การซ่อมแซมองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดัดหลังถูกเพลิงไหม้โดยใช้แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยติดตั้งแบบใกล้ผิว

นายสุวัชร ตันวัฒนะประทีป

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

REPAIR OF FLEXURAL REINFORCED CONCRETE MEMBERS AFTER FIRE USING NEAR-SURFACE MOUNTED FIBER REINFORCED POLYMER RODS

Mr. Suwatchara Tanwatthanaprathip

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การซ่อมแซมองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดัดหลังถูกเพลิงไหม้โดยใช้แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยติดตั้งแบบใกล้ผิว
โดย	นายสุวัชร ตันวัฒนะประทีป
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทิต ปานสุข
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.รักติพงษ์ สหมิตรมงคล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธัญวัฒน์ โพธิศิริ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทิต ปานสุข)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.รักติพงษ์ สหมิตรมงคล)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อัครวัชร เล่นวารี)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.จักรพันธ์ เทือกต๊ะ)

สุวัชร ตันวัฒนะประทีป : การซ่อมแซมองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดัดหลังถูกเพลิงไหม้โดยใช้แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยติดตั้งแบบใกล้ผิว (REPAIR OF FLEXURAL REINFORCED CONCRETE MEMBERS AFTER FIRE USING NEAR-SURFACE MOUNTED FIBER REINFORCED POLYMER RODS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.วิทิต ปานสุข, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม :ดร.รักติพงษ์ สหมิตรมงคล,92 หน้า.

บทคัดย่อภาษาไทย

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับผลกระทบจากเพลิงไหม้จะมีการสูญเสียกำลัง ทั้งในส่วนตัวคอนกรีต ตลอดจนแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีต ปัญหาที่ตามมาหลังจากเกิดเพลิงไหม้ก็คือจะทำอย่างไรให้อาคารสามารถกลับมาใช้งานได้อย่างปกติโดยให้เสียค่าใช้จ่ายและเวลาให้เหมาะสมที่สุด ซึ่งการซ่อมแซมอาคารหลังถูกเพลิงไหม้ด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยเป็นทางเลือกหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงวิธีการซ่อมแซมคอนกรีตเสริมเหล็กหลังถูกเผาไฟด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ติดตั้งแบบใกล้ผิว(Near Surface Mount) โดยงานวิจัยนี้จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 การทดสอบ โดยการทดสอบแรกจะเป็นการทดสอบกำลังรับแรงดึงของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ซึ่งพฤติกรรมการรับแรงดึงเป็นเส้นตรงไม่มีจุดครากเหมือนเหล็ก การทดสอบต่อมาจะเป็นการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว โดยทดสอบแบบดึงโดยตรงซึ่งสามารถนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงกับระยะยึดเหนี่ยวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเพื่อที่จะหาระยะยึดเหนี่ยวที่เหมาะสมในการติดตั้งแต่ละวิธีต่อไป การทดสอบสุดท้ายเป็นการทดสอบโครงสร้างรับแรงดัดโดยจะหล่อพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กให้ได้ขนาดตามต้องการและนำไปเผาในเตาเผาที่มีการควบคุมอุณหภูมิตามมาตรฐานแล้วจึงนำมาติดแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนด้วยวิธีการติดตั้งใกล้ผิวในด้านล่างของพื้นด้วยรูปแบบต่างๆ หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบหาค่ากำลังการรับน้ำหนักและระยะโก่งตัวที่เกิดขึ้นโดยตำแหน่งการติดตั้งและการกระจายตัวของแท่งวัสดุเสริมเส้นใยนั้นส่งผลอย่างมากต่อกำลังของโครงสร้างหลังการซ่อมแซม ซึ่งวิธีการที่เหมาะสมทั้งในด้านความสะดวกของขั้นตอนการติดตั้งและในด้านกำลังรับน้ำหนักคือการติดตั้งแบบวางแท่งวัสดุเสริมเส้นใยบนชั้นวัสดุซ่อมโดยวางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยให้ตรงกับเหล็กเสริม

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2556 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

5470435621 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS : CONCRETE/FIRE/CFRP ROD/NSM

SUWATCHARA TANWATTHANAPRATHIP: REPAIR OF FLEXURAL REINFORCED CONCRETE MEMBERS AFTER FIRE USING NEAR-SURFACE MOUNTED FIBER REINFORCED POLYMER RODS.ADVISOR: ASSOC. PROF. WITHIT PANSUK, Ph.D., CO-ADVISOR: RAKTIPONG SAHAMITMONGKOL, Ph.D., 92pp

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

Post-fire damaged reinforced concrete structure was loss both concrete strength and bond between concrete and reinforcing steel. The problem is how to re-activated by optimizing cost and time. The reparation using fiber reinforced composite material is an interesting choice for the fire deteriorated building components.

The main purpose of this research is to study about the method to repair fire damaged material with carbon fiber polymer rod near surface of specimens or Near Surface Mount totally 3 experiments. There are direct tensile strength of rod, bond strength by direct pull-out test, and flexural strength of fire deteriorated slab. The special behavior of tensile strength test is to observe a linearly result without any yielding point until failure. The relationship of tensile stress against anchor depth per diameter is introduced in order to find an appropriate depth for each installation. Then, a carbon fiber reinforced polymer rod was installed into post-fire slab for flexural test. The location and distribution of polymer rod installed into specimens play an important role on the repaired material strength. Finally, the appropriate way to repair a damaged structure considering both convenience and strength condition is to place the polymer rod on repairing material layers in the same line with original reinforcing steel.

Department: Civil Engineering Student's Signature .....

Field of Study: Civil Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year: 2013 Co-advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

อันดับแรกต้องขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาตราจารย์.ดร.วิทิต ปานสุข และ ดร.รักติพงษ์ สหมิตรมงคล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความอนุเคราะห์และคำแนะนำที่ดีตลอดมา ขอขอบพระคุณบริษัทเด็กซ์ตร้า แมนูแฟ็คเจอร์ริ่ง (ประเทศไทย) จำกัด และ บริษัท รีโทรฟิท สตรัคเจอร์ สเปเชียลลิสต์ จำกัด ที่ให้ความร่วมมือและให้การสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์รวมถึงแรงงานจากช่างผู้ชำนาญการในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์ คุณCao Nguyen Thi และเพื่อนๆนิสิตปริญญาโทและปริญญาเอกภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการคอนกรีต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกคน ที่ให้การช่วยเหลือจนทำให้การวิจัยนี้สำเร็จได้

สุดท้ายนี้ ต้องขอขอบคุณทุกคนในครอบครัวที่สนับสนุนและให้กำลังใจจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฎ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่สำคัญ 4

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับอัคคีภัย 4

2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย 7

2.1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการเสริมกำลังแบบติดตั้งใกล้ผิว 9

2.2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับเพลิงไหม้ 14

2.2.1 มาตรฐานการทดสอบอัตราทนไฟขององค์อาคาร 14

2.2.2 แนวความคิดเกี่ยวกับปริมาณไฟ (Fire Load Concept) 15

2.2.3 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับความรุนแรงของไฟ (Basic Theory of Fire verity) 16

2.2.4 เส้นโค้งมาตรฐานระหว่างอุณหภูมิกับเวลา 16

2.3 ชนิดและคุณสมบัติของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย 17

2.4 คุณสมบัติทางกลของกำลังยึดเหนี่ยว 19

2.4.1 ลักษณะของการวิบัติ 19

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในคอนกรีต 21

หน้า

2.5 การซ่อมแซมและเตรียมผิว 22
2.5.1 การขัดผิว 23
2.5.2 การลบมุม 23
2.5.3 การอุดรอยร้าว 24
2.5.4 การฉาบผิว 24
2.5.5 การทำความสะอาดผิว 24
2.6 มาตรฐานการการติดตั้งระบบ FRP แบบฝังใกล้ผิว 24
2.6.1 ทาวัสดุยึดประสาน 25
2.6.2 การติดตั้งแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย 25
2.6.3 การบ่ม 25
2.6.4 การเคลือบป้องกันผิวและการแต่งผิว 25
2.6.5 การป้องกันชั่วคราว 26
2.7 ข้อจำกัดของการใช้อีพ๊อกซี่ 26
2.8 การตรวจสอบและการประกันคุณภาพ 26
2.8.1 การตรวจสอบการหลุดล่อน (Debonding) 26
2.8.2 การตรวจสอบการยึดเหนี่ยว (Adhesion) 27
2.8.3 การตรวจสอบสำหรับงานเสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย 27
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย 28
3.1 การทดสอบการรับแรงดึง 28
3.2 การทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว 29
3.3 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก 32
3.4 การเจาะทดสอบตัวอย่างคอนกรีต 39
3.5 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อม 41
3.5.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อม 41
3.5.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อม 41
3.5.3 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อม 41
3.6 แผนการดำเนินงาน 43
3.7 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน 44

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ 45
4.1ผลการทดสอบการรับแรงดึง 45
4.2 ผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว 46
4.3 ผลการทดสอบองค์อาคารรับแรงดัด 59
4.3.1 ผลการจำลองเพลิงไหม้ 59
4.3.2 ผลการดึงทดสอบ (Pull-off test) 66
4.3.3 ผลการเจาะทดสอบคอนกรีต 67
4.3.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อม 68
4.3.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด 71
บทที่ 5 สรุปผล 85
รายการอ้างอิง 86
ภาคผนวก 90
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 92

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 ลักษณะของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและลักษณะของท่อเหล็กที่แนะนำ 8
ตารางที่ 3-1 ลักษณะของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว 31
ตารางที่ 3-2 ลักษณะของตัวอย่างพื้นที่ใช้ในการทดสอบ 38
ตารางที่ 3-3 ตารางแสดงแผนการดำเนินงาน 43
ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึง 45
ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยว 47
ตารางที่ 4-3 ตัวแปรในการหาระยะยึดเหนี่ยว 57
ตารางที่ 4-4อุณหภูมิที่เวลาต่างๆในเตาสำหรับการเผาชิ้นตัวอย่าง240ksc เป็นเวลา90 นาที 60
ตารางที่ 4-5อุณหภูมิที่เวลาต่างๆในเตาสำหรับการเผาชิ้นตัวอย่าง350ksc เป็นเวลา90 นาที 61
ตารางที่ 4-6 ผลของความรุนแรงไฟ 64
ตารางที่ 4-7 สภาพผิวคอนกรีตหลังจากเผาไฟ 64
ตารางที่ 4-8 ผลการดึงทดสอบแผ่นพื้นตัวอย่าง 67
ตารางที่ 4-9 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต 68
ตารางที่ 4-10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อม 68
ตารางที่ 4-11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อม 69
ตารางที่ 4-12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อม 70
ตารางที่ 4-13 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด 71

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2-1 ลักษณะการวิบัติของคอนกรีตหลังจากถูกความร้อนที่เวลาต่างๆ 6
ภาพที่ 2-2 แสดงวิบัติแบบไม้กวาด (Broom-type failure) ของCFRP และ GFRP Rod 7
ภาพที่ 2-3 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิด 12
ภาพที่ 2-4 ลักษณะคานที่ใช้ในการทดสอบ 13
ภาพที่ 2-5 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ ASTM E119-98 17
ภาพที่ 2-6 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ มอก.1334-2539 17
ภาพที่ 2-7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของเส้นใยแต่ละชนิด 18
ภาพที่ 2-8 ลักษณะผิวของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบต่างๆ 18
ภาพที่ 2-9 ลักษณะของการถ่ายแรงระหว่างคอนกรีตกับวัสดุเสริมกำลัง 19
ภาพที่ 2-10 ลักษณะของรอยแตกของคอนกรีต ที่มีการวิบัติแบบ Splitting Failure 20
ภาพที่ 2-11 ลักษณะของการรูดออกของแท่งพอลิเมอร์จากการวิบัติแบบPullout 20
ภาพที่ 3-1แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่เตรียมไว้ทดสอบรับแรงดึง 28
ภาพที่ 3-2 การทดสอบรับแรงดึงของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย 29
ภาพที่ 3-3 ระยะในการติด strain gauge 29
ภาพที่ 3-4 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว 30
ภาพที่ 3-5 การทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยว 31
ภาพที่ 3-6 ตัวอย่างพื้นที่ใช้ในการทดสอบรับแรงดัด 32
ภาพที่ 3-7 การจำลองสภาพไฟไหม้ 33
ภาพที่ 3-8 การสกัดคอนกรีตที่ได้รับความเสียหายจากเพลิงไหม้ 33
ภาพที่ 3-9 การติดตั้งลูกเหล็ก 34
ภาพที่ 3-10 เครื่องดึงทดสอบและลักษณะการวิบัติของชิ้นตัวอย่าง 34
ภาพที่ 3-11 ลักษณะร่องที่เจาะเสร็จเรียบร้อยแล้ว 35
ภาพที่ 3-12 ใช้เครื่องเป่าไล่สิ่งสกปรกและเศษคอนกรีตที่หลุดล่อนออกไป 35
ภาพที่ 3-13 ลักษณะการติดตั้งแท่งพอลิเมอร์แบบตรงกับเหล็กเสริม 36
ภาพที่ 3-14 ลักษณะการติดตั้งแท่งพอลิเมอร์แบบสลับฟันปลา 36
ภาพที่ 3-15 ลักษณะการติดตั้งแท่งพอลิเมอร์แบบวางบนชั้นซ่อมแซม 37

หน้า

ภาพที่ 3-16 ลักษณะการติดตั้งแท่งพอลิเมอร์แบบวางระหว่างชั้นผิวแกร่งกับชั้นซ่อมแซม 37
ภาพที่ 3-17 การตั้งแบบหล่อก่อนเทวัสดุซ่อม 38
ภาพที่ 3-18 การฉาบผิววัสดุซ่อมให้เรียบ 39
ภาพที่ 3-19 การเจาะทดสอบตัวอย่างคอนกรีต 40
ภาพที่ 3-20 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต 40
ภาพที่3-21 การหล่ออีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อมในแบบหล่อ 42
ภาพที่3-22 การทดสอบกำลังรับแรงอัด 42
ภาพที่3-23 การทดสอบกำลังรับแรงดึง 42
ภาพที่3-24 การทดสอบกำลังรับแรงดัด 42
ภาพที่3-25 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน 44
ภาพที่ 4-1 ลักษณะการวิบัติของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย 45
ภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในการทดสอบกำลังรับแรงดึง 46
ภาพที่ 4-3 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวA-1และA-2 48
ภาพที่ 4-4 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยว B-1และB-2 48
ภาพที่ 4-5 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยว C-1และC-2 48
ภาพที่ 4-6 การกระจายตัวของความเค้นในการวางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยบนชั้นผิวแกร่ง 49
ภาพที่ 4-7 การกระจายตัวของความเค้นในการวางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยระหว่างชั้นผิวแกร่ง
กับวัสดุซ่อม 49
ภาพที่ 4-8 การกระจายตัวของความเค้นในการวางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยบนชั้นวัสดุซ่อม 49
ภาพที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับระยะจากFree endของตัวอย่างA-1 50
ภาพที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับระยะจากFree endของตัวอย่างA-2 50
ภาพที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับระยะจากFree endของตัวอย่างB-1 51
ภาพที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับระยะจากFree endของตัวอย่างB-2 51
ภาพที่ 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับระยะจากFree endของตัวอย่างC-1 51
ภาพที่ 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับระยะจากFree endของตัวอย่างC-2 52
ภาพที่ 4-15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ยกับค่าการไถลเฉลี่ย 52
ภาพที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ยกับค่าการไถล 53
ภาพที่ 4-17 สมดุลของแรงในระบบการยึดเหนี่ยว 53

หน้า

ภาพที่ 4-18 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะฝังยึดต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกับความเค้นดึงในแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย 59
ภาพที่ 4-19 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตากับเวลาของชิ้นตัวอย่าง240ksc 61
ภาพที่ 4-20 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตากับเวลาของชิ้นตัวอย่าง350ksc 62
ภาพที่ 4-21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับเวลา ของชิ้นตัวอย่าง240ksc 63
ภาพที่ 4-22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับเวลา ของชิ้นตัวอย่าง350ksc 63
ภาพที่ 4-23 น้ำในคอนกรีตที่ซึมออกมาขณะเผาไฟ 65
ภาพที่ 4-24 สีและรอยร้าวหลังจากเก็บชิ้นตัวอย่างลงมา 66
ภาพที่ 4-25 ผลการเจาะทดสอบคอนกรีตกำลังอัด240ksc 67
ภาพที่ 4-26 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัด 68
ภาพที่ 4-27 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดึง 69
ภาพที่ 4-28 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดัด 70
ภาพที่ 4-29 ลักษณะการวิบัติของพื้นตัวอย่างSC1 74
ภาพที่ 4-30 รอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSC1 74
ภาพที่ 4-31 ลักษณะการวิบัติของพื้นตัวอย่างSC2 75
ภาพที่ 4-32 รอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSC2 75
ภาพที่ 4-33 ลักษณะการวิบัติของพื้นตัวอย่างSF1 76
ภาพที่ 4-34 รอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSF1 76
ภาพที่ 4-35 ลักษณะการวิบัติของพื้นตัวอย่างSF2 77
ภาพที่ 4-36 รอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSF2 77
ภาพที่ 4-37 ลักษณะการวิบัติของพื้นตัวอย่างSF3 78
ภาพที่ 4-38 รอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSF3 78
ภาพที่ 4-39 ลักษณะการวิบัติของพื้นตัวอย่างSF4 79
ภาพที่ 4-40 รอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSF4 79
ภาพที่ 4-41 ลักษณะการวิบัติของพื้นตัวอย่างSF5 80
ภาพที่ 4-42 รอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSF5 80
ภาพที่ 4-43 ลักษณะการวิบัติของพื้นตัวอย่างSF6 81
ภาพที่ 4-44 รอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSF6 81

หน้า

ภาพที่ 4-45 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและระยะโก่งตัวของตัวอย่างที่มีกำลังคอนกรีต 240ksc 83
ภาพที่ 4-46 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและระยะโก่งตัวของตัวอย่างที่มีกำลังคอนกรีต 350ksc 83
ภาพที่ 4-47 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและระยะโก่งตัวของตัวอย่างที่มีการวางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยห่างจากเหล็กเสริมต่างกัน 84
ภาพที่ 4-48 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและระยะโก่งตัวของตัวอย่างที่มีการวางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในชั้นต่างกัน 84

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีอุบัติเหตุที่เกี่ยวข้องกับอาคารเกิดขึ้นบ่อยครั้ง หนึ่งในอุบัติเหตุที่ส่งผลกระทบต่ออาคารโครงสร้างเป็นอย่างมากก็คือเพลิงไหม้ อาคารเหล่านี้เมื่อถูกเพลิงไหม้จะมีการสูญเสียกำลังทั้งในส่วนตัวคอนกรีต ตลอดจนแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีต ปัญหาที่ตามมาหลังจากเกิดเพลิงไหม้ก็คือจะทำอย่างไรให้อาคารสามารถกลับมาใช้งานได้อย่างปกติโดยให้เสียค่าใช้จ่ายและเวลาให้เหมาะสมที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆอย่างด้วยกัน เช่น ความเสียหายของโครงสร้าง งบประมาณในการซ่อมแซม เป็นต้น หนึ่งในวิธีการซ่อมแซมอาคารหลังถูกเพลิงไหม้ที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากก็คือการเสริมกำลังโครงสร้างอาคารด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักที่สูง มีความต้านทานการผุกร่อนสูง มีน้ำหนักเบา และมีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูง โดยจะนำมาใช้ในการเสริมกำลังคานและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อเพิ่มความแข็งแกร่งต่อการดัด (flexural stiffness) กำลังรับการดัด (flexural strength) และกำลังรับการเฉือน (shear strength) ซึ่งในการวิจัยนี้ได้เลือกใช้แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย มาซ่อมแซมแบบติดตั้งใกล้ผิว (Near Surface Mount) โดยข้อได้เปรียบของการติดตั้งแบบใกล้ผิวโดยใช้แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เมื่อเปรียบเทียบกับการเสริมกำลังภายนอกอื่นๆ [1] มีดังนี้

1. แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะถูกป้องกันด้วยอีพ๊อกซี่จากผลกระทบของอุบัติเหตุและความเสียหายเชิงกล
2. ขั้นตอนในการติดตั้งลดลงเนื่องจากไม่ต้องมีการเตรียมผิว มีแต่การทำร่อง (Grooving) เพื่อติดตั้งแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
3. ป้องกันการวิบัติแบบหลุดล่อน (debonding) ซึ่งสามารถพบในการเสริมกำลังของชิ้นส่วนคานต่อเสาในการเชื่อมแบบแข็งเกร็งเมื่อแรงดัดสูงสุดอยู่ที่ส่วนปลายของชิ้นส่วน
4. การวิบัติแบบหลุดล่อนจากคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง
5. ลักษณะภายนอกของโครงสร้างยังดูสวยงามไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

การศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาถึงวิธีการซ่อมแซมคอนกรีตเสริมเหล็กหลังถูกเผาไฟด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ติดตั้งแบบใกล้ผิว(Near Surface Mount) โดยงานวิจัยนี้จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 การทดสอบ โดยการทดสอบแรกจะเป็นการทดสอบกำลังรับแรงดึงของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ซึ่งต้องนำแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมาหุ้มด้วยท่อเหล็กและยึดด้วยอีพ๊อกซี่เพื่อที่จะไม่ให้เกิดแรงอัดในทิศที่ตั้งฉากกับเส้นใยหลังจากนั้นจึงนำไปทดสอบการดึง การทดสอบต่อมาจะเป็นการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว โดยจะหล่อคอนกรีตให้มีรูปร่างตามที่ต้องการ จากนั้นจึงติดตั้งแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยตามวิธีการติดตั้งใกล้ผิวเพื่อจำลองกำลังยึดเหนี่ยว แล้วนำมาทดสอบแบบดึงโดยตรง (direct pull-out test) การทดสอบสุดท้ายเป็นการทดสอบโครงสร้างรับแรงดัดโดยจะหล่อพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กให้ได้ขนาดตามต้องการและนำไปเผาในเตาเผาที่มีการควบคุมอุณหภูมิตามมาตรฐานแล้วจึงนำมาติดแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยด้วยวิธีการติดตั้งใกล้ผิวในด้านล่างของพื้นด้วยรูปแบบต่างๆ หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบหาค่ากำลังการรับน้ำหนักและระยะโก่งตัวที่เกิดขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อเปรียบเทียบการซ่อมแซมคอนกรีตเสริมเหล็กหลังถูกไฟไหม้โดยใช้แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ติดตั้งแบบใกล้ผิว (Near- Surface Mount)ในรูปแบบต่างๆ
2. เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมการรับแรงดัดของคอนกรีตเสริมเหล็กหลังถูกไฟไหม้ที่เสริมกำลังโดยใช้แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและติดตั้งแบบใกล้ผิว (Near Surface Mount)
3. เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังให้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับผลกระทบจากอัคคีภัย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. การติดตั้งอุปกรณ์และขั้นตอนการทดสอบเผาไฟ ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM E119[2]
2. การทดสอบการรับแรงกระทำที่อุณหภูมิปกติเท่านั้น
3. ชิ้นตัวอย่างที่ทำการเผามีอายุมากกว่า 28 วัน
4. คอนกรีตที่ใช้หล่อชิ้นตัวอย่างมีความหนาแน่นธรรมดาไม่มีสารผสมเพิ่ม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการติดตั้งที่เหมาะสมเพื่อพัฒนามาตรฐานในการติดตั้งแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบใกล้ผิวต่อไป
2. เข้าใจถึงรูปแบบการติดตั้งที่มีผลต่อกำลังการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโครงสร้างจริง
3. เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ ในการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังให้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับผลกระทบจากอัคคีภัย

บทที่ 2
งานวิจัยและทฤษฎีที่สำคัญ

ในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกจะเป็นการนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แบ่งเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับอัคคีภัย ซึ่งจะอธิบายถึงลักษณะต่างๆของคอนกรีตที่ถูกไฟเผา ทั้งก่อนและหลังซ่อมแซมด้วยวิธีต่างๆ ต่อมาจะเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยจะเสนอตั้งแต่วิธีการทดสอบต่างๆทั้งการทดสอบการดึง กำลังยึดเหนี่ยว จนไปถึงการประยุกต์ใช้แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในการนำไปใช้เสริมกำลัง สุดท้ายจะเป็นการเสนองานวิจัยที่เกี่ยวกับการเสริมกำลังแบบติดตั้งใกล้ผิว โดยจะอธิบายถึงวิธีการเสริมกำลังแบบนี้ว่ามีข้อดี-ข้อเสีย และ มีความแตกต่างจากการเสริมกำลังรูปแบบอื่นอย่างไร

ช่วงที่ 2 จะเป็นการเสนอทฤษฎีที่สำคัญและการนำแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยไปใช้ คุณสมบัติของคอนกรีตหลังการถูกเพลิงไหม้ มาตรฐานการทดสอบความสามารถทนไฟ ลักษณะต่างๆ ตั้งแต่กำลังรับน้ำหนัก ข้อดี-ข้อเสียของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยชนิดต่างๆ รวมถึงขั้นตอนวิธีการซ่อมแซม การเตรียมผิว และการตรวจสอบหลังจากซ่อมแซมแล้ว เป็นต้น

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับอัคคีภัย

ในปี ค.ศ. 1991 Bruce Ellingwood and T.D. Lin [3] ทำการศึกษากำลังรับแรงดัดและแรงเฉือนในองค์อาคารชนิดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้อัคคีภัย ในการทดลองได้ออกแบบตัวอย่างเพื่อศึกษาถึงผลของระยะหุ้มเหล็กเสริม,ชนิดของกราฟไฟ(Fire curve),โอกาสและความเป็นไปได้ที่องค์อาคารจะวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนขณะเกิดอัคคีภัย ผลจากการทดสอบแสดงว่าคานทั้งหมดเกิดการวิบัติเนื่องจากผลของแรงดัดทั้งสิ้นแม้ว่าคานทั้งหมดจะเกิดการแตกร้าวบริเวณฐานรองรับขึ้น ก่อนที่จะเกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดที่ช่วงกลางคานก็ตาม ผลการศึกษาสรุปได้ว่า ขณะที่อุณหภูมิของคานมีค่าสูงกำลังต้านทานแรงเฉือนของคานไม่น่าจะเป็นส่วนสำคัญที่ควบคุมการวิบัติของคาน ส่วนผลของระยะหุ้มเหล็กเสริมมีผลต่อการโก่งตัวของคานน้อยมาก และชนิดของกราฟไฟที่ใช้ในการจำลองสภาวะอัคคีภัยที่แตกต่างกันมีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในชิ้นส่วนคาน

ในปี ค.ศ. 2001 เจษฎา เกษมเศรษฐ์ และ หทัยรัตน์ มณีเทศ [4] ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังรับแรงอัด ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต ตัวอย่างทดสอบถูกเผาไฟด้วยช่วงเวลาที่แตกต่างกันตั้งแต่ 0 ถึง 2 ชั่วโมง สำหรับการเผาแท่งคอนกรีตทรงกระบอกใช้

เตาขนาดเล็กใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิในการเผาอยู่ในช่วง 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาสรุปได้ว่าคุณสมบัติทั้ง 3 ของคอนกรีตมีค่าลดลงอย่างมากตามระยะเวลาเผาไฟ

ในปี ค.ศ. 2001 ทรงเกียรติ หาญสันติ [5] ศึกษาผลของระยะเวลาที่เผาไฟ ที่มีต่อค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างที่ได้จากการเจาะทดสอบคอนกรีตหลังเผาไฟ รวมถึงค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมหลังเผาไฟ พฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเสริมก่อนและหลังถูกเผาไฟ พฤติกรรมการรับแรงเฉือนและแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังเผาไฟ และตรวจสอบความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเผาไฟด้วยการทดสอบแบบไม่ทำลาย ผลการทดสอบพบว่า

1) กำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเจาะทดสอบ มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่เผาไฟ และมีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีคลื่นอัลตราโซนิก

2) ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ เพราะสามารถป้องกันความร้อนจากไฟได้ โดยตัวอย่างที่มีระยะคอนกรีตหุ้ม 2.5 เซนติเมตร ที่เผาไฟไม่เกิน 90 นาที สามารถช่วยคงคุณสมบัติกำลังดึงคราก และกำลังดึงประลัยภายหลังเผาไฟให้ลดลงไม่เกิน 5% และยังพบอีกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นภายหลังเผาไฟไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก

3) กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตหลังถูกไฟเผา มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่เผาไฟ โดยกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กกลมจะเหลือไม่ถึง 50% หลังจากเผาไฟ 15 นาที และหลังจากเผาไฟ 60 นาทีเหล็กกลมแทบไม่เหลือกำลังยึดเหนี่ยวเลย สำหรับทุกระยะคอนกรีตหุ้มที่ศึกษา

4) กำลังรับแรงเฉือนของคานตัวอย่างที่ทดสอบมีแนวโน้มลดลงประมาณ 10% ทุกๆ 30 นาทีที่เผาไฟเมื่อเทียบกับกำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากข้อกำหนด ACI 318[6]

5) ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผาไฟไม่เกิน 60 นาที ค่าโมเมนต์ครากและโมเมนต์ประลัยไม่มีการเปลี่ยนแปลงในนัยสำคัญ แต่ที่ระยะเวลาในการเผาไฟ 90 นาทีค่าโมเมนต์ครากของคานตัวอย่างที่ทำการศึกษาลดลง 16% และโมเมนต์ประลัยมีค่าลดลง 15%

6) ดัชนีความเหนียวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทดสอบมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับระยะเวลาที่เผาไฟไม่เกิน 60 นาที

7) การประเมินค่ากำลังดึงที่หลงเหลือหลังการเผาไฟของเหล็กเสริม มีความสำคัญอย่างมากต่อความแม่นยำในการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในปี ค.ศ. 2012 ทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์ [7] ศึกษาผลกระทบของเพลิงไหม้เพื่อใช้ในการประเมินความเสียหายของคอนกรีต โดยวิเคราะห์ความแตกต่างของเวลาในการเผาซึ่งใช้มาตรฐาน ASTM E119เป็นแบบจำลองของไฟ จากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1.สี

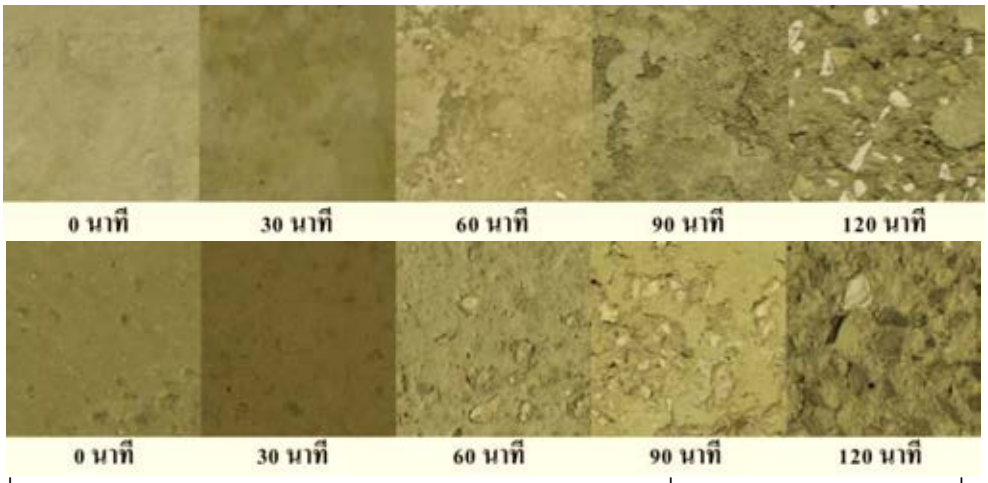
เมื่อเผาที่เวลา30และ60นาที ผิวของคอนกรีตด้านที่ถูกไฟเผาจะกลายเป็นสีชมพู/แดงซึ่งน่าจะเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของออกไซด์เหล็กในมวลรวมและเมื่อเผาไฟที่เวลา90และ120นาที พบว่าคอนกรีตมีสีซีดจางลงจนเป็นสีเทาและสีขาวตามลำดับดังภาพที่ 2-1

