

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
ทุนอุดหนุนการวิจัย งบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2547

หัวข้อโครงการวิจัย
การศึกษาพฤติกรรมการยัดเกาะของคอนกรีตที่ถูกเสริมด้วย
แผ่นไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลัง
A Study of Concrete Confined by FRP Composites

*BKO086434

AQ-0029144

- 6 ต.ค. 2548

197469

โดย

ดร. อานนท์ วงษ์แก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

บทคัดย่อ

โครงการงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยวัสดุไฟเบอร์พลาสติก เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับการซ่อมแซมและเสริมกำลังคอนกรีตด้วยแผ่นไฟเบอร์ และนำเสนอวิธีการที่เหมาะสมและประหยัดในการซ่อมแซมเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีต

โครงการวิจัยนี้ทำการทดลองหาค่ากำลังอัดและระยะการเสียรูปในแนวตั้งของแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร ทั้งที่เสริมเหล็กและไม่เสริมเหล็ก โดยแท่งคอนกรีตนี้ถูกทำให้ชำรุดด้วยวิธีการทางเคมี ซึ่งระดับการชำรุดเสียหายถูกแบ่งโดยใช้ระยะเวลาและน้ำหนักคงเหลือของเหล็กเสริมเป็นตัวกำหนด หลังจากนั้นแท่งคอนกรีตเหล่านี้ถูกนำมาซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์ ด้วยจำนวนรอบที่แตกต่างกันตามระดับความเสียหาย ค่าแรงอัดที่ได้จากการซ่อมแซมถูกเปรียบเทียบกับค่าแรงอัดของแท่งทดสอบที่ไม่ชำรุด จากผลการศึกษาแท่งคอนกรีตตัวอย่าง พบว่าพฤติกรรมของแท่งคอนกรีตที่ได้รับการเสริมกำลัง และการซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์นั้นมีความคล้ายคลึงกันคือ เพิ่มความสามารถในการรับแรงอัด และค่าการเสียรูปในแนวแกนตั้งของแท่งทดสอบ จำนวนรอบที่ใช้ในการพันแผ่นไฟเบอร์เพื่อเสริมกำลังนั้นขึ้นอยู่กับค่าความสามารถในการรับแรงอัดที่ต้องการให้เพิ่มขึ้น สำหรับจำนวนรอบที่ใช้ในการพันแผ่นไฟเบอร์เพื่อซ่อมแซมนั้นขึ้นอยู่กับระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแท่งคอนกรีต ทั้งนี้แผ่นไฟเบอร์นั้นใช้ได้ดีกับแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กและไม่เสริมเหล็ก

Abstract

The purposes of this study are to study behaviors of concrete confined by Fiber Reinforced Plastic (FRP) composite, to apply experimental data for repairing and retrofitting of the damaged concrete by FRP, and to suggest an appropriate and cost-effective use of FRP composite.

The experiments were designed to measure the compressive forces and vertical displacements of tested specimens. The specimens were concrete cylinders with dimensions of 100 mm. in diameter and 200 mm. in height. The specimens also are with and without steel reinforcement. The damages were introduced to the specimens by using an electrolysis process. The damage levels were determined from the period of the electrolysis process and the remaining weight of steel in the specimens. Then, the damaged specimens were repaired by using a fiber reinforced paper to wrap with various numbers of layers. The compressive loads of repaired specimens were compared to the undamaged specimens.

The results showed that the behavior of repaired specimens is acceptable. The compressive loads can be significantly increased by wrapping of FRP composite to the surfaces of specimens. The increase of compressive loads depends on the number layers of FRP used for wrapping the specimens. The numbers of FRP layers used for repairing the specimens are determined from damage levels of the specimens. FRP composite is also applicable for both concrete cylinders with and without steel reinforcement.

กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจาก สภาวิจัยแห่งชาติประจำปีงบประมาณ 2547 ภายใต้หัวข้อเรื่อง “การศึกษาพฤติกรรมการยึดเกาะของคอนกรีตที่ผูกเสริมด้วยแผ่นไฟเบอร์พลาสติกเสริมกำลัง” ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณมา ณ ที่นี้ และผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ซึ่งเป็นหน่วยงานต้นสังกัดของผู้วิจัย ได้ให้การสนับสนุนในการทำงานวิจัยเป็นอย่างดี รวมถึงอาจารย์และเพื่อนร่วมงานหลายท่าน ที่ให้คำปรึกษาในการทำงานวิจัยครั้งนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมิชิแกน แอนอาร์เบอร์ รัฐมิชิแกน ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่อนุญาตให้ใช้ห้องทดลองและอุปกรณ์ในการปฏิบัติงานทดลองบางส่วนองงานวิจัยครั้งนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
สารบัญ	iv
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการทำโครงการ	1
1.4 แผนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎี	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.3 การเสริมกำลังด้วย Carbon Fiber	8
2.4 การเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริม	10
บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	12
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	14
3.3 ขั้นตอนการศึกษาโครงการ	18
3.4 การเตรียมวัสดุสำหรับใช้ในการหล่อแท่งคอนกรีต	18
3.5 การหล่อแท่งคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก	20
3.6 การหล่อแท่งคอนกรีตเสริมเหล็ก	22
3.7 การบ่มคอนกรีต	23
3.8 กระบวนการเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของคอนกรีต	24
3.9 การเสริมกำลังและซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์	25
3.10 การทดสอบความสามารถรับกำลังอัดของแท่งคอนกรีต	27

	หน้า
3.11 การตรวจสอบความเสียหายของแท่งคอนกรีต	28
บทที่ 4 ผลการทดลอง	
4.1 การใช้รหัสอักษรเป็นชื่อเรียกแทนแท่งคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ	30
4.2 ผลการทดสอบแท่งคอนกรีต N7 และแท่งคอนกรีตเสริมเหล็ก N7S	31
4.3 ผลการทดสอบแท่งคอนกรีตเสริมด้วยแผ่นไฟเบอร์ N7F1	32
4.4 ผลการทดสอบแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กและห่อหุ้มด้วยแผ่นไฟเบอร์	34
4.5 ผลการทดสอบแท่งคอนกรีตเสริมด้วยแผ่นไฟเบอร์ ที่มีระยะทาบ 1 เซนติเมตร, 5 เซนติเมตร, 10 เซนติเมตร	35
4.6 ผลการทดสอบแท่งคอนกรีตไม่เสริมเหล็กที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นไฟเบอร์ จำนวน 2 ชั้น และ 4 ชั้น	37
4.7 ผลการทดสอบแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผ่านกระบวนการ การเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริม	38
4.8 ผลการทดสอบแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการสูญเสีย เหล็กเสริมระดับ E2 และมีการซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์จำนวน 1 รอบ	41
4.9 ผลการทดสอบแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการสูญเสียเหล็กเสริม ระดับ E3 และซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์จำนวน 1 รอบ และ 2 รอบ	42
4.10 ผลการทดสอบแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการสูญเสียเหล็กเสริม ระดับ E4 และซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์จำนวน 1, 2 รอบ และ 6 รอบ	43
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	
5.1 สรุปผลการทดลอง	45
5.2 ข้อเสนอแนะ	46
บรรณานุกรม	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ปัจจุบันปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเนื่องจากเหล็กเสริมเกิดสนิม นับว่าเป็นปัญหาที่สำคัญยิ่ง จะสังเกตเห็นได้จากอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปมักจะเกิดอาการแตกร้าว เนื่องจากปัญหาเหล็กเสริมเกิดสนิมและทำให้ผิวคอนกรีตแตกกะเทาะ ซึ่งปัจจัยนี้ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและความแข็งแรงของคอนกรีต ดังนั้นการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเหล่านี้เพื่อให้สามารถใช้งานได้ต่อไปและปลอดภัย จึงเป็นสิ่งที่น่าศึกษาเป็นอย่างยิ่ง การซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี การใช้แผ่นไฟเบอร์หรือหุ้มโครงสร้างคอนกรีตก็เป็นอีกแนวทางหนึ่ง ซึ่งสามารถนำมาซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตได้ จึงนับว่าเป็นสิ่งที่น่าศึกษาตรวจสอบ และประเมินผลถึงประสิทธิภาพ รวมถึงวิธีการและปริมาณในการใช้แผ่นไฟเบอร์ซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีต และนำเสนอวิธีการใช้แผ่นไฟเบอร์เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยแผ่นไฟเบอร์
- 1.2.2 เปรียบเทียบพฤติกรรมระหว่างคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยแผ่นไฟเบอร์ และ ไม่ถูกห่อหุ้มด้วยแผ่นไฟเบอร์
- 1.2.3 ศึกษาขนาดและปริมาณที่เหมาะสมในการนำแผ่นไฟเบอร์มาประยุกต์ใช้
- 1.2.4 ศึกษาประสิทธิภาพของแผ่นไฟเบอร์ที่นำมาใช้ในการซ่อมแซมความเสียหายของคอนกรีต เช่น การกะเทาะออกของผิวคอนกรีต
- 1.2.5 เสนอแนะวิธีการที่เหมาะสมในการนำแผ่นไฟเบอร์มาใช้ในการซ่อมแซมคอนกรีต

1.3 ขอบเขตโครงงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตที่ถูกพันด้วยแผ่นไฟเบอร์ในด้าน กำลัง และลักษณะการวิบัติ
- 1.3.2 เปรียบเทียบพฤติกรรมระหว่างคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มและไม่ถูกห่อหุ้มด้วยแผ่นไฟเบอร์

- 1.3.3 เสนอวิธีการใช้ และปริมาณแผ่นไฟเบอร์ที่เหมาะสมในการซ่อมแซมและเสริมกำลังให้กับคอนกรีต

1.4 แผนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 เตรียมตัวอย่างแท่งคอนกรีตที่จะใช้ในการทดสอบ
- 1.4.3 เร่งการเกิดสนิมเหล็กในแท่งคอนกรีตทดสอบด้วยวิธีอิเล็กโตไลซิส (Electolysis) เพื่อให้ได้ระดับความเสียหายตามที่ต้องการ
- 1.4.4 เสริมกำลังและซ่อมแซมแท่งคอนกรีตในข้อ 1.4.3 ด้วยแผ่นไฟเบอร์
- 1.4.5 ทดสอบกำลังแท่งคอนกรีตที่ไม่ถูกซ่อมแซม และซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์เปรียบเทียบกัน
- 1.4.6 สรุปและวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมด พร้อมทั้งจัดทำรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบถึงพฤติกรรมของแท่งคอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยแผ่นไฟเบอร์
- 1.5.2 ทราบถึงแนวคิดในการนำแผ่นไฟเบอร์มาใช้เสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 1.5.3 ทราบถึงวิธีการนำวัสดุประเภทไฟเบอร์มาใช้ในการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดความเสียหายจากการถูกกัดกร่อนและเกิดสนิมที่เหล็กเสริม ผลจากการศึกษาทดลองในครั้งนี้สามารถนำไปใช้ในการบำรุง รักษา และซ่อมแซมสะพานคอนกรีตซึ่งเกิดความเสียหายเนื่องจากการถูกกัดกร่อนและการกะเทาะออกของผิวคอนกรีต

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 ทฤษฎีการจำกัดปริมาตรด้วยการห่อหุ้ม (Confinement theory)

Fiber reinforced paper (FRP) เป็นวัสดุที่สามารถทนต่อแรงดึงและต้านทานต่อสภาวะที่ ถูกกัดกร่อนได้ดีมากกว่าวัสดุก่อสร้างประเภทอื่น แต่สามารถทนต่อแรงกดอัดได้น้อย จึงได้มีการ นำแผ่นไฟเบอร์ มาใช้พันห่อหุ้มภายนอกของชิ้นส่วนคอนกรีตเพื่อไปช่วยส่งเสริมกำลังของ คอนกรีตเสริมเหล็กตามหลักทฤษฎีที่ว่าด้วยการห่อหุ้มเพื่อจำกัดการเพิ่มขยายปริมาตรของ คอนกรีต (Confinement theory) จากหลักการที่มีอยู่ว่า “การวิบัติของคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นจะ เกิดขึ้นเมื่อโครงสร้างคอนกรีตนั้นๆ เกิดการขยายตัวจนความสามารถในการยึดเกาะกันของ คอนกรีตลดลง เนื่องจากการรับแรงที่มากเกินไปจนผิว หรือด้านในโครงสร้างคอนกรีตนั้นๆ เกิดปริ แตกออกจากกัน” เราจะเห็นได้ว่าการขยายปริมาตรออกของคอนกรีตเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิด การวิบัติ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรจะส่งผลถึงความสามารถในการยึดเกาะกันของ คอนกรีต ดังนั้นถ้าเราสามารถจำกัดไม่ให้คอนกรีตเกิดการขยายปริมาตรได้ ก็จะช่วยยืด ระยะเวลาการวิบัติของคอนกรีตได้ ซึ่งวัสดุที่จะนำมาใช้ในการจำกัดการขยายปริมาตรออกนั้น จะต้องเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทนต่อแรงดึงได้ดีกว่าคอนกรีต แต่ไม่จำเป็นต้องทนต่อแรงกดอัด ได้ดีเท่ากับคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตเมื่อถูกแรงกดอัดจะมีผลทำให้ส่วนผสมภายในเกิดการ ถ่างแยกให้กันจนเกิดเป็นแรงดัดภายใน จนแรงอัดที่ถูกส่งผ่านเข้ามาด้านบนเปลี่ยนเป็นแรงดึงที่ ผิวด้านข้างทำให้ความสามารถในการยึดเกาะกันของคอนกรีตลดลง ดังนั้นวัสดุที่จะนำมาพันรอบ ด้านข้างจะต้องเป็นวัสดุที่รับแรงดึงได้ดีกว่าคอนกรีต

สำหรับประโยชน์หลักของ Fiber Reinforced Paper (FRP) นั้นจะแบ่งเป็นหัวข้อหลักคือ

1. ใช้ในการซ่อมแซมคอนกรีตที่เกิดความเสียหายจากการถูกกัดกร่อนที่ผิว หรือเกิดการกะเทาะที่ผิวคอนกรีตเนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิม
2. ใช้ในการเสริมกำลังให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงได้มากขึ้น เช่น การเสริมแรงเฉือน ของคอนกรีต เป็นต้น

ดังนั้นในโครงการทางวิศวกรรมนี้จะศึกษาถึงพฤติกรรมของคอนกรีตที่เสริมแผ่น ไฟเบอร์ว่ามี ลักษณะอย่างไร มีพฤติกรรมการวิบัติอย่างไร ศึกษาถึงวิธีการและรูปแบบที่จะทำให้ สามารถนำ Fiber Reinforced Paper (FRP) มาประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.1.2 การเสื่อมสภาพของคอนกรีต [7]

การเสื่อมสภาพของคอนกรีตสามารถจำแนกออกได้เป็น 5 ชนิด ตามสาเหตุของการเสื่อมสภาพดังนี้

- 2.1.2.1 โดยสาเหตุทางกายภาพ ได้แก่ การหดตัวแบบแห้ง การทรุดตัว การหดตัวแบบพลาสติก การแข็งตัวและการไหลของน้ำในคอนกรีต
- 2.1.2.2 โดยสาเหตุทางเคมี ได้แก่ คาร์บอนเนชั่น การกัดกร่อนโดยกรด โดยซัลเฟต ปฏิกริยาระหว่างต่างกับมวลรวม
- 2.1.2.3 โดยสาเหตุทางกล ได้แก่ การขีดสี การชะล้างด้วยกระแสน้ำและกรวดทราย และการแตกตัวของฟองอากาศในน้ำ
- 2.1.2.4 โดยสาเหตุทางชีวภาพ ได้แก่ การเสื่อมสภาพโดย ตะไคร่ รา รากพืช หรือแบคทีเรีย
- 2.1.2.5 โดยสาเหตุรวม ได้แก่ การเกิดสนิมในเหล็ก เป็นต้น

ปัญหาของความคงทนในคอนกรีตส่วนใหญ่มักจะเกิดกับคอนกรีตหลังจากสภาวะแข็งตัวแล้ว แต่อย่างไรก็ดี ปัญหาอย่างที่เกิดขึ้นกับคอนกรีตในสภาวะก่อนหน้านี้นี้ก็สามารถนำไปสู่ปัญหาในระยะยาวได้ สำหรับการศึกษาคอร์สงานครั้งนี้ได้มุ่งเน้นเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอันเนื่องมาจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม และการหลุดกะเทาะออกของเนื้อคอนกรีตเท่านั้น

2.1.3 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต

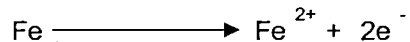
โดยปกติแล้วเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตจะถูกปกป้องไม่ให้เกิดสนิมด้วยความเป็นด่างที่สูงของคอนกรีต ในสภาวะของความเป็นด่างที่สูง เหล็กจะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาอะโนดิกได้ คือเหล็กจะไม่แตกตัวออกเป็นไอออน (Fe^{2+}) และอิเล็กตรอน ($2e$) ได้เลย ความเป็นด่างในคอนกรีตมักจะอยู่ในช่วง 12.5 จนถึง 13.5 ขึ้นกับวัสดุ และส่วนผสมของคอนกรีต คุณภาพของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมก็เป็นปัจจัยสำคัญของการควบคุมการเป็นสนิมของเหล็กเสริมด้วย

เหล็กเสริมในคอนกรีตจะเป็นสนิมได้ก็ต่อเมื่อได้เกิดเงื่อนไขทั้ง 3 ประการดังต่อไปนี้

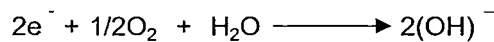
- ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงจนปฏิกิริยาอะโนดิกสามารถเกิดได้ ซึ่งความเป็นด่างในระดับที่จะทำให้ปฏิกิริยาอะโนดิกเกิดได้นั้น จะมีค่า ph ต่ำกว่าระดับ 9 ถึง 10 และมักจะเรียกว่าระดับวิกฤติของความเป็นด่าง ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลงได้ด้วยสาเหตุต่างๆดังต่อไปนี้ คือ คาร์บอนเนชั่น การซึมผ่านของคลอไรด์ เข้าไปในคอนกรีต หรือแม้แต่การชะล้างของน้ำฝนในกรณีที่คอนกรีตพรุนมาก
- มีความชื้นพอที่จะทำให้ ไอออนของเหล็ก (Fe^{2+}) เข้าสู่สารละลาย และเพียงพออยู่ในบริเวณที่คอนกรีตที่หุ้มรอบๆ เหล็กเสริมอยู่แล้ว

- มีออกซิเจนเพียงพอในการทำปฏิกิริยาเพื่อการเกิดสนิม ซึ่งปกติแล้วออกซิเจนในปริมาณที่เพียงพอในการเกิดสนิมมักจะแพร่เข้าสู่คอนกรีตบริเวณเหล็กเสริมโดยผ่านทางช่องว่างที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ คือแพร่ผ่านอากาศในช่องว่างแต่การแพร่ของออกซิเจนผ่านช่องว่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำอยู่ตลอดเวลาจะไม่เกิดสนิมในเหล็ก

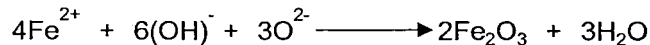
การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตจะเริ่มด้วย คอนกรีตในบริเวณรอบๆเหล็กเสริมมีความเป็นด่างลดลงจนถึงระดับวิกฤต และบริเวณรอบๆเหล็กเสริมมีความชื้นเพียงพอ ทำให้เหล็กเกิดปฏิกิริยา Electrolysis ขึ้นดังต่อไปนี้



