนักที่กระทำ เหล็กปลอกจึงทำหน้าที่โอบรัดการขยายตัวที่เกิดขึ้นนี้ ส่งผลให้สามารถรับน้ำหนักได้สูงขึ้น การวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจะเริ่มจากคอนกรีตที่หุ้มเหล็กปลอกจะแตกหลุดล่อนออกมาและเมื่อให้น้ำหนักกดเสาค่อยไปเสาจจะวิบัติช้า ๆ ทั้งนี้เพราะว่าเหล็กปลอกจะช่วยรักษารูปทรงของเสาไว้

เสาคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อรับน้ำหนักที่กระทำตามแนวแกนตรงศูนย์ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับการเปลี่ยนรูปหรือการหดตัวจะเป็นเส้นตรงในช่วงน้ำหนักกระทำน้อย ๆ ซึ่งหน่วยแรงอัดทั้งในคอนกรีตและในเหล็กเสริมมีค่าอยู่ในช่วงอลาสติก แต่เมื่อเสารับน้ำหนักหรือแรงอัดมากขึ้นโดยทำให้หน่วยแรงอัดในคอนกรีตมีค่าสูงเกินกว่า $0.5f_c$ ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง เนื่องจากมีความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัดและหน่วยการหดตัวของคอนกรีตเริ่มไม่เป็นสัดส่วนกัน แสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อแรงอัดกระทำมากขึ้นจนกระทั่งหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมถึงจุดครากร่วมกับหน่วยแรงอัดในคอนกรีตมีค่าสูงสุด คอนกรีตที่หุ้มเสริมเหล็กจะเริ่มถูกอัดแตก หลุดร่อนออกโดยแรงเฉือนในรูปแบบของแรงดึงทะแยง สำหรับรูปแบบการวิบัติของเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมด้วยเหล็กปลอกเดียวนั้นจะมีการ

สมบัติแบบแรงอัด โดยเสาคอนกรีตที่หุ้มเหล็กปลอกจะหลุดล่อนออกและเสาจะวิบัติอย่างช้า ๆ จากนั้น คอนกรีตแกนเสาจะเกิดการแตกแบบแรงเฉือนทแยงร่วมกับการเกิดการโก่งเดาะทางด้านข้างของเหล็ก แกน ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 พฤติกรรมรับน้ำหนักตามแนวแกนของเสาสั้นเสริมเหล็กปลอกเดี่ยว



รูปที่ 2.2 ลักษณะการวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมด้วยเหล็กปลอกเดี่ยว

2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย

วัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย หรือ FRP (Fiber Reinforced Polymer) ประกอบด้วยวัสดุหลัก 2 ชนิด คือ เส้นใยไฟเบอร์ (Fiber) และเรซินเมทริก (Resin Matrix) โดยที่เส้นใยไฟเบอร์เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรง ส่วนเรซินเมทริกเป็นตัวยึดเส้นใยและเป็นตัวถ่ายแรงให้กระจายสู่เส้นใยไฟเบอร์ นอกจากนี้เรซินยังเป็นตัวประสานให้เส้นใยไฟเบอร์ยึดติดกับพื้นผิวของโครงสร้าง และ ส่งถ่ายแรงจากโครงสร้างสู่เส้นใยไฟเบอร์ ตัวอย่างประเภทเส้นใยไฟเบอร์ได้แก่ เส้นใยแก้ว (Glass) เส้นใยคาร์บอน (Carbon) และเส้นใยอารามิด (Aramid) โดยที่การศึกษาทดลองนี้จะใช้วัสดุเสริมใยคาร์บอนเนื่องจากมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนกำลังแรงดึงต่อน้ำหนักสูงมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อน ละเส้นใยคาร์บอนยังมีความทนทานต่อสภาพความเป็นกรดต่างได้ดีกว่าเส้นใยชนิดอื่นนอกจากนี้เส้นใยอารามิดยังมีกำลังรับแรงดึงได้ต่ำกว่าและตัดยากส่วนเส้นใยแก้วจะมีการสึกกร่อนเนื่องจากการเสียดสีซึ่งจะทำให้ความสามารถในการรับแรงดึงลดลงอีกทั้งยังมีความแข็งมาก จากคุณสมบัติดังกล่าวของเส้นใยคาร์บอนจึงน่าจะมีความเหมาะสมกว่าเส้นใยชนิดอื่นที่น่าจะนำมาซ่อมแซมหรือเสริมกำลัง สำหรับการศึกษาดังกล่าวนี้จะใช้ผลิตภัณฑ์วัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้เครื่องหมายการค้าของบริษัท ซิก้า (ประเทศไทย) จำกัด โดยจะใช้ผลิตภัณฑ์ชนิด SikaWrap-230C ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้เสริมกำลังแบบติดตั้งพันหุ้มหรือโค้งม้วนตามลักษณะของโครงสร้างได้ดี

ส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับการซ่อมแซมหรือการเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใยมี 3 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกคือ เส้นใย ทำหน้าที่ให้ความแข็งแรง เส้นใยโดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติ Linear Elastic to Failure โดยจะไม่มีจุดครากเหมือนเหล็กเสริม โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีเส้นใย 3 ประเภทที่ใช้ในการเสริมกำลังด้านวิศวกรรมโยธา คือ เส้นใยคาร์บอน (Carbon) เส้นใยแก้ว (Glass) และเส้นใยอารามิด (Aramid)

ส่วนที่สองคือ กาว เป็นตัวถ่ายแรงเฉือนระหว่างพื้นผิวโครงสร้างวัสดุโพลีเมอร์ ซึ่งทำให้เกิดพฤติกรรมแบบคอมโพสิตได้อย่างสมบูรณ์ โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้กาว Epoxy ซึ่งประกอบด้วย Resin และ Hardener และสารผสมเพิ่มอื่น ๆ ตามความต้องการ และวัตถุประสงค์ของการทำงาน ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้กาว Sikadur – 330 Impregnating Resin ซึ่งเป็นกาวที่ผลิตให้ใช้คู่กับงาน SikaWrap-230C โดยเฉพาะชนิดนี้จะมีส่วนประกอบด้วยกัน 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นเรซินหรือส่วน A ลักษณะจะมีสีขาวและส่วนที่เป็น Hardener หรือ ส่วน B ลักษณะจะมีสีเทา อัตราส่วนในการผสมจะใช้ A 4 ส่วนต่อ B 1 ส่วน เมื่อผสมกันแล้วจะมีความหนาแน่น 1.31 กิโลกรัมต่อลิตร กาวชนิดนี้จะมีระยะเวลาการใช้งานหลังจากผสมประมาณ 90 นาที ที่อุณหภูมิประมาณ 30 นาที ที่อุณหภูมิประมาณ 35°C ก่อนที่กาวจะแข็งตัว และจะมีระยะระหว่างการทาภาวลงบนพื้นผิวที่ทาไปแล้ว โดยที่กาวสามารถที่จะยึดติดเข้าด้วยกันประมาณ 30 นาทีที่อุณหภูมิประมาณ 35°C กำลังการยึดเกาะกับพื้นผิวคอนกรีตเมื่อทิ้งไว้ 1 วันในอุณหภูมิประมาณ 15°C นั้นจะทำให้การวิบัติเกิดขึ้นที่คอนกรีต

ส่วนที่สามคือ แมตริก (Matrix) เป็นตัวป้องกันวัสดุโพลีเมอร์จากการเสียดสีและการสึกกร่อน จากสภาพแวดล้อม ช่วยยึดเส้นใยและช่วยกระจายแรงสู่เส้นใยสำหรับการศึกษานี้ Sikadur – 330 จะทำหน้าที่เป็นทั้งกาวและเมทริกซ์ร่วมกัน

2.3 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กหุ้มด้วยวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใยรับแรงอัดตามแนวแกน

การหุ้มเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหุ้มด้วยวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย (FRP) นั้นทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดตามแนวแกนของเสาเพิ่มขึ้นและไม่เกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด โดยการพันหุ้มวัสดุเสริมเส้นใยจะพันให้ทิศทางการวางตัวของเส้นใยขวางกับแนวแกนของเสาซึ่งพันหุ้มลักษณะเช่นนี้จะทำให้การโอบรัดของเส้นใยมีพฤติกรรมการโอบรัดแกนเสาเช่นเดียวกับเหล็กปลอกในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก พฤติกรรมการโอบรัดเสาคอนกรีตของเส้นใยจะเริ่มขึ้นต่อเมื่อเสาได้รับแรงอัดจนกระทั่งเสาเกิดการหดตัวและมีการแบ่งขยายออกทางด้านข้างทำให้เส้นใยมีพฤติกรรมคล้ายกับบ่วงที่โอบรัดแกนเสาเพื่อไม่ไห้คอนกรีตหลุดร่อนและแตกกระเปาะ เมื่อให้แรงอัดแก่เสาเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ก็จะทำให้หน่วยแรงดึงในเส้นใยเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงหน่วยแรงดึงประลัยจนทำให้เส้นใยแตกขาดและเสาก็จะเกิดการวิบัติในที่สุด

2.4 การคำนวณค่ากำลังอัดของเสาที่เสริมกำลังด้วย วิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยปูนซีเมนต์ชนิดไม่หดตัว และวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์

ในส่วนการศึกษานี้จะนำเสนอค่ากำลังอัดของเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่คำนวณด้วยสมการของ ACI สมการการออกแบบที่ 1 ใช้สำหรับคำนวณหาแรงอัดสูงสุดของเสาตาม ACI 318-99 [1] ซึ่งกำหนดให้ค่าตัวคูณลดค่าแรงอัดสูงสุดของเสาสั้นคอนกรีต (ϕ) มีค่าเท่ากับ 0.70 สำหรับเสาสั้นที่ใช้เหล็กปลอก แต่สำหรับการศึกษานี้กำหนดให้ใช้ค่า ϕ เท่ากับ 1.0 ทั้งนี้เพื่อต้องการเปรียบเทียบค่าแรงอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กกับผลการทดสอบเสาที่ระดับพังทลายของเสา ส่วนสมการที่ (2) และ (3) เป็นการประยุกต์ใช้สมการการออกแบบที่ (1) โดยเพิ่มแรงอัดที่คำนวณได้จากส่วนพื้นที่ที่ขยายหน้าตัดเพิ่ม ใช้สำหรับคำนวณหาแรงอัดสูงสุดของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก และเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัวตามลำดับ สมการที่ 4-4.3 เป็นชุดสมการที่ใช้ในการหาค่ากำลังอัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวิธีพันด้วยแผ่นไฟเบอร์ ตามข้อเสนอแนะของ ACI 440.2R-02 (บทที่ 11) [2] คำอธิบายตัวแปรต่างๆ แสดงไว้ต่อจากสมการ

$$\phi P_n = \phi(0.85 f'_c A_c + f_y A_{st}) \quad (1)$$

$$\phi P_n = \phi [(0.85 f'_c A_c + f_y A_{st}) + (0.85 f'_{rc} (A_{rc} - A'_{st}) + f_y A'_{st})] \quad (2)$$

$$\phi P_n = \phi [(0.85 f'_c A_c + f_y A_{st}) + (0.85 f'_{ns} (A_{ns} - A'_{st}) + f_y A'_{st})] \quad (3)$$

$$\phi P_n = 0.80 \phi [0.85 \psi_f f'_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (4)$$

$$f'_{cc} = f'_c \left[\left[2.25 \sqrt{1 + 7.9 \frac{f_l}{f'_c}} - 2 \frac{f_l}{f'_c} - 1.25 \right] \right] \quad (4.1)$$

$$f_l = \frac{\kappa_a \rho_f f_{fe}}{2} \quad (4.2)$$

$$\rho_f = \frac{2 m_f (b + h)}{bh} \quad (4.3)$$

A_c = พื้นที่หน้าตัดคอนกรีตเสาต้นแบบ

A_{rc} = พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต (RCJ) ส่วนเพิ่ม

A_{ns} = พื้นที่หน้าตัดคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS) ส่วนเพิ่ม

A_{st} = พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริม ยืน

A'_{st} = พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมยืนในคอนกรีตส่วนเพิ่ม

f'_c = กำลังอัดประลัยคอนกรีตเสาต้นแบบ

f'_{rc} = กำลังอัดประลัยคอนกรีต (RCJ) ส่วนเพิ่ม

f'_{ns} = กำลังอัดประลัยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS) ส่วนเพิ่ม

f_y = กำลังรับแรงดึงที่จุดครากเหล็กเสริมยืน

f'_{cc} = กำลังรับแรงอัดปรากฏของคอนกรีตที่ถูกพันด้วยแผ่นไฟเบอร์

f_l = ค่าหน่วยแรงโอบรัดเนื่องจากการพันแผ่นไฟเบอร์

f_{fe} = ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลของแผ่นไฟเบอร์ ณ จุดที่แผ่นไฟเบอร์ฉีกขาด

- κ_u = ค่าตัวคูณสำหรับรูปหน้าตัด ในกรณีหน้าตัดสี่เหลี่ยมไม่มีการกำหนดค่า κ_u ไว้สำหรับการคำนวณหาค่าแรงอัด แต่ระบุสมการคำนวณค่า κ_u ไว้สำหรับการคำนวณด้านความเหนียวเท่านั้น ดังนั้นสำหรับการศึกษานี้จึงใช้ค่า κ_u เท่ากับ 1.0
- ψ_f = ค่าตัวคูณลดกำลังแนะนำให้ใช้เท่ากับ 0.95
- ρ_f = อัตราส่วนการเสริมแผ่นไฟเบอร์
- n = จำนวนชั้นแผ่นไฟเบอร์
- t_f = ความหนาแผ่นไฟเบอร์
- b = ความกว้างของหน้าตัดเสา
- h = ความยาวของหน้าตัดเสา

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kent และ Park (1971) ได้ เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียด (Stress-strain relationship) ของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด พบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากที่ความเครียดของคอนกรีตมีค่าเกินความเครียดที่ความเค้นสูงสุด (Strain at peak-stress) นอกจากนี้ยังพบว่าความเครียดของคอนกรีตที่จุดประลัยมีค่าค่อนข้างต่ำแสดงให้เห็นว่าความเหนียวของคอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัดมีค่าน้อย นอกจากนี้ Kent และ Park (1971) ยังได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดจากเหล็กเสริมตามขวาง ภายใต้แรงอัดตามแนวแกนที่ไม่มีการเอียงศูนย์จากผลการทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 100 x 150 ซม. และสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10 ซม. และ 12.8 ซม. โดยความเค้นสูงสุดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดตรงกับความเครียดเท่ากับ 0.002

Sheikh และคณะ (1980) ได้ทำการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยการให้แรงอัดตามแนวแกน (Concentric loading) แบบทิศทางเดียว (Monotonic loading) กับตัวอย่างหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสจำนวน 24 ตัวอย่างที่มีลักษณะการจัดเรียงเหล็กเสริมตามยาวและเหล็กเสริมตามขวางต่างกันโดยที่ปลายทั้งสองข้างของตัวอย่างทำการจัดเรียงเหล็กเสริมตามขวางให้มีระยะเรียงน้อยกว่าช่วงกลางซึ่งพิจารณาให้เกิดการวิบัติและทำการขยายหน้าตัดในช่วงนี้ ให้ใหญ่ขึ้นรวมทั้งมีกล่องเหล็กมาหุ้มอยู่ภายนอกอีกชั้นหนึ่งเพื่อเป็นการควบคุมให้เกิดการวิบัติในช่วงกลาง ซึ่งจากการทดลองสามารถคำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตได้โดยหักลบแรงทั้งหมดด้วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กตามยาวที่ได้จากการทดสอบดึงเหล็ก โดยตั้งสมมติฐานที่ว่าความเครียดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตมีค่าเท่ากับความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมตามยาว ณ ตำแหน่งที่ติดกัน และความเครียดมีการกระจายสม่ำเสมอตลอดช่วงที่พิจารณาซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดและจากผลการทดสอบสามารถ

สร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีการโอบรัดขึ้นและได้เสนอในปี ค.ศ. 1982 โดยใช้สมมติฐานของพื้นที่ที่ถูกโอบรัดประสิทธิผล (Effective confined area) เนื่องจากกำลังโอบรัดในกรณีของเหล็กปลอกรูปสี่เหลี่ยมจะมีการกระจายไม่สม่ำเสมอตลอด ปริมาตรของคอนกรีต ซึ่งการประมาณพื้นที่ที่ไม่ถูกโอบรัดสามารถคำนวณได้จากส่วนโค้งของสมการพาราโบลา

Amir Mirmiran and Mohsen Shahaway (1997) ได้ศึกษาการรับกำลังของเสาจะเพิ่มขึ้นแปรผันตรงตามจำนวนรอบที่โอบรัดด้วย FRP โดยทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 152 มม. สูง 305 มม. จำนวน 30 ตัวอย่าง 6 ตัวอย่างเป็นเสาคอนกรีตธรรมดาและอีก 24 ตัวอย่างเป็นเสาคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยแผ่น FRP จากการศึกษาพบว่าแผ่น FRP ที่ห่อหุ้ม คอนกรีตด้านนอกมีส่วนทำให้เกิดโอบรัด (Confinement) เป็นผลให้กำลัง (Strength) และความเหนียว (Ductility) ของเสาคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นโดยแปรผันตามจำนวนชั้นของแผ่น FRP โดยกำลังและความเหนียวของคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความหนาหรือจำนวนชั้นของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่เพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้แล้วยังพบอีกว่าการเกิดรอยแตกในแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่พันหุ้มคอนกรีตอยู่รอบนอกเปรียบเสมือนเครื่องเตือนการวิบัติ

Tarek H. Almusallam (2007) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของเสาคอนกรีตที่มีกำลังอัดที่แตกต่างกัน ที่มีการเสริมกำลังด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP) ภายใต้แรงอัดแกนเดียวโดยการดำเนินงานใช้ตัวอย่างเสาคอนกรีตทั้งหมด 54 ตัวอย่าง โดยถูกแบ่งออกเป็นหกกลุ่มซึ่งแต่ละกลุ่มมีการโอบรัดด้วย GFRP จำนวน 1 ชั้น และ 3 ชั้น ซึ่งผลการทดสอบพบว่าการโอบรัดด้วย GFRP เพิ่มค่ากำลังอัดของเสาคอนกรีตทรงกระบอกที่มีกำลังอัดต่ำได้มากกว่าเสาคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง ตัวอย่างเช่น เสาคอนกรีต M1 ที่โอบรัดด้วย GFRP 3 ชั้นสามารถเพิ่มกำลังได้ถึง 110 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ เสาคอนกรีต M2 ที่มีค่ากำลังอัดสูงกว่าสามารถเพิ่มกำลังได้เพียง 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อโอบรัดด้วย GFRP จำนวน 3 ชั้นเท่านั้น แนวโน้มเช่นนี้สามารถนำมาประกอบกับความจริงที่ว่า คอนกรีตที่มีกำลังอัดที่แตกต่างกัน คอนกรีตที่มีกำลังสูงจะมีความแข็ง (Stiffness) ที่เพิ่มขึ้นทั้งในทิศทางตามแนวแกนและตั้งฉากกับแนวแกน ส่งผลให้เสาคอนกรีตที่มีกำลังอัดต่ำเกิดการขยายตัวทางด้านข้างมากกว่าเสาคอนกรีตที่มีกำลังอัดสูง การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงตามแนวตั้งฉากกับแนวแกนของคอนกรีตทรงกระบอก อาจก่อให้เกิดการวิบัติของเสาคอนกรีตเนื่อง จากการฉีกขาดของแผ่น GFRP กับคอนกรีตที่ถูกอัดแตก (Crushing) นอกจากนี้รูปแบบการวิบัติ พบว่าในกลุ่มเสาตัวอย่างที่มีค่ากำลังอัดปานกลางประมาณ 600-800 กก./ตร.ซม. ลักษณะของการวิบัติจะเกิดเนื่องจากแผ่น GFRP ฉีกขาดก่อน แต่สำหรับคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดสูงประมาณ 1000 กก./ตร.ซม. ขึ้นไปการวิบัติจะเกิดจากคอนกรีตถูกอัดแตก (Crushing) ของแกนคอนกรีต ก่อนที่แผ่น GFRP จะเกิดการฉีกขาด

อาานนท์และคณะพบว่าเมื่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็กถูกเสริมด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอนเสริมกำลัง ทำให้เสามีกำลังอัดเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20-60 ขึ้นอยู่กับลักษณะหน้าตัดของเสา และมีระยะยวบตัวของเสา เพิ่มขึ้น 60%-100%