2.การหลุดล่อน

ที่เวลา30และ60นาทีตัวอย่างคอนกรีตทั้ง2กำลังไม่พบการหลุดล่อนที่ชัดเจน เมื่อเผาไปถึง90นาทีพบการหลุดล่อนที่เห็นได้อย่างชัดเจนซึ่งตัวอย่างที่มีกำลัง350กก./ซม.^{2}พบการหลุดล่อนที่มากกว่าตัวอย่าง240กก./ซม.^{2}ถึง4เท่าและเมื่อเผาไปถึง120นาที ความลึกของการหลุดล่อนก็มากขึ้นโดยชิ้นตัวอย่างที่มีกำลัง350กก./ซม.^{2}มีความลึกของการหลุดล่อนที่มากกว่าชิ้นตัวอย่างที่มีกำลัง240กก./ซม.^{2}

3.รอยร้าว

ชิ้นตัวอย่างที่มีกำลัง240กก./ซม.^{2} ไม่ปรากฏรอยร้าวให้เห็นมีเพียงการหลุดล่อนทั่งผิวหน้า ส่วนชิ้นตัวอย่างที่มีกำลัง350กก./ซม.^{2} เมื่อเผาไฟ90นาที เริ่มปรากฏรอยร้าวขนาด 0.1-0.5 มิลลิเมตร ส่วนตัวอย่างที่เผาไฟ120นาที มีการหลุดล่อนทั่วผิวหน้าจนไม่เห็นรอยร้าว

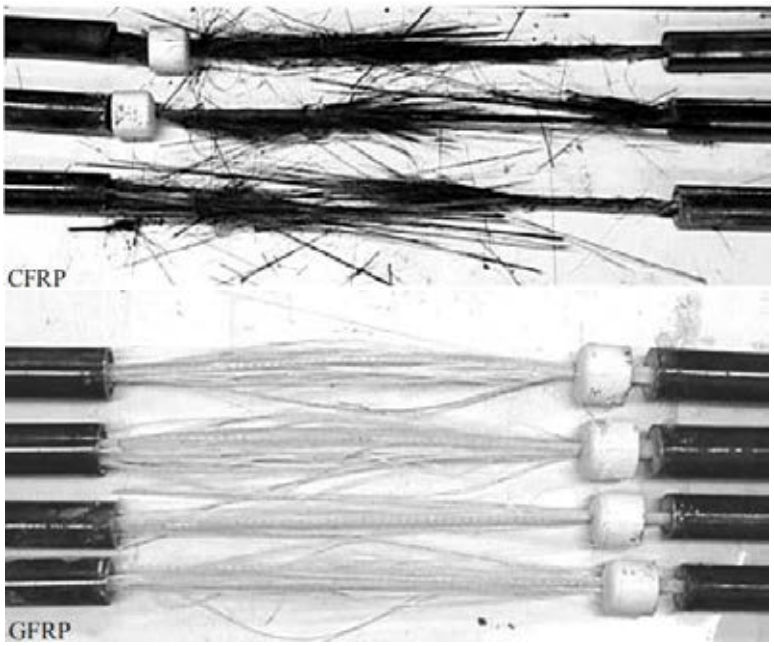


ภาพที่ 2-1 ลักษณะการวิบัติของคอนกรีตภายหลังถูกความร้อนที่เวลาต่างๆ ของคอนกรีตที่มีกำลังออกแบบ240ksc (บน)และ350ksc (ล่าง)[7]

2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ในปี ค.ศ. 2003 F.Micelli and A.Nanni [8] ได้พัฒนาวิธีการทดสอบกำลังรับแรงดึงของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยชนิดต่างๆ โดยมีลักษณะหน้าตัด ลักษณะพื้นผิว และอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นตัวแปรที่สนใจ ซึ่งจะมีการเตรียมอุปกรณ์ที่ติดตั้งกับแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยก่อนทำการทดสอบกล่าวคือ จะมีการพ่นทรายที่พื้นผิวของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและทำความสะอาดด้วยอะซิโตน จากนั้นจะนำมาเสียบเข้ากับท่อเหล็กที่มีขนาดและความยาวตามมาตรฐานหลังจากนั้นจึงเทสารเชื่อมประสาน(Expansive grout) ให้เต็มท่อ และทิ้งไว้72ชั่วโมงเพื่อให้พัฒนากำลังได้เต็มที่ เมื่อเตรียมตัวอย่างทดสอบเสร็จแล้วก็นำมาทดสอบโดยใช้เครื่อง UTM โดยติด strain gauges และ extensometer บันทึกน้ำหนักกระทำต่อการยืดตัว (load-displacement)และน้ำหนักกระทำต่อเวลา(load-time) ซึ่งได้ผลการทดสอบและคำแนะนำในการทดสอบแท่งพอลิเมอร์ ดังนี้

1.อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากกว่า 36(L/D>36) จะไม่มีผลต่อการทดสอบแต่ถ้าหากเพิ่มอัตราส่วนมากขึ้น โอกาสที่จะเจอจุดที่อ่อนแอมากขึ้น และอาจจะทำให้น้ำหนักกระทำที่จุดวิบัติต่ำลงได้ แต่สิ่งที่มีผลต่อการทดสอบคือลักษณะหน้าตัดและลักษณะพื้นผิว กล่าวคือตัวอย่างทดสอบที่มีหน้าตัดสี่เหลี่ยมและผิวเรียบ จะวิบัติแบบรูดออกจากท่อเหล็ก (slip failure) ซึ่งชิ้นตัวอย่างอื่นวิบัติแบบไม้กวาด (Broom-type failure) ดังภาพที่ 2-2



ภาพที่2-2 การวิบัติแบบไม้กวาด (Broom-type failure) ของCFRP(บน) และ GFRP Rod(ล่าง)

2.น้ำหนักกระทำสูงสุดคือ156 กิโลนิวตัน ของการทดสอบกับแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP Rod) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.53 มม. ซึ่งจะสามารถทำนายและเลือกเครื่องทดสอบที่เหมาะสมในการทดสอบต่อไปได้

3.ลักษณะของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและลักษณะของท่อเหล็กที่แนะนำเพื่อไม่ให้เกิดการเลื่อนไถลและเกิดการครากของท่อเหล็กที่แนะนำตามตารางที่2-1

ตารางที่ 2-1 ลักษณะของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและลักษณะของท่อเหล็กที่แนะนำ[8]

ชนิดของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (มม.)	ขนาดของท่อ		ทำนายแรงดึงสูงสุด (กิโลนิวตัน)	ระยะยืดเหนี่ยว (มม.)
		ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกขั้นต่ำ (มม.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในขั้นต่ำ (มม.)		
CFRP	4	42	3.5	15-45	250
	6	42	4.8	45-80	300
	8	42	4.8	80-140	350
	10	48	5.0	140-180	450
GFRP	6	42	3.5	20-40	250
	8	42	4.8	40-60	300
	10	42	4.8	60-90	300
	12	42	4.8	90-120	350
	14	48	5.0	120-165	400

ในปี ค.ศ. 2007 กฤษฎา ปานเกษม [9] ได้นำเสนอผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดคานคอนกรีตจำนวน 5 คาน ที่มีการออกแบบเสริมกำลังรับแรงดึงและแรงอัดด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ซึ่งมีขนาดหน้าตัดคานเท่ากันทั้งหมด คานทดสอบแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มแรกเสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) รับแรงดึงอย่างเดียวกลุ่มที่สองใช้แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว รับแรงอัดและแรงดึงในคาน ส่วนกลุ่มที่สามมีการเสริมกำลังเหมือนในกลุ่มที่สอง แต่มีความแตกต่างของระยะห่างเหล็กลูกตั้ง เพื่อสังเกตผลของการโอบรัดของเหล็กลูกตั้งที่มีต่อแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วรับแรงอัด ความแตกต่างของหน่วยแรงและหน่วยการยืดหดตัวที่เกิดขึ้นในแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วรับแรงอัดมีผลต่อกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตในคานทั้งสามกลุ่ม ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า

1.การใช้แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเสริมกำลังส่วนรับแรงอัดทำให้คานมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคานที่ไม่มีการเสริมกำลังส่วนรับแรงอัด

2.การใช้แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเสริมกำลังส่วนรับแรงอัดมีผลช่วยให้คานมีการโก่งตัวลดลง

3. คานเมื่อมีการเสริมกำลังส่วนรับแรงอัดตำแหน่งของแนวแกนสะเทินขยับสูงขึ้นพื้นที่ส่วนรับแรงอัดของคานลดลงและหน่วยการยืดหดตัวในท่อนเสริมกำลังรับแรงดึงเพิ่มสูงขึ้นซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีผลต่อรูปแบบการวิบัติและพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีต

ในปี ค.ศ. 2012 So Jeong Han *et al*. [10] ได้ทำการศึกษาถึงกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิดและแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนกับคอนกรีต โดยงานวิจัยนี้ ได้ใช้แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.2 มม.และ10 มม.และแท่งเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. ทำการทดสอบแบบการดึงโดยตรง(direct pull-out bond test)กับคอนกรีตที่มีกำลังอัด 340 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยจะจัดให้มีระยะยึดเหนี่ยวต่างๆกันคือ 5,7,9และ11เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า

1.จากตัวอย่างทั้งหมด33ตัว วิบัติด้วยการรูดออกของแท่งวัสดุเสริมเส้นใยโดยแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นยึดเหนี่ยวกับการเลื่อนไถล (slip) นั้นในช่วงแรกความเค้นยึดเหนี่ยวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อถึงจุดสูงสุดก็จะลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเลื่อนไถลของแท่งวัสดุเสริมเส้นใย หลังจากนั้นความเค้นยึดเหนี่ยวจะเหลือแค่ประมาณ 15%-30% ของความเค้นสูงสุด

2.กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจาก การกระจายตัวที่ไม่เป็นเส้นตรงของความเค้นยึดเหนี่ยว บนพื้นผิวสัมผัสระหว่างแท่งวัสดุเสริมเส้นใยกับคอนกรีต

3.ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน อัตราส่วนระหว่างกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิดต่อแท่งเหล็ก มีค่า0.79 และ0.68 ตามลำดับ

2.1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการเสริมกำลังแบบติดตั้งใกล้ผิว

ในปี ค.ศ. 1999 Xiang Yan *et al*. [11] ได้ศึกษาพฤติกรรมของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ที่นำมาใช้เสริมกำลังด้วยวิธีติดตั้งใกล้ผิวโดยจะแบ่งงานออกเป็น2ขั้นตอน ขั้นแรกจะเป็นการทดสอบกำลังรับแรงดึง ซึ่งจะใช้การทดสอบแบบเดิมที่ใช้หัวกริบหนีบแท่งเหล็กแล้วดึงไม่ได้ เนื่องจากคุณสมบัติในการรับแรงอัดของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในแนวตั้งฉากกับเส้นใยมีค่าน้อยมาก เส้นใยอาจจะขาดก่อนถึงจุดวิบัติจริง ดังนั้นจึงต้องมีการเตรียมแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

โดยใช้ ท่อเหล็กหุ้มที่ปลาย2ด้าน แล้วเทอีพ๊อกซี่ลงไปเหมือนในการทดสอบของ F.Micelli และ A.Nanni [8] แต่จะมีตัวแปรเพิ่มเติมคือเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (8mm.และ10mm.) ชนิดของพอลิเมอร์(Z-series, G-series, T-series และ S-series) และชนิดของผิว (เรียบและขรุขระ) หลังจากนั้นจึงเข้าเครื่องทดสอบกำลังรับแรงดึงแล้วบันทึกผล การทดสอบที่2เป็นการทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวของการติดตั้งแบบใกล้ผิวโดยหล่อคอนกรีตทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าหลังจากนั้นจึงนำมาเซาะร่องแล้วเทอีพ๊อกซี่ให้มีระยะยึดเหนี่ยวแตกต่างกัน คือ 2นิ้ว ,4นิ้ว และ6นิ้ว หลังจากนั้นจึงทดสอบแบบการดึงโดยตรง จากผลการทดสอบพบว่า ในการทดสอบกำลังรับแรงดึงนั้น มีลักษณะการวิบัติ3แบบคือ วิบัติแบบดึง(tensile failure), วิบัติแบบรูดออก (pullout failure)และวิบัติแบบผสมระหว่างแรงดึงและแรงดัด โดยการวิบัติแบบที่1เป็นสิ่งที่ต้องการ แต่การวิบัติแบบที่2นั้นเกิดจากระยะเวลาการบ่มของวัสดุประสานยังไม่นานพอซึ่งการบ่มควรต้องใช้เวลาอย่างน้อย72ชั่วโมงส่วนการวิบัติแบบที่3อาจเกิดจากท่อเหล็กบางเกินไปที่ให้เกิดการครากและหดตัวไปด้านใดด้านหนึ่งจนทำให้ในขณะที่ดึงนั้นแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยวางตัวเยื้องศูนย์กับแรงกระทำ ทำให้เกิดการงอตัวและเกิดแรงดัดในที่สุด ส่วนผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวนั้น พบว่า น้ำหนักกระทำประลัย(ultimate load) เพิ่มขึ้นในช่วงระยะยึดเหนี่ยวจาก2นิ้วเป็น 4นิ้ว แต่เพิ่มขึ้นน้อยมากในช่วงเปลี่ยนระยะยึดเหนี่ยวจาก4นิ้วเป็น6นิ้ว แต่ลักษณะการวิบัติของระยะยึดเหนี่ยวจาก2นิ้วและ4นิ้วเป็นการวิบัติที่คอนกรีตส่วนระยะยึดเหนี่ยว6นิ้วมีลักษณะการวิบัติที่ผิวสัมผัสระหว่างแท่งพอลิเมอร์เริมเส้นใยกับอีพ๊อกซี่ ซึ่งเป็นเพราะว่าพื้นที่คอนกรีตที่ต้านทานแรงยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้นเมื่อระยะยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น

ในปี ค.ศ.2001 Laura De Lorenzis and Antonio Nanni [12] ได้ศึกษาการเสริมกำลังด้วยวิธีติดตั้งใกล้ผิว เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนซึ่งจะมีทั้งการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวซึ่งใช้คานรูปตัวทีหงายที่มีแต่คอนกรีตโดยไม่ได้เสริมเหล็กและติดตั้งข้อหมุนไว้ส่วนบนและตัดคอนกรีตในส่วนล่างจากนั้นเซาะร่องและเสริมกำลังด้วยวิธีติดตั้งใกล้ผิวในด้านล่าง ตามความยาวของคาน โดยมีระยะยึดเหนี่ยวต่างๆกันคือ 6เท่า,12เท่า และ18เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและในระยะยึดเหนี่ยว12เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางนั้นก็จัดให้มีขนาดของร่อง(Groove)3ขนาดคือ 0.5นิ้ว 3/4นิ้ว และ1นิ้ว แล้วจึงนำมาเข้าเครื่องทดสอบแรงดัด ก็จะเกิดแรงดึงที่ใต้คาน แล้วบันทึกผล ส่วนการทดสอบการเสริมกำลังรับแรงเฉือนจะใช้คานรูปตัวทียาว3เมตร ที่มีการติดตั้งเหล็กขนาด 28.7 มม. 2แท่งที่ออกแบบมาแล้วว่าให้วิบัติด้วยแรงเฉือนจำนวน 3 คานโดยคาน B1 ไม่ได้เสริมกำลังเพิ่มส่วนคาน B2และ B3ได้ทำการเสริมกำลังเพิ่มด้วยวิธีติดตั้งใกล้ผิวโดยใช้แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วตัดให้มีความยาวเท่ากับความสูงของเอวคานมาติดกับเอวคานที่เซาะร่องไว้แล้วด้วยระยะห่าง (spacing) 7นิ้วและ5นิ้ว ตามลำดับ จากผลการทดสอบส่วนของการยึด

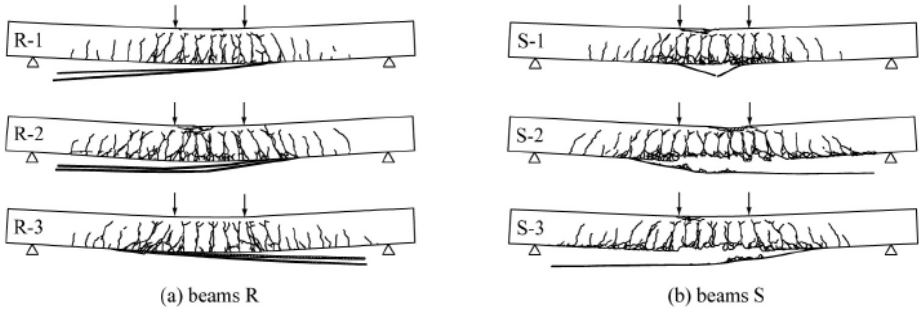
เหนี่ยวนั้น ได้ผลว่า 4ใน5ของตัวอย่างทั้งหมด วิบัติด้วยการแตกออก(splitting)ของอีพ๊อกซี่ ซึ่งเป็นผลจากความหนาและกำลังรับแรงดึงของอีพ๊อกซี่เอง ในส่วนของผลกระทบจากระยะยึดเหนี่ยวนั้น เมื่อยิ่งเพิ่มระยะ กำลังรับน้ำหนักสูงสุดก็ยิ่งเพิ่มขึ้น โดยมีการกระจายตัวของความเครียดค่อนข้างคงที่ เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้น และในส่วนของผลกระทบจากขนาดร่องนั้น น้ำหนักกระทำสูงสุดเพิ่มขึ้น15%และ8% เมื่อขนาดร่องเพิ่มขึ้นจาก0.5นิ้วเป็น3/4นิ้วและจาก3/4นิ้วเป็น1นิ้วตามลำดับ ซึ่งการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงที่2นั้น อาจจะมาจากรูปแบบการวิบัติที่ต่างกันโดยอาจเกิดจากเมื่อความหนาของอีพ๊อกซี่ที่เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถต้านทานการแตกออกของคอนกรีตได้ดีขึ้น แต่เมื่อความหนามากขึ้นไปอีก ทำให้การวิบัติเปลี่ยนจากการแตกออกของอีพ๊อกซี่เป็นการแตกออกของคอนกรีตรอบๆแทน ส่วนการทดสอบคานที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนนั้นมีรูปแบบของการวิบัติของคานทั้งหมดจะเป็นการแตกออกของอีพ๊อกซี่ที่หุ้มรอบๆ โดยคาน B2และB3 มีกำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นจากคานควบคุม28%และ41% ตามลำดับ ซึ่งหมายถึง ถ้ายิ่งเพิ่มจำนวนของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเข้าไป(ระยะห่างแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยลดลง) กำลังรับน้ำหนักก็ยิ่งเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าถ้ายิ่งลดระยะห่างของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย กำลังรับน้ำหนักก็ยิ่งเพิ่มขึ้น

ในปี ค.ศ.2005 N. Kishi *et al*. [13] ได้ศึกษาผลกระทบและการหลุดลอกของการเสริมกำลังด้วยวิธีติดตั้งใกล้ผิว โดยการเปรียบเทียบระหว่างแท่งพอลิเมอร์กับแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิดโดยจะเปลี่ยนขนาดหน้าตัดและความกว้างของแท่งพอลิเมอร์กับแผ่นพอลิเมอร์เป็น 3 ค่าโดยควบคุมให้ความแข็งแกร่งแนวแกนเท่ากัน โดยทดสอบทั้งหมด6คาน แต่ละคานมีขนาด 150x250x3000 มิลลิเมตร และทำการให้น้ำหนักกระทำ2จุด เพื่อให้เกิดแรงดัดที่คาน จากนั้นจึงวัดค่าน้ำหนักกระทำ การโก่งตัว และการกระจายตัวของความเครียด ซึ่งสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

1) คานที่เสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีการวิบัติโดยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยหลุดล่อนออก แต่คานที่เสริมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมี 1ตัวที่วิบัติโดยการขาดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยลักษณะการวิบัติจะเป็นดังภาพที่ 2-3

2) ในกรณีที่ค่าความแข็งแกร่งแนวแกนเท่ากัน ผลของการเสริมกำลังด้วยวิธีใกล้ผิวของแท่งพอลิเมอร์และแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่าใกล้เคียงกัน

3) การกระจายตัวของความเครียดในคานที่เสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีแนวโน้มสูงกว่าคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งน่าจะหมายความว่าแรงทั้งหมดที่ทำให้เกิดรอยแตกแนวทแยงจะกระจายไปแค่บางจุดของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

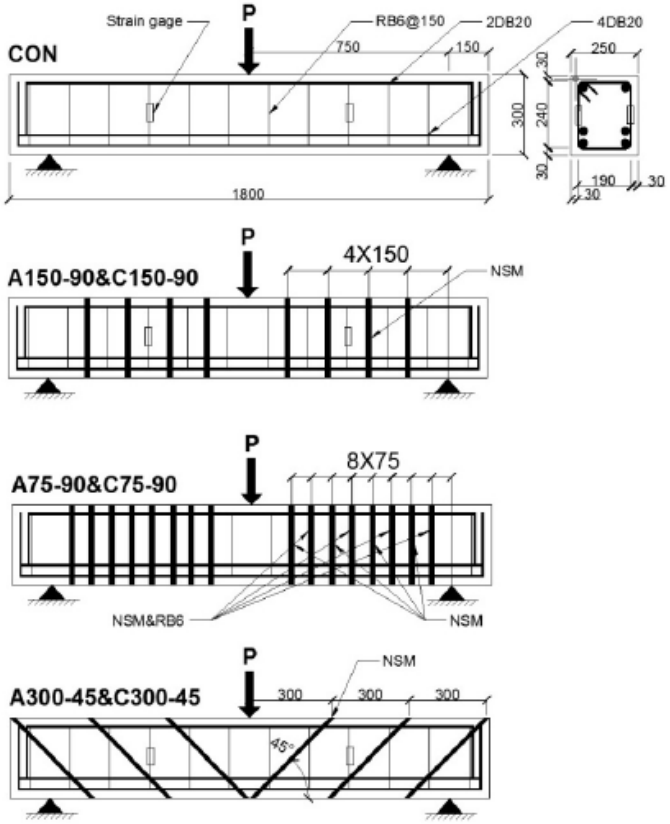


ภาพที่ 2-3 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิด(a) และแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิด(b)

ในปี ค.ศ. 2007 Eliane K.CASTRO *et al*. [14] ศึกษาถึงการเสริมกำลังรับแรงดัดในคานรูปตัวทีด้วยการติดตั้งแบบใกล้ผิว ซึ่งมุ่งเน้นการศึกษาไปที่กำลังรับน้ำหนักที่จุดวิบัติ โดยมีคานตัวอย่างทั้งหมด 12 ตัวอย่าง แบ่งออกเป็นคานควบคุม 2 ตัวอย่าง และคานเสริมกำลัง 5แบบแบบละ 2 ตัวอย่าง โดยการเสริมกำลังในกลุ่มแรกจะใช้ CFRP strips ขนาดหน้าตัด2x16 มิลลิเมตร จำนวน3แผ่นมาติดแบบติดตั้งใกล้ผิว ในกลุ่ม2 ใช้แท่ง CFRP เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน1แท่งมาติด กลุ่มที่3 ใช้แท่งGFRP ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 มิลลิเมตรจำนวน 2แท่งมาติด กลุ่มที่4 ใช้แผ่น CFRP 2แผ่นมาติดแบบเชื่อมประสานภายนอก โดยการติดเป็น2ชั้น ส่วนกลุ่มสุดท้ายใช้เหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรจำนวน1แท่ง มาติดด้วยวิธีการติดตั้งใกล้ผิว โดยส่วนที่เชื่อมโยงให้การติดตั้งทั้งหมดมีความคล้ายกันคือ การใช้ขนาดหน้าตัดที่คูณด้วยอิลาสติกโมดูลัสของแต่ละแบบให้มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งคานทั้งหมดเป็นคานบนจุดรองรับธรรมดา (simple beam) ความยาวช่วงคาน 400 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบ 4 จุด (4-Point Load) จากผลการทดสอบพบว่า คานที่เสริมกำลังในกลุ่มแรกและกลุ่มที่3 วิบัติด้วยการหลุดล่อนของคอนกรีตหุ้ม คานที่เสริมกำลังในกลุ่มที่2 วิบัติด้วยการขาดของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย คานที่เสริมกำลังในกลุ่มที่4 วิบัติด้วยการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยใกล้จุดรองรับ ส่วนคานที่เสริมกำลังในกลุ่มสุดท้าย วิบัติด้วยการครากของเหล็กเสริมกำลัง จากการวัดค่ากำลังการรับน้ำหนักจนถึงจุดวิบัติ ได้ว่าคานที่เสริมกำลังในกลุ่มที่ 2 สามารถรับกำลังได้มากที่สุดในบรรดาคานที่เสริมกำลังโดยมีค่ากำลังรับน้ำหนักวิบัติมากกว่าคานในกลุ่มสุดท้าย(ใช้เหล็กมาติดตั้ง) ประมาณ 32% และเมื่อพิจารณาคานที่มีกำลังรับน้ำหนักมากที่สุด ที่วิบัติโดยการวิบัติแบบดัด คานในกลุ่มที่2ก็มีกำลังมากกว่าคานที่มีการวิบัติแบบเดียวกันประมาณ 12%

ในปี ค.ศ. 2013 Pongsak Wiwatrojanagul [1] ได้พัฒนาเทคนิคในการเสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ติดตั้งด้วยวิธีใกล้ผิว เพื่อเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคานในรูปแบบต่างๆกัน โดยจะแบ่งงานออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นแรก จะเป็นการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแท่ง

พอลิเมอร์เสริมเส้นใยกับคอนกรีตเพื่อหาขนาดร่องที่เหมาะสมในการติดตั้งด้วยวิธีใกล้ผิว โดยใช้ขนาดร่อง2ขนาดคือ1.5เท่าและ2เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และใช้เส้นใย 2 ชนิดคือ อะรามิดไฟเบอร์ และ คาร์บอนไฟเบอร์ ในการทดสอบ หลังจากนั้นจึงนำมาติดตั้งแบบวิธีใกล้ผิวกับคอนกรีตสี่เหลี่ยมขนาด40x30x20เซนติเมตร ซึ่งมีระยะยึดเหนี่ยว10 เซนติเมตร ขั้นตอนที่2จะเป็นการทดสอบการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคานที่ติดตั้งแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยด้วยวิธีติดตั้งใกล้ผิว3แบบคือ1)เสริมด้วยระยะห่าง 75 มิลลิเมตรและทำมุม 90 องศา 2)เสริมด้วยระยะห่าง150 มิลลิเมตรและทำมุม 90องศา 3)เสริมด้วยระยะห่าง150มิลลิเมตรและทำมุม 45 องศา โดยใช้ทั้งอะรามิดไฟเบอร์ และ คาร์บอนไฟเบอร์ ในการทดสอบ ดังภาพที่2-4



ภาพที่2-4 ลักษณะคานที่ใช้ในการทดสอบ

ผลการทดสอบพบว่า ขนาดของร่องที่เหมาะสมคือ 1.5เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งวัสดุเสริมเส้นใย($1.5d_b$) ซึ่งจะมีผลดีทั้ง3ด้านคือ มีกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและอีพ๊อกซี่มากกว่า มีความแข็งแกร่งมากกว่า และใช้อีพ๊อกซี่น้อยกว่าขนาดของร่องเป็น2เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งวัสดุเสริมเส้นใย และในการเสริมกำลังของคานยังได้ผลที่ว่า การเสริมกำลังแบบติดตั้งใกล้ผิว สามารถเพิ่ม กำลังรับแรงเฉือนได้ ถึง 23%-41%โดยคานที่รับกำลังได้มากที่สุด

ในการวิบัติแบบเฉือนคือคานที่ติดตั้งวิธีที่ 3 โดยใช้อะรามิดไฟเบอร์ (คานที่รับกำลังได้มากที่สุด เพิ่มขึ้น 41% คือติดตั้งแบบวิธีที่ 3 แต่วิบัติแบบ การดัด) คือเพิ่มขึ้น 29%เมื่อเทียบกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง อีกทั้งคานที่เสริมกำลังจะมีระยะการโก่งตัวน้อยลงอีกด้วย และยังได้ข้อสรุปเพิ่มขึ้นอีกว่า การเสริมกำลังแบบถี่ๆไม่ได้ช่วยให้กำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้น เพราะเป็นการทำให้คอนกรีตที่อยู่ระหว่างแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีหน้าตัดน้อยลง จึงทำให้คอนกรีตนั้นหลุดออกง่ายกว่าเว้นให้ห่างๆกัน

2.2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับเพลิงไหม้

2.2.1 มาตรฐานการทดสอบอัตราทนไฟขององค์อาคาร

คอนกรีตเมื่อถูกเพลิงไหม้จะส่งผลให้กำลังของคอนกรีตมีค่าลดลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาและความรุนแรงของไฟที่กระทำต่อคอนกรีต ซึ่งถ้ามีความรุนแรงมากก็จะส่งผลถึงความมั่นคงของอาคารก่อสร้างได้ ดังนั้นเพื่อก่อให้เกิดความปลอดภัยในการใช้อาคารก่อสร้างและเป็นไปตามมาตรฐานในการก่อสร้างอาคาร จึงได้มีการร่างกฎกระทรวงขึ้นมาภายใต้ความรับผิดชอบของกรมโยธาธิการ สังกัดกระทรวงมหาดไทย

จากกฎกระทรวงฉบับที่ 48(2540) สามารถสรุปอัตราการทนไฟของอาคารสูง อาคารขนาดใหญ่พิเศษ และอาคารขนาดใหญ่ ได้ดังนี้

1. โครงสร้าง เสา และ คาน มีอัตราทนไฟ ไม่น้อยกว่า 3 ชั่วโมง
2. พื้นไม่น้อยกว่า 2 ชั่วโมง
3. บันไดที่ไม่ใช่บันไดหนีไฟไม่น้อยกว่า 1 ชั่วโมง
4. บันไดหนีไฟ ไม่น้อยกว่า 2 ชั่วโมง

เทียบเท่าคอนกรีตหนาอย่างน้อย 10 ซม. และบันไดหนีไฟสำหรับอาคารเก่า (กฎกระทรวงฉบับที่ 47) ก็เพียงแต่ ระบุให้ปิดล้อมบันไดด้วยพอลิเมอร์ที่ไม่ติดไฟ ซึ่งในทางปฏิบัติจะใช้อัตราทนไฟไม่น้อยกว่า 1 ชั่วโมง และสามารถใช้ผนังยิปซั่ม ซึ่งมีน้ำหนักเบาในการปิดล้อมบันไดได้ ตามมาตรฐานสากลการปิดล้อมบันไดจะต้องมีอัตราการทนไฟอย่างน้อย 2 ชั่วโมง ส่วนห้องเครื่องก็จะมีอัตราการทนไฟที่แตกต่างกันไป

ต่อมาภายหลังได้ออกกฎกระทรวงฉบับที่ 60 พ.ศ. 2549 โดยกำหนดให้โครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก หรือคอนกรีตอัดแรงที่มีขนาด หรือความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม หรือคอนกรีตหุ้มเหล็กน้อยกว่าที่กำหนดไว้จะต้องใช้วัสดุอื่นหุ้มเพิ่มเติม หรือต้องป้องกันโดยวิธีอื่นเพื่อช่วยทำให้เสาหรือคานมีอัตราการทนไฟไม่น้อย

กว่า 3 ชั่วโมงและตงหรือพื้นต้องมีอัตราการทนไฟไม่น้อยกว่า 2 ชั่วโมง โดยจะต้องมีเอกสารรับรองอัตราการทนไฟจากสถาบันที่เชื่อถือได้ประกอบการขออนุญาต