โดยเหล็กจะแตกตัวเป็นไอออน Fe เข้าสู่สารละลาย อิเล็กตรอนจะวิ่งไปตามเหล็ก ปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการอะโนดิก จากนั้น 2e^{-} ที่เกิดจากปฏิกิริยาอะโนดิกจะรวมกับน้ำและออกซิเจนที่บริเวณเดียวกัน หรือบริเวณใกล้เคียง ทำให้เกิดเป็นไฮดรอกซิลไอออน (OH) ดังสมการต่อไปนี้



ปฏิกิริยานี้เรียกว่า กระบวนการแคโทดิก (Cathodic Process) หลังจากนั้น สนิมก็จะเกิดขึ้นดังสมการต่อไปนี้



โดยที่ Fe_2O_3 คือเฟอริกออกไซด์ หรือสนิม

ผลกระทบของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

สาเหตุหลักที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตสูญเสียกำลังรับแรงจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมมีอยู่ 2 ประการคือ

- ขนาดของเหล็กบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอะโนดิก (เหล็กสูญเสียอิเล็กตรอน) จะเล็กลง เนื่องจากเนื้อเหล็กบางส่วนกลายเป็นสารละลาย (Fe^{2+}) และอิเล็กตรอน ทำให้พื้นที่หน้าตัดในการรับแรงในบริเวณดังกล่าวลดลงตามขนาดของเหล็กที่ลดขนาดลง
- การเกิดสนิมจะทำให้เกิดแรงดันต่อคอนกรีตบริเวณรอบๆเหล็กเสริม เนื่องจากสนิมเหล็กจะมีปริมาณมากกว่าเหล็กเดิมที่สลายตัวเข้าสู่สารละลาย ดังนั้นจะทำให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมแตกร้าตามแนวเหล็กเสริมได้ ดังนั้นผลกระทบโดยรวมจากสาเหตุ

ข้างต้นนี้คือ กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Fatigue Strength และความสามารถในการแอ่นตัวหรือเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโครงสร้างก็ลดลงด้วย นอกจากนี้ ความยืดหยุ่นก็จะลดลง การเกิดรอยแตกร้าวยังเป็นการเร่งให้น้ำและออกซิเจนเข้าไปถึงบริเวณเหล็กเสริมได้เร็ว และมากยิ่งขึ้น ทำให้เร่งการเกิดสนิมของเหล็กเสริมให้เร็วและรุนแรงยิ่งขึ้นด้วย

2.1.4 การกัดกร่อนโดยกรด (Acid Attack)

ในการศึกษาโครงการวิจัยครั้งนี้ได้มีการใช้วิธีการกัดกร่อนผิวคอนกรีตด้วยกรด ไฮโดรคลอริก (Hydrochloric) เพื่อจำลองสภาวะการถูกกัดกร่อนตามธรรมชาติจนเกิดความพรุนที่ผิวคอนกรีต การกัดกร่อนโดยกรดเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงสารประกอบแคลเซียมทุกประเภทที่มีอยู่ในคอนกรีต เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์($\text{Ca}(\text{OH})_2$) แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต(C-A-H) ให้กลายเป็นเกลือแคลเซียมของกรดที่เข้ามาปฏิกิริยา เช่น กรดเกลือ (HCl) ก็จะเปลี่ยนสารประกอบแคลเซียมในคอนกรีตไปเป็นแคลเซียมคลอไรด์(CaCl_2) จนทำให้บริเวณที่ถูกกัดกร่อนสูญเสียความสามารถในการยึดเกาะระหว่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งระหว่างซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) กับมวลรวม เกลือที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาก็จะถูกชะล้างออกไปได้ง่าย ทำให้เนื้อคอนกรีตถูกทำลายหายไปและมวลรวมหลุดออกจากคอนกรีตได้ง่าย และความรุนแรงของการกัดกร่อนของกรดขึ้นอยู่กับชนิดของกรด ความเข้มข้นของกรด โดยสาเหตุที่เลือกใช้กรดไฮโดรคลอริกเนื่องจากเป็นกรดที่สะดวกในการจัดเตรียม และสามารถกัดกร่อนผิวของคอนกรีตให้เกิดความพรุนได้ดี

2.1.5 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์

คลอไรด์อาจมีอยู่ในคอนกรีตเอง เช่น มีอยู่ในน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต หิน ทราย (โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทรายจากแหล่งใกล้ทะเล) หรือน้ำยาผสมคอนกรีตบางชนิด เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่มักมีอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน เช่น จากน้ำทะเล จากดิน หรือจากเกลือที่ใช้ละลายน้ำแข็ง ถึงแม้คลอไรด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ดี แต่ถ้าไม่มีออกซิเจน การเกิดสนิมของเหล็กเสริมก็ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ นั่นคือความพรุนที่ผิวของคอนกรีตก็เป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต ดังนั้นในการศึกษาโครงการวิจัยครั้งนี้จึงต้องมีการทำให้ผิวคอนกรีตเกิดความพรุนก่อน เพื่อให้กระบวนการจำลองเกิดสนิมที่เหล็กเสริมในคอนกรีตได้ผลดีที่สุด

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การซ่อมแซมเสาที่ได้รับ ความเสียหายจากการกัดกร่อนด้วย FRP [2]

เอกสารนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการประสิทธิภาพของแผ่นไฟเบอร์ (FRP) ที่นำมาใช้ซ่อมแซมเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดความเสียหายจากการกัดกร่อนโดยทำการทดสอบกับแบบจำลอง ย่อส่วนทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร และทำการจำลอง สภาพการกัดกร่อนในธรรมชาติที่เกิดกับคอนกรีตด้วยการใช้กระแสไฟฟ้าและกรดเข้มข้นมาเป็นสิ่ง ช่วยเร่งให้เกิดสภาพการกัดกร่อน กับแท่งลูกปูนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตรและสูง 300 มิลลิเมตรจำนวนทั้งหมด 50 ลูก แบ่งเป็น 2 ประเภทหลักคือ 1. ใช้เหล็กกลมขนาด 3 มิลลิเมตรพันเกลียวเป็นเหล็กปลอก 2. ใช้เหล็กกลมขนาด 3 มิลลิเมตรตัดรูปสามเหลี่ยมเป็นเหล็ก ปลอก โดยทั้งสองประเภทใช้เหล็กเสริมหลักขนาด 10 มิลลิเมตรจำนวน 4 เส้นเท่ากันและมีระยะ ท่อหุ้มเหล็ก 10 มิลลิเมตรเท่ากันที่อายุกำลัง 28 วัน ซึ่งผลจากการทดสอบสามารถยืนยันได้ว่า FRP มีความแข็งแรงเพียงพอและสามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนได้อย่างดี พิสูจน์ให้เห็นว่า FRP เป็นวัสดุที่มีคุณภาพเพียงพอสำหรับการนำมาใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะเมื่อ นำไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของวิธีการซ่อมแซมด้วยการปะคอนกรีต Low Permeability ซึ่ง การซ่อมแซมด้วยไฟเบอร์จะให้ประสิทธิภาพดีกว่าและจะยังเห็นได้ชัดเมื่อจำนวนชั้นที่พันด้วยแผ่น ไฟเบอร์มากขึ้น

2.2.2 พฤติกรรมของส่วนของโครงสร้างรับแรงดัดและแรงอัดเมื่อซ่อมแซมหรือเสริมกำลัง ด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ [4]

เอกสารนี้ศึกษาการใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ซ่อมแซมและเสริมกำลังของโครงสร้างที่รับ แรงดัดและแรงดัด โดยศึกษาถึงความแตกต่างและความเหมาะสมของจำนวนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ที่จะนำมาใช้เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและคุ้มค่ามากที่สุด ซึ่งพบว่าการนำไฟเบอร์มาเสริมกำลังจะ ทำให้คานและเสามีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งดูได้จากคานมีระยะโก่งตัวลดลงและเสามีค่าหน่วยการ ยึดตัวน้อยลง แต่กำลังที่เพิ่มขึ้นไม่เป็นปฏิภาคโดยตรงกับจำนวนคาร์บอนไฟเบอร์ที่เพิ่มขึ้น แผ่น คาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่คานและเสาที่ทำการเสริมกำลังได้มากกว่าคาน และเสาที่ทำการซ่อมแซม

2.2.3 งานเสริมกำลังพื้นสะพาน (Strengthening) โดยการใช้แผ่นเหล็ก (Steel Plates) และ Carbon Fiber [8]

เอกสารนี้เสนอการเสริมกำลังของสะพานโดยมีรายละเอียดดังนี้ โดยสะพานอ่างทองมี ลักษณะโครงสร้างสะพานแบบ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก และโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง ขนาด $(9*8)+(3*40)+(7*10)$ ยาว 262.00 ม. มีความกว้างผิวจราจร 8.00 ม. และทางเท้ากว้างข้างละ

1.50 ม. ได้เริ่มเปิดใช้งานมาตั้งแต่ปี พ.ศ.2502 ในปัจจุบันปริมาณการจราจรบนสะพานแห่งนี้มีความหนาแน่นมาก และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอีก กรมทางหลวงจึงได้มีโครงการซ่อมบำรุงและขยายช่องจราจร เพื่อรองรับปริมาณการจราจรที่เพิ่มขึ้นโดยแบ่งโครงการก่อสร้างและซ่อมบำรุงออกเป็น 2 ส่วน

- ในส่วนของงานก่อสร้างสะพานใหม่ต่อเนื่องกับสะพานเดิม เพื่อขยายช่องจราจรเพิ่มจากเดิม 8.00 ม. เป็น 14.00 ม.
- ในส่วนของสะพานเดิม ได้มีการตรวจสอบ/ประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้น โดยเลือกวิธีการเสริมกำลังแบบ Externally Bonded Reinforcement ด้วยการติดตั้ง Steel Plates และ Carbon Fiber ได้แผ่นพื้น เพื่อช่วยเพิ่มหน้าตัดของเหล็กเสริมในการรับแรงดัดและแรงเฉือนในแผ่นพื้นสะพาน ทั้งยังช่วยลดการแอ่นตัวของพื้นสะพานอีกด้วยในการติดตั้งแผ่นเหล็กจะใช้ Epoxy เป็นตัวประสานกับท้องคานร่วมกับใช้ Chemical Bolt ช่วยในการยึดติดด้วย

2.3 การเสริมกำลังด้วย Carbon Fiber

2.3.1 รูปแบบ Carbon Fiber โดยทั่วไปมี 3 ประเภท

- แบบแผ่นเส้นใย (Fiber Sheet) มีลักษณะเป็นแผ่นเส้นใย Carbon Fiber จัดเรียงตัวในทิศทางแนวเดียวหรือสองแนว ใช้ระยะเวลาในการติดตั้งนาน ถ้ายางรับน้ำหนักได้ดี ปลอดภัยจากการหลุดล่อน เหมาะสำหรับการเสริมกำลังรับแรงดัด
- แบบแผ่นแข็ง (Laminate) มีลักษณะเป็น Carbon Fiber ที่จัดเรียงและยึดด้วย Resin ให้มีลักษณะเป็นแผ่นแข็ง ซึ่งมีปริมาณ Carbon Fiber ประมาณ 70% ของหน้าตัดใช้ เวลาในการติดตั้งน้อยกว่าแบบเส้นใยเหมาะสำหรับการเสริมกำลังรับแรงดัดในคานและพื้น
- แบบเส้น (Rod) มีลักษณะคล้ายเหล็กเส้นและมีหลายขนาดเป็น Composite ของเส้นใย Carbon Fiber และ Resin โดยมีปริมาณ Carbon Fiber ประมาณ 70% มักใช้กับโครงสร้างคอนกรีตใหม่ โดยการตัดผิวคอนกรีตให้เป็นแนวแล้วฝังเส้น Carbon Fiber ลงไป ใช้พื้นที่ค่อนข้างน้อย เหมาะกับการเสริมกำลังรับแรงดัด แรงเฉือน ในคานเสา พื้น

2.3.2 ขั้นตอนและวิธีการติดตั้ง

- การเตรียมผิวคอนกรีต ต้องมีการเตรียมพื้นผิวอย่างดี มีการขัดให้ผิวสะอาดเรียบ โดยอาจกะเทาะผิวส่วนนอกรอกเพื่อให้ถึงเนื้อคอนกรีตที่รับแรงโดยตรง และต้องมี

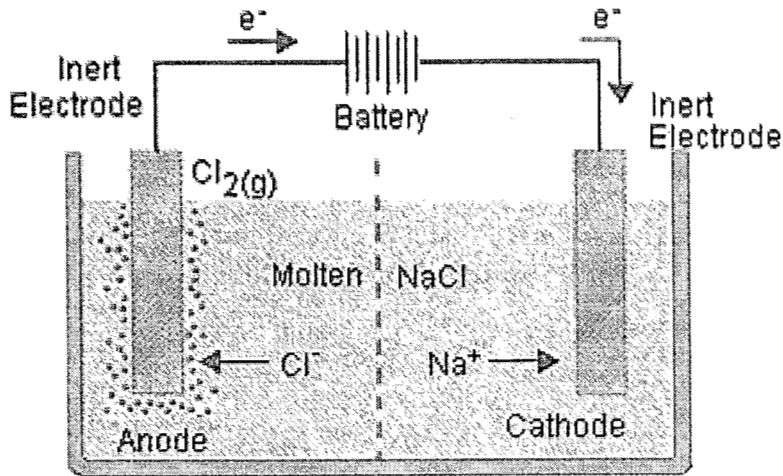
การตรวจสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตไม่น้อยกว่า 20 กก./ ซม.2 ถ้าหากมีรอยแตกหรือรูโหว่ต้องทำการเกราทด้วย Epoxy Mortar ก่อน

- การเตรียมแผ่น Carbon Fiber ทำความสะอาด Carbon Fiber ด้วยน้ำยาทำความสะอาด โดยการติดตั้งจะให้แนวของเส้นใยอยู่ทางเดียวกับที่จะรับแรงดึงในหน้าตัดคาน
- การติดตั้ง Carbon Fiber เข้ากับพื้นคอนกรีต จะต้องมีการเอาหน้าทับรอกจรวดออกจากสะพานก่อนที่จะติดตั้ง Carbon Fiber เข้ากับผิวคอนกรีต ซึ่งต้องทำโดยการปิดการจราจรบนสะพานชั่วคราวจนกว่า Epoxy จะถ่ายแรงได้ ก่อนการติดตั้ง Carbon Fiber ทำการผสม Epoxy แล้วทาลงผิวคอนกรีตปรับระดับของผิวก่อนลงชั้น Primer หลังจากนั้นจะลงชั้นที่เป็นตัวยึด ติดตั้ง Carbon Fiber โดยให้ทิศทางของเส้นใยอยู่ในทิศทางของการรับแรงดึง ใช้ลูกกลิ้งรีดฟองอากาศออก หลังจากนั้นจึงลงสี หรือ Resin ทับอีกชั้น เพื่อป้องกันสภาวะแวดล้อมภายนอก

2.3.3 ข้อแตกต่างระหว่างการใช้ Carbon Fiber กับ Steel Plate

- น้ำหนัก - น้ำหนักของ Steel Plate มีน้ำหนักค่อนข้างมากในขณะที่ Carbon Fiber มีน้ำหนักเบา
- กำลังของวัสดุ - Carbon Fiber มีกำลังรับแรงดึงมากกว่า 10 เท่า ของ Steel Plate แต่ไม่สามารถรับแรงอัดได้เหมือน Steel Plate
- ความหนาที่ใช้ในการเสริมกำลัง - ความหนาของ Steel Plate ต้องมีความหนาน้อยกว่า 3 มม. แต่ Carbon Fiber ใช้ความหนาน้อยกว่า 1 มม.
- การติดตั้ง Carbon Fiber ทำการติดตั้งได้ง่ายกว่า เนื่องจากน้ำหนักเบากว่ามาก
- ความสามารถในการเสริมกำลัง - ในการติดตั้ง Steel Plate มีการติดตั้งด้วย Bolt ร่วมกับ Epoxy จะทำให้กำลังเพิ่มขึ้นได้มากกว่า การติดตั้ง Carbon Fiber เนื่องจากมีการถ่ายแรงรับน้ำหนักได้ดีกว่า
- ความสามารถในการรับ Fatigue Load วัสดุทั้งสองมีความทนทานต่อ Fatigue Load ได้ดี
- ราคาวัสดุ Carbon Fiber มีราคาสูงกว่า Steel Plate ค่อนข้างมาก
- Steel Plate มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งมากกว่า Carbon Fiber

2.4 การเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริม



รูปที่ 2.1 การเกิดกระบวนการ Electrolysis of Molten NaCl

เนื่องจากโครงการวิจัยครั้งนี้มีขอบเขตในการศึกษาเกี่ยวกับการเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีสาเหตุจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริม จึงต้องมีการสร้างสภาพความเสียหายให้เกิดขึ้นกับแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กที่จะใช้ทดสอบเพื่อเก็บข้อมูลด้วยวิธีการที่ใช้ระยะเวลาสั้นและให้ผลถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นการผ่านกระแสไฟฟ้าลงในเหล็กเพื่อให้ไอออนหลุดจากเหล็กจนทำให้เกิดสนิม (electrolytic cells) จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมในการนำมาใช้ โดยมีหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

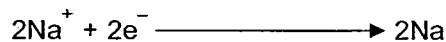
2.4.1 เซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Cells)

เซลล์ไฟฟ้าเคมี คือ เซลล์ที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจากปฏิกิริยาทางเคมี โดยสามารถแบ่งประเภทเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เกิดปฏิกิริยา Oxidation และ Reduction ออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้เองตามธรรมชาติ (Galvanic Cells) และประเภทที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เองตามธรรมชาติ (Voltaic Cells) สำหรับการศึกษาคณะวิจัยครั้งนี้ได้นำหลักการของเซลล์ไฟฟ้าเคมีประเภทที่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เองตามธรรมชาติ แบบ Electrolytic Cells มาใช้ในขั้นตอนการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริม ซึ่ง Electrolytic Cells คือ หน่วยเซลล์ซึ่งทำงานด้วยปฏิกิริยาเคมี และใช้กระแสไฟฟ้าเป็นตัวกระตุ้นให้

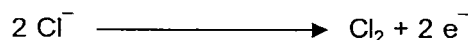
เกิดปฏิกิริยาเคมี (ปฏิกิริยา Oxidation และปฏิกิริยา Reduction) อย่างต่อเนื่อง โดย Electrolytic Cells มีหลักการทำงานดังนี้

จากหลักการของการแยกส่วนประกอบของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (The Electrolysis of Molten NaCl) เมื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าบวกและลบซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) จะทำให้อะตอมของ Na^+ วิ่งเข้าสู่ขั้วไฟฟ้านลบ และอะตอมของ Cl^- จะวิ่งเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าบวก โดยเส้นประบริเวณกลางรูปใช้แทนวัสดุที่สามารถป้องกันการปะปนกันของก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วบวกและโลหะโซเดียมที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วลบโดยยอมให้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ซึมผ่านได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

จากรูปที่ 2.1 เมื่ออะตอมของ Na^+ ชนกับขั้วไฟฟ้านลบซึ่งต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟที่มีค่าความต่างศักย์มากเพียงพอ อะตอมของ Na^+ จะเกิดปฏิกิริยา Reduction จนเปลี่ยนสภาพเป็น Sodium metal (Na) ดังสมการ



และเมื่ออะตอมของ Cl^- ชนกับขั้วไฟฟ้าบวกจะเกิดปฏิกิริยา Oxidation จนเปลี่ยนเป็นก๊าซคลอรีน ซึ่งก็คือฟองอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วบวกดังสมการ



โดยค่าความต่างศักย์ที่ต้องการในการทำให้ Cl^- เกิดปฏิกิริยา Oxidation กลายเป็น Cl_2 เท่ากับ -1.36 V และค่าความต่างศักย์ที่ต้องการในการทำให้ Na^+ เกิดปฏิกิริยา Reduction กลายเป็น Na เท่ากับ -2.71 V