บทที่ 3 การเตรียมตัวอย่างเสาทดสอบ

ในการศึกษานี้ได้ทำการหล่อตัวอย่างเสา ค.ส.ล. ทดสอบต้นแบบ (C) 3 หน้าตัด ขนาด 15x15, 20x20, และ 25x25 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร จำนวนหน้าตัดละ 5 ตัวอย่าง รวมตัวอย่างทั้งสามหน้าตัดมีจำนวนเท่ากับ 15 ตัวอย่าง เมื่อบ่มอายุคอนกรีตจนได้อายุ 28 วัน นำตัวอย่างเสา ค.ส.ล. ต้นแบบแต่ละหน้าตัด จำนวนหน้าตัดละ 4 ตัวอย่างมาทำการเสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก Reinforced Concrete Jacketing (RCJ) จำนวน 1 ตัวอย่าง ทำการเสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว Non-shrinkage Concrete Jacketing (NS) จำนวน 1 ตัวอย่าง ส่วนที่เหลือทำการเสริมกำลังด้วยวิธีการพันรอบด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน CFRP Jacketing 1 ชั้น จำนวน 1 ตัวอย่าง (F1) และทำการเสริมกำลังด้วยวิธีการพันรอบด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน CFRP Jacketing 2 ชั้น จำนวน 1 ตัวอย่าง (F2) จากนั้นทำการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของเสาทั้ง 15 ตัวอย่าง

3.1 วัสดุและขนาดตัวอย่างเสา คอนกรีตเสริมเหล็กทดสอบ

1. คอนกรีตใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดประลัยประมาณ 240 กก./ตร.ซม. ซึ่งเป็นกำลังคอนกรีตที่ใช้งานโดยทั่วไปในการก่อสร้างที่ได้มาตรฐาน

2. แผ่นไฟเบอร์เสริมกำลังใช้แผ่น (CFRP: Carbon Fiber Reinforcement Polymer)

3. ซีเมนต์ชนิดไม่หดตัว (Non-Shrink Cement) ให้กำลังสูงไม่หดตัว จึงแนบแน่นกับเนื้อคอนกรีตเดิม และจับตัวกับเหล็กเสริมได้ดี

4. เหล็กข้ออ้อยมาตรฐาน SD30 เป็นเหล็กเสริมหลักทั้งหมด และใช้เหล็กกลมมาตรฐาน SD24 เป็นเหล็กกรัด

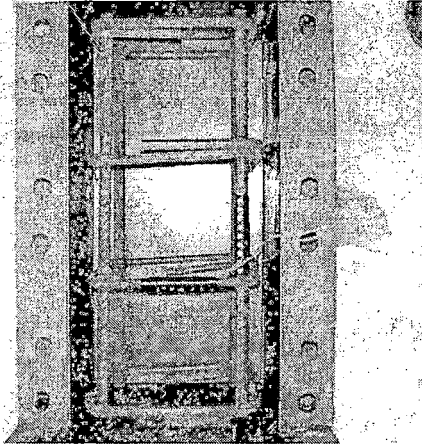
5. หินเกล็ดผสมกับซีเมนต์ชนิดไม่หดตัว (Non-Shrink Cement) ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ล้างปราศจากฝุ่นผง

ขนาดหน้าตัดเสาที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จะเป็นหน้าตัดเสาสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งประกอบด้วย หน้าตัด 3 ขนาด มี ความกว้าง x ยาว x สูง ดังนี้

- เสาขนาดเล็ก : 15x15x40 ซม. จำนวน 5 ตัวอย่าง
- เสาขนาดกลาง : 20x20x40 ซม. จำนวน 5 ตัวอย่าง
- เสาขนาดใหญ่ : 25x25x40 ซม. จำนวน 5 ตัวอย่าง

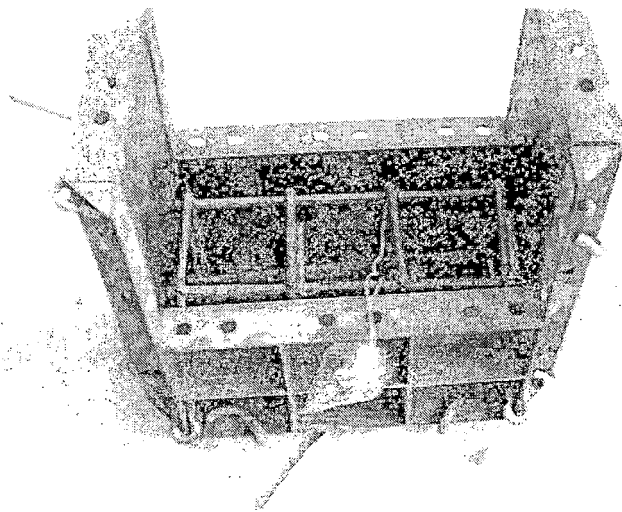
3.2 การเตรียมตัวอย่างเสาต้นแบบ (C)

1. เตรียมเหล็กเสริมข้ออ้อยขนาดหน้าตัด 12 มิลลิเมตรจำนวน 4 เส้นต่อ 1 ต้น ความยาวแต่ละเส้น 40 เซนติเมตรและเหล็กปลอกเส้นกลม 9 มิลลิเมตร ตัดเป็นปลอกเสา ขนาดหน้าตัดเสา 15 x15 เซนติเมตร ขนาด 20 x 20 เซนติเมตร และขนาด 25 x 25 เซนติเมตร และผูกเหล็กเสาดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงการผูกเหล็กเสา (เหล็กยื่นและเหล็กปลอก)

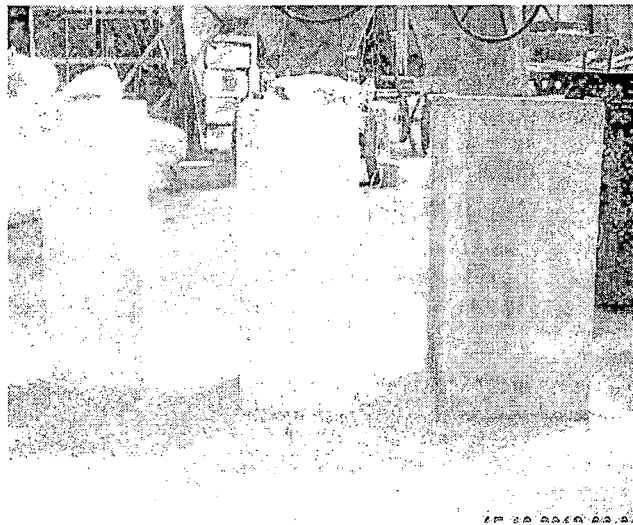
2. นำแบบเหล็ก ประกอบเป็นแบบด้านข้างจำนวน 3 ด้านและด้านหัวกับท้าย ดังรูปที่ 3 ยึดให้แน่นเพื่อป้องกัน เมื่อเทคอนกรีตแล้วแบบแตกหรือตัวอย่างทดสอบเสียรูปร่างจะเกิดผลเสียกับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3.2 แสดงการประกอบแบบเหล็ก

3. เมื่อตัวอย่างทดสอบประกอบเข้าเรียบร้อยแล้วให้นำคอนกรีตมาเทในการทำตัวอย่างทดสอบครั้ง
นี้จะได้คอนกรีตผสมเสร็จใช้กำลังอัดสูงสุด 240 กก.ต่อตร.ซม. ค่าการยุบตัว (Slump) 10 - 12
เซนติเมตร เป็นค่าทั่วไปที่ใช้ในการเทคอนกรีตเสา และเก็บลูกคอนกรีตทรงกลม 15 x 30 เซนติเมตร เพื่อ
นำไปทดสอบหาข้อมูล วางแบบที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้วในแนวนอนส่วนด้านที่เปิดไว้เป็นด้านบนเพื่อเท
คอนกรีตและใช้เหล็กกระทุ้งให้แน่นปรับแต่งระดับผิวหน้าของคอนกรีตให้เรียบร้อย นำกระสอบชุบน้ำมา
คลุมไว้หรือเก็บตัวอย่างทดสอบไว้ในที่ร่มไม่ให้ผิวหน้าคอนกรีตกระทบแสงแดด

4. เมื่อครบ 48 ชม.แกะแบบออกและนำตัวอย่างคอนกรีตไปบ่มโดยแช่น้ำที่อายุ 28 วันเป็นอัน
เสร็จสิ้นการทำตัวอย่างทดสอบ แสดงรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างเสาคอนกรีตต้นแบบ (C)

3.3 การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีการขยายหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก Reinforced Concrete Jacketing (RCJ)

1. นำเสาตัวอย่าง ค.ส.ล. ที่อายุ 28 วัน ทำให้พื้นผิวโดยรอบหยาบโดยใช้เหล็กสกัดผิวของชิ้น
ตัวอย่างให้หยาบ วัตถุประสงค์เพื่อต้องการให้มีการยึดเกาะกันได้อย่างดี

2. นำตัวอย่างทดสอบที่เตรียมไว้มาเสริมหน้าตัดโดยรอบด้วยคอนกรีตมีกำลังอัดประลัย 400 กก.
ต่อตร.ซม. เสริมเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตรจำนวน 4 เส้น และเหล็กปลอกเส้นกลม
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร เสริมโดยรอบมีระยะจากผิวคอนกรีตประมาณ 2.5 เซนติเมตร ดังนั้น
จะทำให้ขนาดหน้าตัดเสามีความยาวเพิ่มขึ้นด้านละประมาณ 5 เซนติเมตร

3. ผสมคอนกรีตมีกำลังอัดสูงสุด 400 กก.ต่อตร.ซม. ผสมด้วยเครื่องเพราะใช้ปริมาณน้อยความชื้นเหลว (Slump) 10 – 12 เซนติเมตร เก็บตัวอย่างลูกคอนกรีตทรงกระบอก 15 x 30 เซนติเมตร นำคอนกรีตเทเข้าไปในแบบที่เตรียมไว้กระทั่งและแต่งผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบร้อยคลุมด้วยกระสอบชุบน้ำหรือ ไม้ให้ตัวอย่างทดสอบโดนแสงแดด

4. เมื่อครบ 48 ชม.แกะแบบออกและนำตัวอย่างตัวอย่างเสา ค.ส.ล.ไปบ่มโดยแช่น้ำ จนครบตามกำหนดนำมาทดสอบต่อไป

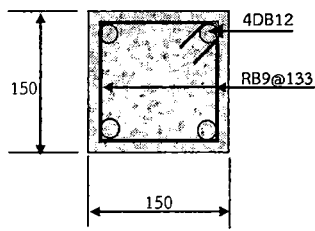
3.4 การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีการเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว Non-Shrinkage Cement Jacketing (NS)

มีวิธีการเสริมเหมือนกับวิธีการขยายหน้าตัดเสาด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete jacketing) แต่ต่างกันตรงที่ใช้วัสดุเป็นซีเมนต์ชนิดไม่หดตัว (Non-Shrinkage Cement Jacketing) ผสมกับหินเกล็ดประมาณ 10% ของน้ำหนักซีเมนต์ที่ใช้ผสม ใส่เหล็ก RB 9 ที่มุมทั้ง 4 ด้าน และมีเหล็กตระแกรงกันร้าวเพื่อยึดเหล็กยื่นและป้องกันคอนกรีตที่เทใหม่แตก แต่ไม่มีเหล็กปลอก ขั้นตอนการปฏิบัติงานเหมือนกับการเสริมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กทุกประการ ขนาดเสาจะเพิ่มขึ้นด้านละประมาณ 5 เซนติเมตร

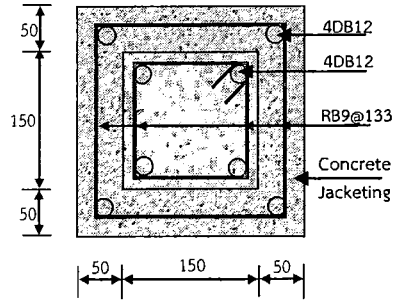
3.5 การเสริมกำลังด้วยวิธีการพันรอบด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน (F1 และ F2)

นำตัวอย่างเสา ค.ส.ล. ที่อายุ 28 วันพันด้วยแผ่นไฟเบอร์ชนิด CFRP 1 ชั้นจำนวนหน้าตัดละ 1 ตัวอย่าง และ 2 ชั้น จำนวนหน้าตัดละ 1 ตัวอย่าง โดยให้บริษัทผู้ผลิตแผ่นไฟเบอร์เป็นผู้ติดตั้งเพราะต้องการความชำนาญและเป็นไปตามมาตรฐาน ACI 440.2R-02

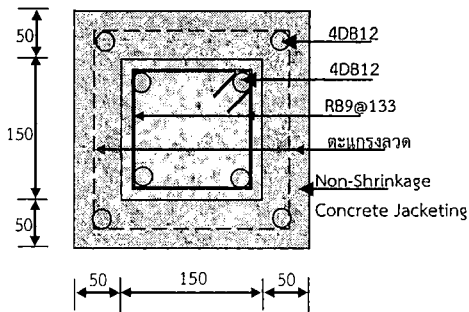
ตารางที่ 3.1 แสดงสรุปรายละเอียดจำนวนตัวอย่างเสา ค.ส.ล. ที่ใช้ในการศึกษา ส่วนรูปที่ 3.1 แสดงรายละเอียดหน้าตัดและการเสริมกำลังแบบต่างๆ โดยเป็นภาพวาดของตัวอย่างหน้าตัดขนาด 15x15 เซนติเมตร ทั้งนี้หน้าตัดขนาด 20x20 และ 25x25 มีรายละเอียดเช่นเดียวกัน



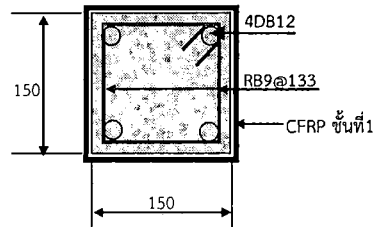
หน้าตัดตัวอย่างเสาต้นแบบ C



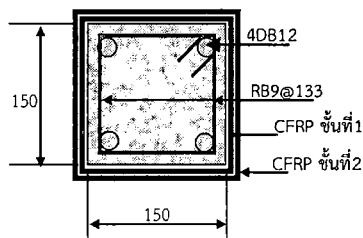
หน้าตัดตัวอย่างเสา RCJ



หน้าตัดตัวอย่างเสา NS



หน้าตัดตัวอย่างเสา F1



หน้าตัดตัวอย่างเสา F2

รูปที่ 3.4 รายละเอียดหน้าตัด เหล็กเสริม และการเสริมกำลัง สำหรับตัวอย่างเสาทดสอบ มิติเป็น มิลลิเมตร

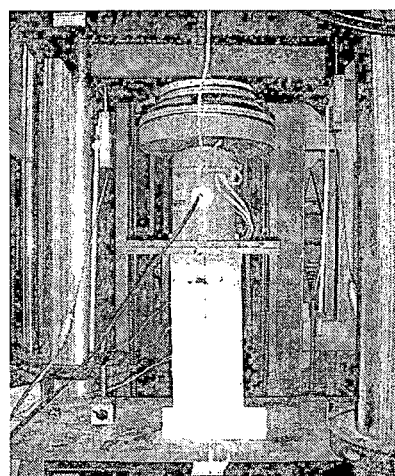
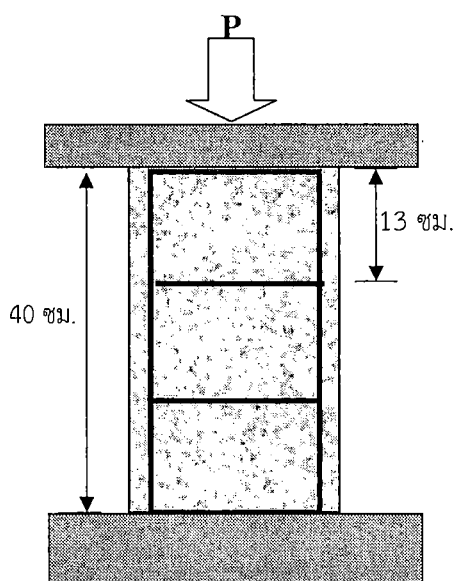
ตารางที่ 3.1 แสดงสรุปรายละเอียดจำนวนตัวอย่างเสา ค.ส.ล. ที่ใช้ในการศึกษา

ขนาดหน้าตัด เสาทดสอบ(ซม)	เสาทดสอบ ต้นแบบ	Reinforced Concrete Jacketing	Non- Shrinkage Cement Jacketing	CFRP Jacketing 2 layer	CFRP Jacketing 2 layer	รวม
15x15	1	1	1	1	1	5
20x20	1	1	1	1	1	5
25x25	1	1	1	1	1	5

3.6 นำเสาที่เตรียมไว้ด้วยวิธีต่าง ๆ จำนวน 30 ตัวอย่างมาทดสอบหาหน้าหนักบรรทุกด้วยการกด โดยใช้เครื่องUTM จนกระทั่งเสาแตกร้าว บันทึกค่าแรงกดและระยะหดตัวของเสา1 รูปที่ 2 แสดงการติดตั้งตัวอย่างเสาทดสอบ อุปกรณ์วัดค่าแรงอัดและอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวของเสา

3.7 นำผลการทดสอบที่ได้ในข้อ 3.6 มาทำการวิเคราะห์ เปรียบเทียบ พฤติกรรมการรับแรงของเสาทั้ง 30 ตัวอย่างที่ออกแบบและเสริมกำลังตามวิธีการทั้ง 3 วิธีการดังกล่าวข้างต้น โดยจะมุ่งเน้นที่พฤติกรรมการพัง ความสามารถในการรับแรงกดของเสาและความเหนียวของเสาที่เสริมกำลังในแต่ละวิธี

3.8 เปรียบเทียบค่าแรงอัดที่ได้จากการทดสอบกับสมการการออกแบบตามมาตรฐาน ACI และวสท. ที่ใช้อยู่ในประเทศไทย



รูปที่ 3.5 การทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

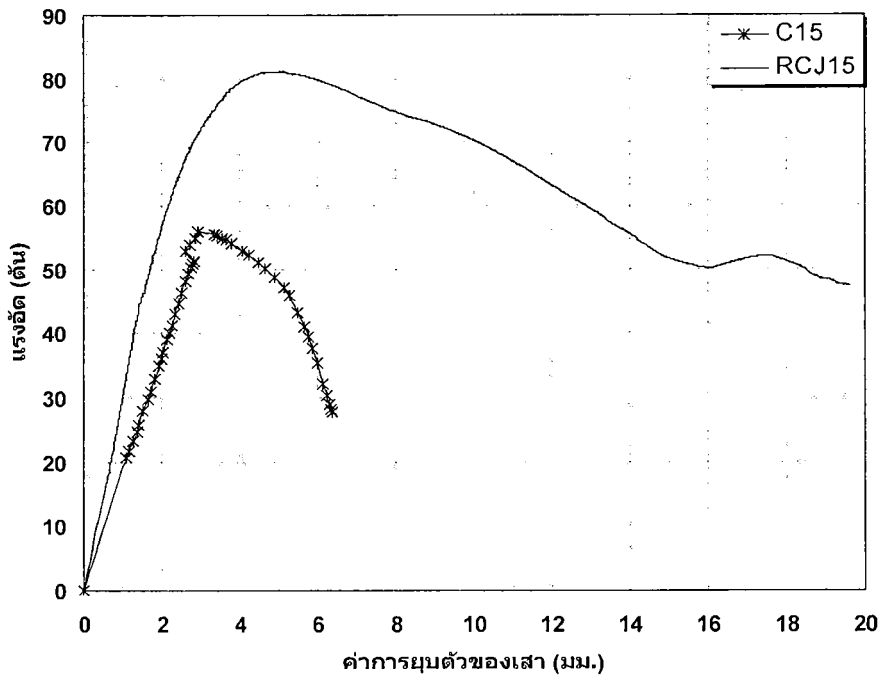
บทที่ 4
ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัด 15x15 เซนติเมตร และการเสริมกำลังแบบต่างๆ

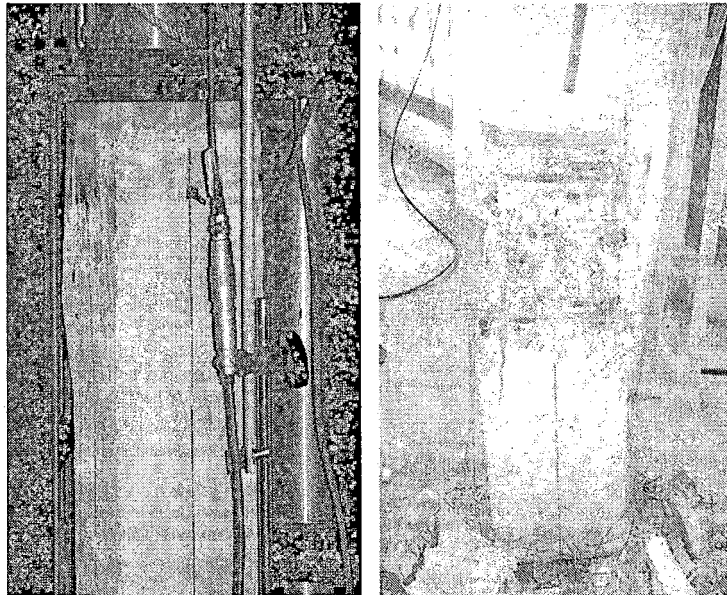
กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยคอนกรีตที่ใช้สำหรับหล่อเสาต้นแบบ (C15) และกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยคอนกรีตที่ใช้สำหรับพื้นที่หน้าตัดส่วนเพิ่มของการเสริมกำลังทั้งสองแบบ กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอก ที่ได้จากการทดสอบวัสดุตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ และกำลังรับแรงดึงของแผ่นไฟเบอร์คาร์บอนจากบริษัทผู้ผลิตแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติวัสดุของเสาต้นแบบ (C15)

เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (15x15)	C15	RCJ15	NS15	F15-2	F15-2
ชนิดวัสดุ					
กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยคอนกรีต (f'_c) ที่ 28 วัน (ksc)	116	116	116	116	116
กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย Concrete Jacket (f'_{rc}) ที่ 28 วัน (ksc)	-	107	-	-	-
กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย Non-Shrinkage Jacket (f'_{ns}) ที่ 28 วัน (ksc)	-	-	295	-	-
กำลังรับแรงดึงเหล็กเสริมหลัก SD30 (ksc) (f_y)	4600	4600	4600	4600	4600
กำลังรับแรงดึงเหล็กกรัด (ปลอก) SD24 (ksc) (f_y^{st})	4300	4300	4300	4300	4300
กำลังรับแรงดึง Sika Wrap 230C/45 (ksc) (f_{fe})	-	-	-	43832	43832

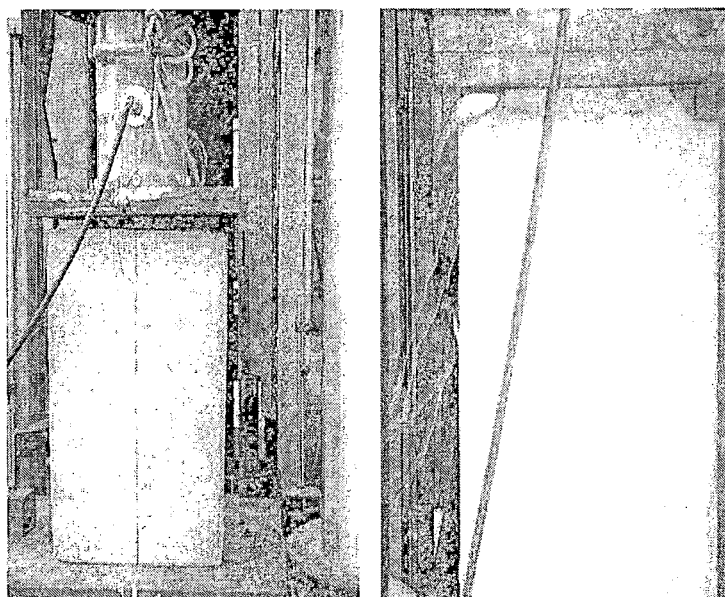


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบระหว่างเสา ต้นแบบ C15 และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธี RCJ15



รูปที่ 4.2 การทดสอบและลักษณะการวิบัติของเสาต้นแบบ C15

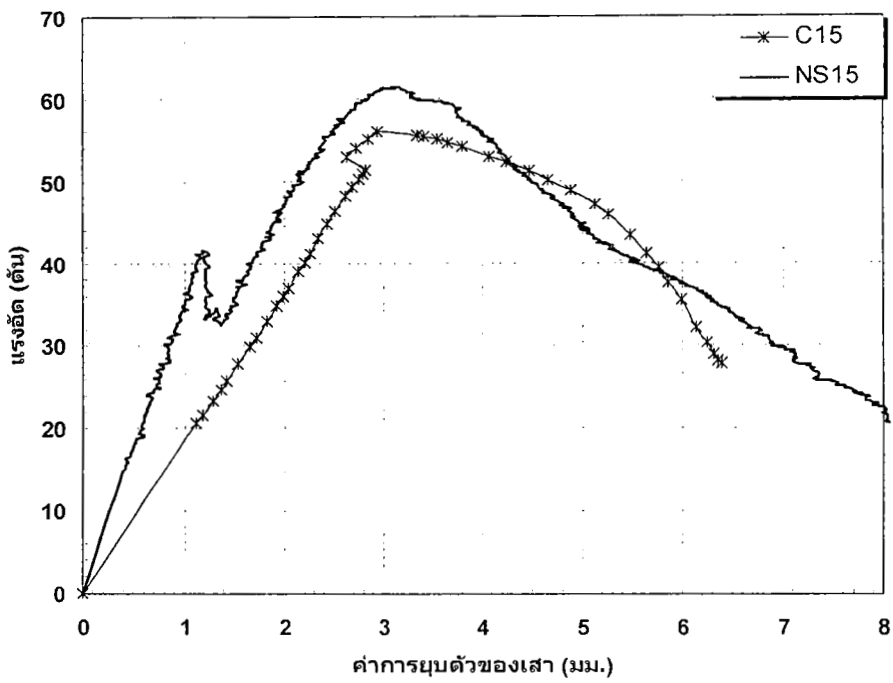
ผลทดสอบประกอบด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับแรงอัดของเสา ค.ส.ล. และระยะยวบตัวของเสา จากรูปที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงอัดสูงสุดที่เสาทั้งสองต้นรับได้ พบว่าเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (RCJ15) สามารถรับแรงอัดได้มากขึ้นประมาณ 40% และมีค่าความชันของเส้นกราฟในช่วงยืดหยุ่นมากกว่าเสาต้นแบบ C15 ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเส้นกราฟทั้งสองเส้นในช่วงที่เลยจุดสูงสุดไปแล้วพบว่าความสามารถในการรับแรงอัดของเสา RCJ15 จะลดลงอย่างช้าๆ มีระยะหดตัวหลังจากการครากของหน้าตัดมากกว่าเมื่อเทียบกับเสา C15 ที่ลดลงอย่างรวดเร็วกว่ามาก จึงสรุปได้ว่า เสา RCJ15 แสดงพฤติกรรมเหนียวมากกว่าเสา C15 รูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงลักษณะการวิบัติของเสาต้นแบบ C15 และ ลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก RCJ15 การวิบัติของเสา C15 เริ่มจากการแตกร้าวที่ผิวคอนกรีตเป็นแนวเส้นตรงจากด้านบนลงสู่ด้านล่างที่แรงอัดประมาณ 52-54 ตัน จากนั้นรอยแตกขยายกว้างขึ้นและยาวขึ้นอย่างรวดเร็ว มีชิ้นส่วนคอนกรีตหลุดออกมาเป็นแผ่นๆ ที่สภาวะนี้การรับแรงอัดของเสาลดลงอย่างรวดเร็ว เสา RCJ15 รับแรงอัดสูงสุดได้เท่ากับ 82 ตัน ส่วนลักษณะการวิบัติของเสา RCJ15 มีความแตกต่างจากเสา C15 กล่าวคือเมื่อรอยร้าวเกิดขึ้นที่ผิวคอนกรีตเป็นแนวเส้นตรงจากด้านบนลงล่าง ที่สภาวะนี้การรับแรงอัดของเสาลดลงอย่างช้าๆ และมีระยะยวบตัวมากขึ้นถึง 16 มม. เมื่อพิจารณาพบว่ารอยร้าวนี้ไม่ขยายตัวกว้างขึ้นอย่างรวดเร็วแต่ค่อยๆ เกิดยาวขึ้น และเมื่อหยุดการทดสอบในส่วนของเปลือกคอนกรีตที่เพิ่มหน้าตัดเข้าไปยังคงสภาพไม่มีการกระเทาะหรือหลุดออก จึงสรุปว่าเสา RCJ15 มีลักษณะการพังที่ดีกว่าเสา C15 มาก และแสดงพฤติกรรมเหนียว



รูปที่ 4.3 ลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (RCJ15)

ส่วนรูปที่ 4.4 เป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดระหว่างเสาต้นแบบ C15 และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธี NS jacketing เมื่อพิจารณาจากค่าความชันของเส้นกราฟในช่วงยืดหยุ่น พบว่ามี ลักษณะใกล้เคียงกับเสา RCJ15 กล่าวคือมีค่าความชันของเส้นกราฟในช่วงยืดหยุ่นมากกว่าเสาต้นแบบ C15 ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มขึ้นจากเสาต้นแบบ C15 ด้านละ 5 เซนติเมตร ส่วนค่าแรงอัดสูงสุด ที่เสาทั้งสองต้นรับได้พบว่าเสา NS15 สามารถรับแรงอัดได้มากขึ้นเพียงประมาณ 7% เมื่อเทียบกับเสา C15 ทั้งๆที่มีการขยายหน้าตัดเท่ากับเสา RCJ15 และใช้คอนกรีตชนิดไม่หดตัวในส่วนของการขยายหน้า ตัดซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตชนิดนี้เท่ากับ 295 กก./ตร.ซม. มากกว่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ย คอนกรีตที่ใช้กับเสา RCJ15 ถึง 2.76 เท่าแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และเมื่อพิจารณาเสา C15 และ NS15 ในช่วงเลยจุดสูงสุดไปแล้วพบว่า ความสามารถในการรับแรงอัดของเสา NS15 และเสา C15 มีลักษณะ เหมือนกัน แสดงว่าการเพิ่มหน้าตัดเสาด้วยวิธีนี้ไม่มีประสิทธิภาพ

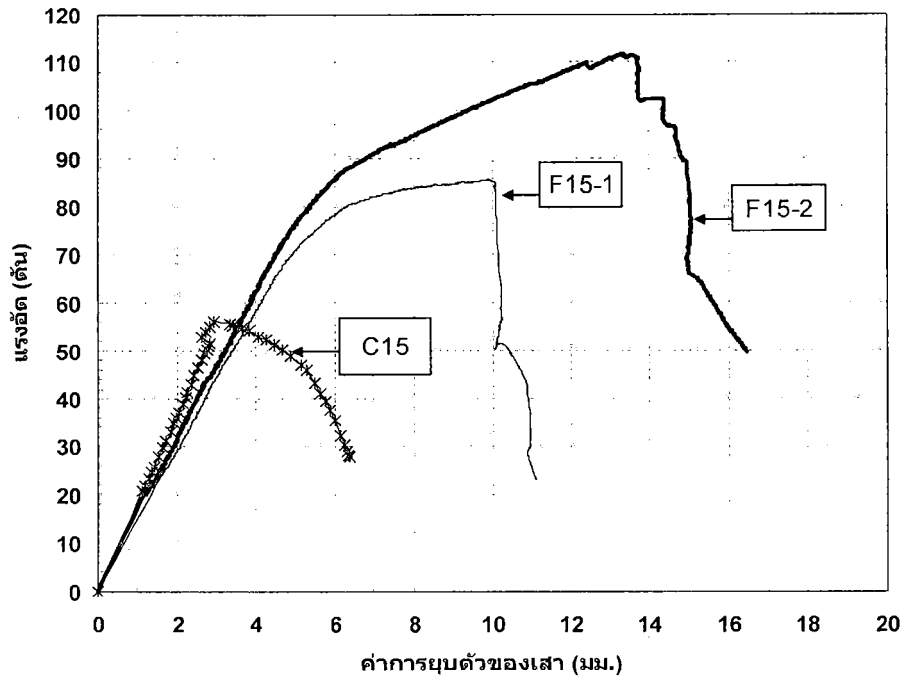
เมื่อพิจารณาลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS15) แสดงในรูปที่ 4.5 ประกอบเส้นกราฟรับแรงอัดของเสาชนิดนี้ พบว่ามีลักษณะการพังที่น่าสนใจ มากคือที่แรงกดประมาณ 40 ตัน ในส่วนของเปลือกคอนกรีตชนิดไม่หดตัวเกิดรอยแตกขึ้น รอยแตกนี้มี ขนาดใหญ่ เกิดจากด้านบนถึงล่างและเกิดขึ้นรวดเร็วไม่ใช่ลักษณะรอยเล็กแล้วค่อยๆขยายออก ทำให้เสา รับแรงอัดลดลงทันทีเหลือเท่ากับประมาณ 32 ตัน จากนั้นเมื่อส่วนเสาแกนในรับแรงอัดต่อ แรงอัดจะ ค่อยๆเพิ่มขึ้นช้าๆ เสา NS15 จะรับแรงอัดได้สูงสุดเท่ากับ 62 ตัน จากนั้นเมื่อเสาแกนในเริ่มวิบัติ ความสามารถในการรับแรงอัดจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในส่วนรอยแตกของเปลือกนั้นจะขยายใหญ่มากขึ้น จนเมื่อเสาแกนในวิบัติ เปลือกคอนกรีตชนิดไม่หดตัวนี้จะแยกออกเป็นสองชิ้นส่วนอิสระจากกัน และยัง แยกออกจากเสาแกนในได้อย่างสมบูรณ์แสดงดังรูปภาพ เมื่อพิจารณาผิวด้านในของเปลือกคอนกรีตที่ สัมผัสกับผิวคอนกรีตของเสาแกนใน พบว่าค่อนข้างเรียบไม่ขรุขระหรือหยาบ อาจแสดงให้เห็นว่าไม่เกิด การถ่ายแรงเฉือนระหว่างเสาแกนในและเปลือกคอนกรีตชนิดไม่หดตัว ทำให้ความสามารถในการรับ แรงอัดของเสาเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับเสา C15 และมีประสิทธิภาพในการรับแรงอัดได้น้อยกว่าเสา RCJ15 มาก เมื่อพิจารณาลักษณะการพังของเสาแกนในพบว่ามีลักษณะเหมือนเสา C15 ทุกประการ คือมี รอยแตกที่ผิวคอนกรีตและหลุดออกเมื่อเริ่มเคลื่อนย้ายเสาหลังการทดสอบ แสดงว่าเสา NS15 นี้แสดง พฤติกรรมแบบไม่เหนียวคล้ายกับเสา C15 สรุปโดยรวมแล้วพบว่า การเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัด ของเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัวโดยใช้รายละเอียดการเสริมเหล็กแสดงดังรูปที่ 3.4 โดยใช้ลวดตะแกรงแทนเหล็กปลอกนั้นไม่สามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดให้เสาคอนกรีตและไม่สามารถ ช่วยเพิ่มระยะยุบตัวของเสาได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบระหว่างเสาต้นแบบ C15 และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธี NS jacketing (NS15)



รูปที่ 4.5 ลักษณะการฉาบติดของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS15)



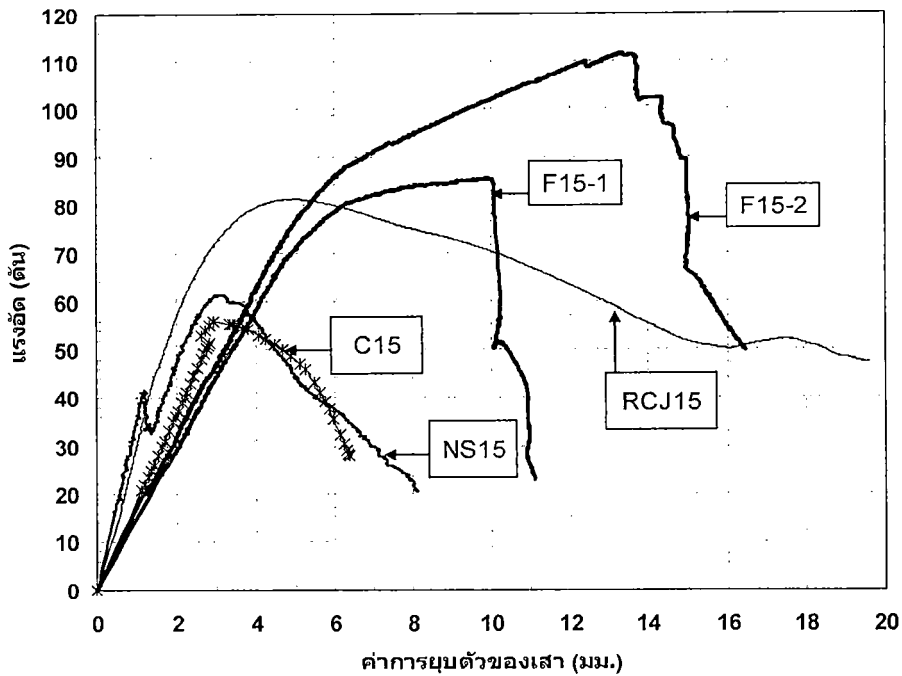
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบระหว่างเสาต้นแบบ C15 และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน 1 ชั้น (F15-1) และ 2 ชั้น (F15-2)



รูปที่ 4.7 ลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วยการพันแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน (F15-1 และ F15-2)

รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดระหว่างเสาต้นแบบ C15 และเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอนจำนวน 1 ชั้น และ 2 ชั้น เมื่อพิจารณาจากค่าความชันของเส้นกราฟทั้งสามเส้นในช่วงยืดหยุ่น พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยเสาต้นแบบ C15 มีค่าความชันของเส้นกราฟในช่วงยืดหยุ่นมากกว่าเสา F15-1 และ F15-2 เล็กน้อย ทั้งนี้เพราะในการติดแผ่นไฟเบอร์ต้องทำการเตรียมผิวคอนกรีตและลบมุมทั้ง 4 ด้านของเสาออกด้วยรัศมีความโค้งประมาณ 1 ซม. ส่วนค่าแรงอัดสูงสุดที่เสา F15-1 และ F15-2 รับได้ พบว่าเสา F15-1 สามารถรับแรงอัดได้มากขึ้นประมาณ 54% เมื่อเทียบกับเสา C15 และ เสา F15-2 สามารถรับแรงอัดได้มากขึ้นประมาณ 100% เมื่อเทียบกับเสา C15 และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเสา F15-1 และ F15-2 เสาที่ถูกเสริมด้วยแผ่นไฟเบอร์ 2 ชั้นสามารถรับแรงอัดได้มากกว่า 1 ชั้นประมาณ 30% นอกจากนี้เสา F15-1 และ F15-2 มีระยะการยุบตัวที่เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเสา F15-1 และ F15-2 รับแรงอัดเกินจุดพิกัดยืดหยุ่นไปแล้วพบว่าเสา F15-1 มีระยะการยุบตัวที่แรงอัดสูงสุดเพิ่มขึ้น 100% และเสา F15-2 มีระยะการยุบตัวที่แรงอัดสูงสุดเพิ่มขึ้นประมาณ 170% เมื่อเทียบกับการยุบตัวของเสาที่แรงอัด ณ จุดพิกัดยืดหยุ่นของเสาทั้งสองต้น แสดงว่าแผ่นไฟเบอร์สามารถเพิ่มความเหนียวให้กับเสาต้นแบบได้ด้วย ส่วนลักษณะการวิบัติของเสาทั้งสองต้นนี้ จะเกิดการฉีกขาดของแผ่นไฟเบอร์ เนื่องจากแรงดึงในแนวเส้นรอบรูปตามทิศทางของเส้นใยไฟเบอร์ โดยก่อนถึงการวิบัติแบบสมบูรณ์จะมีเสียงการขาดของเส้นใยไฟเบอร์ แสดงในรูปที่ 4.7 อย่างไรก็ตามการฉีกขาดของแผ่นไฟเบอร์จะเกิดขึ้นเพียงช่วงสั้นๆ ก่อนถึงจุดวิบัติสุดท้าย ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าการรับแรงอัดของเสาทั้ง F15-1 และ F15-2 จะลดลงอย่างรวดเร็วในขณะที่การยุบตัวของเสาเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นลักษณะการวิบัติแบบเปราะฉับพลัน (Brittle failure)

รูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดและการยุบตัวของเสาทั้ง 5 ตัวอย่าง (C15, RCJ15, NS15, F15-1, และ F15-2) จากรูปแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดของเสาด้วยการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์มีประสิทธิภาพสูงสุด และการเสริมเสากำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS) ที่ใช้รายละเอียดการเสริมเหล็กแสดงดังรูปที่ 3.4 มีประสิทธิภาพน้อยที่สุดไม่สามารถเพิ่มกำลังอัดให้เสาต้นแบบได้ ส่วนเมื่อพิจารณาจากลักษณะการวิบัติและความเหนียว พบว่าการเสริมเสากำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กให้พฤติกรรมการวิบัติที่ดีที่สุด โดยการพังจะเป็นไปในลักษณะค่อยๆเกิดขึ้นทีละน้อยไม่รวดเร็ว ฉับพลัน รุนแรง ถึงแม้ว่าการเสริมเสากำลังด้วยวิธีพันเสาด้วยแผ่นไฟเบอร์ช่วยเพิ่มความเหนียวให้เสาได้ดีแต่ลักษณะการพังเมื่อแผ่นไฟเบอร์ฉีกขาดเป็นการวิบัติแบบฉับพลันและรุนแรง ทำให้เสาคอนกรีตมีกำลังลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนการเสริมเสากำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัวไม่ได้ช่วยให้พฤติกรรมการพังของเสาต้นแบบดีขึ้นแต่อย่างใด



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบระหว่างเสาต้นแบบ C15 และเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีทั้งสามวิธี