มาตรฐาน ASTM E119ได้นิยามความสามารถทนไฟขององค์อาคารไว้ว่า เป็นเวลาที่องค์อาคารนั้นถึงจุดสิ้นสุดสภาพการทนไฟประเภทใดประเภทหนึ่ง โดยจุดสิ้นสุดความสามารถทนไฟของแผ่นพื้นมี 3 ประเภทดังนี้

1. องค์อาคารวิบัติภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่กระทำ สำหรับองค์อาคารชนิดคอนกรีตอัดแรง หมายถึง ค่าอุณหภูมิเหล็กเสริมอัดแรงในหน้าตัดสูงกว่า 427 องศาเซลเซียส สำหรับองค์อาคารที่ออกแบบให้รับน้ำหนักบรรทุกร่วม ให้พิจารณาค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเหล็กเสริมในหน้าตัดสูงกว่า 593 องศาเซลเซียสร่วมด้วย
2. มีการแพร่ของความร้อนไปยังผิวด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟจนส่งผลให้เกิดการลุกไหม้ของเศษฝ้ายหรือสำลี
3. อุณหภูมิบนผิวด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟมีค่าเฉลี่ยสูงขึ้น 139 องศาเซลเซียสจากอุณหภูมิปกติ

2.2.2 แนวความคิดเกี่ยวกับปริมาณไฟ (Fire Load Concept)

นักวิจัยชาวอเมริกันชื่อ Ingberg [15] ได้เสนอความคิดในการสร้างเส้นโค้งมาตรฐานไฟโดยเรียกว่า“แนวความคิดเกี่ยวกับปริมาณไฟ (Fire Load Concept)”

แนวความคิดเกี่ยวกับปริมาณไฟมีข้อสมมติฐานที่สำคัญดังนี้

1. ความทนไฟขององค์อาคาร ขึ้นอยู่กับ “ความรุนแรงของไฟ” เพียงอย่างเดียวเท่านั้นความรุนแรงของไฟสำหรับอาคารหรือเตาไฟที่ใช้ในการทดสอบซึ่งลอกเลียนแบบไฟจริงๆ นั้นก็คือพื้นที่ใต้กราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลา
2. ความรุนแรงของไฟ ขึ้นอยู่กับความเข้มของปริมาณไฟอย่างเดียวเท่านั้น
3. ข้อสมมติฐานดังกล่าวนี้ไม่ได้พิจารณาถึงปัจจัยอื่นๆเช่น พื้นที่ของช่องเปิด ชนิดและน้ำหนักของเชื้อเพลิง เพราะปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อความรุนแรงของไฟน้อยกว่าเมื่อเทียบกับความเข้มของปริมาณไฟ

2.2.3 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับความรุนแรงของไฟ (Basic Theory of Fire Severity)

ความรุนแรงของไฟที่เกิดขึ้นในอาคารจะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ คือเชื้อเพลิงหรือวัสดุที่ติดไฟได้ในอาคารนั้น และพื้นที่ของช่องเปิดภายในอาคาร แต่ปัจจัยทั้งสองนี้สามารถแปรเปลี่ยนได้ และไม่สามารถที่จะกำหนดให้ตายตัวได้ว่าในอาคารนั้นๆจะมีค่าเป็นเท่าใดดังนั้นการที่จะกำหนดความรุนแรงของไฟจึงจำเป็นต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับอุณหภูมิของไฟที่เวลาต่างๆ ก็คือความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลานั้นเอง

ความรุนแรงของไฟคือพลังงานความร้อนที่สามารถทำลายคุณสมบัติในการต้านทานไฟ และความทนทานไฟของวัสดุ พลังงานความร้อนในที่นี้ก็คือพื้นที่ใต้เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลานั้นเอง ซึ่งสอดคล้องกับแนวความคิดเกี่ยวกับปริมาณไฟที่ว่าความรุนแรงของไฟก็คือพื้นที่ใต้เส้นโค้งระหว่างอุณหภูมิกับเวลา เนื่องจากเส้นโค้งมาตรฐานระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของมาตรฐาน ASTM E119 สามารถแปลงให้อยู่ในรูปของมาตรฐานได้ โดยการกำหนดพื้นที่ใต้เส้นโค้งมาตรฐานให้มีค่าเท่ากันกับเส้นโค้งของไฟจริงๆ

2.2.4 เส้นโค้งมาตรฐานระหว่างอุณหภูมิกับเวลา

ASTM E119 ได้เสนอเส้นโค้งมาตรฐานระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่มีความเข้มของปริมาณไฟใกล้เคียงกับไฟที่เกิดขึ้นจริงๆสำหรับเป็นมาตรฐานของการทนไฟสำหรับชิ้นส่วนวัสดุก่อสร้าง โดยสามารถเขียนเป็นสมการที่11 ได้ว่า

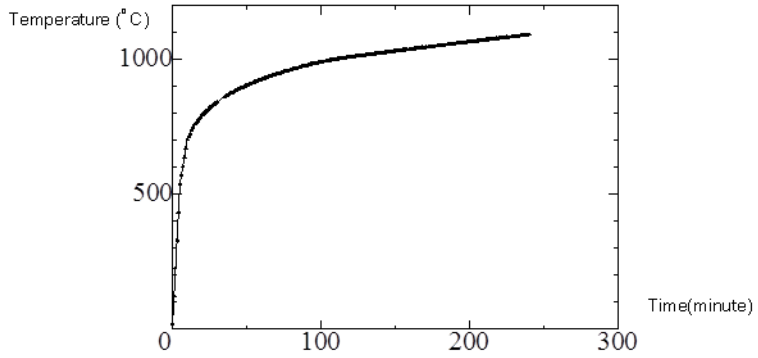
$$T = 750\left(1 - e^{-3.79553\sqrt{t_h}}\right) + 170.41\sqrt{t_h} + T_0 \qquad (1)$$

โดยที่ T = อุณหภูมิภายในเตาเผาที่เวลา t (องศาเซลเซียส)

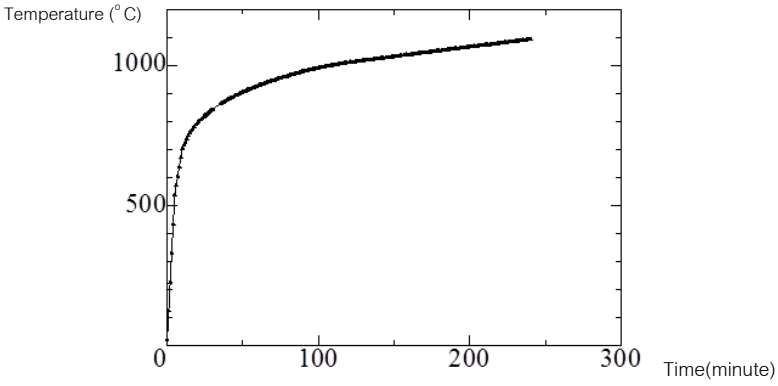
T_0 = อุณหภูมิ ณ เวลาเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)

t_h = เวลานับตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบ (ชั่วโมง)

ซึ่งในประเทศไทยเองก็มีมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุสาหกรรม ในด้านการทดสอบความทนไฟ-ชิ้นส่วนต่างๆ ของโครงสร้างอาคาร มอก.1334-2539[16] ก็ได้แสนอเส้นโค้งมาตรฐานเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วจะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันมากดังแสดงในภาพที่ 2-5และภาพที่2-6



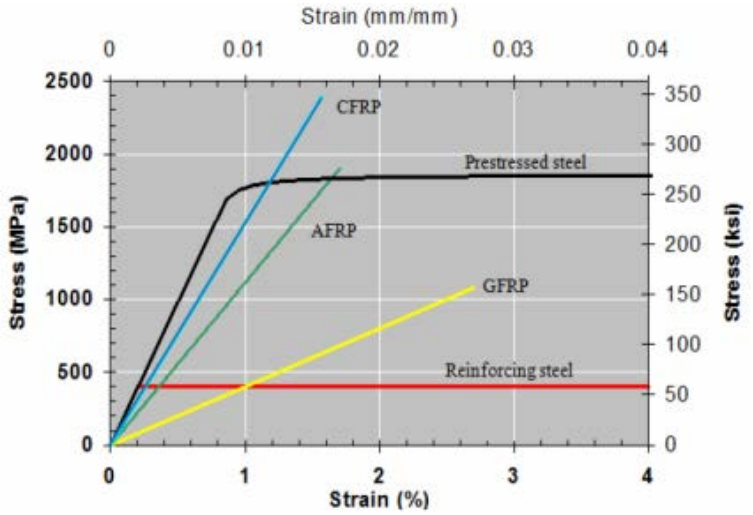
ภาพที่ 2-5 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ ASTM E119-98



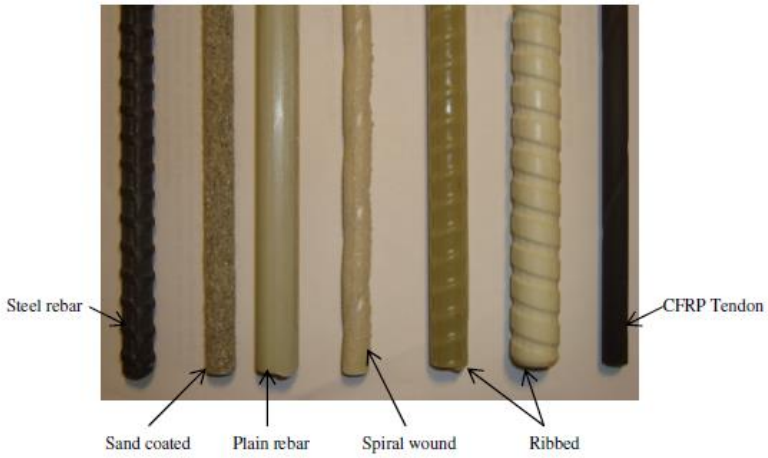
ภาพที่ 2-6 เส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของ มอก. 1334-2539[16]

2.3 ชนิดและคุณสมบัติของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยก็คือวัสดุคอมโพสิต(Composite) หรือพอลิเมอร์เมทริกซ์ที่เสริมกำลังด้วยเส้นใยชนิดหนึ่ง โดยมีหลายแบบขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยที่เสริมเข้าไป โดยมีทั้งแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) เส้นใยคาร์บอน (CFRP) เส้นใยเคฟลาร์หรืออะรามิด (AFRP) โดยเส้นใยแต่ละชนิดก็จะมีคุณสมบัติต่างๆกันดังในภาพที่ 2-7 [17] แต่คุณสมบัติที่เหมือนกันคือมีคุณสมบัติเป็นเส้นตรง (Linearly-Elasticity) กล่าวคือ เมื่อรับแรงดึงจะยืดตัวไปเรื่อยๆจนวิบัติโดยไม่เกิดจุดคราก (yielding point)



ภาพที่2-7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของเส้นใยแต่ละชนิด



ภาพที่2-8 ลักษณะผิวของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบต่างๆ [18]

ความแตกต่างอีกชนิดของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคือลักษณะพื้นผิว โดยมีทั้ง พ่นด้วยทราย (Sand coated),ผิวเรียบ(Plain rebar),บิดเป็นเกลียว(Spiral wound),เป็นข้อปล้อง (Ribbed) ฯลฯ ดังภาพที่ 2-8 ขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้

ข้อดีอีกหลายชนิดของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยยังมีอีกหลายข้อ กล่าวคือ

1. สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีมาก
2. มีน้ำหนักเบาเพียง 25% ของเหล็กเมื่อมีขนาดเท่ากัน
3. อัตราส่วนระหว่างกำลังรับน้ำหนักต่อน้ำหนักตัวมันเองมีค่าสูงมาก
4. กำลังยืดเหนี่ยวมีค่าสูง

2.4 คุณสมบัติทางกลของกำลังยึดเหนี่ยว

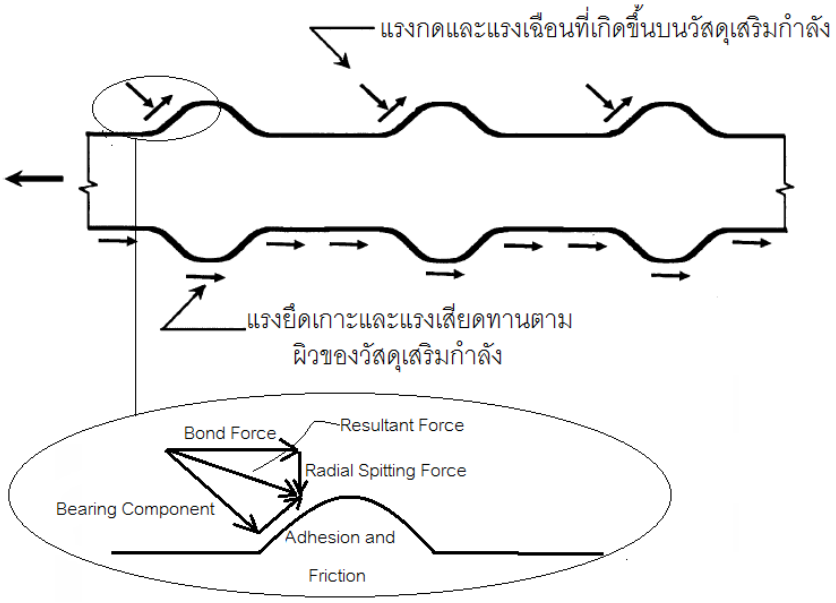
ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมกำลังให้เหมาะสมนั้น จำเป็นจะต้องให้การถ่ายแรงระหว่างคอนกรีตกับวัสดุเสริมกำลังเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยการถ่ายแรงนั้นประกอบด้วย 3 ลักษณะคือ [17]

1.แรงยึดเหนี่ยวทางเคมีระหว่างคอนกรีตกับวัสดุเสริมกำลัง

2.แรงเสียดทานที่เกิดจากผิวสัมผัสระหว่างวัสดุเสริมกำลังกับคอนกรีตโดยรอบ

3.การยึดเหนี่ยวทางกลที่เกิดจากลักษณะผิวของวัสดุเสริมกำลัง

ซึ่งแรงทั้ง3นั้นสามารถรวมกันแบบเวคเตอร์จะได้แรงลัพธ์ ดังภาพที่ 2-9 แสดงลักษณะของการถ่ายแรงระหว่างคอนกรีตกับวัสดุเสริมกำลัง



ภาพที่ 2-9 ลักษณะของการถ่ายแรงระหว่างคอนกรีตกับวัสดุเสริมกำลัง

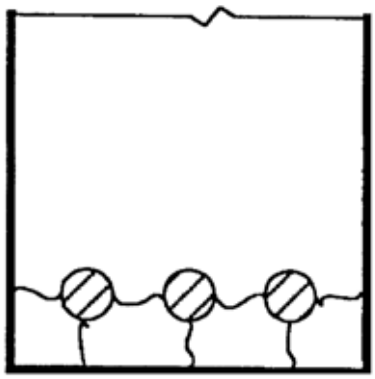
2.4.1 ลักษณะของการวิบัติ

ลักษณะของการวิบัติที่เกิดขึ้นจากกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างแท่งพอลิเมอร์ที่ใช้เสริมกำลังกับคอนกรีตนั้นมี2แบบด้วยกันคือ

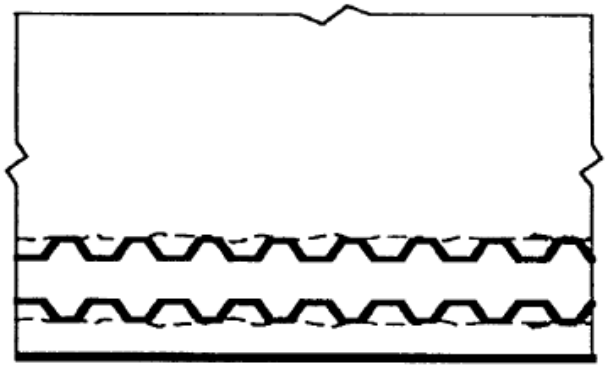
1. การวิบัติเนื่องจากคอนกรีตแยกออก (Splitting Failure) จะเกิดขึ้นเมื่อคอนกรีตรอบๆ แท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังแตกออกโดยแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังยังไม่ขาดออกจากกัน โดยเมื่อแท่งพอลิเมอร์รับน้ำหนักกระทำ จะเกิดแรงดันจากแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังไปสู่คอนกรีตโดยรอบ ถ้าคอนกรีตนั้นไม่สามารถรับแรงดันนั้นได้ ก็จะแตกออกโดย

การวิบัติแบบนี้จะเกิดรอยแยกได้ทั้งแนวตั้งฉาก และขนานกับแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังดังภาพที่ 2-10

2. การวิบัติจากการรูดออกของแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลัง (Pullout Failure) จะเกิดขึ้นเมื่อแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังรูดออกจากคอนกรีต โดยที่คอนกรีตไม่แตกออก และ/หรือ แท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังไม่ขาดออกจากกัน โดยเมื่อแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังได้รับน้ำหนักกระทำ จะเกิดแรงในแนวรัศมีของแท่งพอลิเมอร์น้อยกว่าแรงที่เกิดขึ้นบนคอนกรีตโดยรอบ และ/หรือ แรงในแนวตั้งฉากสูงกว่ากำลังต้านทานของคอนกรีตการวิบัติแบบนี้จะเกิดการเฉือนขึ้นที่ปลายของสันข้อ (the top of the ribs) ที่ผิวรอบๆ แท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังดังภาพที่2-11



ภาพที่ 2-10 ลักษณะของรอยแตกของคอนกรีต ที่มีการวิบัติแบบ Splitting Failure[17]



ภาพที่ 2-11 ลักษณะของการรูดออกของแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังจากการวิบัติแบบ Pullout failure[17]

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในคอนกรีต

เมื่อพิจารณางานวิจัยที่ผ่านมานั้น ทั้งการทดสอบในคานและการทดสอบแบบดึงรูดออกจะมีปัจจัยหลายๆด้านที่ส่งผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังกับคอนกรีต ดังนี้

1.กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (Compressive Strength of Concrete)

จากลักษณะการวิบัติที่ได้กล่าวไปนั้น ทั้งการวิบัติแบบ Splittingและการวิบัติแบบ Pullout ล้วนแล้วแต่เกิดจากกำลังของคอนกรีตที่น้อยเกินไปทั้งสิ้น โดยจากรายงานนั้นกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (tensile strength of concrete) จะเท่ากับรากที่สองของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ($\sqrt{f_c'}$) จาก ACI Committee 408, 1992 [18] ซึ่งมีค่าแค่ประมาณ1ใน10ของกำลังรับแรงอัด โดยผลจากการทดสอบ direct pull-out bond test ได้ผลว่า สำหรับคอนกรีตที่มีค่า f_c' >30 เมกะปาสคาล กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวจะไม่ขึ้นกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต แต่ถ้าคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดน้อย (f_c' ประมาณ 15 เมกะปาสคาล) กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวจะมีผลโดยตรงจากกำลังของคอนกรีต

2.ระยะหุ้ม (Concrete Cover)

คอนกรีตที่หุ้ม จะสามารถโอบรัดแท่งพอลิเมอร์เสริมกำลังซึ่งจะช่วยเพิ่มกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวได้ แต่ถึงกระนั้น การที่แท่งพอลิเมอร์เสริมกำลัง มีคอนกรีตที่หุ้มไม่เพียงพอ ก็จะเกิดการแตกออกของคอนกรีตได้ตามมาตรฐานACI 440.1R-06[19] ซึ่งลักษณะการวิบัติก็จะขึ้นอยู่กับผลจากสาเหตุนี้ด้วย

3.ขนาดของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Bar Diameter)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ผลจากขนาดของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ต่างกันจะมีผลต่อกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวกับคอนกรีต คล้ายกับการใช้แท่งเหล็กในการเสริมกำลัง กล่าวคือ กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะมากขึ้น ถ้าขนาดของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเล็กลง ซึ่งน่าจะเกิดจาก การที่แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้น จะมีน้ำจากคอนกรีตไปดักอยู่ใต้แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมากขึ้น เมื่อน้ำส่วนเกินนี้ระเหยออก จะทำให้เกิดช่องว่างมากขึ้น ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจึงน้อยลง ทำให้กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวจึงน้อยลงตามไปด้วย

4. ระยะยึดเหนี่ยว (Embedment Length)

จากผลของระยะยึดเหนี่ยวที่ได้รายงานไปนั้น ก็ให้ผลเดียวกับเหล็กเสริมกำลัง กล่าวคือ ค่าความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ยสูงสุด(maximum average bond stress value)จะลดลงเมื่อระยะยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น โดยสามารถอธิบายได้ว่า ความเค้นที่เกิดขึ้นจะกระจายได้มากขึ้น

ซึ่งจะสามารถเพิ่มทั้ง แรงดึง และความแข็งแกร่งเริ่มต้นในกราฟความเค้น-การเลื่อนไถล (stress-slip curve) อีกทั้งยังพบว่าการวิบัติแบบ pullout จะเกิดขึ้นเมื่อระยะยึดเหนี่ยวน้อย ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่ำ และขนาดของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีขนาดเล็ก แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าระยะยึดเหนี่ยวมีค่ามาก กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าสูง การวิบัติจะเกิดแบบแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยขาด คอนกรีตที่หุ้มแตกออก หรือไม่ก็วิบัติแบบเฉือนด้วยแรงอัดในคอนกรีต

5. ตำแหน่งที่ติดตั้งแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Bar Cast Position)

โดยหากติดตั้งแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ในส่วนบนของคอนกรีต อากาศ น้ำ ทรายละเอียด จะลอยขึ้นและถูกปิดกั้นด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ทำให้เมื่อคอนกรีตแข็งตัว ผิวสัมผัสของคอนกรีตกับแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะน้อยลง ทำให้กำลังยึดเหนี่ยวลดลง

6. ชนิดของเส้นใย (Type of Fiber)

ในปัจจุบันมีการนำเส้นใยหลายชนิดมาผลิตเป็นแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว(GFRP Rod) มีกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวน้อยกว่าเหล็ก โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนรูปของผิวแท่งพอลิเมอร์ที่มีเส้นใยต่างกัน2ชนิด โดย GFRP Rodจะมีกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวน้อยกว่าเหล็กถึงประมาณ 60-90% โดยจะขึ้นกับขนาดของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยสรุปแล้วตามที่ CSA S806-02 [20] ได้เสนอไว้ CFRP และ GFRP จะให้กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวที่เท่ากัน ส่วนAFRPจะให้กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวที่น้อยกว่า

7.ลักษณะผิวของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Type of Rebar Surface)

ลักษณะผิวของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยนั้นมีหลายแบบ ทั้ง Sand coated, spiral rapped, helical lugged/ribbed และ indentedดังภาพที่2-8 โดยสามารถพิจารณาได้จากแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีผิวขรุขระ จะมีความสามารถยึดเหนี่ยวได้ดีกว่าแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ผิวเรียบ เพราะว่าแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ผิวขรุขระจะมีตัวยึดทางกล (mechanical interlocking) ระหว่างแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยกับคอนกรีต แต่โดยสรุปแล้วจากงานวิจัยที่ผ่านมา ไม่มีแนวโน้มที่แน่ชัดเกี่ยวกับผลกระทบที่มาจากลักษณะผิวของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีต่อกำลังรับแรงยึดเหนี่ยว

2.5 **การซ่อมแซมและเตรียมผิว** [21]

ในการจะซ่อมแซมโครงสร้างที่ถูกไฟเผานั้น ขั้นตอนนี้มีความสำคัญมาก เนื่องจากคอนกรีตที่ถูกไฟเผาจะทำให้เนื้อคอนกรีตอ่อนแอลงและมีผลต่อการถ่ายแรงระหว่างคอนกรีตและ

แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ดังนั้นจึงต้องเตรียมผิวให้อยู่ในสภาพที่สะอาด เรียบ แบนราบหรือโค้งนูน (Convex) เพื่อช่วยทำให้พอลิเมอร์เสริมเส้นใย และคอนกรีตแนบติดกันสนิทตลอดแนว

การเตรียมผิวหน้าของวัสดุฐานเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งลักษณะการใช้งานและระบบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ต่างกันอาจต้องการการเตรียมผิวที่แตกต่างกัน มาตรฐาน ACI 440 ได้จัดแบ่งการใช้งานระบบ FRP ออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทแรงยึดเหนี่ยววิกฤต (Bond Critical Application) และประเภทการสัมผัสวิกฤต (Contact Critical Application) ประเภทแรกเป็นการเสริมกาลังรับแรงดัดและแรงเฉือนของคาน พื้น เสา และผนัง ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการสร้างพฤติกรรมเชิงประกอบ(Composited Behavior) ส่วนประเภทหลังเป็นการเสริมกำลังโดยแรงยึดเหนี่ยวไม่มีบทบาทหลักในการรับแรง เช่น การเสริมกำลังด้วยการรัดรอบเสาคอนกรีตเพื่อโอบปิดเสาแบบเชิงรับ (Passive Confinement) ซึ่งแรงโอบรัดตัวเสาเกิดจากการดึงรั้งของแผ่นเส้นใยจากการขยายตัว (Dilate) ของหน้าตัดเสาเนื่องจากแรงอัด ดังนั้นสำหรับการเสริมกำลังประเภทหลังนี้ การสัมผัสแนบสนิทระหว่างคอนกรีตและพอลิเมอร์เสริมเส้นใยก็เพียงพอสำหรับทำให้เกิดการบีบรัดคอนกรีตขณะมีน้ำหนักบรรทุก

2.5.1 การขัดผิว

ต้องทำการขัดผิวส่วนที่ขรุขระ ไม่สม่ำเสมอ และส่วนที่ยื่นจากพื้นผิว ให้เรียบโดยมีส่วนที่ยื่นจากผิวไม่เกิน 1 มิลลิเมตร ให้ใช้เครื่องขัดแบบจานหมุนหรืออุปกรณ์อื่นๆที่มีลักษณะเดียวกันในการกำจัดรอยเปื้อน สี หรือ สิ่งอื่นใดบนพื้นผิวที่อาจมีผลต่อแรงยึดเหนี่ยว สำหรับบริเวณที่เป็นรูหรือบริเวณที่เว้าที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 13 มิลลิเมตร หรือลึกกว่า 3 มิลลิเมตร เมื่อวัดจากสันแนวตรงยาว 300มิลลิเมตร ต้องทำการอุดหรือฉาบ

2.5.2 การลบมุม

ต้องทำการลบมุม ทั้งมุมนอก มุมใน และขอบที่คม ให้มีรัศมีอย่างน้อย 13 มิลลิเมตร สำหรับพื้นผิวคอนกรีตที่นูนเป็นสัน แนวแบบหล่อคอนกรีต ขอบที่แหลมหรือขรุขระที่มีความสูงเกิน 6 มิลลิเมตร ต้องทาการขัดออกหรือฉาบเสริม ก่อนทำการติดตั้งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต้องทำการกำจัดสิ่งกีดขวาง หรือสิ่งแปลกปลอมที่ฝังอยู่ในคอนกรีต

การลบมุมช่วยปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ลดความเข้มของหน่วยแรงเค้น (Stress Concentration) ในตัวพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และป้องกันไม่ให้เกิดช่องว่างระหว่างคอนกรีตกับพอลิเมอร์เสริมเส้นใย การลบมุมเป็นสิ่งจำเป็นมากโดยเฉพาะระบบ FRP ที่ใช้เส้นใยคาร์บอน เนื่องจากทั้งกำลังและมอดูลัสในทิศตามขวางต่ำกว่าในทิศตามยาวอยู่มาก ดังนั้นจึงฉีกขาดได้ง่ายเมื่อพาดผ่านสันที่แหลม ผิวที่โค้งเว้าใน (Concave) มุมใน (Reentrant

Corners) สิ่งกีดขวางและสิ่งแปลกปลอมที่ฝังอยู่ในคอนกรีต ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อการทำงานของระบบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้

2.5.3 การอุดรอยร้าว

ต้องทำการอุดรอยร้าวทั้งหมดที่ผิวและในเนื้อคอนกรีตที่กว้างเกินกว่า 0.25 มิลลิเมตร ด้วยการอัดฉีดอีพ๊อกซี่เรซินตาม มยผ.1901-51[22] ภายใต้สภาพแวดล้อมที่กัดกร่อนรุนแรง รอยร้าวที่แคบกว่านี้ก็อาจจำเป็นที่จะต้องอุดรอยร้าวด้วยการอัดฉีดอีพ๊อกซี่เรซิน สำหรับวิธีการพิจารณาความกว้างรอยร้าวภายใต้สภาพแวดล้อมต่างๆ ให้ดู มยผ.1552-51[23] และห้ามทำการติดตั้งระบบพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ภายใน 24 ชั่วโมงหลังจากการฉีดอุดรอยร้าว สำหรับผิวขรุขระที่เกิดจากการอุดรอยร้าวให้ทำการกำจัดออก

การเคลื่อนตัวของรอยร้าวขนาดใหญ่กว่าที่กำหนดอาจทำให้ระบบพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ติดเสริมภายนอกหลุดล่อนหรือตัวเส้นใยขู่หักได้ และการฉีดอุดรอยร้าวช่วยเสริมกำลังของคอนกรีตและป้องกันไม่ให้น้ำซึมเข้าด้านหลังของระบบพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

2.5.4 การฉาบผิว (Surface Profiling)

หลังจากการขัดผิวต้องทำการฉาบและปาดเรียบ บริเวณที่ยังคงมีผิวไม่สม่ำเสมอเกินที่ระบุ ซึ่งรวมถึงความเบี่ยงเบนจากระนาบ ครีบหรือส่วนยื่น รูตามด (Bug Hole) ผิวที่เป็นแอ่ง และมุมที่ขรุขระ โดยใช้วัสดุฉาบซ่อมที่ทำจากปูนทรายชนิดอีพ๊อกซี่เรซิน หรือพอลิเมอร์คอนกรีตที่มีกำลังไม่น้อยกว่ากำลังของคอนกรีตเดิม หลังจากฉาบแล้วต้องบ่มส่วนที่ฉาบเป็นเวลาอย่างน้อย 7 วัน ก่อนจะทำการติดตั้งระบบพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

2.5.5 การทำความสะอาดผิว

ต้องทำความสะอาดผิวของคอนกรีตที่เตรียมเสร็จแล้ว และคอนกรีตในส่วนวัสดุฐานตามมาตรฐาน มยผ. 1901-51 และต้องปล่อยให้แห้งก่อนที่จะทำการติดตั้งระบบพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และภายหลังทำความสะอาดเสร็จสิ้น ต้องป้องกันไม่ให้วัสดุต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการยึดเหนี่ยวเข้าไปเปื้อนบริเวณที่ทำความสะอาดเสร็จแล้ว

2.6 **มาตรฐานการการติดตั้งระบบ FRP แบบฝังใกล้ผิว** [21]

ก่อนจะทำการติดตั้ง FRP แบบฝังใกล้ผิวต้องเตรียมร่องในคอนกรีต ในตำแหน่งที่จะติดตั้งแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ให้มีขนาดตามที่ระบุในแบบโดยต้องระมัดระวังไม่ให้คอนกรีตบริเวณขอบร่องแตกร้าว และภายในร่องต้องไม่มีสิ่งใดที่มีผลกระทบต่อแรงยึดเหนี่ยว เช่น น้ำมัน คราบปูน หรือความชื้น ต้องทำการกำจัดสิ่งกีดขวาง และสิ่งของที่ฝังอยู่ในร่องออกให้หมด โดยก่อนเริ่มงานควรตรวจสอบสภาพของสถานที่จริงก่อน เพื่อประเมินคุณภาพของคอนกรีตส่วนที่เป็น

วัสดุฐาน สิ่งที่อาจเป็นอุปสรรค หลังจากนั้นจึงติดตั้งแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเข้าไป โดยมีขั้นตอนดังนี้[21]