จากรูปที่ 2.1 จะพบว่าขณะเกิดกระบวนการ Electrolysis ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ขั้วไฟฟ้าบวกจะเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับขั้วไฟฟ้านลบ ดังนั้นเมื่อต่อขั้วไฟฟ้าบวกของระบบนี้เข้ากับเหล็กเสริมของแท่งคอนกรีตจะทำให้เหล็กเสริมมีหน้าที่เปรียบเสมือนขั้วไฟฟ้าบวกด้วยจึงทำให้เหล็กเสริมเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนให้กับวัสดุที่ต่อเข้ากับขั้วลบซึ่งในกรณีนี้ใช้เหล็กประเภทเดียวกับเหล็กเสริมแต่ได้รับการเคลือบด้วยสารป้องกันการผุกร่อน (Epoxy และสีป้องกันสนิม) โดยทั้งนี้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมจะทำหน้าเป็นวัสดุป้องกันการปะปนกันของก๊าซคลอรีนที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วบวกและโลหะโซเดียมที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วลบ ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาได้สอดคล้องกับเงื่อนไขในการเกิดสนิมของเหล็ก โดยทั้งนี้ปริมาณในการเกิดสนิมจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้รับ

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

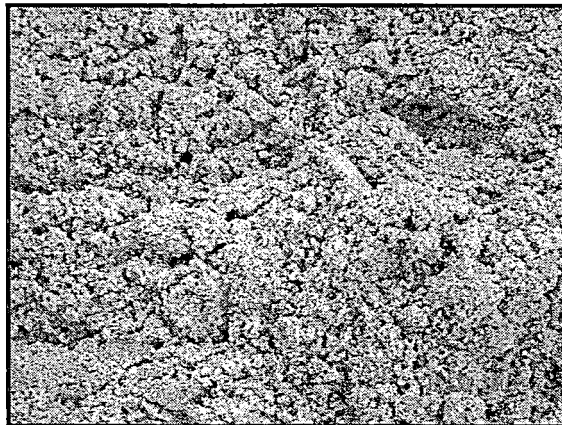
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ปูนซีเมนต์(Cement) ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดราซัง
- 2) หิน (Coarse Aggregate) หินที่ใช้ในการทดสอบเป็นหินปูน ดังแสดงรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 รูปแสดงหินที่ใช้ผสมคอนกรีต

- 3) ทราย (Fine Aggregate) ทรายที่ใช้เป็นทรายบดที่มีสัดส่วนละเอียดตามมาตรฐาน ASTM C 33 (Fine Aggregate) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รูปแสดงทรายที่ใช้ผสมคอนกรีต

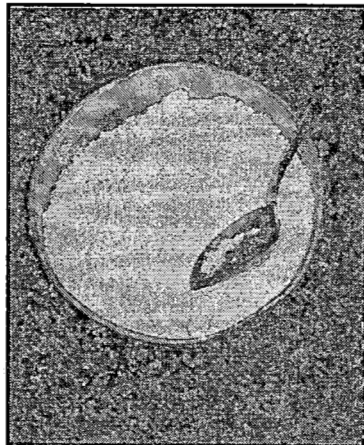
- 4) น้ำ (Water) น้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตต้องเป็นน้ำที่สะอาดปราศจากสิ่งเจือปนโดย

การศึกษานี้ใช้น้ำประปา

- 5) เหล็กเสริม (Reinforcing Steel) เหล็กเสริมที่ใช้เสริมในแท่งคอนกรีต ใช้เหล็กเสริมกลม (RB, grade SR 24) ขนาด 6 mm ดัดเกลียวเป็นเหล็กปลอก และใช้เหล็กข้ออ้อย(DB, grade SD 30) ขนาด 9 mm เป็นเหล็กยื่น ยึดประสานด้วยการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ก)
- 6) ผงกำมะถัน (Sulfur) ผงกำมะถันใช้ในการปรับผิวหน้าของแท่งคอนกรีตที่ต้องการทดสอบให้เรียบ โดย ก่อนใช้ต้องนำไปให้ความร้อนจนมีลักษณะเป็นของเหลวจึงจะใช้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (ข)



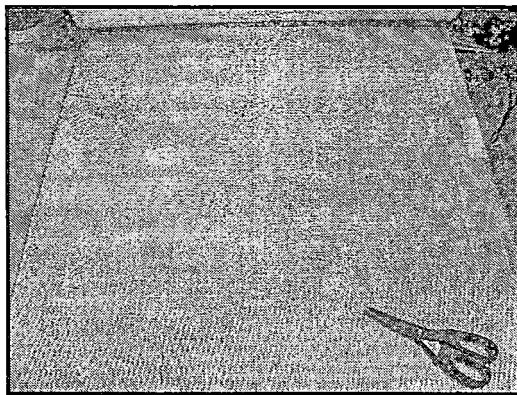
(ก)



(ข)

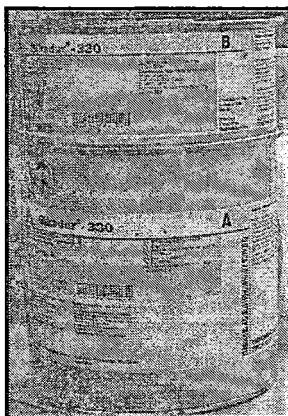
รูปที่ 3.3 รูปแสดงเหล็กเสริมและผงกำมะถัน

- 7) FRP (Fiber reinforced plastic) FRP ใช้ไฟเบอร์ชนิดแผ่น (SikaWrap – 430G) ของบริษัท ชิเก่า จำกัด สำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่รับแรงแบบ Statics ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 รูปแสดงลักษณะของแผ่นไฟเบอร์

- 8) สีทากันสนิม
- 9) นำยาประสานระหว่างผิวคอนกรีตกับแผ่นไฟเบอร์ (Epoxy) ใช้หน้ายา Epoxy สำหรับติดใช้ไฟเบอร์ชนิดแผ่น (Sikadur – 330) โดยเฉพาะ ของบริษัท ชิโก้ จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.5

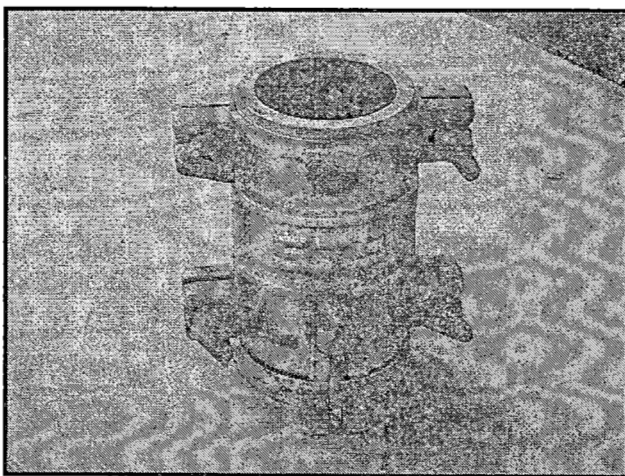


รูปที่ 3.5 รูปแสดงหน้ายา Epoxy

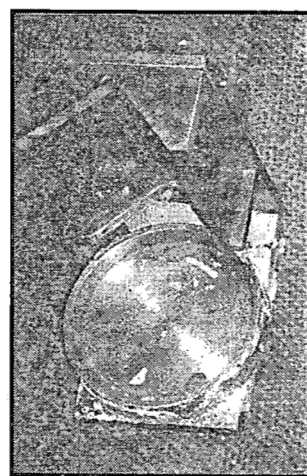
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) แบบหล่อชั้นตัวอย่างทดสอบ (Mold) แบบหล่อชั้นตัวอย่างทรงกระบอกขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) 10 cm และสูง 20 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ก)
- 2) แบบหล่อสำหรับทำการ Cap ด้านหัวและท้ายของแท่งทดสอบด้วยก้ำมะถัน ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ข)
- 3) เครื่องผสมคอนกรีต (Concrete Mixer)
- 4) อุปกรณ์ตักก้ำมะถัน

- 5) เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล (Digital Balance)
- 6) เครื่องทดสอบกำลังอัด (Compression Testing Machine) ในการทดสอบกำลังอัดใช้เครื่อง Universal Testing Machine (Instron) ขนาด 150 ตัน ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เป็นเครื่องทดสอบทุกครั้ง
- 7) เครื่องตัดเหล็กเสริมคอนกรีต (Steel cutting machine)
- 8) แท่งเหล็กกระทุ้งคอนกรีต
- 9) เครื่องผสม Epoxy
- 10) หม้อแปลงไฟฟ้า 12 V 35A (Adaptor) หม้อแปลงจ่ายไฟต้องสามารถแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจาก AC 220 V เป็น DC 12 V และสามารถจ่ายกระแสไฟได้ 35 A ดังแสดงในรูปที่ 3.8
- 11) ตู้จ่ายกระแสไฟฟ้าตู้จ่ายไฟเป็นตัวกลางที่ใช้ถ่ายทอดกระจายกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลง ไปสู่แท่งคอนกรีตซึ่งต้องผ่านกระบวนการเร่งการเกิดปฏิกิริยาสนิมในเหล็กเสริม ดังแสดงในรูปที่ 3.9
- 12) อุปกรณ์วัดค่ากระแสไฟฟ้า ในการตรวจสอบความเสียหายจากการเกิดสนิมของเนื้อเหล็กตามทฤษฎีนั้นจะต้องมีการวัดค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ไหลเข้าสู่ระบบการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของคอนกรีต ณ เวลาต่างๆ กัน โดยในการศึกษาโครงการครั้งนี้ได้ใช้อุปกรณ์วัดค่ากระแสไฟฟ้าแบบ Clamp Meter โดยมีลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 3.10

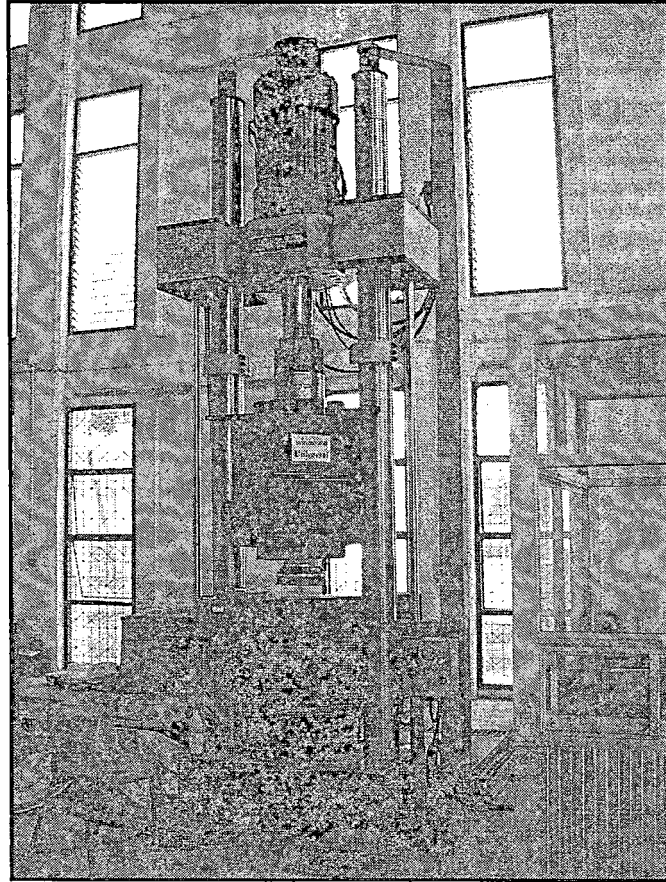


(ก)

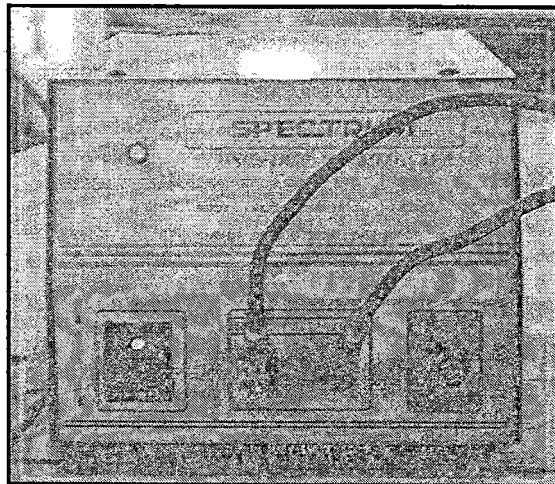


(ข)

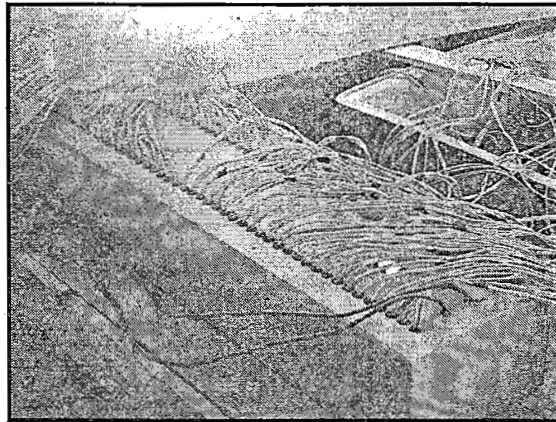
รูปที่ 3.6 รูปแสดงแบบหล่อขึ้นตัวอย่าง และแบบหล่อในการ cap หัวแท่งคอนกรีต



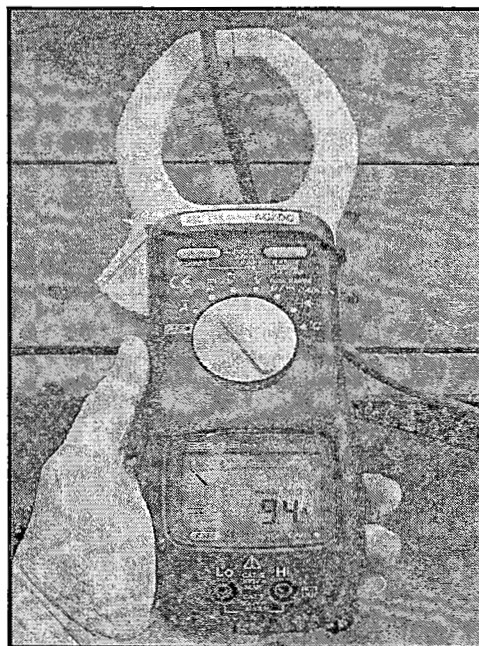
รูปที่ 3.7 รูปแสดงเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine



รูปที่ 3.8 รูปแสดงลักษณะหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 รูปแสดงลักษณะตู้จ่ายกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.10 รูปแสดงลักษณะอุปกรณ์วัดค่ากระแสไฟฟ้า

3.3 ขั้นตอนการศึกษาโครงการ

การศึกษาโครงการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ในการหล่อแท่งคอนกรีตเพื่อใช้เป็นตัวแทนโครงสร้างคอนกรีตในการศึกษา โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ แท่งคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก และแท่งคอนกรีตเสริมเหล็ก

3.4 การเตรียมวัสดุ สำหรับใช้ในการหล่อแท่งคอนกรีต

3.4.1 การเตรียมหิน

- คัดขนาดของหินโดยใช้เฉพาะหินที่ค้างอยู่บนตะแกรงขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว
- ล้างหินให้สะอาดจนเหลือฝุ่นและตะกอนน้อยที่สุด
- แช่หินที่สะอาดแล้วไว้ในน้ำสะอาดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นำหินขึ้นมาวางผึ่งลมจนหินอยู่ในสภาพ wet or damp
- เก็บหินซึ่งอยู่ในสภาพ wet or damp แล้วไว้ในถังมีฝาปิดมิดชิดพร้อมทั้งรองถึงด้วยถุงพลาสติกอีก 1 ชั้น

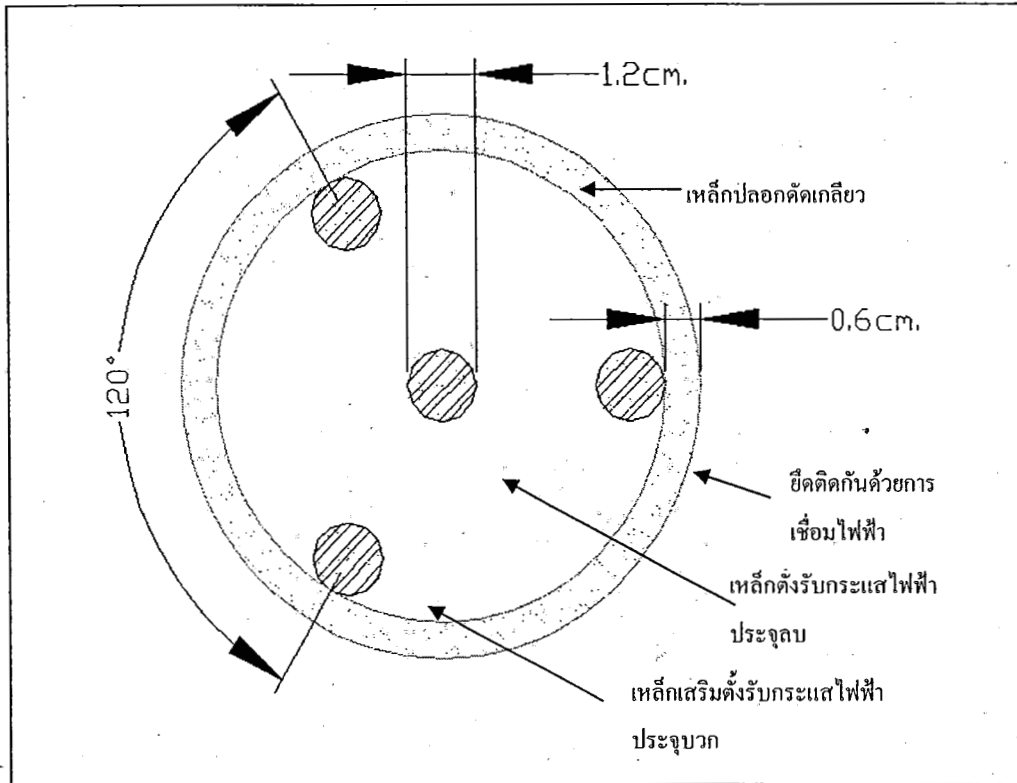
3.4.2 การเตรียมทราย

- ล้างทรายให้สะอาดจนเหลือฝุ่นและตะกอนน้อยที่สุด
- แช่ทรายที่สะอาดแล้วไว้ในน้ำสะอาดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- นำทรายขึ้นมาวางผึ่งลมจนทรายอยู่ในสภาพ wet or damp
- เก็บทรายซึ่งอยู่ในสภาพ wet or damp แล้วไว้ในถังที่มีฝาปิดมิดชิดพร้อมทั้งรองถึงด้วยถุงพลาสติกอีก 1 ชั้น

3.4.3 การเตรียมเหล็กเสริม

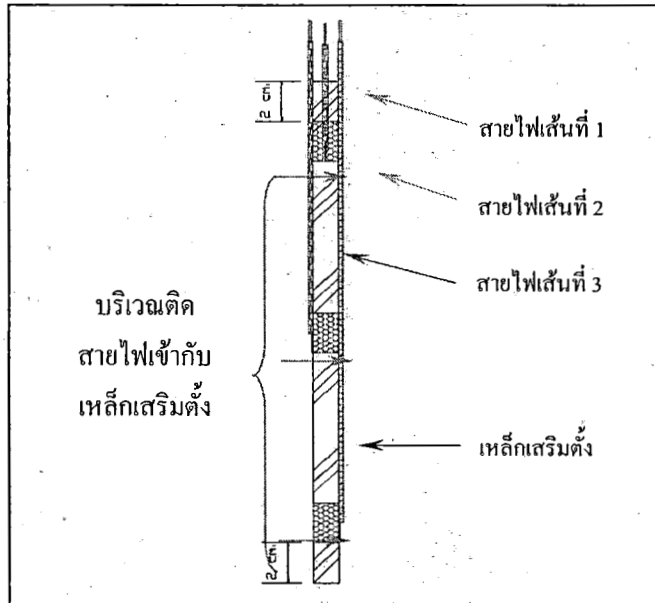
เหล็กเสริมแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เหล็กเสริมตั้ง และเหล็กปลอก โดยที่เหล็กเสริมทั้งสองประเภทมีหน้าที่ช่วยในการรับแรงอัดของคอนกรีตมีขั้นตอนการเตรียม ดังนี้