4.2 การเปรียบเทียบค่าแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัด 15x15 เซนติเมตร คำนวณตามสมการ ACI และค่าจากผลการทดสอบ

ในส่วนการศึกษานี้จะนำเสนอค่ากำลังอัดของเสาสั้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่คำนวณด้วยสมการของ ACI กล่าวไว้ในบทที่ 2 สมการการออกแบบที่ 1 ใช้สำหรับคำนวณหาแรงอัดสูงสุดของเสาตาม ACI 318-99 [1] ซึ่งกำหนดให้ค่าตัวคูณลดค่าแรงอัดสูงสุดของเสาสั้นคอนกรีต (ϕ) มีค่าเท่ากับ 0.70 สำหรับเสาสั้นที่ใช้เหล็กปลอก แต่สำหรับการศึกษานี้กำหนดให้ใช้ค่า ϕ เท่ากับ 1.0 ทั้งนี้เพื่อต้องการเปรียบเทียบค่าแรงอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กกับผลการทดสอบเสาที่ระดับพังทลายของเสา ส่วนสมการที่ (2) และ (3) เป็นการประยุกต์ใช้สมการการออกแบบที่ (1) โดยเพิ่มแรงอัดที่คำนวณได้จากส่วนพื้นที่ที่ขยายหน้าตัดเพิ่ม ใช้สำหรับคำนวณหาแรงอัดสูงสุดของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก และเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัวตามลำดับ สมการที่ 4-4.3 เป็นชุดสมการที่ใช้ในการหาค่ากำลังอัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวิธีพันด้วยแผ่นไฟเบอร์ ตามข้อเสนอแนะของ ACI 440.2R-02 (บทที่ 11) [2] คำอธิบายตัวแปรต่างๆ แสดงไว้ต่อจากสมการ

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าแรงอัดสูงสุดของเสาต้นแบบ (C15) เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (RCJ15) เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS15) เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน 1 ชั้น และ 2 ชั้น (F15-1 และ F15-2) คำนวณตามสมการที่ (1)-(4) เปรียบเทียบกับค่าแรงอัดสูงสุดที่ได้จากผลการทดสอบ ค่าแรงอัดสูงสุดของเสา C15, RCJ15, F15-1, และ F15-2 ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างจริงประมาณ 5%-30% ดังแสดงในตาราง เมื่อใช้ค่าตัวคูณลดค่าแรงอัดสูงสุดของเสาเส้นคอนกรีต (ϕ) เท่ากับ 1.0 ดังนั้นในกรณีใช้ ϕ เท่ากับ 0.7 สำหรับเสาเส้นที่ใช้เหล็กปลอก ค่าแรงอัดสูงสุดที่ได้จากสมการของ ACI จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบประมาณ 7%-40% ซึ่งคำนวณเป็นส่วนปลอดภัย (Factor of Safety) สำหรับเสา C15 ได้ประมาณ 1.87 สำหรับเสา RCJ15 ได้ประมาณ 2.0 สำหรับเสา F15-1 ได้ประมาณ 1.5 และสำหรับเสา F15-2 ได้ประมาณ 1.6

แต่สำหรับเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS15) ค่าแรงอัดที่คำนวณได้จากสมการมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากผลการทดสอบมากถึง 94% แสดงว่าสมการที่ 3 ไม่สามารถใช้ในการคำนวณหาค่าแรงอัดสูงสุดของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัวได้

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงอัดสูงสุดคำนวณจากสมการและผลการทดสอบเสาขนาด 15x15 เซนติเมตร

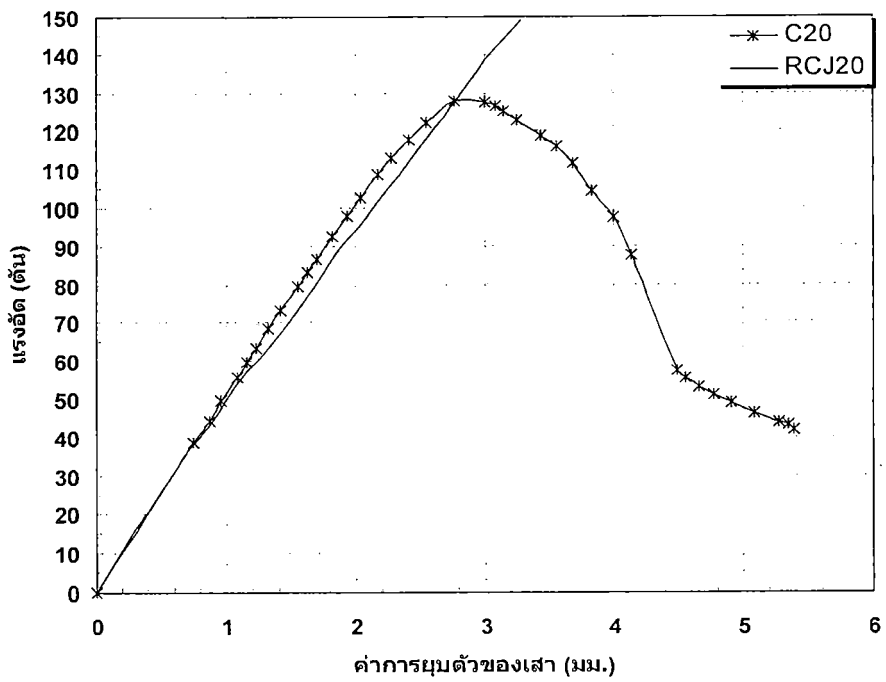
เสา	ϕ	$f'_c, f'_{rc}, f'_{ms}, f'_{cc}$ (ksc)	P_n (สมการ) (ตัน)	P_n (ทดสอบ) (ตัน)	% ต่างต่าง
C15	1.0	116	43	56	23.2
RCJ15	1.0	107	57	80	28.7
NS15	1.0	295	120	62	-93.5
F15-1	1.0	425	82	62	4.7
F15-2	1.0	529	82	112	13.4

4.3 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัด 20x20 เซนติเมตร และการเสริมกำลังแบบต่างๆ

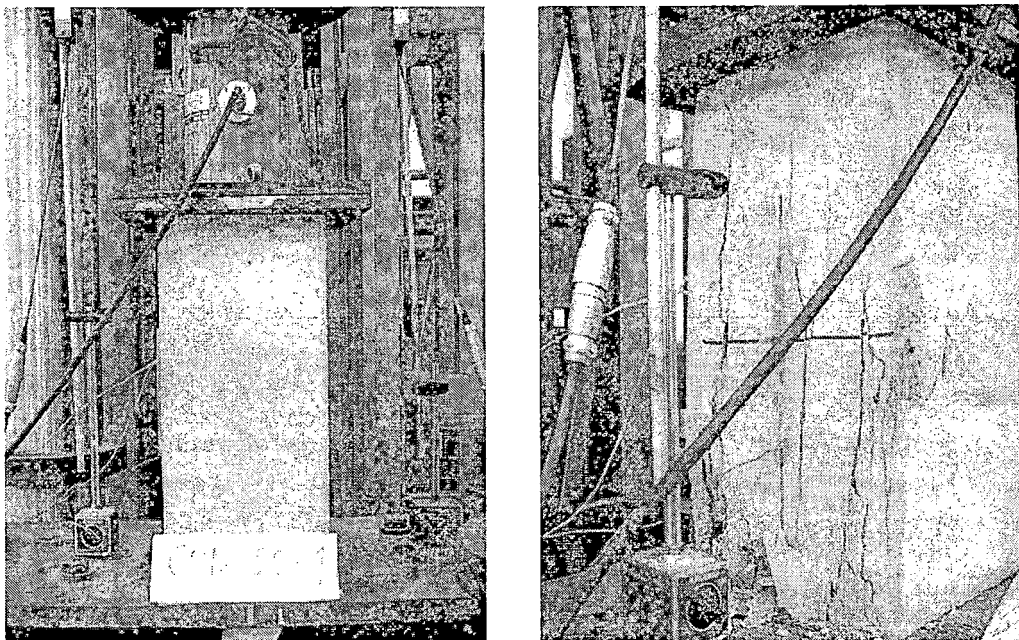
ในส่วนนี้นำเสนอผลการทดสอบเสาคอนกรีตหน้าตัด 20x20 เซนติเมตร ที่เสริมกำลังแบบต่างๆ กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยคอนกรีตที่ใช้สำหรับหล่อเสาต้นแบบ (C20) และกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยคอนกรีตที่ใช้สำหรับพื้นที่หน้าตัดส่วนเพิ่มของการเสริมกำลังทั้งสองแบบ กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอก ที่ได้จากการทดสอบวัสดุตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ และกำลังรับแรงดึงของแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน จากบริษัทผู้ผลิตแสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงคุณสมบัติวัสดุของเสาต้นแบบ (C20)

ชนิดวัสดุ	เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (20x20)				
	C20	RCJ20	NS20	F20-1	F20-2
กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยคอนกรีต (f'_c) ที่ 28 วัน (ksc)	210	210	210	210	210
กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย Concrete Jacket (f'_{rc}) ที่ 28 วัน (ksc)	-	110	-	-	-
กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย Non-Shrinkage Jacket (f'_{ns}) ที่ 28 วัน (ksc)	-	-	295	-	-
กำลังรับแรงดึงเหล็กเสริมหลัก SD30 (ksc) (f_y)	4600	4600	4600	4600	4600
กำลังรับแรงดึงเหล็กกรัด (ปลอก) SD24 (ksc) (f_y')	4300	4300	4300	4300	4300
กำลังรับแรงดึง Sika Wrap 230C/45 (ksc) (f_{fe})	-	-	-	43832	43832

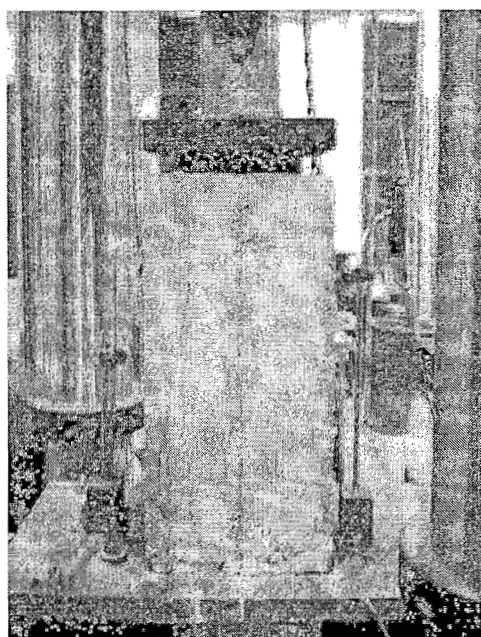
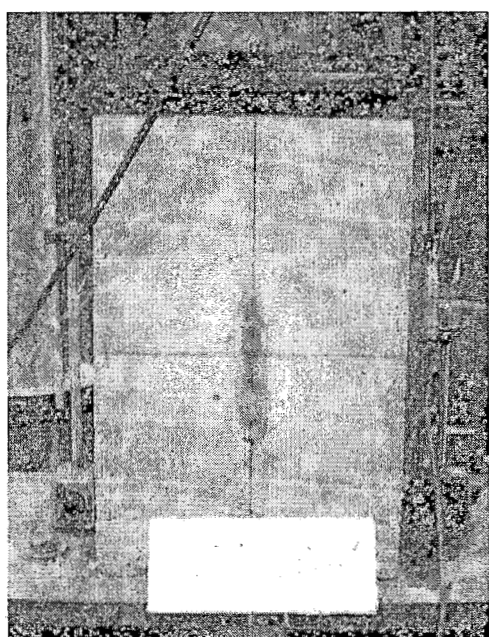


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบระหว่างเสาดันแบบ C20 และ เสาดันที่เสริมกำลังด้วยวิธี RCJ20



รูปที่ 4.10 การทดสอบและลักษณะการวิบัติของเสาดันแบบ C20

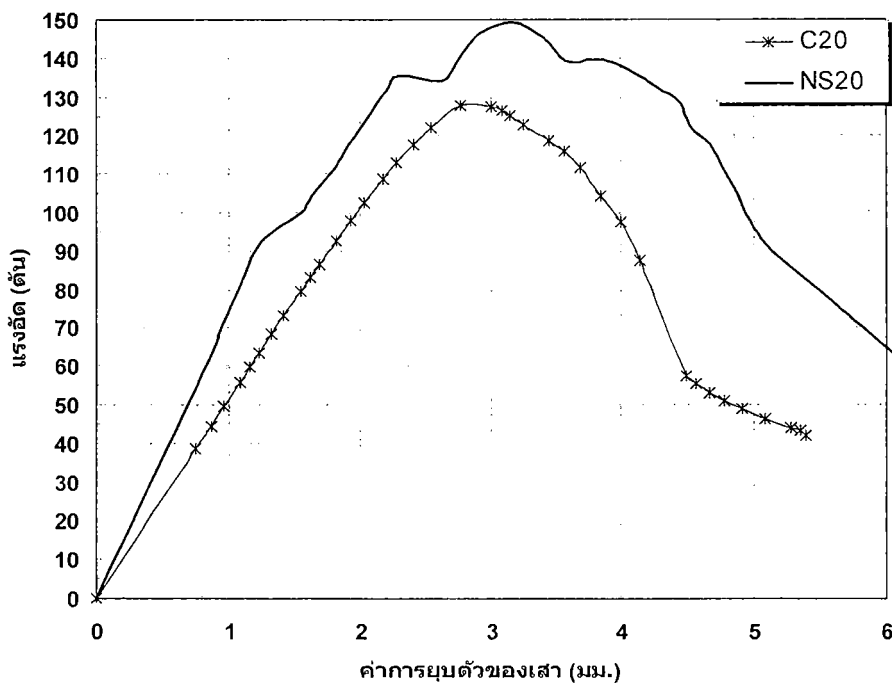
ผลทดสอบแสดงด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับแรงอัดของเสา ค.ส.ล. และระยะยวบตัวของเสา เนื่องจากเครื่องทดสอบ ณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาสามารถให้แรงกระทำได้สูงสุด 150 ตัน ดังนั้นจากรูปที่ 4.9 พบว่าเสาดั้งแบบ C20 รับแรงอัดได้สูงสุดเท่ากับ 128 ตัน และเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก RCJ20 รับแรงอัดได้เท่ากับ 150 ตัน เนื่องจากเครื่องทดสอบหยุดการทำงานที่แรงนี้ และพิจารณาจากการพังในรูปที่ 4.10 และ 4.11 ประกอบพบการแตกที่เสา เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงอัดสูงสุดที่เสาทั้งสองต้นรับได้ พบว่าเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก RCJ20 สามารถรับแรงอัดได้มากขึ้นประมาณ 17% ค่าความชันของเส้นกราฟในช่วงยืดหยุ่นของเสาดั้งแบบ C20 มีค่าใกล้เคียงกับเสา RCJ20 ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มขึ้น



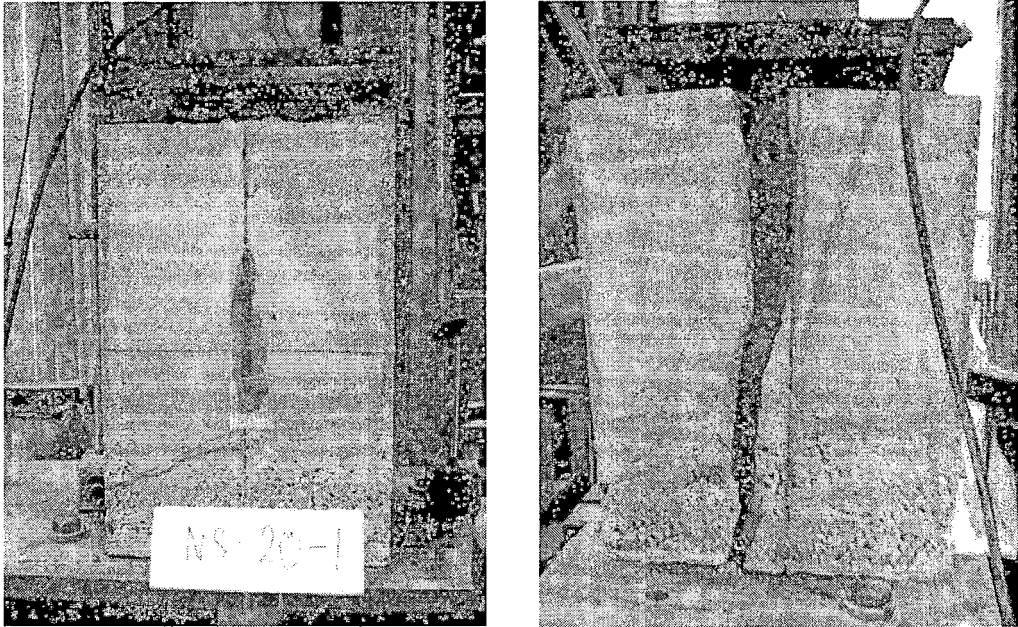
รูปที่ 4.11 การทดสอบและลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก RCJ20

ส่วนรูปที่ 4.12 เป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดระหว่างเสาดั้งแบบ C20 และเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธี NS jacketing (NS20) เมื่อพิจารณาจากค่าความชันของเส้นกราฟในช่วงยืดหยุ่น พบว่ามีค่าความชันของเส้นกราฟในช่วงยืดหยุ่นมากกว่าเสาดั้งแบบ C20 ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มขึ้นจากเสาดั้งแบบ C20 ด้านละ 5 เซนติเมตร ส่วนค่าแรงอัดสูงสุดของเสา NS20 มีค่าเท่ากับ 150 ตัน คิดเป็นค่าแรงอัดที่เพิ่มขึ้นประมาณ 17% เมื่อเทียบกับเสา C20 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS) แสดงในรูปที่ 4.13 ประกอบเส้นกราฟรับแรงอัดของเสาชนิดนี้ พบว่าที่แรงกดประมาณ 95 ตัน ในส่วนของเปลือกคอนกรีต

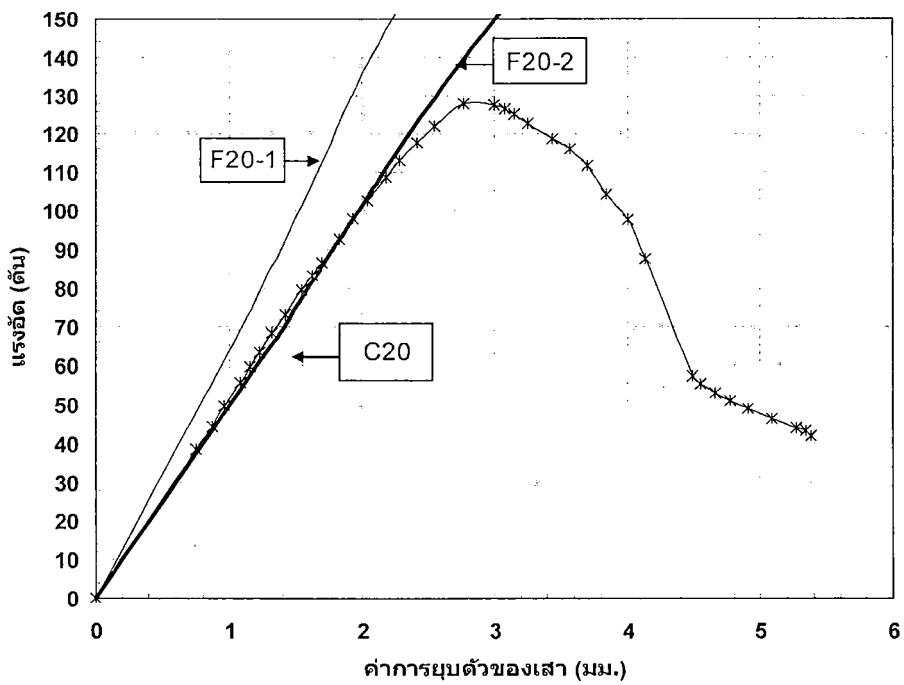
ชนิดไม่หัดตัวเกิดรอยแตกขึ้น แล้วรอยแตกค่อยๆขยายขนาดขึ้น ในสภาวะนี้ส่วนของเสาแกนในสามารถรับแรงอัดได้ต่อ แรงอัดจะค่อยๆเพิ่มขึ้นช้าๆ เสา NS20 จะรับแรงอัดได้สูงสุดเท่ากับ 150 ตัน จากนั้นเมื่อเสาแกนในเริ่มวิบัติความสามารถในการรับแรงอัดจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในส่วนรอยแตกของเปลือกนั้นจะขยายใหญ่มากขึ้นจนเมื่อเสาแกนในวิบัติ เปลือกคอนกรีตชนิดไม่หัดตัวนี้จะแยกออกเป็นสองชั้นส่วนอิสระจากกัน และยังแยกออกจากเสาแกนในได้อย่างสมบูรณ์แสดงดังรูปภาพ เมื่อพิจารณาผิวด้านในของเปลือกคอนกรีตที่สัมผัสกับผิวคอนกรีตของเสาแกนใน พบว่าค่อนข้างเรียบไม่ขรุขระหรือหยาบ อาจแสดงให้เห็นว่าไม่เกิดการถ่ายแรงเฉือนระหว่างเสาแกนในและเปลือกคอนกรีตชนิดไม่หัดตัว เมื่อพิจารณาลักษณะการพังของเสาแกนในพบว่ามีลักษณะเหมือนเสา C20 ทุกประการ คือมีรอยแตกที่ผิวคอนกรีตและหลุดออกเมื่อเริ่มเคลื่อนย้ายเสาหลังการทดสอบ ลักษณะคล้ายกับเสาหน้าตัด 15x15 ซม.



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบระหว่างเสาต้นแบบ C20 และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธี NS jacketing (NS20)

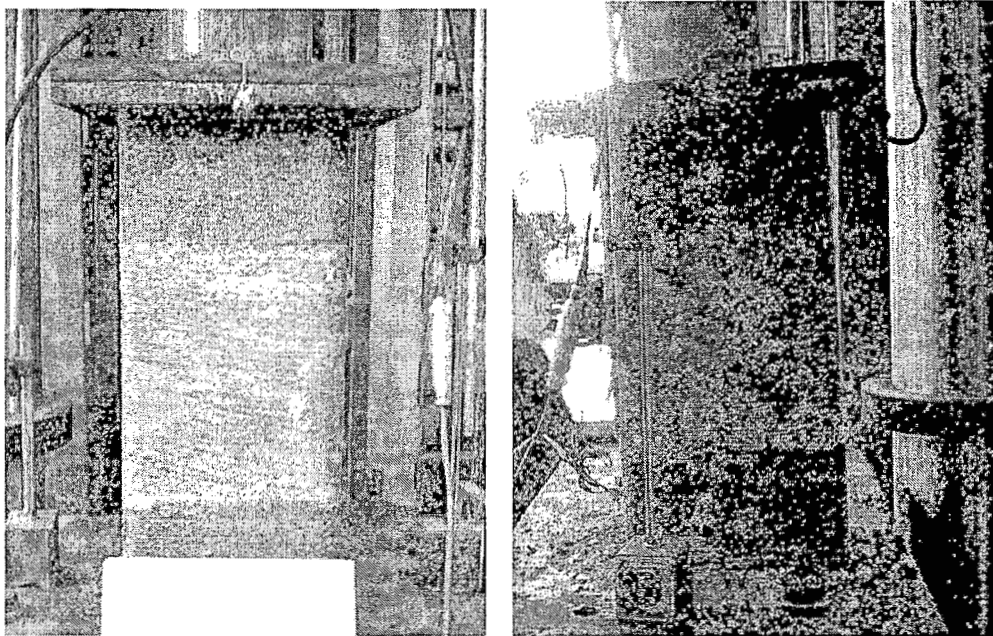


รูปที่ 4.13 ลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว NS20



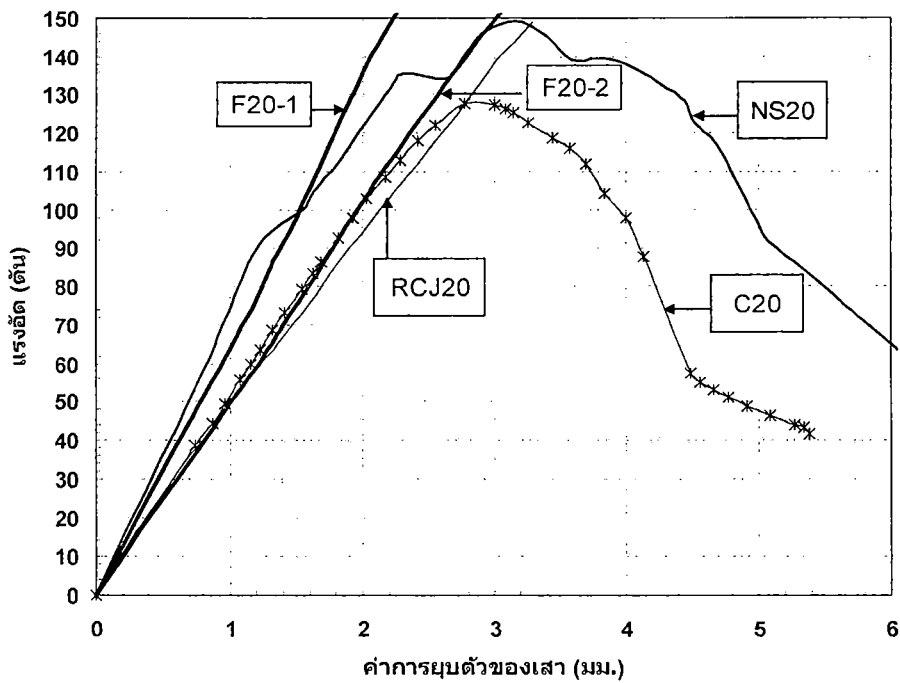
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบระหว่างเสาต้นแบบ C20 และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน 1 ชั้น (F20-1) และ 2 ชั้น (F20-2)

รูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดระหว่างเสาต้นแบบ C20 และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอนจำนวน 1 ชั้น และ 2 ชั้น ส่วนค่าแรงอัดสูงสุดที่ เสา F20-1 และ F20-2 รับได้ พบว่าเสาทั้งสองต้นสามารถรับแรงอัดได้มากขึ้นเกินกว่า 17% เมื่อเทียบ กับเสา C20 เนื่องจากเครื่องทดสอบหยุดการทำงานจึงไม่สามารถทดสอบหาแรงอัดวิบัติของเสาทั้งสองได้ รูปที่ 4.15 แสดงลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน (F20-1 และ F20-2) พบว่ายังไม่มียรอยขาดของแผ่นไฟเบอร์เหมือนเสา F15-1 และ F15-2



รูปที่ 4.15 ลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน (F20-1 และ F20-2)

รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดและการยุบตัวของเสาทั้ง 5 ตัวอย่าง (C20, RCJ20, NS20, F20-1, และ F20-2) จากรูปแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดของเสา ด้วยการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์มีประสิทธิภาพสูงสุด และการเสริมเสากำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีต ชนิดไม่หดตัว (NS) ที่ใช้รายละเอียดการเสริมเหล็กแสดงดังรูปที่ 3.4 มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด ไม่สามารถ เปรียบเทียบพฤติกรรมการพังของเสาทั้ง 5 ต้นได้เนื่องจากไม่สามารถให้แรงจนถึงวิบัติของเสา RCJ20 F20-1 F20-2 ได้



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบระหว่างเสาคอนกรีตเสริมกำลังด้วยวิธีทั้งสามวิธี

4.4 การเปรียบเทียบค่าแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัด 20x20 เซนติเมตร คำนวณตามสมการ ACI และค่าจากผลการทดสอบ

การคำนวณหาค่าแรงอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กตาม ACI 318-99 [1] และ ACI 440.2R-02 (บทที่ 11) [2] โดยใช้สมการที่แสดงไว้ในบทที่ 2 กำหนดค่าตัวคูณลดค่าแรงอัดสูงสุดของเสาคอนกรีต (ϕ) มีค่าเท่ากับ 1.0 แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก RCJ20 F20-1 และ F20-2 มีค่าแรงอัดสูงสุดจากการทดสอบมากกว่า 150 ตัน จึงไม่สามารถเปรียบเทียบค่าความแตกต่างกับค่าการคำนวณจากสมการได้

ตารางที่ 4.4 ค่าแรงอัดสูงสุดคำนวณจากสมการและผลการทดสอบเสาขนาด 20x20 เซนติเมตร

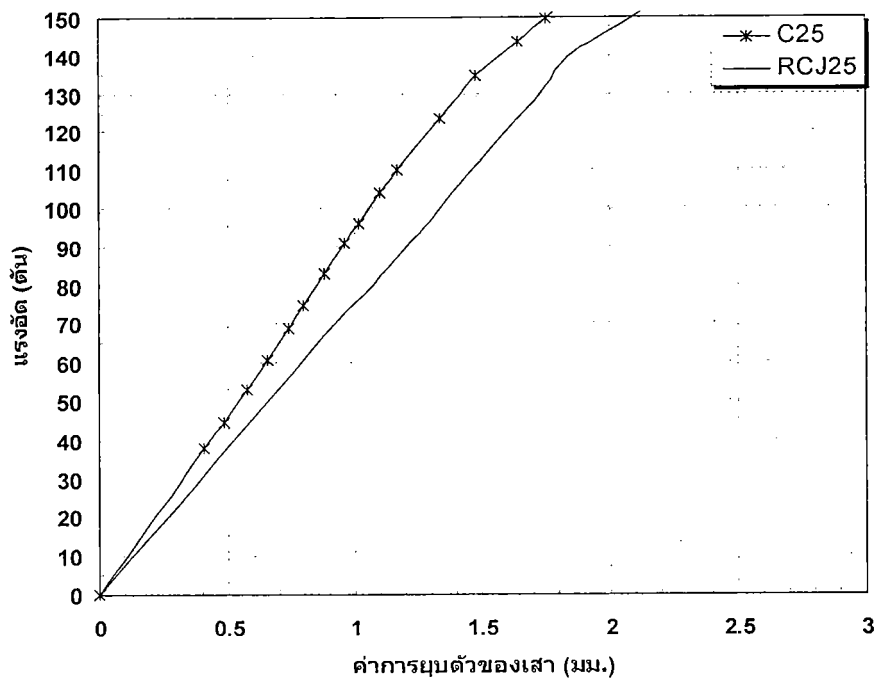
เสา	ϕ	$f'_c, f'_{rc}, f'_{ns}, f'_{cc}$ (ksc)	P_n (สมการ) (ตัน)	P_n (ทดสอบ) (ตัน)	% ต่างต่าง
C	1.0	210	92	128	28.1
RCJ	1.0	110	160	>150	-
NS	1.0	295	238	120	-58.7
F1	1.0	110	175	>150	-
F2	1.0	796	220	>150	-

4.5 เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัด 25x25 เซนติเมตร และการเสริมกำลังแบบต่างๆ

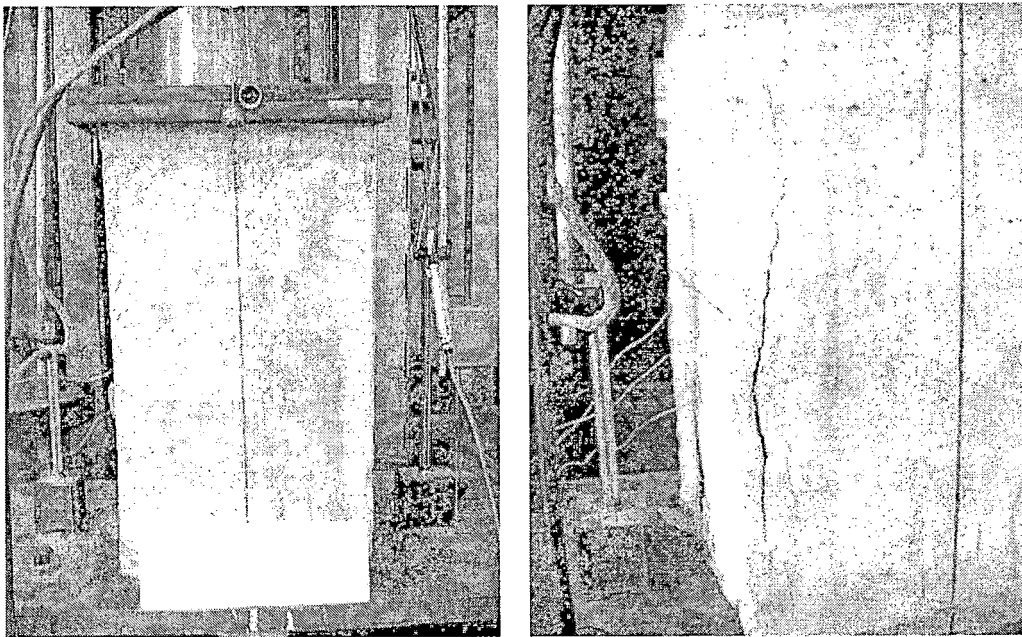
ผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัด 25x25 เซนติเมตร ที่เสริมกำลังแบบต่างๆ กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย คอนกรีตที่ใช้สำหรับหล่อเสาต้นแบบ (C25) และกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยคอนกรีตที่ใช้สำหรับพื้นที่หน้าตัด ส่วนเพิ่มของการเสริมกำลังทั้งสองแบบ กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอก ที่ได้จากการ ทดสอบวัสดุตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ และกำลังรับแรงดึงของแผ่นไฟเบอร์คาร์บอนจากบริษัทผู้ผลิต แสดงไว้ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงคุณสมบัติวัสดุของเสาต้นแบบ (C25)

เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (25x25) ชนิดวัสดุ	C25	RCJ25	NS25	F25-1	F25-2
กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยคอนกรีต (f'_c) ที่ 28 วัน (ksc)	215	215	215	215	215
กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย Concrete Jacket (f'_{rc}) ที่ 28 วัน (ksc)	-	-	-	-	-
กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย Non-Shrinkage Jacket (f'_{ns}) ที่ 28 วัน (ksc)	-	-	295	-	-
กำลังรับแรงดึงเหล็กเสริมหลัก SD30 (ksc) (f_y)	4600	4600	4600	4600	4600
กำลังรับแรงดึงเหล็กกรัด (ปลอก) SD24 (ksc) (f_y^{st})	4300	4300	4300	4300	4300
กำลังรับแรงดึง Sika Wrap 230C/45 (ksc) (f_{fe})	-	-	-	43832	43832

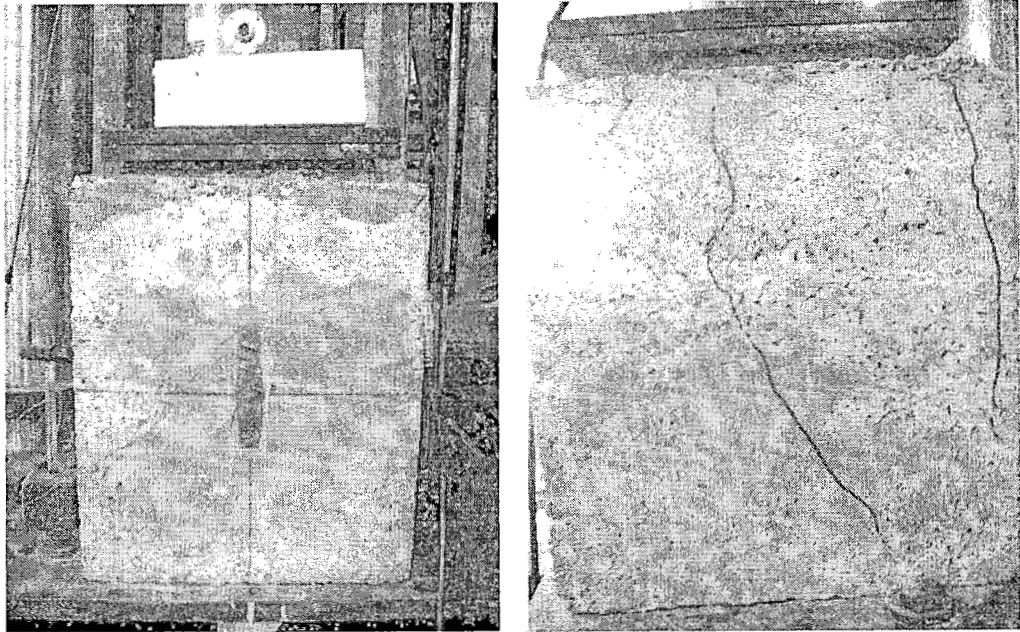


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบระหว่างเสาต้นแบบ C25 และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธี RCJ25



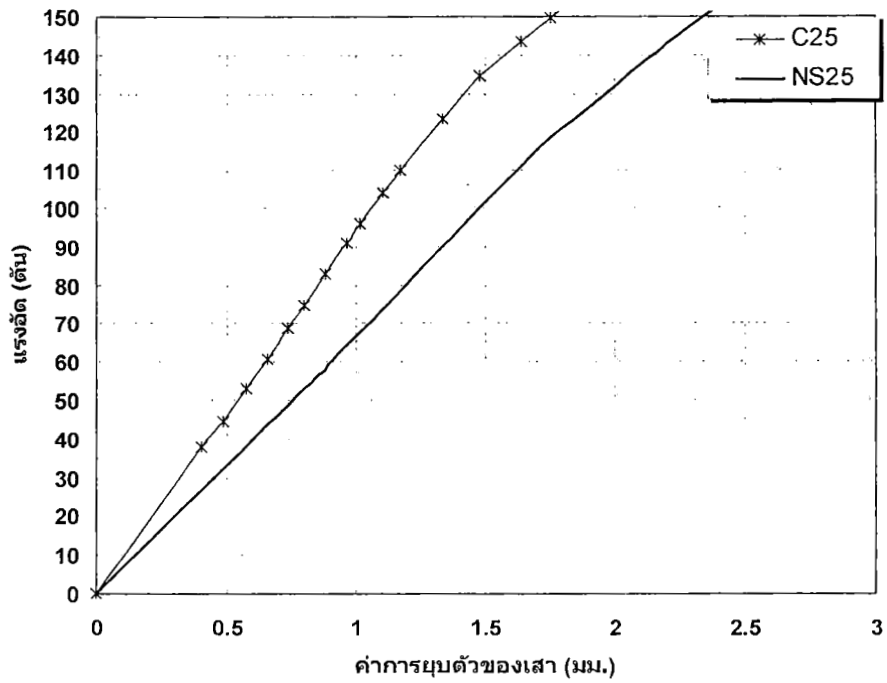
รูปที่ 4.18 การทดสอบและลักษณะการวิบัติของเสาต้นแบบ C25

จากรูปที่ 4.17 พบว่าเสาต้นแบบ C25 รับแรงอัดได้สูงสุดเท่ากับ 150 ตัน มีรอยแตกขนาดใหญ่เกิดขึ้นที่ผิวคอนกรีตแสดงในรูปที่ 4.18 และเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก RCJ25 รับแรงอัดได้มากกว่า 150 ตัน เนื่องจากเครื่องทดสอบหยุดการทำงานที่แรงนี้ และพิจารณาจากการพังในรูปที่ 4.19 ประกอบพบการแตกที่เสาเพียงเส้นบางๆ แสดงว่าเสา RCJ25 ควรรับแรงอัดได้มากกว่านี้ จึงไม่สามารถเปรียบเทียบค่าแรงอัดสูงสุดที่เสาทั้งสองต้นรับได้



รูปที่ 4.19 การทดสอบและลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (RCJ25)

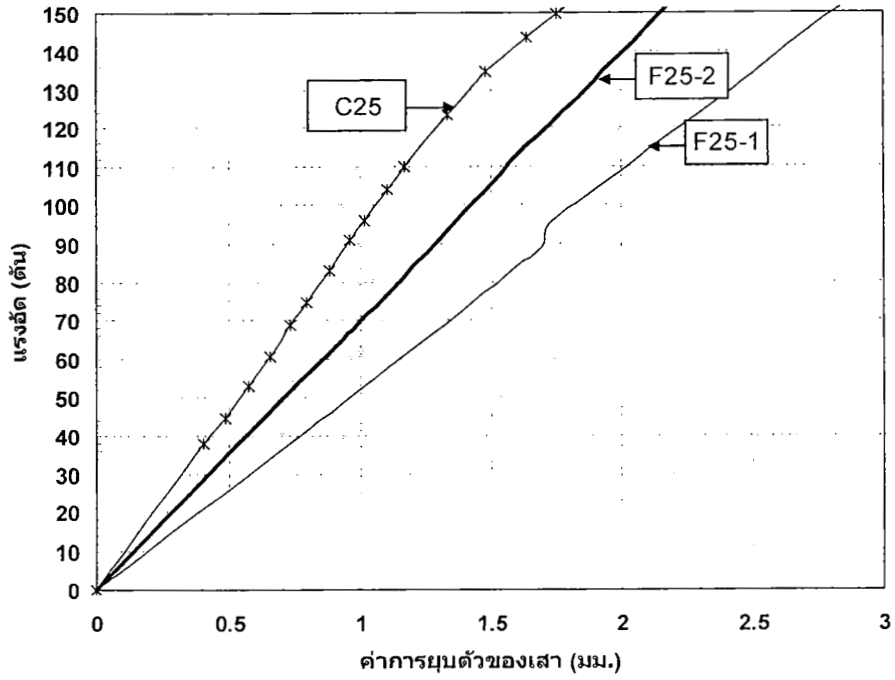
รูปที่ 4.20 เป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดระหว่างเสาต้นแบบ C25 และเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธี NS jacketing (NS25) ค่าแรงอัดสูงสุดของเสา NS25 มีค่าเท่ากับ 150 ตัน โดยมีลักษณะการวิบัติของเสาแสดงในรูปที่ 4.21 มีลักษณะคล้ายกับเสา NS15 และ NS20 คือส่วนของเปลือกคอนกรีตชนิดไม่หดตัวเกิดรอยแตกขึ้น แล้วรอยแตกค่อยๆขยายใหญ่ขึ้น อย่างไรก็ตามตัวอย่างนี้เปลือกคอนกรีตชนิดไม่หดตัวยังไม่แยกออกจากกันที่แรงอัด 150 ตัน



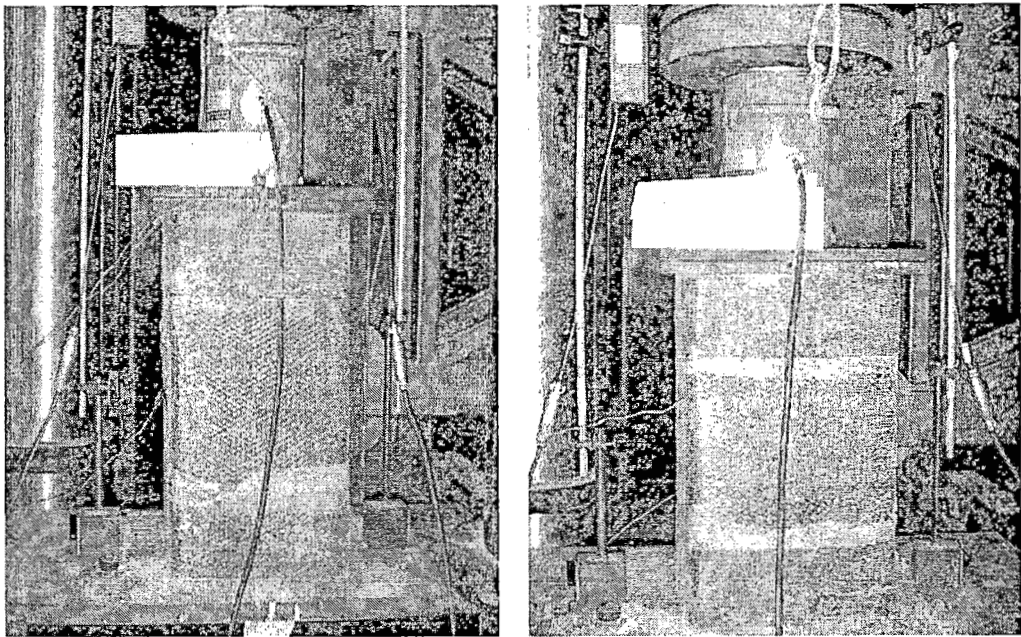
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบระหว่างเสา ต้นแบบ C และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธี NS jacketing (NS25)



รูปที่ 4.21 ลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS25)

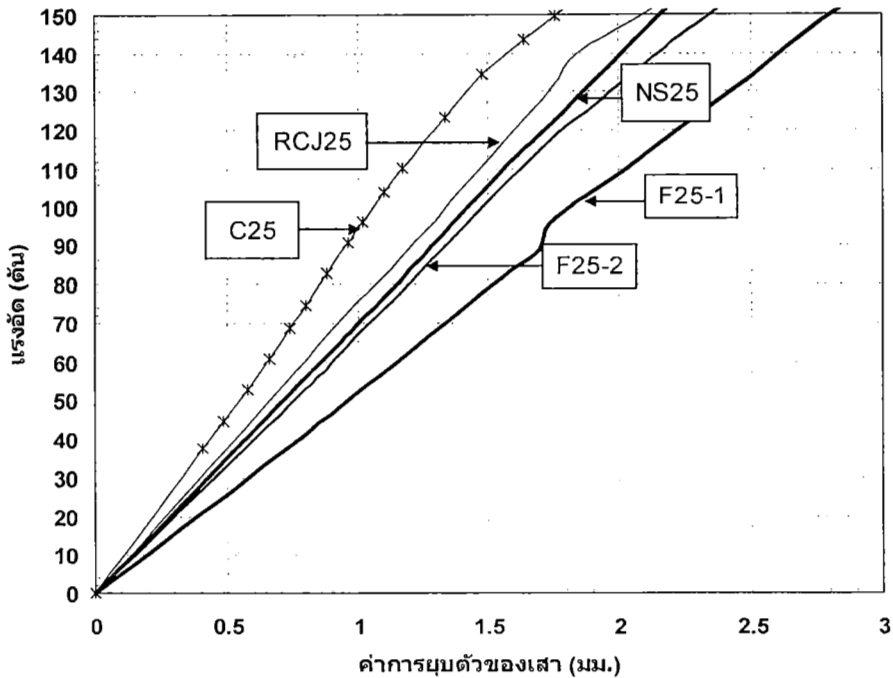


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบระหว่างเสาต้นแบบ C25 และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน 1 ชั้น (F25-1) และ 2 ชั้น (F25-2)



รูปที่ 4.23 ลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน (F25-1 และ F25-2)

รูปที่ 4.22 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดระหว่างเสาต้นแบบ C25 และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอนจำนวน 1 ชั้น และ 2 ชั้น ค่าแรงอัดสูงสุดของเสา F25-1 และ F25-2 มีค่ามากกว่า 150 ตัน รูปที่ 4.23 แสดงลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน (F25-1 และ F25-2) พบว่ายังไม่มีรอยขาดของแผ่นไฟเบอร์เหมือนเสา F15-1 และ F15-2



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบระหว่างเสาต้นแบบ C25 และเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีทั้งสามวิธี

รูปที่ 4.24 แสดงการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดและการยุบตัวของเสาทั้ง 5 ตัวอย่าง (C25, RCJ25, NS25, F25-1, และ F25-2) จากรูปแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดของเสาด้วยการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์มีประสิทธิภาพสูงสุด ถึงแม้ว่าเสา NS25 จะรับแรงสูงสุดได้มากกว่า 150 ตัน แต่ก็มียอดแตกที่เปลือกคอนกรีตที่ใหญ่ ดังนั้นจึงสรุปว่าการเสริมเสากำลั่งด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS) ที่ใช้รายละเอียดการเสริมเหล็กแสดงดังรูปที่ 3.4 มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด ไม่สามารถเปรียบเทียบพฤติกรรมการพังของเสาทั้ง 5 ต้นได้เนื่องจากไม่สามารถให้แรงจนถึงวิบัติของเสา C25 RCJ25 F25-1 F25-2 ได้

4.6 การเปรียบเทียบค่าแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัด 25x25 เซนติเมตร คำนวณตามสมการ ACI และค่าจากผลการทดสอบ

การคำนวณหาค่าแรงอัดสูงสุดของเสาตาม ACI 318-99 [1] และ ACI 440.2R-02 (บทที่ 11) [2] โดยใช้สมการที่แสดงไว้ในบทที่ 2 กำหนดค่าตัวคูณลดค่าแรงอัดสูงสุดของเสาเส้นคอนกรีต (ϕ) มีค่าเท่ากับ 1.0 แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 เสา NS25 RCJ25 F25-1 และ F25-2 มีค่าแรงอัดสูงสุดจากการทดสอบมากกว่า 150 ตัน จึงไม่สามารถเปรียบเทียบค่าความแตกต่างกับค่าการคำนวณจากสมการได้

ตารางที่ 4.6 ค่าแรงอัดสูงสุดคำนวณจากสมการและผลการทดสอบเสาขนาด 25x25 เซนติเมตร

เสา	ϕ	$f'_c, f'_{rc}, f'_{ms}, f'_{cc}$ (ksc)	P_n (สมการ) (ตัน)	P_n (ทดสอบ) (ตัน)	% ต่างต่าง
C	1.0	215	135	150	10.0
RCJ	1.0	22	165	>150	-
NS	1.0	295	281	>150	-
F1	1.0	628	268	>150	-
F1	1.0	809	341	>150	-

บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการสามวิธีที่นิยมใช้ในประเทศไทยคือ 1) การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (RCJ) 2) การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS) และ 3) การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน 1 ชั้น และ 2 ชั้น (F1 และ F2) โดยหล่อตัวอย่างเสาต้นแบบและทำการเสริมกำลังด้วยวิธีดังกล่าว ทดสอบหาแรงอัดสูงสุดที่เสาแต่ละต้นสามารถรับได้และนำค่ามาวิเคราะห์เปรียบเทียบ พร้อมทั้งสังเกตพฤติกรรมการพังของเสา ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1) เสาที่เสริมกำลังเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (RCJ15) รับแรงอัดได้เพิ่มขึ้น 40% เทียบกับเสาต้นแบบ (C15) และมีระยะยุบตัวที่แรงอัดสูงสุดมากกว่าของเสาต้นแบบประมาณ 50% แสดงว่าการเสริมกำลังด้วยวิธีนี้และรายละเอียดนี้สามารถเพิ่มกำลังอัดและความเหนียวให้กับเสาต้นแบบ

2) เสาที่เสริมกำลังเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS15) รับแรงอัดได้เพิ่มขึ้นเพียง 7% เทียบกับเสาต้นแบบ (C15) และมีระยะยุบตัวเท่ากับของเสาต้นแบบ แสดงว่าการเสริมกำลังด้วยวิธีนี้และรายละเอียดนี้ไม่มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังให้พฤติกรรมการพังของเสาที่ไม่ดี กล่าวคือเป็นการพังแบบเปราะรุนแรง (Brittle failure)

3) เสาที่เสริมกำลังเสาด้วยวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน 1 ชั้น และ 2 ชั้น (F15-1 และ F15-2) สามารถเพิ่มแรงอัดให้เสาต้นแบบได้ 54% และ 100% ตามลำดับ และเสาที่เสริมกำลังทั้งสองต้นมีระยะยุบตัวมากกว่าของเสาต้นแบบ แสดงว่าการเสริมกำลังด้วยวิธีนี้และรายละเอียดนี้สามารถเพิ่มความเหนียวให้กับเสาต้นแบบ อย่างไรก็ตามลักษณะการวิบัติของเสาทั้งสองต้นนี้เกิดขึ้นรวดเร็ว เนื่องจากการขาดของเส้นใยไฟเบอร์คาร์บอน ซึ่งเป็นลักษณะการพังแบบเปราะ (Brittle failure)

4) เมื่อเปรียบเทียบด้านกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น พบว่าการเสริมกำลังด้วยวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน 2 ชั้น มีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังสูงสุด รองลงมาเป็นวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน 1 ชั้น และสุดท้ายเป็นวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก

5) การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS) โดยใช้รายละเอียดเหล็กที่ยื่นที่มุมเสาและพันรอบด้วยลวดตะแกรง เป็นการเสริมกำลังที่ไม่มีประสิทธิภาพ ไม่สมควรนำไปใช้ในงานก่อสร้างจริง สมควรมีการศึกษาและปรับปรุงรายละเอียดต่างๆเพิ่มเติม

6) สมการการคำนวณหาแรงอัดสูงสุดของเสาสั้นคอนกรีตตาม ACI 318-99 สามารถนำมาคำนวณหาแรงอัดสูงสุดของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (RCJ) โดยทำการเพิ่มเติมส่วนการคำนวณแรงอัดที่เกิดจากการเพิ่มหน้าตัดแสดงดังสมการที่ 2

7) ไม่สามารถใช้สมการการคำนวณหาแรงอัดสูงสุดของเสาสั้นคอนกรีตตาม ACI 318-99 ที่ทำการเพิ่มเติมส่วนการคำนวณแรงอัดที่เกิดจากการเพิ่มหน้าตัดแสดงดังสมการที่ 3 ในการคำนวณหาแรงอัดสูงสุดของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS)

8) สมการการคำนวณหาแรงอัดสูงสุดของเสาสั้นคอนกรีตตาม ACI 440.2R-02 (บทที่ 11) สามารถคำนวณหาแรงอัดสูงสุดของเสาที่เสริมกำลังด้วยการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอนได้ใกล้เคียงผลการทดสอบเมื่อใช้ค่า ค่าตัวคูณลดค่าแรงอัดสูงสุดของเสาสั้นคอนกรีต (ϕ) และ ค่าตัวคูณสำหรับรูปหน้าตัด (κ_d) เท่ากับ 1.0

เอกสารอ้างอิง

- [1] ACI 318-99, American Concrete Institute, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete," American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1999.
- [2] ACI 440.2R-02, American Concrete Institute, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures," American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2000.
- [3] Jame G. MacGregor, and James K. Wight, "Reinforced Concrete Mechanics & Design", 4th Edition, Prentice Hall, New Jersey, 2005
- [4] J.,G., Teng, J.,F., Chen, S.,T., Smith, and L., Lam, "FRP Strengthened RC Structures", John Wiley & Sons, New York, 2002
- [5] Mirmiran, A., and Shahawy M., "Behavior of concrete columns confined by fiber composites.", J. of structural Engineering, 1997, May, pp 583-590
- [6] Nanni, A., and Bradford, N. M., "FRP jacketed concrete under uniaxial compression.", Construction and Building Materials, 1995, V.9(2), pp 115-124.

ภาคผนวก

บทความทางวิชาการ

การประเมินกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย วิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก
วิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว และวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน

การประเมินกำลังเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว และวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน

Evaluation of Reinforced Concrete Columns Strengthened by Reinforced Concrete, Non-Shrinkage Concrete, and CFRP Jackets

อรอนท วงษ์แก้ว¹

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

E-mail: arnonw@eng.buu.ac.th

บทคัดย่อ

ประสิทธิภาพการเสริมกำลังรับแรงอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีที่นิยมใช้ในประเทศไทยสามวิธีการ คือการเสริมกำลังเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว และการเสริมกำลังเสาด้วยวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน ถูกนำมาผ่านผลการศึกษานี้ด้วยการทดสอบตัวอย่างเสาในห้องปฏิบัติการ เตรียมตัวอย่างเสา ค.ส.ล. ทดสอบต้นแบบ (C) ขนาด 15x15 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร จำนวน 5 ตัวอย่าง เมื่อบ่มอายุคอนกรีตจนได้อายุ 28 วัน นำตัวอย่างเสา ค.ส.ล. ต้นแบบจำนวน 4 ตัวอย่างมาทำการเสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (RCJ) 1 ตัวอย่าง ทำการเสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS) 1 ตัวอย่าง และทำการเสริมกำลังด้วยวิธีการพันรอบด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน 1 ชั้น (F1) จำนวน 1 ตัวอย่าง และ 2 ชั้น (F2) 1 ตัวอย่าง จากนั้นทำการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของเสาทั้ง 5 ตัวอย่าง นำค่ามาวิเคราะห์เปรียบเทียบ พร้อมทั้งสังเกตพฤติกรรมการพังของเสา เสา RCJ รับแรงอัดได้เพิ่มขึ้น 40% เสา NS รับแรงอัดได้เพิ่มขึ้น 7% เสา F1 และ F2 สามารถรับแรงอัดได้เพิ่มขึ้น 54% และ 100% เมื่อเทียบกับเสาต้นแบบ (C) การเสริมกำลังเสาทั้งสามวิธีช่วยให้ระยะยุบตัวของเสาเพิ่มขึ้น ยกเว้นวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS) โดยใช้รายละเอียดเหล็กยื่นที่มุมเสาและพันรอบด้วยลวดตะแกรง เป็นการเสริมกำลังที่ไม่มีประสิทธิภาพ ไม่สมควรนำไปใช้ในงานก่อสร้างจริง

คำสำคัญ: เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก, ค่าแรงอัด, ค่าการยุบตัว, การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก, การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว, การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน

Abstract

Effectiveness of three conventional practices to enhance the compressive strength of reinforced concrete columns in Thailand was presented in this study. Three

column strengthening techniques widely used in Thailand namely as Reinforced Concrete Jacketing (RCJ), Non-shrinkage Concrete Jacketing (NS), and Carbon Fiber Reinforced Paper (F) were investigated through laboratory experiments. Five reinforced concrete specimen columns with a dimension of 15x15 cm. and 40 cm. in heights were casted. After curing of 28 days, each specimen was strengthened by RCJ, NS, F1, and F2 techniques, respectively. The results show that the column strengthened by RCJ has the compressive force increased by 40% comparing to the control specimen. The NS column, on the other hand, shows an addition of a compressive strength only 7%. This indicates unsuccessful improvement of the compressive force by using the Non-shrinkage Concrete Jacketing technique with the details of four main reinforcing bar at the corners and wrapping around with the low-strength wire mesh. The columns with fiber reinforced paper details of 1 and 2 plies demonstrate enhancement of the compressive forces of 54% and 100%, correspondingly. All techniques can also improve the deformation of columns, except the Non-shrinkage Concrete Jacketing. Therefore, it can conclude that Reinforced Concrete Jacketing and Carbon Fiber Reinforced Paper techniques can increase the compressive strengths of reinforced concrete columns. In contrast, Non-shrinkage Concrete Jacketing technique is not only ineffective for increasing of the column strength but also no use for improving of the column deformation. It should not be recommended in constructions unless it has a further study on the details of reinforcements.

Keywords: Reinforced Concrete Column, Compressive Force, Deformation, Reinforced Concrete Jacketing, Non-Shrinkage Concrete, Carbon Fiber Reinforced Paper

1. คำนำ

สิ่งก่อสร้างภายในประเทศไทยส่วนใหญ่นิยมใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Structures) ทั้งโครงสร้างขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เช่น งานก่อสร้าง งานก่อสร้างอาคารบ้านพักอาศัย เป็นต้น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กต่างๆข้างต้นได้จากการนำคอนกรีตและเหล็กเสริมมาหล่อรวมกันในแบบหล่อคอนกรีตในลักษณะที่ทำให้ได้ส่วนของโครงสร้างที่มีพฤติกรรมร่วมกันรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามต้องการ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความแข็งแรง ทนทานต่อสภาวะดินฟ้าอากาศได้ดีกว่าโครงสร้างประเภทอื่น เสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำกว่า เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างที่อยู่ในแนวตั้งทำหน้าที่รับแรงอัด หรือทั้งแรงอัดและแรงดัดร่วมกันซึ่งได้มาจากการถ่ายน้ำหนักบรรทุกของคานหรือแผ่นพื้นไครคานในชั้นต่างๆ แล้วจึงถ่ายน้ำหนักบรรทุกนั้นลงสู่ดินโดยฐานราก หากเสาต้นใดต้นหนึ่งซึ่งมีพฤติกรรมทำให้ส่วนโครงสร้างที่ยึดต่อเนื่องเกิดการชำรุดเสียหาย จนอาจทำให้โครงสร้างทั้งหมดถึงกับพังลงมาได้ เสาค.ส.ล.) อาจมีรูปตัดกลม สี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีเหล็กเสริมชนิดเหล็กยื่นใช้ช่วยคอนกรีตรับน้ำหนักและมีเหล็กเสริมทางข้างชนิดปลอกเกลียวซึ่งพันต่อเนื่องกันรอบเหล็กยื่นที่อยู่บนเส้นรอบวงของวงกลม เรียกว่าเสาปลอกเกลียว (Spiral Column) เหล็กเสริมทางด้านข้างอาจเป็นชนิดปลอกเดี่ยวพันรอบเหล็กยื่นที่วางในตำแหน่งขอบของรูปสี่เหลี่ยมและเว้นเป็นระยะๆ เรียกว่า เสาปลอกเดี่ยว (Tied Column) เหล็กเสริมทางข้างช่วยให้เสาค.ส.ล. รับน้ำหนักได้มากขึ้น และทำให้เสามีพฤติกรรมแบบเหนียวก่อนเกิดการวิบัติ โดยผู้ออกแบบได้พิจารณาการออกแบบเสาให้สามารถรับแรงดัดงอได้ตามหลักการวิเคราะห์โครงสร้างและมาตรฐานที่มีอยู่ อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาผ่านไปจุดประสงค์การใช้งานของโครงสร้างนั้นๆ อาจเปลี่ยนไปเช่น ต้องการให้มีความสามารถในการรับกำลังเพิ่มขึ้น เพื่อรองรับการใช้งานที่เพิ่มขึ้นของโครงสร้าง จึงต้องทำการเสริมกำลัง (Strengthening) แทนการทำลายทิ้งแล้วสร้างใหม่ทั้งหมด หรือเมื่อเวลาผ่านไปความแข็งแรง ความคงทน ตลอดจนความสามารถในการรับน้ำหนักของวัสดุที่ใช้สร้างโครงสร้างนั้นลดลง จึงต้องมีการปรับปรุงกำลังของโครงสร้าง หรือทำการซ่อมแซม (Repairing) โครงสร้างนั้นๆ ให้มีความสามารถในการรับแรงประเภทต่างๆ ตามวัตถุประสงค์ที่ได้ออกแบบไว้ตั้งแต่ต้น