2.6.1 ทาวัสดุยึดประสาน

ต้องทำการผสมส่วนผสมของวัสดุยึดประสานที่จะใช้ฝัง FRP ในสัดส่วนที่กำหนดในเอกสารข้อมูลของระบบ และผสมให้ทั่วถึงจนได้สีและความข้นเหลวที่สม่ำเสมอ ให้ใส่ส่วนผสมของวัสดุยึดประสานลงในร่องทั้งหมดที่จะติดตั้งโดยใส่ลงครึ่งหนึ่งของความลึกของร่อง โดยช่องว่างในร่องที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุยึดประสานและคอนกรีตจะทำลายประสิทธิภาพต่อการทำงานของระบบ FRP

2.6.2 การติดตั้งแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ต้องทำความสะอาดแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และตัดให้ได้ความยาวตามที่แบบกำหนด โดยการตัดแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอาจใช้จานตัดความเร็วสูง (High – Speed Grinding Cutter) หรือเลื่อยฟันละเอียด (Fine Blade Saw) ไม่ควรตัดด้วยกรรไกรหรืออุปกรณ์อื่นที่อาจทำให้เส้นใยเสียหายและควรใส่หน้ากากกันฝุ่นขณะตัด เมื่อได้พอลิเมอร์เสริมเส้นใยตามขนาดที่ต้องการแล้ว จึงค่อยวางพอลิเมอร์เสริมเส้นใยลงในร่อง และค่อยๆ กดให้วัสดุยึดประสานไหลออกมารอบๆ ตัวพอลิเมอร์เสริมเส้นใย จนเต็มช่องว่างระหว่างผนังร่อง จากนั้นจึงเติมวัสดุยึดประสานให้เต็มร่องและปาดผิวให้เรียบ

2.6.3 การบ่ม

การบ่มเป็นกระบวนการที่ขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิ และอาจใช้เวลา 2 ถึง 3 วันภายใต้อุณหภูมิห้อง โดยต้องปล่อยให้ระบบ FRP ได้รับการบ่มตามเอกสารข้อมูลของระบบ ห้ามเปลี่ยนส่วนผสมของเรซินในสนาม เพื่อเร่งให้การบ่มเกิดเร็วขึ้น ห้ามไม่ให้โครงสร้างรับแรงเต็มที่ก่อนที่การบ่มจะสมบูรณ์เว้นแต่ระบุเป็นอย่างอื่น ในกรณีจำเป็นต้องเร่งการบ่มให้เร็วขึ้นอาจใช้อุณหภูมิสูงขึ้นช่วยเร่ง เช่น ไฟส่องสว่าง (Spotlight) เครื่องทำความร้อนไฟฟ้า ผ้าห่มไฟฟ้าเนื่องจากเส้นใยคาร์บอนเป็นตัวนำไฟฟ้า เมื่อส่งกระแสไฟฟ้าเข้าไปทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น สามารถทำให้เร่งการบ่มให้เร็วขึ้นได้ โดยอุณหภูมิสูงสุดที่จะใช้ได้ขึ้นกับระบบ FRP ที่ใช้ คือต้องไม่เกินอุณหภูมิการเปลี่ยนแก้วของวัสดุ (Glass Transition Tempurature, Tg)แต่วิธีการนี้ยังไม่เป็นที่ยอมรับกันทั่วไป

2.6.4 การเคลือบป้องกันผิวและการแต่งผิว

การเคลือบป้องกันผิวมีจุดประสงค์เพื่อ ความสวยงาม และการป้องกันต่อการกระแทก ไฟ แสงอัลตราไวโอเลต สารเคมี ความชื้น และผู้ประสงค์ร้าย การเคลือบป้องกันผิวจะเคลือบที่ผิวหน้าของระบบ FRP และห้ามเคลือบผิวถ้ามีความชื้นที่ผิวหรือมีความชื้นในอากาศมาก ตัวเคลือบที่ใช้ต้องมีลักษณะยืดหยุ่น (Flexible) กันน้ำ ไม่เป็นชนิดที่ไม่ยอมให้ไอระเหยผ่าน (Non-

Vapor-Barrier) และเข้ากันได้กับระบบ FRP ที่ใช้ ตัวเคลือบนี้อาจเป็นประเภทปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผสมพอลิเมอร์ (Polymer – Modified Portland) หรือ พอลิเมอร์ลาเทกซ์ (Polymer-Base Latex) สำหรับมอร์ต้าร์ใช้ฉาบเคลือบผิวต้องทำจากทรายซิลิกา (Silicate Sand) ที่มีขนาดระหว่างตะแกรงเบอร์ 40(0.42 มิลลิเมตร หรือ 1/64 นิ้ว) และเบอร์ 6 (3.36 มิลลิเมตร หรือ 1/8 นิ้ว) และลงทรายให้ทั่วระบบ FRPก่อนที่เรซินจะแข็งตัว ทั้งนี้ต้องเตรียมวิธีที่เหมาะสมสำหรับการทำงานในแนวดิ่งและเหนือศีรษะ(Overhead) ความหนาของเคลือบต้องเป็นไปตามที่แบบกำหนด ส่วนลักษณะภายนอกชั้นสุดท้ายให้มีสีและลักษณะพื้นผิวใกล้เคียงกับคอนกรีตโดยรอบ ห้ามใช้ตัวทำละลายเช็ดทำความสะอาดผิวของระบบFRP นอกจากผู้ผลิตระบบ FRP อนุมัติ เพราะการใช้ตัวทำละลายเช็ดทำความสะอาดผิวอาจเป็นอันตรายต่อเรซินของระบบ FRP ได้ สำหรับการทาสีทับหน้าโดยปกติไม่จำเป็นต้องขัดตัวเคลือบป้องกันผิวให้หยาบถ้าทาสีชั้นแรกภายใน 2 ถึง 3 วันหลังจากทำการ ถ้าจำเป็นต้องขัดเพื่อทำให้ผิวหยาบด้วยการใช้แรงดันลม ต้องไม่ใช้ความดันลมมากเกินไปเพื่อไม่ให้เส้นใยเสียหาย

2.6.5 การป้องกันชั่วคราว

ต้องทำการป้องกันระบบ FRP จนกว่าเรซินได้รับการบ่มเต็มที่ อาจจะใช้เต็นท์ชั่วคราวหรือผ้าใบพลาสติก เพื่อป้องกันระบบ FRP ต่อฝน ฝุ่น สิ่งสกปรก การกระทบแสงแดดที่มากเกินไป อุณหภูมิที่สูงเกินไป และความชื้นที่มากเกินไป

2.7 ข้อจำกัดของการใช้อีพ๊อกซี่

ข้อจำกัดของการใช้อีพ๊อกซี่ที่สำคัญ 2 ประการคือ

1) ไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงใกล้เคียง 70-80 $^{\circ}$C (ซึ่งเป็นอุณหภูมิ Glass Transition, T_g ของวัสดุอีพ๊อกซี่ที่โดยทั่วไป) หรือมากกว่า ซึ่งจะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพและสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวในทันที
2) สูญเสียกำลังยึดเหนี่ยว จากความชื้นบนพื้นผิวคอนกรีต (ทั้งในระหว่างการติดตั้งและภายหลังการใช้งานอย่างต่อเนื่อง)

2.8 การตรวจสอบและการประกันคุณภาพ

2.8.1 การตรวจสอบการหลุดล่อน (Debonding)

หลังจากเริ่มการบ่มอย่างน้อย 24 ชั่วโมง ให้ทำการตรวจสอบพื้นผิวด้วยตา การตรวจสอบอาจมองหาความเปลี่ยนแปลงของสี การหลุดล่อน การลอก การแอ่นตัว สิ่งที่แสดงว่ามีการกัดกร่อนของเหล็กเสริม และสิ่งผิดปกติอื่นๆ ผลกระทบจากการหลุดล่อนขึ้นอยู่กับขนาด

ตำแหน่ง และจำนวน เมื่อเทียบกับพื้นที่ที่ทำการติดตั้งทั้งหมด เมื่อมีบริเวณที่น่าสงสัยว่าจะมีการหลุดล่อน ก็อาจทำการทดสอบเพิ่มเติม เช่น การตรวจหาด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic Scanning) การตรวจหาด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Detection) การวัดอุณหภูมิพื้นผิวด้วยแสงอินฟราเรด (Infrared Thermography)

2.8.2 การตรวจสอบการยึดเหนี่ยว (Adhesion)

หลังจากเริ่มการบ่มอย่างน้อย 24 ชั่วโมงและก่อนที่จะลงเคลือบผิว ให้ทำการดึงทดสอบ (Direct Tension Pull-Off Test) ตามมาตรฐาน ASTM D4541 [24] เพื่อตรวจสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างระบบ FRP และคอนกรีต ตำแหน่งและจำนวนการสุ่มทดสอบ ให้เป็นไปตามที่แบบกำหนด แต่ต้องมีจำนวนการทดสอบอย่างน้อย 3 จุด โดยที่ต้องไม่น้อยกว่า 1 จุดต่อชิ้นส่วน 1 ช่วง (คาน พื้น หรือ เสา) หรือ ต้องไม่น้อยกว่า 1 จุดต่อพื้นที่ของระบบพอลิเมอร์เสริมเส้นใย 90 ตารางเมตร และไม่น้อยกว่า 1 จุดต่อ 1 ชนิดของคอนกรีตทั้งนี้ต้องตรวจสอบผิวที่วิบัติของชิ้นส่วนที่ดึงออกมาเพื่อให้แน่ใจว่าการวิบัติเกิดในเนื้อคอนกรีต ถ้าการวิบัติเกิดในแนวรอยต่อระหว่างพอลิเมอร์เสริมเส้นใย กับคอนกรีตที่ระดับความเค้นดึงต่ำกว่า 1.40 เมกะปาสคาล ให้ถือว่าไม่ผ่านการทดสอบและต้องทำการซ่อมต่อไป

2.8.3 การตรวจสอบสำหรับงานเสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

1. ตรวจสอบว่าหลังจากเสริมกำลังแล้วโครงสร้างไม่อยู่ในสภาพที่มีการเสริมกำลังมากเกินไป (over-reinforced) โดยตรวจสอบว่าเหล็กเสริมที่อยู่ภายในโครงสร้างเดิม มีการครากหรือไม่เมื่อโครงสร้างวิบัติ
2. ตรวจสอบความเครียดที่เกิดขึ้นในแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยให้ไม่มากเกินไป จนใกล้กับความเครียดที่จุดวิบัติของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยทั่วไปไม่ควรให้ความเครียดที่เกิดขึ้นเกิน 50% ของความเครียดวิบัติ
3. โครงสร้างมีการเสริมกำลังให้รับแรงเฉือนได้เพียงพอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างที่จะต้องรับแรงมากขึ้นหลังจากเสริมกำลัง
4. แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต้องมีความยาวที่ติดเพียงพอ
5. วัสดุประสานอีพ็อกซี่ ที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม สามารถประสานแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตได้อย่างดี เมื่อทำการทดสอบการดึงโดยตรง การวิบัติจะต้องเกิดขึ้นที่เนื้อคอนกรีต
6. คอนกรีตบริเวณที่จะทำการเสริมกำลังต้องอยู่ในสภาพที่ดี มีกำลังอัดมากเพียงพอ

บทที่3
การดำเนินงานวิจัย

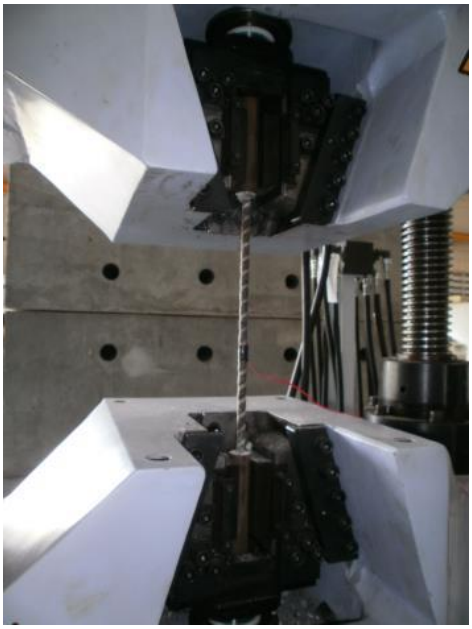
3.1 การทดสอบการรับแรงดึง

ถึงแม้ว่าแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะสามารถรับแรงดึงในแนวขนานกับเส้นใยได้สูงมาก แต่สามารถรับแรงอัดในแนวตั้งฉากกับเส้นใยได้น้อยมากคือประมาณ1:10ของกำลังรับแรงดึงในแนวขนานกับเส้นใย ดังนั้นการทดสอบการรับแรงดึงของเหล็กที่ใช้หัวหนีบหนีบเหล็กแล้วดึงนั้น จึงใช้ไม่ได้ ดังนั้นในการทดสอบแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจึงต้องมีวิธีทดสอบที่แตกต่างจากเดิมเพื่อไม่ให้เกิดแรงอัดในแนวตั้งฉากกับเส้นใยดังนี้

ภาพที่3-1แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่เตรียมไว้ทดสอบรับแรงดึง

1. นำแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร ความยาว 100 เซนติเมตร มาขัดผิวด้วยกระดาษทรายและใช้อะซิโตนในการทำความสะอาด
2. นำท่อเหล็กยาว 35 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน มีขนาดประมาณ 2 เท่าของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและนำจุกพลาสติกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน มาเจาะรูให้มีขนาดเท่ากับแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน
3. ติดจุกพลาสติกไว้ที่ปลายท่อให้แน่น แล้วนำแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน สอดผ่านท่อจนถึงจุกพลาสติก
4. เทอีพ๊อกซี่ลงไปให้เต็มและนำยางมาปิดทับ เพื่อให้แน่ใจว่าแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนอยู่ในแนวตรง ไม่เยื้องศูนย์ จะได้ชิ้นตัวอย่างก่อนนำมาทดสอบดังภาพที่3-1
5. รอให้อีพ๊อกซี่สามารถรับกำลังได้ประมาณ 24 ชั่วโมงแล้วทำเหมือนเดิมอีกข้างหนึ่ง
6. เมื่อทำครบทั้ง2ด้านให้ทิ้งไว้ประมาณ 72 ชั่วโมงเพื่อให้อีพ๊อกซี่รับกำลังได้เต็มที่ จึงสามารถนำไปทดสอบการรับแรงดึงต่อไป

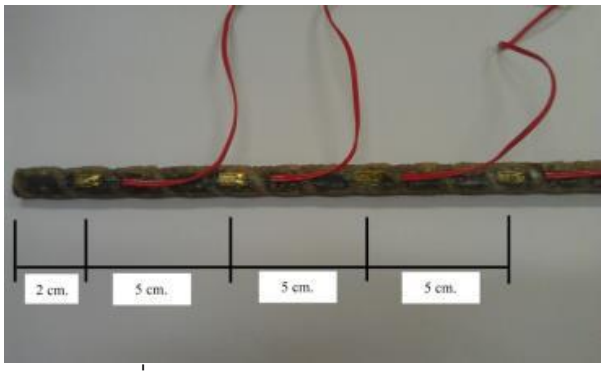
7. ทำการทดสอบหากำลังรับแรงดึงโดยมีวิธีการดังนี้



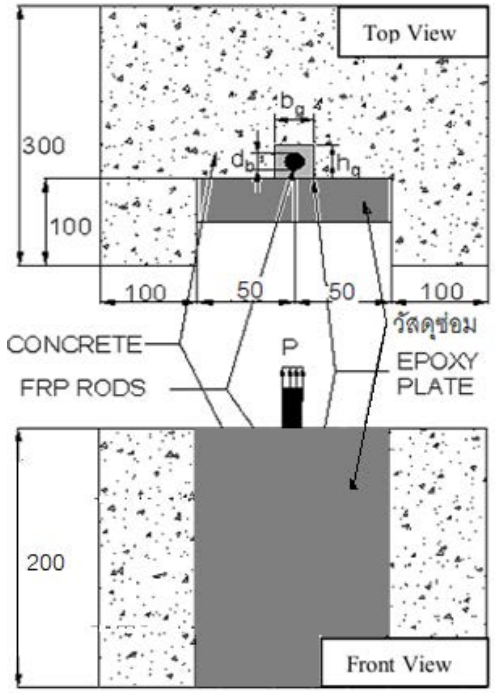
ภาพที่3-2 การทดสอบรับแรงดึงของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

- นำชิ้นส่วนตัวอย่างที่เตรียมไว้มาติดตั้งเข้ากับอุปกรณ์จับยึดตามภาพที่ 3-2
- ติดตั้งตัวอย่างเข้ากับเครื่องทดสอบ universal testing machine และติด strain gauge ลงไปตรงกลางของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน
- ทำการเพิ่มแรงกระทำ ด้วยอัตรา 1มม./นาที. จนตัวอย่างเกิดการวิบัติ
- บันทึกค่าน้ำหนักกระทำ ความเครียดที่เกิดขึ้น และลักษณะการวิบัติของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

3.2 การทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยว



ภาพที่3-3 ระยะในการติด strain gauge



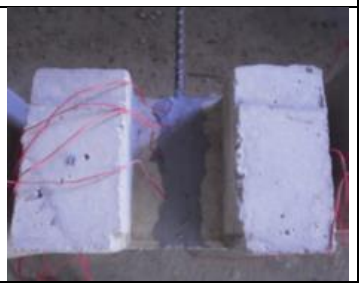
ภาพที่ 3-4 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว

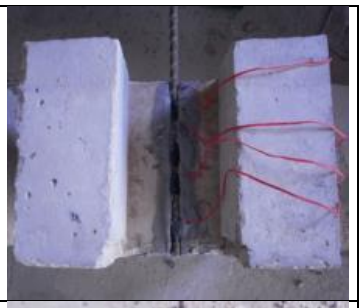
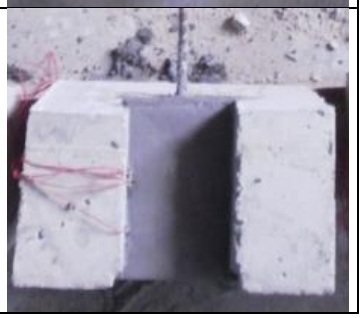
1. หล่อคอนกรีตที่ผสมตามมาตรฐาน ASTM C192/C 192M-07 [25] โดยมีค่ากำลังอัดประลัยที่ออกแบบ (f_c') เท่ากับ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในแบบขนาด 200x300x300 มิลลิเมตร
2. ทำการทดสอบค่ายุบตัว ตามมาตรฐาน ASTM C143/C143M-08 “Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete” [25]
3. ทำการบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 28 วันแล้วทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C39/C39M-09a “Standard Test Method for Compressive Strength” [25] ที่อายุ 28 วัน
4. หลังจากบ่มตัวอย่างครบ 28 วันแล้วนำตัวอย่างออกมาพักที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 7 วันเพื่อให้ตัวอย่างคายความชื้น
5. นำแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนยาว 100 เซนติเมตร มาเตรียมเหมือนกับการเตรียมวัสดุเพื่อทดสอบรับแรงดึง แต่ทำแค่ด้านเดียวแล้วนำอีกด้านหนึ่งมาติดตั้งกับคอนกรีตที่ทำการเซาะร่องโดยก่อนจะนำมาติดตั้งจะติด strain gauge 4จุด โดยแต่ละจุดมีระยะห่าง5 เซนติเมตร เพื่อดูการกระจายตัวของความเครียด ดังภาพที่3-4 ขนาดของร่องจะมีขนาด ดังตารางที่ 3-1 แล้วนำวัสดุซ่อมมาปิดทับดังภาพที่3-4

6. การทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนทำการทดสอบดึงโดยตรงมีขั้นตอนดังนี้
   - ติดตั้งตัวอย่างเข้ากับเครื่องทดสอบ universal testing machine ดังภาพที่ 3-5
   - ทำการเพิ่มแรงกระทำ ด้วยอัตรา1 มิลลิเมตร/นาที จนตัวอย่างเกิดการวิบัติ
   - บันทึกค่าแรงสูงสุด ลักษณะการวิบัติ และระยะเคลื่อนตัวของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ภาพที่ 3-5 การทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยว

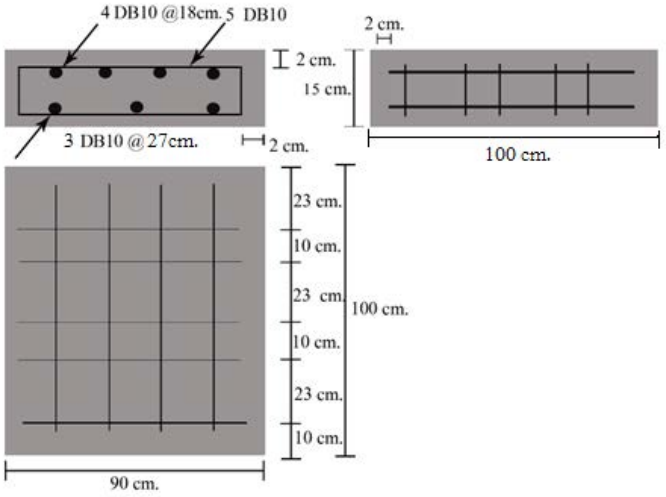
ตารางที่3-1 ลักษณะของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว

ค่ากำลังอัดที่ออกแบบ (กก./ซม.^{2})	ชั้นที่CFRP Rod วางตัวอยู่	ขนาดของร่อง	รูปการวางCFRP Rod
350	ชั้นผิวแกร่ง	$b_g=h_g=1.5d_b$	

350	ระหว่างชั้นผิวแกร่งกับวัสดุซ่อม	$b_g=1.5d_b$ $h_g=0.7d_b$	
350	ชั้นวัสดุซ่อม	นำCFRP Rodมาวางแล้วฉาบทับด้วยวัสดุซ่อมโดยไม่ต้องเซาะร่อง	

3.3 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

หล่อคอนกรีตที่ผสมตามมาตรฐาน ASTM C192/C 192M-07 [25]โดยมีค่ากำลังอัดประลัยที่ออกแบบ (f_c') เท่ากับ 240 และ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรในแบบขนาด 900x1000x150 มิลลิเมตร โดยชิ้นตัวอย่างจะมีเหล็กเสริม โดยเสริมเหล็กข้ออ้อยขนาด 10 มิลลิเมตร เป็นเหล็กบน 4 เส้น เหล็กล่าง 3 เส้น และเสริมเหล็กปลอกเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาด 10 มิลลิเมตรระยะหุ้มเหล็กเสริม 2เซนติเมตร มีระยะดังภาพที่ 3-6 หลังจากนั้นจึงทำการบ่มเป็นเวลา 28วัน



ภาพที่3-6 ตัวอย่างพื้นที่ใช้ในการทดสอบรับแรงดัด

1) เผาตัวอย่างในเตาที่ได้มาตรฐานเพื่อจำลองสภาพไฟไหม้ ในการจำลองสภาพไฟไหม้เลือกมาตรฐานการทดสอบ ASTM E119 และทำการเก็บอุณหภูมิจนเตาเย็น โดยวางชิ้นตัวอย่างด้านบน และให้ไฟเผาจากด้านล้างดังภาพที่3-7

ภาพที่3-7 การจำลองสภาพไฟไหม้

ภาพที่3-8 การสกัดคอนกรีตที่ได้รับความเสียหายจากเพลิงไหม้

2) กะเทาะเอาคอนกรีตที่เสียหายจากการถูกไฟเผาออกจนถึงคอนกรีตชั้นผิวแกร่งดังภาพที่ 3-8ซึ่งจะมีการตรวจสอบกำลังของชั้นผิวแกร่งด้วยการดึงทดสอบโดยมีขั้นตอนดังนี้

2.1 เลือกจุดทดสอบตัวอย่างละ3 จุดโดยการสุ่ม โดยเลือกจุดที่คาดว่าชิ้นตัวอย่างจะไม่รับแรงมากนัก เช่นตรงส่วนมุมและส่วนขอบ และมีระยะระหว่าง 2 จุดทดสอบวัดจากจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์กลางทดสอบอย่างน้อย 16เซนติเมตร และระยะจากจุดศูนย์กลางถึงขอบ 5เซนติเมตร

2.2 จากนั้นจึงจึงใช้ใบตัด ตัดในแนวตั้งฉากเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส 5x5 เซนติเมตร ลึกอย่างน้อย 1 เซนติเมตร

2.3 ทำความสะอาดรอยเจาะและขัดผิวให้เรียบ

2.4 ทาอีพ๊อกซี่ลงบนผิวที่เจาะไว้แล้วนำลูกเหล็ก (steel disk) มาวางทับโดยให้แกนของลูกเหล็กขนานไปกับชิ้นงานทดสอบ โดยต้องไม่ให้กาวไหลลงไปยังรอยเจาะทิ้งไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมงเพื่อให้อีพ๊อกซี่พัฒนากำลังได้เต็มที่ ดังภาพที่3-9

2.5ติดตั้งเครื่องดึงทดสอบเข้ากับลูกเหล็กแล้วจึงทำการเพิ่มความเค้นดึงด้วยอัตรา 35±15 กิโลปาสกาลต่อวินาทีจนกระทั่งชิ้นงานทดสอบหลุดดังภาพที่3-10

2.6 บันทึกค่าสุดท้ายที่อ่านได้และลักษณะการวิบัติ

ภาพที่ 3-9การติดตั้งลูกเหล็ก

ภาพที่3-10 เครื่องดึงทดสอบและลักษณะการวิบัติของชิ้นตัวอย่าง

3) เซาะร่องตามขนาดที่กำหนดและทำความสะอาดผิวหน้าคอนกรีตโดยใช้เครื่องเป่าดังรูปที่ 3-11ถึง3-12แล้วนำแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมาติดตั้งแบบวิธีใกล้ผิวด้วย

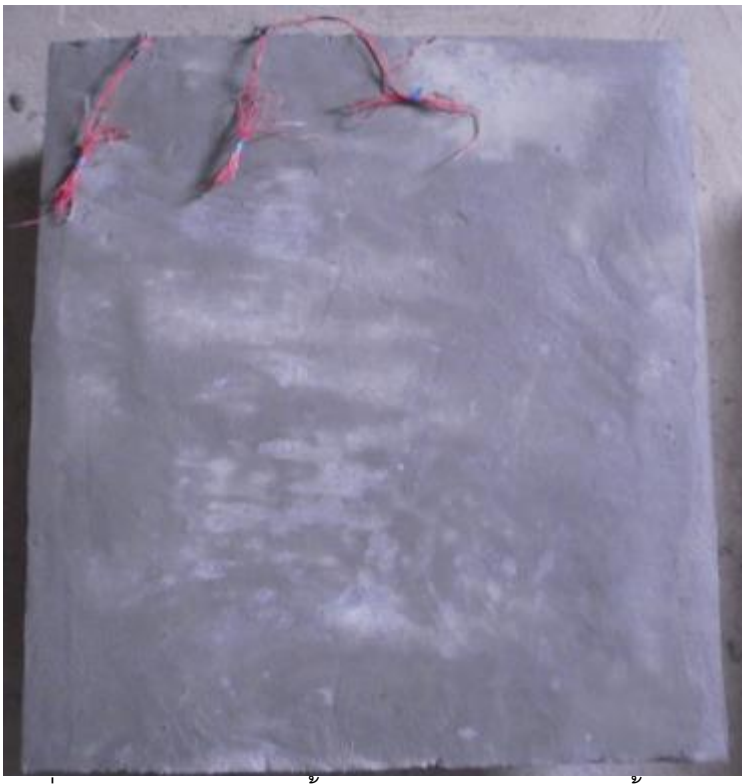
รูปแบบต่างๆตามความยาวทางด้านล่างของพื้น ดังภาพที่ 3-13ถึง3-16และรายละเอียดดังตารางที่3-2

ภาพที่3-11 ลักษณะร่องที่เจาะเสร็จเรียบร้อยแล้ว

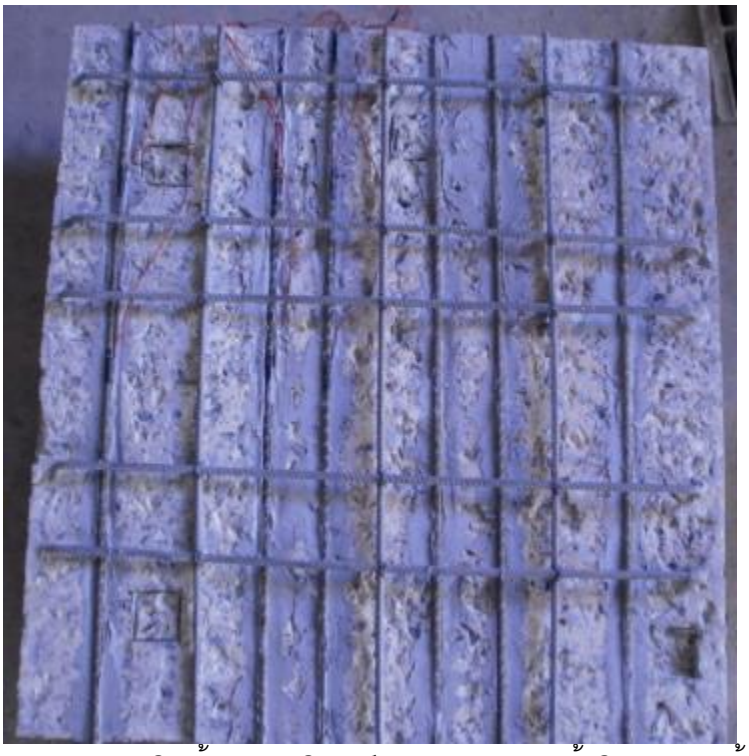
ภาพที่3-12ใช้เครื่องเป่าไล่สิ่งสกปรกและเศษคอนกรีตที่หลุดล่อนออกไป

ภาพที่3-13 ลักษณะการติดตั้งแท่งพอลิเมอร์แบบตรงกับเหล็กเสริม

ภาพที่3-14 ลักษณะการติดตั้งแท่งพอลิเมอร์แบบสลับฟันปลา



ภาพที่3-15 ลักษณะการติดตั้งแท่งพอลิเมอร์แบบวางบนชั้นซ่อมแซม



ภาพที่3-16 ลักษณะการติดตั้งแท่งพอลิเมอร์แบบวางระหว่างชั้นผิวแกร่งกับชั้นซ่อมแซม

ตารางที่ 3-2 ลักษณะของตัวอย่างพื้น ที่ใช้ในการทดสอบ

ชื่อตัวอย่าง	เวลาในการเผาไฟ	วิธีในการจัดวาง	กำลังของคอนกรีต (กก./ซม.^{2})
SC1	ไม่เผา	ไม่เสริมกำลัง	240
SC2		ไม่เสริมกำลัง	350
SF1	เผา90นาที	ไม่เสริมกำลัง	240
SF2		ตรงกับเหล็กเสริม	240
SF3		สลับฟันปลา	240
SF4		สลับฟันปลา	350
SF5		วางในชั้นซ่อมแซม	350
SF6		วางระหว่างชั้นผิวแกร่งกับชั้นซ่อมแซม	350

4) ตั้งแบบหล่อทั้ง4ด้านของชิ้นตัวอย่าง จากนั้นจึงนำวัสดุซ่อมมาเททับและฉาบให้เรียบ ดังภาพที่3-17ถึง3-18

ภาพที่3-17 การตั้งแบบหล่อก่อนเทวัสดุซ่อม

ภาพที่3-18 การฉาบผิววัสดุซ่อมให้เรียบ

5) บ่มตัวอย่างโดยใช้กระสอบคลุมและพรมน้ำเป็นเวลา 28 วัน เพื่อให้วัสดุซ่อมพัฒนากำลังอย่างเต็มที่

6) ทดสอบพฤติกรรมรับแรงดัดของพื้นตัวอย่าง มีวิธีการทดสอบดังนี้

- ในการทดสอบจะเป็นการทดสอบแบบจุดรองรับ3จุด โดยเริ่มจากการปรับขนาดของฐานรองรับให้มีระยะห่างเท่ากับ 80 ซม. แล้วทำการติดตั้งพื้นตัวอย่างเข้ากับฐานรองรับ
- ติดตั้งอุปกรณ์ให้แรงกระทำคือ load beam, load cellและ jack ให้แรงกระทำ
- ทำการติดตั้ง LVDT ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดการโก่งตัวไว้ที่กึ่งกลางคาน
- ให้แรงกระทำ โดยการเพิ่มแรงกระทำทีละประมาณ 600 กก./นาที และเมื่อเพิ่มขึ้นถึง2ตัน ให้ทำการปล่อยน้ำหนักกระทำจนถึงศูนย์และเพิ่มขึ้นอีกทีละ2ตันไปเรื่อยๆ จนกระทั่งพื้นเกิดการวิบัติ
- บันทึกน้ำหนักกระทำ การโก่งตัวของพื้น รอยร้าว ลักษณะการวิบัติ