- ตัดเหล็กเสริมแนวตั้งโดยใช้เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 25 เซนติเมตร จำนวน 3 เส้น ต่อคอนกรีตตัวอย่าง 1 แท่ง
- เหล็กปลอกใช้เหล็กเส้นกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ยาว 150 เซนติเมตร นำมาตัดเป็นเกลียวรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร สูง 19 เซนติเมตร และมีระยะห่างระหว่างเกลียว 5 เซนติเมตร
- เชื่อมเหล็กเสริมตั้ง และเหล็กปลอกให้ติดกันด้วยการเชื่อมไฟฟ้า โดยมีตำแหน่งการวาง ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 รูปแสดงตำแหน่งการจัดวางเหล็กเสริม

- ติดสายไฟสำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าที่บริเวณปลายทั้งสองข้าง และส่วนกลางของเหล็กเสริมตั้งทุกเส้น (เหล็กเสริมตั้ง 1 เส้น ใช้สายไฟ 3 เส้น) โดยให้ปลายของสายไฟยาวพ้นปลายเหล็กเสริมตั้งเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.12

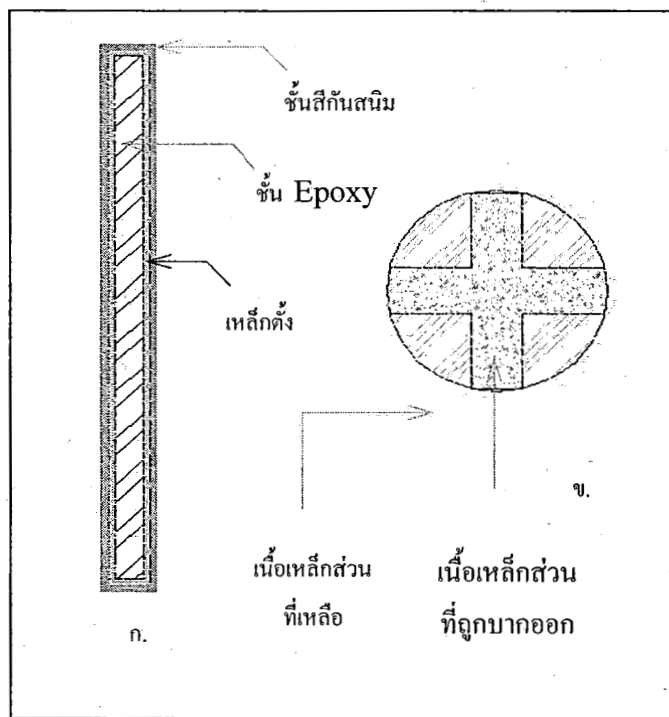


รูปที่ 3.12 รูปแสดงการติดสายไฟเข้ากับเหล็กเสริมตั้ง

3.4.4 เหล็กตั้งสำหรับรับกระแสไฟฟ้าประจุลบ

เหล็กตั้งสำหรับรับกระแสไฟฟ้าประจุลบ มีหน้าที่คือ เป็นสื่อกลางเพื่อให้ไฟฟ้ากระแสลบไหลผ่านทำให้กระแสไฟฟ้าครบวงจร เหล็กตั้งรับกระแสไฟฟ้าประจุลบมีตำแหน่งอยู่บริเวณศูนย์กลางของแท่งคอนกรีต โดยไม่มีหน้าที่ในการช่วยแท่งคอนกรีตรับกำลังอัดโดยตรง ดังนั้นจึงมีวิธีการเตรียมที่แตกต่างจากเหล็กเสริมตั้งเพื่อให้มีคุณสมบัติต้านทานต่อการผุกร่อนอันเกิดจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริม ดังนี้

- ตัดเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 25 เซนติเมตร โดยใช้เหล็กตั้งรับกระแสไฟฟ้าประจุลบ 1 เส้น ต่อคอนกรีต 1 แท่ง
- เคลือบแท่งเหล็กด้วยน้ำยา Epoxy จำนวน 2 ชั้น ทั้งไวจันแห้ง แล้วเคลือบด้วยสีกันสนิมจำนวน 2 ชั้น ทั้งไวจันแห้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ก
- บากปลายด้านบนของเหล็กตั้งจนแบ่งเป็น 4 ส่วน ลึกลงให้หัวจับปากจิ้งจกสามารถยึดติดได้พอดี ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ข



รูปที่ 3.13 รูปแสดงชั้นการเคลือบสารป้องกันการผุกร่อน และลักษณะการบากหัวเหล็กตั้ง

3.5 การหล่อแท่งคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก

เนื่องจากเมื่อทำการทดลองหล่อแท่งคอนกรีตแล้วพบว่า สัดส่วนผสมที่ได้ออกแบบและใช้กับการหล่อแท่งคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก ไม่สามารถใช้ได้ดีกับการหล่อแท่งคอนกรีตเสริม

เหล็กจึงเป็นผลให้สัดส่วนผสมในการหล่อแท่งคอนกรีตทั้งสองประเภทแตกต่างกัน

3.5.1 สัดส่วนผสม (Mix proportion) สำหรับแท่งคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก

ตารางที่ 3.2 แสดงสัดส่วนผสมของคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก

Type of Cement	Mix I proportion (kg/1 m ³)						Slump (cm)	Design Strength MPa	
	w/b	Weight (kg)				%Void		MPa	
		Cement	water	sand	rock			At 7 Days	At 21 Days
1	0.53	325.2	174	755.5	1154.6	1	5.1	193.8	326.4

จำนวน โมล (ลูก)	ปริมาตร 1 โมล (*10 ⁻³ m ³)	ปริมาตรของ คอนกรีตที่ใช้จริง (m ³)	เนื้อ 15 % (m ³)	น้ำหนักวัสดุที่ใช้จริง (kg)			
				cement	water	sand	rock
28	1.571	0.043988	0.0506	16.45	8.80	38.22	58.41

3.5.2 ขั้นตอนการหล่อแท่งคอนกรีต

อุปกรณ์: แบบหล่อแท่งคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร เหล็กดำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ปลายกลมมน ช้อนตัก เกรียงเหล็ก

วิธีหล่อแท่งคอนกรีต: ทำความสะอาดแบบหล่อตัวอย่าง แล้วทาน้ำมันที่ผิวภายใน ทุกด้านทดสอบ Workability ของคอนกรีตสด และจัดบันทึกค่าตักคอนกรีตใส่แบบ โดย แบ่งเป็น 3 ชั้นเท่าๆ กัน แต่ละชั้นตักด้วยเหล็กดำ 25 ครั้งเมื่อตักชั้นสุดท้ายเสร็จ ปาด ผิวหน้าให้เรียบทั้งคอนกรีตไว้ในแบบหล่อจนแห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจึงแกะออกจากแบบ ก่อนทำการหล่อแท่งคอนกรีตต้องมีการตรวจสอบคุณภาพ และความสามารถ เทได้ของคอนกรีตที่สดที่ได้โดยมีวิธีการ ดังนี้

อุปกรณ์

- แบบหล่อรูปกรวยทรงตัด (Slump Mold) เส้นผ่านศูนย์กลางด้านบน 10 เซนติเมตร และด้านล่าง 20 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร มีหูจับและ แผ่นเหล็กยื่นออกมาให้เหยียบทั้ง 2 ข้าง
- เหล็กกระทุ้ง (Tamping Rod) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ยาว 60 เซนติเมตร ปลายกลมมน
- แผ่นเหล็กสำหรับรองมีลักษณะเรียบเป็นระนาบ
- ช้อนตัก เกรียงเหล็ก ตลับเมตร หรือไม้วัด

ขั้นตอนทดสอบ

- นำอุปกรณ์จุ่มน้ำให้เปียก
- วางแผ่นเหล็กลงกับพื้นราบ นำโคนขึ้นวางใช้ทำเหยียบปลายทั้ง 2 ข้างไว้
- ใช้ช้อนตักคอนกรีตใส่ลงในโคน โดยแบ่งเป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นให้มีปริมาตรเท่าๆ กัน กระทุ้งด้วยเหล็กค้ำกระทุ้งชั้นละ 25 ครั้ง โดยทำให้ทั่วพื้นที่หลังจากกระทุ้งชั้นที่ 3 เสร็จ ปาดหน้าคอนกรีตให้เรียบ

3.6 การหล่อแท่งคอนกรีตเสริมเหล็ก

เนื่องจากเมื่อทำการหล่อแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้สัดส่วนผสมเดียวกันกับแท่งคอนกรีตไม่เสริมเหล็กแล้ว ปรากฏว่าเนื้อคอนกรีตมีความสามารถในการเท (Workability) ต่ำเกินไปจนเกิดโพรงภายในแท่งคอนกรีตเมื่อหล่อเสร็จ จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนสัดส่วนผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเทเพิ่มมากขึ้น โดยสัดส่วนผสมสำหรับการหล่อแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กมีรายละเอียด ดังนี้

3.6.1 สัดส่วนผสม (Mix proportion) สำหรับแท่งคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตารางที่ 3.3 แสดงสัดส่วนผสมของคอนกรีตเสริมเหล็ก

Type of Cement	Mix II proportion (kg/1 m ³)						Slump (cm)	Design Strength kN	
	w/b	Weight (kg)				%Void		At 7 Days	At 21 Days
		Cement	water	sand	rock				
1	0.73	268.7	195.9	881.2	991.5	1	10	132.6	214.2

จำนวน โมล (ลูก)	ปริมาตร 1 โมล (*10 ⁻³ m ³)	ปริมาตรของ คอนกรีตที่ใช้จริง (m ³)	เผื่อ 15 % (m ³)	น้ำหนักวัสดุที่ใช้จริง (kg)			
				cement	water	sand	rock
30	1.571	0.04713	0.0542	14.56	10.62	47.76	53.74

3.6.2 ขั้นตอนการหล่อแท่งคอนกรีต

อุปกรณ์

- แบบหล่อก่อนตัวอย่างทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร
- เหล็กกระทุ้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตรปลายกลมมน ช้อนตัก

วิธีหล่อแท่งคอนกรีตเสริมเหล็ก

- ทำความสะอาดแบบหล่อตัวอย่าง แล้วทาน้ำมันที่ผิวภายในทุกด้าน
- จัดวางเหล็กเสริมลงในแบบหล่อ โดยให้ขอบเหล็กปลอกมีระยะห่างจากแบบหล่อ 5 มิลลิเมตรเท่ากันทุกด้าน
- ทดสอบ Workability พร้อมจดบันทึกค่า
- ตักคอนกรีตใส่แบบ โดยแบ่งเป็น 3 ชั้นเท่าๆ กัน แต่ละชั้นกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้ง 25 ครั้ง
- เมื่อกระทุ้งชั้นสุดท้ายเสร็จ ปาดผิวหน้าให้เรียบ
- ทิ้งคอนกรีตไว้ในแบบหล่อจนแห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจึงแกะออกจากแบบ

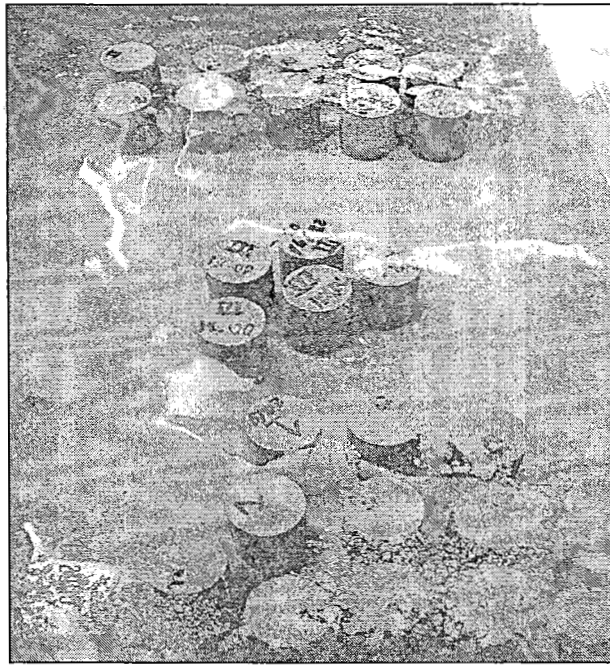
3.7 การบ่มคอนกรีต (Curing)

การบ่มคอนกรีตหรือบำรุงคอนกรีต เป็นการควบคุมและป้องกันมิให้น้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับซีเมนต์ ระเหยออกมาจากคอนกรีตที่เทลงแบบหล่อและแข็งตัวแล้วเร็วเกินไป เพื่อให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงและความทนทานตามที่ต้องการ

หลังจากเทคอนกรีตและทิ้งไว้จนผิวหน้าคอนกรีตหมาดแข็งปราศจากรอยแล้ว จะต้องทำการบ่มทันทีด้วยวิธีที่ถูกต้อง โดยปกคลุมผิวมิให้ถูกแดดหรือลมร้อน และมีให้ถูกรบกววนหรือสะท้อนโดยเฉพาะภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมงแรก ทั้งนี้เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดีและมีคุณสมบัติตามต้องการ อีกทั้งเป็นการป้องกันการสูญเสียน้ำจากคอนกรีตที่เทใหม่ ๆ มิฉะนั้นคอนกรีตจะเกิดการหดตัวเร็วทำให้เกิดแรงดึงที่ผิวที่กำลังจะแห้ง เป็นผลทำให้เกิดรอยร้าวที่ผิวคอนกรีต ช่วงเวลาที่ป้องกันและรักษาความชื้นนี้ไว้ภายหลังจากเทคอนกรีตลงแบบหล่อแล้ว เรียกว่าระยะเวลาของการบ่มคอนกรีต โดยกำลังของคอนกรีตจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตรวจจับที่ยังมีความชื้นให้ซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำได้ต่อไปอีก กำลังของคอนกรีตจะเพิ่มสูงขึ้นรวดเร็วในระยะแรกและ ค่อย ๆ ช้าลงในเวลาต่อมา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความชื้นและอุณหภูมิที่พอเหมาะ โดยอุณหภูมิที่ใช้บ่มคอนกรีตสำหรับคอนกรีตสำหรับคอนกรีตทั่ว ๆ ไป ควรอยู่ระหว่าง 15 - 39 องศาเซลเซียส

สำหรับในการศึกษาโครงการวิจัยครั้งนี้กำหนดให้ใช้ระยะเวลาบ่มที่ 7 วัน นับจากวันที่หล่อคอนกรีตเสร็จแล้ว 24 ชั่วโมง โดยใช้วิธีการเพิ่มความชื้นให้กับคอนกรีตด้วยการหล่อน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.14

197469



รูปที่ 3.14 รูปแสดงการบ่มคอนกรีต

3.8 กระบวนการเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมของคอนกรีต

สาเหตุหลักที่ทำให้โครงสร้างคอนกรีตสูญเสียกำลังรับแรงอัดจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคือการเกิดสนิมมีผลทำให้เนื้อเหล็กบางส่วนหายไปเป็นผลให้พื้นที่หน้าตัดในการรับแรงอัดลดลง และการเกิดสนิมจะทำให้เกิดแรงดันต่อคอนกรีตบริเวณรอบๆ เหล็กเสริม เนื่องจากสนิมเหล็กจะมีปริมาณมากกว่าเหล็กเดิมทำให้คอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมแตกร้าวตามแนวเหล็กเสริมได้ เป็นผลให้กำลังรับแรงของโครงสร้างลดลงเช่นกัน เนื่องจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริมเป็นปัญหาการเสื่อมสภาพที่พบบ่อยกับโครงสร้างคอนกรีตทั่วไปจึงเหมาะแก่การนำมาใช้เป็นกรณีศึกษา แต่ทั้งนี้การเกิดสนิมในเหล็กเสริมตามธรรมชาติเป็นกระบวนการที่ต้องใช้ระยะเวลายาวนาน ในการศึกษาโครงการวิจัยครั้งนี้จึงมีความจำเป็นต้องใช้กระบวนการเร่งการเกิดปฏิกิริยาสนิมในเหล็กเสริมเพื่อลดระยะเวลาการศึกษาโครงการให้สั้นลง โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนดังนี้

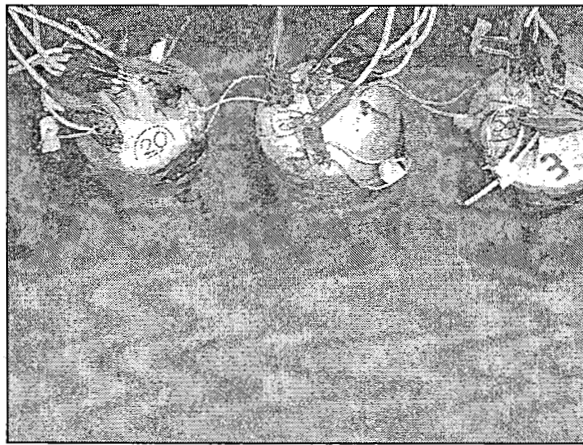
วัสดุและอุปกรณ์

- เกลือแกงบริสุทธิ์
- น้ำสะอาด
- บ่อแช่
- หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 12 V. 35 A
- ตู้จ่ายกระแสไฟฟ้า
- อุปกรณ์วัดค่ากระแสไฟฟ้าแบบ Clamp Meter

ขั้นตอนการปฏิบัติ

- วางเรียงแท่งคอนกรีตลงในบ่อแช่ให้มีระยะห่างระหว่างกันพอประมาณเพื่อป้องกันการลัดวงจรของกระแสไฟฟ้า
- ต่อขั้วไฟฟ้าจากตู้จ่ายไฟฟ้าเข้ากับสายไฟของแท่งคอนกรีต โดยให้ขั้วบวกต่อกับเหล็กเสริมตั้งรับกระแสนวและขั้วลบต่อกับเหล็กตั้งรับกระแสลบ ดังแสดงในรูปที่ 3.11
- เทน้ำเกลือเข้มข้น 5% ลงบ่อแช่หลังต่อขั้วไฟฟ้าเสร็จ โดยให้ระดับน้ำเกลือสูงประมาณ $\frac{4}{5}$ ของความสูงแท่งคอนกรีต และระวังมิให้น้ำท่วมจนถึงเหล็กตั้ง เนื่องจากจะเกิดกระแสไฟลัดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 3.15
- เปิดสวิตซ์ไฟฟ้าที่หม้อแปลงและที่ตู้จ่ายไฟฟ้าเพื่อเริ่มกระบวนการทำปฏิกิริยาวัตค่ากระแสไฟฟ้าด้วย Clamp Meter วันละ 1 ครั้ง พร้อมบันทึกค่าที่ได้
- เปลี่ยนน้ำเกลือ และทำความสะอาดผิวแท่งคอนกรีต อย่างน้อยสัปดาห์ละ 1 ครั้ง เพื่อช่วยให้การทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ

ต้องบันทึกค่าน้ำหนักของเหล็กเสริมตั้ง และเหล็กปลอก ที่ต้องผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริมก่อนนำมาหล่อเข้ากับแท่งคอนกรีตทุกชุด เพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักของเหล็กเสริมที่เหลือหลังจากผ่านกระบวนการเร่งการเกิดสนิมสำหรับกำหนดระดับความเสียหายที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.15 รูปแสดงการต่อขั้วไฟฟ้า และระดับน้ำเกลือ