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงอัดและความเหนียวของเสาค.ส.ล. ที่ถูกเสริมกำลังด้วยวิธีการขยายหน้าตัดเสาแบบ Reinforced Concrete Jacketing (RCJ) และวิธีการขยายหน้าตัดเสาแบบ Non-shrinkage Concrete Jacketing (NS) และวิธีการพันรอบด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน CFRP Jacketing (FRP) 2) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลการเสริมกำลังของเสาด้วยวิธีทั้ง 3 วิธีการดังกล่าว และ 3) เพื่อแนะนำวิธีการเสริมกำลังเสาค.ส.ล. ที่เหมาะสมและเกิดประโยชน์สูงสุด

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปกติการเสริมกำลังของเสาค.ส.ล. มีหลายวิธี เช่น 1) การเสริมภายนอกด้วยคอนกรีตกำลังสูง ซึ่งจะให้น้ำหนักรวมและพื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างเพิ่มขึ้น อาจลดประโยชน์พื้นที่ใช้สอย 2) การเสริมเหล็กรูปพรรณภายนอกของค้ำอาคาร 3) การเสริมภายนอกด้วยการติดหรือรัดด้วยวัสดุเสริมกำลัง เช่นแผ่นไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังวิธีนี้ไม่ทำให้น้ำหนักเพิ่มขึ้นจากเดิม ไม่ทำให้รูปร่างของโครงสร้างเปลี่ยนไปจากเดิม และเพิ่มความยืดหยุ่นของเสาได้ด้วย แต่ต้องทำด้วยช่างผู้เชี่ยวชาญเท่านั้น ส่วนวิธีที่ 1) และ 2) สามารถทำได้โดยช่างทั่วไป

วัสดุไฟเบอร์คาร์บอนเสริมกำลังประกอบด้วย ไฟเบอร์ซึ่งแทรกอยู่ในโพลิเมอร์เมทริกซ์ จะแสดงคุณสมบัติหลายอย่างซึ่งสามารถนำมาใช้ในการเสริมกำลังให้กับวัสดุโครงสร้างได้เป็นอย่างดี วัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังจะสามารถรับแรงดึงได้สูงในทิศทางการเรียงตัวของไฟเบอร์ อย่างไรก็ตามวัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังจะไม่แสดงจุดคราก แต่จะแสดงคุณสมบัติยืดหยุ่นจนกระทั่งถึงขีดขาด การตอบสนองของวัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังต่อแรงดึงในแนวแกนจะเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นกับความเครียดในแนวแกน ส่วนการตอบสนองของวัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังต่อแรงอัดในแนวแกนจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของปริมาตรของไฟเบอร์ คุณสมบัติของไฟเบอร์หรือเรซินที่ใช้ และกำลังของพันธะภายในระหว่างไฟเบอร์ การวิบัติของวัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังภายใต้แรงอัดจะเกิดขึ้นเมื่อไฟเบอร์ถูกทำให้เคลื่อนที่ไปทางด้านข้างซึ่งปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า การโก่งของไฟเบอร์ การตอบสนองของวัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังต่อแรงที่ดึงฉากกับแรงดึงนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของไฟเบอร์และเมทริกซ์ แรงกระทำระหว่างไฟเบอร์และเมทริกซ์ และกำลังของพันธะระหว่างไฟเบอร์และเมทริกซ์ โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการต้านทานแรงที่ดึงฉากกับแรงดึงนั้นจะมีค่าน้อย ส่วนความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของวัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังนั้น ไม่สามารถวัดได้โดยตรงโดยส่วนมากแล้วการวิบัติด้วยแรงเฉือนของวัสดุไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลังจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุเมทริกซ์เกิดการเคลื่อนที่ขนานกับไฟเบอร์

Mirmiran และคณะ [5] เสนอว่า แผ่นไฟเบอร์คาร์บอนเสริมกำลังสามารถเพิ่มกำลังอัดและความแข็งแรงให้กับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก และ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีคุณสมบัติการยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นด้วยเมื่อเสาถูกรัดด้วยแผ่นไฟเบอร์ อานนท์และคณะพบว่าเมื่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็กถูกเสริมด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอนเสริมกำลัง ทำให้เสามีกำลังอัดเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20-60 ขึ้นอยู่กับลักษณะหน้าตัดของเสา และมีระยะยุบตัวของเสาเพิ่มขึ้น 60%-100%

3. การเตรียมตัวอย่างเสาทดสอบ

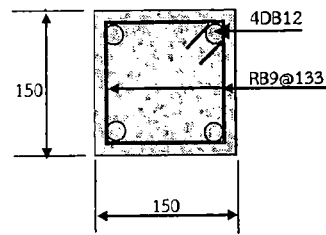
ในการศึกษานี้ได้ทำการหล่อตัวอย่างเสาค.ส.ล.ทดสอบต้นแบบ (C) ขนาด 15x15 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร จำนวน 5 ตัวอย่าง เมื่อบ่มอายุคอนกรีตจนได้อายุ 28 วัน นำตัวอย่างเสาค.ส.ล. ต้นแบบจำนวน 4 ตัวอย่างมาทำการเสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก

Reinforced Concrete Jacketing (RCJ) จำนวน 1 ตัวอย่าง ทำการเสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว Non-shrinkage Concrete Jacketing (NS) จำนวน 1 ตัวอย่าง ทั้งนี้การผสมคอนกรีตชนิดไม่หดตัวนั้นจะใช้ส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ชนิดไม่หดตัวและหินเกล็ดขนาด 10 มม. จำนวน 10% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ส่วนที่เหลือทำการเสริมกำลังด้วยวิธีการพันรอบด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน CFRP Jacketing 1 ชั้น จำนวน 1 ตัวอย่าง (F1) และทำการเสริมกำลังด้วยวิธีการพันรอบด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน CFRP Jacketing 2 ชั้น จำนวน 1 ตัวอย่าง (F2) รายละเอียดหน้าตัดและการเสริมกำลังแสดงไว้ในรูปที่ 1 ทั้งนี้วัสดุแผ่นไฟเบอร์คาร์บอนเสริมกำลังและการติดตั้งดำเนินการโดยช่างจากบริษัท SIKA จากนั้นทำการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของเสาทั้ง 5 ตัวอย่าง

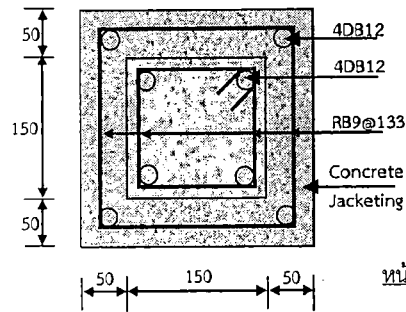
กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยคอนกรีตที่ใช้สำหรับหล่อเสาต้นแบบ และพื้นที่หน้าตัดส่วนเพิ่มของการเสริมกำลังทั้งสองแบบ กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอก ที่ได้จากการทดสอบวัสดุตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ และกำลังรับแรงดึงของแผ่นไฟเบอร์คาร์บอนจากบริษัทผู้ผลิตแสดงไว้ในตารางที่ 1 รูปที่ 2 แสดงการติดตั้งตัวอย่างเสาทดสอบ อุปกรณ์วัดค่าแรงอัดและอุปกรณ์วัดค่าการยุบตัวของเสา

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของวัสดุ

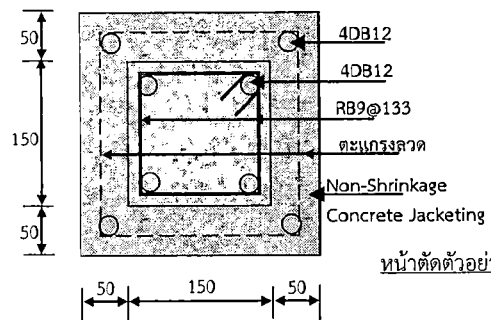
เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ชนิดวัสดุ	C	RCJ	NS	F1	F2
กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยคอนกรีต (f'_c) ที่ 28 วัน (ksc)	116	116	116	116	116
กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย Concrete Jacket (f'_{rc}) ที่ 28 วัน (ksc)	-	107	-	-	-
กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย Non-Shrinkage Jacket (f'_{ns}) ที่ 28 วัน (ksc)	-	-	295	-	-
กำลังรับแรงดึงเหล็กเสริมหลัก SD30 (ksc) (f_y)	4600	4600	4600	4600	4600
กำลังรับแรงดึงเหล็กกรัด (ปลอก) SD24 (ksc) (f_y^{st})	4300	4300	4300	4300	4300
กำลังรับแรงดึง Sika Wrap 230C/45 (ksc) (f_{fe})	-	-	-	43832	43832



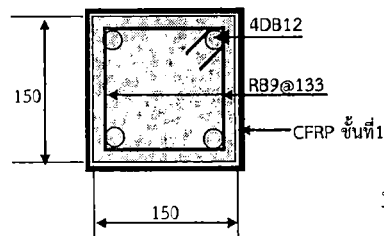
หน้าตัดตัวอย่างเสา C



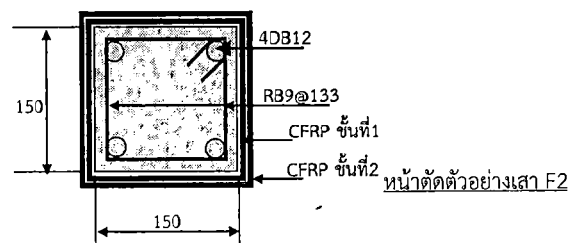
หน้าตัดตัวอย่างเสา RCJ



หน้าตัดตัวอย่างเสา NS

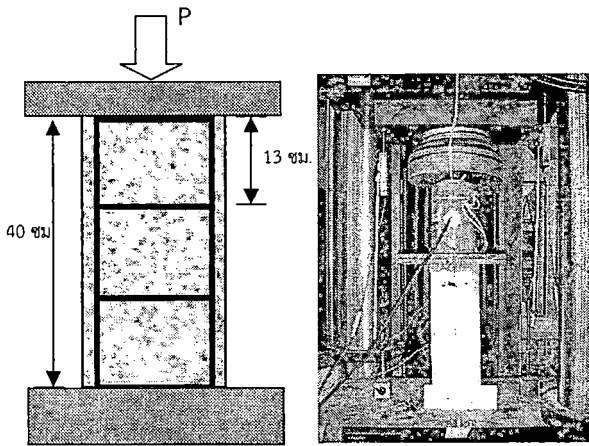


หน้าตัดตัวอย่างเสา F1



หน้าตัดตัวอย่างเสา F2

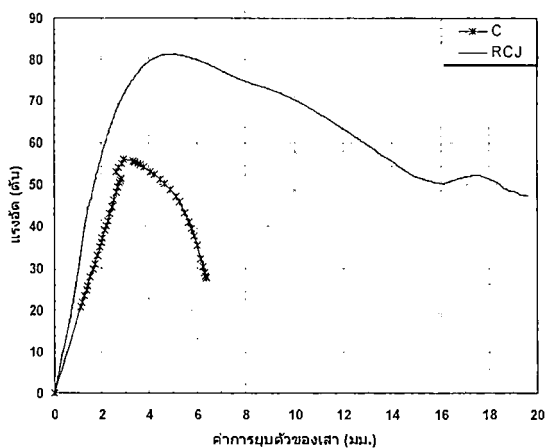
รูปที่ 1 รายละเอียดหน้าตัด เหล็กเสริม และการเสริมกำลัง สำหรับตัวอย่างเสาทดสอบ มิติเป็นมิลลิเมตร



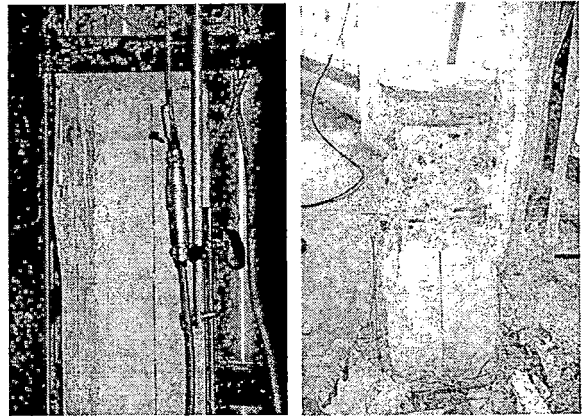
รูปที่ 2 การทดสอบตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

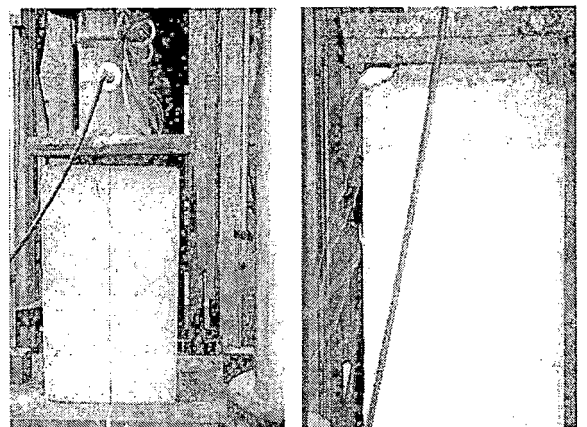
ผลทดสอบประกอบด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับแรงอัดของเสา ค.ส.ล. และระยะยุบตัวของเสา จากรูปที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบค่าแรงอัดสูงสุดที่เสาทั้งสองต้นรับได้ พบว่าเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (RCJ) สามารถรับแรงอัดได้มากขึ้นประมาณ 40% และมีค่าความชันของเส้นกราฟในช่วงยืดหยุ่นมากกว่าเสาต้นแบบ C แสดงว่าเสา RCJ มีค่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเส้นกราฟทั้งสองเส้นในช่วงที่เลยจุดสูงสุดไปแล้วพบว่า ความสามารถในการรับแรงอัดของเสา RCJ จะลดลงอย่างช้าๆ มีระยะหดตัวหลังจากการครากของหน้าตัดมากกว่าเมื่อเทียบกับเสา C ที่ลดลงอย่างรวดเร็วกว่ามาก จึงสรุปได้ว่า เสา RCJ แสดงพฤติกรรมเหนียวมากกว่าเสา C



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบระหว่างเสาต้นแบบ C และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธี RCJ

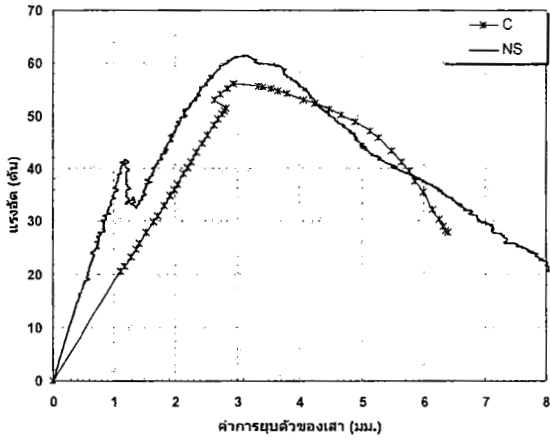


รูปที่ 4 ลักษณะการวิบัติของเสาต้นแบบ (C)

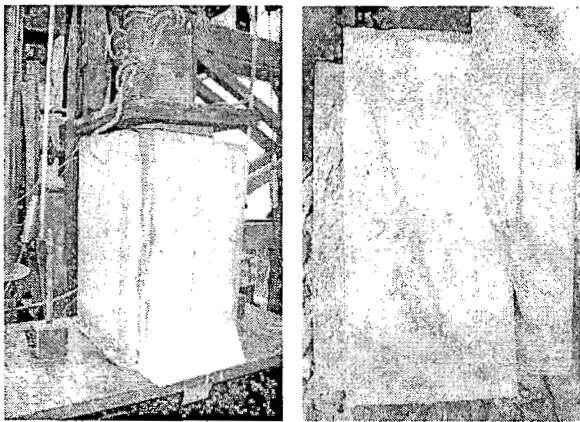


รูปที่ 5 ลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (RCJ)

รูปที่ 4 และ 5 แสดงลักษณะการวิบัติของเสาต้นแบบ (C) และลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (RCJ) การวิบัติของเสา C เริ่มจากการแตกร้าวที่ผิวคอนกรีตเป็นแนวเส้นตรงจากด้านบนลงสู่ด้านล่างที่แรงอัดประมาณ 52-54 ตัน จากนั้นรอยแตกขยายกว้างขึ้นและยาวขึ้นอย่างรวดเร็ว มีชิ้นส่วนคอนกรีตหลุดออกมาเป็นแผ่นๆ ที่สภาวะนี้การรับแรงอัดของเสาลดลงอย่างรวดเร็ว เสา RCJ รับแรงอัดสูงสุดได้เท่ากับ 82 ตัน ส่วนลักษณะการวิบัติของเสา RCJ มีความแตกต่างจากเสา C กล่าวคือเมื่อรอยร้าวเกิดขึ้นที่ผิวคอนกรีตเป็นแนวเส้นตรงจากด้านบนลงล่าง ที่สภาวะนี้การรับแรงอัดของเสาตกลงอย่างช้าๆ และมีระยะยุบตัวมากขึ้นถึง 16 มม. เมื่อพิจารณาพบว่ารอยร้าวนี้ไม่ขยายตัวกว้างขึ้นอย่างรวดเร็วแต่ค่อยๆ เกิดยาวขึ้น และเมื่อหยุดการทดสอบในส่วนของเปลือกคอนกรีตที่เพิ่มหน้าตัดเข้าไปยังคงสภาพไม่มีการกระเทาะหรือหลุดออก จึงสรุปว่าเสา RCJ มีลักษณะการพังที่ดีกว่าเสา C มาก และแสดงพฤติกรรมเหนียว



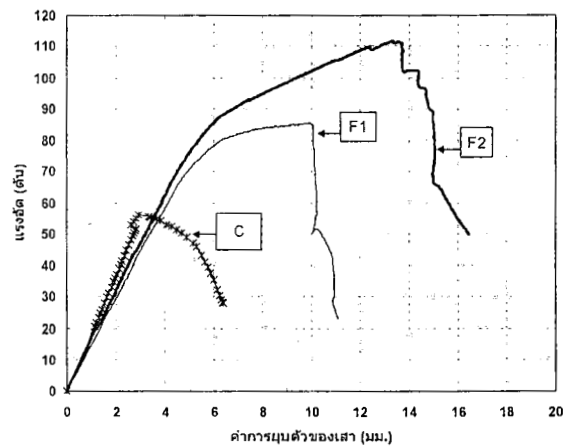
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบระหว่างเสาต้นแบบ C และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธี NS jacketing



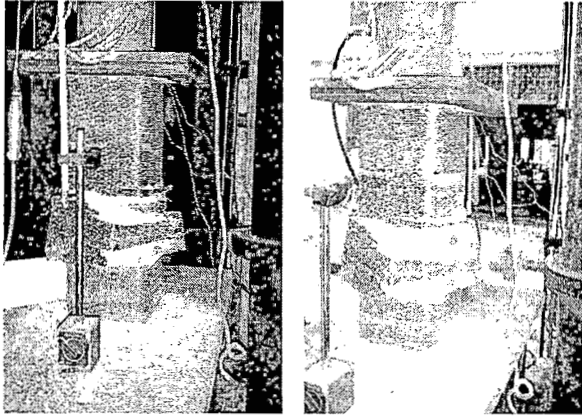
รูปที่ 7 ลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS)

ส่วนรูปที่ 6 เป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดระหว่างเสาต้นแบบ C และเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธี NS jacketing เมื่อพิจารณาจากค่าความชันของเส้นกราฟในช่วงยืดหยุ่น พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกับเสา RCJ กล่าวคือมีค่าความชันของเส้นกราฟในช่วงยืดหยุ่นมากกว่าเสาต้นแบบ C ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มขึ้นจากเสาต้นแบบ C ด้านละ 5 เซนติเมตร จึงทำให้เสา NS มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมากกว่า ส่วนค่าแรงอัดสูงสุดที่เสาทั้งสองต้นรับได้พบว่าเสา NS สามารถรับแรงอัดได้มากขึ้นเพียงประมาณ 7% เมื่อเทียบกับเสา C ทั้งๆที่มีการขยายหน้าตัดเท่ากับเสา RCJ และใช้คอนกรีตชนิดไม่หดตัวในส่วนของการขยายหน้าตัดซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของคอนกรีตชนิดนี้เท่ากับ 295 กก./ตร.ซม. มากกว่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยคอนกรีตที่ใช้กับเสา RCJ ถึง 2.76 เท่าแสดงไว้ในตารางที่ 1 และเมื่อพิจารณาเสา C และ NS ในช่วงเลยจุดสูงสุดไปแล้วพบว่า ความสามารถในการรับแรงอัดของเสา NS และเสา C มีลักษณะเหมือนกัน แสดงว่าการเพิ่มหน้าตัดเสาด้วยวิธีนี้ไม่มีประสิทธิภาพ

เมื่อพิจารณาลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS) แสดงในรูปที่ 7 ประกอบเส้นกราฟรับแรงอัดของเสานี้ พบว่ามีลักษณะการพังที่นาสนใจมากที่สุดคือที่แรงกดประมาณ 40 ตัน ในส่วนของเปลือกคอนกรีตชนิดไม่หดตัวเกิดรอยแตกขึ้น รอยแตกนี้มีขนาดใหญ่ เกิดจากด้านบนถึงล่างและเกิดชั้นรวดเร็วไม่ใช่ลักษณะรอยเล็กแล้วค่อยๆขยายออก ทำให้เสารับแรงอัดลดลงทันทีเหลือเท่ากับประมาณ 32 ตัน จากนั้นเมื่อส่วนเสาแกนในรับแรงอัดต่อ แรงอัดจะค่อยๆเพิ่มขึ้นช้าๆ เสา NS จะรับแรงอัดได้สูงสุดเท่ากับ 62 ตัน จากนั้นเมื่อเสาแกนในเริ่มวิบัติความสามารถในการรับแรงอัดจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในส่วนรอยแตกของเปลือกนั้นจะขยายใหญ่มากขึ้นจนเมื่อเสาแกนในวิบัติ เปลือกคอนกรีตชนิดไม่หดตัวนี้จะแยกออกเป็นสองชิ้นส่วนอิสระจากกัน และยังแยกออกจากเสาแกนในได้อย่างสมบูรณ์แสดงดังรูปภาพ เมื่อพิจารณาผิวด้านในของเปลือกคอนกรีตที่สัมผัสกับผิวคอนกรีตของเสาแกนใน พบว่าค่อนข้างเรียบไม่ขรุขระหรือหยาบ อาจแสดงให้เห็นว่าไม่เกิดการถ่ายแรงเฉือนระหว่างเสาแกนในและเปลือกคอนกรีตชนิดไม่หดตัว ทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดของเสาเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับเสา C และมีประสิทธิภาพในการรับแรงอัดได้น้อยกว่าเสา RCJ มาก เมื่อพิจารณาลักษณะการพังของเสาแกนในพบว่ามีลักษณะเหมือนเสา C ทุกประการ คือมีรอยแตกที่ผิวคอนกรีตและหลุดออกเมื่อเริ่มเคลื่อนย้ายเสาหลังการทดสอบ แสดงว่าเสา NS นี้แสดงพฤติกรรมแบบไม่เหนียวคล้ายกับเสา C สรุปโดยรวมแล้วพบว่าความสามารถในการรับแรงอัดของเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัวโดยใช้รายละเอียดการเสริมเหล็กแสดงดังรูปที่ 1 โดยใช้ลวดตะแกรงแทนเหล็กปลอกนั้นไม่สามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดให้เสาคอนกรีตและไม่สามารถช่วยเพิ่มระยะยุบตัวของเสาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

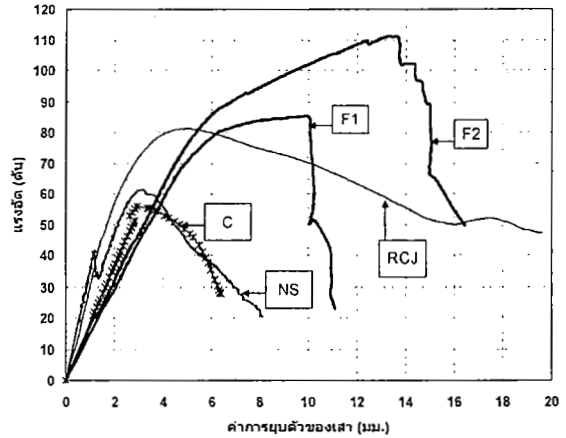


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบระหว่างเสาต้นแบบ C และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน 1 ชั้น (F1) และ 2 ชั้น (F2)



รูปที่ 9 ลักษณะการวิบัติของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน (F1 และ F2)

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดระหว่างเสาต้นแบบ C และเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอนจำนวน 1 ชั้น และ 2 ชั้น เมื่อพิจารณาจากค่าความชันของเส้นกราฟทั้งสามเส้นในช่วงยืดหยุ่น พบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยเสาต้นแบบ C มีค่าความชันของเส้นกราฟในช่วงยืดหยุ่นมากกว่าเสา F1 และ F2 เล็กน้อย ทั้งนี้เพราะในการติดแผ่นไฟเบอร์ต้องทำการเตรียมผิวคอนกรีตและลมนวมทั้ง 4 ด้านของเสาออกด้วยวิธีมีความโค้งประมาณ 1 ซม. จึงทำให้ค่าค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเสา F1 และ F2 ลดลง ส่วนค่าแรงอัดสูงสุดที่เสา F1 และ F2 รับผิดชอบพบว่าเสา F1 สามารถรับแรงอัดได้มากขึ้นประมาณ 54% เมื่อเทียบกับเสา C และเสา F2 สามารถรับแรงอัดได้มากขึ้นประมาณ 100% เมื่อเทียบกับเสา C และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างเสา F1 และ F2 เสาที่ถูกเสริมด้วยแผ่นไฟเบอร์ 2 ชั้นสามารถรับแรงอัดได้มากกว่า 1 ชั้นประมาณ 30% นอกจากนี้เสา F1 และ F2 มีระยะการยุบตัวที่เพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเสา F1 และ F2 รับแรงอัดเกินจุดพิกัดยืดหยุ่นไปแล้วพบว่าเสา F1 มีระยะการยุบตัวที่แรงอัดสูงสุดเพิ่มขึ้น 100% และเสา F2 มีระยะการยุบตัวที่แรงอัดสูงสุดเพิ่มขึ้นประมาณ 170% เมื่อเทียบกับการยุบตัวของเสาที่แรงอัด ณ จุดพิกัดยืดหยุ่นของเสาทั้งสองต้น แสดงว่าแผ่นไฟเบอร์สามารถเพิ่มความเหนียวให้กับเสาต้นแบบได้ด้วย ส่วนลักษณะการวิบัติของเสาทั้งสองต้นนี้ จะเกิดการฉีกขาดของแผ่นไฟเบอร์เนื่องจากแรงดึงในแนวเส้นรอบรูปตามทิศทางของเส้นใยไฟเบอร์ โดยก่อนถึงการวิบัติแบบสมบูรณ์จะมีเสียงการขาดของเส้นใยไฟเบอร์ แสดงในรูปที่ 9 อย่างไรก็ตามการฉีกขาดของแผ่นไฟเบอร์จะเกิดขึ้นเพียงช่วงสั้นๆ ก่อนถึงจุดวิบัติสุดท้าย ซึ่งจะสังเกตได้ว่าการรับแรงอัดของเสาทั้ง F1 และ F2 จะลดลงอย่างรวดเร็วในขณะที่การยุบตัวของเสาเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นลักษณะการวิบัติแบบเปราะฉับพลัน (Brittle failure)



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดและค่าการยุบตัวเปรียบเทียบระหว่างเสาต้นแบบ C และเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีทั้งสามวิธี

รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดและการยุบตัวของเสาทั้ง 5 ตัวอย่าง (C, RCJ, NS, F1, และ F2) จากรูปแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดของเสาด้วยการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์มีประสิทธิภาพสูงสุด และการเสริมเสากำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS) ที่ใช้รายละเอียดการเสริมเหล็กแสดงดังรูปที่ 1 มีประสิทธิภาพน้อยที่สุดไม่สามารถเพิ่มกำลังอัดให้เสาต้นแบบได้ ส่วนเมื่อพิจารณาจากลักษณะการวิบัติและความเหนียวพบว่า การเสริมเสากำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็กให้พฤติกรรมการวิบัติที่ดีที่สุด โดยการพังจะเป็นไปในลักษณะค่อยๆ เกิดขึ้นที่ละน้อยไม่รวดเร็ว ฉียบพลัน รุนแรง ถึงแม้ว่าการเสริมเสากำลังด้วยวิธีพันเสาด้วยแผ่นไฟเบอร์ช่วยเพิ่มความเหนียวให้เสาได้แต่ลักษณะการพังเมื่อแผ่นไฟเบอร์ฉีกขาดเป็นการวิบัติแบบฉับพลันและรุนแรง ทำให้เสาคอนกรีตมีกำลังลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนการเสริมเสากำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัวไม่ได้ช่วยให้พฤติกรรมการพังของเสาต้นแบบดีขึ้นแต่อย่างใด

5. การเปรียบเทียบค่าแรงอัดของเสาคำนวณตามสมการ ACI และค่าจากผลการทดสอบ

ในส่วนการศึกษานี้จะนำเสนอค่ากำลังอัดของเสาเส้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่คำนวณด้วยสมการของ ACI สมการการออกแบบที่ 1 ใช้สำหรับคำนวณหาแรงอัดสูงสุดของเสาเส้นคอนกรีต (ϕ) มีค่าเท่ากับ 0.70 สำหรับเสาเส้นที่ใช้เหล็กปลอก แต่สำหรับการศึกษานี้กำหนดให้ใช้ค่า ϕ เท่ากับ 1.0 ทั้งนี้เพื่อต้องการเปรียบเทียบค่าแรงอัดสูงสุดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กกับผลการทดสอบเสาที่ระดับพังหลายของเสา ส่วนสมการที่ (2) และ (3) เป็นการประยุกต์ใช้สมการการออกแบบที่ (1) โดยเพิ่มแรงอัดที่คำนวณได้จากส่วนพื้นที่ที่ขยายหน้าตัดเพิ่ม ใช้สำหรับคำนวณหาแรงอัดสูงสุด

ของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก และ เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว ตามลำดับ สมการที่ 4-4.3 เป็นชุดสมการที่ใช้ในการหาลำดับอัดเสา คอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวิธีพันด้วยแผ่นไฟเบอร์ ตาม ข้อเสนอแนะของ ACI 440.2R-02 (บทที่ 11) [2] คำอธิบายตัวแปร ต่างๆ แสดงไว้ต่อจากสมการ

ρ_f = อัตราส่วนการเสริมแผ่นไฟเบอร์
 n = จำนวนชั้นแผ่นไฟเบอร์
 t_f = ความหนาแผ่นไฟเบอร์
 b = ความกว้างของหน้าตัดเสา
 h = ความยาวของหน้าตัดเสา

$$\phi P_n = \phi(0.85f'_c A_c + f_y A_{st}) \dots\dots\dots (1)$$

$$\phi P_n = \phi \left[(0.85f'_c A_c + f_y A_{st}) + (0.85f'_{rc} (A_{rc} - A'_{st}) + f_y A'_{st}) \right] \dots\dots (2)$$

$$\phi P_n = \phi \left[(0.85f'_c A_c + f_y A_{st}) + (0.85f'_{ns} (A_{ns} - A'_{st}) + f_y A'_{st}) \right] \dots\dots (3)$$

$$\phi P_n = 0.80\phi \left[0.85\psi_f f'_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \right] \dots\dots\dots (4)$$

$$f'_{cc} = f'_c \left[2.25 \sqrt{1 + 7.9 \frac{f_l}{f'_c}} - 2 \frac{f_l}{f'_c} - 1.25 \right] \dots\dots\dots (4.1)$$

$$f_l = \frac{\kappa_a \rho_f f_{fe}}{2} \dots\dots\dots (4.2)$$

$$\rho_f = \frac{2nt_f (b + h)}{bh} \dots\dots\dots (4.3)$$

- A_c = พื้นที่หน้าตัดคอนกรีตเสาดั้งเดิม
- A_{rc} = พื้นที่หน้าตัดคอนกรีต (RCJ) ส่วนเพิ่ม
- A_{ns} = พื้นที่หน้าตัดคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS) ส่วนเพิ่ม
- A_{st} = พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมยืน
- A'_{st} = พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมยืนในคอนกรีตส่วนเพิ่ม
- f'_c = กำลังอัดประลัยคอนกรีตเสาดั้งเดิม
- f'_{rc} = กำลังอัดประลัยคอนกรีต (RCJ) ส่วนเพิ่ม
- f'_{ns} = กำลังอัดประลัยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS) ส่วนเพิ่ม
- f_y = กำลังรับแรงดึงที่จุดครากเหล็กเสริมยืน
- f'_{cc} = กำลังรับแรงอัดปรากฏของคอนกรีตที่ถูกพันด้วยแผ่นไฟเบอร์
- f_l = ค่าหน่วยแรงโอบรัดเนื่องจากการพันแผ่นไฟเบอร์
- f_{fe} = ค่าหน่วยแรงประสิทธิผลของแผ่นไฟเบอร์ ณ จุดที่แผ่นไฟเบอร์ฉีกขาด
- κ_a = ค่าตัวคูณสำหรับรูปหน้าตัด ในกรณีหน้าตัดสี่เหลี่ยมไม่มี การกำหนดค่า κ_a ไว้สำหรับการคำนวณหาค่าแรงอัด แต่ระบุสมการคำนวณค่า κ_a ไว้สำหรับการคำนวณด้านความเหนียวเท่านั้น ดังนั้นสำหรับการศึกษานี้จึงใช้ค่า κ_a เท่ากับ 1.0

ตารางที่ 2 ค่าแรงอัดสูงสุดคำนวณจากสมการและผลการทดสอบเสา

เสา	ϕ	f'_c, f'_{rc} f'_{ns}, f'_{cc} (ksc)	P_n (สมการ) (ตัน)	P_n (ทดสอบ) (ตัน)	% แตกต่าง
C	1.0	116	43	56	23.2
RCJ	1.0	107	57	80	28.7
NS	1.0	295	120	62	-93.5
F1	1.0	425	82	86	4.7
F2	1.0	529	97	112	13.4

ตารางที่ 2 แสดงค่าแรงอัดสูงสุดของเสาดั้งเดิม (C) เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (RCJ) เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS) เสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน 1 ชั้น และ 2 ชั้น (F1 และ F2) คำนวณตามสมการที่ (1)-(4) เปรียบเทียบกับค่าแรงอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ ค่าแรงอัดสูงสุดของเสา C, RCJ, F1, และ F2 ที่คำนวณได้ มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างจริงประมาณ 5%-30% ดังแสดงในตาราง เมื่อใช้ค่าตัวคูณลดค่าแรงอัดสูงสุดของเสาเสริมคอนกรีต (ϕ) เท่ากับ 1.0 ดังนั้นในกรณีใช้ ϕ เท่ากับ 0.7 สำหรับเสาสั้นที่ใช้เหล็กปลอก ค่าแรงอัดสูงสุดที่ได้จากสมการของ ACI จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบประมาณ 7%-40% ซึ่งคำนวณเป็นส่วนปลอดภัย (Factor of Safety) สำหรับเสา C ได้ประมาณ 1.87 สำหรับเสา RCJ ได้ประมาณ 2.0 สำหรับเสา F1 ได้ประมาณ 1.5 และ สำหรับเสา F2 ได้ประมาณ 1.6

แต่สำหรับเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS) ค่าแรงอัดที่คำนวณได้จากสมการมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากผลการทดสอบมากถึง 94% แสดงว่าสมการที่ 3 ไม่สามารถใช้ในการคำนวณหาค่าแรงอัดสูงสุดของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัวได้

6. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการเพิ่มความสามารถในการรับแรงอัดของเสาเสริมเหล็กด้วยวิธีการสามวิธีที่นิยมใช้ในประเทศไทยคือ 1) การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีต

เสริมเหล็ก (RCJ) 2) การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS) และ 3) การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน 1 ชั้น และ 2 ชั้น (F1 และ F2) โดยหล่อตัวอย่างเสาต้นแบบและทำการเสริมกำลังด้วยวิธีดังกล่าว ทดสอบหาแรงอัดสูงสุดที่เสาแต่ละต้นสามารถรับได้และนำค่ามาวิเคราะห์เปรียบเทียบ พร้อมทั้งสังเกตพฤติกรรมการพังของเสา ซึ่งสามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1) เสาที่เสริมกำลังเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (RCJ) รับแรงอัดได้เพิ่มขึ้น 40% เทียบกับเสาต้นแบบ (C) และมีระยะยวบตัวที่แรงอัดสูงที่สุดมากกว่าของเสาต้นแบบประมาณ 50% แสดงว่าการเสริมกำลังด้วยวิธีและรายละเอียดนี้สามารถเพิ่มกำลังอัดและความเหนียวให้กับเสาต้นแบบ

2) เสาที่เสริมกำลังเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS) รับแรงอัดได้เพิ่มขึ้นเพียง 7% เทียบกับเสาต้นแบบ (C) และมีระยะยวบตัวเท่ากับของเสาต้นแบบ แสดงว่าการเสริมกำลังด้วยวิธีและรายละเอียดนี้ไม่มีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังให้พฤติกรรมการพังของเสาที่ไม่ดี กล่าวคือเป็นการพังแบบเปราะรุนแรง (Brittle failure)

3) เสาที่เสริมกำลังเสาด้วยวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน 1 ชั้น และ 2 ชั้น สามารถเพิ่มแรงอัดให้เสาต้นแบบได้ 54% และ 100% ตามลำดับ และเสาที่เสริมกำลังทั้งสองต้นมีระยะยวบตัวมากกว่าของเสาต้นแบบ แสดงว่าการเสริมกำลังด้วยวิธีและรายละเอียดนี้สามารถเพิ่มความเหนียวให้กับเสาต้นแบบ อย่างไรก็ตามลักษณะการวิบัติของเสาทั้งสองต้นนี้เกิดขึ้นรวดเร็ว เนื่องจากการขาดของเส้นใยไฟเบอร์คาร์บอน ซึ่งเป็นลักษณะการพังแบบเปราะ (Brittle failure)

4) เมื่อเปรียบเทียบด้านกำลังรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้น พบว่าการเสริมกำลังด้วยวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน 2 ชั้น มีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังสูงสุด รองลงมาเป็นวิธีการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอน 1 ชั้น และสุดท้ายเป็นวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก

5) การเสริมกำลังเสาด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS) โดยใช้รายละเอียดเหล็กยึดที่มุมเสาและพันรอบด้วยลวดตะแกรงเป็นการเสริมกำลังที่ไม่มีประสิทธิภาพ ไม่สมควรนำไปใช้ในงานก่อสร้างจริง สมควรมีการศึกษาและปรับปรุงรายละเอียดต่างๆเพิ่มเติม

6) สมการการคำนวณหาแรงอัดสูงสุดของเสาเส้นคอนกรีตตาม ACI 318-99 สามารถนำมาคำนวณหาแรงอัดสูงสุดของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (RCJ) โดยทำการเพิ่มเติมส่วนการคำนวณแรงอัดที่เกิดจากการเพิ่มหน้าตัดแสดงดังสมการที่ 2

7) ไม่สามารถใช้สมการการคำนวณหาแรงอัดสูงสุดของเสาเส้นคอนกรีตตาม ACI 318-99 ที่ทำการเพิ่มเติมส่วนการคำนวณแรงอัดที่เกิดจากการเพิ่มหน้าตัดแสดงดังสมการที่ 3 ในการคำนวณหาแรงอัดสูงสุดของเสาที่เสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มหน้าตัดด้วยคอนกรีตชนิดไม่หดตัว (NS)

8) สมการการคำนวณหาแรงอัดสูงสุดของเสาเส้นคอนกรีตตาม ACI 440.2R-02 (บทที่ 11) สามารถคำนวณหาแรงอัดสูงสุดของเสาที่เสริมกำลังด้วยการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์คาร์บอนได้ใกล้เคียงผลการทดสอบ

เมื่อใช้ค่า ค่าตัวคูณลดค่าแรงอัดสูงสุดของเสาเส้นคอนกรีต (ϕ) และค่าตัวคูณสำหรับรูปหน้าตัด (κ_u) เท่ากับ 1.0

9) การใช้ค่าตัวคูณลดค่าแรงอัดสูงสุดของเสาเส้นคอนกรีต (ϕ) เท่ากับ 0.70 สำหรับเสาเส้นที่ใช้เหล็กปลอก ตามข้อเสนอของ ACI 318-99 ทำให้เสาทดสอบมีส่วนปลอดภัย (Factor of Safety) สำหรับเสา C ได้ประมาณ 1.87 สำหรับเสา RCJ ได้ประมาณ 2.0 สำหรับเสา F1 ได้ประมาณ 1.5 และ สำหรับเสา F2 ได้ประมาณ 1.6

7. กิตติกรรมประกาศ

งานศึกษานี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ประจำปี 2554 (15/2554)

เอกสารอ้างอิง

- [1] ACI 318-99, American Concrete Institute, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete," American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1999.
- [2] ACI 440.2R-02, American Concrete Institute, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures," American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2000.
- [3] Jame G. MacGregor, and James K. Wight, "Reinforced Concrete Mechanics & Design", 4th Edition, Prentice Hall, New Jersey, 2005
- [4] J.G., Teng, J.F., Chen, S.,T., Smith, and L., Lam, "FRP Strengthened RC Structures", John Wiley & Sons, New York, 2002
- [5] Mirmiran, A., and Shahawy M., "Behavior of concrete columns confined by fiber composites.", J. of structural Engineering, 1997, May, pp 583-590
- [6] Nanni, A., and Bradford, N. M., "FRP jacketed concrete under uniaxial compression.", Construction and Building Materials, 1995, V.9(2), pp 115-124.