3.4 การเจาะทดสอบตัวอย่างคอนกรีต

หลังจากทำการทดสอบกำลังรับแรงดัดแล้วมีการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตด้วยการเจาะทดสอบซึ่งวิธีการมีดังนี้

1. เลือกจุดที่อยู่ห่างจากจุดรองรับออกไปด้านละ10เซนติเมตรเพื่อให้เป็นจุดที่ไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดัดมากนักและไม่มีเหล็กเสริมดังภาพที่3-19

2. เจาะทดสอบตัวอย่างที่ไม่ได้เผาไฟ (SC1, SC2) และตัวอย่างที่เผาไฟ90นาที กำลังออกแบบ240 กก. /ซม.^{2}(SF1) เนื่องจากตัวอย่างอื่นได้ทำการสกัดเอาคอนกรีตที่ถูกไฟเผาออกและซ่อมแซมด้วยวัสดุซ่อมแล้วจึงไม่สามารถนำมาทดสอบได้
3. สำรวจดูความสมบูรณ์ของชิ้นตัวอย่างและนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดตามาตรฐาน ASTM C-42[26] ดังภาพที่3-20

ภาพที่3-19 การเจาะทดสอบตัวอย่างคอนกรีต

ภาพที่3-20 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

3.5 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อม

คุณสมบัติพื้นฐานของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อมนั้นมีความสำคัญต่อกำลังรับน้ำหนักขององค์อาคารหลังจากซ่อมแซมเป้นอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทั้งกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง และกำลังรับแรงดัด โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

3.5.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อม

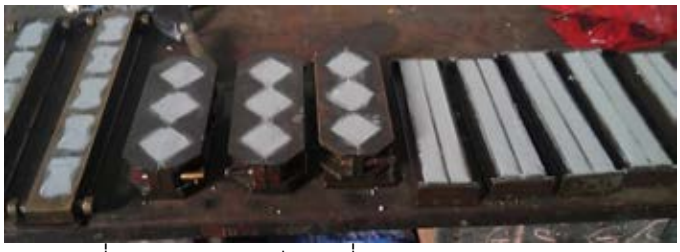
1. หล่ออีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อมในแบบหล่อรูปลูกบาศก์ขนาด 5ซม.x5ซม.x5ซม. ฉาบผิวหน้าให้เรียบและทิ้งไว้ในแบบหล่อเป็นเวลา24ชั่วโมงจนอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อมแข็งตัวดังภาพที่3-21
2. ทำการบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 3 วันและ7วันแล้วทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน BS 4550[27]
3. ขัดผิวให้เรียบ วัดและจดบันทึกขนาดหน้าตัดแล้วนำเข้าเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดดังภาพที่3-22 จนกระทั่งตัวอย่างวิบัติแล้วจดค่าน้ำหนักกระทำ

3.5.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อม

1. หล่ออีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อมในแบบหล่อรูปกระดูก (Briquette) ขนาด 3ซม.x8ซม.x2.5ซม. ฉาบผิวหน้าให้เรียบและทิ้งไว้ในแบบหล่อเป็นเวลา24ชั่วโมงจนอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อมแข็งตัวดังภาพที่3-21
2. ทำการบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 3 วันและ7วันแล้วทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C190 [28]
3. ขัดผิวให้เรียบ นำเข้าเครื่องทดสอบกำลังรับแรงดึงจนกระทั่งตัวอย่างวิบัติดังภาพที่3-23 จดค่าน้ำหนักกระทำและจดบันทึกขนาดหน้าตัดตรงส่วนที่วิบัติ

3.5.3 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อม

1. หล่ออีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อมในแบบหล่อรูปแท่งยาวขนาด 2.5ซม.x2.5ซม.x30ซม. ฉาบผิวหน้าให้เรียบและทิ้งไว้ในแบบหล่อเป็นเวลา24ชั่วโมงจนอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อมแข็งตัวดังภาพที่3-21
2. ทำการบ่มตัวอย่างเป็นเวลา 3 วันและ7วันแล้วทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C348 [29]
3. ขัดผิวให้เรียบ วัดและจดบันทึกขนาดหน้าตัดแล้วนำเข้าเครื่องทดสอบกำลังรับแรงดัดดังภาพที่3-24 จนกระทั่งตัวอย่างวิบัติแล้วจดค่าน้ำหนักกระทำ



ภาพที่3-21 การหล่ออีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อมในแบบหล่อ

ภาพที่3-22 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

ภาพที่3-23 การทดสอบกำลังรับแรงดึง

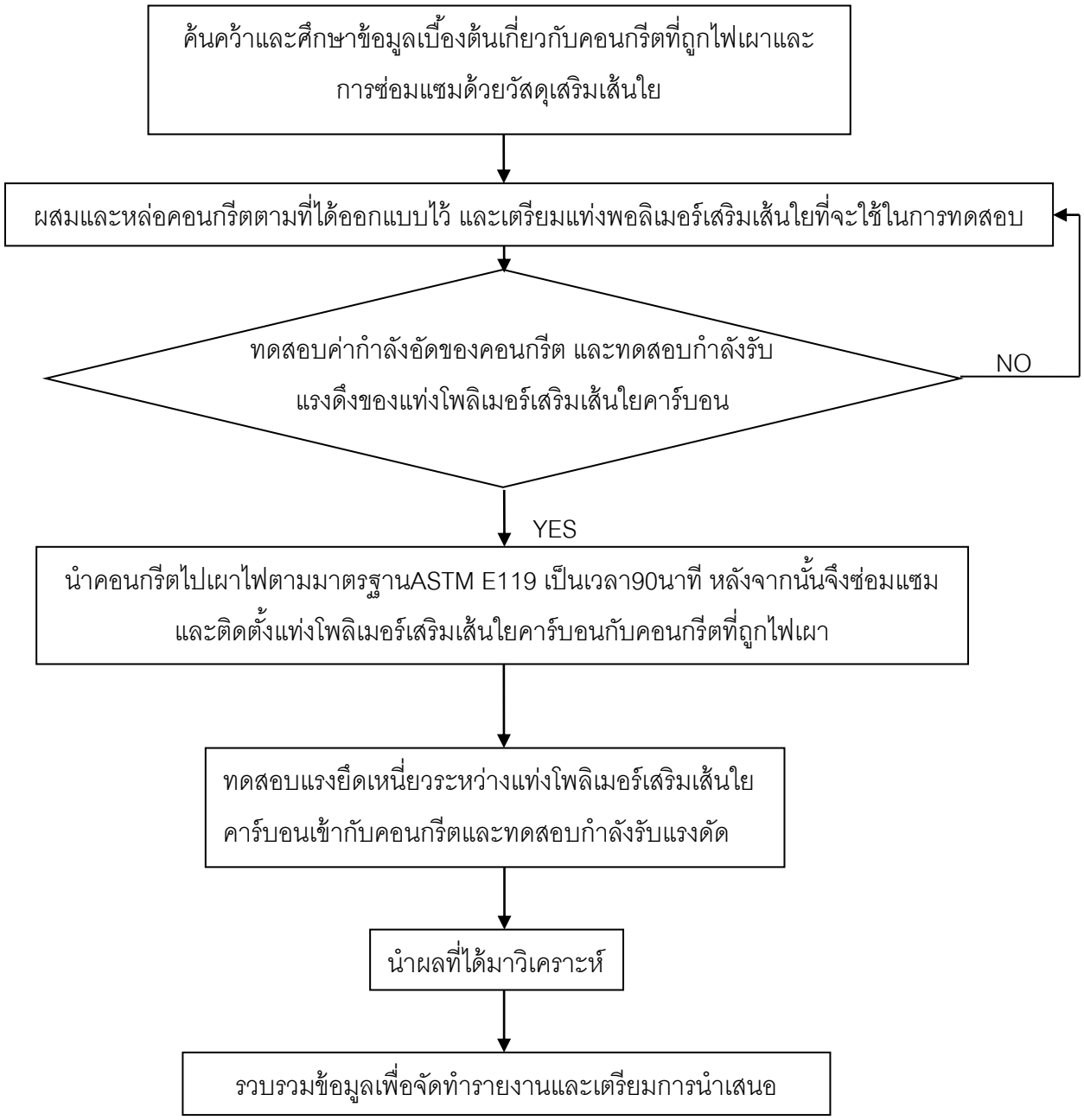
ภาพที่3-24 การทดสอบกำลังรับแรงดัด

3.6 **แผนการดำเนินงาน**

ตารางที่ 3-3 ตารางแสดงแผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	ระยะเวลาการดำเนินการ (เดือน)									
	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
1. ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับคอนกรีตที่ถูกไฟเผาและการซ่อมแซมด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย										
2. ผสมและหล่อคอนกรีตตามที่ได้ออกแบบไว้ และเตรียมแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่จะใช้ในการทดสอบแรงดึง										
3. ทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้ว่าตรงตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ และทดสอบกำลังรับแรงดึงของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย										
4. นำคอนกรีตไปเผาไฟตามอุณหภูมิต่างๆที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นจึงซ่อมแซมและติดตั้งแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแต่ละชนิดกับคอนกรีตที่ถูกไฟเผา										
5. ทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแท่ง พอลิเมอร์เสริมเส้นใยกับคอนกรีต และทดสอบกำลังรับแรงดัดของแผ่นพื้น										
6. นำผลที่ได้มาวิเคราะห์										
7.รวบรวมข้อมูลของวิธีการและตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการซ่อมแซมและเสริมกำลังคอนกรีตที่ถูกไฟเผา เพื่อจัดทำรายงานและเตรียมการนำเสนอ										

3.7แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน



ภาพที่3-25 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

บทที่4
ผลทดสอบและการวิเคราะห์

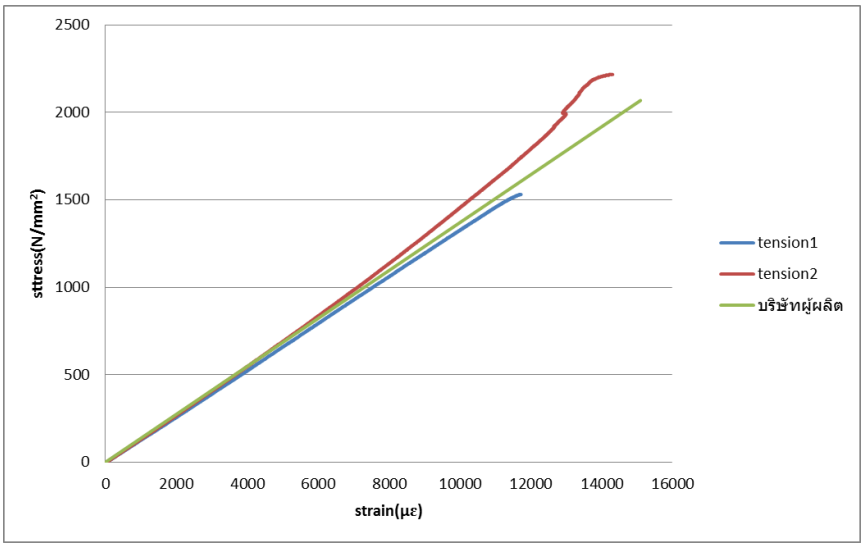
4.1. ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึง

ชิ้นตัวอย่างที่ได้เตรียมไว้แล้วจะนำมาติด strain-gauge ที่ผิวตรงส่วนกลาง ซึ่งได้ผลการทดสอบตามตารางที่4-1

ตารางที่4-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึง

ชิ้นตัวอย่าง	แรงดึงสูงสุด (กิโลนิวตัน)	ความเค้นสูงสุด (นิวตัน/มม.^{2})	ความเครียดสูงสุด ($\mu\varepsilon$)	อิลาสติกโมดูลัส (นิวตัน/มม.^{2})	ลักษณะการวิบัติ
1	98.32	1,507.99	11,434.78	1.32×10^5	แบบไม้กวาด (broom-type failure)
2	144.75	2,220.09	16,718.93	1.33×10^5	แบบไม้กวาด (broom-type failure)

ภาพที่4-1 ลักษณะการวิบัติของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย



ภาพที่4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในการทดสอบกำลังรับแรงดึง

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพบว่ามีการวิบัติแบบไม้กวาด(broom-type failure) ดังภาพที่4-1ทุกตัวอย่างที่ทดสอบ อีกทั้งพฤติกรรมการรับแรงดึงก็ยังเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนกระทั่งวิบัติโดยไม่มีจุดครากเหมือนในเหล็กเสริม และค่าอิลาสติกโมดูลัสที่คิดจากความชันของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ณ จุดที่ความเค้นมีค่า20%และ60%ของความเค้นสูงสุดก็มีค่าใกล้เคียงกันดังภาพที่4-2 แต่กำลังรับแรงดึงมีค่าต่างกันมาก ดังนั้นจึงใช้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ทางบริษัทผู้ผลิตแนะนำ(2,068 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร)

4.2. ผลการทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยว

จากผลการทดสอบที่แสดงในตารางที่4-2 และภาพที่4-3ถึง4-5 ผลปรากฏว่าตัวอย่างที่ใช้ทดสอบทุกชิ้นมีการวิบัติแบบรูดออก(Pull-out failure)ทั้งหมด โดยการวิบัติแบบรูดออกจะเกิดขึ้นเมื่อระยะยึดเหนี่ยวน้อย ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่ำ และขนาดของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีขนาด โดยกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวของตัวอย่างที่วางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในชั้นวัสดุซ่อมมีค่ามากที่สุดส่วนตัวอย่างที่วางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในชั้นผิวแกร่งและระหว่างชั้นผิวแกร่งกับวัสดุซ่อมมีค่าใกล้เคียงกัน

จากลักษณะการวิบัติที่ต่างกัน ทำให้สามารถอธิบายได้ว่า กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวไม่ได้เกิดจากกำลังของวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวแต่ยังขึ้นอยู่กับระยะจากผิวของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยถึงขอบของวัสดุประสาน[30] โดยตัวอย่างที่มีการวางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยบนชั้นผิวแกร่งโดยมีการเซาะร่องแล้วใช้อีพ๊อกซี่เป็นตัวประสานนั้น ลักษณะการวิบัติจะมีลักษณะเป็นโคนขนาดเล็กที่ปลายหรือไม่มีโคนเลยซึ่งเป็นเพราะระยะจากผิวของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยถึงขอบของวัสดุประสานมีความยาวไม่เพียงพอในการกระจายหน่วยแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดความเค้นสูงสุดมี

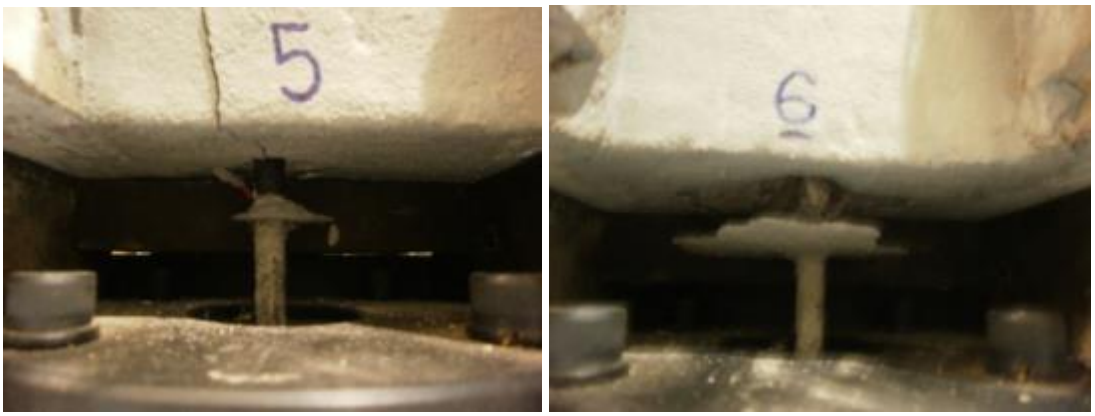
ค่ามากตรงผิวสัมผัส ส่วนตัวอย่างที่วางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยระหว่างชั้นผิวแกร่งกับชั้นวัสดุซ่อมในด้านที่เชื่อมกับอีพ๊อกซี่ยังเป็นโคนที่มีขนาดเล็กเหมือนกับการวางในแบบแรกแต่ในด้านที่เชื่อมกับวัสดุซ่อมมีโคนขนาดใหญ่ซึ่งเป็นเพราะระยะจากผิวของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยถึงขอบของวัสดุซ่อมมีความกว้างมากทำให้สามารถกระจายความเค้นจนสามารถลดความเค้นสูงสุดที่ผิวของวัสดุซ่อมได้ และตัวอย่างสุดท้ายที่วางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยบนชั้นวัสดุซ่อมมีความกว้างจากผิวของระยะจากผิวของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยถึงขอบของวัสดุซ่อม มากทำให้สามารถกระจายแรงและลดความเค้นสูงสุดที่ผิวของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้ ดังภาพที่ 4-6 ถึง 4-8

ตารางที่4-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยว

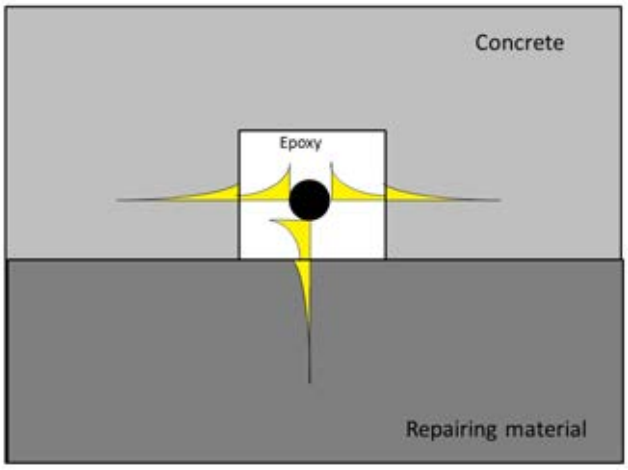
ชั้นที่FRP Rod วางตัวอยู่	ชื่อตัวอย่าง	แรงดึงสูงสุด (กิโลกรัม)	ความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ยสูงสุด (นิวตัน/มม.^{2})	การลื่นไถลที่ความเค้นยึดเหนี่ยวสูงสุด (มิลลิเมตร)	ลักษณะการวิบัติ
ชั้นผิวแกร่ง	A-1	1,607.62	28.43	4.31	รูดออก (rod-epoxy)
	A-2	1,521.58	26.91	4.46	รูดออก (rod-epoxy)
ระหว่างชั้นผิวแกร่งกับวัสดุซ่อม	B-1	1,336.76	23.63	4.29	รูดออก (rod-epoxy และ rod-วัสดุซ่อม)
	B-2	1,671.35	29.55	5.78	รูดออก (rod-epoxy และ rod-วัสดุซ่อม)
ชั้นวัสดุซ่อม	C-1	3,913.09	69.17	4.92	รูดออก (rod- repair material)
	C-2	4,338.51	76.69	4.99	รูดออก (rod- repair material)

ภาพที่4-3 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยว
(ซ้าย) ชั้นผิวแกร่งตัวที่1, (ขวา) ชั้นผิวแกร่งตัวที่2

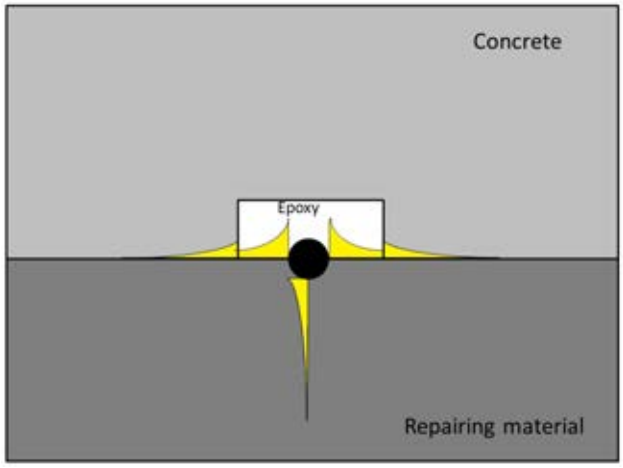
ภาพที่4-4 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยว
(ซ้าย) ระหว่างชั้นผิวแกร่งกับวัสดุซ่อมตัวที่1,(ขวา) ระหว่างชั้นผิวแกร่งกับวัสดุซ่อมตัวที่2



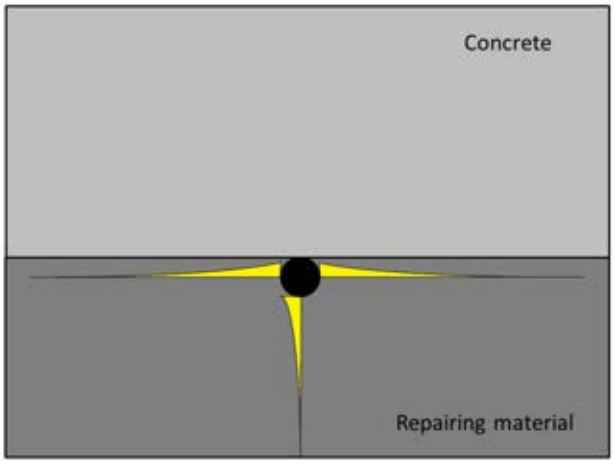
ภาพที่4-5 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยว
(ซ้าย) ชั้นวัสดุซ่อมตัวที่1,(ขวา) ชั้นวัสดุซ่อมตัวที่2



ภาพที่ 4-6 การกระจายตัวของความเค้นในการวางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยบนชั้นผิวแกร่ง

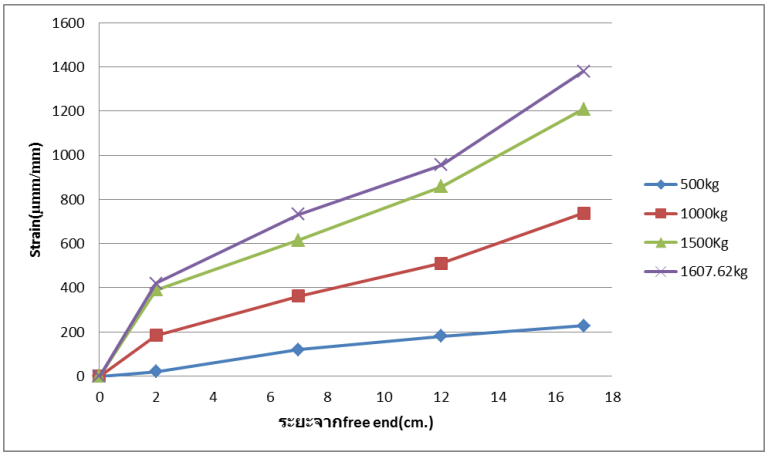


ภาพที่ 4-7 การกระจายตัวของความเค้นในการวางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยระหว่างชั้นผิวแกร่งกับวัสดุซ่อม

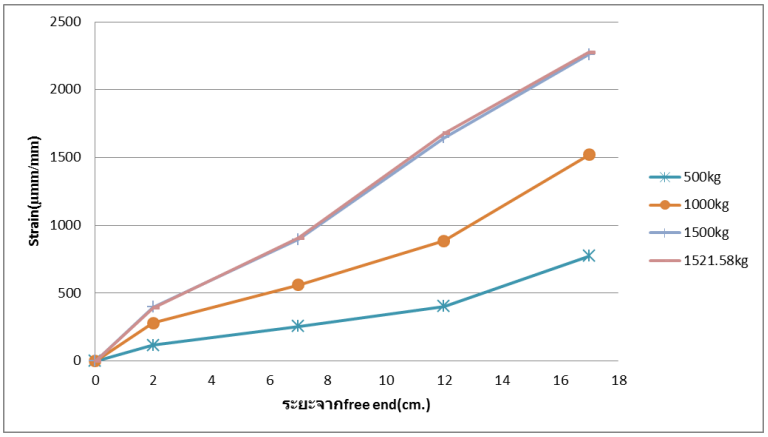


ภาพที่ 4-8 การกระจายตัวของความเค้นในการวางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยบนชั้นวัสดุซ่อม

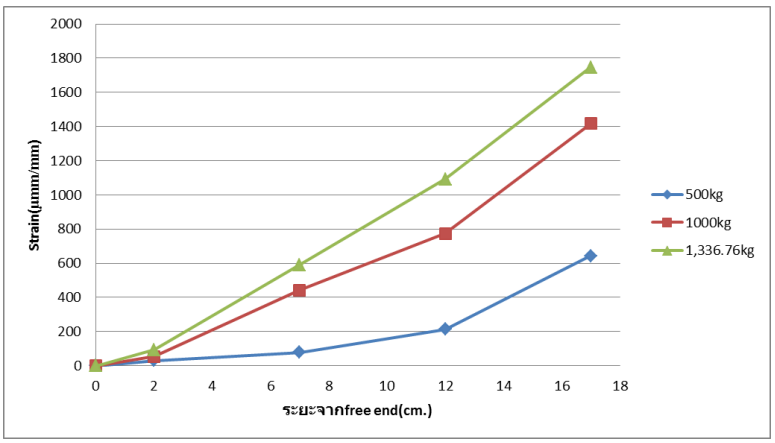
ในการทดสอบมีการติดstrain gauge ที่ระยะ 2cm. , 7cm. , 12cm. และ17cm. จากปลายอิสระ(Free end) ซึ่งแสดงไว้ดังภาพที่4-9ถึง4-14 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าแนวโน้มค่าความเครียดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างจากปลายอิสระมีค่ามากขึ้นและเมื่อเพิ่มแรงกระทำมากขึ้นค่าความเครียดก็จะมีอัตราการเพิ่มสูงขึ้นตามระยะจากปลายอิสระ โดยความเครียดที่ปลายอิสระจะมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยมากจนแทบจะเรียกได้ว่ามีค่าเป็นศูนย์ จากพฤติกรรมเช่นนี้สามารถอธิบายถึงลักษณะการวิบัติที่ปลายยึดรั้งของตัวอย่างการทดสอบทั้งหมดว่าค่าความเครียดที่เกิดขึ้นตรงปลายยึดรั้งนั้นมีค่ามากกว่าความเครียดที่อีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อมจะรับได้ จึงทำให้เกิดการหลุดออกของอิพ๊อกซี่และวัสดุซ่อมที่ส่วนปลายยึดรั้ง โดยความเครียดที่ปลายยึดรั้งของตัวอย่างที่วางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในชั้นวัสดุซ่อมขณะวิบัติ มีค่ามากกว่าตัวอย่างที่วางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในชั้นผิวแกร่งและระหว่างชั้นผิวแกร่งและวัสดุซ่อม จึงทำให้กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวของตัวอย่างC-5และC-6 มีค่ามากที่สุด



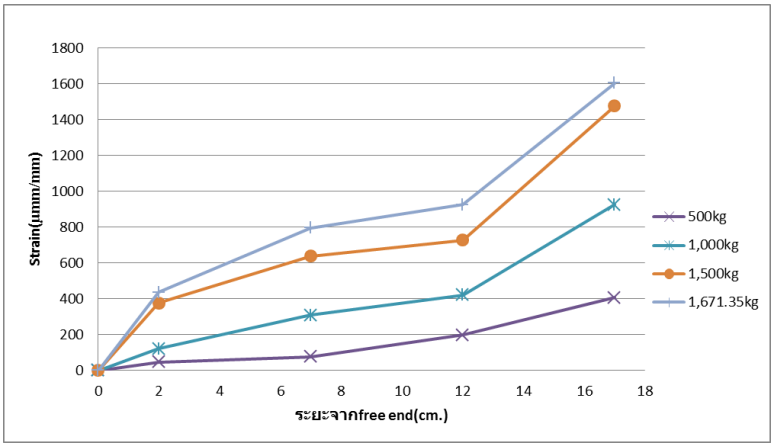
ภาพที่4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับระยะจากFree endของตัวอย่างA-1



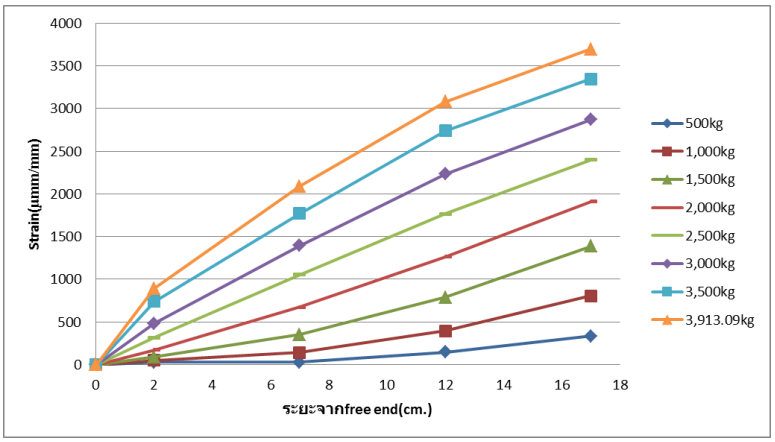
ภาพที่4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับระยะจากFree endของตัวอย่างA-2



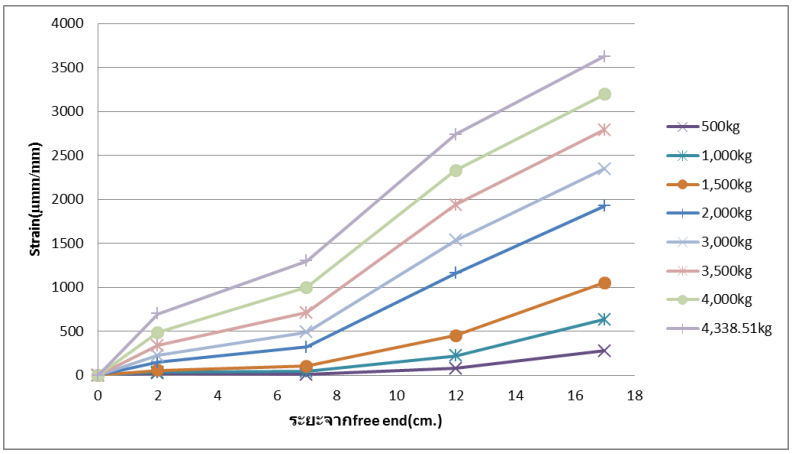
ภาพที่4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับระยะจากFree endของตัวอย่างB-1



ภาพที่4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับระยะจากFree endของตัวอย่างB-2

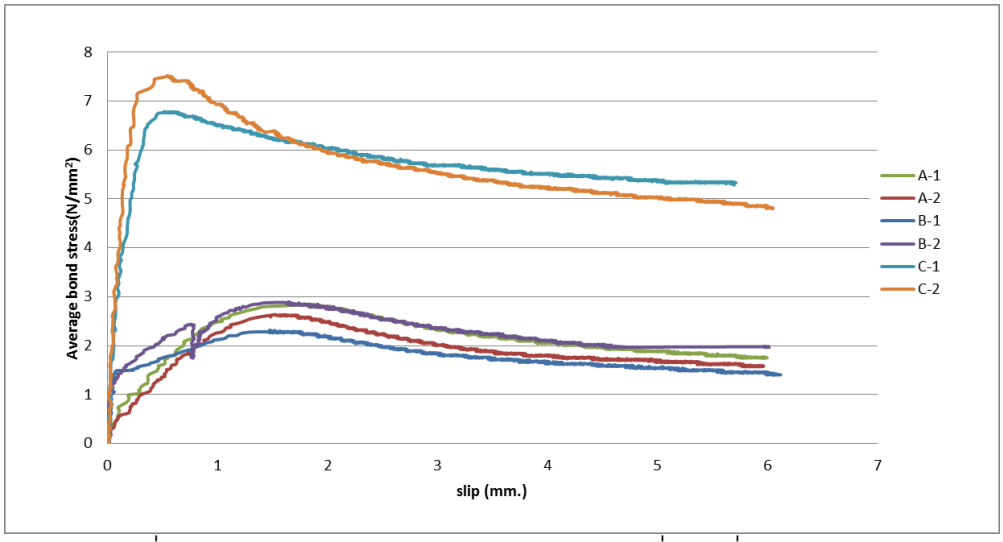


ภาพที่4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับระยะจากFree endของตัวอย่างC-1