3.9 การเสริมกำลังและซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์

การเสริมกำลังให้คอนกรีตมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับกำลังของคอนกรีตไม่เสริมเหล็กและคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับการซ่อมแซมคอนกรีตไม่เสริมเหล็กและคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีจุดประสงค์เพื่อฟื้นฟูคอนกรีตไม่เสริมเหล็กและคอนกรีตเสริมเหล็กที่

เกิดการเสื่อมสภาพและได้รับความเสียหายให้กลับมามีความสามารถในการรับกำลังเท่าเดิมหรือมากกว่าเดิม ซึ่งในการศึกษาโครงการวิจัยนี้ได้ใช้แผ่นไฟเบอร์ (Fiber Reinforced Plastic : FRP) ชนิด FRP-G เป็นวัสดุในการซ่อมแซมร่วมกับน้ำยาเชื่อมประสาน ระหว่างแผ่นไฟเบอร์กับผิวคอนกรีต (Epoxy) โดยมีรายละเอียดและขั้นตอน ดังนี้

การเตรียมแผ่นไฟเบอร์

- ตัดแผ่นไฟเบอร์ให้มีขนาดความกว้างเท่ากับความสูงของแท่งคอนกรีต และมีความยาวเท่ากับเส้นรอบวงของหน้าตัดแท่งคอนกรีต
- สำหรับกรณีที่ต้องการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมโดยการพันแผ่นไฟเบอร์จำนวน 2 รอบขึ้นไป ให้ใช้ความยาวของแผ่นไฟเบอร์เท่ากับเส้นรอบวงของหน้าตัดแท่งคอนกรีตคูณกับจำนวนรอบที่ต้องการ

การเตรียม Epoxy

Epoxy ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้คือ Epoxy สำหรับติดไฟเบอร์ชนิดแผ่น (Sikadur - 330) ของบริษัท ซิก้า จำกัด โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วน A และส่วน B ในการใช้ต้องนำทั้งสองส่วนนี้มาผสมกันในอัตราส่วน 4 : 1 และสิ่งสำคัญคือ Epoxy นั้นหลังจากผสมแล้วจะแข็งตัวภายใน 30 นาที ดังนั้นในการผสมแต่ละครั้งต้องคำนวณว่าจะทาครั้งละกี่ชิ้นงาน ทั้งนี้จากประสบการณ์พบว่าปริมาณที่พอเหมาะสำหรับผู้ทำงาน 3 คน คือการผสมครั้งละ 2 กิโลกรัมโดยมีขั้นตอนการผสมดังนี้

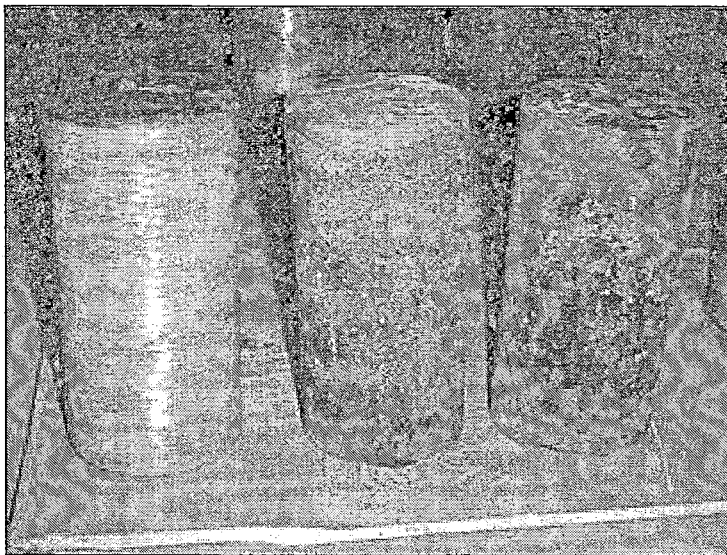
- คำนวณพื้นที่ผิวที่ต้องการทาจากพื้นที่ผิวของแผ่นไฟเบอร์ที่ตัดไว้
- จากคำแนะนำการใช้ สำหรับการทาพื้นที่ 1 ตร.ม. จะต้องใช้ Epoxy (ที่ผสมระหว่างส่วน A และ B แล้ว) หนักประมาณ 1.5 กิโลกรัม โดยในการทาผิวของแท่งคอนกรีตจะใช้ Epoxy ประมาณ 1 กิโลกรัม และในการทาทับที่ผิวนอกของแผ่นไฟเบอร์นั้น จะใช้ Epoxy ประมาณ 0.5 กิโลกรัม สำหรับการทาแท่งคอนกรีตที่พันด้วยแผ่นไฟเบอร์ 2 ชั้นขึ้นไปนั้นใช้ Epoxy ประมาณ 1 กิโลกรัมต่อพื้นที่ 1 ตร.ม.
- วางแผนว่าควรทำการผสมกี่ครั้ง ครั้งละเท่าใด และในการผสม 1 ครั้ง ต้องใช้ Epoxy ส่วน A และ B หนักเท่าใด
- นำ Epoxy ส่วน A และ B ที่ได้มาเทรวมกัน แล้วผสมด้วยการใช้เครื่องคน โดยใช้เวลาคนประมาณ 3 นาทีจนสังเกตได้ว่าผิวของ Epoxy ที่ได้มีความมันวาวหลังจากที่ผสม Epoxy เสร็จควรรีบนำ Epoxy ที่ได้มาใช้ทันที

การพันแผ่นไฟเบอร์

การพันแผ่นไฟเบอร์เป็นขั้นตอนสำคัญในการเสริมกำลัง หรือซ่อมแซมคอนกรีตเนื่องจากส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการเสริมกำลังและการซ่อมแซมโดยตรง ดังนั้นในการพันแผ่นไฟเบอร์ต้องอาศัยความชำนาญ การวางแผนที่ดี ความระมัดระวัง และ

ความละเอียดรอบคอบเป็นอย่างมากโดยขั้นตอนในการพื้นแผ่นไฟเบอร์มีรายละเอียด ดังนี้

- ทาผิวแห้งคอนกรีตด้วย Epoxy ให้ทั่ว ไม่ควรทาหนาหรือบางเกินไป ควรให้เนื้อ Epoxy เข้าไปอุดช่องว่างที่ปรากฏบนผิวแห้งคอนกรีตจนเต็ม เนื่องจาก การเกิดช่องว่างระหว่างผิวแห้งคอนกรีตกับแผ่นไฟเบอร์นั้นทำให้ประสิทธิภาพที่ต่ำลดลง
- พื้นแผ่นไฟเบอร์ที่เตรียมไว้รอบแห้งคอนกรีต ใช้ลูกกลิ้งพลาสติกกลิ้งตามเพื่อ กำจัดช่องว่าง เมื่อสังเกตเห็นว่า Epoxy ที่ทาไว้ที่ผิวแห้งคอนกรีตซึมขึ้นมา จนถึงผิวของแผ่นไฟเบอร์แล้วจึงถือว่าใช้ได้ ให้ทำเช่นนี้ไปจนเสร็จ
- หากเป็นการพื้นแผ่นไฟเบอร์เพียงรอบเดียว หรือ สำหรับผิวไฟเบอร์ชั้นบนสุด จะต้องมีการทา Epoxy ทับผิวไฟเบอร์รอบนอกอีกหนึ่งชั้น
- หลังพื้นแผ่นไฟเบอร์เสร็จแล้วทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 7 วัน จึงสามารถนำแท่ง คอนกรีตนั้นมาทดสอบได้



รูปที่ 3.16 แสดงลักษณะของแท่งคอนกรีตที่ได้รับการซ่อมแซมแล้วและก่อนได้รับการซ่อมแซม

3.10 การทดสอบความสามารถรับกำลังอัดของแท่งคอนกรีต

คุณสมบัติในการรับกำลังอัดเป็นสิ่งที่บ่งบอกถึงคุณภาพ ความแข็งแรง และความปลอดภัยของโครงสร้างคอนกรีต โดยนำค่าความสามารถรับกำลังอัดที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ออกแบบไว้ สำหรับเครื่องมือที่ใช้ทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดของแท่งคอนกรีตในการศึกษาโครงการครั้งนี้คือ เครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) โดยใช้ข้อมูล 2 ชนิดคือ ค่าแรงอัด (Compressive Load) และค่าระยะการเสียรูปในแนวแกนตั้ง (Deformation on Vertical Axis) ซึ่งมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

- เมื่อทำการปมจนครบกำหนดอายุให้หน้าแท่งคอนกรีตขึ้นจากน้ำ แล้วนำไปฝั่งให้

แห้งเป็นระยะเวลา 24 ชม.

- นำแท่งคอนกรีตที่แห้งแล้วไปทำการ Cap ทั้งด้านบน และด้านล่าง แล้วทิ้งไว้จนก้ำมะถันแข็งตัวเป็นระยะเวลา 24 ชม.
- นำก้อนตัวอย่างวางบนแท่นทดสอบโดยให้แกนอยู่ในแนวศูนย์กลางของแท่งกวด
- เปิดเครื่องทดสอบ โดยควบคุมน้ำหนักที่กดให้มีอัตราสม่ำเสมอประมาณ 1.43 – 3.47 กก./ตร.ซม./วินาที เท่ากันทุกครั้งที่ทดสอบ
- กวดแท่งคอนกรีตทดสอบจนพัง บันทึกค่าน้ำหนักที่ได้

3.11 การตรวจสอบความเสียหายของแท่งคอนกรีต

การตรวจสอบความเสียหายของแท่งคอนกรีตจะกระทำหลังจากที่แท่งคอนกรีตได้ผ่านกระบวนการทำให้เกิดความเสียหาย (กระบวนการเร่งการเกิดสนิมในเหล็กเสริม) แล้ว เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการอ้างอิงกับค่าความสามารถรับแรงอัดที่ลดลงจากความเสียหาย และค่าความสามารถรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นหลังจากได้รับการเสริมกำลัง หรือซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์แล้ว โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

การตรวจสอบความเสียหายแท่งคอนกรีตที่ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริม จากการศึกษาในหัวข้อ "Repair of corrosion-damaged columns with FRP wraps." โดย Pantazopoulou ได้เสนอสูตรในการคำนวณน้ำหนักที่หายไปอันเนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมไว้ดังนี้

$$\Delta W = \frac{I * t * A_m}{Z * F}$$

เมื่อ ΔW = Loss weight of iron (g)

I = Electric current (Ampere)

t = Time since corrosion initial (Second)

A_m = Atomic mass of the metal (For iron = 55.85 g)

F = Faraday's constant (96,486.7 coulombs (g/equivalent))

การตรวจสอบวิธีนี้ต้องเก็บข้อมูลค่ากระแสไฟฟ้าตามช่วงเวลาที่กำหนด

การทดสอบโดยการชั่งน้ำหนักจริงของเหล็กเสริมที่เหลือ การตรวจสอบวิธีนี้เป็นการตรวจสอบโดยตรง และค่าน้ำหนักที่ได้ถือว่ามีค่าความถูกต้องสูง เนื่องจากการสกัดเอาเหล็กเสริมที่เหลืออยู่ในแท่งคอนกรีตที่เสียหายหลังผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมออกมาชั่งน้ำหนัก

บทที่ 4

ผลการทดลอง

การศึกษาทดลองโครงการวิจัยครั้งนี้มีการเก็บข้อมูลผลการทดลองในลักษณะกราฟ เชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงอัด (Compressive Load) และค่าระยะการเสียรูปในแนวแกนตั้ง (Axial Displacement) โดยเป็นการบันทึกค่าด้วยหน่วยประมวลผลในเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine (UTM) สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล ที่ได้จากการทดลองนั้นประกอบด้วยหัวข้อหลัก คือ ลักษณะภายนอกของชิ้นงานทดสอบ ค่าแรงอัดที่แท่งคอนกรีตสามารถรับได้ ค่าระยะการเสียรูปในแนวแกนตั้ง และลักษณะพฤติกรรมในการวิบัติ ลักษณะการแตกของชิ้นงานและปริมาณสนิมที่เกิดขึ้น โดยมีรายละเอียด ดังนี้

4.1 การใช้รหัสอักษรเป็นชื่อเรียกแทนแท่งคอนกรีตที่ใช้ทดสอบ

ผลการทดลองในการศึกษาโครงการครั้งนี้ได้ถูกบันทึกไว้ในลักษณะของกราฟเส้น ซึ่งกราฟแต่ละเส้นคือตัวแทนข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัด และค่าระยะการเสียรูปในแนวตั้งจากการทดสอบแท่งคอนกรีตที่ใช้ศึกษาในกรณีต่าง ๆ ดังนั้นกราฟแต่ละเส้นจึงมีชื่อเรียกเฉพาะแล้วแต่กรณีการศึกษา โดยได้กำหนดความหมายของรหัสอักษรในตำแหน่ง ต่าง ๆ ไว้ดังนี้

- ตำแหน่งที่ 1 คือ ประเภทของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการผสมคอนกรีต โดย "N" หมายถึง ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1
- ตำแหน่งที่ 2 คือ ระยะเวลาการบ่ม โดย "7" หมายถึง ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน
- ตำแหน่งที่ 3 คือ ลักษณะการเสริมเหล็ก โดยหากปรากฏอักษร "S" หมายถึงเป็นแท่งคอนกรีตเสริมเหล็ก และหากไม่ปรากฏหมายถึงเป็นแท่งคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก
- ตำแหน่งที่ 4 คือ การผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริม โดยหากปรากฏอักษร "E" หมายถึงผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิม และหากไม่ปรากฏหมายถึงไม่ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิม
- ตำแหน่งที่ 5 คือ ระดับความเสียหายของแท่งคอนกรีต โดยแบ่งเป็นระดับที่ 1 ถึง 4 ตามระยะเวลาที่ผ่านกระบวนการเร่งการเกิดปฏิกิริยาการเกิดสนิม
- ตำแหน่งที่ 6 คือ การได้รับการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์ โดยหากปรากฏอักษร "F" หมายถึงได้รับการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยแผ่น ไฟเบอร์

ตำแหน่งที่ 7 คือ จำนวนรอบในการพันแผ่นไฟเบอร์เพื่อเสริมกำลังหรือซ่อมแซมแท่งคอนกรีต

ตำแหน่งที่ 8 คือ ตัวอย่างทดสอบที่ 1, 2, 3 ตามลำดับ

"N7F2"

จากข้อความด้านบนเป็นชื่อรหัสที่ใช้เรียกแทนแท่งคอนกรีตไม่เสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสมของคอนกรีต โดยมีอายุการบ่ม 7 วัน และได้รับการเสริมกำลังโดยการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์จำนวน 2 รอบ

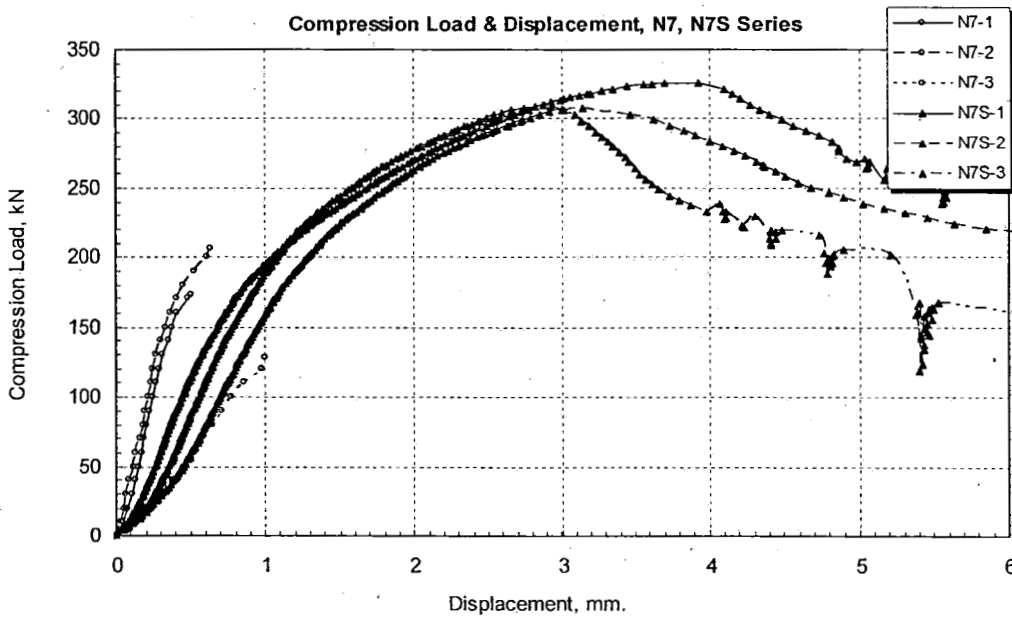
และ

"N7SE4F6-sp1"

จากข้อความด้านบนเป็นชื่อรหัสที่ใช้เรียกแทนแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสมของคอนกรีต โดยมีอายุการบ่ม 7 วัน และผ่านกระบวนการแรงปฏิบัติการเกิดสนิมในเหล็กเสริมด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าจนมีความเสียหายระดับที่ 4 และได้รับการซ่อมแซมโดยการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์จำนวน 6 รอบ เป็นตัวอย่างทดสอบที่ 1

สำหรับแท่งคอนกรีตทดสอบที่ใช้ในการทดลองนี้ ทุกตัวอย่างจะมีค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต (f_c) ที่อายุ 7 วัน

4.2 ผลการทดสอบแท่งคอนกรีต N7 และแท่งคอนกรีตเสริมเหล็ก N7S

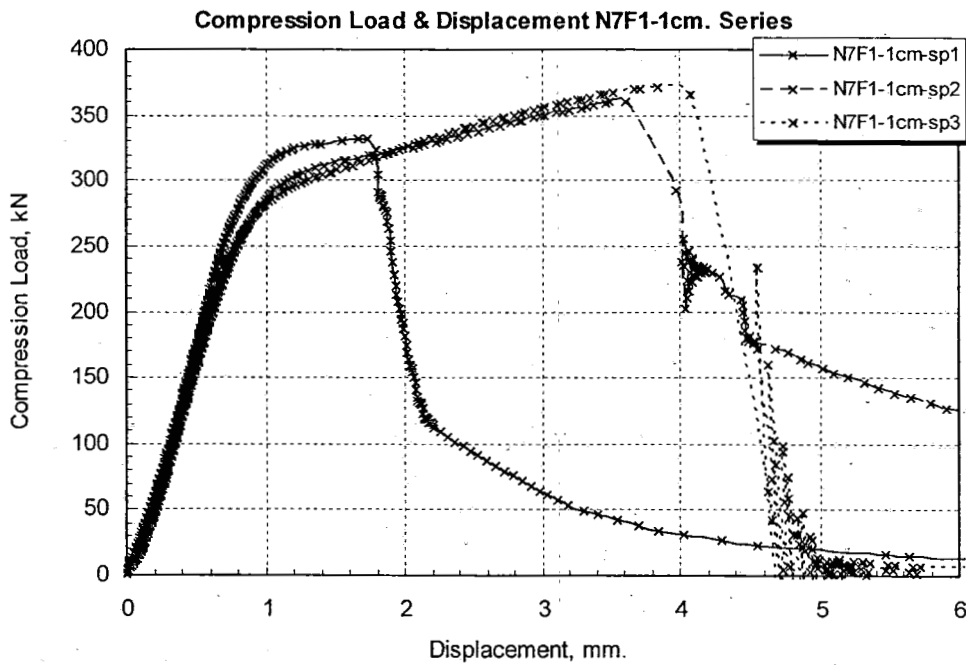


รูปที่ 4.1

รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักกด (Compression Load) และ ค่าการหดตัว (Displacement) ของแท่งคอนกรีต นอกจากนี้ในรูปยังแสดงการเปรียบเทียบระหว่างแท่งคอนกรีตและแท่งคอนกรีตเสริมเหล็ก จากการทดลองจะเห็นว่า ค่ากำลังอัดสูงสุดของแท่งคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 200 kN และมีค่าการหดตัวสูงสุดเท่ากับ 0.6 มม. ส่วนแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น จะมีค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 320 kN และมีค่าการหดตัวที่ค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 4 มม. จะเห็นได้ว่าแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น สามารถรับกำลังอัดได้มากกว่าแท่งคอนกรีตที่ไม่ได้เสริมเหล็กถึง 60% และมีค่าการหดตัวมากกว่าถึงประมาณ 5.7 เท่า ทำให้สรุปได้ว่า แท่งคอนกรีตเสริมเหล็กมีความยืดหยุ่นมากกว่าและรับแรงได้มากกว่าแท่งคอนกรีตที่ไม่ได้เสริมเหล็ก

ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบทั้งสองชนิดก็มีความแตกต่างกันมาก กล่าวคือ แท่งคอนกรีตนั้นเมื่อใกล้ถึงแรงกดสูงสุด คอนกรีตจะมีเสียงคล้ายมีรอยแตก แต่ไม่สามารถสังเกตเห็นได้จากภายนอก จากนั้นไม่นานก็จะเกิดรอยร้าวขนาดใหญ่ที่ภายนอก และแรงอัดจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่คอนกรีตเสริมเหล็กนั้น แท่งทดสอบจะเกิดรอยแตกออกที่บริเวณน้ำหนักกดใกล้เคียงกับแท่งคอนกรีตเปล่า แต่อย่างไรก็ตามแท่งคอนกรีตยังคงสามารถรับน้ำหนักกดได้ต่อไป จากนั้นคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอยู่ ก็ค่อยๆทะาะออกมาขึ้นจนเห็นเหล็กเสริม เมื่อใกล้ตำแหน่งน้ำหนักสูงสุด จะสังเกตเห็นเหล็กเสริมเกิดการโก่งงอเล็กน้อย แล้วค่อยเพิ่มมากขึ้นเมื่อวิบัติ อย่างไรก็ตามน้ำหนักกดที่แท่งคอนกรีตรับได้จะค่อยๆ ลดลงจากจุดวิบัติพร้อมกับระยะการหดตัวของเหล็กเสริม น้ำหนักกดจะไม่ลดลงอย่างรวดเร็วเหมือนแท่งคอนกรีตที่ไม่ได้เสริมเหล็ก

4.3 ผลการทดสอบแท่งคอนกรีตเสริมด้วยแผ่นไฟเบอร์ N7F1



รูปที่ 4.2

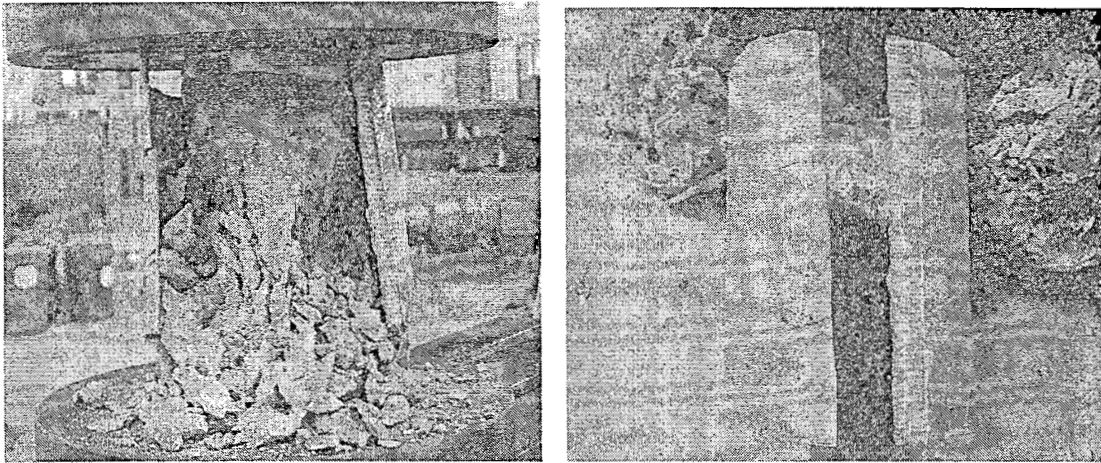
รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักกด (Compression Load) และค่าการหดตัว (Displacement) ของแท่งคอนกรีตที่ไม่มีเสริมเหล็ก แต่ถูกห่อหุ้มด้วยแผ่นไฟเบอร์จำนวน 1 รอบ และมีระยะห่างเท่ากับ 1 เซนติเมตร จะเห็นว่า แท่งคอนกรีตมีความสามารถรับกำลังสูงสุดได้เท่ากับ 370 kN และมีค่าการหดตัวสูงสุดที่ตำแหน่งแรงกดสูงสุดเท่ากับ 4 มม. จากกราฟจะเห็นว่า เส้นกราฟแต่ละเส้นจะมีความชัน 2 ความชันที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน จากกราฟทั้ง 3 เส้น จะเห็นว่า คอนกรีตที่ถูกห่อหุ้มด้วยแผ่นไฟเบอร์ถึงแม้ว่าจะไม่มีเหล็กเสริม ก็สามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้น โดยสามารถรับน้ำหนักกดได้มากขึ้นกว่าคอนกรีตไม่เสริมเหล็กถึง 85% นอกจากนี้ยังมีค่าการหดตัวมากขึ้นถึง 5.7 เท่า จึงสรุปได้ว่าแผ่นไฟเบอร์สามารถช่วยเพิ่มกำลังอัดของแท่งคอนกรีตและการยืดหยุ่นของคอนกรีตได้ ถึงแม้ว่าจะห่อหุ้มเพียง 1 ชั้น

ลักษณะการวิบัติของแท่งทดสอบชุดนี้นั้น มี 2 ลักษณะ คือ

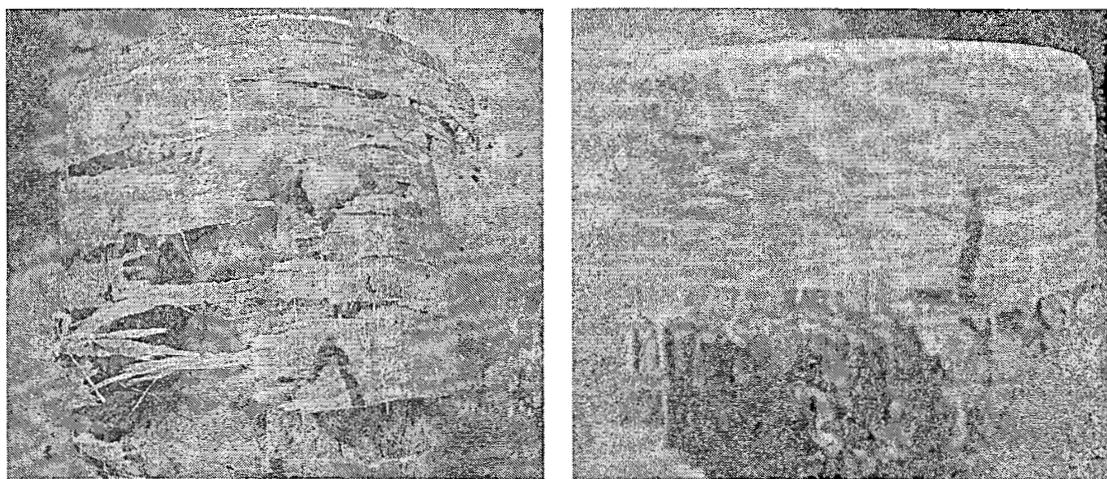
1) วิบัติแบบแผ่นไฟเบอร์ ที่บริเวณรอยต่อทาบของแผ่นไฟเบอร์เมื่อห่อหุ้มครบรอบแท่งคอนกรีตขาดออกจากกัน โดยตัวแผ่นไฟเบอร์นี้ไม่มีการฉีกขาด ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยแท่งทดสอบที่มีลักษณะการวิบัติแบบนี้คือ N7F1-1cm-sp1

2) วิบัติโดยมีการฉีกขาดของแผ่นไฟเบอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 แท่งทดสอบที่มีลักษณะการวิบัติแบบนี้คือ N7F1-1cm-sp2 และ N7F1-1cm-sp3

การวิบัติในลักษณะที่ 1 จะเกิดเสียงดังคล้ายระเบิดและเกิดขึ้นรวดเร็ว ในขณะที่การวิบัติแบบที่ 2 จะไม่เกิดเสียงดัง แต่การฉีกขาดของแผ่นไฟเบอร์ก็จะเกิดขึ้นรวดเร็วเช่นกัน

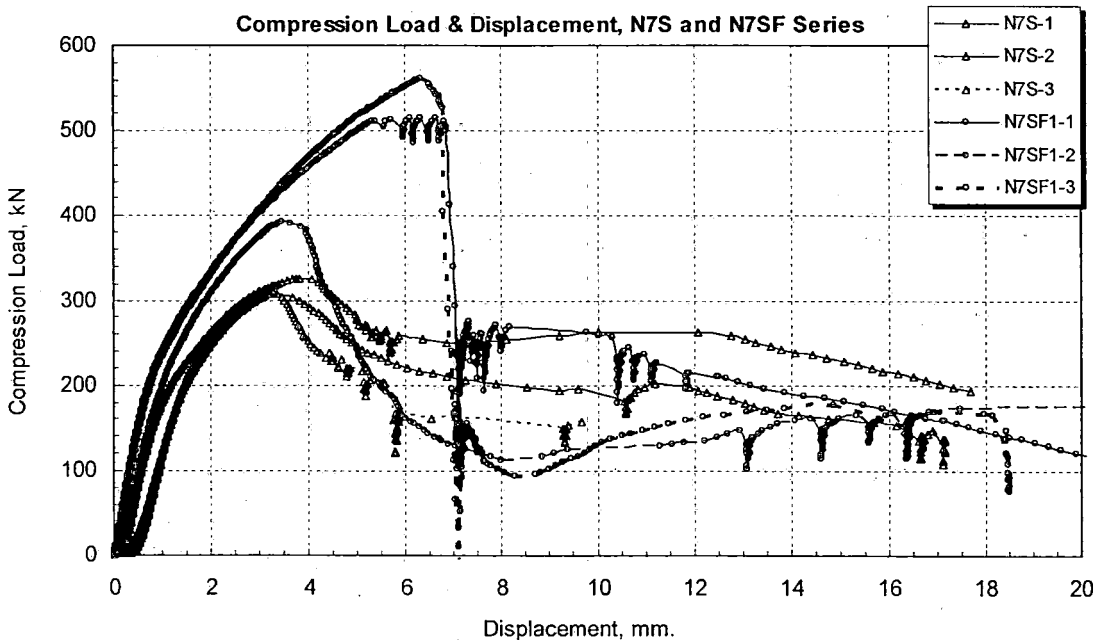


รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการวิบัติของแผ่นไฟเบอร์ที่บริเวณรอยต่อขาดออกจากกัน



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะการวิบัติของแผ่นไฟเบอร์ที่ฉีกขาดออกจากกัน

4.4 ผลการทดสอบแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กและห่อหุ้มด้วยแผ่นไฟเบอร์

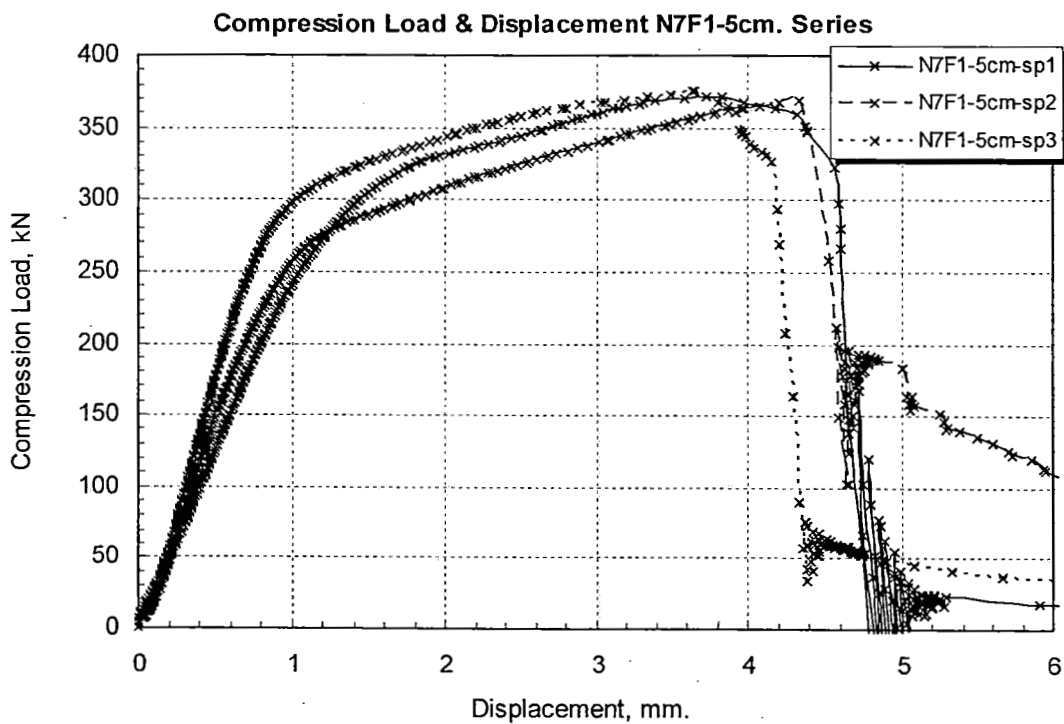
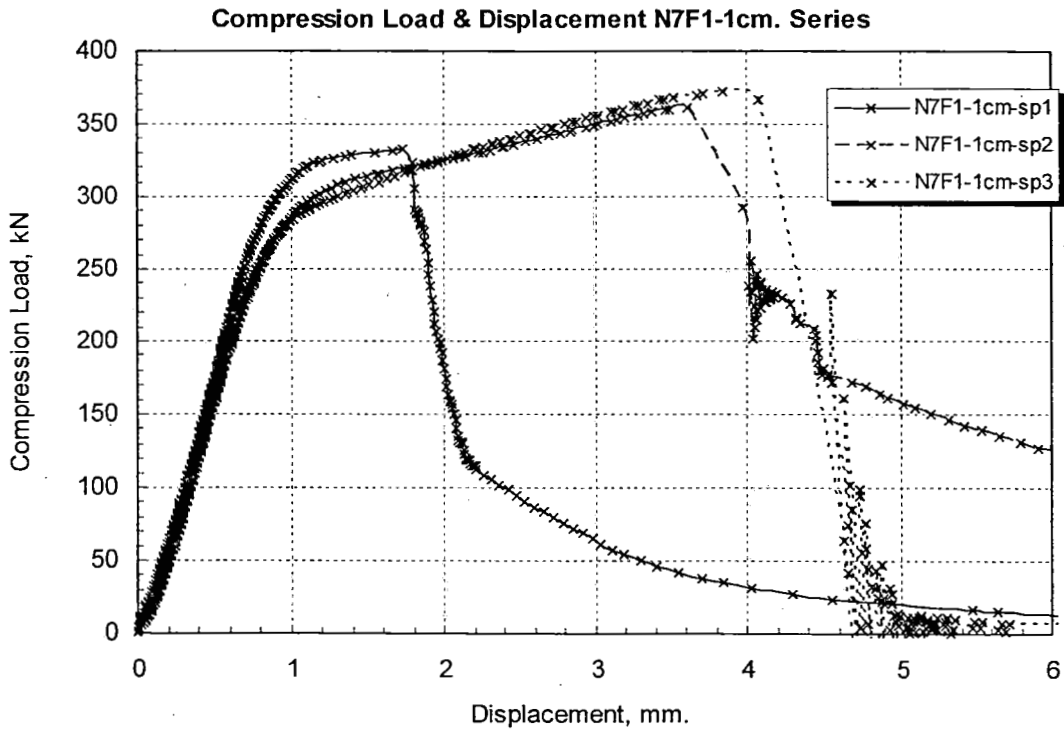


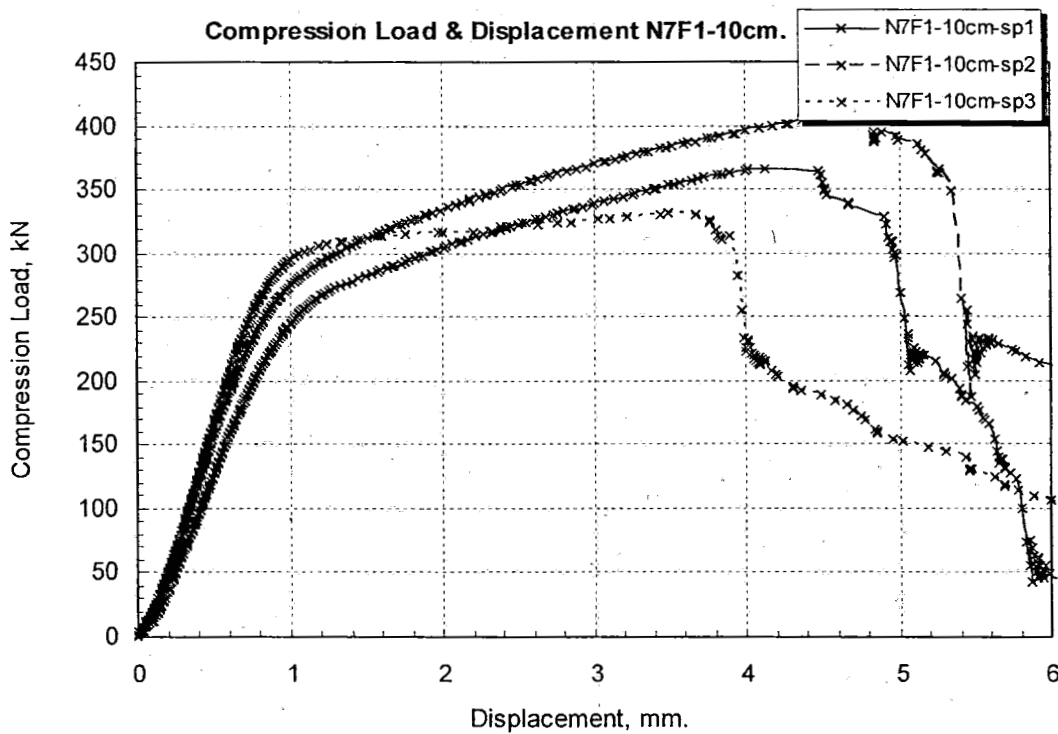
รูปที่ 4.5

รูปกราฟนี้ แสดงผลการทดลองของแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมด้วยแผ่นไฟเบอร์ จากกราฟรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า แผ่นไฟเบอร์ที่เสริมเข้าไปนั้น เพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตเสริมเหล็กให้เพิ่มขึ้น โดยสามารถเพิ่มได้ถึง 50% ส่วนระยะหัดตัวนั้น สามารถเพิ่มได้ประมาณ 1.5 เท่า เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งน้ำหนักกดสูงสุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า แผ่นไฟเบอร์สามารถช่วยเพิ่มกำลังอัดของแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กและการยืดหยุ่นได้ โดยแท่งทดสอบชุดนี้มีการเสริมแผ่นไฟเบอร์เพียง 1 ชั้น

ลักษณะการวิบัติของแท่งทดสอบนั้น มีลักษณะคล้ายกับที่เกิดขึ้นในผลการทดลองก่อนหน้า นี้ คือ การวิบัตินั้นมี 2 แบบ ดังได้กล่าวไปแล้ว อย่างไรก็ตามเมื่อแผ่นไฟเบอร์ฉีกขาดนั้น จะสังเกตเห็นได้ว่า การฉีกขาดนั้นมีบางส่วนที่ขาดเนื่องจากความคมของเหล็กเสริมที่โง่งออกมา ทำให้เกิดรอยขาดเริ่มต้น และจากนั้นเมื่อคอนกรีตเบ่งตัวออกจะดันให้เกิดรอยฉีกกว้างขึ้น และเมื่อแผ่นไฟเบอร์วิบัติจะสังเกตเห็นว่ากำลังอัดกระทำลดลงทันที จากนั้นกำลังอัดจะเพิ่มขึ้นกลับมาที่ระดับหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กเสริมในคอนกรีตยังคงสามารถรับกำลังอัดได้บางส่วน จนกระทั่งเกิดการโง่งเตาะโดยสมบูรณ์