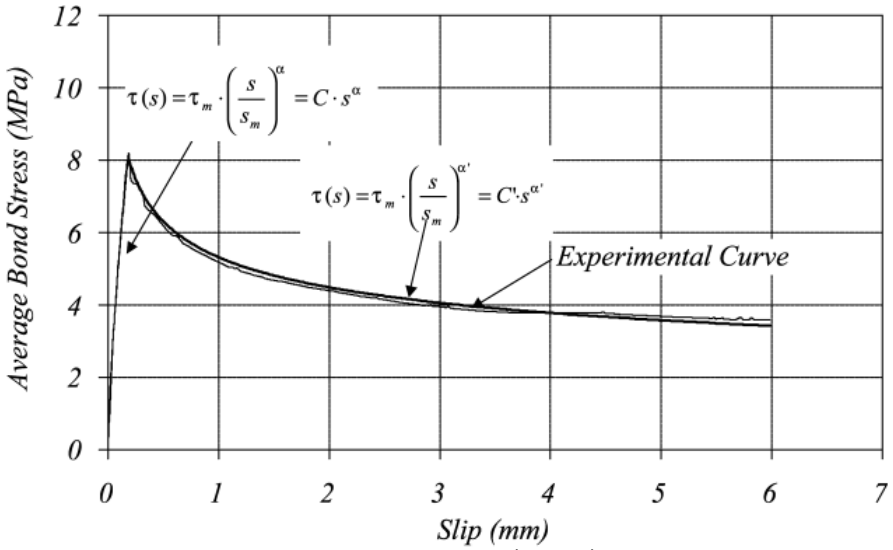


ภาพที่4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับระยะจากFree endของตัวอย่างC-2

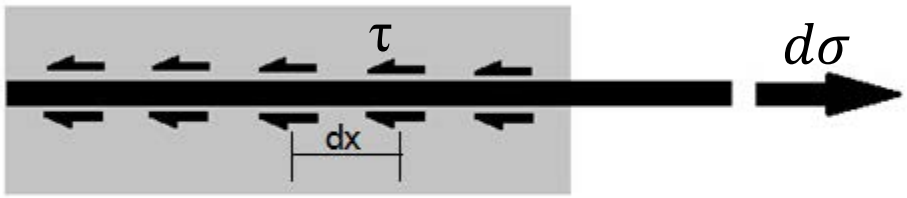
ในการทดสอบมีการติดตั้งLVDTเพื่อวัดค่าการไถลโดยแสดงได้ดังภาพที่4-15 หากนำมาเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ย (average bond stress) กับค่าการไถล (slip)ของ Bertero–Popov–Eligehausen(BPE)[31] ในภาพที่ 4-16[32] ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่ดัดแปลงจากพฤติกรรมของการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับคอนกรีตปรากฏว่ามีความใกล้เคียงกันดังนั้นจะสามารถหาระยะยึดเหนี่ยวได้ ดังนี้



ภาพที่ 4-15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ยกับค่าการไถล



ภาพที่ 4-16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ย (average bond stress) กับค่าการไถล(slip) [32]



ภาพที่4-17 สมดุลของแรงในระบบการยึดเหนี่ยว

เริ่มจากการหาค่าความเค้นยึดเหนี่ยว (bond stress) การกระจายของความเครียด (strain distribution) โดยใช้สมการการสมดุลของแรง (Equilibrium of force)ดังภาพที่4-17 [33] ตามสมการที่2

$$\tau\pi d_b d_x = \frac{\pi d_b^2}{4} d\sigma \tag{2}$$

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมเป็นแบบเส้นตรง(linear elastic)ของแท่งพอลิเมอร์สามารถพิจารณาให้ได้ตามสมการที่3

$$\sigma = E_b \varepsilon_b \cong E_b \frac{ds}{dx} \tag{3}$$

โดย $\tau(x)$ = ความเค้นยึดเหนี่ยวที่จุด x

d_b = เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

E_b = ค่าโมดูลัสของของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ε_b = ค่าความเครียดบนแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

s = ค่าการไถล

จากสมการที่2และ3 สามารถเขียนในรูปของอนุพันธ์ได้ดังสมการที่4

$$\frac{d^2s}{dx^2} - \frac{4}{E_b d_b}\tau(x) = 0 \tag{4}$$

หลังจากนั้นก็จะใช้ความสัมพันธ์ของ Bertero–Popov–Eligehausen(BPE) โดยในช่วงแรกจะมีลักษณะดังสมการที่5แต่หลังจากค่าความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ยถึงจุดสูงสุดแล้วจะมีลักษณะดังสมการที่6

$$\tau(s) = \tau_m\left(\frac{s}{s_m}\right)^{\alpha} \quad , \ 0 < s < s_m \tag{5}$$

$$\tau(s) = \tau_m\left(\frac{s}{s_m}\right)^{\alpha'} \quad , \ s \geq s_m \tag{6}$$

โดย τ_m = ค่าความเค้นยึดเหนี่ยวที่จุดสูงสุด

s_m =ค่าการไถลที่จุดความเค้นยึดเหนี่ยวสูงสุด

α =ค่าปรับแก้ในช่วงแรกก่อนถึงจุดสูงสุด (มีค่าระหว่าง 0ถึง1)

α' =ค่าปรับแก้ในช่วงหลังจากจุดสูงสุด (มีค่าระหว่าง -1ถึง0)

จากสมการที่4และ5สามารถเขียนใหม่ได้ตามสมการที่7

$$\frac{d^2s}{dx^2} - \frac{4\tau_m s^{\alpha}}{E_b d_b s_m} = 0 \tag{7}$$

หากพิจารณาเงื่อนไขสภาพขอบสำหรับการยึดเหนี่ยวแบบสมบูรณ์ (perfect anchorage) สามารถพิจารณาได้ตามสมการที่8 โดยมีเงื่อนไขขอบคือค่าการไถลและความเครียดที่ปลายอิสระมีค่าเป็นศูนย์ดังสมการที่9

$$s(x) = \left[\frac{2\tau_m}{E_b d_b s_m^2}\frac{(1-\alpha)}{(1+\alpha)}\right]^{1/(1-\alpha)} . x^{2/(1-\alpha)} \quad (8)$$

$$s(0) = 0 \text{ และ } \left(\frac{ds}{dx}\right)_{x=0} = \varepsilon(0) = 0 \quad (9)$$

เมื่อพิจารณาการไถลตลอดความยาวของแท่งพอลิเมอร์จากสมการที่2และ3สามารถเขียนได้ใหม่ตามสมการที่10

$$\sigma(x) = E\frac{ds}{dx} \quad (10)$$

จากสมการที่8และ9 พิจารณาให้ความเค้นที่สามารถทำให้การไถลเกิดขึ้นเท่ากับs_mได้ความเค้นตามสมการที่11

$$\sigma_1 = \sigma(s_m) = \sqrt{\frac{8E_b}{d_b}\frac{\tau_m s_m}{1+\alpha}} \quad (11)$$

จากภาพที่4-15 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ยหาได้จากสมการที่12 กับค่าการไถลที่ปลายอิสระและปลายยึดรั้ง ที่มาจากLVDTและการกระจายตัวของความเครียดหาได้จากสมการที่13หรือ14 จะได้ว่าถ้าหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ยกับค่าการไถลเฉลี่ยระหว่างปลายอิสระและปลายยึดรั้งจะมีลักษณะสอดคล้องกับภาพที่4-16 ซึ่งเมื่อหาค่าพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ยกับการไถลเฉลี่ยระหว่างปลายอิสระ(free-end slip)กับปลายยึดรั้ง(load-end slip)จนถึงค่าความเค้นสูงสุดจะได้ค่าดังสมการที่15 ซึ่งสามารถนำมาใช้หาค่าปรับแก้ α ได้ดังสมการที่16

$$\tau_{av} = \frac{P}{\pi d_b l_b} \quad (12)$$

โดยที่ τ_{av} = ค่าความเค้นยึดเหนี่ยวเฉลี่ย

P = แรงดึงขณะนั้น

l_b = ระยะฝังยึดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

$$s(x) = s(0) + \int_0^x \varepsilon_b(x)dx \quad (13)$$

ซึ่งหากระยะการติด strain-gauge ไม่ต่อเนื่อง(เกินกว่า1cm.-2cm.)สามารถใช้สมการแบบไม่ต่อเนื่องได้ตามสมการที่14 [32]

$$s(x_i) = s(0) + \sum_{j=1}^{i} \varepsilon_{bj} \cdot (x_j - x_{j-1}) \quad (14)$$

$$A_\tau(0, s_m) = \int_0^{s_m} \tau_m \left(\frac{s}{s_m}\right)^\alpha d_s = \frac{\tau_m \cdot s_m}{1+\alpha} \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{\tau_m \cdot s_m}{A_\tau(0, s_m)} - 1 \quad (16)$$

ซึ่งเมื่อพิจารณาทั้งระบบ สามารถเขียนสมการที่2ได้ดังสมการที่17

$$\tau\pi d_b l_m = \frac{\sigma\pi d_b^2}{4} \quad (17)$$

โดย l_m =ระยะฝังยึดอย่างน้อยที่ทำให้ค่าการไถลที่ปลายอิสระเป็นศูนย์

จากสมการที่11,16และ17 สามารถหาระยะฝังยึดได้ดังสมการที่18

$$l_m = \sqrt{\frac{E_b s_m d_b}{2(1+\alpha)\tau_m}} \quad (18)$$

ซึ่งผลจากการทดสอบและการวิเคราะห์สามารถหาระยะยึดเหนี่ยวอย่างน้อยของแต่ละวิธีในการติดตั้งแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบต่างๆแสดงในตารางที่4-3

ตารางที่4-3 แสดงตัวแปรในการหาระยะฝังยึด

ชั้นที่FRP Rodวางตัว	τ_m (N/mm^2)	s_m (mm.)	A_τ (N/mm)	α	α'	l_m (cm.)
ชั้นผิวแกร่ง	2.837	1.763	3.641	0.374	-0.40	52.02
	2.638	1.519	2.637	0.520	-0.38	47.61
ระหว่างชั้นผิวแกร่งกับวัสดุซ่อม	2.317	1.474	2.755	0.24	-0.35	55.41
	2.897	1.648	3.792	0.259	-0.35	52.00
ชั้นวัสดุซ่อม	6.784	0.513	2.526	0.378	-0.10	18.12
	7.521	0.544	3.209	0.274	-0.18	18.43

จากตารางที่4-3 เมื่อพิจารณาถึงระยะยึดเหนี่ยวของในแต่วิธีการติดตั้งจะได้ว่าการนำแท่งพอลิเมอร์ไปวางในชั้นวัสดุซ่อมจะให้ค่าระยะยึดเหนี่ยวที่น้อยที่สุดซึ่งน้อยกว่าแบบอื่นถึงประมาณ25เท่า รองลงมาคือการนำแท่งพอลิเมอร์ไปวางบนชั้นผิวแกร่งโดยการทำร่องและเชื่อมประสานด้วยอีพ๊อกซี่ส่วนวิธีการติดตั้งที่ให้ค่าระยะยึดเหนี่ยวที่มากที่สุดคือการนำแท่งพอลิเมอร์ไปวางไว้ระหว่างชั้นผิวแกร่งกับวัสดุซ่อม

ในมาตรฐาน ACI-440 ได้แนะนำว่าระยะฝังยึดต้องเป็นระยะที่ไม่ทำให้วิบัติด้วยการแตกของคอนกรีต (splitting failure) ดังนั้นจึงได้มีสมการหาค่าระยะฝังยึดของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในคอนกรีต โดยให้ใช้ค่าแค่28% หากเปลี่ยนเป็นการติดตั้งแบบใกล้ผิว ดังสมการที่19

$$L_d = 0.028 \frac{\pi d^2 f_u}{4\sqrt{f_c'}} \tag{19}$$

โดย L_d =ระยะฝังยึดของมาตรฐาน ACI-440

f_u =กำลังรับแรงดึงที่จุวิบัติของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

f_c' =กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

จากสมการที่19 เมื่อแทนค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเท่ากับ 0.90เซนติเมตร,ใช้กำลังรับแรงดึงที่40%ของกำลังรับแรงดึงที่จุดวิบัติของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเพื่อไม่ให้เกิดการวิบัติแบบเปราะ เท่ากับ827.2เมกะปาสคาล

(2068x40%) และใช้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเท่ากับ 35เมกะปาสคาล จะได้ระยะฝังยึดเท่ากับ 24.9 เซนติเมตร ซึ่งค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับระยะฝังยึดที่วางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยบนชั้นวัสดุซ่อม เนื่องจากวัสดุซ่อมมีคุณสมบัติคล้ายคอนกรีต แต่การติดตั้งแบบใกล้ผิวบนอีพ๊อกซี่จะได้ค่าระยะฝังยึดที่สูงกว่า ดังนั้นการใช้สมการจากมาตรฐานACI-440จึงยังไม่เพียงพอเนื่องจาก

1.ในมาตรฐาน ACI-440 เป็นแค่พฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยกับคอนกรีตเท่านั้น แต่ในการติดตั้งแบบใกล้ผิวโดยทั่วไปจะใช้อีพ๊อกซี่เป็นตัวประสาน ซึ่งมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบเนียนกว่าคอนกรีต ดังนั้นค่าระยะฝังยึดที่ได้ควรจะต้องมีค่ามากกว่าติดตั้งแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในคอนกรีต

2.ในมาตรฐาน ACI-440 สมมติให้ค่าสัมประสิทธ์แรงเสียดทานระหว่างแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยกับคอนกรีตเท่ากับ1.0 ซึ่งเป็นการนำค่าสัมประสิทธ์ระหว่างเหล็กเส้นกับคอนกรีตมาใช้ แต่ในความเป็นจริงแล้ว ค่าสัมประสิทธ์แรงเสียดทานระหว่างแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยกับอีพ๊อกซี่จะมีค่าน้อยกว่าประมาณ 30%ถึง60%เท่านั้น

3.ในมาตรฐาน ACI-440 ได้ออกแบบให้ระยะหุ้มคอนกรีตที่ใช้มีค่ามาก แต่ในการติดตั้งแบบใกล้ผิวความหนาของระยะหุ้มของอีพ๊อกซี่มีอย่างจำกัด ทำให้ความเค้นดึงทั้งระหว่างแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยกับอีพ๊อกซี่และระหว่างอีพ๊อกซี่กับคอนกรีตมีค่าสูงมากดังที่ได้กล่าวไป ทำให้ต้องใช้ระยะฝังยึดที่มากกว่า

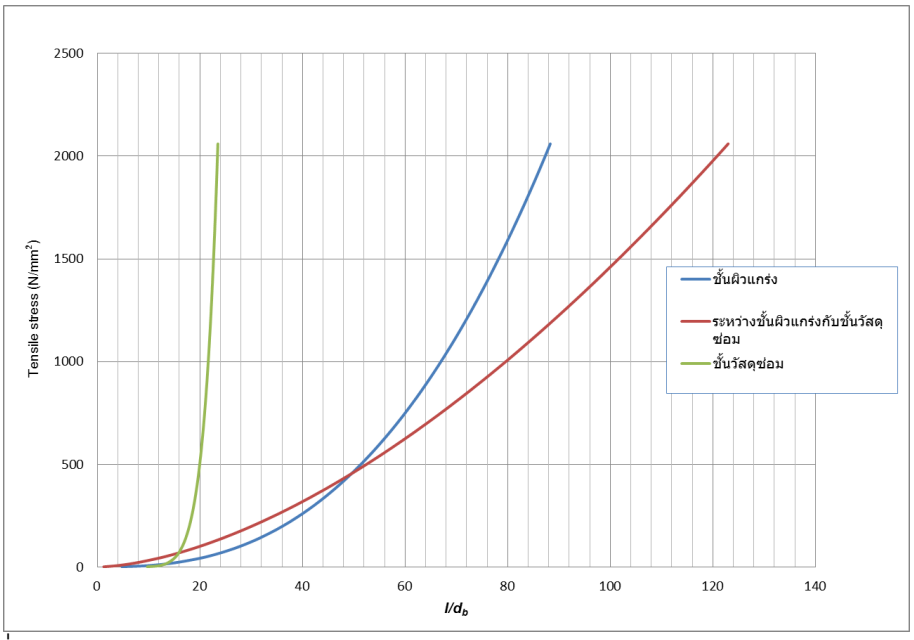
ดังนั้นการใช้สมการจากมาตรฐาน ACI-440 ยังมีข้อจำกัดหลายประการตามที่ได้กล่าวไป จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าที่ใช้เพื่อให้มีความเหมาะสมตามลักษณะการติดตั้งในแต่ละแบบ โดยจากสมการที่8,10และ18 สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่20

$$\frac{\sigma(x)}{\sigma_1} = \left(\frac{x}{l_m}\right)^{1+\alpha}/_{1-\alpha} \tag{20}$$

จากสมการที่20 สามารถแทน $x = l$ และได้สมการที่21

$$l = l_m\left(\frac{\sigma}{\sigma_1}\right)^{1-\alpha}/_{1+\alpha} \tag{21}$$

ซึ่งสามารถนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะฝังยึดต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกับความเค้นดึงในแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยดังภาพที่4-14



ภาพที่4-18 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะฝังยึดต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกับความเค้นดึงในแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

จากภาพที่ 4-18 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างระยะฝังยึดต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกับความเค้นดึงในแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในแต่ละค่าจนกระทั้งความเค้นดึงของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยวิบัติ แต่มาตรฐาน ACI-440 ได้แนะนำให้ใช้ความเค้นดึงที่40%ของความเค้นดึงที่จุดวิบัติ ดังนั้นค่าระยะฝังยึดต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่เหมาะสมกับการติดตั้งแบบวางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนบนชั้นวัสดุซ่อม ชั้นผิวแกร่งที่เชื่อมประสานด้วยอีพ๊อกซี่และระหว่างชั้นผิวแกร่งกับชั้นวัสดุซ่อมคือ 21.13,59.98และ 59.12 ตามลำดับ

4.3. ผลการทดสอบองค์อาคารรับแรงดัด

4.3.1 ผลการจำลองเพลิงไหม้

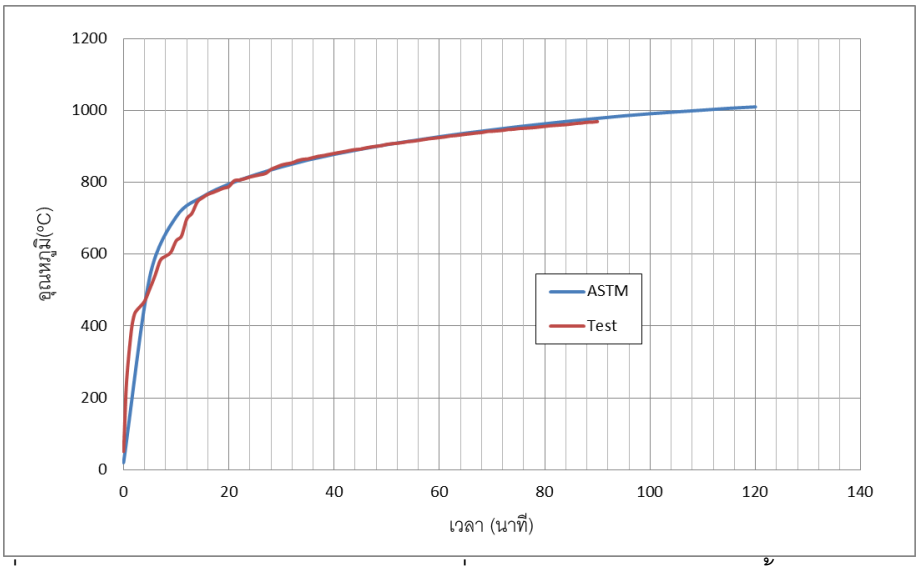
เมื่ออายุของชิ้นตัวอย่างมีไม่น้อยกว่า 28 วันแล้ว จึงนำชิ้นตัวอย่างเข้าเตาเผาที่เวลา 90 นาที โดยสามารถอธิบายผลได้ดังนี้

1. อุณหภูมิภายในเตา

อุณหภูมิภายในเตาที่เวลาต่างๆดังตารางที่ 4-4ถึง4-5 และมีผลเทียบกับกราฟไฟมาตรฐานแสดงดังภาพที่4-19และ4-20

ตารางที่4-4 อุณหภูมิที่เวลาต่างๆในเตาสำหรับการเผาชิ้นตัวอย่าง240ksc เป็นเวลา 90 นาที

เวลา (ชม.:นาที:วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชม.:นาที:วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชม.:นาที:วินาที)	อุณหภูมิ (°C)
0:00:00	51	0:28:00	836	0:59:00	923
0:00:10	101	0:29:00	842	1:00:00	925
0:00:39	251	0:30:00	848	1:01:00	926
0:01:27	390	0:31:00	852	1:02:00	929
0:02:03	432	0:32:00	854	1:03:00	930
0:02:42	445	0:33:00	860	1:04:00	932
0:03:00	452	0:34:12	864	1:05:00	934
0:04:00	469	0:35:00	865	1:06:00	935
0:05:03	504	0:36:00	869	1:07:00	937
0:06:00	541	0:37:00	873	1:08:00	938
0:07:21	583	0:38:00	875	1:09:00	941
0:08:00	594	0:39:00	878	1:10:00	942
0:09:00	606	0:40:00	880	1:12:00	945
0:10:00	637	0:42:30	887	1:13:15	947
0:11:00	650	0:43:00	889	1:14:00	948
0:12:00	698	0:44:00	891	1:15:03	950
0:13:00	714	0:45:00	892	1:16:00	950
0:14:00	745	0:46:00	896	1:17:00	951
0:15:00	757	0:47:00	898	1:18:00	952
0:16:00	766	0:48:00	900	1:19:00	954
0:17:00	772	0:49:12	902	1:20:00	956
0:18:00	778	0:50:18	906	1:21:00	957
0:19:03	784	0:51:00	908	1:22:00	958
0:20:00	788	0:52:00	909	1:23:00	959
0:21:00	804	0:53:00	911	1:24:00	961
0:22:00	806	0:54:00	913	1:25:00	962
0:23:00	810	0:55:00	914	1:26:00	964
0:24:00	815	0:56:00	917	1:27:00	965
0:25:00	818	0:56:57	919	1:28:24	967
0:26:00	821	0:57:00	919	1:29:00	967
0:27:00	825	0:58:00	921	1:30:00	969

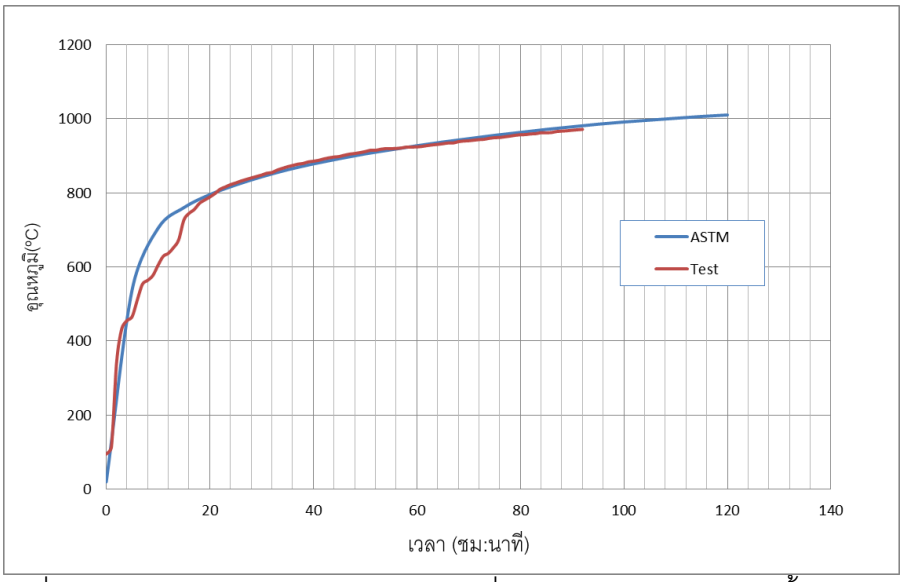


ภาพที่4-19 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตากับเวลา ของชิ้นตัวอย่าง240ksc

ตารางที่ 4-5 อุณหภูมิที่เวลาต่างๆในเตาสำหรับการเผาชิ้นตัวอย่าง350ksc เป็นเวลา90 นาที

เวลา (ชม.:นาที:วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชม.:นาที:วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (ชม.:นาที:วินาที)	อุณหภูมิ (°C)
0:00:00	50	0:31:12	853	1:01:00	929
0:00:03	95	0:32:06	855	1:02:00	930
0:01:00	114	0:34:00	861	1:03:00	932
0:02:00	343	0:35:06	866	1:04:00	934
0:03:00	433	0:37:00	870	1:05:00	934
0:04:00	455	0:38:09	874	1:06:00	938
0:05:03	466	0:39:00	877	1:07:00	940
0:06:00	511	0:40:00	879	1:08:00	940
0:07:30	553	0:41:00	883	1:09:00	942
0:08:00	564	0:42:00	885	1:10:00	944
0:09:00	577	0:43:00	888	1:11:00	944
0:10:00	604	0:44:00	891	1:12:00	947
0:11:03	629	0:45:00	894	1:13:00	949
0:12:00	637	0:46:00	896	1:14:00	949
0:13:00	652	0:47:00	898	1:15:00	951
0:14:00	673	0:48:06	901	1:16:00	953
0:15:00	727	0:49:00	904	1:17:00	955
0:16:00	745	0:50:00	906	1:18:00	957
0:17:00	755	0:51:00	908	1:19:00	957
0:18:00	771	0:52:00	911	1:20:00	959
0:19:00	780	0:53:45	915	1:21:00	960
0:20:00	788	0:54:00	915	1:21:57	962
0:21:03	798	0:55:00	917	1:23:00	962
0:22:06	810	0:55:51	919	1:24:00	963
0:23:00	816	0:56:00	919	1:25:00	965

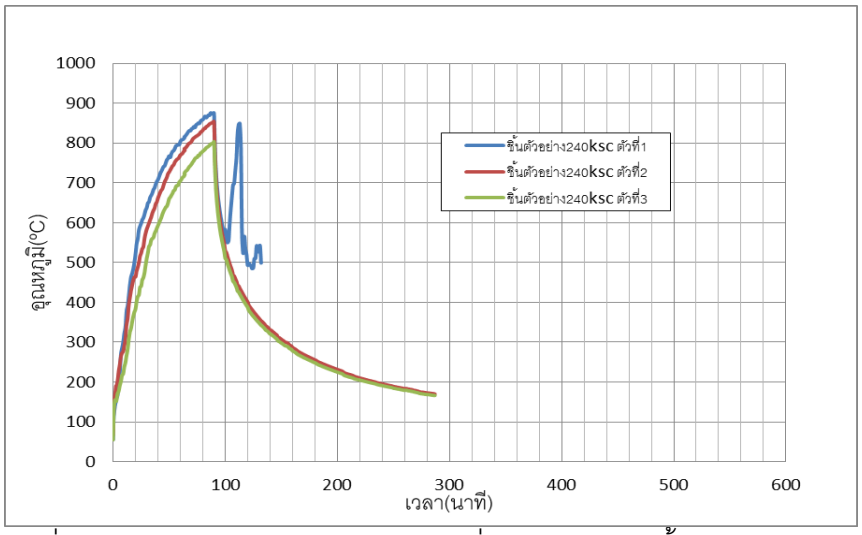
0:24:00	822	0:56:57	920	1:26:00	966
0:25:03	826	0:57:00	921	1:27:00	967
0:26:06	832	0:58:00	923	1:28:00	969
0:27:06	836	0:58:00	923	1:29:00	970
0:28:06	840	0:58:03	924	1:30:00	971
0:29:09	844	0:59:00	925		
0:30:00	848	1:00:00	927		



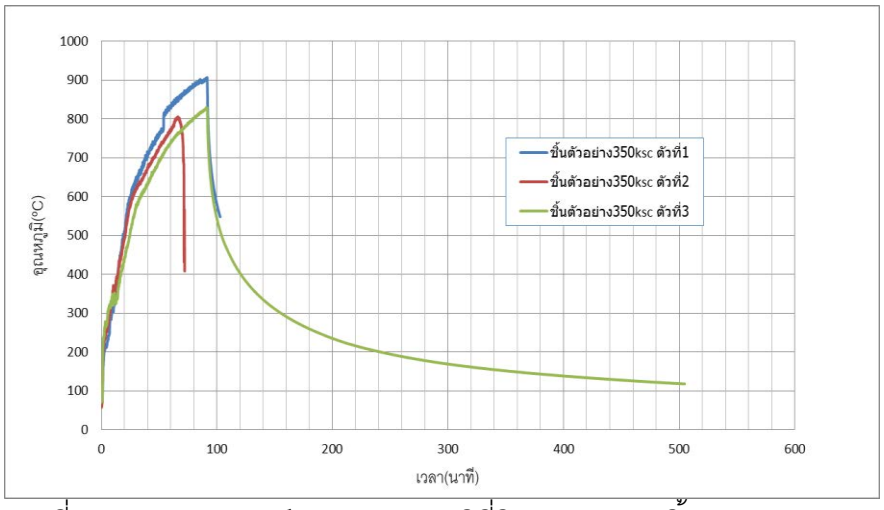
ภาพที่4-20 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตากับเวลาของชิ้นตัวอย่าง 350ksc

2. บนผิวชิ้นตัวอย่าง

ขณะเผาได้ใช้สายวัดอุณหภูมิวัดที่บริเวณกลางผิวของชิ้นตัวอย่าง โดยเก็บอุณหภูมิตั้งแต่เริ่มเผาจนถึงอุณหภูมิหลังดับไฟ โดยค่าอุณหภูมิที่วัดได้หลังจากดับไฟแล้วต้องมีค่าลดลงตามเวลาแต่สายวัดอุณหภูมิบางชิ้นตัวอย่างกลับมีค่าขึ้น-ลง ทั้งนี้เนื่องจากฉนวนหุ้มสายวัดเกิดละลายและบางเส้นก็เกิดขาดตรงหัววัดอุณหภูมิ ทั้งหมดแสดงในภาพที่4-21และภาพที่4-22



ภาพที่4-21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับเวลาของชิ้นตัวอย่าง240ksc



ภาพที่4-22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวกับเวลาของชิ้นตัวอย่าง350ksc

อุณหภูมิที่ผิวตัวอย่างกับอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาจะมีค่าแตกต่างกันประมาณ100°C และมีแนวโน้มคล้ายกับอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตา เมื่อหาพื้นที่ใต้กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่ผิวของแต่ละชิ้นตัวอย่างก็จะได้ความรุนแรงไฟ (Fire Severity) ดังแสดงในตารางที่ 4-6

ตารางที่4-6 ผลของความรุนแรงไฟ

กำลังอัดคอนกรีตที่ออกแบบ (กก./ซม.^{2})	ตัวอย่างที่	อุณหภูมิสูงสุด (°C)	ความรุนแรงของไฟ(°C.min)
240	SF1	875.8	$6.1x10^4$
	SF2	854.4	$5.8x10^4$
	SF3	803.3	$5.2x10^4$
350	SF4	906.9	$6.2x10^4$
	SF5	805.6	$3.8x10^4$
	SF6	829.6	$5.6x10^4$

ตารางที่4-7 สภาพผิวคอนกรีตหลังจากเผาไฟ

ลักษณะผิวของตัวอย่างหลังจากเผาไฟ	
240(กก./ซม.^{2})	350(กก./ซม.^{2})
SF1	SF4
SF2	SF5

SF3

SF6

ลักษณะความเสียหายที่พินิจด้วยสายตา

1. สี

ชิ้นตัวอย่างทั้ง2กำลัง มีสีเทาอ่อนปนส้มเมื่อเทียบกับด้านที่ไม่ถูกไฟเผา และมีรอยเขม่าโดยรอบ ซึ่งสันนิฐานว่าน้ำภายในที่ระเหยออกทำให้มีสีที่อ่อนลง อีกทั้งปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของออกไซด์เหล็กในมวลรวมทำให้มีสีส้ม/แดงแสดงในตารางที่4-7

2. รอยร้าว

ชิ้นตัวอย่างทั้ง2กำลัง มีรอยร้าวขนาดเล็กแต่ยาวประมาณ10-13เซนติเมตรที่ผิวด้านข้าง ซึ่งน่าจะเกิดจากการขยายตัวของไอน้ำในคอนกรีตดันออกมาโดยสังเกตได้จากขณะเผามีน้ำไหลซึมออกมาด้านข้าง ดังภาพที่4-23และ 4-24 แต่ที่ผิวหน้าของคอนกรีตด้านที่โดนไฟโดยตรงจะมีรอยแตกร้าวในคอนกรีตกำลังรับแรงอัด240กก./ซม.^{2}เท่านั้น แต่ในคอนกรีตกำลังรับแรงอัด350กก./ซม.^{2}จะพบแค่การเปลี่ยนแปลงของสีและมีรอยร้าวแค่เล็กน้อยบางจุดของผิวหน้าคอนกรีต

3. การหลุดล่อน

ตัวอย่างทั้งหมดไม่พบเห็นการหลุดล่อนที่ชัดเจน

ภาพที่4-23 น้ำในคอนกรีตที่ซึมออกมาขณะเผาไฟ

ภาพที่4-24 สีและรอยร้าวหลังจากเก็บชิ้นตัวอย่างลงมา

4.3.2 **ผลการดึงทดสอบ** (Pull-off test)

ก่อนจะทำการติดตั้งแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนลงไปจำเป็นต้องตรวจสอบแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตเดิมด้วยวิธีดึงทดสอบที่โดยจะทดสอบที่ระดับความลึก0ซม.และ 5 ซม.[3] ซึ่งสกัดโดยสว่านกระแทกและเครื่องเจียร ผลที่ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 4-8 ทั้งนี้ตามคู่มือ fib[34] กำลังดึงทดสอบที่ยอมให้สำหรับงานซ่อมของคอนกรีตที่เสียหายจากเพลิงไหม้คือ 1.5 เมกะปาสคาล ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในจึงยึดถือว่า กำลังดึงทดสอบที่ยอมให้สำหรับงานซ่อม(ผิวแกร่ง)คือ 1.5เมกะปาสคาล หรือมีค่าเท่ากับ 3กิโลนิวตัน เมื่อทดสอบด้วยลูกเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม.

ผลการดึงทดสอบสำหรับผิวแกร่ง สามารถอธิบายผลได้ว่า การทดสอบชิ้นตัวอย่างทุกชิ้นที่ระยะ 5ซม.จากผิว ไม่พบค่าทดสอบที่มากกว่า 3.0 กิโลนิวตันแต่จะมีบางจุดที่มีค่ามากกว่า3.0 กิโลนิวตัน ซึ่งอาจเป็นจุดที่ไม่ได้รับผลกระทบของไฟมากนัก ส่วนคอนกรีตที่มีกำลัง 240กก./ซม.^{2} (SF2,SF3) มีกำลังรับแรงดึงไม่แตกต่างมากนักกับคอนกรีตที่มีกำลัง350 กก./ซม.^{2} (SF4,SF5,SF6)แต่การทดสอบชิ้นตัวอย่างที่ระยะ 0 เซนติเมตรจากผิวตัวอย่างที่ไม่ได้เผาไฟ(SC1,SC2)มีค่ามากกว่า3.0 กิโลนิวตันทุกตัวแต่ตัวอย่างที่ถูกเผาไฟ(SF1) มีค่าน้อยมากจนถึงไม่สามารถทดสอบได้เลยก็มีซึ่งแสดงให้เห็นว่าไฟสามารถทำลายกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตได้ และผลของไฟจะลดลงเมื่อความลึกจากผิวคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่4-8 ผลการดึงทดสอบแผ่นพื้นตัวอย่าง

ครั้งที่	แผ่นพื้นที่ทดสอบ							
	SC1	SC2	SF1	SF2	SF3	SF4	SF5	SF6
	ระยะจากผิว(เซนติเมตร)							
	0 cm			5 cm.				
1	4.35	7.10	0.70	4.50	2.10	1.00	1.60	3.50
2	5.80	7.30	N/A	0.25	1.80	1.90	1.60	2.70
3	4.90	6.50	0.75	0.50	1.50	0.90	1.00	1.65
เฉลี่ย(กิโลนิวตัน)	5.02	6.97	0.73	1.75	1.80	1.27	1.40	2.62
เฉลี่ย(เมกะปาสคาล)	2.55	3.55	0.37	0.88	0.90	0.62	0.70	1.35

4.3.3 ผลการเจาะทดสอบคอนกรีต

หลังจากนำแผ่นพื้นตัวอย่างไปทดสอบกำลังรับแรงดัดแล้ว ได้มีการเจาะทดสอบตัวอย่างคอนกรีต ผลปรากฏว่าสีของคอนกรีตส่วนที่เผาไฟนั้นเปลี่ยนเป็นสีส้ม/แดง ลึกจากผิวประมาณ5เซนติเมตรซึ่งแสดงดังภาพที่4-25 หลังจากนั้นจึงนำชิ้นตัวอย่างไปตัดให้ได้อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ2 แต่มีตัวอย่างบางตัวเกิดหักขณะตัดจึงไม่สามารทดสอบได้ หลังจากนั้นจึงนำไปกดทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C-42 โดยกำลังอัดหลังจากเผาไฟแล้วของตัวอย่างกำลังอัด 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรมีค่ากำลังอัดลดลงจากเดิม41.46% ดังตารางที่4-9 ซึ่งเป็นเหตุผลทำให้กำลังรับน้ำหนักและความแข็งแกร่งของพื้นตัวอย่างที่ถูกเผาไฟมีค่าลดลง

ภาพที่4-25 ผลการเจาะทดสอบคอนกรีตกำลังอัด240ksc
ไม่ได้เผาไฟ(ซ้าย)เผาไฟ90นาที(ขวา)

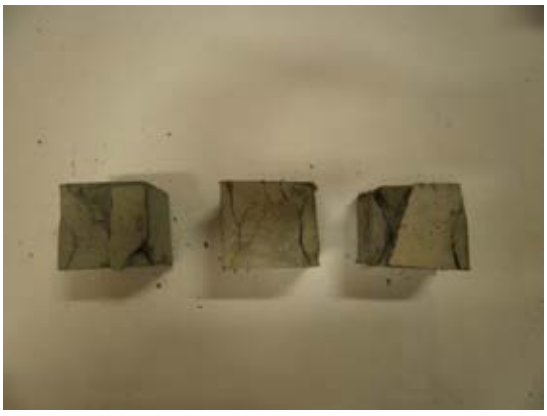
ตารางที่4-9 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

ค่ากำลังอัดที่ออกแบบ (กก/ซม.^{2})	ค่าจริง (กก/ซม.^{2})			
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	เฉลี่ย
240	303.14	192.91	N/A	248.02
350	264.56	297.63	353.57	305.25
240 เผาไฟ90นาที	62.00	155.70	217.85	145.19

4.3.4 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อม

1.ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อม

ค่ากำลังรับแรงอัดของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อมได้จากการนำน้ำหนักกระทำที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบต่อพื้นที่หน้าตัดที่วัดจากชิ้นตัวอย่างแสดงดังตารางที่4-10และลักษณะการวิบัติแสดงดังภาพที่4-26 ซึ่งผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของอีพ๊อกซี่มีค่าเฉลี่ยมากกว่าของวัสดุซ่อมถึงเกือบ2เท่า ที่เวลาในการบ่ม7วัน และการพัฒนากำลังก็รวดเร็วกว่าวัสดุซ่อมอีกด้วย



ภาพที่4-26 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัด

ตารางที่4-10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อม

ชนิดของวัสดุ	เวลาในการบ่ม	ค่ากำลังที่วัดได้ (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
		1	2	3	เฉลี่ย
อีพ๊อกซี่	3วัน	580.55	630.59	541.44	584.19
	7วัน	750.61	730.54	738.51	739.88
วัสดุซ่อม	3วัน	330.51	339.81	268.86	313.06
	7วัน	353.32	325.51	352.00	343.61

2.ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อม

ค่ากำลังรับแรงดึงของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อมได้จากการนำน้ำหนักกระทำที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบหารด้วยพื้นที่หน้าตัดที่วัดจากชิ้นตัวอย่างส่วนที่วิบัติแสดงดังตารางที่4-11 และลักษณะการวิบัติแสดงดังภาพที่4-27 ซึ่งผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงดึงของอีพ๊อกซี่มีค่าเฉลี่ยมากกว่าของวัสดุซ่อมถึงประมาณ10เท่าที่เวลาในการบ่ม7วัน เนื่องจากอีพ๊อกซี่เป็นวัสดุประเภทอิลาสติกทำให้กำลังรับแรงดึงมีค่ามากกว่าวัสดุซ่อมซึ่งเป็นมอร์ตา

ภาพที่4-27 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดึง

ตารางที่4-11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อม

ชนิดของวัสดุ	เวลาในการบ่ม	ค่ากำลังที่วัดได้ (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
		1	2	3	เฉลี่ย
อีพ๊อกซี่	3วัน	247.33	218.12	247.25	237.57
	7วัน	275.60	268.96	288.21	277.59
วัสดุซ่อม	3วัน	20.98	24.86	20.93	22.25
	7วัน	24.75	27.38	28.36	26.83

3.ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อม

ค่ากำลังรับแรงดัดของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อมสามารถหาได้จากสมการที่22 แสดงดังตารางที่4-12 และลักษณะการวิบัติแสดงดังภาพที่4-28 ซึ่งผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงดึงของอีพ๊อกซี่มีค่าเฉลี่ยมากกว่าของวัสดุซ่อมถึงประมาณ6 เท่าที่เวลาในการบ่ม7วัน

$$f_r = \frac{Mc}{I} \tag{22}$$

โดยที่ f_r = กำลังรับแรงดัด

M =โมเมนต์ดัด

c = ระยะจากแกนสะเทินถึงผิวส่วนรับแรงดึงสูงสุด

I = โมเมนต์ความเฉื่อย

ภาพที่4-28 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงดัด

ตารางที่4-12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของอีพ๊อกซี่และวัสดุซ่อม

ชนิดของวัสดุ	เวลาในการบ่ม	ค่ากำลังที่วัดได้ (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)			
		1	2	3	เฉลี่ย
อีพ๊อกซี่	3วัน	336.03	375.60	356.01	355.88
	7วัน	455.05	421.60	484.62	453.75
วัสดุซ่อม	3วัน	57.53	57.16	57.16	57.28
	7วัน	78.31	70.41	70.01	72.94

ถึงแม้ว่าผลการทดสอบที่ได้จะยืนยันว่าว่าทั้งกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง และกำลังรับแรงดัดของอีพ๊อกซี่มีค่ามากกว่าวัสดุซ่อมหลายเท่าตัว แต่อย่างไรก็ตามต้นทุนของวัสดุซ่อมมีราคาที่ต่ำกว่าอีพ๊อกซี่มาก อีกทั้งความทนทานต่อไฟก็ยังมีค่ามากกว่าอีพ๊อกซี่ ซึ่งหากเกิดเหตุเพลิงไหม้อีกครั้งวัสดุซ่อมก็สามารถป้องกันองค์อาคารให้มีความต้านทานต่อไฟนานขึ้น รวมถึงกำลังของวัสดุซ่อมก็ไม่ได้มีค่าน้อยกว่ากำลังของคอนกรีตหลังจากถูกเผาไฟ ดังนั้นการใช้วัสดุซ่อมชนิดนี้ในการซ่อมแซมองค์อาคารรับแรงดัดจึงมีความเหมาะสมสำหรับการเพิ่มกำลังและความแข็งแกร่งขององค์อาคารรับแรงดัดหลังจากเพลิงไหม้ได้ดีกว่าอีพ๊อกซี่

4.3.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดในตารางที่4-13 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างรับแรงดัดที่ได้รับผลกระทบจากเพลิงไหม้นั้นทำให้กำลังรับแรงดัดลดลงประมาณ8% และการเสริมกำลังด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยนั้นสามารถทำให้กำลังเพิ่มขึ้นก่อนถูกไฟเผาเฉลี่ยถึงประมาณ200% แต่ก็จะมีผลทำให้ลักษณะการวิบัติเปลี่ยนไปเป็นแบบเฉือนซึ่งเกิดแบบทันทีทันใด ดังนั้นหากต้องการเสริมกำลังด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องพิจารณาหน่วยแรงและหน่วยการยืดหดตัว รวมถึงกำลังรับน้ำหนักของทั้งระบบให้เหมาะสมและไม่เกิดการวิบัติแบบเฉือน

ตารางที่4-13 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด

ชื่อตัวอย่าง	เวลาในการเผาไฟ	กำลังอัดที่ออกแบบของคอนกรีต (กก./ซม.^{2})	น้ำหนักกระทำสูงสุด (ตัน)	ระยะโก่งตัวที่น้ำหนักกระทำสูงสุด (มม.)	SF/SC	ลักษณะการวิบัติ
SC1	ไม่เผา	240	10.94	5.25	1	แบบดัด
SC2		350	11.24	6.41	1	แบบดัด
SF1	เผา90นาที	240	10.14	6.68	0.92	แบบดัด
SF2		240	21.44	4.85	2.05	แบบเฉือน
SF3		240	20.97	4.47	1.91	แบบเฉือน
SF4		350	19.55	5.55	1.74	แบบเฉือน
SF5		350	22.69	5.66	2.01	แบบเฉือน
SF6		350	20.36	4.18	1.81	แบบเฉือน

ภาพที่4-29 ถึงภาพที่4-44 แสดงลักษณะการวิบัติของพื้นคอนกรีตโดยชิ้นตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกเผาไฟ(SC1,SC2)และชิ้นตัวอย่างที่ถูกเผาไฟแต่ไม่ได้ซ่อมแซม(SF1)จะมีลักษณะการวิบัติแบบดัดส่วนตัวอย่างที่เผาไฟและซ่อมแซมในช่วงแรกจะมีรอยแตกร้าวแบบดัดจนถึงประมาณ16-18ตันจากนั้นจะมีรอยแตกร้าวแบบเฉือนและแบบดัดร่วมด้วยจนถึงจุดวิบัติโดยในตัวอย่างที่วางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยระหว่างชั้นผิวแกร่งและวัสดุซ่อม(SF6)เป็นตัวอย่างเดียวที่มีการแบ่งชั้นระหว่างวัสดุซ่อมกับชั้นผิวแกร่ง ตัวอย่างอื่นๆนั้นจะมีรอยร้าวที่ต่อเนื่องจากวัสดุซ่อมถึงคอนกรีตเดิมโดยมีรายละเอียดของรอยร้าวในแต่ละตัวอย่างดังนี้

จากภาพที่4-29และ 4-30 แสดงลักษณะการวิบัติและรอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSC1โดยรอยร้าวแรกจะเกิดที่น้ำหนักกระทำ8 ตันโดยเป็นรอยร้าวแบบดัดตรงกึ่งกลางตัวอย่าง และรอยร้าวจะมีความยาวมากขึ้นและใหญ่ขึ้นเมื่อมีน้ำหนักกระทำที่10ตันจนกระทั่งถึงจุดวิบัติ

จากภาพที่4-31และ 4-32 แสดงลักษณะการวิบัติและรอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSC2 โดยรอยร้าวแรกจะเกิดที่น้ำหนักกระทำ8 ตันเช่นเดียวกับตัวอย่างSC1แต่เกิดที่ระยะห่างจากจุดกึ่งกลางทั้งสองด้าน10เซนติเมตรอย่างสมดุล จากนั้นเมื่อถึงน้ำหนักกระทำที่10ตันรอยร้าวจะยาวขึ้นแต่ขนาดของรอยร้าวยังมีขนาดเล็กอยู่และเมื่อถึงจุดวิบัติรอยร้าวยังมีความยาวเท่าเดิมแต่จะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นโดยยังคงเป็นการวิบัติแบบดัด

จากภาพที่4-33และ 4-34 แสดงลักษณะการวิบัติและรอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSF1 โดยรอยร้าวแรกจะเกิดที่น้ำหนักกระทำ6 ตัน และมีความยาวมากเกือบถึงผิวคอนกรีตด้านบนหลังจากนั้นเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำขึ้นไปเรื่อยๆความยาวของรอยร้าวก็จะเพิ่มมากขึ้นโดยที่ขนาดยังคงเท่าเดิมอยู่

จากภาพที่4-35และ 4-36 แสดงลักษณะการวิบัติและรอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSF2 โดยรอยร้าวแรกจะเกิดที่น้ำหนักกระทำ6 ตัน แต่ยังเป็นรอยร้าวขนาดเล็กและสั้น เมื่อให้น้ำหนักกระทำไปเรื่อยๆความยาวของรอยร้าวจะเพิ่มมากขึ้นโดยที่ขนาดยังไม่ต่างจากเดิมมากนัก จนกระทั่งน้ำหนักกระทำขึ้นไปถึง18ตันรอยร้าวแบบดัดก็จะเริ่มเป็นรอยร้าวแบบเฉือนในชั้นคอนกรีตเดิม และเมื่อน้ำนักกระทำที่22ตันก็จะเห็นรอยร้าวแบบเฉือนชัดเจนมีขนาดใหญ่และยาวเพิ่มขึ้นจนกระทั่งวิบัติ

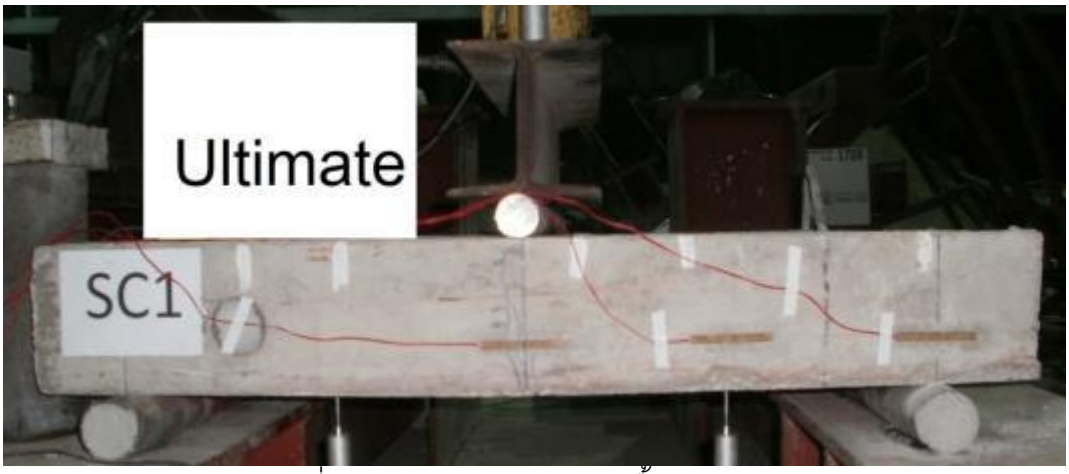
จากภาพที่4-37และ 4-38 แสดงลักษณะการวิบัติและรอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSF3 โดยรอยร้าวแรกจะเกิดที่น้ำหนักกระทำ6 ตัน แต่ยังเป็นรอยร้าวขนาดเล็กและสั้น เมื่อให้น้ำหนักกระทำไปเรื่อยๆความยาวของรอยร้าวจะเพิ่มมากขึ้นและจำนวนของรอยร้าวก็ยังเพิ่มมากขึ้นแต่เพิ่มขึ้นแค่ฝั่งเดียวซึ่งอาจเป็นเพราะผิวของวัสดุซ่อมตอนฉาบไม่เรียบเสมอ

กันทำให้การให้น้ำหนักกระทำไม่สมดุล แต่หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำจนถึง20ตันผิววัสดุซ่อมส่วนที่อยู่บนจุดรองรับถูกกดจนแตกออกทำให้ระบบเริ่มสมดุลและมีรอยร้าวอีกฝั่งหนึ่งแต่เป็นรอยร้าวแบบเฉือนและเมื่อให้น้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้นอีกรอยร้าวก็มีความกว้างมากขึ้นจนถึงจุดวิบัติ

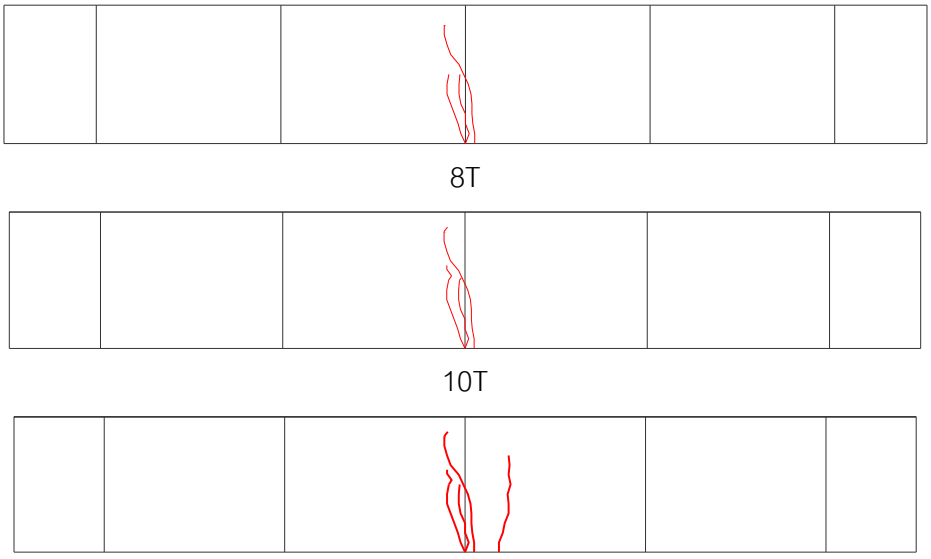
จากภาพที่4-39และ 4-40 แสดงลักษณะการวิบัติและรอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSF4 โดยรอยร้าวแรกจะเกิดที่น้ำหนักกระทำ6 ตันโดยยังเป็นรอยร้าวแบบดัดอยู่แต่เมื่อถึงน้ำหนักกระทำที่12ตันรอยร้าวในคอนกรีตเดิมจะเริ่มเป็นรอยร้าวแบบเฉือนแต่ยังมีขนาดเล็กอยู่จนกระทั่งเมื่อน้ำหนักกระทำเกิน18ตันไปแล้วรอยร้าวมีจำนวนเพิ่มขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้นมากและเมื่อถึงใกล้จุดวิบัติรอยร้าวแบบเฉือนจะวิ่งจากกึ่งกลางไปหาจุดรองรับจนกระทั่งวิบัติ

จากภาพที่4-41และ 4-42 แสดงลักษณะการวิบัติและรอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSF5 โดยรอยร้าวแรกจะเกิดที่น้ำหนักกระทำ6 ตัน ซึ่งมีทั้งรอยร้าวแบบดัดและแบบเฉือน แต่รอยร้าวจะยังคงมีจำนวนและขนาดเท่าเดิมจนถึงน้ำหนักกระทำที่22ตัน รอยร้าวจะมีขนาดใหญ่ขึ้นแต่ก็ยังคงมีจำนวนเท่าเดิมอยู่จนกระทั่งวิบัติ

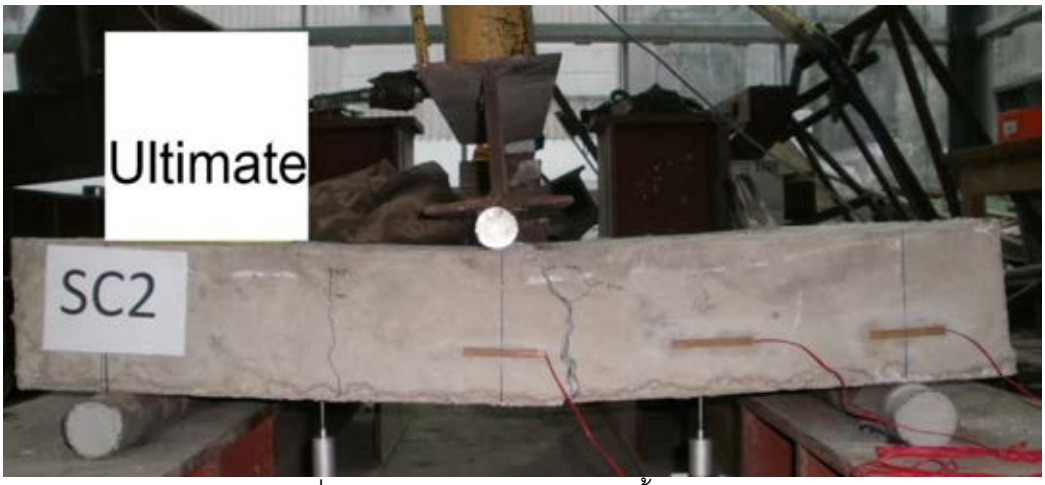
จากภาพที่4-43และ 4-44 แสดงลักษณะการวิบัติและรอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSF6 โดยรอยร้าวแรกจะเกิดที่น้ำหนักกระทำ6 ตันเช่นเดิม และความยาวของรอยร้าวจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆโดยที่ไม่เพิ่มจำนวนและความกว้างจนกระทั่งถึงน้ำหนักกระทำที่20ตัน รอยร้าวในคอนกรีตเดิมจะเริ่มเป็นรอยร้าวแบบเฉือนและรอยร้าวแบบเฉือนจะเพิ่มขึ้นทั้งความกว้างและขนาดแต่ที่น่าสังเกตคือในตัวอย่างนี้มีการแบ่งชั้นกันระหว่างคอนกรีตเดิมกับวัสดุซ่อมอย่างเห็นได้ชัดซึ่งอาจจะมาจากการที่วางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยไว้ระหว่างชั้นทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นรอบๆแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่ามากสุดตรงรอยต่อซึ่งส่งผลให้คอนกรีตเดิมเกิดการแยกชั้นกับวัสดุซ่อมแสดงดังภาพที่4-7



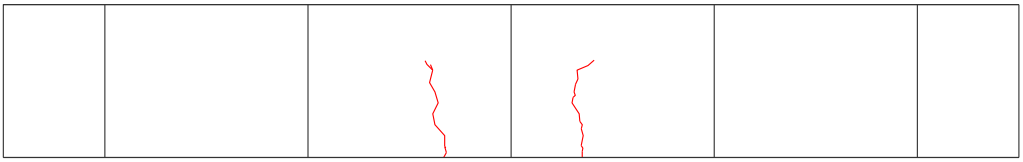
ภาพที่4-29 ลักษณะการวิบัติของพื้นตัวอย่างSC1



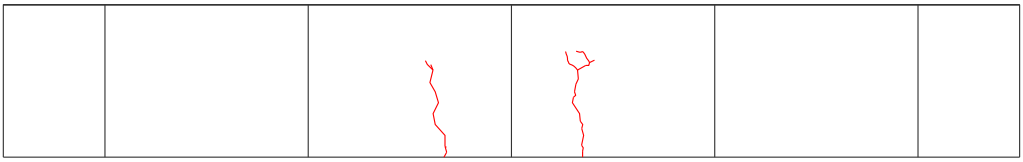
ภาพที่4-30 รอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSC1



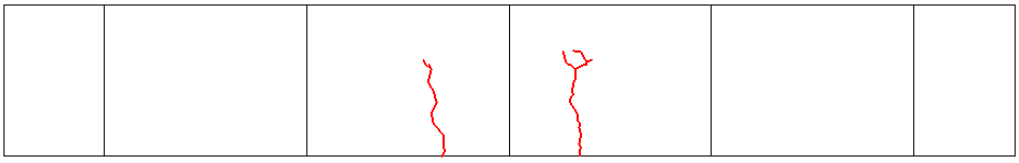
ภาพที่4-31 ลักษณะการวิบัติของพื้นตัวอย่างSC2



8T



10T

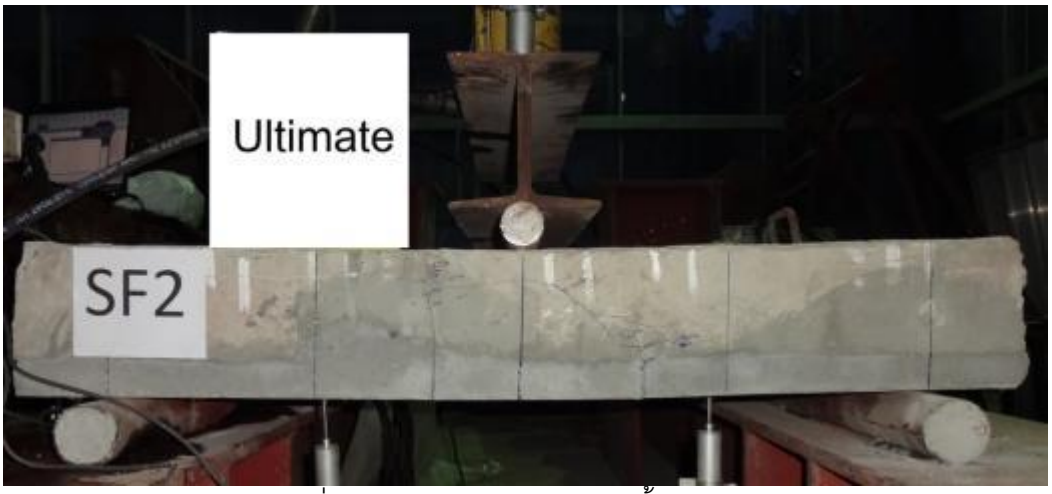


Ultimate

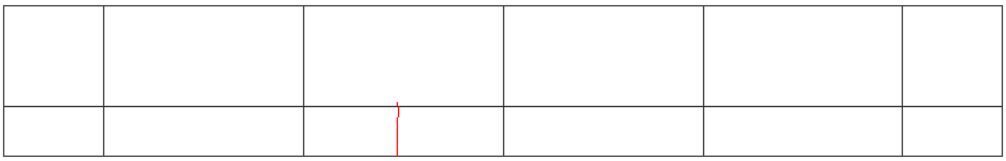
ภาพที่4-32 รอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSC2

ภาพที่4-33 ลักษณะการวิบัติของพื้นตัวอย่างSF1

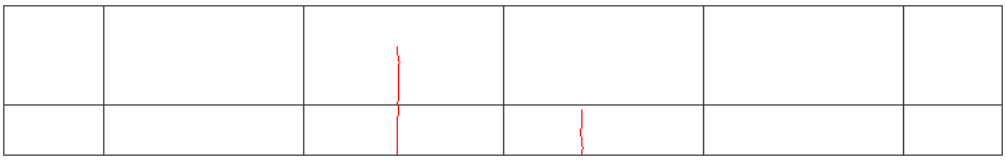
ภาพที่4-34 รอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSF1



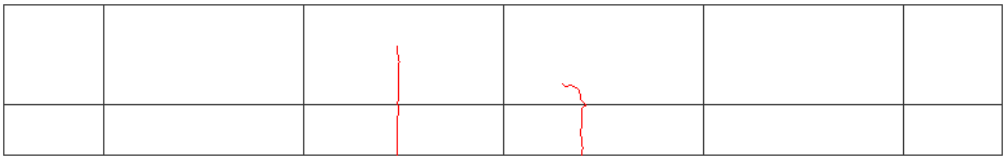
ภาพที่4-35 ลักษณะการวิบัติของพื้นตัวอย่างSF2