4.5 ผลการทดสอบแท่งคอนกรีตเสริมด้วยแผ่นไฟเบอร์ ที่มีระยะทาบ ดังนี้ 1 เซนติเมตร, 5 เซนติเมตร, 10 เซนติเมตร



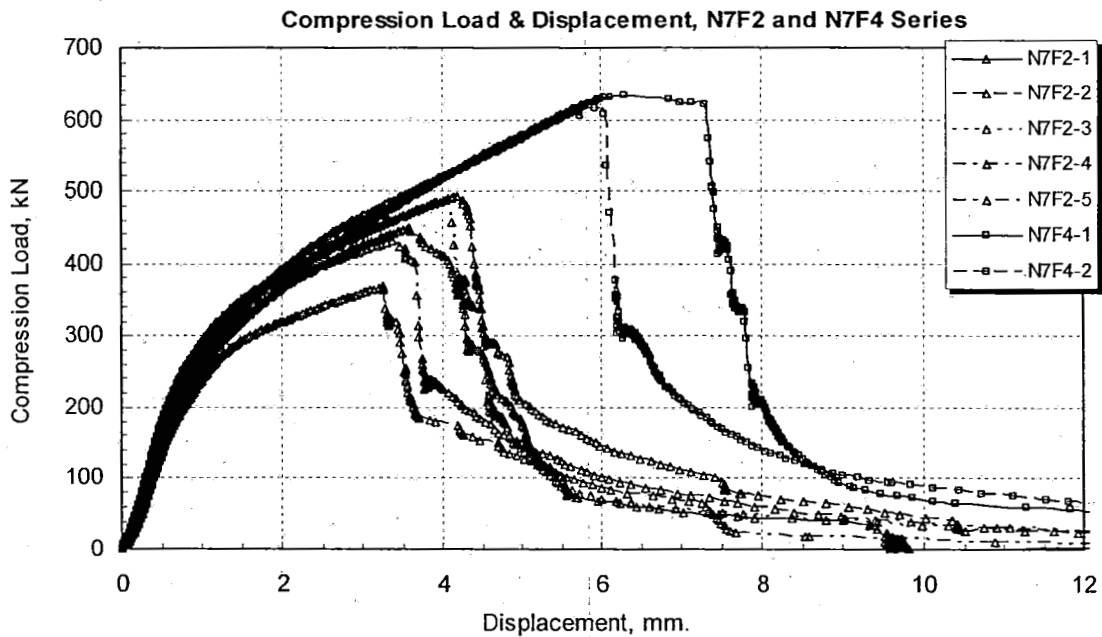


รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตที่มีระยะทาบ 1, 5, 10 เซนติเมตร ตามลำดับ

รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตที่มีระยะทาบต่างๆ กัน เนื่องจากแผ่นไฟเบอร์เป็นวัสดุที่มีมูลค่าสูง ดังนั้นการนำมาใช้ต้องคำนึงถึงความประหยัดและให้ผลการเพิ่มกำลังสูงสุด ระยะทาบกันของแผ่นไฟเบอร์ก็เป็นตัวแปรอันหนึ่งที่ควรศึกษาเพื่อกำหนดระยะทาบที่เหมาะสม ระยะทาบที่กำหนดไว้ คือ 1, 5, 10 เซนติเมตร ตามลำดับ จากการทดลองจะเห็นว่า ค่าน้ำหนักกดสูงสุดของชุดตัวอย่างทั้ง 3 นั้น ใกล้เคียงกัน คือ อยู่ระหว่าง 350 – 400 kN และมีระยะหดตัวสูงสุดอยู่ที่ระหว่าง 4 – 5 มม. ยกเว้นแท่งทดสอบ N7F1-1cm-sp1 ทั้งนี้เนื่องจากการทดสอบนี้วิบัติเนื่องจากการฉีกขาดที่รอยต่อทาบของแผ่นไฟเบอร์ โดยมีได้วิบัติเนื่องจากการฉีกขาดของแผ่นไฟเบอร์ ดังได้กล่าวไปแล้วในลักษณะการวิบัติของหัวข้อก่อนหน้านี้จากการสังเกตจะเห็นว่า เมื่อติดแผ่นไฟเบอร์นั้น ถ้าเกิดฟองอากาศระหว่างแผ่นไฟเบอร์และผิวของคอนกรีต จะทำให้หน่วยแรงการยึดเกาะระหว่างแผ่นไฟเบอร์กับแท่งคอนกรีตไม่ดี ซึ่งจะมีผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงอัดของแท่งคอนกรีตและลักษณะการวิบัติ จากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ระยะทาบที่เหมาะสมควรอยู่ที่ 5 เซนติเมตร หรือครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลาง เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ให้ผลการทดสอบดี และลักษณะการวิบัติที่ดี ส่วนการใช้ระยะทาบที่ 10

เซนติเมตรนั้นมากเกินไปไม่เหมาะสม ถึงแม้จะให้ผลการทดลองดี ส่วนที่ใช้ระยะทาบที่ 1 เซนติเมตรนั้นมีโอกาสที่การวิบัติจะเกิดขึ้นที่รอยต่อทาบ จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นระยะทาบ ดังนั้น จึงสรุปว่า ระยะทาบของแผ่นไฟเบอร์ ไม่ควรน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัดแท่ง ทดสอบ

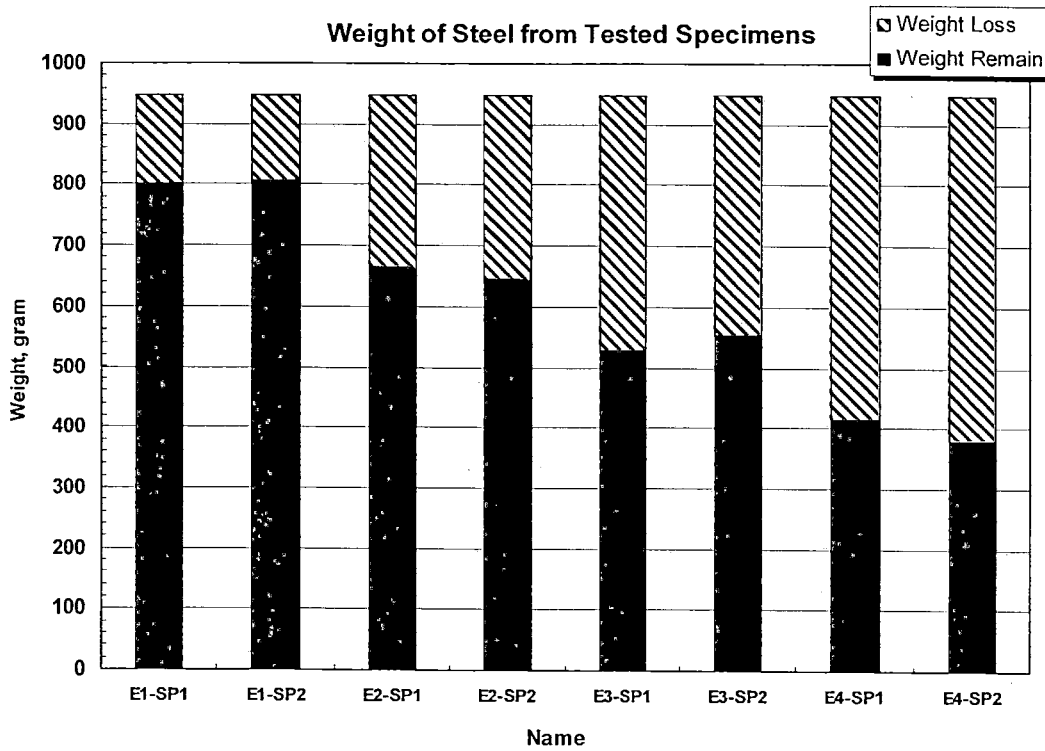
4.6 ผลการทดสอบแท่งคอนกรีตไม่เสริมเหล็กที่ห่อหุ้มด้วยแผ่นไฟเบอร์จำนวน 2 ชั้น และ 4 ชั้น



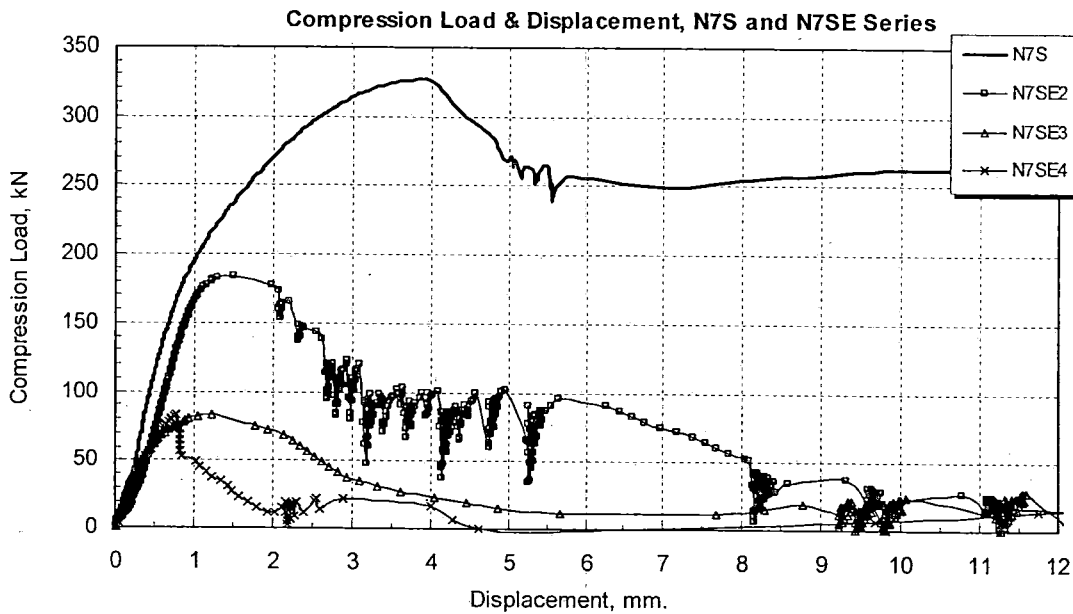
รูปที่ 4.7

การทดสอบชุดนี้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความสามารถในการรับน้ำหนักกดของ แท่งคอนกรีต กับจำนวนรอบของแผ่นไฟเบอร์ ที่ใช้ในการพันรอบแท่งทดสอบ จากผลการทดสอบ แสดงให้เห็นชัดเจนว่า ความสามารถในการรับแรงกดของแท่งคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบของ แผ่นไฟเบอร์ที่ใช้พันเพิ่มขึ้น โดยเมื่อจำนวนรอบที่ใช้พันเพิ่มขึ้น 1 เท่า กล่าวคือ จาก 2 รอบ เป็น 4 รอบ ความสามารถในการรับแรงกดของแท่งคอนกรีตเพิ่มขึ้นจากค่าเฉลี่ยที่ 450 kN สำหรับการพัน 2 รอบ เป็น 620 kN สำหรับการพัน 4 รอบ โดยเพิ่มขึ้นถึง 38% และมีระยะการหดตัวเพิ่มขึ้นจาก ค่าเฉลี่ยที่ 6.5 มม. คิดเป็นระยะหดตัวที่เพิ่มขึ้น 86%

4.7 ผลการทดสอบแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมในเหล็กเสริม



รูปที่ 4.8



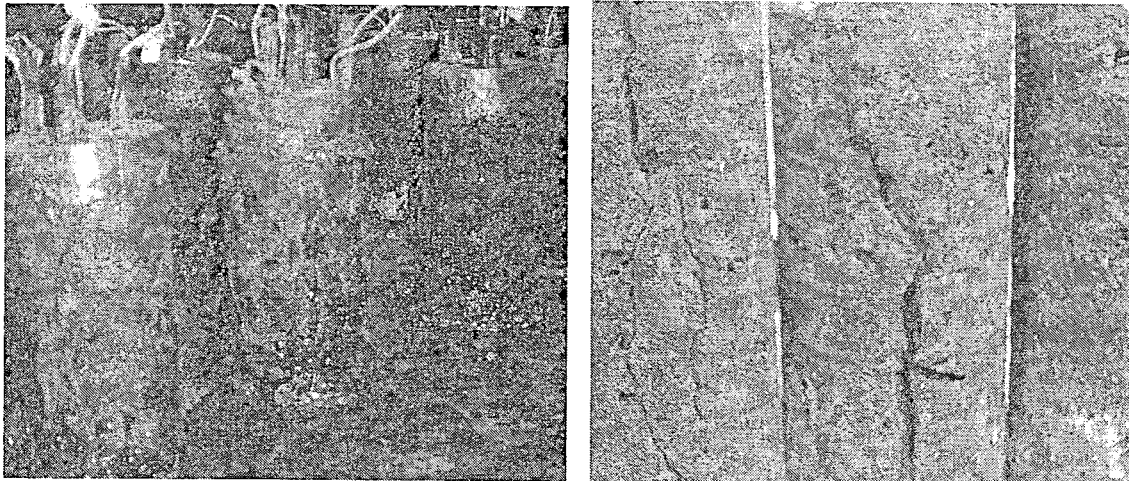
รูปที่ 4.9

รูปที่ 4.8 แสดงน้ำหนักเหล็กเสริมโดยเป็นค่าเฉลี่ยของน้ำหนักเหล็กเสริมทั้งหมดที่ใช้ในแท่งคอนกรีตแต่ละแท่ง กราฟแท่งสี่ด้านที่แสดงน้ำหนักเหล็กที่เหลืออยู่ หลังจากการผ่านกระบวนการแรงสั่นเหล็ก ส่วนกราฟแท่งลายขวางแสดงน้ำหนักเหล็กที่สูญเสียไประหว่างผ่านกระบวนการแรงสั่น โดยชุดแท่งทดสอบ E1 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเหล็กที่ 150 กรัม ชุดแท่งทดสอบ E2 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเหล็กที่ 280 กรัม ชุดแท่งทดสอบ E3 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเหล็กที่ 400 กรัม ชุดแท่งทดสอบ E4 มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเหล็กที่ 580 กรัม รูปที่ 4.10 แสดงแท่งทดสอบที่ผ่านกระบวนการแรงปฏิบัติการสั่นและแสดงการเกิดรอยแตก

รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการรับน้ำหนักกดของแท่งคอนกรีตเสริมเหล็ก และคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผ่านกระบวนการแรงปฏิบัติการเกิดสั่น จะเห็นว่าความสามารถในการรับแรงกดของแท่งคอนกรีตทดสอบจะลดลงตามปริมาณเหล็กเสริมที่สูญเสียไป โดยตัวอย่าง N7SE4 ซึ่งมีการสูญเสียเหล็กเสริมมากที่สุด สามารถรับแรงกดได้สูงสุดเพียง 80 kN ในขณะที่แท่งคอนกรีตเสริมเหล็ก N7S ที่ไม่มีการสูญเสียน้ำหนักสามารถรับน้ำหนักได้ถึง 330 kN ลดลงถึง 76% นอกจากนี้ระยะหัดตัวของแท่งคอนกรีตที่เกิดสั่นก็จะลดลงเมื่อเหล็กเสริมสูญเสียน้ำหนักมากขึ้น โดยจะเห็นว่า N7SE4 มีการหัดตัวเพียง 0.8 มม. ในขณะที่ N7S มีการหัดตัวถึง 4 มม. ลดลงถึง 80% ดังนั้นจะเห็นว่า ทั้งความสามารถในการรับแรงกดและการหัดตัวของแท่งคอนกรีตนั้นลดลงเมื่อเหล็กสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากปฏิกิริยาสั่น โดยเมื่อยิ่งสูญเสียน้ำหนักมาก ความสามารถในการรับแรงกดก็จะลดลงมาก นอกจากนี้จะสังเกตเห็นรอยแตกของแท่งทดสอบในระหว่างปฏิบัติการเกิดสั่น ทั้งนี้เกิดขึ้นเพราะเหล็กเสริมเกิดอาการบวมตัวหรือเบ่งตัว เนื่องจากการสูญเสียน้ำหนักแล้วเกิดแรงดัน เมื่อแรงดันมากพอก็จะทำให้คอนกรีตที่ห่อหุ้มเหล็กเสริมอยู่เริ่มแตกกร้าว โดยแรงดันนี้จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเหล็กสูญเสียน้ำหนักมากขึ้น ดังนั้นจะเห็นว่า ในช่วงต้นของชุดทดสอบ E1 และ E2 นั้น จะไม่เห็นรอยแตกกร้าวของผิวคอนกรีต ส่วนชุดทดสอบ E3 และ E4 จะเห็นรอยแตกกร้าวอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.10

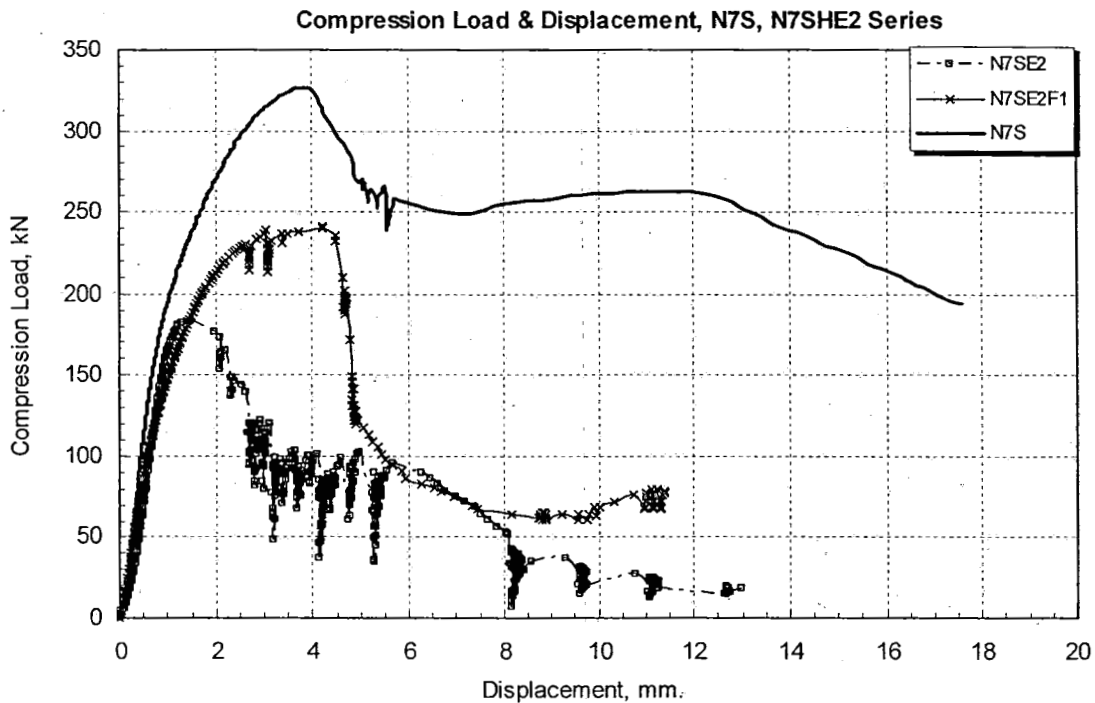
ตารางที่ 4.1 แสดงการสูญเสียความสามารถในการรับแรงกดและระยะหดตัว คิดเป็นค่าร้อยละ เทียบกับแท่งทดสอบ N7S

ชุดแท่งทดสอบ	น้ำหนัก เหล็กเสริม ที่สูญเสีย (กรัม)	ร้อยละ น้ำหนัก เหล็กเสริม ที่สูญเสีย	แรงกด ที่อ่านได้ (kN)	ร้อยละ แรงกด ที่ สูญเสีย	ระยะ หดตัว (มม.)	ร้อยละ ระยะ หดตัว ที่สูญเสีย
N7S	-	-	320	-	4	-
E1	150	15%	ไม่มีข้อมูล	-	ไม่มีข้อมูล	-
E2	280	29%	180	44%	1.5	63%
E3	400	42%	80	75%	1.0	75%
E4	580	61%	80	75%	0.8	80%



รูปที่ 4.10 แสดงแท่งทดสอบที่ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิมและแสดงการเกิดรอยแตก

4.8 ผลการทดสอบแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการสูญเสียเหล็กเสริมระดับ E2 และมีการซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์จำนวน 1 รอบ



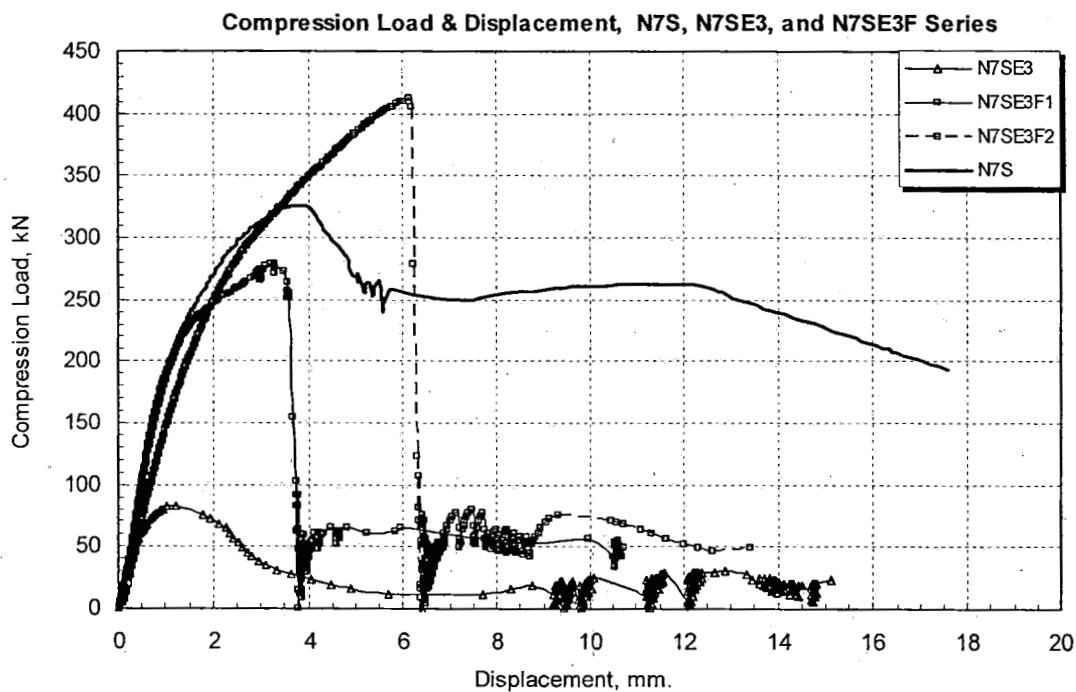
รูปที่ 4.11

การทดสอบชุดนี้ต้องการนำเสนอแนวความคิดที่ว่า แผ่นไฟเบอร์นั้นสามารถเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตได้ โดยศึกษาได้จากผลการทดลองที่กล่าวก่อนหน้านี้นั้น ดังนั้นเมื่อคอนกรีตเสริมเหล็กที่สูญเสียความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตเนื่องจากการสูญเสียเหล็กเสริมจากการเกิดสนิม เมื่อนำมาซ่อมแซมโดยการพันรอบด้วยแผ่นไฟเบอร์ จะสามารถเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตให้กลับมาเท่าเดิมหรือใกล้เคียงกับแท่งคอนกรีตที่มีได้สูญเสียเหล็กเสริมได้หรือไม่

การทดลอง เริ่มจากการใช้แท่งคอนกรีตเสริมเหล็ก N7SE2 ซึ่งเป็นแท่งคอนกรีตที่ผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาสนิม ในระดับที่เกิดการสูญเสียน้ำหนักเหล็กเสริมในระดับประมาณ 29% จากข้อมูลการทดลองก่อนหน้านี้นั้น แสดงให้เห็นว่า ที่ระดับการเกิดสนิมนี้ แท่งคอนกรีตยังไม่เกิดรอยแตกร้าวและสูญเสียความสามารถในการรับแรงกดไปประมาณ 44% และมีระยะหัดตัวของแท่งคอนกรีตลดลง 63% เมื่อเทียบกับแท่งคอนกรีตเสริมเหล็ก N7S จากนั้นเมื่อนำมาซ่อมแซมโดยใช้แผ่นไฟเบอร์พันรอบ จำนวน 1 รอบ จากผลการทดลองจะเห็นว่าแท่งคอนกรีตสามารถรับน้ำหนักกดได้เพิ่มขึ้นจาก 180 kN เป็น 240 kN เพิ่มขึ้น 33% และมีระยะหัดตัวเพิ่มขึ้นจาก 1.5 มม. เป็น 4

มม. อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับ แท่งคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เกิดสนิม ซึ่งมีความสามารถในการรับแรงกดได้ที่ 320 kN จะเห็นว่ายังมีค่าน้อยกว่าอยู่ 80 kN หรือน้อยกว่าประมาณ 33% กล่าวโดยสรุป คือ การซ่อมแซมแท่งคอนกรีตด้วยการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์ จำนวน 1 รอบนั้น ทำให้แท่งคอนกรีตที่สูญเสียกำลังอัดไป สามารถช่วยให้ความสามารถในการรับกำลังอัดกลับคืนมาประมาณครึ่งหนึ่ง

4.9 ผลการทดสอบแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการสูญเสียเหล็กเสริมระดับ E3 และซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์จำนวน 1 รอบ และ 2 รอบ

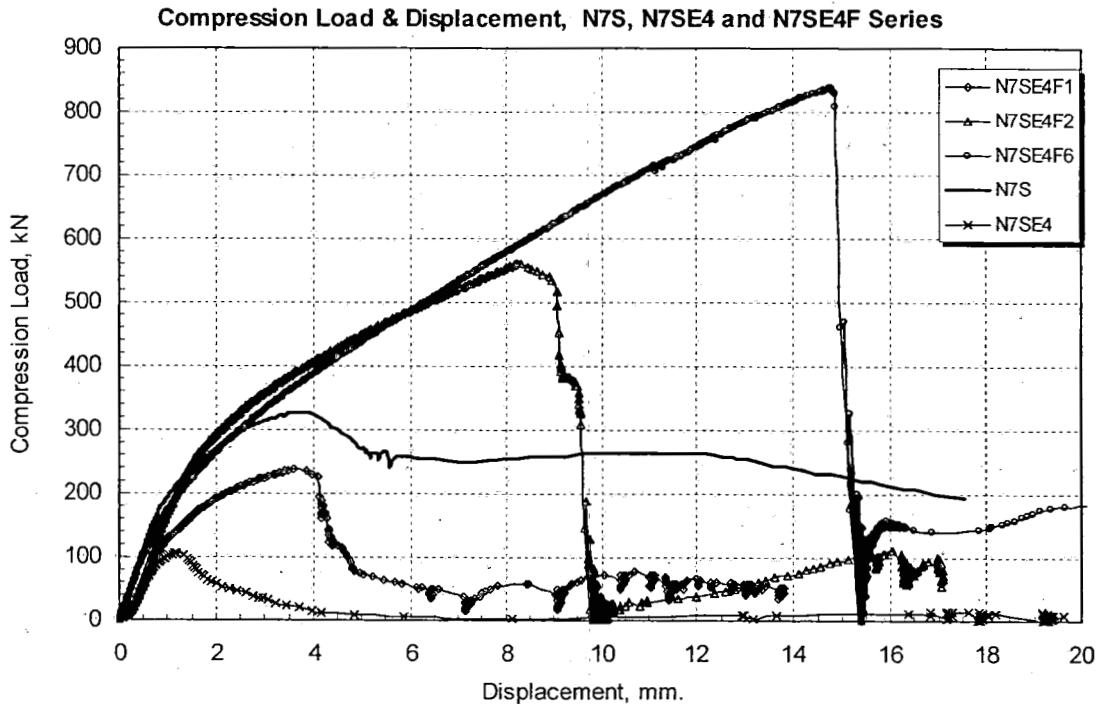


รูปที่ 4.12

การทดลองนี้คล้ายกับชุดการทดลองก่อนหน้านี้ กล่าวคือ ต้องการศึกษาว่า เมื่อคอนกรีตเสริมเหล็กเสียหายในระดับ E3 นั้น จะสามารถซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์ได้หรือไม่ การสูญเสียเหล็กเสริมในระดับ E3 นั้น จะเกิดรอยแตกกว้างของผิวคอนกรีตแสดงให้เห็นอย่างชัดเจน ลักษณะการซ่อมแซมคือ จะทำการพันแผ่นไฟเบอร์รอบแท่งคอนกรีตเลย โดยมีได้อุดรอยแตกกว้างของคอนกรีตก่อนทำการซ่อมแซม

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การพันด้วยแผ่นไฟเบอร์ 1 รอบ สามารถเพิ่มการรับแรงกดของแท่งคอนกรีต จาก 80 kN เป็น 270 kN และ ระยะหัดตัว จาก 1 มม. เป็น 3 มม. และเมื่อพันด้วยจำนวน 2 รอบ จะสามารถเพิ่มการรับแรงอัด จาก 80 kN เป็น 400 kN และระยะหัดตัวจาก 1 มม. เป็น 6 มม.

4.10 ผลการทดสอบแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการสูญเสียเหล็กเสริมระดับ E4 และ ซ่อมแซมด้วยแผ่นไฟเบอร์จำนวน 1, 2 รอบ และ 6 รอบ



รูปที่ 4.13

เมื่อแท่งคอนกรีตมีการเกิดสนิมรุนแรงที่สุดถึงระดับ E4 นั้น จะเห็นว่า แท่งคอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงอัดประมาณ 80 kN และระยะหดตัวประมาณ 0.8 มม. มีรอยร้าวเกิดขึ้นอย่างชัดเจนและในบางแท่งทดสอบ คอนกรีตที่ห่อหุ้มเหล็กหลุดร่อนออกมาเป็นแผ่นๆ การซ่อมแซมยังคงเหมือนที่กล่าวมา คือ ใช้การพันรอบด้วยแผ่นไฟเบอร์และไม่มีการอุดรอยร้าวด้วยซีเมนต์เพสต์ก่อนทั้งสิ้น การซ่อมแซมจะนำชิ้นคอนกรีตที่หลุดออกมาใส่กลับเข้าไปในตำแหน่งเดิมและพันด้วยแผ่นไฟเบอร์ที่ถูกทาด้วยอีพอกซี จากการทดลองจะเห็นว่า เมื่อพันด้วยแผ่นไฟเบอร์ 1 รอบ กำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 250 kN เมื่อพันด้วยแผ่นไฟเบอร์ 2 รอบ กำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 550 kN เมื่อพันด้วยแผ่นไฟเบอร์ 6 รอบ กำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 820 kN ส่วนค่าการหดตัวของแท่งคอนกรีต ก็เพิ่มขึ้นจาก 0.8 มม. เป็น 4 มม., 8 มม., และ 14 มม. เมื่อพันด้วยแผ่นไฟเบอร์ 1, 2, และ 6 รอบ ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

- 5.1.1 เมื่อแท่งคอนกรีตเสริมเหล็กและไม่เสริมเหล็กถูกห่อหุ้มด้วยแผ่นไฟเบอร์จะส่งผลให้ค่าแรงอัดสูงสุด และค่าระยะการเสีรูปร่างในแนวแกนตั้งขณะเกิดแรงอัดสูงสุดเพิ่มขึ้นมากกว่าแท่งคอนกรีตที่ไม่ถูกห่อหุ้มด้วยแผ่นไฟเบอร์
- 5.1.2 สำหรับแท่งคอนกรีตไม่เสริมเหล็กเมื่อถูกห่อหุ้มด้วยแผ่นไฟเบอร์ จะส่งผลให้มีพฤติกรรมการวิบัติคล้ายคลึงกับคอนกรีตเสริมเหล็ก นั่นคือการรับแรงอัดจะถูกแบ่งเป็น 2 ช่วง โดยที่ช่วงแรกเป็นการรับน้ำหนักของเนื้อคอนกรีตภายใน และหลังจากเนื้อคอนกรีตหมดความสามารถยืดหยุ่นระหว่างกันแล้วจึงเป็นช่วงที่แผ่นไฟเบอร์ที่พันอยู่รอบ ๆ รับน้ำหนักต่อไป
- 5.1.3 เมื่อระยะเวลาในการผ่านกระบวนการเร่งปฏิกิริยาการเกิดสนิมมากขึ้น ปริมาณน้ำหนักของเหล็กเสริมที่เหลืออยู่จะน้อยลง ส่งผลให้ค่าแรงอัดสูงสุดและระยะการเสีรูปร่างในแนวแกนตั้งขณะเกิดแรงอัดสูงสุดน้อยลงเช่นกัน
- 5.1.4 การซ่อมแซมแท่งคอนกรีตโดยการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์ มีผลทำให้แท่งคอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงเพิ่มมากขึ้น โดยเมื่อจำนวนรอบในการพันแผ่นไฟเบอร์เพิ่มมากขึ้น ค่าแรงอัดสูงสุดและค่าระยะการเสีรูปร่างในแนวแกนตั้งขณะเกิดแรงอัดสูงสุดจะเพิ่มขึ้นด้วย
- 5.1.5 เมื่อมีปริมาณโพรงอากาศระหว่างผิวแท่งคอนกรีตกับแผ่นไฟเบอร์หลังการเชื่อมประสานด้วยน้ำยา Epoxy มาก ความสามารถในการรับแรงอัดของแท่งคอนกรีตจะน้อยลง
- 5.1.6 ระยะทาบของแผ่นไฟเบอร์ไม่ควรต่ำกว่า ครึ่งหนึ่งของพื้นที่หน้าตัดคอนกรีตที่จะถูกซ่อมแซม
- 5.1.7 ปริมาณในการใช้แผ่นไฟเบอร์เพื่อเสริมกำลังและซ่อมแซมแท่งคอนกรีตให้เหมาะสม ต้องพิจารณาจาก ระดับความเสียหายที่เกิดขึ้น และค่าความสามารถในการรับแรงอัดที่ต้องการ
- 5.1.8 ประสิทธิภาพของแผ่นไฟเบอร์ที่นำมาใช้ในการซ่อมแซมความเสียหายของคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากการกะเทาะออกของผิวคอนกรีต โดยอาจมีสาเหตุมาจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม หรืออุบัติเหตุเนื่องจากการชน หรือกระแทกผิวคอนกรีตด้วยของแข็งนั้น จากผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดว่า แผ่นไฟเบอร์สามารถนำมาใช้ซ่อมแซมคอนกรีต ที่มีความเสียหายดังกล่าวข้างต้นได้ โดย

วิธีการที่นำมาใช้ไม่มีขั้นตอนยุ่งยากมากนัก สามารถพื้นแผ่นไฟเบอร์เข้ากับหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กได้เลย โดยอาจไม่จำเป็นต้องมีการอุดรอยร้าว หรือฉาบเรียบบริเวณผิวคอนกรีตที่กะเทาะเลยก็ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาโครงการครั้งนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการศึกษาขั้นต่อไปได้มาตรฐานที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง เนื่องจากการซ่อมแซมโดยการใช้แผ่นไฟเบอร์เป็นวิธีที่สะดวก และได้ผลดีวิธีหนึ่ง
- 5.2.2 ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบถึงต้นทุนในการซ่อมแซมด้วยวิธีอื่น กับต้นทุนในการซ่อมแซมโดยการใช้แผ่นไฟเบอร์สำหรับกรณีเดียวกัน และกรณีอื่น ๆ ด้วย
- 5.2.3 ในขั้นตอนการซ่อมแซมโดยการพันด้วยแผ่นไฟเบอร์ควรมีการควบคุมคุณภาพที่ดี และสม่ำเสมอ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและคุ้มค่าที่สุดที่สุด
- 5.2.4 เพื่อประสิทธิภาพสูงสุดและการใช้งานของแผ่นไฟเบอร์ที่คุ้มค่า ควรมีการเตรียมพื้นผิวคอนกรีตบริเวณที่จะใช้แผ่นไฟเบอร์พันรอบให้สะอาดและเรียบ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการยึดเกาะของแผ่นไฟเบอร์กับพื้นผิวคอนกรีตได้ดีมากขึ้น

บรรณานุกรม

1. Mirmiran, A., and Shahawy M., "Behavior of concrete columns confined by fiber composites.", J. of structural Engineering, 1997, May, pp 583 – 590.
2. Pantazopoulou, S. J., Bonacci, J. F., Sheikh, S., Thomas, M. D. A., and Hearn N., "Repair of corrosion-damaged columns with FRP wraps.", J. of composite for Construction, 2001, Feb., pp 3 – 11.
3. Shahawy M., and Mirmiran, A., "Test and modeling of carbon-wrapped concrete columns.", Composites Part B: Engineering, 2000, pp 471 – 480.
4. ดร. บุญไชย สติตมันน์ในธรรม, พฤติกรรมของส่วนของโครงสร้างรับแรงดัดและแรงอัดเมื่อซ่อมแซมหรือเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์, โครงการงานทางวิศวกรรมโยธา, ๒๕๔๓, หน้า ๓๑ – ๓๖, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
5. ชวัชชัย คงศักดิ์ตระกูล. วัสดุในการซ่อมแซมและป้องกันโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก. การสัมมนาการซ่อมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
6. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. ความคงทนของคอนกรีต. กรุงเทพฯ. พิมพ์ครั้งที่ 1, หน้า 40 – 42. 2543
7. จิตพันธ์ ประกอบพร. งานเสริมกำลังพื้นสะพาน โดยการใช้แผ่นเหล็ก และแผ่นคาร์บอน การสัมมนาวิศวกรรมการทาง ครั้งที่ 2. 2546.
8. รศ. ดร. สมนึก ตั้งเต็มศิริกุล. ปัญหาความคงทนของคอนกรีต. การสัมมนาการซ่อมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
9. Ahmad, S. H. and Shah, S. P., "Stress-strain curves of concrete confined by spiral reinforcement.", ACI Journal, 1982, 79(6), pp 484-490
10. Mander, J. B., and Priestly, M. J. N. and Park, R., "Theoretical stress-strain model for confined concrete.", J. of Structural Engineering Div., ASCE, 1988, 114(8), pp 1805-1826
11. Fardis, M. N., and Khalili, H. H., "FRP-encased concrete as a structural material.", Mag. Concr. Res., 1982, 34(121), pp191-202
12. Pantazopoulou, S. J., and Papoulia, K. D., "Modeling cover-cracking due to reinforcement corrosion in RC structures.", J. of Engineering Mechanics, 2001, April, pp 342-351
13. Nanni, A., and Bradford, N. M., "FRP jacketed concrete under uniaxial compression.", Construction and Building Materials, 1995, V.9(2), pp 115-124

197469

14. Samaan, M., Mirmiran, A., and Shahawy M., "Model of concrete confined by fiber composites.", J. of Structural Engineering, ASCE, 1998, 124(9), pp 1025-1031
15. Ramirez, L. J., "Ten concrete column repair methods.", Construction and Building Materials, 1996, V.10(3), pp 195-202
16. MacGregor, J. G., "Reinforced concrete mechanics and design", 2nd Edition, 1992