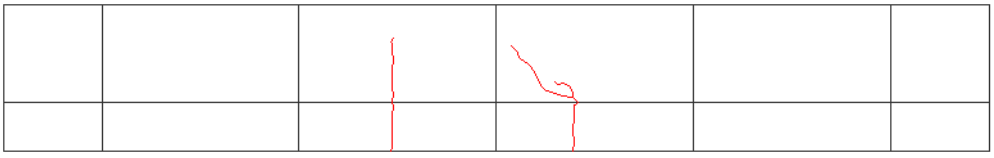
6T



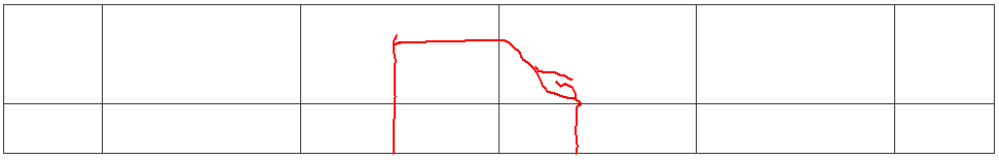
12T



18T



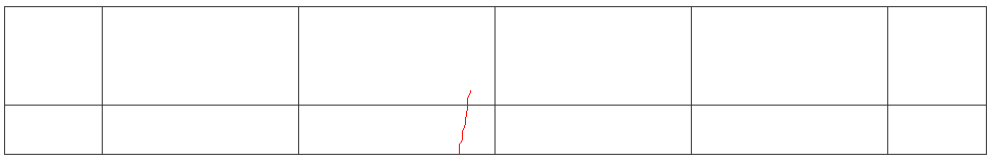
20T



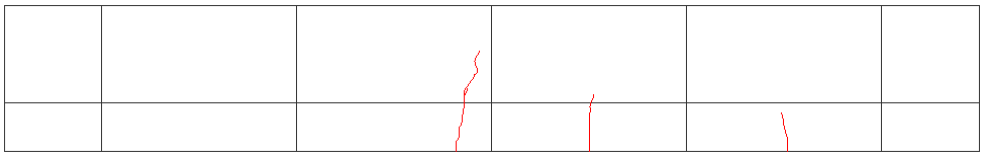
Ultimate

ภาพที่4-36 รอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSF2

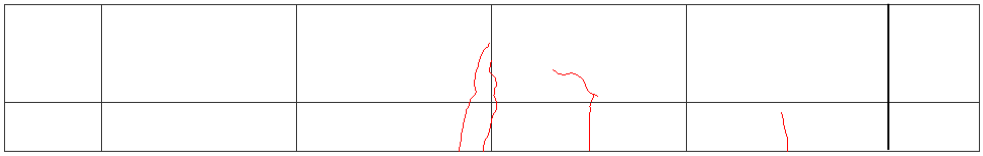
ภาพที่4-37 ลักษณะการวิบัติของพื้นตัวอย่างSF3



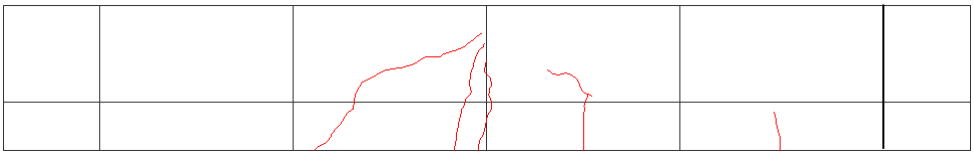
6T



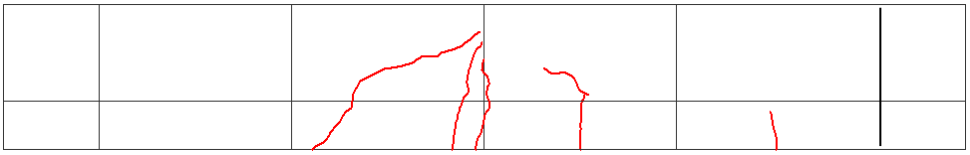
12T



18T



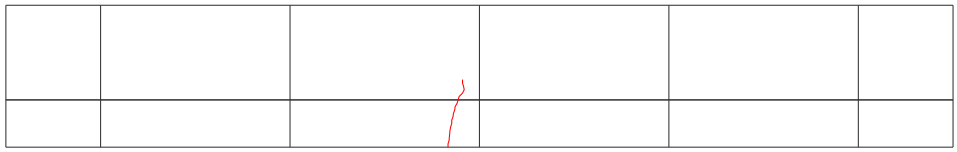
20T



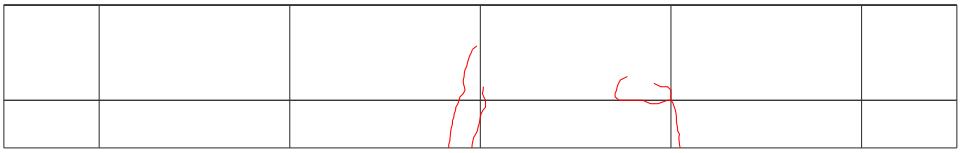
Ultimate

ภาพที่4-38 รอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSF3

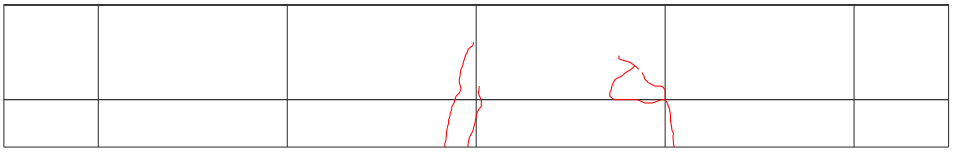
ภาพที่4-39 ลักษณะการวิบัติของพื้นตัวอย่างSF4



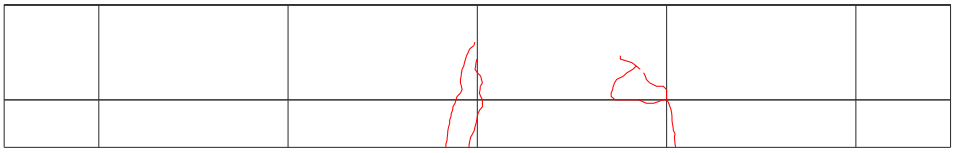
6T



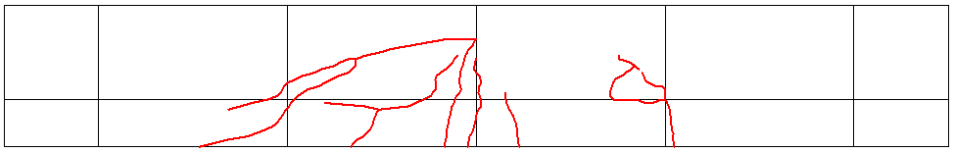
12T



16T



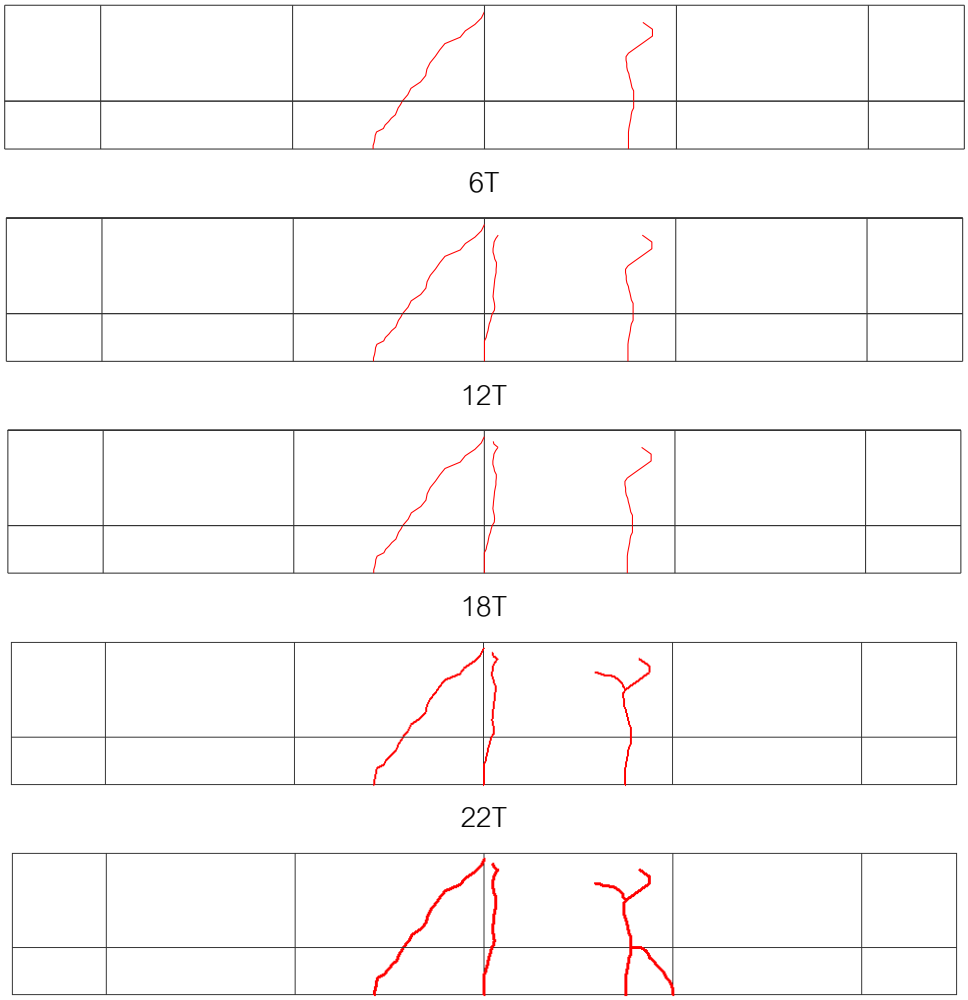
18T



Ultimate

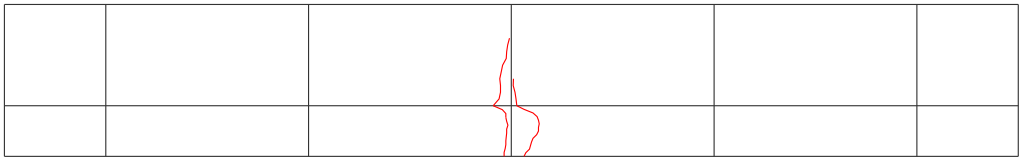
ภาพที่4-40 รอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSF4

ภาพที่4-41 ลักษณะการวิบัติของพื้นตัวอย่างSF5

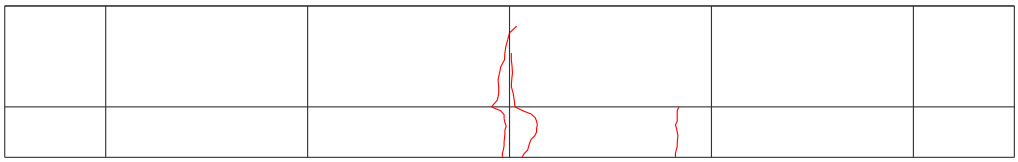


ภาพที่4-42 รอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSF5

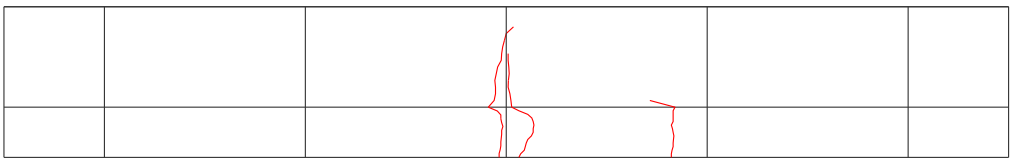
ภาพที่4-43 ลักษณะการวิบัติของพื้นตัวอย่างSF6



6T

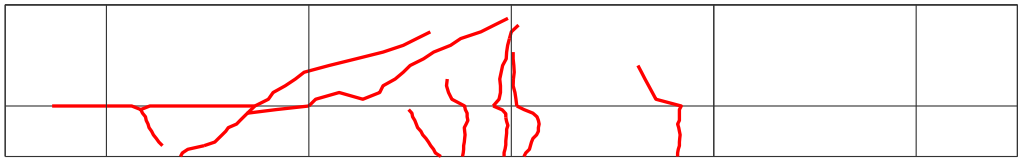


16T



20T

22T



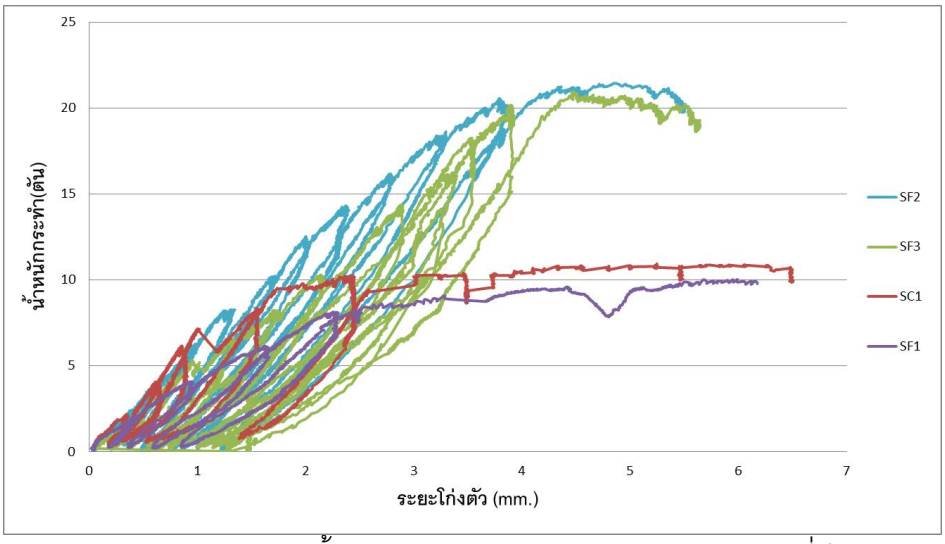
Ultimate

ภาพที่4-44 รอยร้าวในแต่ละน้ำหนักกระทำของของพื้นตัวอย่างSF6

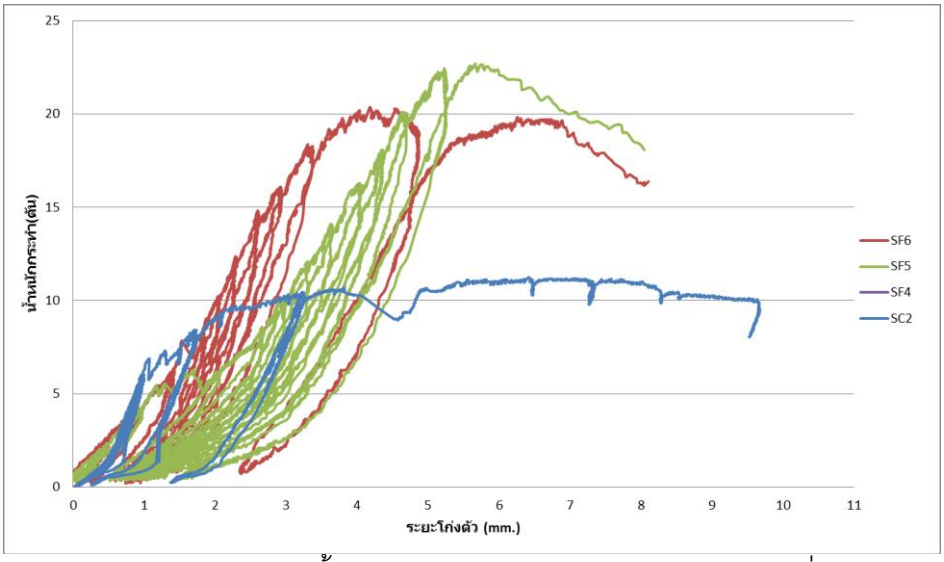
ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและระยะการโก่งตัวของตัวอย่างที่ได้รับผลกระทบจากไฟแสดงได้ดังภาพที่4-45โดยเมื่อเทียบค่าความแข็งแกร่ง(ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและระยะโก่งตัวในช่วงก่อนคอนกรีตเกิดรอยร้าว)จะพบว่าความแข็งแกร่งของตัวอย่างSF1มีค่าลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างSC1แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งแกร่งลดลงเนื่องมาจากกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตมีค่าลดลง[6]

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและระยะการโก่งตัวของตัวอย่างทีมีระยะจัดเรียงห่างจากเหล็กเสริมต่างกัน แสดงดังภาพที่4-47โดยตัวอย่าง SF2และตัวอย่างSF3ค่าความแข็งแกร่งเพิ่มขึ้นหลังจากเผาไฟจนเทียบเท่ากับตัวอย่างก่อนถูกเผาไฟแต่การเสริมกำลังโดยวางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยไว้ใกล้เหล็กเสริมมีค่าความแข็งแกร่งสูงกว่าการเสริมกำลังแบบสลับฟันปลาแสดงรายละเอียดดังภาพที่4-46 ซึ่งน่าจะมาจากรอยร้าวที่เกิดขึ้นมักจะเกิดที่บริเวณรอบๆเหล็กเสริมซึ่งทำให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยหลังจากเกิดรอยร้าวลดลงเรื่อยๆแต่หากนำเอาแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยไปติดไว้ใกล้ๆกับเหล็กเสริมก็จะสามารถชะลอหรือหยุดรอยร้าวนั้นๆไม่ให้ร้าวเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งแกร่งและกำลังรับน้ำหนักเพิ่มขึ้นอีกด้วย

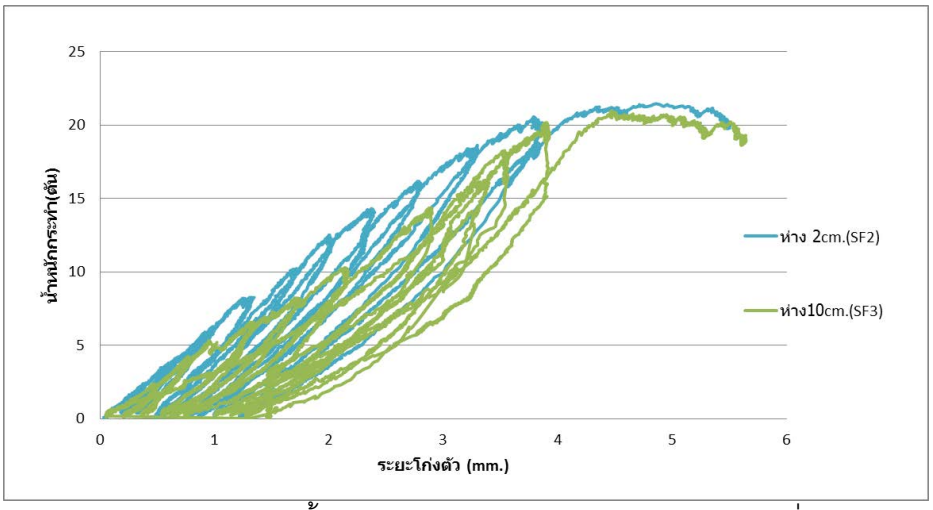
ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและระยะการโก่งตัวของตัวอย่างที่มีการวางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในชั้นต่างกัน แสดงได้ดังภาพที่4-48 ซึ่งตัวอย่างทั้งหมดสามารถเพิ่มกำลังรับแรงดัดขององค์อาคารได้จริงแสดงได้ดังภาพที่4-46 แต่ผลการทดสอบที่ได้เป็นการวิบัติด้วยแรงเฉือนเนื่องจากมีการเสริมกำลังรับแรงดัดจนเกินกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่าง แต่อย่างไรก็ตามหากพิจารณาถึงผลของกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวจากการวางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยบนชั้นวัสดุซ่อมที่มีค่ามากที่สุด อีกทั้งความง่ายและระยะเวลาในการติดตั้งน้อยกว่าวิธีอื่นทำให้วิธีนี้น่าจะเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการวางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในที่ต่างกันทั้ง3แบบ



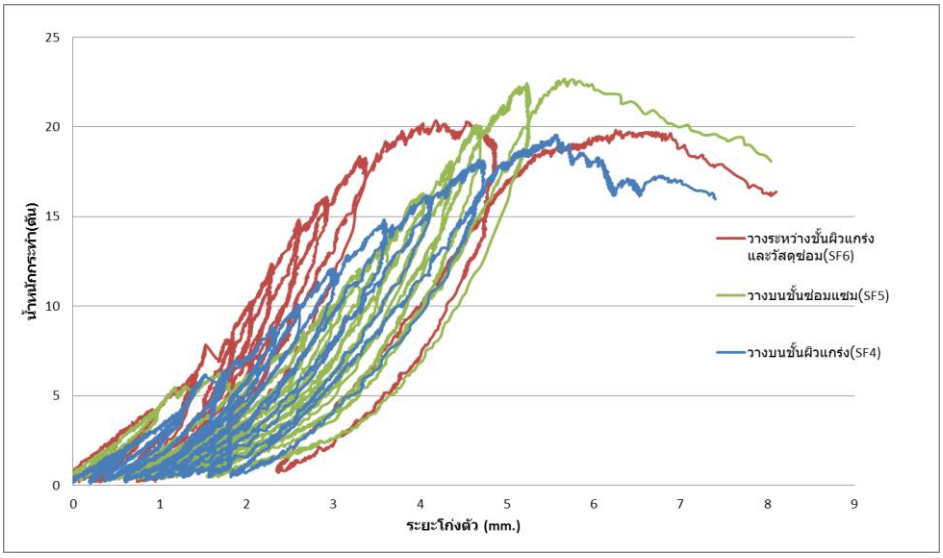
ภาพที่4-45 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและระยะโก่งตัวของตัวอย่างที่มีกำลังคอนกรีต 240ksc



ภาพที่4-46 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและระยะโก่งตัวของตัวอย่างที่มีกำลังคอนกรีต 350ksc



ภาพที่4-47 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและระยะโก่งตัวของตัวอย่างที่มีการวางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยห่างจากเหล็กเสริมต่างกัน



ภาพที่4-48 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและระยะโก่งตัวของตัวอย่างที่มีการวางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในชั้นต่างกัน

บทที่ 5
สรุปผล

1.1 สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงดึง

1.1.1 การวิบัติของแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนจะเป็นแบบไม้กวาด

1.1.2 พฤติกรรมในการรับแรงดึงเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติโดยไม่เกิดจุดคราก เหมือนเหล็กเสริม

1.2 สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยว

1.2.1 การวางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในชั้นวัสดุซ่อมจะสามารถรับแรงยึดเหนี่ยวได้ดีกว่าวางในชั้นผิวแกร่งและระหว่างชั้นผิวแกร่งกับวัสดุซ่อมตามลำดับ

1.2.2 ค่าความเครียดจะเกิดน้อยมากจนแทบจะเป็นศูนย์ที่จุดปลายอิสระและจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนมากที่สุดตรงจุดปลายยึดรั้งโดยอัตราการเพิ่มขึ้นจะสมมูลกับแรงกระทำขณะใดๆ

1.3 สรุปผลการทดสอบกำลังรับแรงดัด

1.3.1 ผลของไฟสามารถทำลายกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างอณุภาคของคอนกรีตได้ และผลของไฟจะลดลงเมื่อความลึกจากผิวคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น ซึ่งทำให้ค่าความแข็งแกร่งและกำลังรับน้ำหนักขององค์อาคารรับแรงดัดมีค่าลดลง

1.3.2 การสกัดเอาคอนกรีตที่ได้รับความเสียหายจากไฟออกและซ่อมแซมโดยใช้วัสดุซ่อมทำให้ความแข็งแกร่งขององค์อาคารมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้กำลังรับแรงดัดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ต้องพิจารณากำลังรับแรงอัดและแรงดึงของวัสดุซ่อมให้มีค่ามากกว่ากำลังของคอนกรีตที่ได้รับความเสียหายจากไฟร่วมด้วย

1.3.3 การวางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยใกล้กับเหล็กเสริมสามารถเพิ่มความแข็งแกร่งได้ดีกว่าการวางให้ห่างจากเหล็กเสริม

1.3.4 หากพิจารณาถึงกำลังรับแรงยึดเหนี่ยว ความง่ายและเวลาในติดตั้ง การวางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในชั้นวัสดุซ่อมน่าจะเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดของรูปแบบการวางแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในชั้นต่างๆ

1.3.5 เนื่องจากการวิบัติของตัวอย่างที่ผ่านการเสริมกำลังแล้วนั้นเป็นลักษณะการวิบัติแบบเปราะ ดังนั้นการออกแบบใช้งานควรตรวจสอบค่าความเค้นและความเครียดให้มีค่าความปลอดภัยเพียงพอกับการใช้งานและไม่เกินกำลังรับแรงเฉือนขององค์อาคารนั้นๆ

รายการอ้างอิง

[1] Pongsak Wiwatrojanagul.Shear Strengthening of RC Beams by Near Surface Mounted FRP Rods. Doctoral dissertation. School of Civil Engineering and Technology, Sirindorn International Institute of Technology, Thammasat University. 2013

[2] ASTM DESIGNATION: E119-10. Standard Test Methods for Fire tests of Building Construction and Materials. 2010

[3] Brue Eillingwood and T.D. Lin. Flexure and Shear Behavior of Concrete Beams during Fires. ACSE : Journal of Structural Division 117(February 1991):440-458

[4] เจษฎา เกษมเศรษฐ์ และ หทัยรัตน์ มณีเทศ.การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของคอนกรีตก่อนและหลังการเผาไหม้. ใน เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6 (วันที่ 10-12 พฤษภาคม2543):MAT93-MAT99.

[5] ทรงเกียรติ หาญสันติ. การศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังถูกไฟไหม้, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต.สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.2001

[6] ACI Committee 318-05 : Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.2005

[7] ทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์. การประเมินคอนกรีตที่เสียหายจากเพลิงไหม้,วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต.สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.2012

[8] F. Micelli and A. Nanni. TENSILE CHARACTERIZATION OF FRP RODS FOR REINFORCED CONCRETE STRUCTURES.Mechanics of Composite Materials, Vol. 39, No. 4, 2003

[9] กฤษฎา ปานเกษม. การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมท่อนวัสดุ GFRP. ใน เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13 (วันที่ 14-16 พฤษภาคม), 2007

[10] So Jeong Han, Dae-Jin Kim and Young Hak Lee. Bond Strength of Carbon and Aramid Fiber Reinforced Polymer Rebars in Normal Strength Concrete. APFIS 20129.Hokkaido University, Japan.2012

[11] Xiang Yan, X., B. Miller, A. Nanni, C.E. Bakis, Characterization of CFRP Rods Used as Near Surface Mounted Reinforcement, Proc.8th Intl. Structural Faults and Repair Conf., M.C. Forde, Ed., Engineering Technics Press, Edinburgh, Scotland, 1999

[12] Laura De Lorenzis and Antonio Nanni. CHARACTERIZATION OF FRP RODS AS NEAR-SURFACE MOUNTED REINFORCEMENT. JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION ,MAY ,2001

[13] N. Kishi, H. Mikami, Y. Kurihashi and S. Sawada .FLEXURAL BEHAVIOR OF RC BEAMS REINFORCED WITH NSM AFRP RODS. Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005). International Institute for FRP in Construction,2005

[14] Eliane K.CASTRO, Guilherme S.MeELO and Yosiaki NAGATO. FLEXURAL STRENGTHENING OF RC"T" BEAMS WITH NEAR SURFACE MOUNTED (NSM) FRP REINFORCEMENTS .University of Patras, Greece, july 16-18,2007

[15] Ingberg S.H., et al. Combustible Content in Buildings. BMS 149. Washington, D.C.National Bureau of Standard, 1957

[16] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุสาหกรรม. มอก.1334-2539 การทดสอบความทนไฟ-ชิ้นส่วนต่างๆของโครงสร้างอาคาร. กรุงเทพฯ : กระทรวงอุตสาหกรรม, 2539.

[17] Shahriar Quayyum .BOND BEHAVIOUR OF FIBRE REINFORCED POLYMER (FRP) REBARS IN CONCRETE. Master's Thesis. B.Sc. Bangladesh University of Engineering & Technology, Bangladesh, June 2010.

[18] ACI Committee 408 (1992). State-of-the-art report on bond under cyclic loads, American Concrete Institute, Detroit, หน้า 3-7,1992

[19] ACI 440.1R-06.Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. American concrete Institute, Farmington Hills,Michigan,2006

[20] CAN/CSA S806-02. Design and construction of building components with fiber reinforced polymers. Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, Canada, หน้า 177. 2002

[21] กรมโยธาธิการและผังเมือง. มยผ. 1508-51 มาตรฐานการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริม

เหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย.กรุงเทพฯ: กระทรวงมหาดไทย, 2551

[22] กรมโยธาธิการและผังเมือง. มยผ.1901-51.มาตรฐานปฏิบัติในการซ่อมแซมอาคาร กรุงเทพฯ:กระทรวงมหาดไทย,2551

[23] กรมโยธาธิการและผังเมือง.มยผ. 1552-51. มาตรฐานการตรวจวัดการเคลื่อนตัวของอาคาร. กรุงเทพฯ: กระทรวงมหาดไทย, 2551

[24] ASTM DESIGNATION: 4541-09 : Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers.

[25] ASTM International Annual Book. ASTM Standards Section4 Construction. ,vol. 04.02, Concrete and Aggregates, 2008

[26] ASTM Designation. C 42/C 42M – 04. Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete. July 1, 2004

[27] BS 4550: Methods of testing cement.Physical tests Determination of standard consistence .1978

[28] American Society for Testing and Materials C 190. Method of Test for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars.1970

[29] American Society for Testing and Materials C 348. Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic Cement Mortars.ASTM Spec.Tech.Publ.1997

[30] Tarek K. Hassan and Sami H. Rizkalla. Bond Mechanism of NSM FRP Bars for Flexural Strengthening of Concrete Structures. Department of Civil Engineering, North Carolina State University Campus Box 7533, Raleigh, NC, USA 27695-7533

[31] Eligehausen R, Popov EP, Bertero VV. Local bond stress–slip relationships of deformed bars under generalized excitations. Report No. 83/23, EERC, Berkeley, CA: University of California,P. 162.1983

[32] Laura De Lorenzis. A modified pull-out test for bond of near-surface mounted FRP rods in concrete. Department of Innovation Engineering, University of Lecce, Via per Monteroni, 73100 Lecce, Italy.2002

[33] E. Cosenza, Andrea Rizzo and Antonio La Tegola. Development length of FRP straight rebars. Department of Structural Analysis and Design, University of Naples Federico II, Via Claudio 21, 80125 Naples, Italy.2002

[34] FIB, Task Group 4.3, Fire design of concrete structures structural behavior and Assessment, July 2008

ภาคผนวก

คุณสมบัติของวัสดุ

1.อีพ๊อกซี่เรซิ่น Sikadur -30

ประเภท อิพ๊อกซีเรซิ่นผสมพอลิเมอร์

กำลังรับแรงยึดเหนี่ยว

กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวกับเหล็กเสริม	>21 N/mm^2 (ค่าเฉลี่ย>30 N/mm^2)
กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวกับคอนกรีต	>4 N/mm^2 (วิบัติที่คอนกรีต)

ค่าโมดูลัส

แรงอัด	9,600 N/mm^2(+23ºC)
แรงดึง	11,200 N/mm^2(+23ºC)

2.น้ำยาประสานคอนกรีต Sikadur -32 TH

กำลังรับแรงอัด	60-70 N/mm^2
กำลังรับแรงดัด	30-35N/mm^2
กำลังรับแรงดึง	18-20N/mm^2
กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวกับเหล็กเสริม	2.5-3 N/mm^2(วิบัติที่คอนกรีต)
กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวกับคอนกรีต	18-20N/mm^2(35ºC,65% rH,10วัน)

3.วัสดุซ่อม Sika MonoTop-614 T

ประเภท ซีเมนต์มอร์ตาผสมเส้นใยไฟเบอร์

กำลังรับแรงยึดเหนี่ยว >2.0 N/mm^2 (บ่ม28วัน)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุวัชร ตันวัฒนะประทีป เกิดวันที่ 20 ตุลาคม 2531 เป็นบุตรชายของนายวีระ และนางพูลสุข ตันวัฒนะประทีป มีพี่สาวหนึ่งคนคือ นางสาวธนวรรณ ตันวัฒนะประทีป เข้ารับการศึกษาในระดับประถมที่โรงเรียนการัญศึกษา ระดับมัธยมต้นและมัธยมปลายที่โรงเรียนรัตนาธิเบศร์ และสอบเทียบเข้ารับการศึกษาในระดับปริญญาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ.2553 และได้ศึกษาต่อในระดับปริญญามหาบัณฑิต ที่แขนงวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย