

การศึกษาการเกิดความเข้มของหน่วยแรงในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง
หรือซ่อมแซมด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์



นายปิยะ รัตนวุฒิสุวรรณ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

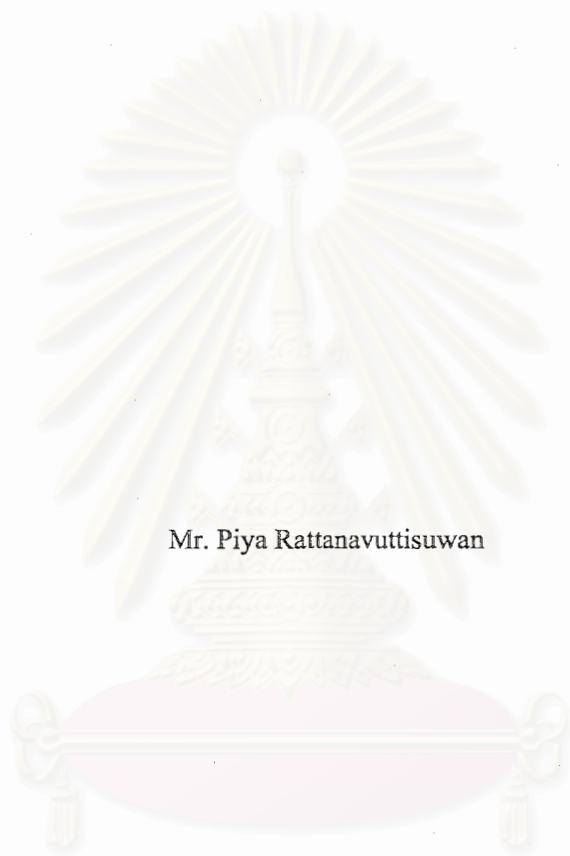
ISBN 974-17-1253-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

29 ต.ค. 2546

I20473400

A STUDY ON STRESS CONCENTRATION IN RC BEAMS STRENGTHEN
OR REPAIRED WITH CFRP



Mr. Piya Rattanavuttisuwan

สถาบันวิทยบริการ

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-1253-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการเกิดความเข้มของหน่วยแรงในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่
เสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

โดย

นายปิยะ รัตนวุฒิสวรรณ

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

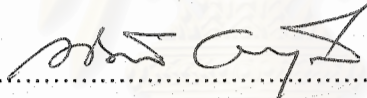
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปิณฑุภาแก้ว)

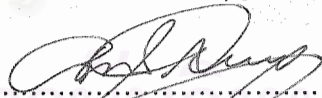
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาตรี)



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม)



..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชาติ สิทธิพันธุ์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปิยะ รัตนวุฒิสวรรณ : การศึกษาการเกิดความเข้มของหน่วยแรงในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (A Study On Stress Concentration In RC Beams Strengthen Or Repaired with CFRP) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม : 175 หน้า, ISBN 974-17-1253-7.

ในการศึกษานี้จะมุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมและค่าความเข้มของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตของคานที่เสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน โดยมีคานตัวอย่างทั้งหมด 13 ตัวอย่าง แบ่งออกเป็นคานควบคุม 2 ตัวอย่าง คานซ่อมแซม 2 ตัวอย่าง และคานเสริมกำลัง 9 ตัวอย่าง ซึ่งจะมีรูปแบบของการเสริมกำลังและการซ่อมแซมต่างกันไปตามตัวแปรที่กำหนดไว้คือ คือ ความกว้างและความยาวของพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ระยะการยึดปลาย ปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึง ความหนาของชั้นกาว และการซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วยวัสดุประสาน (epoxy) ซึ่งคานทั้งหมดเป็นคานบนจุดรองรับธรรมดา (simple beam) ความยาวช่วงคาน 200 ซม. รับน้ำหนักกระทำแบบ 4 จุด (4-Point Load) และมีมาตรวัดความเครียด (strain gage) ติดตั้งอยู่ที่ผิวเหล็กเสริม 3-5 จุดในแต่ละตัวอย่าง

จากผลการทดสอบพบว่าคานที่เสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจะมีกำลังสูงขึ้น 41%-166% เมื่อเปรียบเทียบกับคานควบคุม และมีค่าโก่งตัวสูงสุดที่กึ่งกลางคานลดลง ซึ่งคิดเป็น 9%-25%ของคานควบคุม ในขณะที่รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กและกระจายตัวสูงกว่าคานควบคุม ในส่วนของค่าดัชนีความเหนียว (ductility index) ของคานเสริมกำลังจะมีค่าน้อยกว่าคานควบคุมอย่างชัดเจน และการวิบัติของคานเสริมกำลังเป็นลักษณะการวิบัติแบบเปราะ (brittle failure) ซึ่งเกิดขึ้น 2 ลักษณะคือ คอนกรีตส่วนหุ้มเหล็กเสริมรับแรงดึงฉีกตัวออก และพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนหลุดลอกออก โดยการวิบัติของคานเสริมกำลังทั้งหมดจะเริ่มจากปลายพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน และสอดคล้องกับค่าความเครียดที่วัดได้จากเหล็กเสริมรับแรงดึงบริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน ในส่วนของค่าความเข้มของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตบริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนพบว่าเกี่ยวข้องกับรูปแบบการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมอย่างชัดเจน โดยรูปแบบการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมที่ให้ค่าความเข้มของหน่วยแรงน้อยที่สุดในการศึกษาครั้งนี้ คือ การใช้แถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนกว้าง 10 ซม. ยาว 190 ซม. และมีระยะการยึดปลาย 75 ซม.

ภาควิชา _____ วิศวกรรมโยธา _____ ลายมือชื่อนิสิต _____ หรือ _____ วิชาวิศวกรรม
สาขาวิชา _____ วิศวกรรมโยธา _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____
ปีการศึกษา _____ 2545 _____ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

4270423621 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORDS : STRESS CONCENTRATION / REINFORCEMENT / FAILURE BEHAVIOR / REPAIRMENT / STRENGTHENING / CARBON FIBER.

PIYA RATTANAVUTTISUWAN : A STUDY ON STRESS CONCENTRATION IN RC BEAMS STRENGTHEN OR REPAIRED WITH CFRP, THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.DR.BOONCHAI STITMANNAITHUM, 175 PP., ISBN 974-17-1253-7.

This study was emphasized on behavior and stress concentration in RC beam strengthened and repaired with carbon fiber reinforced polymer (CFRP). There were 13 specimens, 2 specimens were controlled beams. 8 specimens were strengthened with varied carbon fiber length, width, wrapping length, thickness of epoxy and the quantity of tension steel while the rest two were repaired crack with and with out epoxy injection. All specimens were simply supported, 200 cm. in span length and loaded using a 4-point loading pattern. Three to five electrical strain gages were bonded on surface of reinforcing steel.

The results showed that, CFRP strengthened and repaired specimens had 41% - 166% higher strength than the controlled beam. The maximum deflection at mid span could be reduced by 9%-25% of the controlled beam's and the crack widths were much smaller and had better distribution than those of the controlled. The ductility index was decreased significantly. The failure mode was brittle failure, which occurred at the CFRP curtailment where the highest stress concentration was located. The brittle failure mode of strengthened beams could be divided into 2 kinds namely the peeling of concrete covering and the debonding of CFRP. The failure of all specimens was closely related to the strain in the reinforcing steel at the CFRP curtailment. And the stress concentration at the CFRP curtailment was closely related to strengthen or repaired pattern. From this study, the pattern which made the lowest stress concentration was achieved by using CFRP with dimensions of 10 cm. in width, 190 cm. in length and 75 cm. in wrapping length.

Department Civil Engineering Student's signature Piya Rattana Vuttisuwan
Field of study Civil Engineering Advisor's signature Boonchai Stitmannaithum
Academic year 2002 Co-advisor's signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยมาด้วยดีตลอด นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาติ ประธานคณะกรรมการ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชาติ สิทธิพันธุ์ กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์อย่างยิ่ง

การศึกษาครั้งนี้จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้เลย หากไม่ได้รับการสนับสนุนเป็นอย่างดีจากบริษัท ซิก้า (ประเทศไทย) จำกัด ผู้ให้การสนับสนุนแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (Sika CarboDur S512) แผ่นเส้นใยคาร์บอน (SikaWrap Hex-230C) และวัสดุประสาน (SikaDur 30 และ SikaDur330) รวมทั้งให้การสนับสนุนทางด้านเทคนิคการเสริมกำลังและการซ่อมแซมแก่การศึกษาครั้งนี้ ซึ่งข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

และกว่าการศึกษาครั้งนี้จะสำเร็จลุล่วงไปได้ สมาชิกในครอบครัวของข้าพเจ้าต้องมีความลำบากยิ่งกว่าข้าพเจ้าหลายเท่าตัว ทั้งให้การสนับสนุนทางด้านกำลังใจและกำลังทรัพย์แก่ข้าพเจ้าเสมอมา ซึ่งความดีอันใดที่พึงมีจากการศึกษาในครั้งนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่ครอบครัวของข้าพเจ้าทุกประการ แต่ความผิดพลาดอันใดที่เกิดขึ้นในการศึกษาครั้งนี้ข้าพเจ้าขอรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือและมอบกำลังใจแก่ข้าพเจ้าด้วยความเต็มใจเสมอมา และที่ขาดเสียไม่ได้คือ น้อง ๆ โครงการทางวิศวกรรมโยธาปีการศึกษา 2544 ที่ได้ให้ความช่วยเหลือแก่ข้าพเจ้าในการศึกษาครั้งนี้เป็นอย่างดี จนการศึกษาครั้งนี้สำเร็จลุล่วงเป็นที่เรียบร้อย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นายปิยะ รัตนวุฒิสุวรรณ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 สมมติฐานที่ใช้ในการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พฤติกรรมของคานประกอบ.....	4
2.2 หลักวัสดุกลศาสตร์ของคานประกอบ.....	6
2.2.1 หลักวัสดุกลศาสตร์ของชั้นวัสดุในคานประกอบ.....	7
2.2.2 หลักวัสดุกลศาสตร์ของคานประกอบ.....	12
บทที่ 3 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	16
3.1 งานวิจัยศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมโดยรวม.....	16
3.2 งานวิจัยศึกษาแบบจำลองอธิบายการเกิดความเข้มของหน่วยแรง.....	20
บทที่ 4 การทดสอบ.....	28
4.1 การทดสอบเบื้องต้น.....	28
4.2 การทดสอบจริง.....	30

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 คุณสมบัติของวัสดุ.....	33
4.3.1 กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต.....	33
4.3.2 กำลังรับแรงดึงของเหล็ก.....	33
4.3.3 กำลังรับแรงดึงของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน.....	34
4.4 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ.....	35
4.4.1 การตีมาตรฐานวัดความเครียด.....	35
4.4.2 การหล่อคานตัวอย่าง.....	36
4.4.3 การติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน.....	36
4.5 การทดสอบและการเก็บข้อมูล.....	37
บทที่ 5 ผลการทดสอบ.....	39
5.1 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง CB1.....	39
5.2 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง RF1.....	43
5.3 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง RF2.....	46
5.4 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง RF3.....	49
5.5 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง RF4.....	52
5.6 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง RF5.....	55
5.7 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง RF6.....	58
5.8 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง RF7.....	61
5.9 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง RF8.....	64
5.10 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง CB2.....	68
5.11 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง RF9.....	71
5.12 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง RP1.....	75
5.12.1 การให้น้ำหนักกระทำก่อนการซ่อมแซม.....	75
5.12.2 การให้น้ำหนักกระทำภายหลังการซ่อมแซม.....	78
5.13 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง RP2.....	80
5.13.1 การให้น้ำหนักกระทำก่อนการซ่อมแซม.....	80
5.13.2 การให้น้ำหนักกระทำภายหลังการซ่อมแซม.....	82

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	86
6.1 ผลของการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน.....	86
6.1.1 กำลังรับแรงดัด.....	86
6.1.2 ค่าการโก่งตัวและค่าความเหนียว.....	88
6.1.3 รอยแตกร้าวและลักษณะการวิบัติ.....	89
6.1.4 ค่าความเข้มของหน่วยแรงที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน	90
6.2 ผลของระยะการยึดปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน.....	91
6.2.1 กำลังรับแรงดัด.....	92
6.2.2 ค่าการโก่งตัวและค่าความเหนียว.....	93
6.2.3 รอยแตกร้าวและลักษณะการวิบัติ.....	94
6.2.4 ค่าความเข้มของหน่วยแรงที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน	95
6.3 ผลของความยาวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน.....	96
6.3.1 กำลังรับแรงดัด.....	96
6.3.2 ค่าการโก่งตัวและค่าความเหนียว.....	98
6.3.3 รอยแตกร้าวและลักษณะการวิบัติ.....	99
6.3.4 ค่าความเข้มของหน่วยแรงที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน	100
6.4 ผลของความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน.....	101
6.4.1 กำลังรับแรงดัดและลักษณะการวิบัติ.....	102
6.4.2 รอยแตกร้าว ค่าการโก่งตัว และค่าความเหนียว.....	104
6.4.3 ค่าความเข้มของหน่วยแรงที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน	105
6.5 อัตราส่วนระหว่างความหนาของชั้นกาวต่อความหนาของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน.....	106
6.5.1 พฤติกรรมโดยรวม.....	106
6.5.2 ค่าความเข้มของหน่วยแรงที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน	107
6.6 ผลของขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง.....	108
6.6.1 กำลังรับแรงดัด.....	109
6.6.2 ค่าการโก่งตัวและค่าความเหนียว.....	110
6.6.3 รอยแตกร้าวและลักษณะการวิบัติ.....	110

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.6.4 ค่าความเข้มของหน่วยแรงที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน	111
6.7 ผลของการใช้วัสดุประสานก่อนการซ่อมแซมด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน.....	115
6.7.1 กำลังรับแรงดัด.....	115
6.7.2 ค่าการโก่งตัวและค่าความเหนียว.....	116
6.7.3 รอยแตกร้าวและลักษณะการวิบัติ.....	117
6.7.4 ค่าความเข้มของหน่วยแรงที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน	117
บทที่ 7 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับแบบจำลอง.....	119
7.1 แบบจำลองของ Malek และคณะ.....	119
7.2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับแบบจำลองของ Malek และคณะ.....	123
7.3 การปรับปรุงแบบจำลองของ Malek และคณะ.....	125
บทที่ 8 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	128
8.1 สรุป.....	128
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	130
รายการอ้างอิง.....	132
ภาคผนวก.....	134
ก. การวิเคราะห์หน้าตัดด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง.....	135
ข. การหาหน่วยแรงในคานตัวอย่าง CB1 และ RF1 ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง.....	160
ค. การคำนวณหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงดัดจากตามแบบจำลองของ Malex และคณะ.....	166
ง. การคำนวณอัตราส่วนค่าหน่วยแรงเฉือนในคานที่ใช้เหล็กเสริมขนาดต่างกัน.....	172
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	175

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงลักษณะการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในการทดสอบเบื้องต้น.....	28
4.2 แสดงกำลังรับแรงดัดและลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างในการทดสอบเบื้องต้น....	29
4.3 แสดงค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่างในการทดสอบเบื้องต้น.....	29
4.4 แสดงลักษณะการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในการทดสอบจริง.....	31
4.5 แสดงตัวแปรที่สำคัญในแบบจำลองของ Robert และ Malex.....	32
4.6 แสดงการจัดกลุ่มคานตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ.....	32
4.7 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของก้อนคอนกรีตตัวอย่างรูปทรงระบอก	33
4.8 แสดงค่ากำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมในคานตัวอย่าง.....	34
4.9 แสดงค่ากำลังรับแรงดึงประลัยของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน.....	34
4.10 แสดงการจำนวนและลักษณะการตีความมาตรวัดความเครียดของคานตัวอย่าง.....	35
5.1 แสดงค่าน้ำหนักกระทำที่ให้แก่คานและค่าการโก่งตัว ณ จุดกึ่งกลางช่วงคานของคาน ตัวอย่างต่างๆ.....	85
6.1 แสดงค่าความเหนียวของคานตัวอย่างต่างๆ.....	89
6.2 แสดงลักษณะการเสริมพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคาน RF1 RF4 และ RF5.....	96
6.3 แสดงลักษณะการเสริมพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคาน RF1 RF6 และ RF7.....	102
6.4 แสดงลักษณะของคาน CB1 CB2 RF1 และ RF9.....	109
6.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียดที่ 4 และ 7.....	114
7.1 แสดงค่าเปรียบเทียบผลการทดสอบกับแบบจำลองของ Malek และคณะ.....	123
7.2 แสดงค่าหน่วยแรงต่างๆจากแบบจำลองดั้งเดิมของ Malek และแบบจำลองของ Malek ที่ถูกปรับปรุง.....	127

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดก่อนหน้าตัดเกิดการแตกร้าว.....	5
2.2 แสดงการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดเมื่อหน้าตัดเริ่มแตกร้าว.....	5
2.3 แสดงความเค้นและความเครียดของหน้าตัดเมื่อความเค้นอัดของคอนกรีตมีค่าเกิน 0.5 f_c	5
2.4 แสดงพฤติกรรมของคานประกอบภายใต้แรงกระทำจากภายนอก.....	6
2.5 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่บางมาก.....	7
2.6 แสดงลักษณะชิ้นส่วนของชั้นวัสดุ.....	8
2.7 แสดงแบบจำลองการเคลื่อนตัวของชิ้นส่วนในชั้นวัสดุ.....	9
2.8 แสดงหน้าตัดของคานประกอบที่ประกอบขึ้นจากชั้นวัสดุจำนวน 6 ชั้น.....	11
2.9 แสดงคานประกอบรับแรงตามแนวแกน Z และโมเมนต์ดัดที่ปลาย.....	12
2.10 แสดงคานประกอบรับแรงตามแนวแกน X เพียงอย่างเดียว.....	14
3.1 แสดงลักษณะการตีพลาสติกเสริมเส้นใยในงานวิจัยของ Ritchie และคณะ.....	16
3.2 แสดงลักษณะการตีพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วในงานวิจัยของ Sharif และคณะ.....	17
3.3 แสดงแบบจำลอง Marco Arduini และคณะ.....	19
3.4 แสดงลักษณะการตีพลาสติกเสริมเส้นใยในงานวิจัยของ N. F. Grace และคณะ.....	20
3.5 แสดงแบบจำลองในขั้นตอนที่ 1 ของ T. M. Robert.....	21
3.6 แสดงแบบจำลองในขั้นตอนที่ 2 ของ T. M. Robert.....	21
3.7 แสดงรวมผลคำตอบจากขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 เข้าด้วยกัน.....	22
3.8 แสดงแบบจำลองในขั้นตอนที่ 3 ของ T. M. Robert.....	23
3.9 แสดงแบบจำลองความเค้นที่เกิดขึ้นในพลาสติกเสริมเส้นใยของ Malek และคณะ.....	25
3.10 แสดงแบบจำลองความเค้นตั้งฉากในคานคอนกรีตตีพลาสติกเสริมเส้นใยของ Malek	26
4.1 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กและการตีแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน ตัวอย่างในการทดสอบเบื้องต้น.....	28
4.2 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กและการตีแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน ตัวอย่างในการทดสอบจริง.....	30
4.3 แสดงชิ้นตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงดึงของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน.....	34
4.4 แสดงตำแหน่งติดตามวัดความเครียดของคานตัวอย่าง.....	35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 แสดงขั้นตอนการหล่อคานตัวอย่าง.....	36
4.6 แสดงการขัดผิวหน้าของคานตัวอย่างและผิวหน้าคานที่ขัดเสร็จแล้ว.....	37
4.7 แสดงลักษณะการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ.....	38
5.1 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กของคาน CB1.....	39
5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน CB1.....	40
5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน CB1....	41
5.4 แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นก่อนเกิดการวิบัติบนคานตัวอย่าง CB1.....	42
5.5 แสดงการวิบัติบนคานตัวอย่าง CB1 เนื่องจากคอนกรีตถูกอัดแตก.....	42
5.6 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง CB1.....	43
5.7 แสดงลักษณะและการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RF1...	43
5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RF1.....	44
5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RF1....	44
5.10 แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นก่อนเกิดการวิบัติบนคาน RF1.....	45
5.11 แสดงคาน RF1 หลังเกิดการวิบัติ ซึ่งคอนกรีตหลุดลอกจนเห็นเหล็กเสริมรับแรงดึง.....	45
5.12 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวของคาน RF1.....	46
5.13 แสดงลักษณะและการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน F2...	46
5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RF2.....	47
5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RF2....	48
5.16 แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นก่อนเกิดการวิบัติบนคานตัวอย่าง RF2.....	48
5.17 แสดงลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่าง RF2.....	48
5.18 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF2.....	49
5.19 แสดงลักษณะและการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน F3...	49
5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RF3.....	50
5.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RF3....	51
5.22 แสดงลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่าง RF3.....	51
5.23 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวของคาน RF3.....	51
5.24 แสดงลักษณะและการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RF4	52
5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RF4.....	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RF4...	53
5.27 แสดงรอยแตกร้าวที่ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RF4.....	54
5.28 แสดงลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่าง RF4.....	54
5.29 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวของคาน RF4.....	55
5.30 แสดงลักษณะและการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RF5	55
5.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RF5.....	56
5.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RF4....	57
5.33 แสดงรอยแตกร้าวที่ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RF5.....	58
5.34 แสดงลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่าง RF5.....	58
5.35 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวของคาน RF5.....	58
5.36 แสดงลักษณะและการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RF6	59
5.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RF6..	60
5.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RF6....	60
5.39 แสดงสภาพของคานตัวอย่าง RF6 ทั้งก่อนและหลังการวิบัติ.....	61
5.40 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวของคาน RF6.....	61
5.41 แสดงลักษณะและการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RF7	62
5.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RF7.....	62
5.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RF7....	63
5.44 แสดงลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่าง RF7.....	64
5.45 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวของคาน RF7.....	64
5.46 แสดงลักษณะและการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RF8	65
5.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RF8.....	65
5.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RF8....	66
5.49 แสดงสภาพของคานตัวอย่าง RF8 ก่อนเกิดการวิบัติ.....	67
5.50 แสดงลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่าง RF8.....	67
5.51 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวของคาน RF8.....	68
5.52 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กของคาน CB2.....	68
5.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน CB2.....	69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน CB2...	70
5.55 แสดงสภาพของคานตัวอย่าง CB2 ทั้งก่อนและหลังการวิบัติ.....	71
5.56 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง CB2.....	71
5.57 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กและการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RF9.....	72
5.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RF9.....	72
5.59 แสดงลักษณะการวิบัติของคาน RF9.....	73
5.60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RF9...	74
5.61 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวของคาน RF9.....	74
5.62 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กและการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RP1.....	75
5.63 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RP1.....	76
5.64 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RP1 ทั้งก่อนและหลังการซ่อมแซม.....	77
5.65 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวก่อนการซ่อมแซมของคาน RP1.....	77
5.66 แสดงสภาพคานตัวอย่าง RP1 ก่อนเกิดการวิบัติ.....	79
5.67 แสดงลักษณะการวิบัติของคาน RP1.....	79
5.68 แสดงภาพร่างรอยแตกร้าวทั้งก่อนและหลังการซ่อมแซมของคานตัวอย่าง RP1.....	79
5.69 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กและการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RP2.....	80
5.70 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RP2.....	81
5.71 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RP2 ทั้งก่อนและหลังการซ่อมแซม.....	82
5.72 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวก่อนการซ่อมแซมของคาน RP2.....	82
5.73 แสดงรอยแตกร้าวก่อนการวิบัติของคานตัวอย่าง RP2 ภายหลังจากการซ่อมแซม.....	83
5.74 แสดงลักษณะการวิบัติของคาน RP2.....	84
5.75 แสดงภาพร่างรอยแตกร้าวทั้งก่อนและหลังการซ่อมแซมของคานตัวอย่าง RP2.....	84
6.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวของคาน CB1 และ RF1....	87

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.2 แสดงการกระจายตัวของแรงบนหน้าตัดคานเสริมกำลังและคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	87
6.3 แสดงค่าการโก่งตัวที่จุดครากและที่จุดประลัย.....	88
6.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าความเครียดของคาน CB1 และ RF1 ทั้ง 3 ตำแหน่ง.....	90
6.5 แสดงอัตราส่วนกำลังรับแรงดัดของคาน RF2 และ RF3 ต่อกำลังรับแรงดัดของคาน RF1	92
6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน CB1 RF1 RF2 และ RF3.....	92
6.7 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตที่มีและไม่มีกรงเหล็กภายใน ณ น้ำหนักกระทำเท่ากัน.....	93
6.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าความเครียดของคาน RF1 RF2 และ RF3.....	95
6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน CB1 RF1 RF4 และ RF5.....	97
6.10 แสดงอัตราส่วนกำลังรับแรงดัดของคาน RF4 และ RF5 ต่อกำลังรับแรงดัดของคาน RF1.....	97
6.11 แสดงค่าสตีเฟนสของคานที่เสริมความยาวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่างกัน.....	98
6.12 แสดงการรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีต.....	100
6.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าความเครียดของคาน RF1 และ RF5...	100
6.14 แสดงค่าความเครียดที่ระยะต่างๆในคานตัวอย่าง RF5 ที่น้ำหนักกระทำประมาณ 10 ตัน	101
6.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน CB1 RF1 RF6 และ RF7.....	103
6.16 แสดงการซ้อนทับของหน่วยแรงในคานตัวอย่าง RF1 และ RF6.....	103
6.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าความเครียดของคาน RF1 RF6 และ RF7.....	105
6.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน CB1 RF1 และ RF8.....	107
6.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าความเครียดของคาน RF1 และ RF8...	108

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน CB1 CB2 RF1 และ RF9.....	109
6.21 แสดงแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อเหล็กเสริมรับดึง.....	111
6.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าความเครียดของคาน RF1 และ RF9...	112
6.23 แสดงรอยแตกร้าวของคาน RF1 และ RF9.....	113
6.24 แสดงค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียดที่ 4 และ 7 ของคาน RF9.....	113
6.25 แสดงการกระจายความเครียดบนหน้าตัดคานตัวอย่าง RF9 ที่น้ำหนักกระทำต่างๆ.....	114
6.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวของคาน RP1 และ RP2...	116
7.1 แสดงแบบจำลองความเค้นที่เกิดขึ้นในพลาสติกเสริมเส้นใยของ Malek และคณะ.....	120
7.2 แสดงแบบจำลองความเค้นตึงฉากในคานคอนกรีตติดพลาสติกเสริมเส้นใยของ Malek..	121
7.3 แสดงการรวมหน่วยแรงที่ผิวล่างของคอนกรีตตามการคำนวณในตารางที่ 7.1.....	123
7.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ K กับค่า $\frac{M_0}{M_{Max}}$	126



1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตจนถึงปัจจุบัน สิ่งก่อสร้างทางด้านวิศวกรรมโยธาถูกออกแบบให้สามารถรับแรงกระทำต่างๆ ทั้งที่เป็นแรงกระทำแบบสถิตย์หรือแรงกระทำแบบจรตามแต่ลักษณะการใช้งานของสิ่งปลูกสร้างนั้นๆ สิ่งที่เกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ควบคู่กับการใช้งานคือการชำรุดเสียหาย ทั้งความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากการใช้งานตามปกติ สภาพแวดล้อม อุบัติเหตุ การเสื่อมถอยของกำลังวัสดุเนื่องจากความล้าและความคืบ หรือแม้แต่ความต้องการเพิ่มกำลังของโครงสร้างเพื่อรองรับแรงกระทำที่เพิ่มขึ้น การบำรุงรักษาซ่อมแซมและการเสริมกำลังขององค์อาคารจึงจำเป็นอย่างมากสำหรับโครงสร้างเหล่านี้ การซ่อมแซมและการเสริมกำลังองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถกระทำได้หลายวิธี วิธีหนึ่งที่ทำให้ผลดีคือการเสริมวัสดุเสริมรับแรงดึงภายนอกเข้าไปในส่วนรับแรงดึงของโครงสร้าง พลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนก็เป็นวัสดุเสริมรับแรงดึงภายนอกอีกชนิดหนึ่งที่จะถูกนำมาใช้งานแทนแผ่นเหล็กธรรมดา ด้วยคุณสมบัติที่เด่นหลายประการเช่น ความสามารถรับแรงดึงตามแนวเส้นใยสูง น้ำหนักเบา สะดวกต่อการใช้งาน ทนต่อการสึกกร่อนและกัดกร่อนเนื่องจากสภาพแวดล้อมได้ดี

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าคานที่ซ่อมแซมหรือเสริมกำลังด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนส่วนหนึ่งจะเกิดการวิบัติจากการหลุดลอกของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมบริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน เนื่องจากความเข้มของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีต การวิบัติลักษณะนี้เป็นอันตรายต่อการใช้งานจริงเนื่องจากการวิบัติแบบเปราะ (brittle failure) และทำนายพฤติกรรมได้ยาก อีกทั้งในประเทศไทยพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนยังเป็นวัสดุที่ค่อนข้างใหม่ต่อการใช้งานจริงและยังมีการศึกษาอยู่น้อย งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตจะเน้นไปทางด้านการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังและกระทำในต่างประเทศ ซึ่งมีสภาพแวดล้อมที่ต่างไปจากประเทศไทยอย่างสิ้นเชิง

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยชิ้นนี้จึงถูกจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงดัดงอกที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตขององค์อาคารรับแรงดัดที่มีการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน รวมถึงศึกษาข้อจำกัดในการใช้งานพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนสำหรับงานเสริมกำลังหรือซ่อมแซมในประเทศไทย เพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางในการประยุกต์ใช้งานจริงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ถูกจัดทำขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาการวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตขององค์อาคารรับแรงดัดที่เสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน
2. เพื่อหาแนวทางเบื้องต้นในการพัฒนาแบบจำลองทำนายการวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตขององค์อาคารรับแรงดัดที่เสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน
3. ศึกษาข้อจำกัดในการประยุกต์การใช้งานจริงของพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในงานเสริมกำลังหรือซ่อมแซมองค์อาคารรับแรงดัด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของการศึกษาครั้งนี้มีดังต่อไปนี้

1. พิจารณาแต่ผลของพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีต่อองค์อาคารรับแรงดัดในส่วนของการเสริมกำลังหรือซ่อมแซม
2. เน้นศึกษาการวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงในเนื้อคอนกรีตบริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน
3. พิจารณาแต่คานบนจุดรองรับแบบธรรมดา (simple beam)
4. พิจารณาแต่ผลของน้ำหนักกระทำแบบสถิต (static load)
5. ไม่พิจารณาผลที่เกิดจากความล้า (fatigue) ของวัสดุ
6. ใช้เหล็กเสริมตามขยวมาตรฐาน SD30 และ SD40 และเหล็กเสริมตามขวงมาตรฐาน SR24

1.4 สมมติฐานที่ใช้ในการศึกษา

สมมติฐานที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. แรงภายในที่หน้าตัดใดๆของคานประกอบจะต้องสมดุลกับแรงภายนอกที่มากระทำ
2. หน้าตัดของคานประกอบทั้งก่อนและในขณะที่มีแรงกระทำบนคานต้องยังคงเป็นระนาบราบ (plane)
3. ความเค้นบนหน้าตัดของคานขึ้นอยู่กับความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงภายนอกที่มากระทำ โดยเป็นไปตามความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของแต่ละวัสดุ
4. ความเครียดของวัสดุเสริมกำลังและเหล็กเสริมจะต้องมีค่าเท่ากับค่าความเครียดในเนื้อคอนกรีตที่อยู่ใกล้เคียง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่ามีการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมหรือวัสดุเสริมกำลังกับคานคอนกรีตโดยสมบูรณ์

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้จะทำการศึกษาดำเนินการตามขั้นตอนต่างๆที่ได้วางไว้ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาพฤติกรรมและสมมติฐานต่างๆ รวมถึงรายงานการวิจัยต่างๆที่ผ่านมาเกี่ยวกับผลของพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีต่อพฤติกรรมขององค์อาคารรับแรงคด รวมทั้งพฤติกรรมการเกิดความเข้มของหน่วยแรงในเนื้อคอนกรีตที่ใช้แผ่นเสริมรับแรงดึงภายนอก เพื่อเป็นความรู้พื้นฐานและแนวทางในการทำวิจัย
2. เตรียมการทดสอบโดยมีการควบคุมคุณภาพให้เป็นมาตรฐานเดียวกันทุกตัวอย่างเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลของตัวแปรต้นที่มีต่อตัวแปรตามได้อย่างสะดวก
3. ทำการทดสอบคานตัวอย่างและเก็บข้อมูลการทดสอบ
4. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ พร้อมกับเปรียบเทียบผลที่ได้กับทฤษฎีและผลงานวิจัยที่ผ่านมา
5. สรุปผลการทดสอบพร้อมทั้งพิจารณาแนวทางเบื้องต้นในการพัฒนาแบบจำลองอธิบายลักษณะการวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในองค์อาคารรับแรงคดที่เสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน
6. จัดทำบทสรุป รายงานผลการทดสอบพร้อมข้อเสนอแนะในการใช้งานพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในงานเสริมกำลังหรือซ่อมแซมองค์อาคารรับแรงคด

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เมื่อการศึกษาครั้งนี้เสร็จสมบูรณ์แล้ว ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจะมีดังต่อไปนี้

1. เข้าใจถึงประสิทธิภาพของพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในงานเสริมกำลังหรือซ่อมแซมองค์อาคารรับแรงคด
2. เข้าใจและสามารถอธิบายถึงการวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตขององค์อาคารรับแรงคดที่มีการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนได้
3. นำผลการทดสอบและแบบจำลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการใช้งานจริงได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

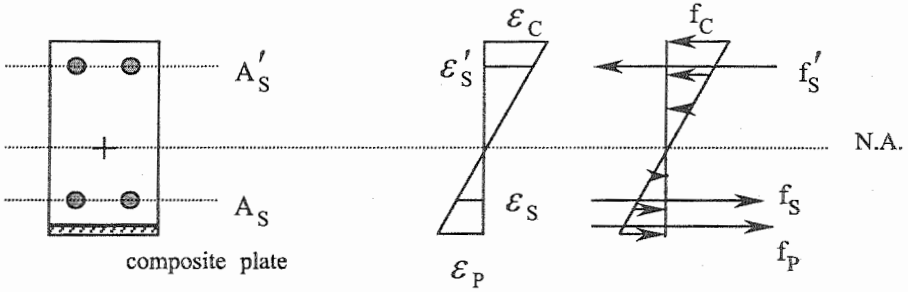
เนื่องจากคานที่เชื่อมแฉกหรือเสริมกำลังด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนมีพฤติกรรมเหมือนกับคานประกอบ ดังนั้นหลักการและทฤษฎีของคานประกอบจึงถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมโดยทั่วไป ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือพฤติกรรมของคานประกอบและหลักวัสดุศาสตร์ของคานประกอบ

2.1 พฤติกรรมของคานประกอบ

นับตั้งแต่เริ่มมีแรงภายนอกกระทำบนตัวคานประกอบจนกระทั่งเกิดการวิบัติ คานประกอบจะมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนอยู่หลายขั้นตอน ซึ่งพฤติกรรมเหล่านี้ต้องอาศัยสมมติฐานบางอย่างในการอธิบาย แต่พฤติกรรมของคานประกอบจะคล้ายคลึงกับพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา ดังนั้นสมมติฐานของคานคอนกรีตจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้กับคานประกอบดังนี้

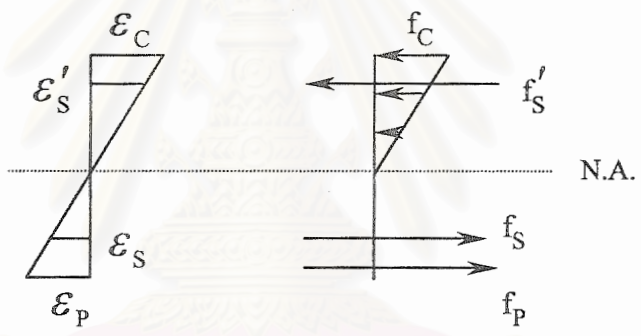
1. แรงภายในที่หน้าตัดใดๆของคานประกอบจะต้องสมดุลกับแรงภายนอกที่มากระทำ
2. หน้าตัดของคานประกอบทั้งก่อนและในขณะที่มีแรงกระทำบนคานต้องยังคงเป็นระนาบราบ (plane)
3. ความเค้นบนหน้าตัดของคานประกอบขึ้นอยู่กับความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงภายนอกที่มากระทำ โดยเป็นไปตามความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของแต่ละวัสดุ
4. ค่าความเครียดของวัสดุเสริมกำลังและเหล็กเสริมจะต้องเท่ากับค่าความเครียดในเนื้อคอนกรีตที่อยู่ใกล้เคียง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่ามีการยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมหรือวัสดุเสริมกำลังกับคานคอนกรีตโดยสมบูรณ์

เมื่อเริ่มให้มีแรงภายนอกมากระทำบนคาน โดยที่แรงภายนอกยังไม่ทำให้ความเค้นดึง (tensile stress) ในเนื้อคอนกรีตเกินค่าโมดูลัสแตกร้าวของคานคอนกรีต (modulus of rupture) หน้าตัดของคอนกรีตจะยังไม่เกิดรอยแตกร้าวและสามารถต้านทานแรงดึงและแรงอัดได้ ในขณะเดียวกันเหล็กเสริมและวัสดุเสริมแรงดึงจะมีความเครียดเกิดขึ้นเท่ากับคอนกรีตที่อยู่โดยรอบตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ เหล็กเสริมและวัสดุเสริมแรงดึงจึงต้องรับแรงดึงเหมือนกับคอนกรีต การกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในช่วงนี้จะเป็นไปตามรูปที่ 2.1 และเมื่อเพิ่มแรงกระทำให้คานประกอบจนค่าความเค้นดึงในเนื้อคอนกรีตมีค่าเท่ากับโมดูลัสแตกร้าว รอยแตกร้าวจะเริ่มปรากฏและจะขยายตัวอย่างรวดเร็วส่งผลให้แนวแกนสะเทิน (neutral axis) ขยับตัวสูงขึ้น ลักษณะรอยแตกร้าวที่ติจะต้องมีขนาดเล็กและไม่เปิดกว้างซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนและสึกกร่อนของเหล็กเสริมได้ดี ซึ่งเป็นลักษณะของรอยแตกร้าวในคานประกอบส่วนใหญ่



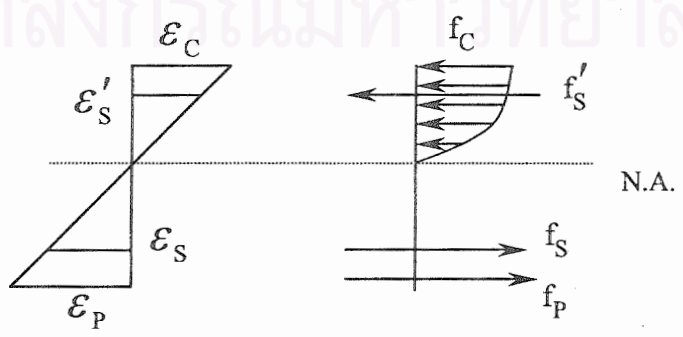
รูปที่ 2.1 แสดงการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดก่อนหน้าตัดเกิดการแตกร้าว

คอนกรีตในส่วนที่แตกร้าวจะไม่สามารถรับแรงดึงได้อีก ทำให้เหล็กเสริมและวัสดุรับแรงดึงต้องทำหน้าที่รับแรงดึงแทน ขณะที่ความเค้นอัดในเนื้อคอนกรีตยังมีค่าไม่เกิน $0.5 f'_c$ พฤติกรรมของคอนกรีตยังคงเป็นยึดหยุ่นแบบเส้นตรงอยู่ การกระจายตัวของความเค้นและความเครียดในช่วงนี้จะเป็นไปตามรูปที่ 2.2



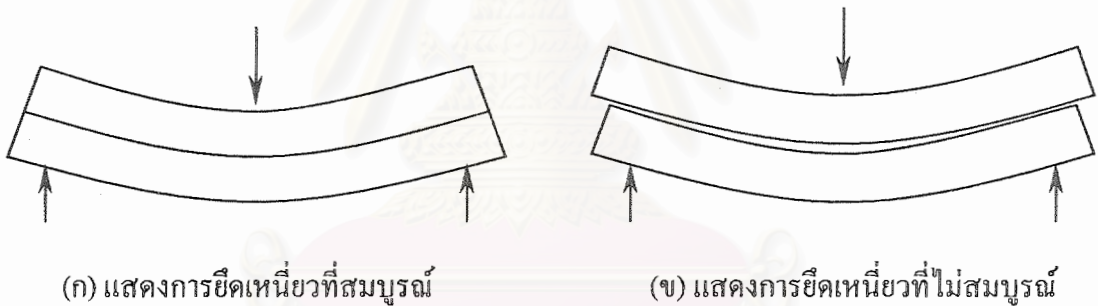
รูปที่ 2.2 แสดงการกระจายตัวของความเค้นและความเครียดเมื่อหน้าตัดเริ่มแตกร้าว

และเมื่อแรงกระทำภายนอกมีค่าเพิ่มขึ้น จนค่าความเค้นอัดในเนื้อคอนกรีตมีค่าเกิน $0.5 f'_c$ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตจะไม่เป็นเส้นตรงอีกต่อไป การกระจายตัวของความเค้นและความเครียดจะเป็นไปตามรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงความเค้นและความเครียดของหน้าตัดเมื่อความเค้นอัดของคอนกรีตมีค่าเกิน $0.5 f'_c$

ในส่วนของการวิบัติ การวิบัติของคานประกอบจะแตกต่างไปจากคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา เนื่องจากคานประกอบจะมีการวิบัติเฉพาะที่ (local failure) เพิ่มเข้ามาอีก 1 ลักษณะนอกเหนือไปจากการวิบัติจากแรงดัด (flexural failure) โดยการวิบัติเฉพาะที่จะมีสาเหตุมาจากแรงเฉือนตามแนวนอน (horizontal shear) เป็นหลักทำให้การวิบัติในลักษณะนี้เป็นการวิบัติแบบเปราะ (brittle failure) โดยแรงเฉือนตามแนวนอนนี้จะก่อให้เกิดการเลื่อนตัว (slip) ของชั้น (layers) ในคานประกอบ ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยอาศัยรูปที่ 2.4 กล่าวคือ คานประกอบจะเกิดจากชั้นของวัสดุหลายๆ ชั้นมาประกอบเข้าด้วยกัน โดยมีแรงยึดเหนี่ยวของผิวสัมผัสระหว่างชั้นเป็นตัวประสานในชั้นแต่ละชั้นมีพฤติกรรมเสมือนหนึ่งเป็นเนื้อเดียวกันตลอด ซึ่งเมื่อคานประกอบรับแรงภายนอกที่มากกระทำ คานประกอบจะเกิดหน่วยแรงต่างๆขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงเฉือนตามแนวนอน ซึ่งถ้าค่าของแรงเฉือนตามแนวนอนมีค่าน้อยกว่าค่าการยึดเหนี่ยวของผิวสัมผัสระหว่างชั้นแล้ว ชั้นส่วนทั้งสองจะมีพฤติกรรมเสมือนเป็นชั้นส่วนเดียวกัน ดังรูปที่ 2.4 (ก) แต่ถ้าค่าของแรงเฉือนตามแนวนอนมีค่ามากกว่าค่าการยึดเหนี่ยวของผิวสัมผัสระหว่างชั้นแล้ว หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือค่าการยึดเหนี่ยวของผิวสัมผัสระหว่างชั้นมีกำลังไม่เพียงพอ ชั้นส่วนทั้งสองจะเกิดการเลื่อนแยกจากกันดังรูปที่ 2.4 (ข)



รูปที่ 2.4 แสดงพฤติกรรมของคานประกอบภายใต้แรงกระทำจากภายนอก

แต่สำหรับคานเสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยแผ่นเสริมรับแรงดึงภายนอก จะมีลักษณะการวิบัติที่นอกเหนือไปจากที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น คือ การวิบัติจากคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเกิดรอยร้าวและหลุดลอกออก เนื่องจากความเข้มของหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงดัดจากในเนื้อคอนกรีต ซึ่งเป็นหัวข้อในการศึกษาครั้งนี้

2.2 หลักวัสดุกลศาสตร์ของคานประกอบ¹

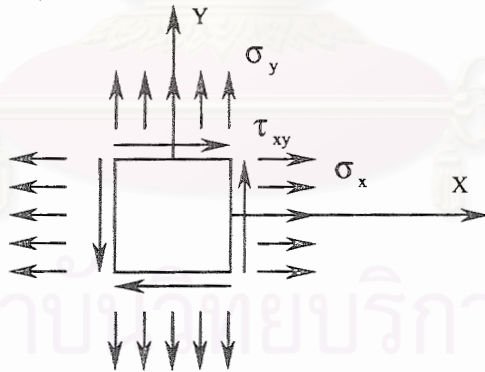
ในส่วนของหลักวัสดุกลศาสตร์ของคานประกอบจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือ หลักวัสดุกลศาสตร์ของชั้นวัสดุซึ่งเป็นชั้นของคานประกอบ และหลักวัสดุกลศาสตร์ของคานประกอบ

2.2.1 หลักวัสดุศาสตร์ของชั้นวัสดุในคานประกอบ

จากความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดแบบยืดหยุ่นในเชิงหลักกลศาสตร์วัสดุ (mechanic of material) ซึ่งสามารถเขียนในรูปของสมการคู่ลำดับได้ดังสมการที่ (2.1)

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

โดย $[\sigma]$, $[\epsilon]$ คือคู่ลำดับของความเค้นและความเครียดตามลำดับ (stress and strain matrix) และ $[C]$ คือคู่ลำดับของสติฟเนส (stiffness matrix) ถ้าวัสดุมีเนื้อเดียวตลอดทั้งชิ้นค่า C_{ij} จะมีค่าคงที่และไม่มี ความสัมพันธ์กับตำแหน่ง และถ้าวัสดุนั้นมีพฤติกรรมยืดหยุ่นในแต่ละทิศทางไม่เหมือนกัน (anisotropic material) คู่ลำดับสติฟเนสจะสมมาตรตามแนวทแยงมุมคือค่า C_{ij} จะมีค่าเท่ากับ C_{ji} และ เมื่อเราพิจารณาชิ้นส่วนที่บางมาก ชิ้นส่วนนั้นจะเสมือนกับมีมิติเพียง 2 มิติเท่านั้น ความเครียดจะ พิจารณาเพียง 3 ทิศทางคือ ϵ_x , ϵ_y และ ϵ_{xy} ทำให้ความเค้นที่เกิดขึ้นมีเพียง σ_x , σ_y และ σ_{xy} เท่านั้น ดังรูปที่ 2.5 และความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดจะเป็นดังสมการที่ (2.2)

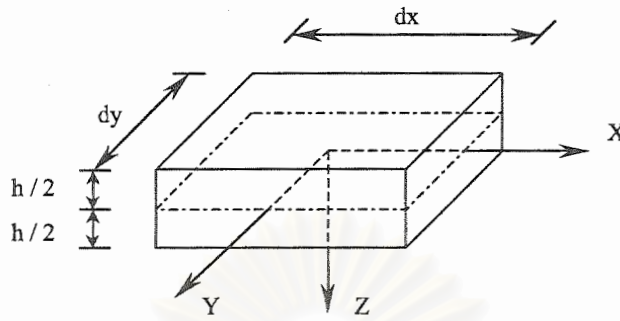


รูปที่ 2.5 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนที่บางมาก

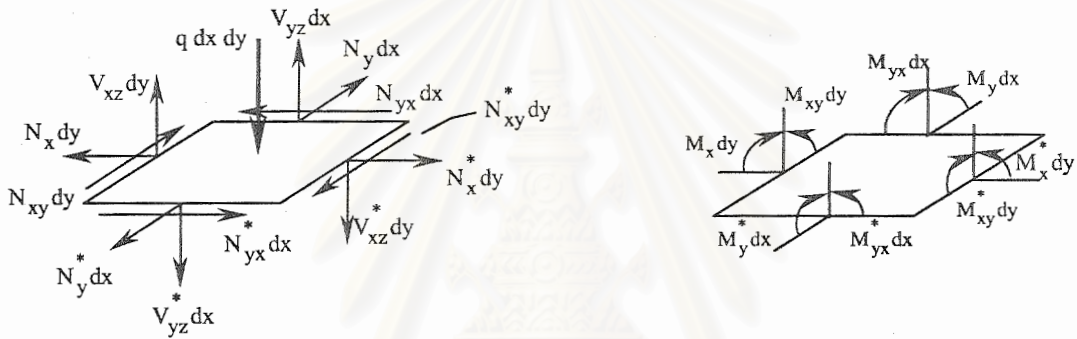
$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{14} \\ C_{12} & C_{22} & C_{24} \\ C_{14} & C_{24} & C_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

จากหลักการข้างต้นจะถูกนำมาประยุกต์ใช้คานประกอบ โดยพิจารณาให้ชั้นของวัสดุในคาน ประกอบประกอบขึ้นจากชิ้นส่วนแผ่นบางที่บางมาก และแรงภายในของชั้นวัสดุ (ได้แก่ N_x , N_y ,

N_{xy} , M_x , M_y และ M_{xy}) จะเกิดจากการอินทิเกรต (integrate) รวมแรงที่เกิดขึ้นในชั้นส่วนแผ่นบาง ตลอดความหนาของชั้นวัสดุ ดังแสดงในสมการที่ (2.3) และรูปที่ 2.6



(ก) แสดงลักษณะความขนาดและแกนอ้างอิงของชั้นส่วนของชั้นวัสดุ



(ข) แสดงแรงที่เกิดขึ้นในชั้นส่วนของวัสดุ

(ค) แสดงโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในชั้นส่วนของชั้นวัสดุ

รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะชั้นส่วนของชั้นวัสดุ

โดย

$$V_{yz}^* = V_{yz} + \frac{\partial V_{yz}}{\partial y} dy \quad ; \quad N_{yx}^* = N_{yx} + \frac{\partial N_{yx}}{\partial y} dy$$

$$V_{xz}^* = V_{xz} + \frac{\partial V_{xz}}{\partial x} dx \quad ; \quad M_x^* = M_x + \frac{\partial M_x}{\partial x} dx$$

$$N_x^* = N_x + \frac{\partial N_x}{\partial x} dx \quad ; \quad M_y^* = M_y + \frac{\partial M_y}{\partial y} dy$$

$$N_y^* = N_y + \frac{\partial N_y}{\partial y} dy \quad ; \quad M_{xy}^* = M_{xy} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} dx$$

$$N_{xy}^* = N_{xy} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} dx \quad ; \quad M_{yx}^* = M_{yx} + \frac{\partial M_{yx}}{\partial y} dy$$

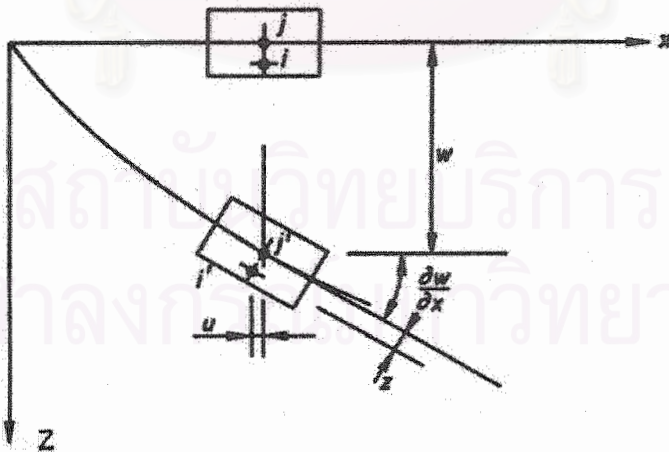
โดยจากรูปที่ 2.6 พบว่าค่าแรงตามแนวตั้งจะสมดุลกับแรงกระทำ (q) ดังแสดงในสมการที่ (2.4)

$$\begin{aligned}
 N_x &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz & M_x &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz \\
 N_y &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y dz & M_y &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dz \\
 N_{xy} &= \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} dz & M_{xy} &= \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} z dz
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

$$\frac{\partial v_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial v_{yz}}{\partial y} = -q \tag{2.4}$$

จากนั้นจะพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่เกิดขึ้นกับการเคลื่อนตัว (displacement) ของชั้นวัสดุ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเคลื่อนตัวจากหลักกลศาสตร์วัสดุดังแสดงในสมการที่ (2.5) และรูปที่ 2.7 ซึ่งแสดงแบบจำลองการเคลื่อนตัวของชิ้นส่วนในชั้นวัสดุ

$$\begin{aligned}
 \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} & \gamma_{xy} = \gamma_{yx} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\
 \epsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} & \text{และ} & & \gamma_{yz} = \gamma_{zy} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\
 \epsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} & & & \gamma_{xz} = \gamma_{zx} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}
 \end{aligned} \tag{2.5}$$



รูปที่ 2.7 แสดงแบบจำลองการเคลื่อนตัวของชิ้นส่วนในชั้นวัสดุ

เมื่อกานประกอบรับแรงกระทำ ชิ้นส่วนในชั้นวัสดุต่างๆของกานประกอบจะเกิดการเคลื่อนตัวขึ้น ซึ่งการเคลื่อนตัวนี้ในเบื้องต้นจะอยู่บนสมมติฐานที่ว่าชิ้นส่วนนี้เป็นวัตถุแข็งเกร็ง (rigid body) โดยเมื่อชิ้นส่วนเกิดการเคลื่อนตัว จุด i และ j (ซึ่งเป็นจุดบนชิ้นส่วน) จะเปลี่ยนตำแหน่งมายัง i' และ

j' ในขณะที่เส้นตรง $i-j$ ยังคงตั้งฉากกับกึ่งกลางผิวหน้าของชิ้นส่วน ซึ่งจากรูปที่ 2.6 สามารถเขียนการเคลื่อนตัวของจุด i ตามแนวแกน x และแนวแกน y ได้ดังสมการที่ (2.4)

$$u = -z \frac{\partial w}{\partial x} \quad \text{และ} \quad v = -z \frac{\partial w}{\partial y} \quad (2.6)$$

แต่ในพฤติกรรมจริงของคานประกอบพบว่า ชิ้นส่วนต่างๆของคานประกอบจะมีผลของแรงดัดเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้นจึงต้องพิจารณาผลของการโก่งตัวจากแรงดัดในชิ้นส่วน โดยใช้สมมติฐานของเคียร์คอฟฟ์และเลิฟ (Kirchhoff - Love hypothesis) ซึ่งกล่าวว่าหน้าตัดของคานประกอบทั้งก่อนและในขณะที่มีแรงกระทำบนคานต้องยังคงเป็นระนาบราบ ดังนั้นค่าการเคลื่อนตัวของชิ้นส่วนในสมการที่ (2.6) จึงเขียนได้ใหม่ดังสมการที่ (2.7)

$$u = u_0 - zw_{,x} \quad \text{และ} \quad v = v_0 - zw_{,y} \quad (2.7)$$

ส่งผลให้ความเค้นและความเครียดของชิ้นส่วนสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (2.8) และ (2.9)

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= u_{0,x} - zw_{,xx} \\ \epsilon_y &= v_{0,y} - zw_{,yy} \\ \gamma_{xy} &= u_{0,y} + v_{0,x} - 2zw_{,xy} \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{14} \\ C_{12} & C_{22} & C_{24} \\ C_{14} & C_{24} & C_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{0,x} - zw_{,xx} \\ v_{0,y} - zw_{,yy} \\ u_{0,y} + v_{0,x} - 2zw_{,xy} \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

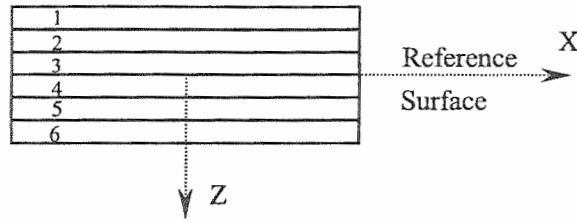
โดย u_0 และ v_0 คือการเคลื่อนตัวของจุดกึ่งกลางผิวหน้าของชิ้นส่วน

$w_{,x}$ และ $w_{,y}$ คือสัญลักษณ์แทน $\frac{\partial w}{\partial x}$ และ $\frac{\partial w}{\partial y}$ ตามลำดับ

$w_{,xx}$ และ $w_{,yy}$ คือความโค้งดัด (curvature) ในทิศทาง x,y ของแผ่นระนาบ

$w_{,xy}$ คือความโค้งบิด (twisting) ของแผ่นระนาบ

และเมื่อพิจารณานำชิ้นของวัสดุมาประกอบกันเป็นหน้าตัดคานประกอบดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงตัวอย่างคานประกอบที่ประกอบขึ้นจากชิ้นของวัสดุจำนวน 6 ชิ้น แต่ละชั้นจะมีความหนาเท่ากับ h_k พบว่าจะสามารถหาแรงภายในของชิ้นวัสดุที่ k ได้ดังสมการที่ (2.10) และแรงภายในบนหน้าตัดคานประกอบทั้งหมดจะแสดงดังสมการที่ (2.11) และ (2.12)



รูปที่ 2.8 แสดงหน้าตัดของคานประกอบที่ประกอบขึ้นจากชั้นวัสดุจำนวน 6 ชั้น

$$\begin{aligned}
 N_x^{(k)} &= \int_{h_{k-1}}^{h_k} \sigma_x^{(k)} dz & M_x^{(k)} &= \int_{h_{k-1}}^{h_k} \sigma_x^{(k)} z dz \\
 N_y^{(k)} &= \int_{h_{k-1}}^{h_k} \sigma_y^{(k)} dz & M_y^{(k)} &= \int_{h_{k-1}}^{h_k} \sigma_y^{(k)} z dz \\
 N_{xy}^{(k)} &= \int_{h_{k-1}}^{h_k} \tau_{xy}^{(k)} dz & M_{xy}^{(k)} &= \int_{h_{k-1}}^{h_k} \tau_{xy}^{(k)} z dz
 \end{aligned} \quad \text{และ} \quad (2.10)$$

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{14} \\ A_{12} & A_{22} & A_{24} \\ A_{14} & A_{24} & A_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{0,x} \\ v_{0,y} \\ u_{0,y} + v_{0,x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{14} \\ B_{12} & B_{22} & B_{24} \\ B_{14} & B_{24} & B_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_{,xx} \\ w_{,yy} \\ 2w_{,xy} \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{14} \\ B_{12} & B_{22} & B_{24} \\ B_{14} & B_{24} & B_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{0,x} \\ v_{0,y} \\ u_{0,y} + v_{0,x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{14} \\ D_{12} & D_{22} & D_{24} \\ D_{14} & D_{24} & D_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_{,xx} \\ w_{,yy} \\ 2w_{,xy} \end{Bmatrix} \quad (2.12)$$

โดย

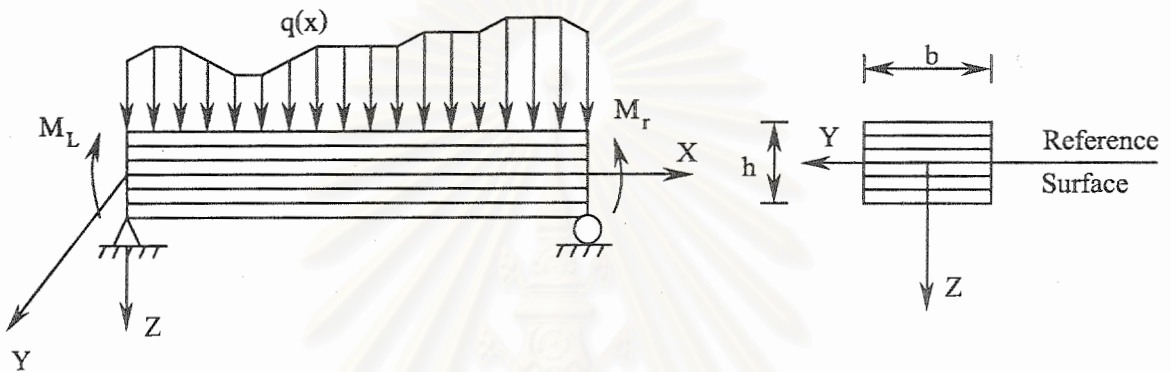
$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n C_{ij}^{(k)} (h_k - h_{k-1})$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n C_{ij}^{(k)} (h_k^3 - h_{k-1}^3)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n C_{ij}^{(k)} (h_k^2 - h_{k-1}^2)$$

2.2.2 หลักวัสดุศาสตร์ของคานประกอบ

เมื่อนำชั้นของวัสดุที่มีความกว้าง b และความหนา h มาประกอบกันเป็นคานประกอบดังรูปที่ 2.9 โดยให้คานประกอบดังกล่าวรับแรงกระทำแบบแผ่สม่ำเสมอ (uniform load) ตามแนวแกน Z และมีโมเมนต์ค้ำกระทำที่ระยะ $x=0$ และ $x=L$ มีค่า M_L และ M_r ตามลำดับ โดยมีค่าการเคลื่อนตัวตามแนวแกน X และแนวแกน Z คงที่ตลอดความกว้างของคานประกอบและไม่ขึ้นกับค่า y และเนื่องจากแรงกระทำต่อคานเป็นแรงกระทำในระนาบ $X-Z$ ดังนั้นการโก่งตัวตามแนวแกน Y จึงมีค่าเป็น 0 ส่งผลให้ค่าความเครียดของคานประกอบนี้เป็นดังสมการที่ (2.13)



รูปที่ 2.9 แสดงคานประกอบรับแรงตามแนวแกน Z และ โมเมนต์ค้ำค้ำที่ปลาย

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= u_{0,x} - zw_{,xx} \\ \epsilon_y &= 0 \\ \gamma_{xy} &= 0\end{aligned}\quad (2.13)$$

และเมื่อพิจารณาที่แผ่นระนาบ k โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากสมการที่ (2.2)

$$\begin{aligned}\sigma_x^{(k)} &= C_{11}^{(k)} \epsilon_x \\ \sigma_y^{(k)} &= C_{12}^{(k)} \epsilon_x = \frac{C_{12}^{(k)}}{C_{11}^{(k)}} \sigma_x^{(k)} \\ \tau_{xy}^{(k)} &= C_{14}^{(k)} \epsilon_x = \frac{C_{14}^{(k)}}{C_{11}^{(k)}} \sigma_x^{(k)}\end{aligned}\quad (2.14)$$

ซึ่งจากสมการที่ (2.14) ทำให้สมการที่ (2.11) และ (2.12) ลดรูปลงมาเป็น

$$\begin{aligned}N_x &= A_{11} u_{0,x} - B_{11} w_{,xx} \\ N_y &= A_{12} u_{0,x} - B_{12} w_{,xx} \\ N_{xy} &= A_{14} u_{0,x} - B_{14} w_{,xx}\end{aligned}\quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} M_x &= B_{11} u_{0,x} - D_{11} w_{,xx} \\ M_y &= B_{12} u_{0,x} - D_{12} w_{,xx} \\ M_{xy} &= B_{14} u_{0,x} - D_{14} w_{,xx} \end{aligned} \quad (2.16)$$

และเมื่อพิจารณาแรงภายในของหน้าตัด ณ ตำแหน่งใดๆ จะพบว่า แรงภายในตามแนวแกน X จะมีค่าเป็น 0 ($N_x=0$) ดังนั้นเมื่อแทนค่า $N_x=0$ ลงในสมการที่ (2.15) จะได้

$$u_{0,x} = \frac{B_{11}}{A_{11}} w_{,xx} \quad (2.17)$$

และเมื่อแทนค่าสมการที่ (2.17) ลงในสมการที่ (2.16) จะได้

$$M_x(x) = \left(\frac{B_{11}^2}{A_{11}} - D_{11} \right) w_{,xx} \quad (2.18)$$

หรือ

$$w_{,xx} = \left(\frac{A_{11}}{B_{11}^2 - A_{11}D_{11}} \right) M_x(x) \quad (2.19)$$

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสมการคาน $w_{,xx}=M/EI$ แล้วพบว่า $(B_{11}^2 - A_{11}D_{11})/A_{11}$ จะมีค่าเท่ากับ EI และเมื่อแทนค่าสมการที่ (2.19) กลับลงไปในสมการที่ (2.17) แล้วอินทิเกรตจะได้ค่าของ u_0 ในเทอมของ x ดังแสดงในสมการที่ (2.20)

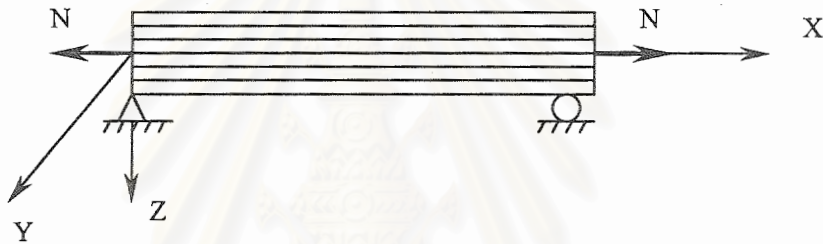
$$u_0(x) = \frac{B_{11}}{B_{11}^2 - A_{11}D_{11}} \int_0^x M(\xi) d\xi + k \quad (2.20)$$

โดยค่า k เป็นค่าคงที่จากการอินทิเกรตหาค่าได้จากสภาวะขอบเขต (boundary condition) และเมื่อแทนค่า $u_0(x)$ และ $w_{,xx}$ ลงในสมการที่ (2.13) จะได้พจน์ ϵ_{xx} ในเทอมของ M_x และเมื่อแทนค่า ϵ_{xx} ลงในสมการที่ (2.14) จะได้ค่าความเค้นในแผ่นระนาบดังสมการที่ (2.21) และ (2.22)

$$\epsilon_x = \frac{A_{11}}{B_{11}^2 - A_{11}D_{11}} \left(\frac{B_{11}}{A_{11}} - z \right) M_x(x) \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_x^{(k)} &= C_{11}^{(k)} \left(\frac{A_{11}}{B_{11}^2 - A_{11}D_{11}} \right) \left(\frac{B_{11}}{A_{11}} - z \right) M_x(x) \\
 \sigma_y^{(k)} &= C_{12}^{(k)} \left(\frac{A_{11}}{B_{11}^2 - A_{11}D_{11}} \right) \left(\frac{B_{11}}{A_{11}} - z \right) M_x(x) \\
 \tau_{xy}^{(k)} &= C_{14}^{(k)} \left(\frac{A_{11}}{B_{11}^2 - A_{11}D_{11}} \right) \left(\frac{B_{11}}{A_{11}} - z \right) M_x(x)
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาให้คานประกอบรับแต่แรงตามแนวแกนดังรูปที่ 2.10 โมเมนต์ดัดภายใน M_x ในสมการที่ (2.16) จะมีค่าเป็น 0 และแรงภายในตามแนวแกน x (N_x) ในสมการที่ (2.15) จะมีค่าเท่ากับ N แทนค่า $M_x=0$ ลงสมการที่ (2.16) จะได้



รูปที่ 2.10 แสดงคานประกอบรับแรงตามแนวแกน X เพียงอย่างเดียว

$$u_{0,x} = \frac{D_{11}}{B_{11}} w_{,xx} \tag{2.23}$$

$$w_{,xx} = \left(\frac{B_{11}}{A_{11}D_{11} - B_{11}^2} \right) N \tag{2.24}$$

โดยค่า EI จะมีค่าเท่ากับ $(A_{11}D_{11} - B_{11}^2)/B_{11}$ และถ้าแรงตามแนวแกน N กระทำ ที่จุดเยื้องกับแกนสะเทินของคาน e_x สมการที่ (2.24) จะเป็นดังสมการที่ (2.25)

$$w_{,xx} = \left(\frac{B_{11}}{A_{11}D_{11} - B_{11}^2} \right) \frac{Ne_x}{e_x} \tag{2.25}$$

ซึ่งเมื่อแทนค่าสมการที่ (2.24) กลับลงไปในสมการที่ (2.23) แล้วอินทิเกรตจะได้ค่าของ u_0 ในเทอมของ x ดังสมการที่ (2.26)

$$u_0(x) = \frac{D_{11}}{A_{11}D_{11} - B_{11}^2} \int_0^x N d\xi + k \quad (2.26)$$

โดยค่า k เป็นค่าคงที่จากการอินทิเกรต หาค่าได้จากสภาวะขอบเขต (boundary condition) และเมื่อแทนค่า $u_0(x)$ และ $w_{,xx}$ ลงในสมการที่ (2.13) จะได้ค่า ϵ_{xx} และเมื่อแทนค่า ϵ_{xx} ลงในสมการที่ (2.14) จะได้ค่าความเค้นในแผ่นระนาบดังสมการที่ (2.27) และ (2.28)

$$\epsilon_x = \frac{B_{11}}{A_{11}D_{11} - B_{11}^2} \left(\frac{D_{11}}{B_{11}} - z \right) N \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} \sigma_x^{(k)} &= C_{11}^{(k)} \left(\frac{B_{11}}{B_{11}^2 - A_{11}D_{11}} \right) \left(\frac{D_{11}}{B_{11}} - z \right) N \\ \sigma_y^{(k)} &= C_{12}^{(k)} \left(\frac{B_{11}}{B_{11}^2 - A_{11}D_{11}} \right) \left(\frac{D_{11}}{B_{11}} - z \right) N \\ \tau_{xy}^{(k)} &= C_{14}^{(k)} \left(\frac{B_{11}}{B_{11}^2 - A_{11}D_{11}} \right) \left(\frac{D_{11}}{B_{11}} - z \right) N \end{aligned} \quad (2.28)$$

จากหลักการดังกล่าวข้างต้น สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นความรู้เบื้องต้นในการพัฒนาแบบจำลองอธิบายการวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงดึงจากที่เกิดขึ้นในคานที่เสริมกำลังด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีอยู่แล้วได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

งานวิจัยที่ผ่านมา

เนื่องจากการวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานที่ซ่อมแซมหรือเสริมกำลังด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ยังไม่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจน อีกทั้งพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนมีแนวโน้มที่จะถูกนำมาใช้ทดแทนแผ่นเหล็กเสริมรับแรงดึงในอนาคต จึงมีผู้สนใจทำการศึกษาพฤติกรรมทั่วไปและพฤติกรรมการวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นของคานที่ซ่อมแซมหรือเสริมกำลังด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนหลายท่าน งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับคานที่ซ่อมแซมหรือเสริมกำลังด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ งานวิจัยศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมโดยรวมซึ่งจะศึกษาผลของพลาสติกเสริมเส้นใยต่อพฤติกรรมของคาน และงานวิจัยศึกษาแบบจำลองอธิบายการเกิดความเข้มของหน่วยแรง

3.1 งานวิจัยศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมโดยรวม

การใช้งานพลาสติกเสริมเส้นใยในการซ่อมแซมและเสริมกำลังประยุกต์มาจากการใช้แผ่นเหล็กเสริมรับแรงดึง แต่เนื่องจากพลาสติกเสริมเส้นใยเป็นวัสดุเปราะ ดังนั้นพฤติกรรมจึงต่างไปจากแผ่นเหล็ก จึงมีผู้วิจัยหลายๆท่านศึกษาพฤติกรรมโดยรวมดังต่อไปนี้

Philip A. Ritchie, Davis A. Thomas, Le-Wu Le and Guy M. Connelly (1991)³ ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการเสริมกำลังของคานด้วยพลาสติกเสริมเส้นใย 3 ชนิดคือ พลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน พลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว และพลาสติกเสริมเส้นใยaramid (Aramid FRP) โดยมุ่งเน้นไปที่การศึกษากำลังและสติเฟนของคานตัวอย่างเนื่องจากการเปลี่ยนกำลัง โมดูลัสยืดหยุ่นและชนิดของพลาสติกเสริมเส้นใย รวมทั้งการทำนายกำลังและลักษณะการวิบัติของคานด้วยวิธีวิเคราะห์ทางทฤษฎี ในการทดสอบมีการปรับปรุงลักษณะการติดพลาสติกเสริมเส้นใยให้แตกต่างออกไปถึง 5 ลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยการยึดปลายพลาสติกเสริมเส้นใย (ลักษณะที่ 2 3 และ 4) และการขยายความยาวของพลาสติกเสริมเส้นใยให้เข้าไปชิดจุดรองรับ (ลักษณะที่ 5) จากผลการทดสอบคานส่วนใหญ่จะเกิดการวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใย ยกเว้นลักษณะที่ 5 เท่านั้นที่ทำให้คานมีลักษณะการวิบัติจากแรงดัด



(ก) ลักษณะที่ 1 (ข) ลักษณะที่ 2 (ค) ลักษณะที่ 3 (ง) ลักษณะที่ 4 (จ) ลักษณะที่ 5

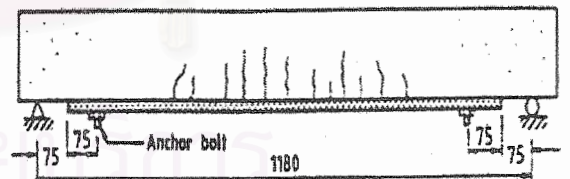
รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะการติดพลาสติกเสริมเส้นใยในงานวิจัยของ Ritchie และคณะ

เมื่อพิจารณาโมเมนต์แตกร้าว (cracking moment) และกำลังรับแรงดัดประลัย (ultimate moment capacity) พบว่าคานที่ติดพลาสติกเสริมเส้นใยทุกตัวมีค่าโมเมนต์แตกร้าวสูงขึ้น โดยค่ากำลังรับแรงดัดประลัยจะสูงขึ้นประมาณ 28% - 97% เมื่อพิจารณารอยแตกร้าวพบว่าจะเกิดมากขึ้นและไม่กระจายตัวอีกทั้งรอยแตกร้าวจะไม่เปิดกว้าง ซึ่งเป็นลักษณะรอยแตกร้าวที่ดี

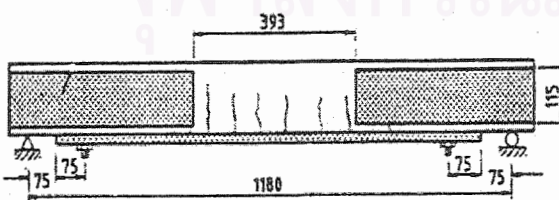
Alfarabi Sharif, G. J. Al-Sulaimani, I. A. Basunbul, M. H. Baluch and B. N. Ghaleh (1994)⁴ ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการซ่อมแซมคานด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วโดยเน้นไปที่การหา ลักษณะการติดพลาสติกเสริมเส้นใยให้คานมีการวิบัติจากแรงดัดอย่างสมบูรณ์ และเปรียบเทียบผลการทดสอบกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี โดยการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจะแบ่งตามลักษณะการวิบัติ คือ การวิเคราะห์เมื่อคานวิบัติจากแรงดัด โดยจะใช้วิธีความเครียดสอดคล้อง (strain compatibility) ในการหาค่ากำลังประลัย และการวิเคราะห์เมื่อคานวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงบริเวณปลาย แถบพลาสติกเสริมเส้นใยโดยใช้แบบจำลองของ T. M. Robert ในการทำนายกำลังของคาน (ซึ่งจะกล่าวถึงแบบจำลองนี้ในหัวข้อถัดไป) จากผลการทดสอบพบว่าลักษณะการติดพลาสติกเสริมเส้นใยที่มีการยึดปลาย เช่น ใช้สลักเกลียวหรือใช้พลาสติกเสริมเส้นใยหุ้มทับ จะให้กำลังของคานสูงกว่า การติดแบบไม่ใช้วัสดุยึดปลาย และลักษณะการติดพลาสติกเสริมเส้นใยที่ให้การวิบัติจากแรงดัด และให้กำลังสูงสุดคือการติดแบบไอแจ็กเก็ต (I - Jacket) ดังรูปที่ 3.2(ง) ซึ่งการติดพลาสติกเสริมเส้นใยลักษณะนี้ยังช่วยเพิ่มความเหนียว (ductility) และช่วยป้องกันการเกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากความเค้นเฉือน (shear stress) ในคานที่เกิดมักจะเกิดขึ้นเมื่อใช้สลักเกลียวเป็นวัสดุยึดปลายอีกด้วย และยังพบว่า การติดพลาสติกเสริมเส้นใยที่หนา มีโอกาสเกิดการวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงบริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใยมากกว่าการติดพลาสติกเสริมเส้นใยที่มีความหนาน้อย อีกทั้งยังทำให้ความเหนียวของคานลดลง



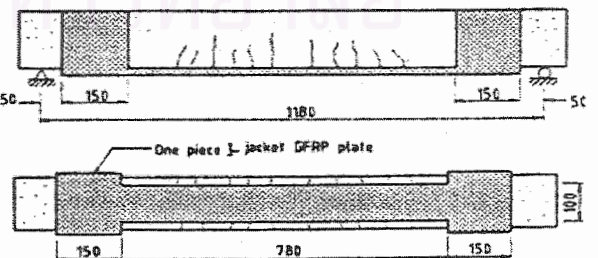
(ก) การติดแบบไม่ยึดปลาย



(ข) การติดแบบยึดปลายด้วยสลักเกลียว



(ค) การยึดปลายด้วยสลักเกลียวและพลาสติกเสริมเส้นใย



(ง) การติดแบบไอแจ็กเก็ต (I - Jacket)

รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะการติดพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วในงานวิจัยของ Sharif และคณะ

Hamid Saadatmanesh (1994)⁵ ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ไปของการใช้พลาสติกเสริมเส้นใยรับแรงในโครงสร้างต่างๆ ในส่วนขององค์อาคารรับแรงค้ำที่เชื่อมแซมด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยได้ทำการทดสอบ วิเคราะห์ และทำนายพฤติกรรมด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง (strain compatibility) โดยในช่วงที่คานมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (elastic behavior) สามารถทำนายพฤติกรรมได้ใกล้เคียงผลการทดสอบ แต่ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมได้ในช่วงที่คานมีพฤติกรรมแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic behavior) เนื่องจากคานตัวอย่างมีการวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใย Hamid สรุปว่าพลาสติกเสริมเส้นใยสามารถช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงค้ำประลัยของคานได้อย่างมาก โดยเฉพาะคานที่มีอัตราการเสริมเหล็กเสริมรับแรงค้ำที่ต่ำ และยังช่วยลดขนาดของรอยแตกร้าวได้อีกด้วย แต่พลาสติกเสริมเส้นใยจะไปลดความเหนียวของคานลง โดยการลดลงของความเหนียวจะแปรตามความเหนียวของคานก่อนที่จะเชื่อมแซมด้วย

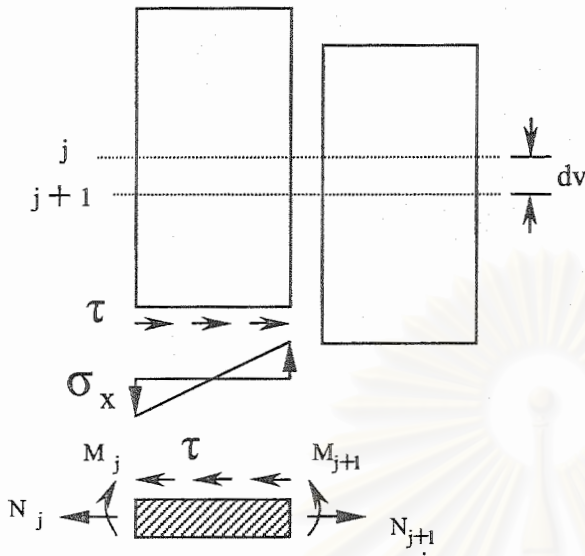
Y. N. Ziraba, M. H. Baluch, I. A. Basunbul, A. M. Sharif, A. K. Azad and G. J. Al-Sulaimani (1994)⁶ ทำการศึกษาและแนะนำวิธีออกแบบสำหรับคานคานค้ำเสริมรับแรงค้ำภายนอกโดยแยกการออกแบบตามลักษณะการวิบัติของคานคือ การวิบัติจากแรงค้ำ โดยนำข้อกำหนดออกแบบของ ACI มาประยุกต์ใช้ และการวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใยจะนำแบบจำลองของ T. M. Robert มาคำนวณกำลังของคานที่รับได้ก่อนที่จะวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบริเวณปลายแผ่นเสริมรับแรงค้ำภายนอก

Marco Arduini, Angelo Di Tommaso and Antonio Nanni (1997)⁷ ได้ทำการศึกษาการวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงบริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนซึ่งทำให้คานมีพฤติกรรมแบบเปราะ โดยทำการทดสอบคานตัวอย่างเพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับกรณีวิเคราะห์ผลทางทฤษฎีและนำโปรแกรมไฟไนต์เอลเมนต์ (finite element) มาเปรียบเทียบความถูกต้องอีกครั้งหนึ่ง ในการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจะพิจารณาพฤติกรรมของวัสดุดังนี้

- คอนกรีต : พิจารณาพฤติกรรมตามแบบจำลองของ Hognestad และคำนึงถึงผลการโอบรัดของเหล็กเสริมตามขวางตามข้อกำหนดของ CEB-FIP
- กาว (adhesive) : พิจารณาเป็นวัสดุยืดหยุ่นเนื้อเดียวกันตลอด (isotropic elastic behavior) และมีการยึดเหนี่ยวที่สมบูรณ์ทั้งกับคอนกรีตและพลาสติกเสริมเส้นใย
- พลาสติกเสริมเส้นใย: พิจารณาให้มีพฤติกรรมยืดหยุ่นแบบเส้นตรง (linear-elastic behavior)
- เหล็กเสริม : พิจารณาให้มีพฤติกรรมเป็นเส้นตรง 2 ช่วง (bi-linear behavior)

ซึ่งคานตัวอย่างจะถูกแบ่งการพิจารณาออกเป็น n ชั้น แต่ละชั้นมีความยาว Dx และใช้สมการสมดุลของแรงค้ำจากและโมเมนต์ค้ำค้ำ แรงเฉือนในแต่ละชั้นส่วนคือผลต่างของแรงค้ำในพลาสติกเสริมเส้นใย โดยพิจารณาการกระจายตัวของแรงเฉือนเป็นเส้นตรงตลอดความกว้างของชั้นส่วน ค่าแรงเฉือนสูงสุดในชั้นส่วน j มีค่าดังสมการที่ (3.1) ส่วนพลาสติกเสริมเส้นใยจะรับแรงค้ำตามแนวแกนและโมเมนต์ค้ำค้ำตามรูปที่ 3.3 ความแตกต่างระหว่างโมเมนต์ที่ปลายพลาสติกเสริมเส้นใยทำให้เกิด

ความเค้นดัดฉากขึ้นบริเวณผิวรอยต่อคอนกรีตกับชั้นกาวและชั้นกาวกับพลาสติกเสริมเส้นใย โดยค่าความเค้นดัดฉากที่มากที่สุดเป็นไปตามสมการที่ (3.2)



$$\tau_{max,j} = 2(N_{j+1} - N_j)(D_x) \quad (3.1)$$

$$\sigma_{max,j} = \frac{6M_j(D_x)^2}{b} \quad (3.2)$$

โดย

$\tau_{max,j}$: แรงเฉือนสูงสุดที่ผิวรอยต่อคอนกรีตกับชั้นกาวในชั้นส่วน j

$\sigma_{max,j}$: ความเค้นดัดฉากขึ้นบริเวณผิวรอยต่อคอนกรีตกับชั้นกาว

N_j, M_j : แรงดึงและโมเมนต์ในชั้นส่วนของพลาสติกเสริมเส้นใยตามลำดับ

รูปที่ 3.3 แสดงแบบจำลอง Marco Arduini และคณะ

จากผลการทดสอบพบว่า คานทุกตัวจะมีพฤติกรรมยืดหยุ่นแบบเส้นตรง (linear elastic behavior) ในช่วงแรก จากนั้นรอยแตกร้าวจะเกิดขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางคานและพฤติกรรมของคานจะไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear behavior) ซึ่งในช่วงนี้คานจะรอยแตกร้าวเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งค่าความเครียดในพลาสติกเสริมเส้นใยและการโก่งตัวจะเพิ่มขึ้นมากอีกด้วย และเมื่อเปรียบเทียบผลจากการทดสอบกับการวิเคราะห์ทางทฤษฎีพบว่า อัตราส่วนกำลังรับแรงดัดประลัยทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากการทดสอบมีค่าอยู่ระหว่าง 0.93-1.09 และ 0.70-1.0 สำหรับการโก่งตัว

N. F. Grace, G. A. Sayed, A. K. Soliman and K. R. Saleh (1999)⁹ เน้นศึกษาไปที่ผลของลักษณะการติดพลาสติกเสริมเส้นใยที่มีต่อกำลังรับแรงดัดและศึกษาการประมาณค่าความเหนียวของคานตัวอย่างโดยใช้พลาสติกเสริมเส้นใย 2 ชนิดคือ พลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนและพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว ซึ่งลักษณะการติดพลาสติกเสริมเส้นใยเป็นไปดังรูปที่ 3.4 ผลการทดสอบพบว่าคานตัวอย่างกลุ่มที่ 1 2 และ 4 จะวิบัติจากแรงดัดซึ่งจะมีทั้งที่เกิดจากคอนกรีตถูกอัดแตก (crushing) และพลาสติกเสริมเส้นใยขาดออกจากกัน (rupture of FRP) ส่วนการวิบัติของคานตัวอย่างกลุ่มที่ 3 เกิดจากพลาสติกเสริมเส้นใยลอกออก (debonding) และคานตัวอย่างกลุ่มที่ 5 เกิดการวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใย เมื่อพิจารณากำลังรับแรงดัดของคานตัวอย่างพบว่าค่าเพิ่มขึ้นจากคานควบคุมประมาณ 26%-135% ซึ่งคานตัวอย่างที่มีกำลังสูงสุดเกิดการวิบัติแบบคอนกรีตถูกอัดแตก ในส่วนของความเหนียวจะถูกนิยามด้วยอัตราส่วนพลังงานที่ถูกดูดซับเข้าไปในช่วงพฤติกรรมแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic behavior) ต่อพลังงานที่ถูกดูดซับไปทั้งหมดนั้น พบว่าความเหนียวของคานตัวอย่างทั้งหมดมีค่าน้อยกว่าคานควบคุม

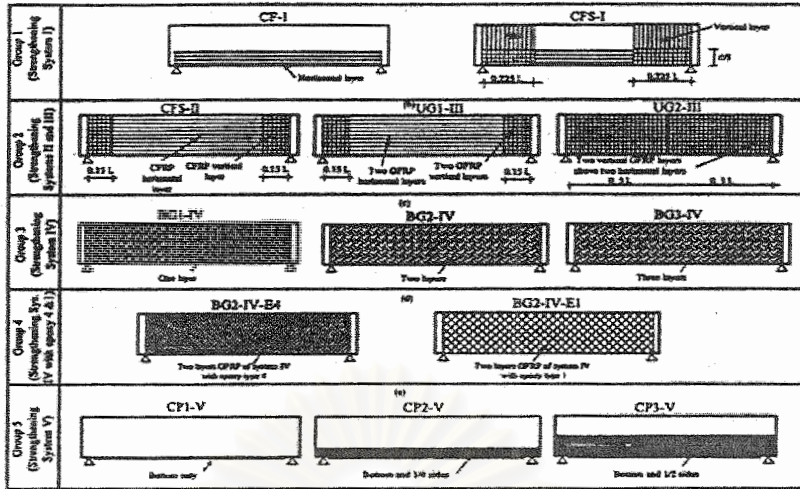


Fig. 1—Arrangements of strengthening of tested beams.

รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะการติดพลาสติกเสริมเส้นใยในงานวิจัยของ N. F. Grace และคณะ

G. Tumialan, P. Serra, A. Nanni and A. Belarbi (1999)¹⁰ ทำการศึกษาเน้นไปที่พฤติกรรมการวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใยโดยตรง โดยดูผลของลักษณะการติดพลาสติกเสริมเส้นใยรวมทั้งลักษณะและชนิดของกาวที่มีต่อการวิบัติ ผลการทดสอบพบว่าคานตัวอย่างมีกำลังต้านทานแรงดัดเพิ่มขึ้น 30%-60% และการวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงจะเกิดขึ้น 2 ลักษณะคือ การหลุดลอกของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมบริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใย ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่ความหนาของชั้นกาวมากกว่าความหนาของพลาสติกเสริมเส้นใย การวิบัติลักษณะนี้ป้องกันได้โดยใช้วัสดุยึดปลายพลาสติกเสริมเส้นใยแบบยูแจ็คเก็ต (U-Jacket) ส่วนการวิบัติในอีกลักษณะคือการหลุดลอกของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมบริเวณกึ่งกลางคาน

3.2 งานวิจัยศึกษาแบบจำลองอธิบายการเกิดความเข้มของหน่วยแรง

การศึกษาถึงลักษณะการเกิดความเข้มของหน่วยแรงซึ่งก่อให้เกิดการหลุดลอกของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกระทำมาตั้งแต่การใช้แผ่นเหล็กเป็นแผ่นเสริมรับแรงดึงภายนอก การศึกษาในส่วนของแผ่นเหล็กเสริมรับแรงดึงมีดังต่อไปนี้

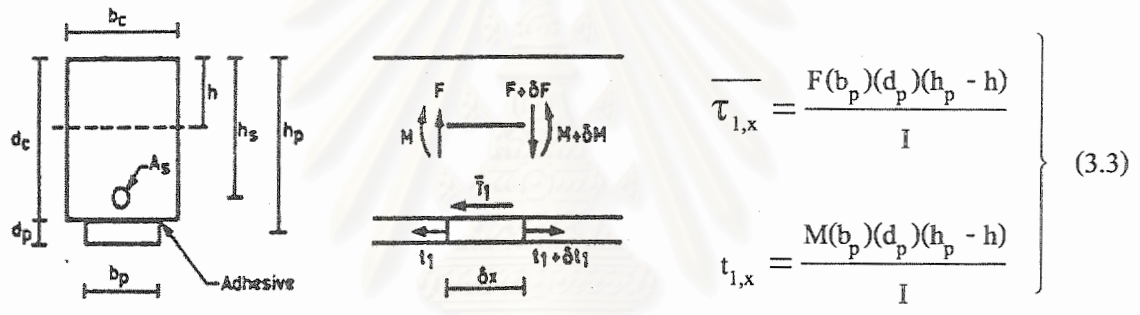
M. D. McDonald (1982)¹¹ ได้แนะนำให้อำกัดอัตราส่วนของความกว้างต่อความหนาของแผ่นเสริมรับแรงดึงภายนอกไม่ต่ำกว่า 60 เพื่อป้องกันการวิบัติลักษณะดังกล่าว แต่ R. N. Swamy แนะนำให้มีค่าไม่ต่ำกว่า 50

Oehlers D. J. and Moran J. P. (1990)¹¹ ได้แนะนำให้อำกัดค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบริเวณปลายแผ่นเหล็กเสริมรับแรงดึงเพื่อป้องกันการหลุดลอกของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมบริเวณที่เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด และในปี 1992 Oehlers ได้เสนอว่าสามารถป้องกันการวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นบริเวณปลายแผ่นเหล็กเสริมรับแรงดึงได้โดยจำกัดทั้งค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดบริเวณปลายแผ่นเหล็กเสริมรับแรงดึง

ในส่วนของแบบจำลอง มีแบบจำลองอธิบายพฤติกรรมดังกล่าวที่สำคัญอยู่ 2 แบบจำลอง คือ แบบจำลองของ T. M. Robert (1989) และแบบจำลองของ Amir M. Malek และคณะ (1998)

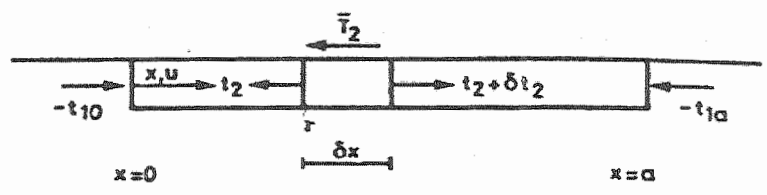
T. M. Robert (1989)² เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นอธิบายการเกิดความเข้มของหน่วยแรงบริเวณปลายแผ่นเหล็กเสริมรับแรงดึง โดยแยกแบบจำลองเป็นการทำนายการเกิดความเข้มของหน่วยแรงเฉือน และหน่วยแรงตึงฉาก แบบจำลองนี้แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนและจะนำผลที่ได้ในแต่ละขั้นตอนมารวมกันเป็นคำตอบที่สมบูรณ์

ขั้นตอนที่ 1 จะพิจารณาให้หน้าตัดคานามีพฤติกรรมเป็นคานาประกอบอย่างสมบูรณ์ โดยให้แผ่นเหล็กเสริมรับแรงดึงมีแต่แรงตามแนวแกนและแรงเฉือนตามแนวนอนจากกาวเท่านั้นดังรูปที่ 3.5 ในขั้นตอนนี้จะได้ค่าแรงเฉือนตามแนวนอนที่ 1 และค่าแรงดึงที่ 1 รวมทั้งค่าแรงเฉือนและแรงดึงเสมือนที่กระทำที่ปลายแผ่นเหล็กเสริมรับแรงดึง ($\tau_{10}, \tau_{1a}, t_{10}, t_{1a}$) โดยแรงเฉือนและแรงดึงที่ได้จะแสดงดังสมการที่ (3.3)



รูปที่ 3.5 แสดงแบบจำลองในขั้นตอนที่ 1 ของ T. M. Robert

ขั้นตอนที่ 2 จะพิจารณาเฉพาะแผ่นเหล็กเสริมรับแรงดึง โดยให้แผ่นเหล็กรับแรงเฉือนตามแนวตั้ง โมเมนต์คดและแรงเฉือนตามแนวนอนจากกาวดังรูปที่ 3.6 (ในรูปจะไม่แสดงแรงเฉือนตามแนวตั้งและโมเมนต์คด) และสมมติให้ชั้นกาวมีสติเฟนสเลื่อนต่อหน่วยความยาว (K_s) ดังในสมการที่ (3.4) ในขั้นตอนนี้ค่าแรงดึงบริเวณปลายแผ่นเหล็กเสริม (t_{10}, t_{1a}) จะต้องถูกกำจัดโดยใส่แรงในทิศทางตรงกันข้ามเข้าไปเนื่องจากแรงเหล่านี้ไม่มีอยู่จริง ในขั้นตอนนี้จะได้ค่าแรงเฉือนตามแนวนอนที่ 2 ตามสมการที่ (3.5) ค่าแรงดึงที่ 2 ตามสมการที่ (3.6)



รูปที่ 3.6 แสดงแบบจำลองในขั้นตอนที่ 2 ของ T. M. Robert

$$K_s = G_a \frac{b_a}{d_a} \quad (3.4)$$

$$\overline{\tau}_{2,x} = \left(\frac{K_s}{E_p d_p b_p} \right)^{1/2} \left(-t_{10} \sinh \alpha x + \left(\frac{t_{10} \cosh \alpha a - t_{1a}}{\sinh \alpha a} \right) \cosh \alpha x \right) \quad (3.5)$$

$$t_2 = \left(E_p \frac{du}{dx} \right) b_p d_p \quad (3.6)$$

โดย G_a : โมดูลัสเฉือนของชั้นกาว

b_a, d_a : ความกว้างและความหนาของชั้นกาว

b_p, d_p : ความกว้างและความหนาของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

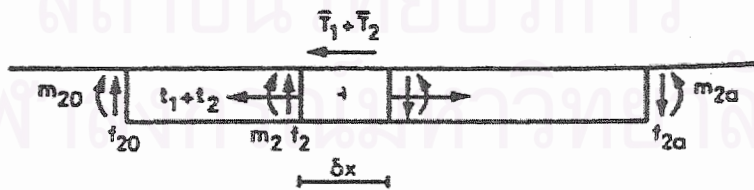
E_p : โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นเหล็กเสริมรับแรงดึง

α : เป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $\left(\frac{K_s}{E_p b_p d_p} \right)^{1/2}$

u : การเคลื่อนที่ของแผ่นเหล็กเสริมรับแรงดึงตามแนวนอน มีค่าตามสมการที่ (3.7)

$$u = -\frac{t_{10} \sinh \alpha x}{E_p b_p d_p \alpha} + \frac{(t_{10} \cosh \alpha a - t_{1a})}{E_p b_p d_p \alpha \sinh \alpha a} \cosh \alpha x \quad (3.7)$$

และจากรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นรูปแสดงการรวมผลจากชั้นตอนที่ 1 และชั้นตอนที่ 2 เข้าด้วยกัน เมื่อสมมูลแรงภายในช่วง δx จะได้แรงเฉือนตามแนวดิ่งดังสมการที่ (3.8) เนื่องจากมุมการหมุน (curvature) ของคอนกรีตและแผ่นเหล็กเสริมรับแรงดึงมีค่าเท่ากันโดยประมาณดังนั้น โมเมนต์และแรงเฉือนตามแนวดิ่งที่ปลายแผ่นเหล็กเสริมรับแรงดึง (m_{20}, f_{20}) จะมีค่าดังสมการที่ (3.9) และ (3.10) ตามลำดับ



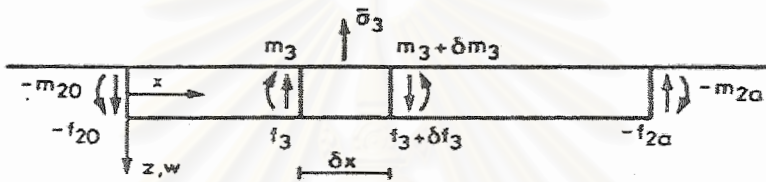
รูปที่ 3.7 แสดงรวมผลคำตอบจากชั้นตอนที่ 1 และชั้นตอนที่ 2 เข้าด้วยกัน

$$f_2 = \frac{dm_2}{dx} + \left(\overline{\tau}_1 + \overline{\tau}_2 \right) \frac{d_p}{2} \quad (3.8)$$

$$m_{20} = M_0 \left(\frac{E_p I_p}{E_p I_p + E_c I_c} \right) \quad (3.9)$$

$$f_{20} = F_0 \left(\frac{E_p I_p}{E_p I_p + E_c I_c} \right) + \left(\overline{\tau}_{10} + \overline{\tau}_{20} \right) \frac{d_p}{2} \quad (3.10)$$

ขั้นตอนที่ 3 จะพิจารณาเฉพาะแผ่นเหล็กเสริมรับแรงดึง โดยให้แผ่นเหล็กรับแรงเชื่อมตามแนวตั้ง โมเมนต์คัตและแรงดึงจากจากชั้นกาวดังรูปที่ 3.8 และสมมติให้ชั้นกาวมีสติฟเนสต่อหน่วยความยาว (K_n) ดังในสมการที่ (3.11) ในขั้นตอนนี้ค่าแรงเชื่อมตามแนวตั้งและโมเมนต์คัตบริเวณปลายแผ่นเหล็กเสริม ($f_{20}, f_{2a}, m_{20}, m_{2a}$) จะต้องถูกกำจัดโดยใส่แรงในทิศทางตรงกันข้ามเข้าไปเนื่องจากแรงเหล่านี้ไม่มีอยู่จริง ในขั้นตอนนี้จะได้ค่าแรงเชื่อมตามแนวอนัลพัทธ์ตามสมการที่ (3.12) ค่าแรงดึงจากจากชั้นกาวตามสมการที่ (3.13) และการเคลื่อนตัวตามแนวตั้งตามสมการที่ (3.14)



รูปที่ 3.8 แสดงแบบจำลองในขั้นตอนที่ 3 ของ T. M. Robert

$$K_n = E_a \frac{b_a}{d_a} \quad (3.11)$$

$$\overline{\tau} = \overline{\tau}_1 + \overline{\tau}_2 \quad (3.12)$$

$$\overline{\sigma} = 2e^{-\gamma x} \left[\left(f_{20} \gamma + m_{20} \gamma^2 \right) \cos \gamma x - m_{20} \gamma^2 \sin \gamma x \right] \quad (3.13)$$

$$w = \frac{e^{-\gamma x}}{2E_p I_p \gamma^4} \left[\left(f_{20} \gamma + m_{20} \gamma^2 \right) \cos \gamma x - m_{20} \gamma^2 \sin \gamma x \right] \quad (3.14)$$

$$\gamma = \left(\frac{K_n}{4E_p I_p} \right)^{1/4} \quad (3.15)$$

สำหรับสมการที่ (3.5) และ (3.13) จะไม่ให้ค่าที่ถูกต้องเมื่อ x เข้าใกล้ค่า a ดังนั้นจึงต้องพิจารณาสมการดังกล่าวเป็นแบบกระจกเสมือน (mirror image problem) กล่าวคือ เมื่อค่า x เข้าใกล้ a จะต้องพิจารณาสมการทั้งสองที่จุด x' เข้าใกล้ 0 แทน

ในการหาค่าความเค้นสูงสุดเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน Robert ได้พิจารณาสมการที่ (3.5) ใหม่โดยให้ $\sinh \alpha x$ มีค่าประมาณ $\cosh \alpha x$ และสมการที่ (3.13) พิจารณาตัดพจน์รอง (minor term) ซึ่งได้แก่ค่า m_2 ทิ้งไปทำให้ได้ค่าความเค้นเฉือนและความเค้นดัดจากสูงสุดเป็นดังสมการที่ (3.16) และ (3.17) ตามลำดับ

$$\tau_0 = \left(F_0 + M_0 \left\{ \frac{K_s}{E_p b_p d_p} \right\}^{1/2} \right) \frac{(b_p)(d_p)(h_p - h)}{I b_a} \quad (3.16)$$

$$\sigma_0 = \tau_0 d_p \left(\frac{K_n}{4E_p I_p} \right)^{1/4} \quad (3.17)$$

Robert ทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสมการที่ (3.16) และ (3.17) กับคำตอบที่ถูกต้องแม่นยำกว่า พบว่าค่าที่ได้จากสมการทั้งสองมีค่าต่ำกว่าอยู่ไม่เกิน 30% Robert ให้เหตุผลว่าเกิดจากการประมาณค่าต่างๆตั้งแต่ขั้นตอนแรก จึงทำให้เกิดค่าผิดพลาดสะสมขึ้นในทุกขั้นตอน ผลที่ได้จึงผิดพลาดไป และในการใช้แบบจำลองนี้ Robert แนะนำให้ใช้ค่าโมเมนต์ที่ตำแหน่ง $(d_c + d_p)/2$ จากปลายแผ่น เหล็กเสริมรับแรงดึงแทนค่า M_0 เพื่อให้ผลที่ได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

Amir M. Malek, Hamid Saadatmanesh and Mohammad R. Ehsani (1998)⁸ ได้ทำการสร้างแบบจำลองอธิบายการเกิดความเค้มของหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงดัดจากบริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใย โดยมีสมมติฐานว่า

- 1 วัสดุทั้ง 3 ชนิดคือ คอนกรีต พลาสติกเสริมเส้นใย และกาวมีพฤติกรรมยืดหยุ่นแบบเส้นตรงและมีเนื้อเดียวกันตลอด
- 2 ชั้นกาวมีการยึดเหนี่ยวที่สมบูรณ์กับหน้าตัดคอนกรีตและพลาสติกเสริมเส้นใย
- 3 การกระจายตัวของความเครียดเป็นเส้นตรงตลอดทั้งหน้าตัดคาน

Malek ตั้งสมมติฐานดังกล่าวโดยดูจากพฤติกรรมจริงของคานเนื่องจากบริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใยเป็นบริเวณที่มีค่าโมเมนต์ดัดต่ำ ทำให้หน่วยแรงต่างๆที่เกิดจากแรงดัดมีค่าน้อย ส่งผลให้วัสดุในบริเวณดังกล่าวมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเป็นเส้นตรง ซึ่งแบบจำลองของ Malek จะพิจารณาหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงดัดจากแยกออกจากกัน โดยแบบจำลองอธิบายการเกิดความเค้มของหน่วยแรงเฉือน ($\tau(x)$) และตัวแปรที่เกี่ยวข้องแสดงในสมการที่ (3.18) ถึง (3.23) และอาศัยรูปที่ 3.9 ประกอบการพิจารณา อนึ่งนิยามของตัวแปรต่างๆในแบบจำลองจะเป็นไปดังแสดงในหน้าที่ 27

$$\tau(x) = t_p [b_3 \sqrt{A} \cosh(\sqrt{A}x) - b_3 \sqrt{A} \sinh(\sqrt{A}x) + 2b_1 x + b_2] \quad (3.19)$$

โดยที่

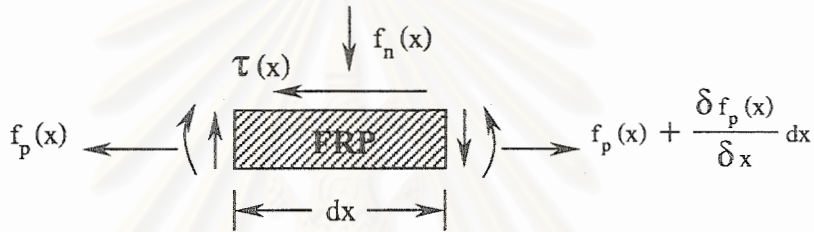
$$A = \frac{G_a}{t_a t_p E_p} \quad (3.18)$$

$$b_1 = \frac{y a_1 E_p}{I_{tr} E_c} \quad (3.20)$$

$$b_2 = \frac{y E_p}{I_{tr} E_c} (2a_1 L_0 + a_2) \quad (3.21)$$

$$b_3 = E_p \left[\frac{y}{I_{tr} E_c} (a_1 L_0^2 + a_2 L_0 + a_3) + 2b_1 \frac{t_a t_p}{G_a} \right] \quad (3.22)$$

$$M(x_0) = a_1 x_0^2 + a_2 x_0 + a_3 \quad (3.23)$$



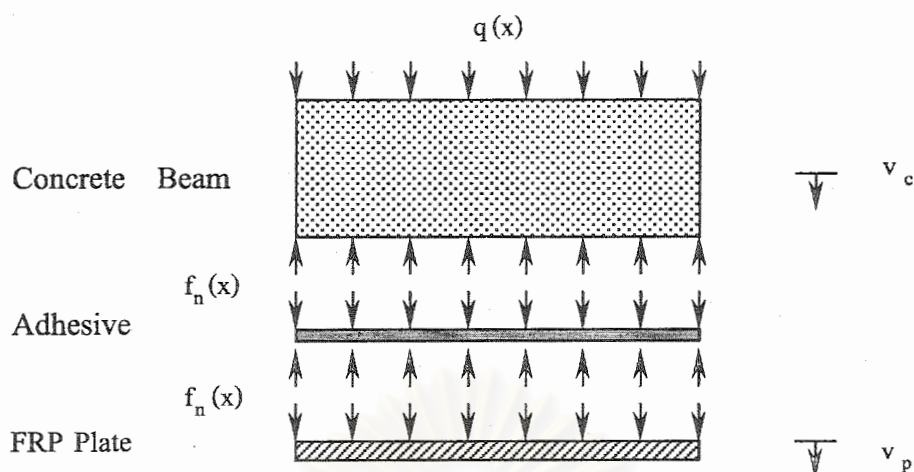
รูปที่ 3.9 แสดงแบบจำลองความเค้นที่เกิดขึ้นในพลาสติกเสริมเส้นใยของ Malek และคณะ

ซึ่งสมการในแบบจำลองอธิบายการเกิดความเค้นของหน่วยแรงเฉือน ($\tau(x)$) และตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมดจะอยู่ในพจน์ของตัวแปร x โดยมีจุดเริ่มต้นอยู่ที่ปลายพลาสติกเสริมเส้นใย ในขณะเดียวกันคานซึ่งมีโมเมนต์คด ($M(x_0)$) ดังแสดงในสมการที่ (3.23) จะมีจุดเริ่มต้นของตัวแปร x_0 เป็นจุดศูนย์กลาง แต่เพื่อให้ง่ายต่อการอ้างอิงตำแหน่ง Malek จึงสมมติให้จุดเริ่มต้นของตัวแปร x ห่างจากจุดเริ่มต้นของตัวแปร x_0 อยู่ L_0 ดังนั้นความสัมพันธ์ของ x และ x_0 จึงเป็น $x_0 = x + L_0$ และเมื่อพิจารณาสมการที่ (3.18) บริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใย ($x=0$) จะได้ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดดังสมการที่ (3.24)

$$\tau_{\max} = t_p (b_3 \sqrt{A} + b_2) \quad (3.24)$$

ในส่วนของแบบจำลองอธิบายการเกิดความเค้นของหน่วยแรงตั้งฉาก ($f_n(x)$) และตัวแปรที่เกี่ยวข้องจะแสดงดังสมการที่ (3.25) ถึง (3.31) โดยพิจารณารูปที่ 3.10 ประกอบ และนิยามของตัวแปรต่างๆในแบบจำลองจะเป็นไปดังแสดงในหน้าที่ 27

$$f_n(x) = e^{-\beta x} \left[D_1 \cos(\beta x) + D_2 \sin(\beta x) \right] + \frac{q E_p I_p}{b_p E_c I_c} \quad (3.25)$$



รูปที่ 3.10 แสดงแบบจำลองความเค้นตึงฉากในคานคอนกรีตติดพลาสติกเสริมเส้นใยของ Malek

โดยที่

$$D_1 = \left(\frac{K_n}{E_p I_p} \right) \left(\frac{v_p}{2\beta^3} \right) - \left(\frac{K_n}{E_c I_c} \right) \left(\frac{v_c + \beta M_0}{2\beta^3} \right) \quad (3.26)$$

$$D_2 = \left(\frac{K_n}{E_c I_c} \right) \left(\frac{M_0}{2\beta^3} \right) \quad (3.27)$$

$$V_c = V_0 + V_c^s \quad \text{และ} \quad V_p = V_p^s \quad (3.28)$$

$$V_c^s = -b_p \bar{y}_c t_p (b_3 \sqrt{A} + b_2) \quad (3.29)$$

$$V_p^s = -0.5 b_p t_p^2 (b_3 \sqrt{A} + b_2) \quad (3.30)$$

$$\beta = \left(\frac{K_n b_p}{4E_p I_p} \right)^{1/4} \quad (3.31)$$

ซึ่งสมการในแบบจำลองอธิบายการเกิดความเค้นของหน่วยแรงตึงฉาก ($f_n(x)$) และตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมดจะอยู่ในพจน์ของตัวแปร x โดยมีจุดเริ่มต้นอยู่ที่ปลายพลาสติกเสริมเส้นใยเหมือนกับสมการในแบบจำลองอธิบายการเกิดความเค้นของหน่วยแรงเฉือน ($\tau(x)$) โดยเมื่อพิจารณาสมการที่ (3.25) บริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใย ($x=0$) จะได้ค่าหน่วยแรงตึงฉากสูงสุดดังสมการที่ (3.32)

$$f_{n, \max} = \frac{K_n}{2\beta^3} \left(\frac{V_p}{E_p I_p} - \frac{V_c + \beta M_0}{E_c I_c} \right) + \frac{q E_p I_p}{b_p E_c I_c} \quad (3.32)$$

- โดย E_p, E_c : โมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกเสริมเส้นใยและคอนกรีตตามลำดับ
 G_a : โมดูลัสเฉือนของชั้นกาว
 I_p, I_c : โมเมนต์ความเฉื่อยของพลาสติกเสริมเส้นใยและคอนกรีตตามลำดับ
 I_r : โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแปลงเทียบเท่าหน้าตัดคอนกรีต
 \bar{y} : ระยะจากผิวคอนกรีตส่วนรับแรงอัดถึงแกนสะเทินของหน้าตัดเสริมกำลังที่ยังไม่แตกร้าว
 \bar{y}_c : ระยะจากแนวแกนสะเทินถึงผิวบนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา
 t_a, t_p : ความหนาของชั้นกาวและพลาสติกเสริมเส้นใยตามลำดับ
 b_p : ความกว้างของพลาสติกเสริมเส้นใย
 K_n : สติฟเนสในแนวตั้งฉากกับผิวของชั้นกาว มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับความหนาของชั้นกาว
 q : แรงภายนอกที่มากระทำเป็นน้ำหนักกระทำแผ่สม่ำเสมอ (uniform load)
 M_p, V_0 : โมเมนต์คัดและแรงเฉือนในคานคอนกรีตบริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใยเนื่องจากแรงภายนอกที่มากระทำ
 V_p^s, V_c^s : แรงเฉือนในพลาสติกเสริมเส้นใยและคอนกรีต เป็นแรงปฏิกิริยาที่ต้านทานแรงเฉือนในชั้นกาวตามลำดับ
 V_p, V_c : แรงเฉือนในพลาสติกเสริมเส้นใยและคอนกรีตบริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใย

P. Mukhopadhyaya and R. N. Swamy (1999)¹¹ ได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบแบบจำลองของ Robert กับผลการทดสอบคานของผู้วิจัยรายอื่นที่รวบรวมมา พบว่าสมการที่ (3.16) และ (3.17) ของ Robert ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมการวิบัติดังกล่าวได้ในทุกกรณี เนื่องจากผลการทดสอบที่รวบรวมมามีค่าการกระจายตัวของข้อมูลที่กว้างมาก โดยเฉพาะเมื่อแผ่นเสริมรับแรงดึงภายนอกเป็นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนทำให้ยากต่อการสรุปผล และผลการทดสอบเหล่านี้ยังชี้ให้เห็นว่าค่าความเข้มของหน่วยแรงที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นตาม โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นเสริมรับแรงดึงภายนอก แต่สำหรับพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนผลการทดสอบมีการกระจายตัวมากเกินไปที่จะสรุปได้ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงผลจากการใช้วัสดุที่มีพฤติกรรมแตกต่างกันต่อพฤติกรรมของคานได้อย่างชัดเจน

บทที่ 4

การทดสอบ

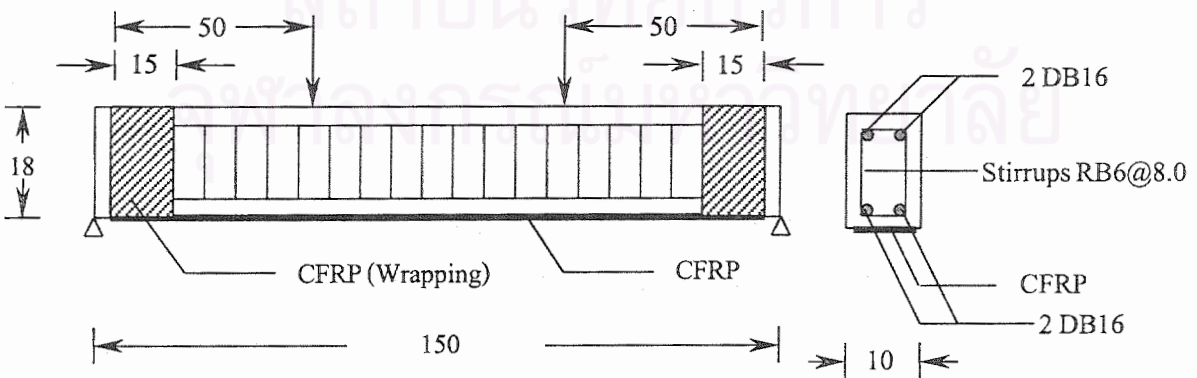
4.1 การทดสอบเบื้องต้น

ในการทดสอบเบื้องต้นใช้คานตัวอย่างขนาด 10 X 18 X 150 ซม. จำนวน 4 ตัวอย่าง ให้นำหนักแบบจุดกระทำ 2 จุด โดยใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติทางด้านกำลังดึงแสดงด้านล่างและมีลักษณะการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนตามตารางที่ 4.1 และตามรูปที่ 4.1

คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดประลัยที่อายุ 28 วัน	: 300 ksc.
เหล็กเสริมตามยาว	: SD 30
เหล็กเสริมตามขวาง	: SR 24
แถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนรับแรงดึงมีกำลังรับแรงดึงประลัย	: 31,000 ksc. ¹²
แผ่นเส้นใยคาร์บอนยึดปลายมีกำลังรับแรงดึงประลัย	: 35,700 ksc. ¹²

ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในการทดสอบเบื้องต้น

คานตัวอย่าง	จำนวนแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน	การใช้วัสดุยึดปลาย	หมายเหตุ
CB	-	-	คานควบคุม
RFB1	1	แผ่นเส้นใยคาร์บอนยาว 15 ซม.	คานเสริมกำลัง
RFB2	2	แผ่นเส้นใยคาร์บอนยาว 15 ซม.	คานเสริมกำลัง
RPB	1	แผ่นเส้นใยคาร์บอนยาว 15 ซม.	คานซ่อมแซม



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กและการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคานตัวอย่างในการทดสอบเบื้องต้น

โดยคานช่อมแซมจะให้น้ำหนักก่อนการช่อมแซมประมาณ 90% ของน้ำหนักประลัย และช่อมแซมโดยการฉีดวัสดุประสาน (epoxy injection) ลงตามรอยแตกร้าวของคาน จากนั้นจึงใช้แถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนติดทับอีกครั้ง

ผลการทดสอบ

เมื่อพิจารณากำลังรับแรงดึงและลักษณะการวิบัติพบว่า คานตัวอย่างที่ติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนทุกตัวมีกำลังเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับคานควบคุม โดยกำลังและลักษณะของคานตัวอย่างเป็นไปตามตารางที่ 4.2 ส่วนค่าการโก่งตัวเป็นไปดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 แสดงกำลังรับแรงดึงและลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างในการทดสอบเบื้องต้น

คานตัวอย่าง	น้ำหนักประลัย (ตัน)	อัตราส่วนน้ำหนักประลัยของคานตัวอย่างต่อคานควบคุม	ลักษณะการวิบัติ
CB	8.4	1.00	คอนกรีตถูกอัดแตกหลังเหล็กเสริมถึงจุดคราก
RFB1	11.1	1.32	ผิวคอนกรีตส่วนของมอร์ตาร์หลุดลอกออก
RFB2	13.6	1.62	ผิวคอนกรีตส่วนของมอร์ตาร์หลุดลอกออก
RPB	10.0	1.19	ผิวคอนกรีตส่วนของมอร์ตาร์หลุดลอกออก

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่างในการทดสอบเบื้องต้น

คานตัวอย่าง	ค่าการโก่งตัวสูงสุด (มม.)	อัตราส่วนการโก่งตัวของคานตัวอย่างต่อคานควบคุม
CB	20.4	1.00
RFB1	13.7	0.67
RFB2	11.8	0.58
RPB	14.8	0.72

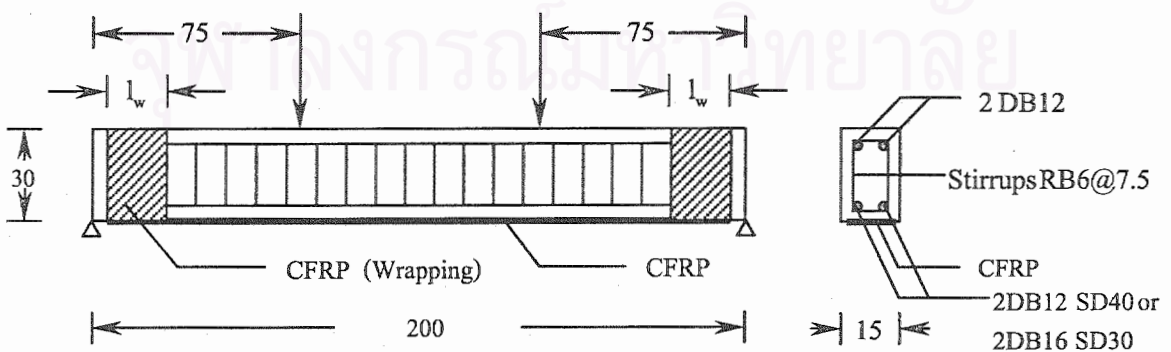
คานควบคุมเกิดการวิบัติจากแรงดึงโดยคอนกรีตส่วนรับแรงอัดถูกอัดแตกหลักจากที่เหล็กเสริมด้านล่างถึงจุดคราก (น้ำหนักที่จุดครากมีค่าเท่ากับ 7.50 ตันและน้ำหนักประลัยมีค่าเท่ากับ 8.40 ตัน) และเนื่องจากเหล็กเสริมรับแรงอัดอยู่ต่ำมาก (ประมาณ 5 ซม. จากผิวบนของคานคอนกรีต) เมื่อคานใกล้จะวิบัติ รอยแตกร้าวจะขยายตัวผ่านตำแหน่งของเหล็กเสริมด้านบน ทำให้เหล็กเสริมด้านบนที่เคยรับแรงอัดเปลี่ยนเป็นรับแรงดึงแทน ทำให้คอนกรีตส่วนรับแรงอัดเกิดความเครียดอัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนเกิดการวิบัติในที่สุด ส่วนคานตัวอย่างที่ติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนทั้ง

หมจะเกิดการวิบัติแบบเฉพาะที่จากการหลุดลอกของคอนกรีตส่วนมอร์ตาร์ (mortar) เนื่องจากส่วนผสมคอนกรีตในการทดสอบเบื้องต้นให้ค่าการซึม (bleeding) ที่ผิวหน้าของคอนกรีตสูง ในการทดสอบจริงจะแก้ปัญหาโดยทำการขัดมอร์ตาร์บริเวณผิวหน้าของคอนกรีตที่ติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนออกให้หมดแล้วจึงติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน และเมื่อพิจารณาค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง (ตารางที่ 4.3) พบว่าค่าการโก่งตัวของคานติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนมีค่าน้อยกว่าคานควบคุมอย่างชัดเจนและมีค่าน้อยลงเมื่อใช้ปริมาณแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนมากขึ้น ในส่วนของคานซ่อมแซมพบว่ามีการโก่งตัวมากกว่าคานเสริมกำลังที่ใช้แถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในปริมาณที่เท่ากัน (RPB และ RFB1) เนื่องจากน้ำหนักกระทำการซ่อมแซมที่มีค่าประมาณ 90% ของน้ำหนักประลัย ทำให้เหล็กเสริมด้านล่างถึงจุดครากก่อนการซ่อมแซม ส่งผลให้คานมีพฤติกรรมเปลี่ยนไปเป็นแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic behavior) และเกิดการโก่งตัวคงค้าง ทำให้เมื่อถึงจุดวิบัติคานจึงมีค่าการโก่งตัวมากกว่าคานเสริมกำลังถึงแม้ว่าน้ำหนักประลัยจะมีค่าน้อยกว่า ในส่วนของค่าสตีฟเนสของคานพบว่าสตีฟเนสมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนดูได้จากค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่างที่ลดลง

4.2 การทดสอบจริง

ในการศึกษานี้จะทำการทดสอบคานตัวอย่างขนาด 15 X 30 X 200 ซม. จำนวน 13 ตัวอย่าง ให้น้ำหนักแบบจุดกระทำ 2 จุด โดยใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติทางด้านกำลังดึงแสดงด้านล่าง และมีลักษณะการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนตามตารางที่ 4.4 และตามรูปที่ 4.2

คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดประลัยที่อายุ 28 วัน	: 300 ksc.
เหล็กเสริมตามยาว	: SD 40 และ SD 30
เหล็กเสริมตามขวาง	: SR 24
แถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนรับแรงดึงมีกำลังรับแรงดึงประลัย	: 31,000 ksc. ¹²
แผ่นเส้นใยคาร์บอนยึดปลายมีกำลังรับแรงดึงประลัย	: 35,700 ksc. ¹²



รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กและการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคานตัวอย่างในการทดสอบจริง

ตารางที่ 4.4 แสดงลักษณะการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในการทดสอบจริง

คานตัวอย่าง	จำนวนแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน	ความยาวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (ซม.)	ระยะของการยึดปลาย (L_w) (ซม.)	ความหนาของชั้นกาว (มม.)	ลักษณะเหล็กเสริมรับแรงดึง	หมายเหตุ
CB1	0	0	0	2.0	2DB12 SD40	คานควบคุม
RF1	2	190	0	2.0	2DB12 SD40	คานเสริมกำลัง
RF2	2	190	40	2.0	2DB12 SD40	คานเสริมกำลัง
RF3	2	190	75	2.0	2DB12 SD40	คานเสริมกำลัง
RF4	2	170	0	2.0	2DB12 SD40	คานเสริมกำลัง
RF5	2	150	0	2.0	2DB12 SD40	คานเสริมกำลัง
RF6	3	190	0	2.0	2DB12 SD40	คานเสริมกำลัง
RF7	1	190	0	2.0	2DB12 SD40	คานเสริมกำลัง
RF8	2	190	0	0.8	2DB12 SD40	ลดความหนาของชั้นกาว
CB2	0	0	0	2.0	2DB16 SD30	เปลี่ยนเหล็กเสริมรับแรงดึง
RF9	2	190	0	2.0	2DB16 SD30	เปลี่ยนเหล็กเสริมรับแรงดึง
RP1	2	190	0	2.0	2DB12 SD40	ไม่ฉีดวัสดุประสานอุดรอยแตกร้าว
RP2	2	190	0	2.0	2DB12 SD40	ฉีดวัสดุประสานอุดรอยแตกร้าว

หมายเหตุ - คาน RF หมายถึงคานเสริมกำลัง และคาน RP หมายถึงคานซ่อมแซมโดยคานซ่อมแซม จะให้น้ำหนักกระทำจนมีค่าการโก่งตัวประมาณ 1.0 ซม. ซึ่งเป็นจุดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดครากแล้วก่อนการซ่อมแซม

- คานตัวอย่างทั้งหมดจะต้องขัดมอร์ตาร์บริเวณผิวหน้าของท้องคานซึ่งหนาประมาณ 5 มม. ออกให้หมดก่อนแล้วจึงติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน
- ความหนาของชั้นกาวที่วัดได้จะมีความหนาประมาณ 2.0 มม. ซึ่งเป็นไปตามข้อมูลจากบริษัท ซิก้า (ประเทศไทย) จำกัด

โดยลักษณะการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนตามตารางที่ 4.4 สืบเนื่องมาจากการพิจารณาแบบจำลองของ Robert และ Malek พบว่าตัวแปรที่สำคัญในการทำนายค่าความเข้มของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นมีด้วยกันหลายตัวแปร ตัวแปรในแบบทดสอบดังกล่าวจะถูกนำมาเป็นตัวแปรต้นในการทดสอบของหัวข้อศึกษาครั้งนี้โดยจะทำการเลือกตัวแปรเพียงบางส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.5 เนื่องจากข้อจำกัดของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบบางประการซึ่งได้รับการสนับสนุนจากบริษัท ชิก้า (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งจากตัวแปรดังกล่าวสามารถจัดกลุ่มเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 แสดงตัวแปรที่สำคัญในแบบจำลองของ Robert และ Malek

แบบจำลอง	ความเค้น	ตัวแปรที่สำคัญในแบบจำลอง	ตัวแปรที่นำมาใช้ในการทดสอบ
Robert	เฉือน	d_p , b_p และ b_a^*	d_p (หรือ t_p) b_p L_o และ t_a^*
	ดึงฉาก	d_p	
Malek	เฉือน	t_p , t_a , E_p , E_c , I_{tr} , G_a และ L_o^*	
	ดึงฉาก	b_p , t_p , t_a และ I_p^*	

* ตัวแปรของ Robert เป็นไปตามรูปที่ 3.5 และคำนิยามในหน้า 20 และ ตัวแปรของ Malek เป็นไปตามคำนิยามในหน้า 24

ตารางที่ 4.6 แสดงการจัดกลุ่มคานตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ

กลุ่ม	คานตัวอย่าง	ตัวแปรที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลทดสอบ	ตัวแปรที่ในแบบจำลองของ Robert หรือ Malek
1	CB1 และ RF1	ผลของการเสริมกำลัง	-
2	CB1 RF1 RF2 และ RF3	ผลของระยะการหุ้มปลาย	-
3	CB1 RF1 RF4 และ RF5	ผลของความยาวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน	L_o
4	CB1 RF1 RF6 และ RF7	ผลของความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน	b_p
5	CB1 RF1 และ RF8	อัตราส่วนความหนาของชั้นกาวต่อความหนาของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน	t_a/t_p
6	CB1 CB2 RF1 และ RF9	ผลของปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึง	-
7	RP1 และ RP2	ผลของการใช้วัสดุประสาน	-

4.3 คุณสมบัติของวัสดุ

4.3.1 กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (compressive and tensile strength of concrete)

จากการออกแบบการทดสอบที่กำหนดให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้หล่อคานตัวอย่างมีค่าประมาณ 300 ksc. ที่อายุ 28 วัน เมื่อทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 15 ซม. และสูง 30 ซม. จำนวน 3 ตัวอย่างต่อคานตัวอย่าง 1 ตัวอย่าง แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive strength) ตามมาตรฐาน ASTM C39-94¹³ ได้ผลทดสอบตามตารางที่ 4.7 ซึ่งพบว่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตตัวอย่างที่มีอายุ 28 วันมีค่าประมาณ 300 ksc. ตามการออกแบบ ในส่วนของกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต ได้ทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 15 ซม. สูง 30 ซม. จำนวน 3 ตัวอย่างต่อการผสมคอนกรีต 1 ครั้ง แล้วจึงนำไปทดสอบกำลังรับแรงดึง (splitting tensile strength) ตามมาตรฐาน ASTM C496-96¹⁴ ได้ผลทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของก้อนคอนกรีตตัวอย่างรูปทรงกระบอก

คานตัวอย่าง	CB1	CB2	RF1	RF2	RF3	RF4	RF5	RF6	RF7	RF8	RF9	RP1	RP2
อายุของคอนกรีต ตัวอย่าง (วัน)	33	34	144	206	198	72	72	65	65	65	38	72	72
กำลังรับแรงดึง เฉลี่ย (ksc.)	26.2	26.4	26.2	26.2	26.2	31.1	31.1	32.2	32.2	32.2	26.4	31.1	31.1
กำลังรับแรงอัด เฉลี่ยเฉลี่ย (ksc.)	308	300	371	390	430	331	337	361	339	339	310	331	337

4.3.2 กำลังรับแรงดึงของเหล็ก (tensile strength of steel bar)

การทดสอบครั้งนี้ได้กำหนดให้ใช้เหล็กกลม (round bar) ที่มีกำลังรับแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ SR24 และเหล็กข้ออ้อย (deformed bar) ที่มีกำลังรับแรงดึงเฉลี่ยเท่ากับ SD30 และ SD40 เสริมในคานตัวอย่าง เมื่อทำการเก็บตัวอย่างเหล็กเสริมจำนวน 3 - 5 ตัวอย่างต่อเหล็ก 1 ชนิด มาทดสอบกำลังรับแรงดึงเฉลี่ย (tensile strength of steel) ตามมาตรฐาน ASTM E8¹⁵ จะได้ผลทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4.8 ซึ่งพบว่าเหล็กเสริมทั้งหมดมีกำลังรับแรงดึงเฉลี่ยเป็นไปตามการออกแบบค่ากำลังที่ได้จริงตามตารางที่ 4.8 จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์กำลังของคานตัวอย่างด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง (strain compatibility method)

ตารางที่ 4.8 แสดงค่ากำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมในคานตัวอย่าง

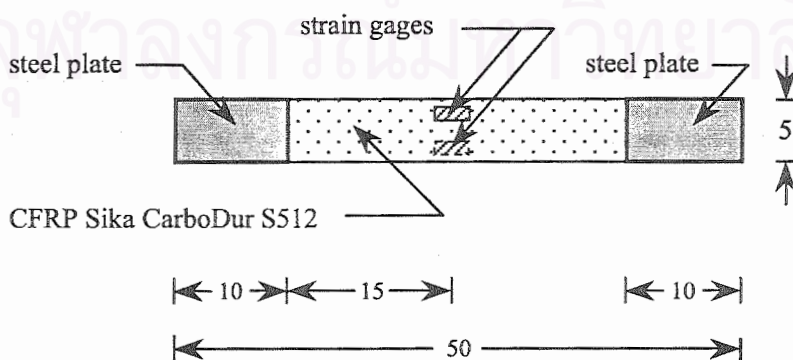
ชนิดของเหล็กเสริม	กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (ksc.)	กำลังรับแรงดึงประลัย (ksc.)	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (ksc.)
RB6 SR24	4,726	6,342	2.104×10^6
DB12 SD40	4,790	6,251	2.144×10^6
DB16 SD30	3,742	4,968	2.140×10^6

4.3.3 กำลังรับแรงดึงของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (tensile strength of CFRP)

ในส่วนของการทดสอบกำลังรับแรงดึงประลัยของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนได้ใช้ชิ้นตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่างโดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3039¹⁶ และมีลักษณะของชิ้นตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงประลัยที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงค่ากำลังรับแรงดึงประลัยของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

ชิ้นตัวอย่าง	กำลังรับแรงดึงประลัย (ksc.)	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (ksc.)
1	34,000	2.029×10^6
2	32,333	1.929×10^6
3	32,500	1.952×10^6
4	33,000	1.964×10^6
5	32,500	1.836×10^6
ค่าเฉลี่ย	32,867	1.942×10^6



รูปที่ 4.3 แสดงชิ้นตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงดึงของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

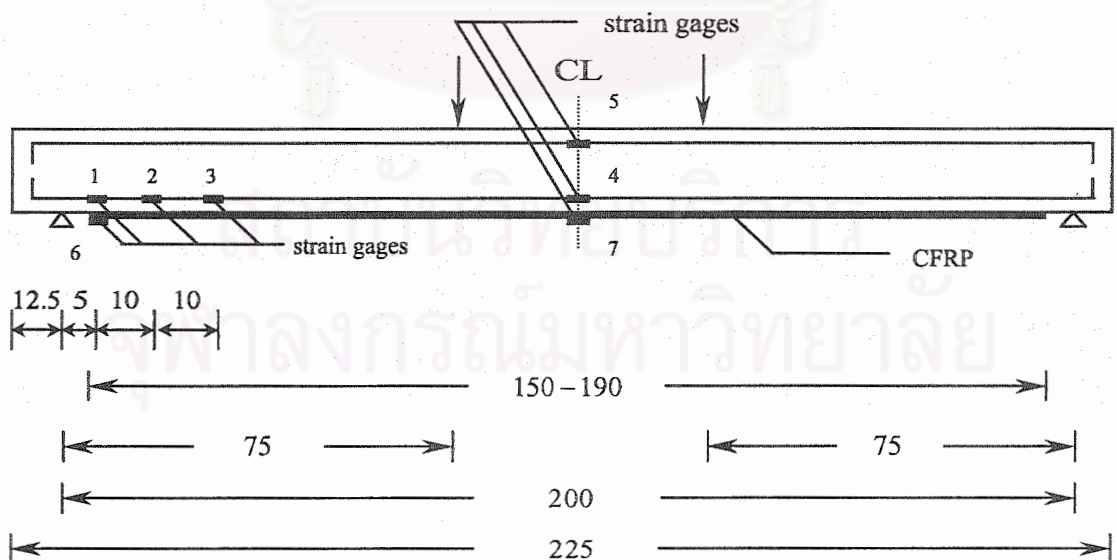
4.4 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

4.4.1 การติดมาตรวัดความเครียด (strain gage)

คานตัวอย่างทั้งหมดจะติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gage) เพื่อวัดค่าความเครียดในตำแหน่งต่างๆของคานตัวอย่างที่จะเกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งบนผิวเหล็กเสริมรับแรงดึงบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนซึ่งเป็นจุดที่มีค่าความเข้มของหน่วยแรงสูงจนทำให้คอนกรีตเกิดการรื้อกัตัวหลุดลอกออก มาตรวัดความเครียดที่จะถูกติดตั้งตามตำแหน่งต่างๆของคานตัวอย่าง ดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.10 แสดงการจำนวนและลักษณะการติดมาตรวัดความเครียดของคานตัวอย่าง

รูปแบบ	คานตัวอย่าง	ตำแหน่งที่ติดมาตรวัดความเครียด	จำนวนมาตรวัดความเครียด
1	CB1 RF1 RF2 RF3 RF4 และ RF5	1 2 3 4 และ 5	5
2	RF6 RF7 RF8 RP1 และ RP2	1 4 และ 5	3
3	CB2	1 2 3 และ 4	4
4	RF9	1 2 3 4 5 6 และ 7	7

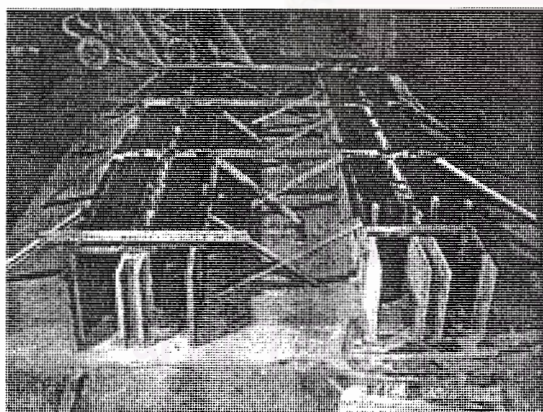


รูปที่ 4.4 แสดงตำแหน่งติดมาตรวัดความเครียดของคานตัวอย่าง

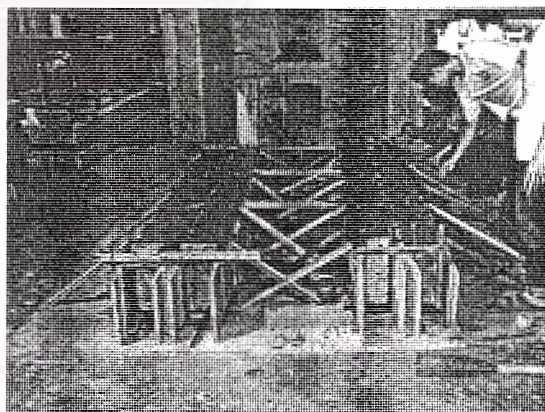
โดยมาตรวัดความเครียดในตำแหน่งที่ 1 2 3 และ 4 จะติดตั้งที่ผิวเหล็กเสริมรับแรงดึง ส่วนมาตรวัดความเครียดในตำแหน่งที่ 5 จะติดตั้งที่ผิวเหล็กเสริมรับแรงอัด ในขณะที่มาตรวัดความเครียดในตำแหน่งที่ 6 และ 7 จะติดตั้งที่ผิวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน หนึ่งในการันตัวอย่าง RF9 มาตรวัดความเครียดในตำแหน่งที่ 5 จะติดตั้งที่ผิวคอนกรีตด้านบน (top fiber) ของการันตัวอย่างแทนเหล็กเสริมรับแรงอัด

4.4.2 การหล่อการันตัวอย่าง

การันตัวอย่างจะแบ่งการหล่อออกเป็น 4 ครั้งครั้งละ 2-4 ตัวอย่าง โดยจะเข้าไปแบบขนาด 15 X 30 X 225 ซม. ดังรูปที่ 4.5 (ก) ซึ่งก่อนการผสมและเทคอนกรีตจะนำโครงเหล็กเสริมที่ติดมาตรวัดความเครียดเรียบร้อยแล้วเข้าไปในแบบหล่อ จากนั้นจะทำสัญลักษณ์บนไม้แบบให้ตรงกับตำแหน่งของมาตรวัดความเครียดที่ติดไว้ที่ผิวเหล็กเสริม เพื่อความสะดวกในการกำหนดตำแหน่งของจุดรองรับ จุดให้น้ำหนักกระทำ และตำแหน่งที่จะติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน เมื่อเตรียมไม้แบบและเหล็กเสริมเรียบร้อยแล้วจึงผสมและเทคอนกรีต โดยใช้ส่วนผสมที่ออกแบบให้มีค่ากำลังอัดประลัยที่ 28 วันเท่ากับ 300 ksc. คอนกรีตส่วนหนึ่งจะถูกนำไปทดสอบค่าการยุบตัว (slump test) และเก็บตัวอย่างรูปทรงกระบอกไว้ทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive strength) อย่างน้อย 3 ตัวอย่างต่อการทดสอบ 1 ตัวอย่าง และกำลังรับแรงดึง (tensile strength) จำนวน 3 ตัวอย่างต่อการผสมคอนกรีต 1 ครั้ง การันตัวอย่างที่หล่อเรียบร้อยแล้วจะถูกตั้งทิ้งไว้ในไม้แบบประมาณ 3 วันเพื่อให้คอนกรีตได้กำลังค่าหนึ่งก่อน จึงทำการแกะแบบและเคลื่อนย้ายไปเก็บและบ่มชื้นโดยใช้ผ้ากระสอบคลุม



(ก)



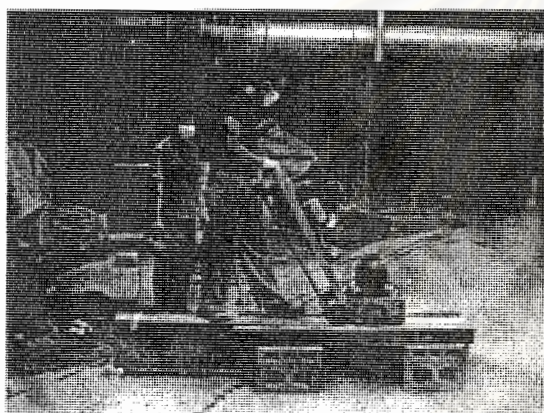
(ข)

รูปที่ 4.5 แสดงขั้นตอนการหล่อการันตัวอย่าง

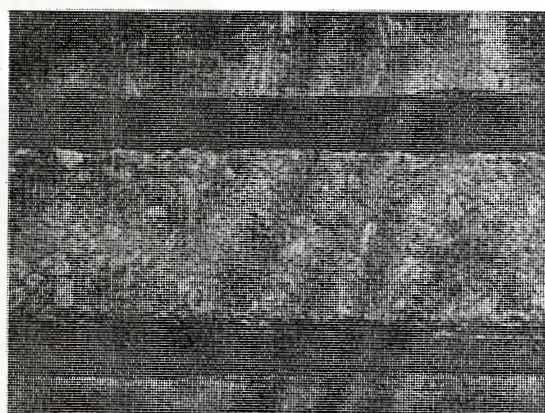
4.4.3 การติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

เมื่อการันตัวอย่างบ่มชื้นจนอายุครบ 28 วันแล้ว จะถูกนำไปขัดผิวหน้าส่วนที่เป็นมอร์ตาร์ (mortar) บริเวณใต้ท้องการันตัวอย่างรูปที่ 4.6 (ก) เพื่อให้แถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนยึดกับเม็ด

หินในเนื้อคอนกรีตโดยตรง เนื่องจากผลการทดสอบเบื้องต้นพบว่าคานตัวอย่างเกิดการวิบัติแบบเฉพาะที่จากการหลุดลอกของคอนกรีตส่วนมอร์ตาร์ เมื่อขีดผิวคานตัวอย่างเรียบร้อยแล้วจึงทำความสะอาดผิวหน้าและนำไปเก็บในที่ที่มีอากาศแห้งเพื่อลดค่าความชื้นในคานตัวอย่างให้อยู่ในระดับที่สามารถติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนได้ แล้วจึงติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนโดยใช้วัสดุประสาน (epoxy) ยึดระหว่างแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนกับเนื้อคอนกรีต ซึ่งบริเวณที่ติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจะถูกกำหนดไว้แล้วโดยสัญลักษณ์ที่ได้ทำไว้บนผิวคานตัวอย่างในขั้นตอนการหล่อคานตัวอย่าง เพื่อให้ค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียดที่ผิวของเหล็กเสริมเป็นค่าตามตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้ในการออกแบบการทดสอบ ซึ่งภายหลังจากการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเรียบร้อยแล้วจะต้องเก็บคานตัวอย่างไว้ในที่ร่มและแห้งเป็นเวลาอย่างน้อย 7 วันเพื่อให้วัสดุประสานได้กำลังสูงสุด



(ก)



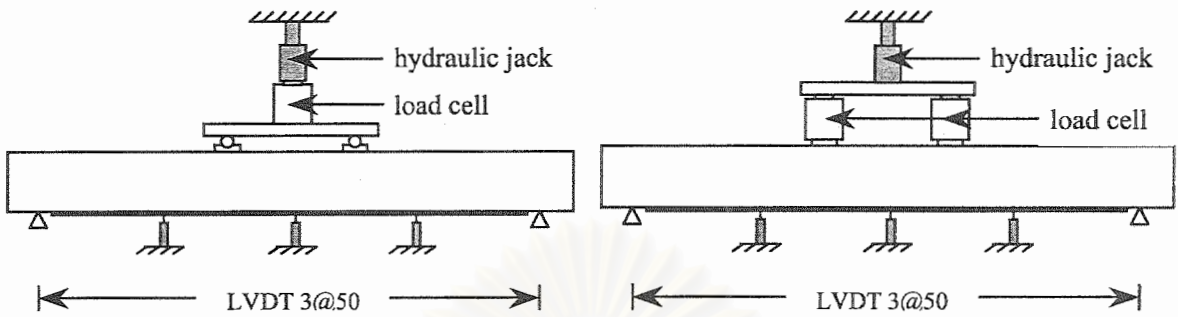
(ข)

รูปที่ 4.6 แสดงการขีดผิวหน้าของคานตัวอย่างและผิวหน้าคานที่ขีดเสร็จแล้ว

4.5 การทดสอบและการเก็บข้อมูล

เมื่อคานตัวอย่างติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเรียบร้อยแล้ว จึงนำคานตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบโดยจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบอันได้แก่ หน่วยวัดน้ำหนักกระทำ (load cell) เครื่องวัดค่าการโก่งตัว (LVDT) และไฮดรอลิกแจ็ก (hydraulic jack) ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งหน่วยวัดน้ำหนักกระทำและเครื่องวัดค่าการโก่งตัว รวมทั้งมาตรวัดความเครียดที่ติดตั้งในตำแหน่งต่างๆ ของคานตัวอย่างจะถูกต่อเข้ากับเครื่องจัดเก็บข้อมูล (data logger) เพื่อจัดเก็บข้อมูลในรูปของตัวเลขลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยการติดตั้งเครื่องมือในการทดสอบครั้งนี้มีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะ (รูปที่ 4.7(ก) และ 4.7(ข)) คือ แบบที่ใช้หน่วยวัดน้ำหนักกระทำ 1 ตัว ซึ่งเป็นแบบปกติ และแบบที่ใช้หน่วยวัดน้ำหนักกระทำ 2 ตัว ซึ่งใช้ในกรณีที่คานตัวอย่างมีแนวโน้มว่าจะสามารถรับน้ำหนัก

ประลัยได้มากกว่า 20 ตัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากหน่วยวัดน้ำหนักกระทำที่ใช้ในการทดสอบสามารถรับน้ำหนักใช้งานได้ไม่เกิน 20 ตัน



(ก) ใช้หน่วยวัดน้ำหนักกระทำ 1 ตัว

(ข) ใช้หน่วยวัดน้ำหนักกระทำ 2 ตัว

รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะการติดตั้งเครื่องมือทดสอบ

หลังจากที่ติดตั้งเครื่องมือทดสอบเรียบร้อยแล้ว จึงเริ่มให้น้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่าง โดยในช่วงแรกจะให้น้ำหนักกระทำครั้งละ 500 กิโลกรัม จนกระทั่งน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 1,500 กิโลกรัม ซึ่งเป็นน้ำหนักที่เข้าใกล้จุดแตกร้าวแรก (cracking state) จึงเปลี่ยนไปให้น้ำหนักกระทำต่อคานครั้งละ 300 กิโลกรัม เพื่อสังเกตรอยแตกร้าวแรกที่จะเกิดขึ้น เมื่อพบรอยแตกร้าวแรกแล้วจึงเพิ่มการให้น้ำหนักกระทำเป็นครั้งละ 500 กิโลกรัมตามเดิมจนกระทั่งคานตัวอย่างเกิดการวิบัติ โดยการวิบัติของคานตัวอย่างที่ติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจะนิยามเมื่อแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนหลุดลอกออกจากตัวคานในกรณีที่คานเกิดการวิบัติแบบเฉพาะที่ (local failure) และในกรณีที่คานเกิดการวิบัติจากแรงดัด (flexural failure) จะนิยามเมื่อแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนขาดออกจากกัน หรือคอนกรีตส่วนรับแรงอัดถูกอัดแตก (crushing) อนึ่งในระหว่างที่หยุดการให้น้ำหนักในแต่ละช่วง จะทำการตรวจสอบผิวด้านข้างของคานตัวอย่างเพื่อสังเกตรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น เมื่อพบรอยแตกร้าวแล้วจะทำการขีดสัญลักษณ์ไว้เพื่อนำไปจดบันทึกและเปรียบเทียบลักษณะการแตกร้าวของคานตัวอย่าง ซึ่งจะเป็นข้อบ่งชี้ถึงสภาพการใช้งานจริง (serviceability)

เมื่อทำการทดสอบเสร็จสิ้น จะนำข้อมูลที่จัดเก็บได้มาจัดระเบียบข้อมูลอีกครั้ง แล้วจึงนำไปทำการประมวลผลในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคาน (load - deflection relationship) และในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าความเครียดที่วัดได้ในตำแหน่งต่างๆของคานตัวอย่าง (load - strain diagram) และจะนำข้อมูลที่ประมวลผลเรียบร้อยแล้วไปวิเคราะห์พฤติกรรมทั่วไปและพฤติกรรมการวิบัติจากความเข้มของหน่วยแรงในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อไป

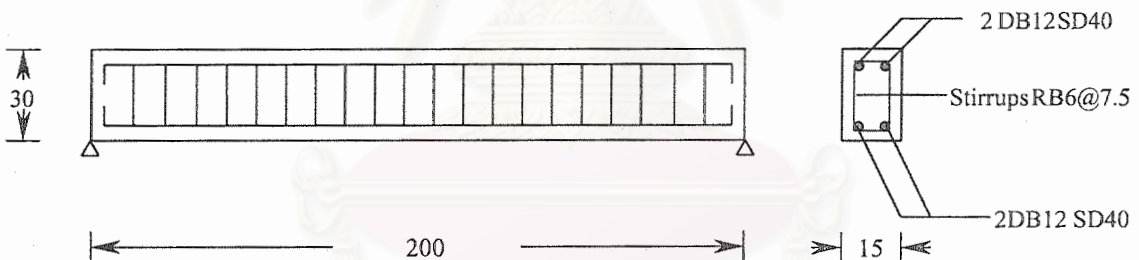
บทที่ 5

ผลการทดสอบ

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบที่ได้ พบว่าคานตัวอย่างทั้งหมดมีพฤติกรรมแตกต่างกันออกไป ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบและพฤติกรรมโดยรวมของคานตัวอย่างแต่ละตัวแยกจากกัน โดยพฤติกรรมของคานตัวอย่างจะกล่าวถึงตั้งแต่เริ่มให้น้ำหนักกระทำจนกระทั่งคานตัวอย่างเกิดการวิบัติ (ตามคำนิยามที่ระบุไว้ในหัวข้อที่ 4.4) ดังนี้

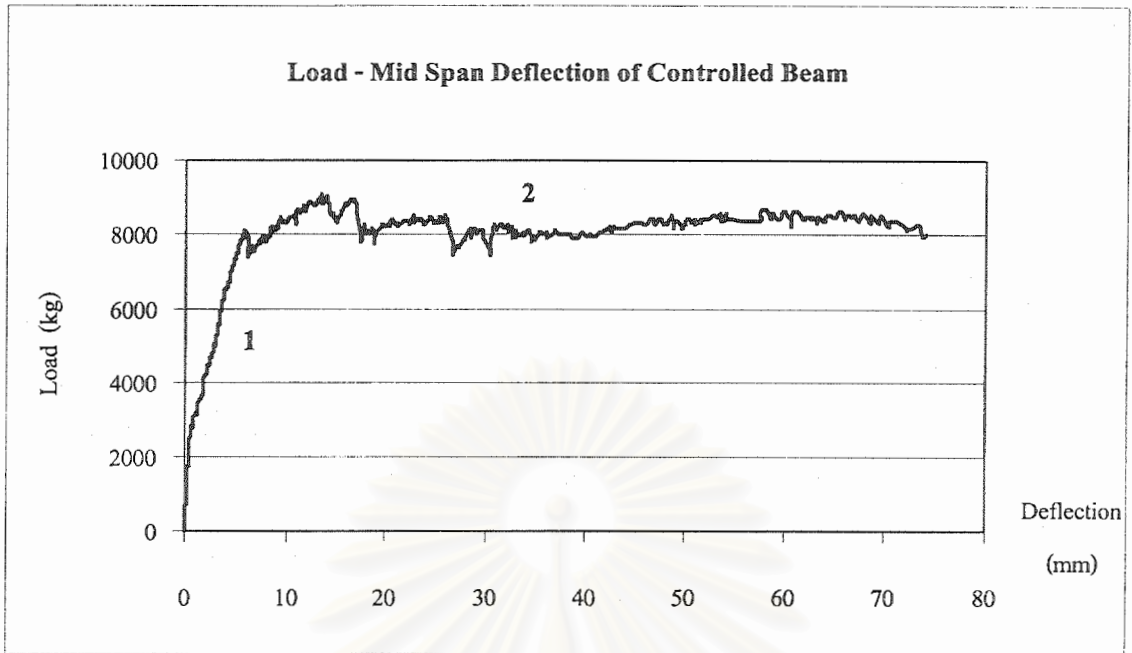
5.1 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง CB1

คานตัวอย่าง CB1 เป็นคานควบคุม (controlled beam) ที่ใช้เปรียบเทียบผลของลักษณะการเสริมแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก มีลักษณะเป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดาที่ไม่ติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน โดยจะมีการเสริมเหล็กเสริมภายในดังรูปที่ 5.1 ซึ่งลักษณะการเสริมเหล็กดังรูปที่ 5.1 นี้จะใช้กับคานตัวอย่างทุกตัว ยกเว้นคานตัวอย่าง CB2 และ RF9



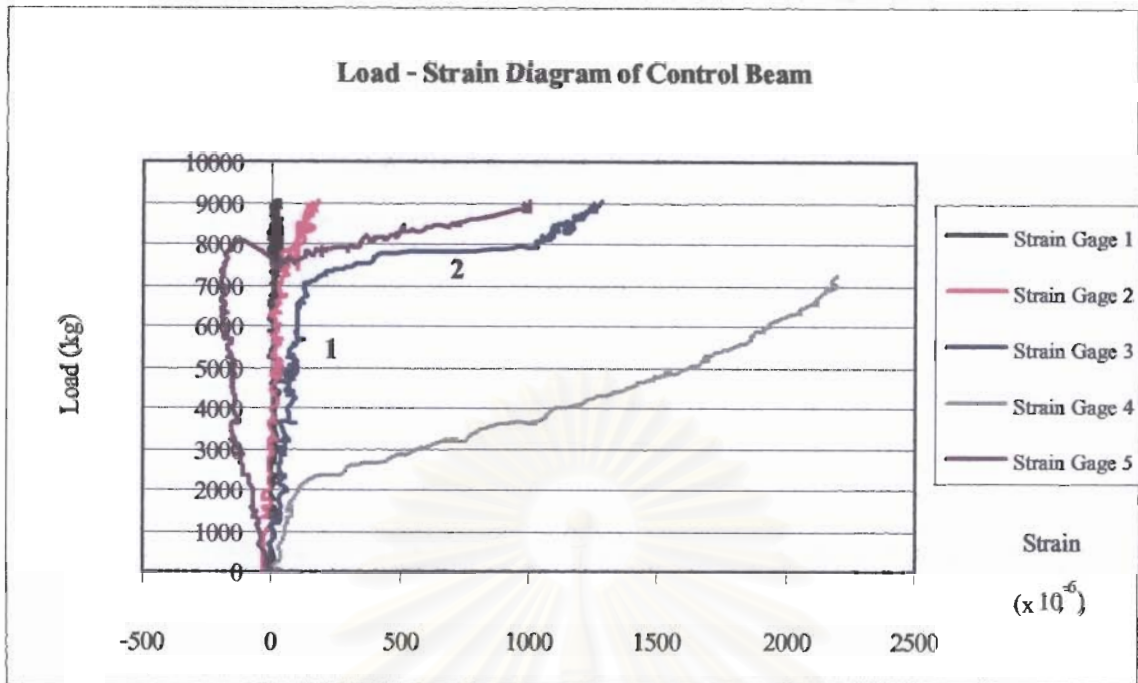
รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กของคาน CB1

เมื่อเริ่มให้น้ำหนักกระทำกับคานตัวอย่าง CB1 จนถึงน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 2.2 ตัน คานตัวอย่าง CB1 จะเริ่มเกิดรอยแตกร้าวแรก (cracking state) บริเวณท้องคานใต้จุดที่น้ำหนักกระทำ ซึ่งเป็นจุดที่มีอัตราส่วนระหว่างแรงเฉือนและค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด โดยรอยแตกร้าวแรกที่พบมีความยาวประมาณ 6.0 ซม. และเห็นได้อย่างชัดเจน จากนั้นเมื่อน้ำหนักไปเรื่อยๆ รอยแตกร้าวของคานตัวอย่างจะขยายตัวและเพิ่มจำนวนขึ้นตามน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้น โดยลักษณะรอยแตกทั้งหมดจะอยู่ในแนวตั้ง ซึ่งเป็นรอยแตกร้าวที่เกิดจากแรงดัด (flexural crack) ในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวเป็นเชิงเส้นตรง ดังส่วนที่ 1 ของรูปที่ 5.2 จนกระทั่งเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 8.0 ตัน พบว่าน้ำหนักกระทำที่ให้แก่คานตัวอย่าง CB1 จะไม่เพิ่มขึ้นอีกและเริ่มมีค่าคงตัวในขณะที่ค่าการโก่งตัวของคานยังเพิ่มขึ้นอยู่เรื่อยๆ ส่งผลให้รอย



รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน CB1

แตกร้าวมีการขยายตัวทั้งความกว้างและความยาว ณ จุดนี้พบว่ารอยแตกร้าวที่ยาวที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางคานมีความยาวเกินครึ่งหนึ่งของความลึกของหน้าตัดคาน เมื่อพิจารณารูปที่ 5.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง CB1 พบว่าที่น้ำหนักกระทำดังกล่าว เส้นความสัมพันธ์มีการเปลี่ยนค่าความชัน (เส้นความสัมพันธ์เปลี่ยนไปอยู่ในแนวราบ) ณ จุดนี้เป็นจุดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดคราก (yielding state) สาเหตุที่เส้นความสัมพันธ์มีการเปลี่ยนค่าความชัน ณ จุดนี้ เนื่องจากสตีเฟนของเหล็กเสริมรับแรงดึงมีค่าลดลงมาก (เหล็กเสริมรับแรงดึงที่ถึงจุดครากแล้วจะมีค่าสตีเฟนน้อยมาก) ทำให้สตีเฟนรวมของคานตัวอย่างลดลง เส้นความสัมพันธ์จึงเปลี่ยนไปอยู่ในแนวนอน ซึ่งในช่วงนี้คานตัวอย่าง CB1 ยังคงสามารถรับน้ำหนักกระทำได้โดยค่าน้ำหนักมากที่สุดที่คานรับได้คือ 9.0 ตัน และเมื่อให้น้ำหนักกระทำต่อ (น้ำหนักกระทำมีค่าคงตัว) จนถึงค่าการโก่งตัวประมาณ 18.0 มม. คอนกรีตส่วนบนของคานตัวอย่าง CB1 เกิดการแตกร้าวและบู่เข้าหากันอย่างชัดเจน (crushing state) ดังรูปที่ 5.5 แต่คานตัวอย่าง CB1 ยังคงสามารถรับน้ำหนักกระทำได้ โดยน้ำหนักกระทำที่ให้มามีค่าลดลงเล็กน้อยมาอยู่ที่น้ำหนักประมาณ 8.1 ตัน สาเหตุที่คานตัวอย่าง CB1 ยังสามารถรับน้ำหนักกระทำต่อได้เนื่องจาก คอนกรีตส่วนที่มีการโอบรัดด้วยเหล็กปอกยังมีค่าความเครียดไม่ถึง 0.003 และเมื่อให้น้ำหนักกระทำจนถึงค่าการโก่งตัวประมาณ 74.0 มม. (ในช่วงนี้น้ำหนักกระทำจะอยู่ในช่วง 7.4-8.4 ตัน) คอนกรีตบริเวณเหล็กเสริมรับแรงดึงจะระเบิดออก และน้ำหนักกระทำตกลงไปอยู่ที่ประมาณ 4.0 ตันซึ่งเป็นจุดวิบัติของคานตัวอย่าง CB1 โดย ณ จุดวิบัติคานตัวอย่าง CB1 จะมีค่าการโก่งตัวถาวรประมาณ 74.2 มม. และมีน้ำหนักประลัยเท่ากับ 8.0 ตัน ดังรูปที่ 5.2

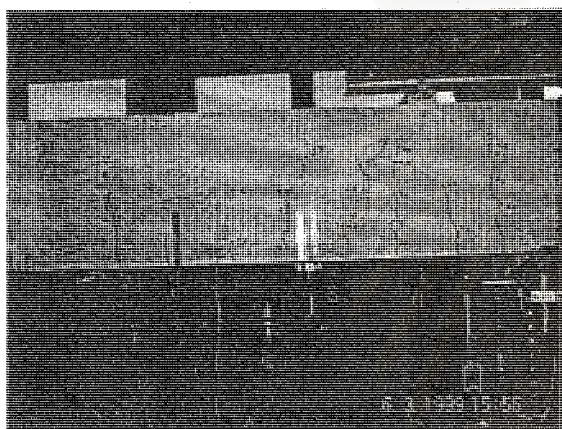


รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน CB1

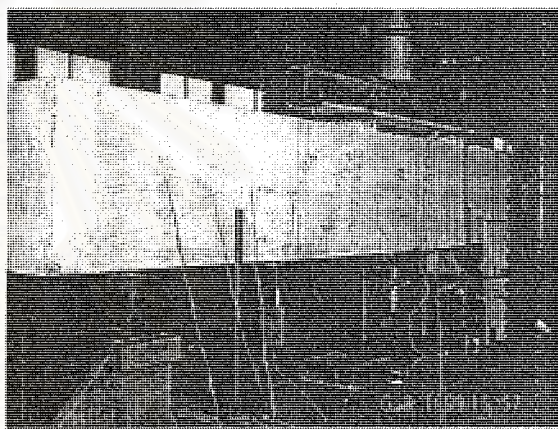
เมื่อพิจารณารูปที่ 5.3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียด (strain gage) ในตำแหน่งต่างๆของคานตัวอย่าง CB1 พบว่ามาตรวัดที่ 4 ไม่สามารถใช้งานได้หลังจากน้ำหนักกระทำมีค่า 7.2 ตัน จึงทำให้ไม่สามารถระบุได้แน่นอนว่าเหล็กเสริมรับแรงดึงเกิดการร้าวที่น้ำหนักเท่าใด ในขณะที่เมื่อพิจารณาเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 1 และ 2 พบว่า เส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดที่ 1 และ 2 จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยค่าความเครียดที่วัดได้มีค่าแกว่งอยู่ใกล้ศูนย์กลางตลอดที่ให้น้ำหนักกระทำ ส่วนเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดที่ 3 สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ 1 ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรง และส่วนที่ 2 ที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง (ดังรูปที่ 5.3) โดยเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดที่ 3 จะมีจุดเปลี่ยนค่าความชันที่ประมาณ 7.0 ตัน และเมื่อพิจารณาเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 5 พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีค่าคิดลบในช่วงแรก เนื่องจากมาตรวัดความเครียดที่ 5 ทำการติดตั้งบนผิวของเหล็กเสริมรับแรงอัดบริเวณกึ่งกลางของคานตัวอย่าง แต่ภายหลังจากจุดร้าวไปแล้ว ค่าความเครียดที่วัดได้เริ่มมีค่าเป็นบวก แสดงให้เห็นว่าแกนสะเทิน (neutral axis) มีการขยับตัวขึ้นจนทำให้เหล็กเสริมรับแรงอัดเปลี่ยนมาเป็นรับแรงดึงแทน ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะเกิดขึ้นในองค์อาคารรับแรงคดที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงน้อย

และจากรูปที่ 5.6 ซึ่งแสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง CB1 จะพบว่า ลักษณะรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นเป็นรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคด (flexural crack) ทั้งหมด เนื่องจากคานตัวอย่าง CB1 มีการเสริมเหล็กถูกตั้งในปริมาณมาก (ตามการออกแบบสามารถรับแรงเฉือนได้

ถึง 15.2 ตัน) ซึ่งเป็นการออกแบบเพื่อกันการวิบัติจากแรงเฉือนในกรณีที่คานตัวอย่างมีการเสริมกำลังเรียบร้อยแล้ว เนื่องจากคานเสริมกำลังจะรับสามารถน้ำหนักประลัยได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงเฉือนที่คานตัวอย่างต้องรับมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณารอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง CB1 พบว่ารอยแตกร้าวมีขนาดใหญ่และมีจำนวนน้อย และกระจุกตัวอยู่ในช่วงระหว่างจุดให้น้ำหนักกระทำ (bending zone) ซึ่งเป็นลักษณะของรอยแตกร้าวที่ไม่ดี เนื่องจากรอยแตกร้าวที่กว้างจะทำให้เหล็กเสริมต่างๆมีโอกาสเกิดการกัดกร่อน (corrosion) ได้ง่าย อีกทั้งการกระจุกตัวของรอยแตกร้าวยังทำให้คานตัวอย่าง CB1 มีความสม่ำเสมอ (homogeneous) ตลอดตัวคานน้อยลง ส่งผลให้พฤติกรรมของคานตัวอย่างไม่สอดคล้องกับทฤษฎีที่ใช้วิเคราะห์หรือทำการออกแบบ

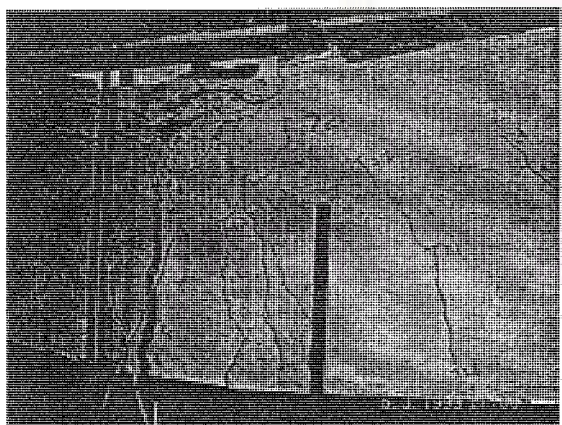


(ก)

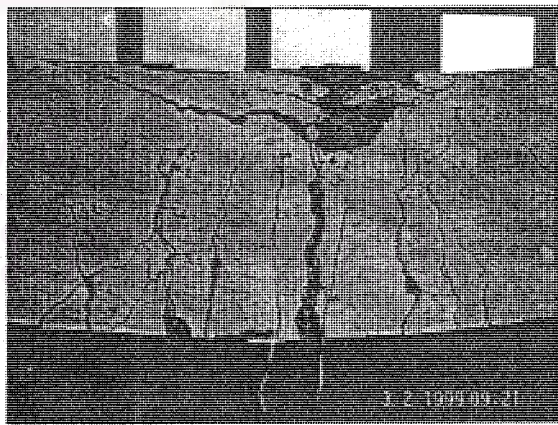


(ข)

รูปที่ 5.4 แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นก่อนเกิดการวิบัติบนคานตัวอย่าง CB1

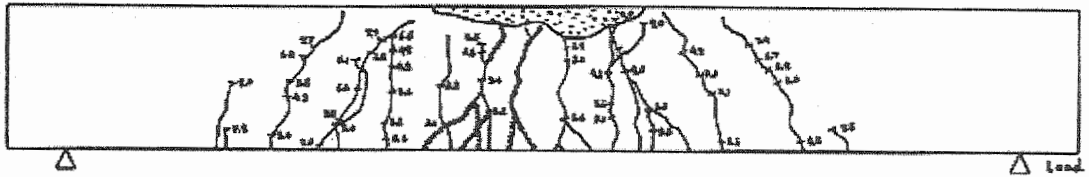


(ก)



(ข)

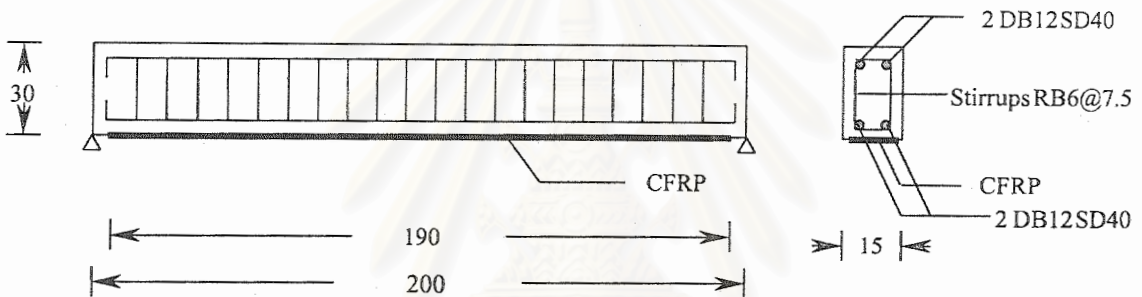
รูปที่ 5.5 แสดงการวิบัติบนคานตัวอย่าง CB1 เนื่องจากคอนกรีตถูกอัดแตก



รูปที่ 5.6 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง CB1

5.2 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง RF1

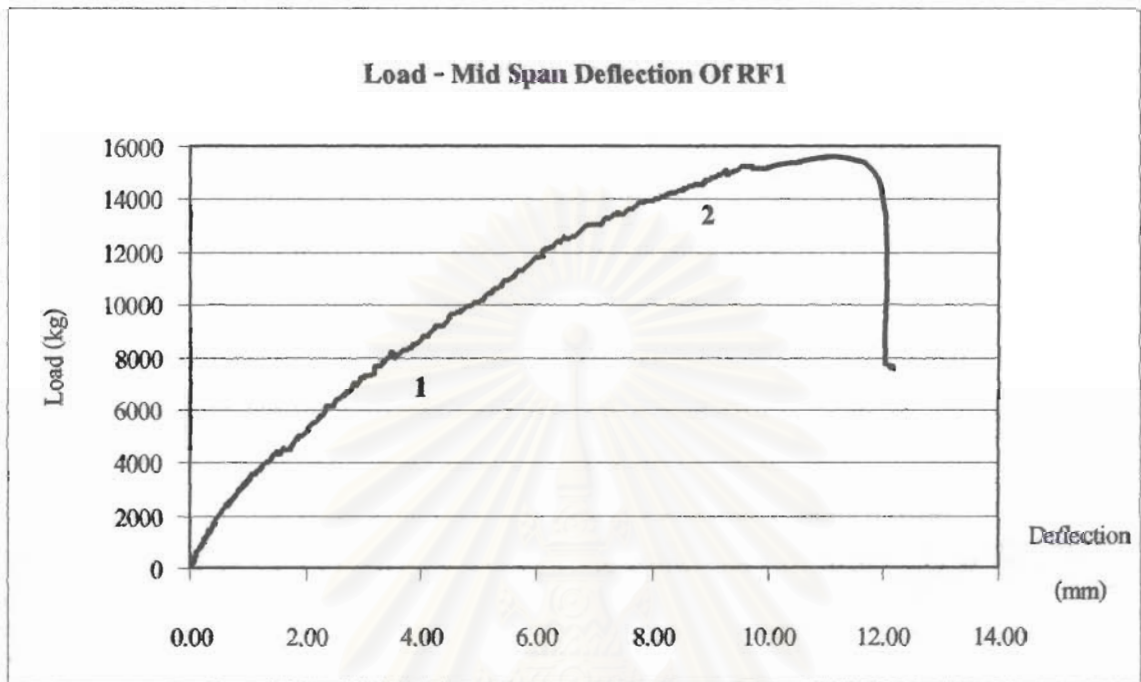
คานตัวอย่าง RF1 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจำนวน 2 แผ่น ความยาวแผ่นละ 1.90 เมตร โดยคานดังกล่าวจะมีการเสริมเหล็กเสริมต่างๆ เหมือนกับคานตัวอย่าง CB1 และมีการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนดังรูปที่ 5.7



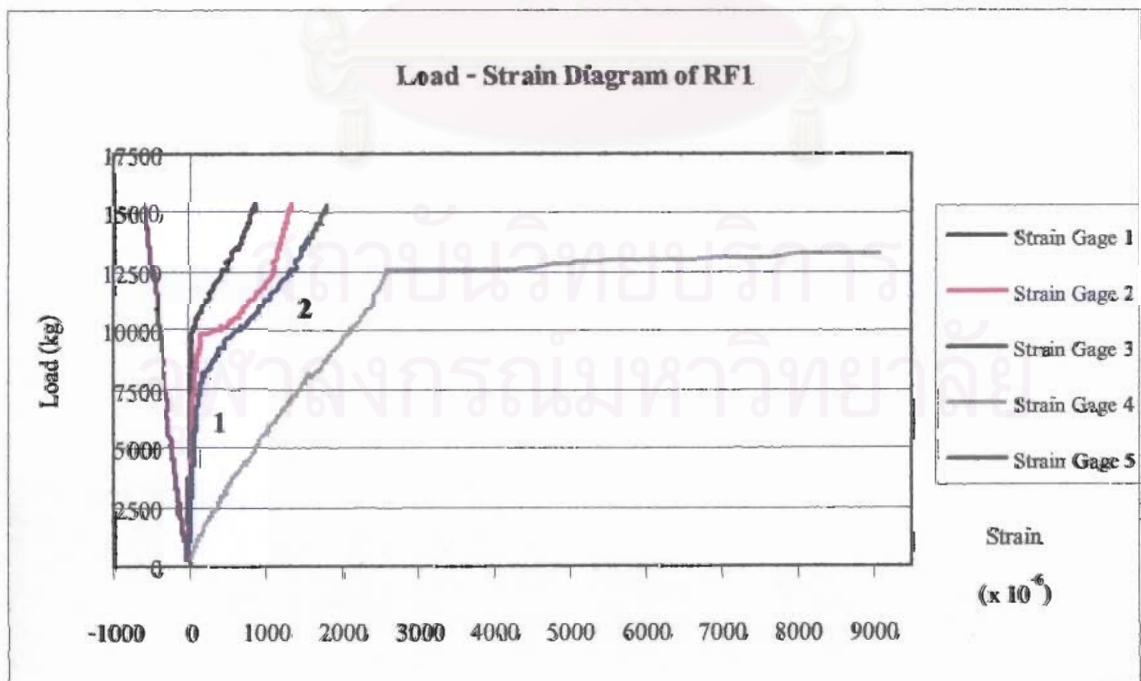
รูปที่ 5.7 แสดงลักษณะและการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RF1

จากผลการทดสอบเมื่อนำน้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่าง RF1 จนถึงน้ำหนักประมาณ 2.7 ตัน พบว่าคานตัวอย่าง RF1 เริ่มเกิดรอยแตกร้าวเล็กๆขึ้นบริเวณท้องคานได้จุดที่น้ำหนักกระทำ โดยรอยแตกร้าวจะทอดตัวอยู่ในแนวตั้ง ซึ่งเป็นลักษณะของรอยแตกร้าวที่เกิดจากแรงคัด รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะมีการขยายตัวและเพิ่มจำนวนตามน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้นตลอดการทดสอบ จนเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 4.5 ตัน รอยแตกร้าวจะเริ่มกระจายเข้าสู่ช่วงระยะ 75 ซม. จากจุดรองรับ (shear zone) รอยแตกร้าวในบริเวณนี้มีลักษณะเฉียงทำมุมประมาณ 45 องศา กับแนวราบ ในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวเป็นเชิงเส้นตรง ดังส่วนที่ 1 ในรูปที่ 5.8 เมื่อนำน้ำหนักต่อจนกระทั่งน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 14.1 ตัน คานตัวอย่าง RF1 เกิดเสียงคอนกรีตลั่นและตรวจพบรอยแตกร้าวที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน โดยรอยแตกร้าวจะขยายตัวสูงขึ้นเรื่อยๆตามน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้นจนถึงบริเวณแนวเหล็กเสริมรับแรงคัด รอยแตกร้าวจึงเริ่มเอนลงตามแนวเหล็กเสริม และเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่า 15.3 ตัน แถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเกิดการหลุดลอกออกอย่างทันทีทันใด ทำให้น้ำหนักกระทำที่วัดได้ตกลงมาอยู่ที่ 7.8 ตัน โดยค่าการโก่งตัวสูงสุดก่อนการวิบัติมีค่า 9.8 มม. ซึ่งลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่าง RF1 เป็น

แบบเฉพาะที่ (local failure) ที่เกิดจากการหลุดลอกของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (debonded failure) ดังแสดงในรูปที่ 5.11

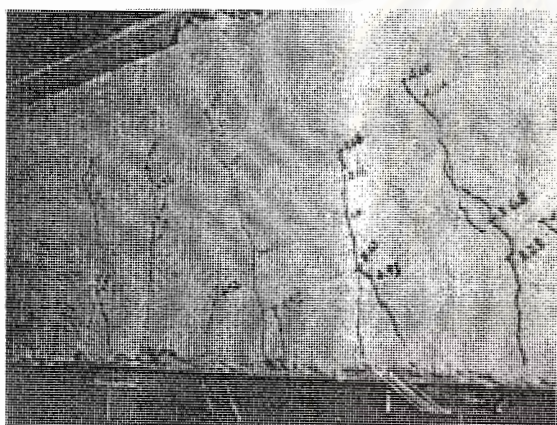


รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RF1



รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RF1

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียด (strain gage) ในตำแหน่งต่างๆของคานตัวอย่าง RF1 พบว่าเหล็กเสริมรับแรงดึงเกิดการครากที่น้ำหนัก 12.5 ตัน สังเกตได้จากเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดที่ 4 ที่เปลี่ยนไปอยู่ในแนวอน และค่าความเครียดที่วัดได้ ณ จุดเปลี่ยนค่าความชันมีค่าเท่ากับค่าความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริม (ประมาณ 2,500 ไมโคร) ซึ่งเมื่อสังเกตรูปที่ 5.8 พบว่าที่น้ำหนักกระทำประมาณ 12.5 ตัน เส้นความสัมพันธ์มีการเปลี่ยนค่าความชันจริง โดยสามารถแยกเส้นความสัมพันธ์ที่มีค่าความชันต่างกันออกได้เป็นสองส่วน ดังรูปที่ 5.8 และเมื่อพิจารณาเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 1 2 และ 3 พบว่าลักษณะของเส้นความสัมพันธ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ 1 ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรง และส่วนที่ 2 ที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ดังรูปที่ 5.9 โดยเส้นความสัมพันธ์ทั้ง 3 ความสัมพันธ์จะมีจุดเปลี่ยนค่าความชันที่ประมาณ 10.0 9.7 และ 8.3 ตัน ตามลำดับ ในขณะที่เส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 5 จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีค่าติดลบ เนื่องจากมาตรวัดความเครียดที่ 5 ทำการติดตั้งบนผิวของเหล็กเสริมรับแรงอัด

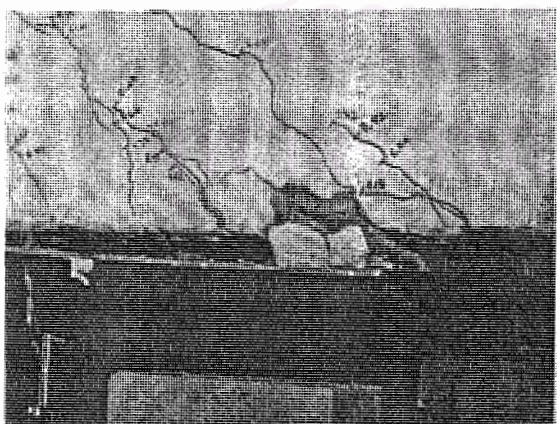


(ก)

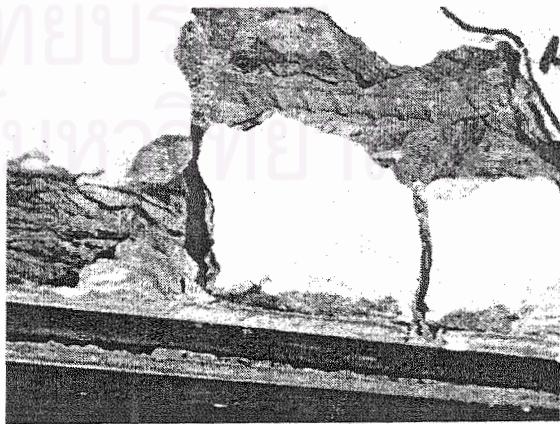


(ข)

รูปที่ 5.10 แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นก่อนเกิดการวิบัติบนคาน RF1



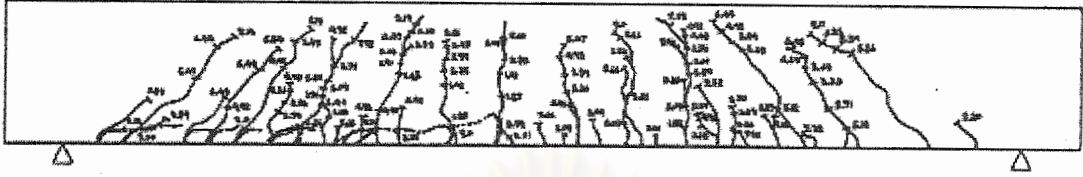
(ก)



(ข)

รูปที่ 5.11 แสดงคาน RF1 หลังเกิดการวิบัติ ซึ่งคอนกรีตหลุดลอกจนเห็นเหล็กเสริมรับแรงดึง

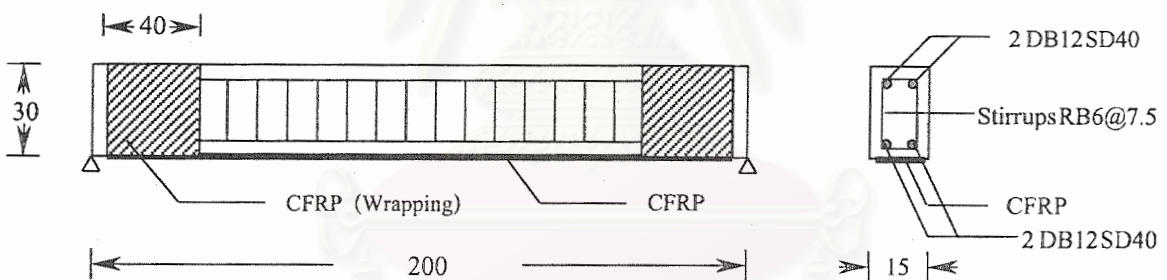
เมื่อพิจารณารอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF1 ภายหลังจากการวิบัติเทียบกับคานตัวอย่าง CB1 พบว่าจะมีลักษณะที่แตกต่างกันคือ รอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF1 จะมีขนาดเล็กและกระจายตัวมากกว่าคานตัวอย่าง CB1 ลักษณะรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF1 ทั้งคานแสดงดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวของคาน RF1

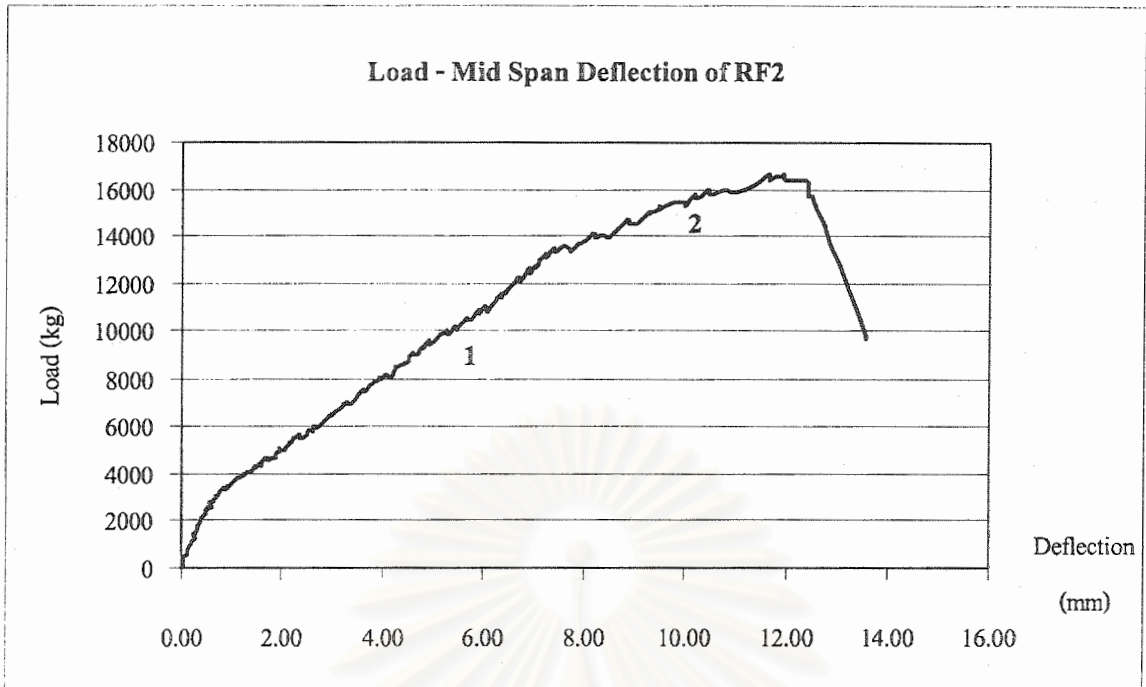
5.3 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง RF2

คานตัวอย่าง RF2 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจำนวน 2 แผ่น ความยาวแผ่นละ 1.90 เมตร และหุ้มบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนด้วยแผ่นเส้นใยคาร์บอน (wrapping sheet) เป็นระยะ 40 ซม. โดยคานดังกล่าวจะมีลักษณะการเสริมเหล็กเสริมต่างๆ และการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่างๆดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 แสดงลักษณะและการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RF2

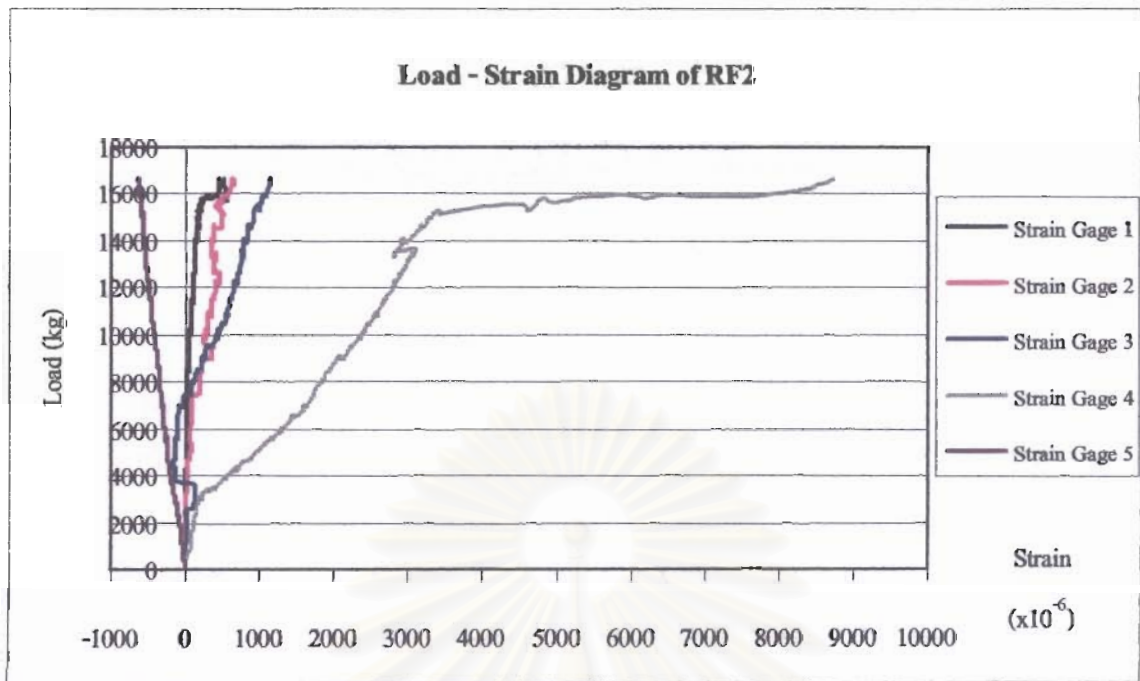
เมื่อให้น้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่าง RF2 จนถึงน้ำหนักกระทำประมาณ 3.0 ตัน พบว่าคานตัวอย่าง RF2 เริ่มเกิดรอยแตกร้าวเล็กๆขึ้นบริเวณท้องคานได้จุดที่น้ำหนักกระทำ โดยรอยแตกร้าวจะวางตัวอยู่ในแนวตั้ง ซึ่งเป็นลักษณะของรอยแตกร้าวที่เกิดจากแรงคด รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะขยายตัวและเพิ่มจำนวนตามน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้น จนเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 8.5 ตันจะสังเกตเห็นรอยแตกร้าวขยายออกมาจากส่วนที่ถูกหุ้มปลาย (บริเวณที่ปลายลูกศรชี้ในรูปที่ 5.16) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวยังคงเป็นเชิงเส้นตรงดังส่วนที่ 1 ในรูปที่ 5.14 โดยในขณะที่ให้น้ำหนักกระทำกับคานตัวอย่าง RF2 จะได้ยินเสียงลั่นออกมาจากแผ่นเส้นใยคาร์บอนที่ใช้หุ้มบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเป็นระยะๆ ตลอดการทดสอบ และเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 16.7 ตัน คานตัวอย่าง RF2 เกิดการวิบัติจากการหลุด



รูปที่ 5.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RF2

ลอกออกของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนอย่างทันทีทันใด ทำให้น้ำหนักกระทำที่วัดได้ตกลงมาอยู่ที่ 9.8 ตัน โดยค่าการโก่งตัวสูงสุดก่อนการวิบัติมีค่า 12.5 มม. ซึ่งลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่าง RF2 เป็นแบบเฉพาะที่ (local failure) ที่เกิดจากการหลุดลอกของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (debonded failure) ดังแสดงในรูปที่ 5.17

และเมื่อพิจารณารูปที่ 5.15 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและความเครียดที่วัดได้ในตำแหน่งต่างๆของคานตัวอย่าง RF2 พบว่าเหล็กเสริมรับแรงดึงเกิดการร้าวที่น้ำหนักกระทำ 13.6 ตัน สังเกตได้จาก ณ น้ำหนักกระทำนี้ เส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดที่ 4 มีการเปลี่ยนค่าความชัน และเมื่อพิจารณาเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 1 2 และ 3 พบว่าลักษณะเส้นความสัมพันธ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคล้ายกับคานตัวอย่าง RF1 แต่ไม่ชัดเจนเหมือนกับคานตัวอย่าง RF1 กล่าวคือส่วนที่ 1 ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรง และส่วนที่ 2 ที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง โดยเส้นความสัมพันธ์ทั้ง 3 ความสัมพันธ์จะมีจุดเปลี่ยนค่าความชันที่น้ำหนักกระทำประมาณ 9.5 9.0 และ 6.9 ตันตามลำดับ ขณะที่เส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 5 จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีค่าติดลบ เนื่องจากมาตรวัดความเครียดที่ 5 ติดตั้งบนผิวของเหล็กเสริมรับแรงอัด และเมื่อพิจารณารอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF2 พบว่าจะมีลักษณะเหมือนกับรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF1 คือ จะมีขนาดเล็ก แคบ และมีกระจายตัวสูง โดยลักษณะรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF2 ทั้งคานแสดงดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RF2



(ก)

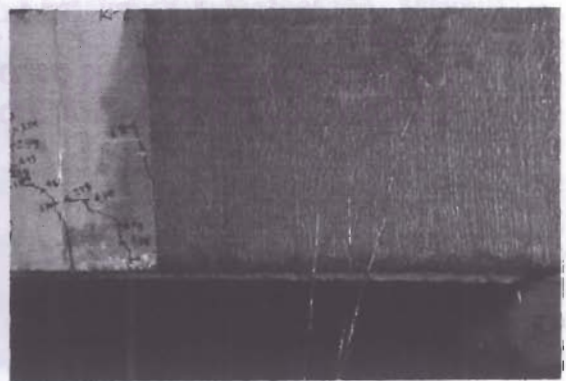


(ข)

รูปที่ 5.16 แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นก่อนเกิดการวิบัติบนคานตัวอย่าง RF2

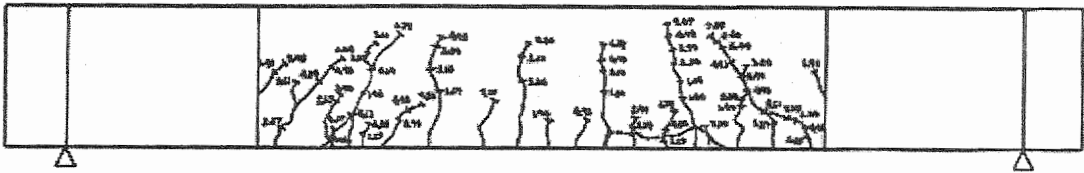


(ก)



(ข)

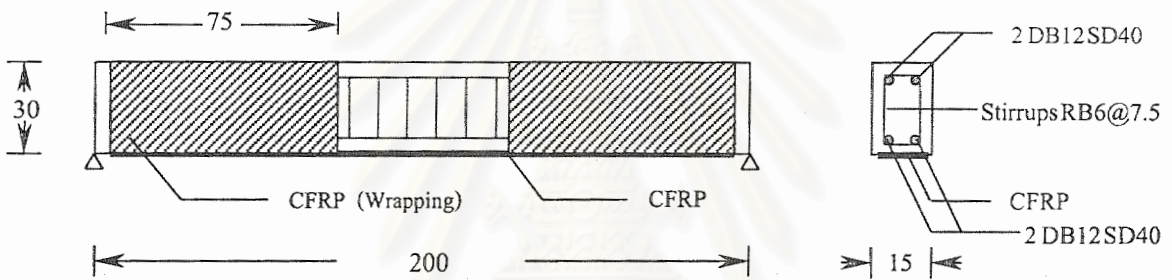
รูปที่ 5.17 แสดงลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่าง RF2



รูปที่ 5.18 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF2

5.4 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง RF3

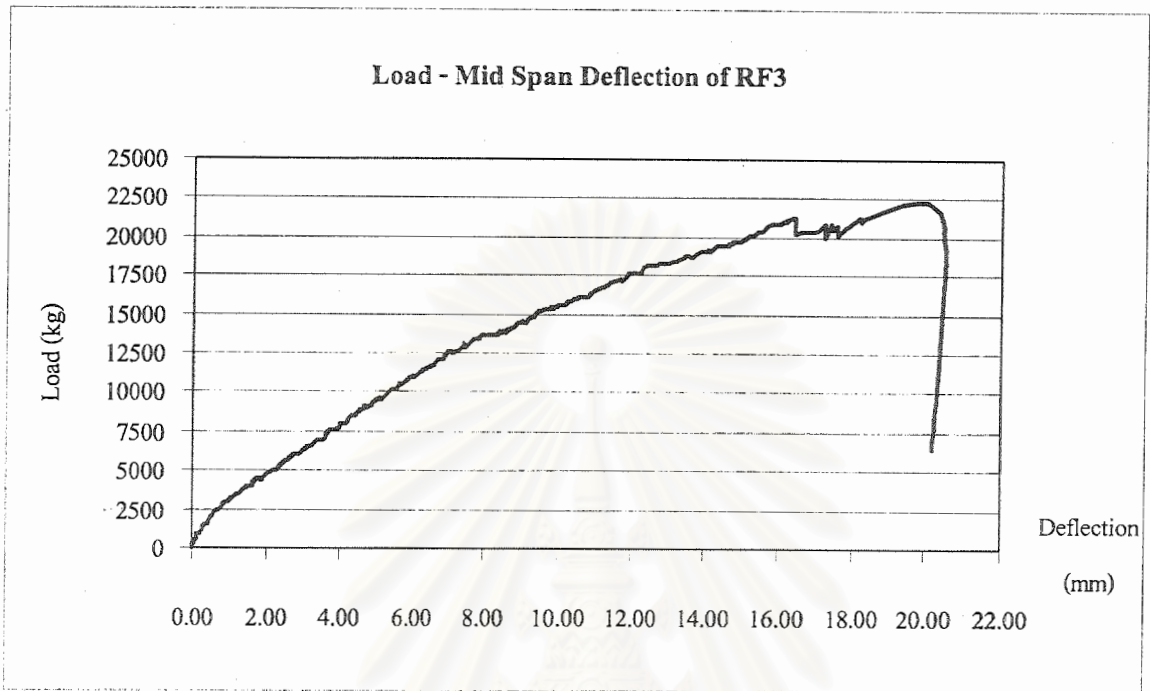
คานตัวอย่าง RF3 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจำนวน 2 แผ่น ความยาวแผ่นละ 1.90 เมตร และหุ้มบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนด้วยแผ่นเส้นใยคาร์บอน (wrapping sheet) เป็นระยะ 75 ซม. โดยคานดังกล่าวจะมีลักษณะการเสริมเหล็กเสริมต่างๆ และการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่างๆดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 แสดงลักษณะและการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RF3

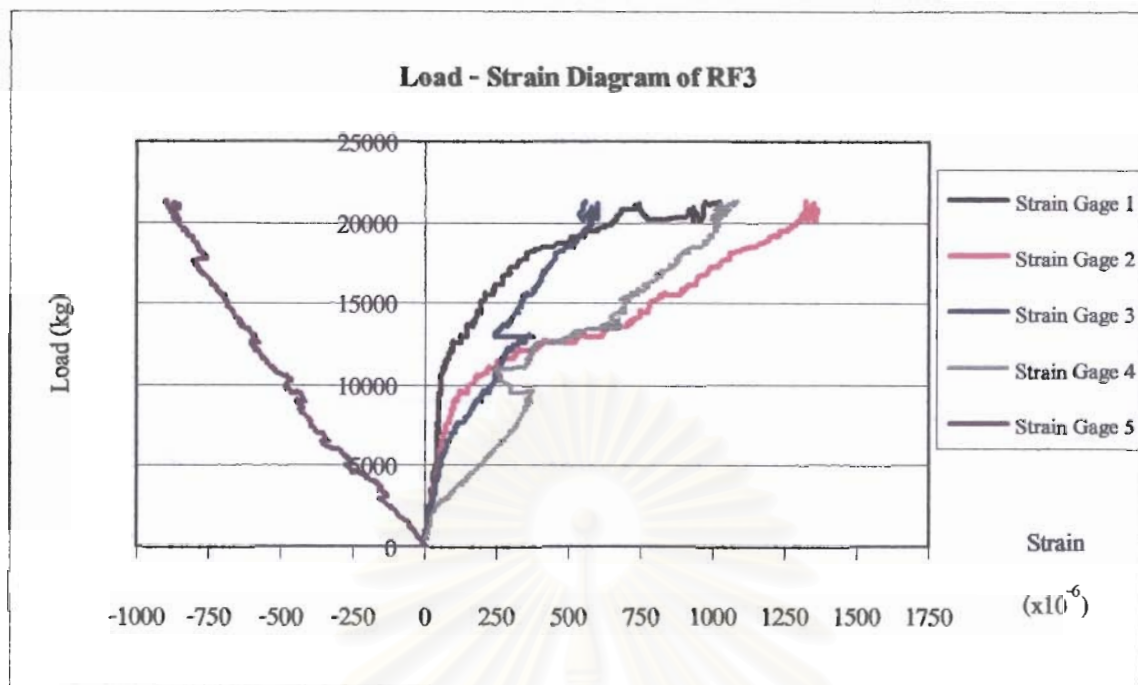
เนื่องจากคานตัวอย่าง RF3 มีการใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอนหุ้มตลอดช่วง 75 ซม. จากจุดรองรับ ทำให้สามารถสังเกตรอยแตกร้าวได้เฉพาะในช่วงระหว่างจุดให้น้ำหนักกระทำเท่านั้น โดยเมื่อเริ่มให้น้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่าง RF3 จนถึงน้ำหนักประมาณ 2.7 ตัน พบว่าคานตัวอย่าง RF3 เริ่มเกิดรอยแตกร้าวเล็กๆขึ้นบริเวณท้องคานได้จุดที่น้ำหนักกระทำ โดยรอยแตกร้าวในช่วงแรกยังมีขนาดเล็กมากและวางตัวอยู่ในแนวตั้ง ซึ่งเป็นลักษณะการแตกร้าวที่เกิดจากแรงดัด รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะขยายตัวและเพิ่มจำนวนตามน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆและมีขนาดไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งในขณะที่ให้น้ำหนักกระทำกับคานตัวอย่าง RF3 จะได้ยินเสียงลั่นออกมาจากแผ่นเส้นใยคาร์บอนที่ใช้หุ้มบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเป็นระยะๆตลอดการทดสอบ และตั้งแต่น้ำหนักกระทำมีค่ามากกว่า 11.6 ตัน พบว่ารอยแตกร้าวในช่วงระหว่างน้ำหนักกระทำ (bending zone) จะมีการขยายตัวในอัตราที่ต่ำกว่าช่วงแรกอย่างชัดเจน จนกระทั่งเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 21.3 ตัน คานตัวอย่าง RF3 เกิดการวิบัติจากการหลุดลอกออกของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนอย่างทันทีทันใด ทำให้น้ำหนักกระทำที่วัดได้ตกลงมาอยู่ที่ 6.5 ตัน โดยค่าการโก่งตัวสูงสุดก่อนการวิบัติมีค่า 18.4 มม. (ดังรูปที่ 5.20) ซึ่งลักษณะการวิบัติของคานตัว

อย่าง RF3 เป็นแบบเฉพาะที่ (local failure) ที่เกิดจากการหลุดลอกของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (debonded failure) ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ชัดจากรูปที่ 5.22

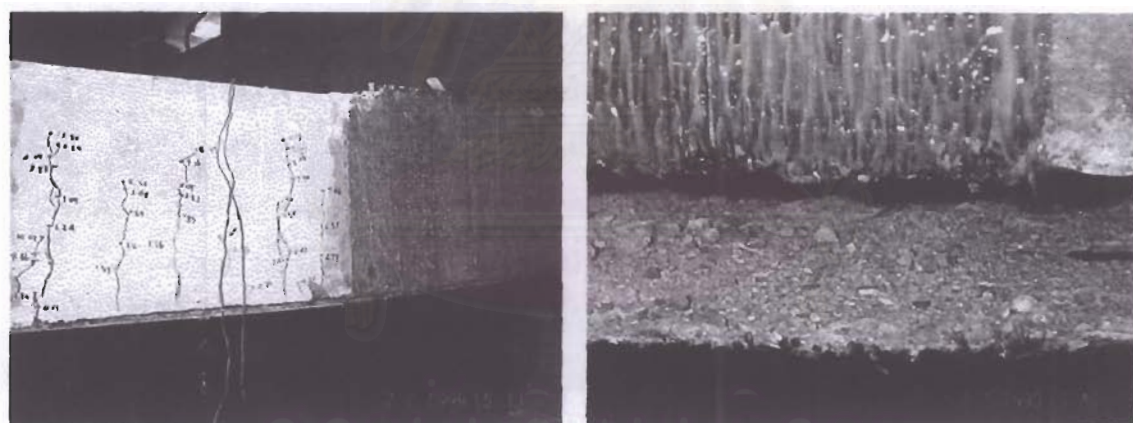


รูปที่ 5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RF3

และเมื่อพิจารณารูปที่ 5.20 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางช่วงคานของคานตัวอย่าง RF3 พบว่าเส้นความสัมพันธ์จะมีการเปลี่ยนค่าความชันที่น้ำหนักประมาณ 13.7 ตัน (จุดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดคราก) สาเหตุที่ต้องพิจารณาจุดครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงจากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางช่วงคาน (รูปที่ 5.20) เนื่องจากมาตรฐานความเครียดในตำแหน่งที่ 4 ไม่สามารถใช้งานได้นับตั้งแต่น้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 9.6 ตัน และเมื่อพิจารณาเส้นความสัมพันธ์ของมาตรฐานความเครียดที่ 1 2 และ 3 พบว่าเส้นความสัมพันธ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคล้ายกับคานตัวอย่าง RF1 แต่ไม่ชัดเจนเหมือนกับคานตัวอย่าง RF1 โดยเส้นความสัมพันธ์ทั้ง 3 ความสัมพันธ์จะมีจุดเปลี่ยนค่าความชันที่ประมาณ 11.9 9.8 และ 7.8 ตัน ตามลำดับ ในขณะที่เส้นความสัมพันธ์ของมาตรฐานความเครียดที่ 5 จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีค่าติดลบเนื่องจากมาตรฐานความเครียดที่ 5 ติดตั้งบนผิวของเหล็กเสริมรับแรงอัดบริเวณกึ่งกลางของคานตัวอย่าง และเมื่อพิจารณารอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF3 ภายหลังจากการวิบัติพบว่าจะมีลักษณะเหมือนกับรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF1 คือ จะมีขนาดเล็กแคบ และมีกระจายตัวสูง โดยลักษณะรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF3 ทั้งคานแสดงดังรูปที่ 5.23



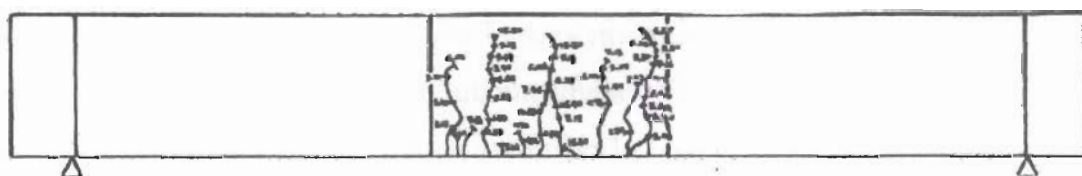
รูปที่ 5.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RF3



(ก)

(ข)

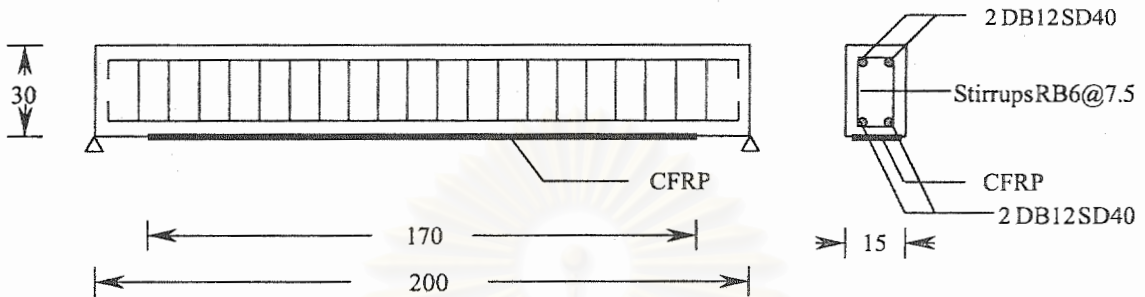
รูปที่ 5.22 แสดงลักษณะการร้าวร้าวของคานตัวอย่าง RF3



รูปที่ 5.23 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวของคาน RF3

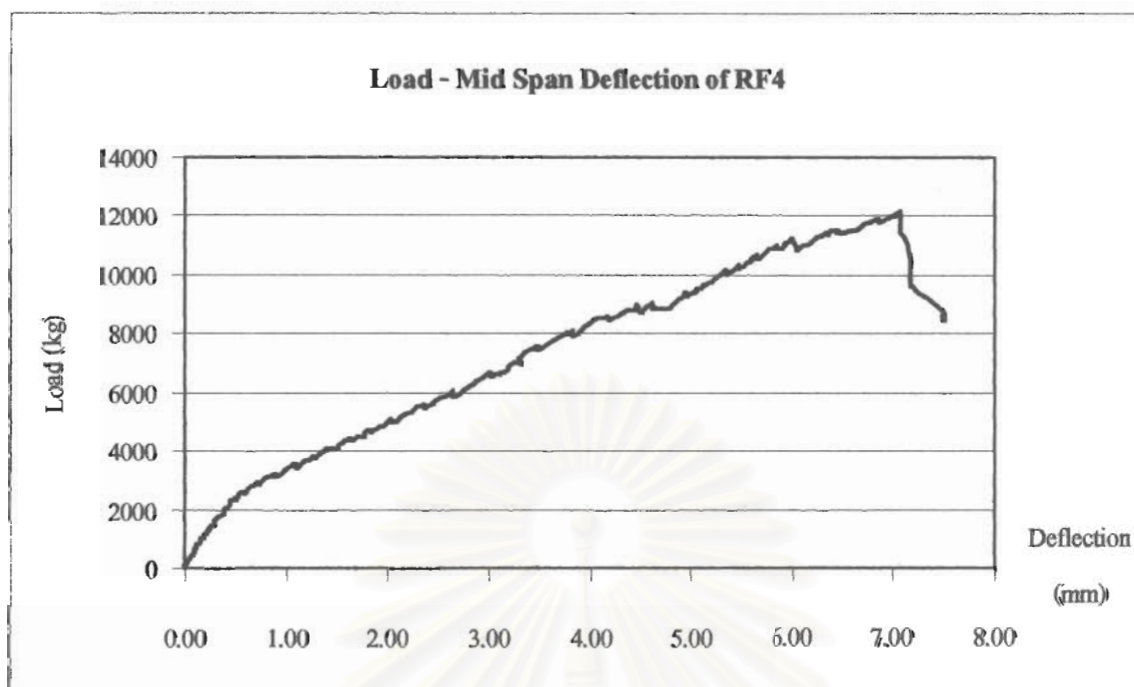
5.5 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง RF4

คานตัวอย่าง RF4 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจำนวน 2 แผ่น ความยาวแผ่นละ 1.70 เมตร โดยคานดังกล่าวจะมีลักษณะการเสริมเหล็กเสริมต่างๆ และการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนดังรูปที่ 5.24

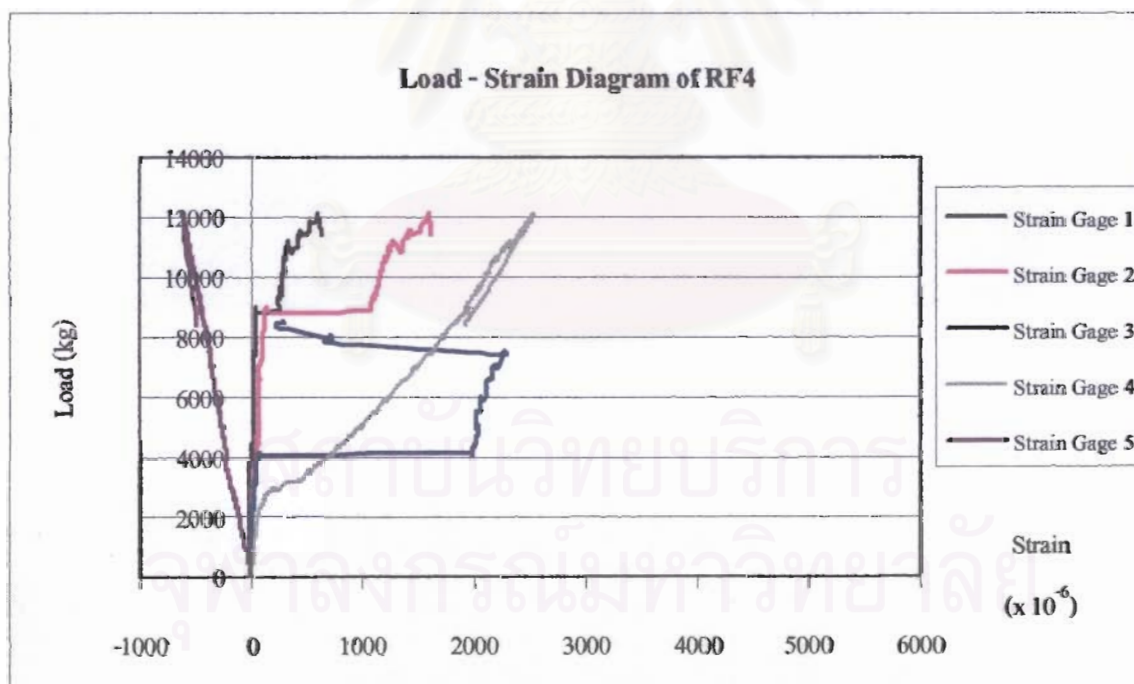


รูปที่ 5.24 แสดงลักษณะและการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RF4

เมื่อเริ่มทำการทดสอบ จะตรวจสอบรอยแตกร้าวแรกๆของคานตัวอย่าง RF4 ที่น้ำหนักกระทำประมาณ 2.8 ตันบริเวณท้องคานได้จุดที่น้ำหนักกระทำ โดยรอยแตกร้าวในช่วงแรกยังมีขนาดเล็กมากและวางตัวอยู่ในแนวตั้ง ซึ่งรอยแตกร้าวจะขยายตัวและเพิ่มจำนวนตามน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้น จนเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 4.4 ตัน จะสังเกตเห็นว่ารอยแตกร้าวเริ่มขยายตัวเข้าไปในช่วง 75 ซม. จากจุดรองรับ (shear zone) โดยเมื่อให้น้ำหนักกระทำต่อ พบว่ารอยแตกร้าวในช่วง 75 ซม. จากจุดรองรับจะมีการขยายตัวมากขึ้น แต่ในขณะที่รอยแตกร้าวบริเวณระหว่างจุดน้ำหนักกระทำ (bending zone) ไม่มีการขยายตัว ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวจะเป็นเชิงเส้นตรงดังรูปที่ 5.25 และเมื่อให้น้ำหนักต่อไปจนถึงค่าประมาณ 9.0 ตัน จะสังเกตเห็นรอยแตกร้าวเกิดขึ้นบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนทั้งสองด้าน รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นนี้ขยายตัวขึ้นจากปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน เอียงทำมุมประมาณ 45 องศา และมีความยาวประมาณ 30 ซม. บริเวณที่ถูกสรชี้ในรูปที่ 5.27 (ข) ที่น้ำหนักกระทำนี้ได้ยินเสียงคอนกรีตแตกอย่างชัดเจน โดยรอยแตกร้าวบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจะมีความกว้างมากขึ้นตามน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้นและมีความกว้างมากกว่าส่วนอื่น ๆ อย่างชัดเจน จนเมื่อน้ำหนักกระทำประมาณ 11.2 ตัน ได้ยินเสียงเหล็กเสริมภายในเกิดการไถลตัว (slip) อย่างชัดเจนเมื่อให้น้ำหนักกระทำต่อพบว่ารอยแตกร้าวที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเริ่มมีทิศทางตามแนวนอนและมีความยาวเพิ่มขึ้น จนกระทั่งที่น้ำหนักประมาณ 12.1 ตัน ได้ยินเสียงเหล็กเสริมภายในไถลตัวอีกครั้ง หลังจากนั้นไม่นานคานก็เกิดการวิบัติ (คงค้ำน้ำหนักกระทำไว้) จากคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมด้านล่างฉีกตัวออกอย่างทันทีทันใด (peeling failure) ดังรูปที่ 5.28 ทำให้น้ำหนักกระทำตกลงมาอยู่ที่ประมาณ 9.0 ตัน โดยค่าการโก่งตัวสูงสุดก่อนการวิบัติมีค่า 7.1 มม. ดังแสดงในรูปที่ 5.25



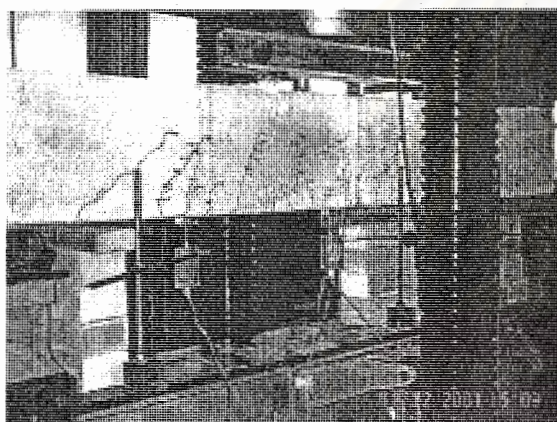
รูปที่ 5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RF4



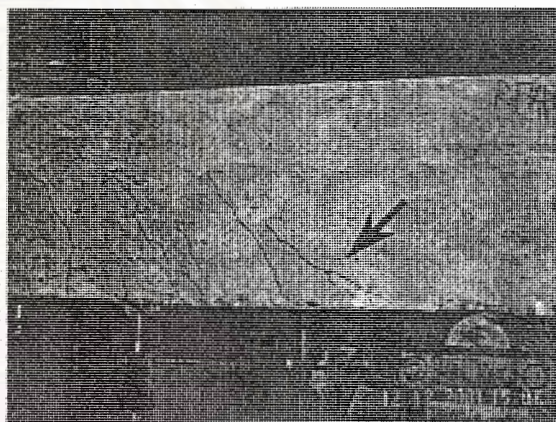
รูปที่ 5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RF4

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.26 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัด ณ ตำแหน่งต่างๆของคานตัวอย่าง RF4 พบว่าเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดที่ 4 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความชันเหมือนกับคานตัวอย่าง RF1 (จุดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดคราก)

โดยเมื่อคานตัวอย่าง RF4 เกิดการวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 12.1 ตันแล้วปรากฏว่าค่าความเครียดของมาตรวัดที่ 4 มีค่าลดลงตามแนวเส้นความสัมพันธ์เดิม ซึ่งเกิดจากเหล็กเสริมรับแรงดึงยังไม่ถึงจุดครากทำให้พฤติกรรมยังคงเป็นแบบยืดหยุ่นอยู่ (elastic behavior) และเมื่อพิจารณาเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 1 2 และ 3 พบว่าลักษณะของเส้นความสัมพันธ์ทั้ง 3 ความสัมพันธ์เกิดความไม่ต่อเนื่องของข้อมูล โดยเมื่อดูจากแนวโน้มความต่อเนื่องของข้อมูลและข้อมูลของคานตัวอย่างอื่นๆ พบว่าเส้นความสัมพันธ์ทั้งสามยังคงมีทิศทางเดียวกัน เพียงแต่เกิดการเลื่อนตัว (shift) ของข้อมูลออกจากแนวเดิม ซึ่งอาจจะเกิดจากข้อผิดพลาดของเครื่องมือเก็บข้อมูล (data logger) ทำให้ค่าความเครียดที่วัดได้ผิดพลาดไป ถ้าพิจารณาข้ามความไม่ต่อเนื่องของข้อมูลไปจะพบว่า เส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 1 และ 2 ยังคงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน โดยมีจุดเปลี่ยนค่าความชันที่ประมาณ 11.2 ตันทั้งสองเส้นความสัมพันธ์ ส่วนมาตรวัดที่ 3 ไม่สามารถวัดค่าต่อได้ ในขณะที่เส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 5 จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีค่าติดลบ เนื่องจากมาตรวัดความเครียดที่ 5 ทำการติดตั้งบนผิวของเหล็กเสริมรับแรงอัด

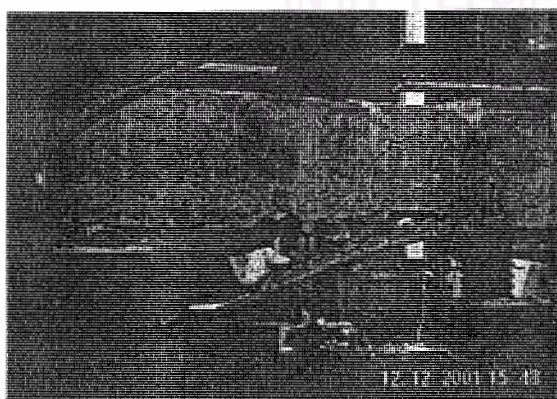


(ก)

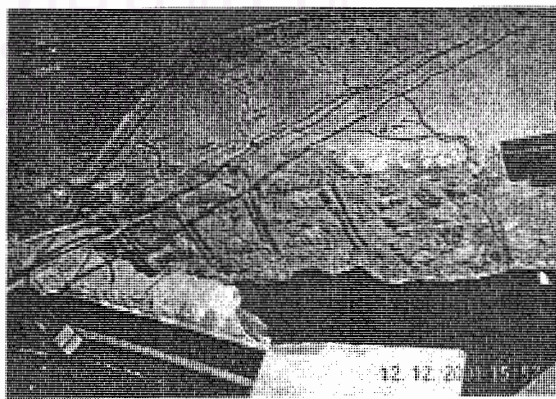


(ข)

รูปที่ 5.27 แสดงรอยแตกร้าวที่ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RF4



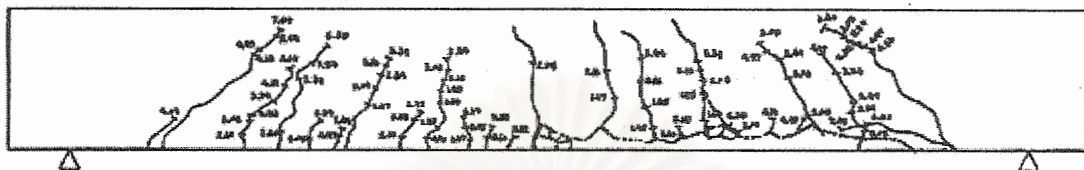
(ก)



(ข)

รูปที่ 5.28 แสดงลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่าง RF4

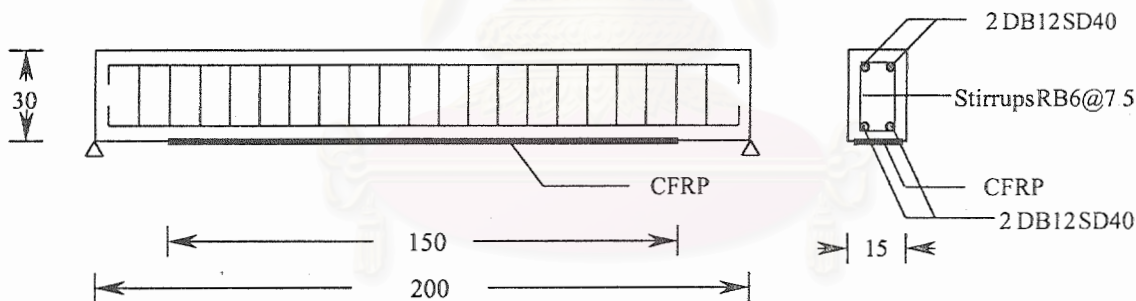
และเมื่อพิจารณารอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF4 ภายหลังจากการวิบัติพบว่ารอยแตกร้าวเกิดขึ้นเฉพาะในช่วงที่ติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน และมีลักษณะเหมือนกับรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF1 คือ จะมีขนาดเล็ก แคบ และมีกระจายตัวสูง โดยลักษณะรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF4 ทั้งคานแสดงดังรูปที่ 5.29



รูปที่ 5.29 แสดงภาพร้าวลักษณะรอยแตกร้าวของคาน RF4

5.6 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง RF5

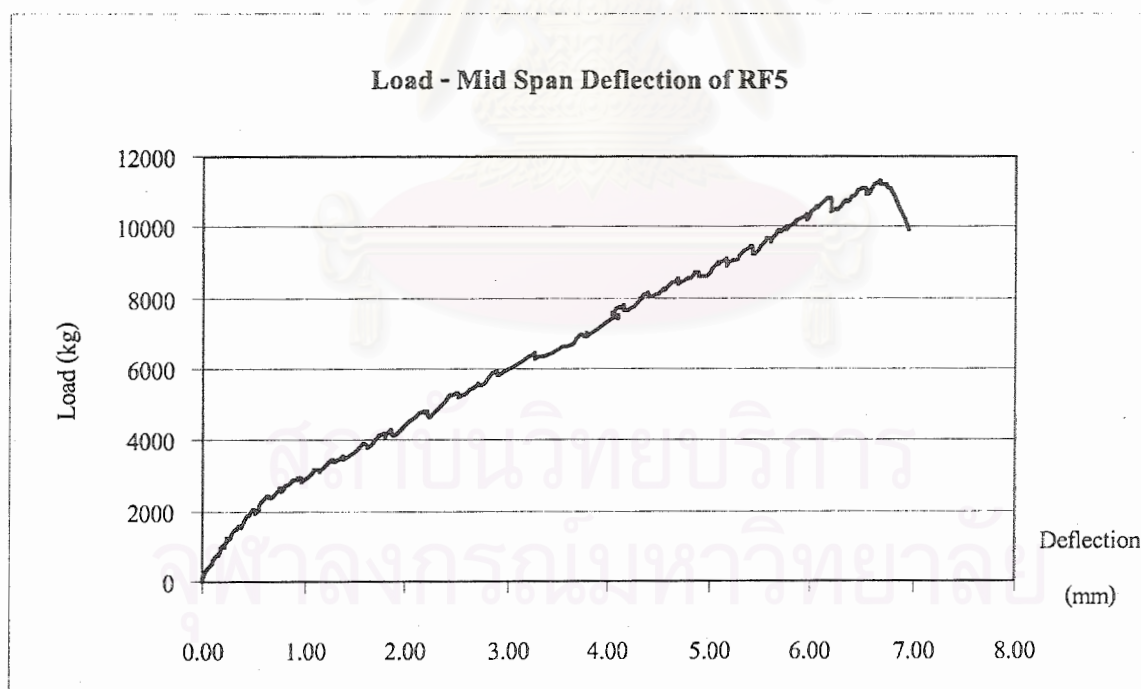
คานตัวอย่าง RF5 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจำนวน 2 แผ่น ความยาวแผ่นละ 1.50 เมตร โดยคานดังกล่าวจะมีลักษณะการเสริมเหล็กเสริมต่างๆ และการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนดังรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.30 แสดงลักษณะและการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RF5

โดยเมื่อเริ่มให้น้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่าง RF5 จนน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 2.5 ตัน พบว่าคานตัวอย่าง RF5 เริ่มเกิดรอยแตกร้าวเล็กๆขึ้นบริเวณท้องคานใต้จุดที่น้ำหนักกระทำ โดยรอยแตกร้าวในช่วงแรกยังมีขนาดเล็กมากและวางตัวอยู่ในแนวตั้ง ซึ่งเป็นลักษณะการแตกร้าวที่เกิดจากแรงคัต รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะขยายตัวและเพิ่มจำนวนตามน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้นจนเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 4.3 ตัน จะสังเกตเห็นว่ารอยแตกร้าวมีความยาวมากขึ้นและเริ่มขยายตัวเข้าไปในช่วง 75 ซม.จากจุดรองรับ (shear zone) โดยเมื่อให้น้ำหนักกระทำต่อ พบว่ารอยแตกร้าวในช่วง 75 ซม.จากจุดรองรับจะมีการขยายตัวมากขึ้น แต่ในขณะที่รอยแตกร้าวบริเวณระหว่างจุดน้ำหนักกระทำ (bending zone) ไม่มีการขยายตัว ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัว

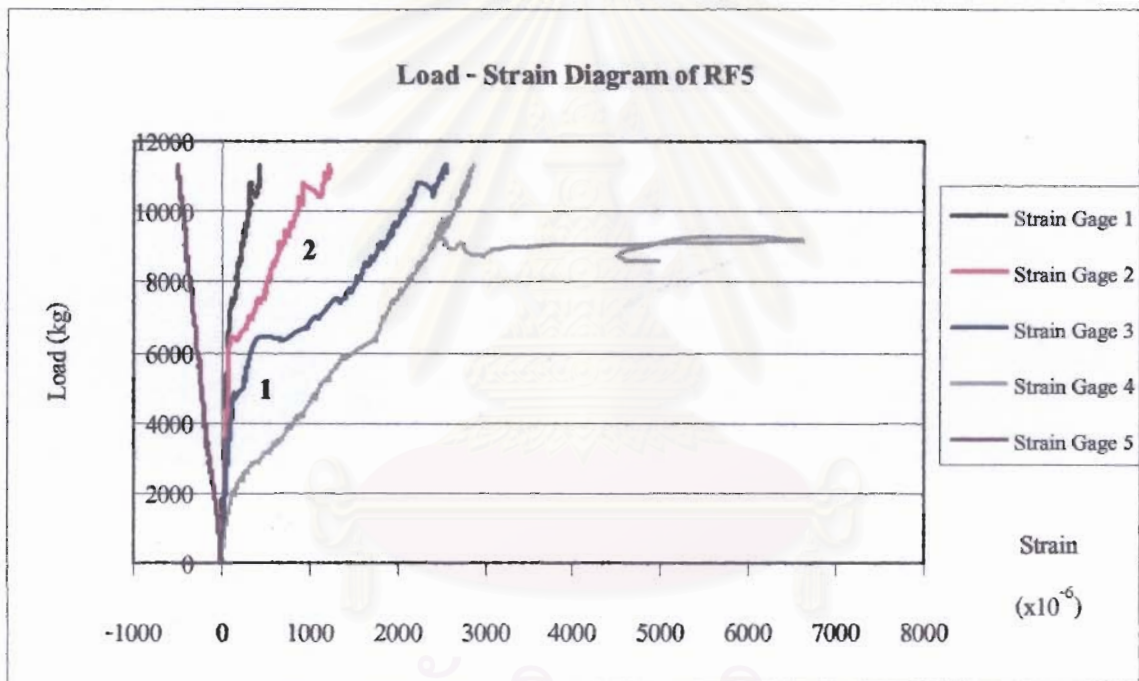
จะเป็นเชิงเส้นตรงดังรูปที่ 5.31 และเมื่อให้น้ำหนักต่อไปจนถึงค่าประมาณ 6.9 ตัน จะสังเกตเห็นรอยแตกร้าวเกิดขึ้นบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนทั้งสองด้าน รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นนี้ขยายตัวขึ้นจากปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน เอียงทำมุมประมาณ 45 องศา และมีความยาวประมาณ 30 ซม. บริเวณที่ถูกครีซีในรูปที่ 5.33 ที่น้ำหนักนี้ได้ยินเสียงคอนกรีตแตกร้าวอย่างชัดเจน โดยรอยแตกร้าวบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจะมีความกว้างมากขึ้นตามน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้นและมีความกว้างมากกว่าส่วนอื่น ๆ อย่างชัดเจน ในขณะที่รอยแตกร้าวบริเวณใต้จุดที่น้ำหนักกระทำไม่มีการขยายตัว จนเมื่อน้ำหนักกระทำประมาณ 7.9 ตัน พบว่ารอยแตกร้าวที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเริ่มมีทิศทางตามแนวนอนและมีความยาวเพิ่มขึ้น และเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 9.7 ตัน รอยแตกร้าวใต้ท้องคานบริเวณปลายแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แตกร้าวตลอดหน้าตัดคานและมีขนาดใหญ่มากขึ้นจนเห็นได้อย่างชัดเจน จนกระทั่งที่น้ำหนักประมาณ 11.3 ตัน เกิดเสียงคอนกรีตลั่นหลังจากนั้นไม่นานคานก็เกิดการวิบัติ (คองน้ำหนักกระทำไว้) จากคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมด้านล่างฉีกตัวออกอย่างทันทีทันใด (peeling failure) ดังรูปที่ 5.34 ทำให้น้ำหนักกระทำตกลงมาอยู่ที่ประมาณ 9.0 ตัน โดยค่าการโก่งตัวสูงสุดก่อนการวิบัติมีค่า 6.8 มม. ดังแสดงในรูปที่ 5.31



รูปที่ 5.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RF5

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.32 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัด ณ ตำแหน่งต่างๆของคานตัวอย่าง RF5 พบว่าเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดที่

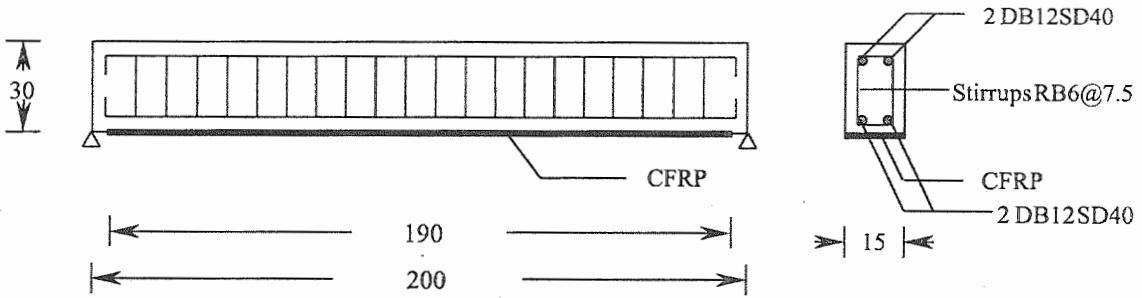
4 ไม่มีการเปลี่ยนค่าความชันเหมือนกับคานตัวอย่าง RF1 (จุดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดคราก) โดยเมื่อคานตัวอย่าง RF5 เกิดการวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 11.3 ดันแล้วปรากฏว่าค่าความเครียดของมาตรวัดที่ 4 มีค่าลดลงตามแนวเดิมของเส้นความสัมพันธ์ ซึ่งเกิดจากเหล็กเสริมรับแรงดึงยังไม่ถึงจุดคราก ทำให้พฤติกรรมยังคงเป็นแบบยืดหยุ่นอยู่ (elastic behavior) และเมื่อพิจารณาเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 1 2 และ 3 จะพบว่าลักษณะของเส้นความสัมพันธ์ทั้ง 3 ความสัมพันธ์ยังคงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนเหมือนคานตัวอย่าง RF1 โดยมีจุดเปลี่ยนค่าความชันที่ประมาณ 6.4 ดันทั้งสามเส้นความสัมพันธ์ ในขณะที่เส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 5 จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีค่าคิดลบ เนื่องจากมาตรวัดความเครียดที่ 5 ทำการติดตั้งบนผิวของเหล็กเสริมรับแรงอัดบริเวณกึ่งกลางของคานตัวอย่าง



รูปที่ 5.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RF4

และเมื่อพิจารณารอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF5 ภายหลังจากการวิบัติพบว่ารอยแตกร้าวเกิดขึ้นเฉพาะในช่วงที่ติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน และมีลักษณะเหมือนกับรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF1 คือ จะมีขนาดเล็ก แฉก และมีกระจายตัวสูง โดยลักษณะรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF5 ทั้งคานแสดงดังรูปที่ 5.35

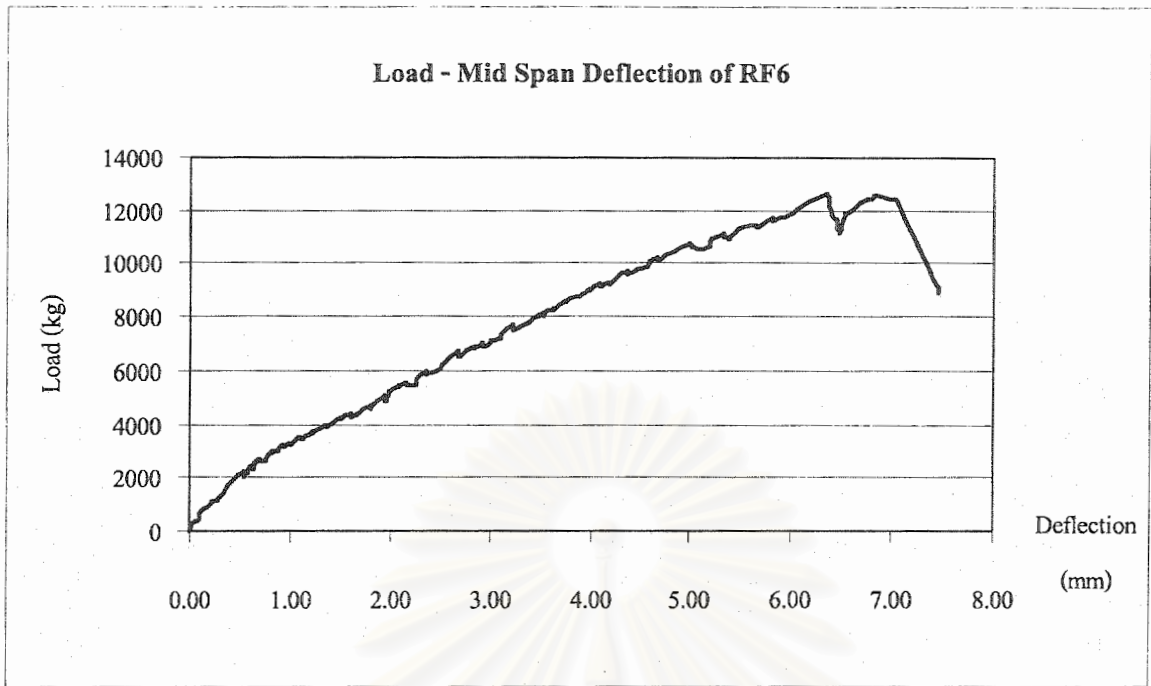




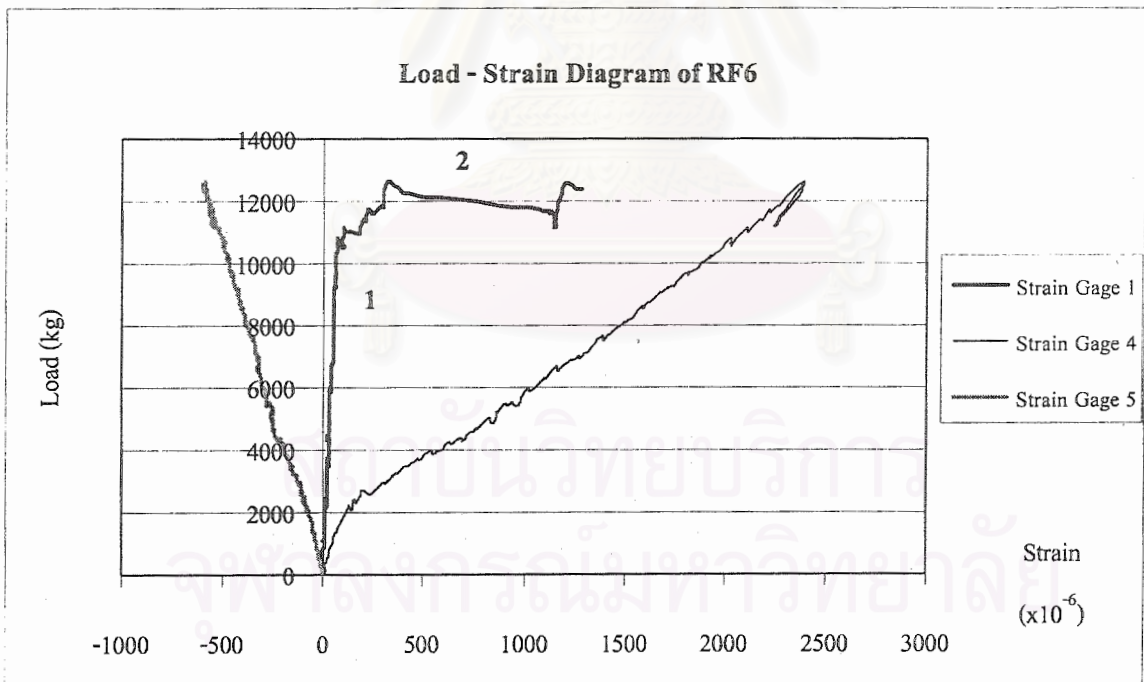
รูปที่ 5.36 แสดงลักษณะและการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RF6

โดยเมื่อเริ่มให้น้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่าง RF6 จนน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 2.8 ตัน พบว่าคานตัวอย่าง RF6 เริ่มเกิดรอยแตกร้าวเล็กๆขึ้นบริเวณท้องคานใต้จุดที่น้ำหนักกระทำ โดยรอยแตกร้าวในช่วงแรกยังมีขนาดเล็กมากและวางตัวอยู่ในแนวตั้ง ซึ่งเป็นลักษณะการแตกร้าวที่เกิดจากแรงคัต รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะขยายตัวและเพิ่มจำนวนตามน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้นจนเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 4.9 ตัน จะสังเกตเห็นว่ารอยแตกร้าวมีความยาวมากขึ้นและเริ่มขยายตัวเข้าไปในช่วง 75 ซม. จากจุดรองรับ (shear zone) โดยเมื่อให้น้ำหนักกระทำต่อ พบว่ารอยแตกร้าวในช่วง 75 ซม. จากจุดรองรับจะมีการขยายตัวมากขึ้น ในขณะที่บริเวณระหว่างจุดน้ำหนักกระทำ (bending zone) ไม่มีการขยายตัว เมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 5.2 ตัน รอยแตกร้าวมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว และเมื่อเพิ่มน้ำหนักกระทำอย่างต่อเนื่องจนน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 12.6 ตัน จึงพบรอยแตกร้าวบริเวณปลายแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (บริเวณที่ถูกตรึงในรูปแบบที่ 5.39 (ก)) โดยที่น้ำหนักกระทำนี้ได้ยื่นเสี่ยงคอนกรีตแตกร้าวอย่างชัดเจน รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นนี้ขยายตัวขึ้นจากปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเพียงทำมุม 45 องศากับแนวราบ โดยจะไม่ขยายตัวยาวเกินระดับของแนวเหล็กเสริมด้านล่าง แต่จะวางตัวตามแนวเหล็กเสริมด้านล่างแทน ซึ่งเมื่อดึงคานน้ำหนักกระทำไว้สักครู่ คานตัวอย่าง RF6 จึงเกิดการวิบัติจากคอนกรีตส่วนหุ้มเหล็กเสริมด้านล่างฉีกตัวออกอย่างทันทีทันใด (peeling failure) ดังรูปที่ 5.39 ทำให้น้ำหนักกระทำตกลงมาอยู่ที่ประมาณ 9.0 ตัน โดยค่าการโก่งตัวสูงสุดก่อนการวิบัติมีค่า 7.0 มม. ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคานของคานตัวอย่าง RF6 เป็น ไปดังรูปที่ 5.37

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.38 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัด ณ ตำแหน่งที่ 1 4 และ 5 ของคานตัวอย่าง RF6 (คานตัวอย่าง RF6 ทำการติดมาตรวัดค่าความเครียดเพียง 3 ตำแหน่งคือ ที่ผิวเหล็กเสริมรับแรงดึงบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ที่ผิวเหล็กเสริมรับแรงดึงบริเวณกึ่งกลางคาน และที่ผิวเหล็กเสริมรับแรงอัดบริเวณกึ่งกลางคาน) พบว่าเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดที่ 4 ไม่มีการเปลี่ยนค่าความชันเหมือนกับคานตัวอย่าง RF1 (จุดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดคราก) โดยเมื่อคานตัวอย่าง RF6 เกิดการวิบัติที่น้ำหนักประมาณ 12.5 ตันแล้ว ปรากฏว่าค่าความเครียดของมาตรวัดที่ 4 มีค่าลดลงตามแนวเส้น



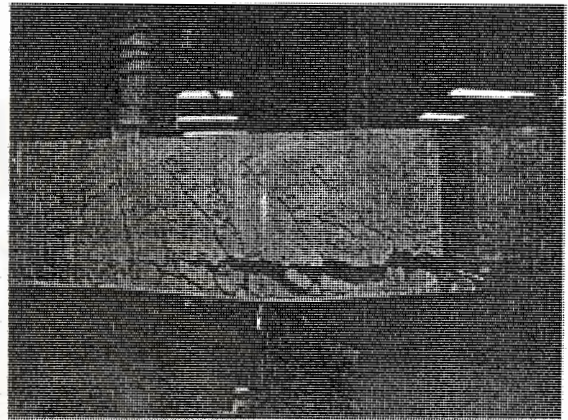
รูปที่ 5.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RF6



รูปที่ 5.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RF6

ความสัมพันธ์เดิมซึ่งเกิดจากเหล็กเสริมรับแรงดึงยังไม่ถึงจุดครากทำให้พฤติกรรมยังคงเป็นแบบยืดหยุ่นอยู่ (elastic behavior) และเมื่อพิจารณาเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 1 พบว่า

ลักษณะของเส้นความสัมพันธ์ ยังคงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนเหมือนคานตัวอย่าง RF1 ดังแสดงในรูปที่ 5.38 โดยมีจุดเปลี่ยนค่าความชันที่ประมาณ 10.8 ตัน ในขณะที่เส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 5 จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีค่าติดลบ เนื่องจากมาตรวัดความเครียดที่ 5 ทำการติดตั้งบนผิวของเหล็กเสริมรับแรงอัดบริเวณกึ่งกลางของคานตัวอย่าง

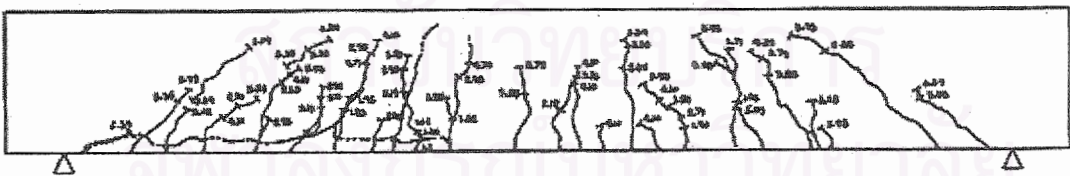


(ก) แสดงรอยแตกร้าวที่ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RF6

(ข) แสดงลักษณะการวิบัติของคาน RF6

รูปที่ 5.39 แสดงสภาพของคานตัวอย่าง RF6 ทั้งก่อนและหลังการวิบัติ

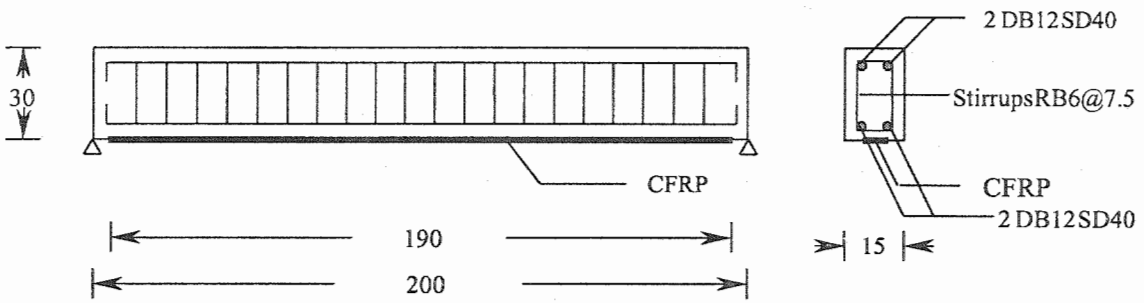
และเมื่อพิจารณารอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF6 ภายหลังจากการวิบัติพบว่ารอยแตกร้าวจะมีลักษณะเหมือนกับรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF1 คือ จะมีขนาดเล็ก แคบ และมีกระจายตัวสูง โดยลักษณะรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF6 ทั้งคานแสดงดังรูปที่ 5.40



รูปที่ 5.40 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวของคาน RF6

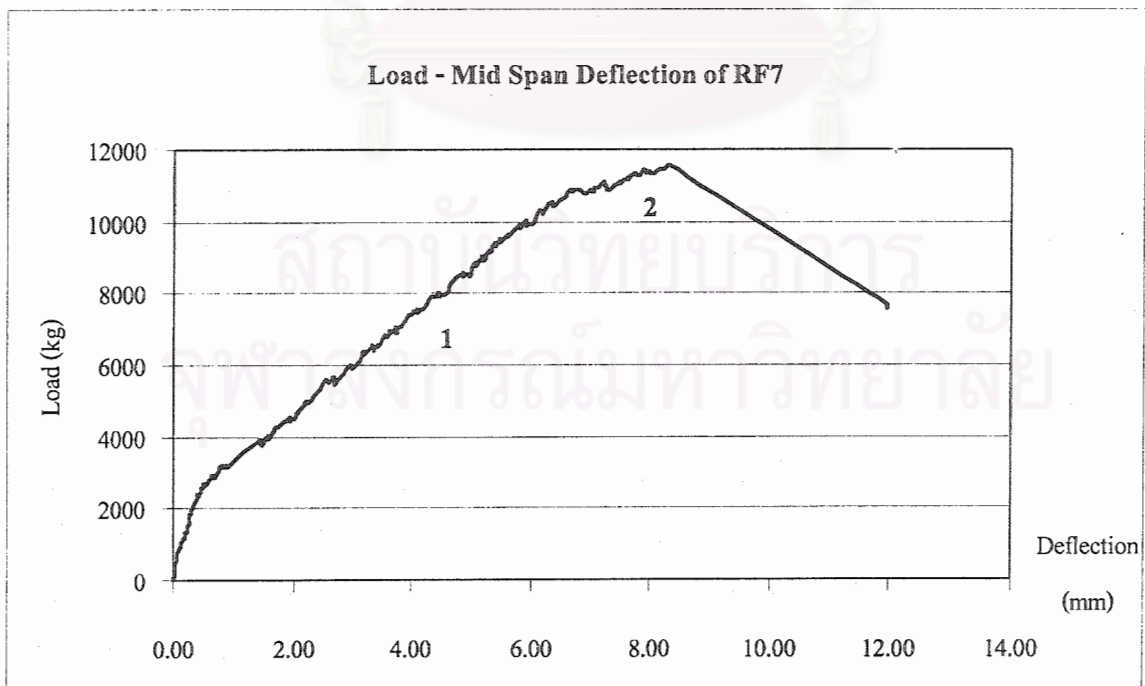
5.8 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง RF7

คานตัวอย่าง RF7 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจำนวน 1 แผ่น มีความยาว 1.90 เมตร โดยคานดังกล่าวจะมีลักษณะการเสริมเหล็กเสริมต่างๆ และการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนดังรูปที่ 5.41



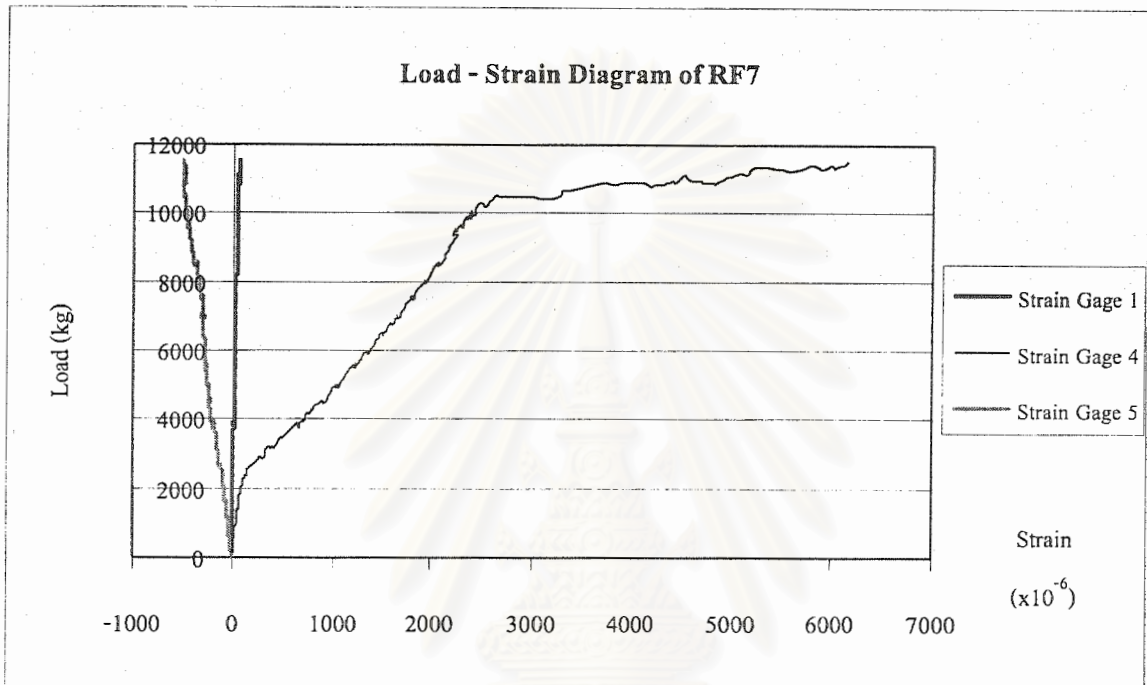
รูปที่ 5.41 แสดงลักษณะและการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RF7

โดยเมื่อเริ่มให้น้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่าง RF7 จนน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 2.8 ตัน พบว่าคานตัวอย่าง RF7 เริ่มเกิดรอยแตกร้าวเล็กๆขึ้นบริเวณท้องคานใต้จุดที่น้ำหนักกระทำ โดยรอยแตกร้าวในช่วงแรกยังมีขนาดเล็กมากและวางตัวอยู่ในแนวตั้ง ซึ่งเป็นลักษณะการแตกร้าวที่เกิดจากแรงคัต รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะขยายตัวและเพิ่มจำนวนตามน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้นจนเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 3.6 ตัน จะสังเกตเห็นว่ารอยแตกร้าวมีความยาวมากขึ้นและเริ่มขยายตัวเข้าไปในช่วง 75 ซม.จากจุดรองรับ (shear zone) โดยเมื่อให้น้ำหนักกระทำต่อจนถึงน้ำหนักกระทำประมาณ 4.4 ตันพบว่ารอยแตกร้าวในช่วง 75 ซม.จากจุดรองรับยังมีการขยายตัวมากขึ้น ในขณะที่บริเวณระหว่างจุดน้ำหนักกระทำ (bending zone) ไม่มีการขยายตัว และเมื่อให้น้ำหนักกระทำอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าประมาณ 7.8 ตัน ได้ยินเสียงเหล็กเสริมภายในเกิดการไถลตัว (slip) อย่างชัดเจน



รูปที่ 5.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RF7

โดยรอยแตกร้าวในช่วงระหว่างน้ำหนักกระทำเริ่มมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นอีก จนกระทั่งที่น้ำหนักประมาณ 11.6 ตัน คานจึงเกิดการวิบัติ จากการหลุดลอกของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน อย่างทันทีทันใด (debonded failure) ดังรูปที่ 5.44 ทำให้น้ำหนักกระทำตกลงมาอยู่ที่ประมาณ 7.7 ตัน โดยค่าการโก่งตัวสูงสุดก่อนการวิบัติมีค่า 8.3 มม. ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคานของคานตัวอย่าง RF7 เป็นไปดังรูปที่ 5.42



รูปที่ 5.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RF7

และจากรูปที่ 5.43 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัด ณ ตำแหน่งที่ 1 4 และ 5 ของคานตัวอย่าง RF7 (คานตัวอย่าง RF7 ทำการติมาตรวัดค่าความเครียดเพียง 3 ตำแหน่งคือ ที่ผิวเหล็กเสริมรับแรงดึงบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ที่ผิวเหล็กเสริมรับแรงดึงบริเวณกึ่งกลางคาน และที่ผิวเหล็กเสริมรับแรงอัดบริเวณกึ่งกลางคาน) พบว่าเหล็กเสริมรับแรงดึงเกิดการร้าวที่น้ำหนักกระทำ 10.5 ตัน โดยสังเกตได้จาก ณ น้ำหนักกระทำดังกล่าว เส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดที่ 4 มีการเปลี่ยนค่าความชันอย่างชัดเจน ประกอบกับค่าความเครียดที่วัดได้ ณ จุดเปลี่ยนค่าความชันมีค่าเท่ากับค่าความเครียดที่จุดร้าวของเหล็กเสริม (ประมาณ 2,500 ไมโคร) ซึ่งเมื่อกลับไปพิจารณารูปที่ 5.42 พบว่าที่น้ำหนักกระทำประมาณ 10.5 ตัน เส้นความสัมพันธ์มีการเปลี่ยนค่าความชันจริง โดยสามารถแบ่งเส้นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัว ณ จุดกึ่งกลางคานออกได้เป็นส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 5.42 และเมื่อพิจารณาเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 1 พบว่าค่าความเครียดที่วัดได้จะมีค่าแกว่งอยู่ใกล้ศูนย์ ไม่มีการเปลี่ยนค่าความชันเหมือนกับคานตัวอย่าง

RF1 แต่อย่างไร ในขณะที่เส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 5 จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง และมีค่าติดลบ เนื่องจากมาตรวัดความเครียดที่ 5 ทำการติดตั้งบนผิวของเหล็กเสริมรับแรงอัด บริเวณกึ่งกลางของคานตัวอย่าง



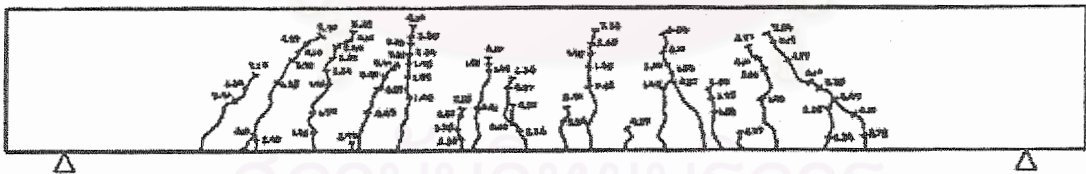
(ก)



(ข)

รูปที่ 5.44 แสดงลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่าง RF7

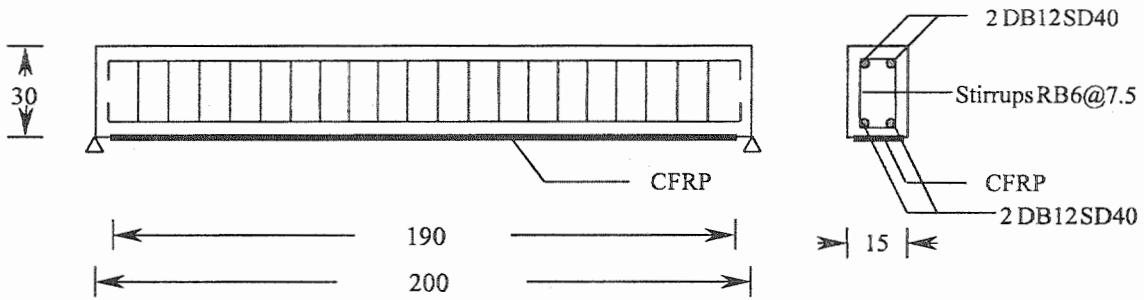
และเมื่อพิจารณารอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF7 ภายหลังจากการวิบัติพบว่ารอยแตกร้าวมีลักษณะคล้ายกับรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF1 คือ จะมีขนาดเล็ก แคบ แต่จะกระจายตัวน้อยกว่าในคานตัวอย่าง RF1 โดยลักษณะการกระจายตัวของรอยแตกร้าวจะคล้ายกับคานตัวอย่าง CB1 คือมีการกระจุกตัวและเกิดไม่เต็มช่วงการเสริมกำลัง ดังแสดงในรูปที่ 5.45



รูปที่ 5.45 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวของคาน RF7

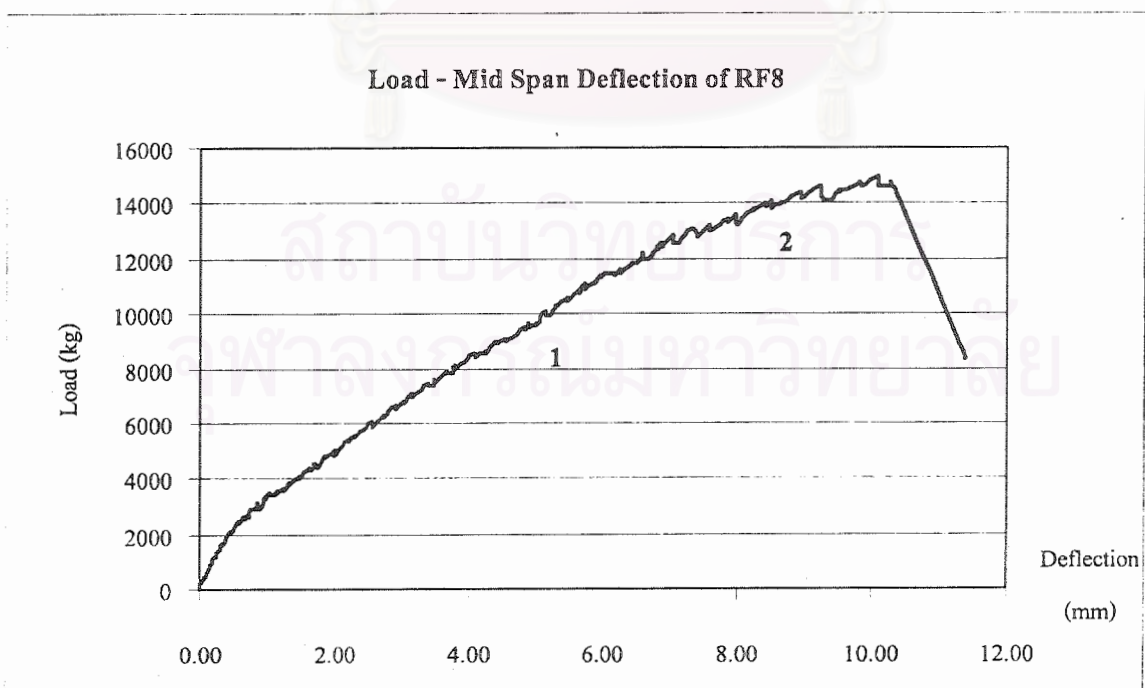
5.9 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง RF8

คานตัวอย่าง RF8 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจำนวน 2 แผ่น ความยาวแผ่นละ 1.90 เมตร แต่จะมีลดความหนาของชั้นกาว ซึ่งปกติแล้วความหนาของชั้นกาวในคานตัวอย่างอื่นๆ จะมีค่าประมาณ 2 มม. แต่ในคานตัวอย่าง RF8 ความหนาของชั้นกาวจะมีค่าประมาณ 0.8 มม. ซึ่งคานตัวอย่าง RF8 จะมีลักษณะการเสริมเหล็กเสริมต่างๆ และการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนดังรูปที่ 5.46



รูปที่ 5.46 แสดงลักษณะและการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RF8

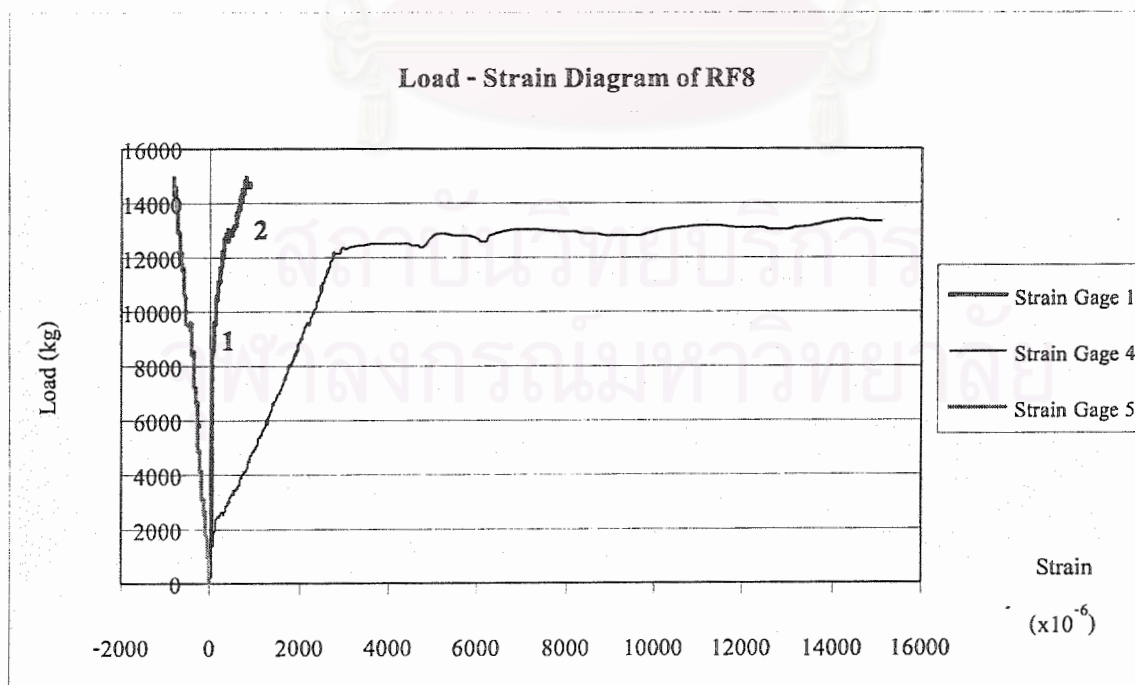
โดยเมื่อเริ่มให้น้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่าง RF8 จนเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 2.5 ตัน พบว่าคานตัวอย่าง RF8 เริ่มเกิดรอยแตกร้าวเล็กๆขึ้นบริเวณท้องคานใต้จุดที่น้ำหนักกระทำ โดยรอยแตกร้าวในช่วงแรกยังมีขนาดเล็กมากและวางตัวอยู่ในแนวตั้ง ซึ่งเป็นลักษณะการแตกร้าวที่เกิดจากแรงดัด รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะขยายตัวและเพิ่มจำนวนตามน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้นจนน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 4.1 ตัน จะสังเกตเห็นว่ารอยแตกร้าวมีความยาวมากขึ้นและเริ่มขยายตัวเข้าไปในช่วง 75 ซม. จากจุดรองรับ (shear zone) โดยเมื่อให้น้ำหนักกระทำต่อเนื่อง พบว่ารอยแตกร้าวในช่วง 75 ซม. จากจุดรองรับจะมีการขยายตัวมากขึ้น ในขณะที่รอยแตกร้าวบริเวณระหว่างจุดน้ำหนักกระทำ (bending zone) ไม่มีการขยายตัว ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวเป็นเชิงเส้นตรง ดังส่วนที่ 1 ในรูปที่ 5.47 และเมื่อให้น้ำหนักต่อไปจนถึงค่าประมาณ 11.5 ตัน จะสังเกตพบรอยแตกร้าวเกิดขึ้นบริเวณจุดรองรับเป็นแนวยาวจากจุดรองรับจนถึงผิวส่วนบนของคานตัวอย่าง RF8 (บริเวณที่ถูกตรึงในรูปที่ 5.49 (ข)) รอยแตกร้าวดังกล่าวเกิดจากผิวสัมผัส



รูปที่ 5.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RF8

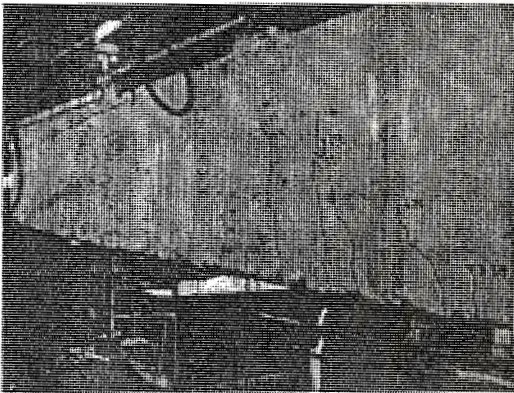
บริเวณจอร์จรับของคานตัวอย่าง RF8 ไม่เรียบ เนื่องมาจากการขัดผิวด้านเพื่อติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ทำให้คานตัวอย่าง RF8 เกิดการบิดตัวเมื่อน้ำหนักกระทำจึงเป็นเหตุให้เกิดรอยแตกร้าวดังกล่าว และเมื่อให้น้ำหนักกระทำต่อจนมีค่าประมาณ 12.8 ตัน พบรอยแตกร้าวเกิดขึ้นที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน เอียงทำมุมประมาณ 45 องศา และมีความยาวประมาณ 30 ซม. บริเวณที่ถูกครีซีในรูปที่ 5.50 (ก) ที่น้ำหนักนี้ได้ยินเสียงคอนกรีตแตกร้าวอย่างชัดเจน ซึ่งรอยแตกร้าวบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจะมีความกว้างมากขึ้นตามน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้นและมีความกว้างมากกว่าส่วนอื่น ๆ อย่างชัดเจน ในขณะที่รอยแตกร้าวบริเวณใต้จุดที่ให้น้ำหนักกระทำไม่มีการขยายตัว และเมื่อให้น้ำหนักกระทำต่อพบว่ารอยแตกร้าวที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเริ่มมีทิศทางตามแนวนอนและมีความยาวเพิ่มขึ้น จนกระทั่งที่น้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 15.0 ตัน คานจึงเกิดการวิบัติ (คงค้ำน้ำหนักกระทำไว้) จากแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนหลุดลอกออกอย่างทันทีทันใด (debonded failure) ดังรูปที่ 5.50 (ข) ทำให้น้ำหนักกระทำตกลงมาอยู่ที่ประมาณ 8.4 ตัน โดยค่าการโก่งตัวสูงสุดก่อนการวิบัติมีค่า 10.3 มม. ดังแสดงในรูปที่ 5.47

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.48 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัด ณ ตำแหน่งที่ 1 4 และ 5 ของคานตัวอย่าง RF8 (คานตัวอย่าง RF8 ทำการติดมาตรวัดค่าความเครียดเพียง 3 ตำแหน่งคือ ที่ผิวเหล็กเสริมรับแรงดึงบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ที่ผิวเหล็กเสริมรับแรงดึงบริเวณกึ่งกลางคาน และที่ผิวเหล็กเสริมรับแรงอัดบริเวณกึ่งกลางคาน) พบว่าเหล็กเสริมรับแรงดึงเกิดการครากที่น้ำหนัก 12.3 ตัน โดยสังเกตได้จาก

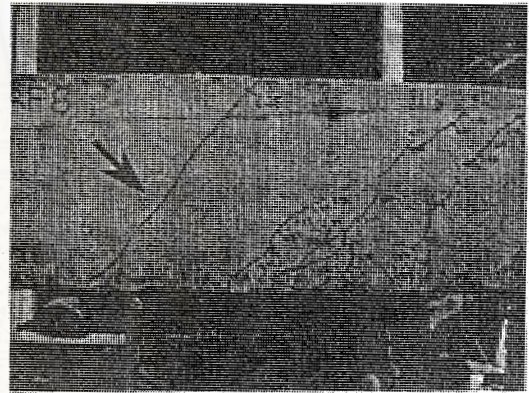


รูปที่ 5.48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RF8

ณ น้ำหนักกระทำดังกล่าวเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดที่ 4 มีการเปลี่ยนค่าความชันอย่างชัดเจน และค่าความเครียดที่วัดได้ ณ จุดเปลี่ยนค่าความชันมีค่าเท่ากับค่าความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริม (ประมาณ 2,500 ไมโคร) ซึ่งเมื่อกลับไปพิจารณารูปที่ 5.47 พบว่าที่น้ำหนักกระทำประมาณ 12.3 ตัน เส้นความสัมพันธ์มีการเปลี่ยนค่าความชันจริง โดยสามารถแบ่งเส้นความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัว ณ จุดกึ่งกลางคานออกได้เป็นส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 5.47 และเมื่อพิจารณาเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 1 พบว่าลักษณะของเส้นความสัมพันธ์ ยังคงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนเหมือนคานตัวอย่าง RF1 ดังแสดงในรูปที่ 5.48 โดยมีจุดเปลี่ยนค่าความชันที่ประมาณ 12.9 ตัน ในขณะที่เส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 5 จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีค่าติดลบ เนื่องจากมาตรวัดความเครียดที่ 5 ทำการติดตั้งบนผิวของเหล็กเสริมรับแรงอัด

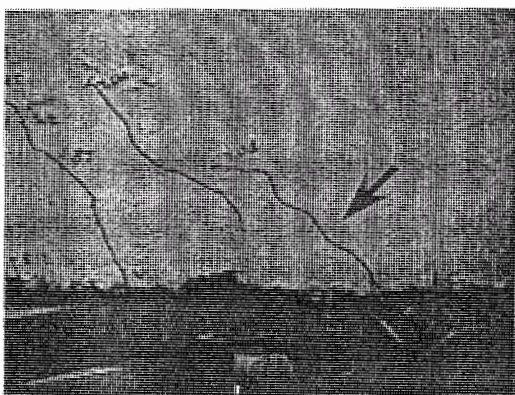


(ก) แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นก่อนเกิดการวิบัติ



(ข) แสดงรอยแตกร้าวเนื่องจากผิวสัมผัส บริเวณจุดรองรับ ไม่เรียบ

รูปที่ 5.49 แสดงสภาพของคานตัวอย่าง RF8 ก่อนเกิดการวิบัติ



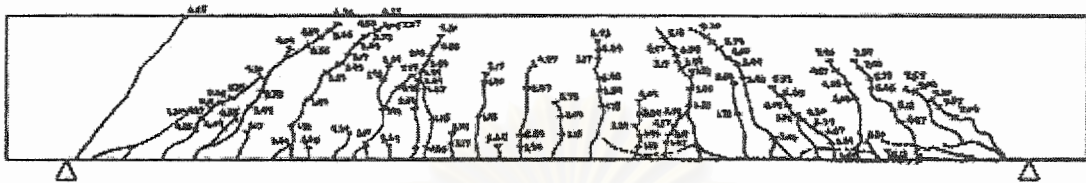
(ก) แสดงรอยแตกร้าวบริเวณปลายแถบ พลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน



(ข) แสดงลักษณะการวิบัติ

รูปที่ 5.50 แสดงลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่าง RF8

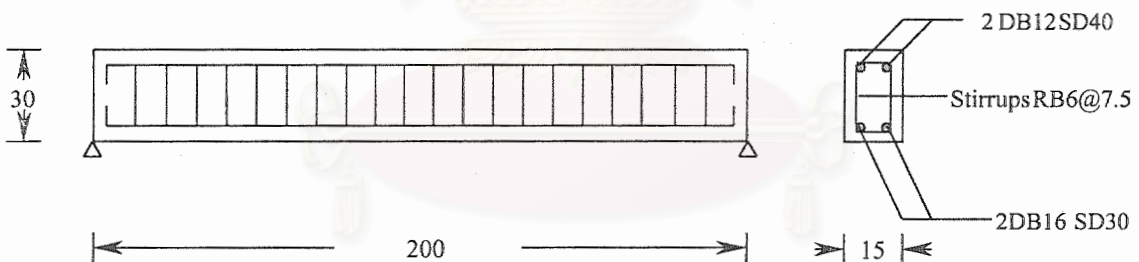
และเมื่อพิจารณารอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF8 ภายหลังจากการวิบัติพบว่ารอยแตกร้าวเกิดขึ้นเฉพาะในช่วงที่ติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน และมีลักษณะเหมือนกับรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF1 คือ จะมีขนาดเล็ก แคบ และมีกระจายตัวสูง โดยลักษณะรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF8 ทั้งคานแสดงดังรูปที่ 5.51



รูปที่ 5.51 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวของคาน RF8

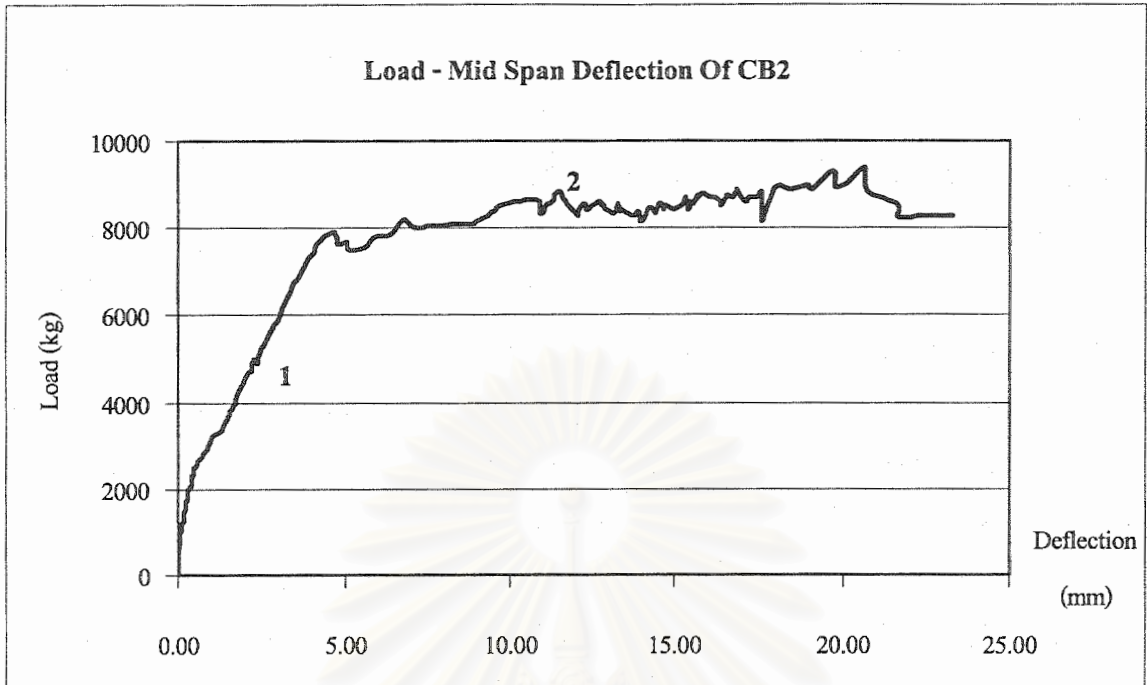
5.10 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง CB2

คานตัวอย่าง CB2 เป็นคานควบคุมอีกตัวหนึ่ง (controlled beam) ที่ใช้เปรียบเทียบผลของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก มีลักษณะเป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดาที่ไม่ติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน โดยจะมีลักษณะการเสริมเหล็กเสริมต่างๆดังรูปที่ 5.52



รูปที่ 5.52 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กของคาน CB2

จากการทดสอบพบว่าเมื่อนำน้ำหนักกระทำกับคานตัวอย่าง CB2 จนน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 2.6 ตัน คานตัวอย่าง CB2 จะเริ่มเกิดรอยแตกร้าวแรก (cracking state) บริเวณท้องคานใต้จุดที่น้ำหนักกระทำซึ่งเป็นจุดที่มีอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์คดและค่าแรงเฉือนสูงสุด โดยลักษณะรอยแตกร้าวทั้งหมดจะอยู่ในแนวตั้ง ซึ่งเป็นรอยแตกร้าวที่เกิดจากแรงคด (flexural crack) รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นนี้จะขยายตัวและเพิ่มจำนวนขึ้นตามน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวมีลักษณะเป็นเชิงเส้นตรงดังส่วนที่ 1 ในรูปที่ 5.53 (รูปที่ 5.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง CB2 ที่ยังไม่ถึงจุดวิบัติ เนื่องจากมีความจำเป็นต้องถอดเครื่องวัดค่าการโก่งตัวออกก่อนที่จะทดสอบเสร็จสิ้น ซึ่ง

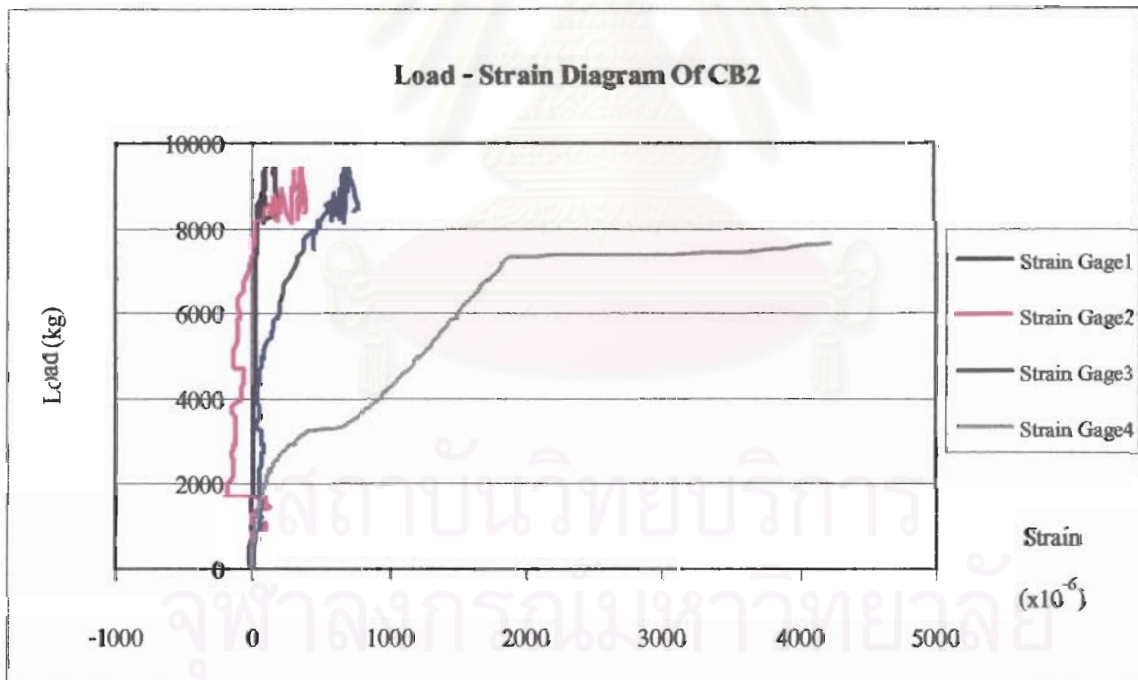


รูปที่ 5.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน CB2

ภายหลังจากถอดเครื่องวัดค่าการโก่งได้ทำการติดตั้งเกจวัดค่าการโก่งตัวเข้าไปแทน (dial gage) จนเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 8.0 ตัน พบว่าน้ำหนักกระทำที่ให้แก่คานตัวอย่าง CB2 จะไม่เพิ่มขึ้นอีกและเริ่มมีค่าคงตัวในขณะที่ค่าการโก่งตัวของคานยังเพิ่มขึ้นอยู่เรื่อยๆ และเมื่อพิจารณารูปที่ 5.53 พบว่าที่น้ำหนักกระทำนี้ เส้นความสัมพันธ์มีการเปลี่ยนค่าความชัน (เส้นความสัมพันธ์เปลี่ยนไปอยู่ในแนวราบ) ณ จุดนี้จึงเป็นจุดที่เหล็กเสริมรับแรงถึงจุดคราก (yielding state) ในช่วงนี้คานตัวอย่าง CB2 ยังคงสามารถรับน้ำหนักกระทำได้โดยค่าน้ำหนักกระทำมากที่สุดที่คานรับได้คือ 9.4 ตัน และเมื่อให้น้ำหนักกระทำต่อ (น้ำหนักกระทำมีค่าคงตัว) จนถึงค่าการโก่งตัวประมาณ 22.0 มม. คอนกรีตส่วนบนของคานตัวอย่างเกิดการยุบ (crushing state) อย่างชัดเจน ดังรูปที่ 5.55 (ข) แต่คานตัวอย่าง CB2 ยังคงสามารถรับน้ำหนักกระทำต่อได้ โดยน้ำหนักกระทำที่ให้จะตกลงเล็กน้อยมาอยู่ที่น้ำหนักประมาณ 8.4 ตัน สาเหตุที่คานตัวอย่าง CB2 ยังคงสามารถรับน้ำหนักกระทำต่อได้ เนื่องจากคอนกรีตส่วนที่มีการโอบรัดด้วยเหล็กปอกยังมีค่าความเครียดไม่ถึง 0.003 และเมื่อให้น้ำหนักกระทำจนถึงค่าโก่งตัวประมาณ 68.5 มม. (ในระหว่างนี้น้ำหนักกระทำจะอยู่ในช่วง 8.3 - 9.4 ตัน) คานตัวอย่าง CB2 จึงวิบัติโดยทรุดตัวลงทันที และน้ำหนักกระทำตกลงไปอยู่ที่ประมาณ 4.7 ตัน โดย ณ จุดวิบัติจะมีค่าการโก่งตัวถาวรประมาณ 75.0 มม. และมีน้ำหนักประลัยเท่ากับ 8.6 ตัน

เมื่อพิจารณารูปที่ 5.54 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียด (strain gage) ในตำแหน่งต่างๆของคานตัวอย่าง CB2 (คานตัวอย่าง CB2

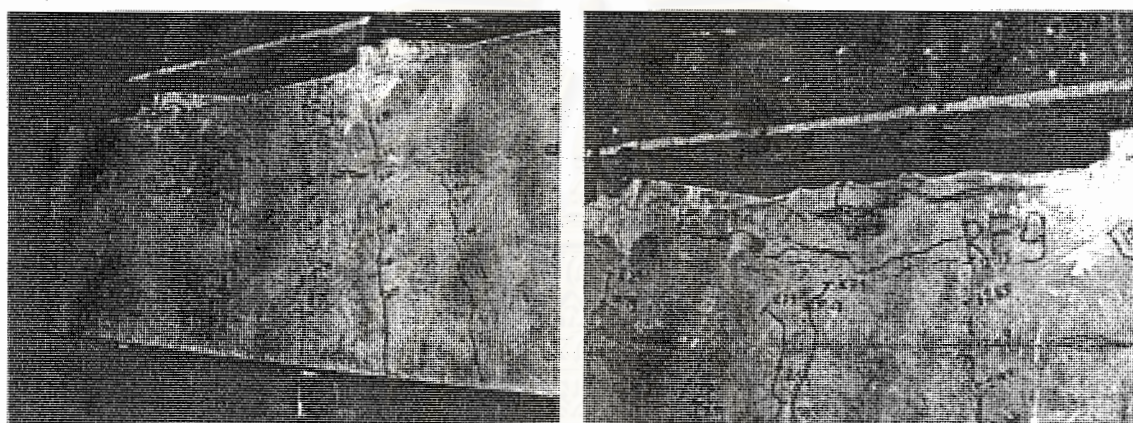
ทำการติมาตรวัดค่าความเครียดเพียง 4 ตำแหน่งคือ ตำแหน่งที่ 1 2 3 และ 4 ตามรูปที่ 4.3) พบว่า เหล็กเสริมรับแรงดึงเกิดการร้าวที่น้ำหนัก 7.3 ตัน สังเกตได้จากเส้นความสัมพันธ์ของมาตร วัด ที่ 4 มีการเปลี่ยนค่าความชันอย่างชัดเจนและค่าความเครียดที่วัดได้ ณ จุดเปลี่ยนค่าความชันมีค่าเท่ากับค่าความเครียดที่จุดร้าวของเหล็กเสริม (ประมาณ 1,800 ไมโคร) ซึ่งน้ำหนักกระทำที่จุดร้าวจากรูปที่ 5.54 สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากรูปที่ 5.53 ซึ่งแสดงให้เห็นการเปลี่ยนค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคานที่น้ำหนักกระทำประมาณ 8.0 ตัน และเมื่อพิจารณาเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 2 ที่น้ำหนักกระทำประมาณ 1.8 ตัน พบว่าเกิดความไม่ต่อเนื่องของข้อมูลเหมือนกับคานตัวอย่าง RF4 โดยเมื่อดูแนวโน้มของเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดที่ 2 พบว่าเส้นความสัมพันธ์ยังคงมีแนวโน้มในทิศทางเดิม เพียงแต่เกิดการเลื่อนตัว (shift) ของข้อมูลออกจากแนวเดิม ซึ่งอาจจะเกิดจากข้อผิดพลาดของเครื่องมือเก็บข้อมูล (data logger) ทำให้ค่าความเครียดที่วัดได้ผิดพลาดไป ถ้าพิจารณาข้ามความไม่ต่อเนื่องของข้อมูลไปจะพบว่า เส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 1 2 และ 3 จะมีลักษณะที่เหมือนกัน คือ มีค่าความเครียดที่วัดได้แกว่งอยู่ใกล้ค่าศูนย์คล้ายกับคานตัวอย่าง CB1.



รูปที่ 5.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน CB2

จากรูปที่ 5.56 ซึ่งแสดงภาพรังลักษณะรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง CB2 จะพบว่า ลักษณะรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นเป็นรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงคด (flexural crack) ทั้งหมด เนื่องจากคานตัวอย่าง CB2 มีการเสริมเหล็กถูกตั้งในปริมาณมาก (ตามการออกแบบสามารถรับแรงเฉือนได้

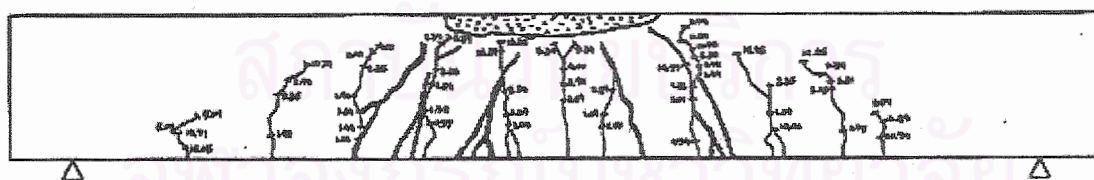
ถึง 15.2 ตัน) ซึ่งเป็นการออกแบบเพื่อกันการวิบัติจากแรงเฉือนในกรณีที่คานตัวอย่างมีการเสริมกำลังเรียบร้อยแล้ว เนื่องจากคานเสริมกำลังจะรับสามารถน้ำหนักประลัยได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงเฉือนที่คานตัวอย่างต้องรับมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณารอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง CB2 พบว่ารอยแตกร้าวมีขนาดใหญ่และมีจำนวนน้อย และกระจุกตัวอยู่ในช่วงระหว่างจุดให้น้ำหนักกระทำ (bending zone) ซึ่งเป็นลักษณะของรอยแตกร้าวที่ไม่ดี เนื่องจากรอยแตกร้าวที่กว้างจะทำให้เหล็กเสริมต่างๆมีโอกาสเกิดการกัดกร่อน (corrosion) ได้ง่าย อีกทั้งการกระจุกตัวของรอยแตกร้าวยังทำให้คานตัวอย่าง CB2 มีความสม่ำเสมอ (homogeneous) ตลอดตัวคานน้อยลง ส่งผลให้พฤติกรรมของคานตัวอย่างไม่สอดคล้องกับทฤษฎีที่ใช้วิเคราะห์หรือทำการออกแบบ



(ก) แสดงรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นก่อนเกิดการวิบัติบนคานตัวอย่าง CB2

(ข) แสดงการวิบัติบนคานตัวอย่าง CB2 เนื่องจากคอนกรีตถูกอัดแตก

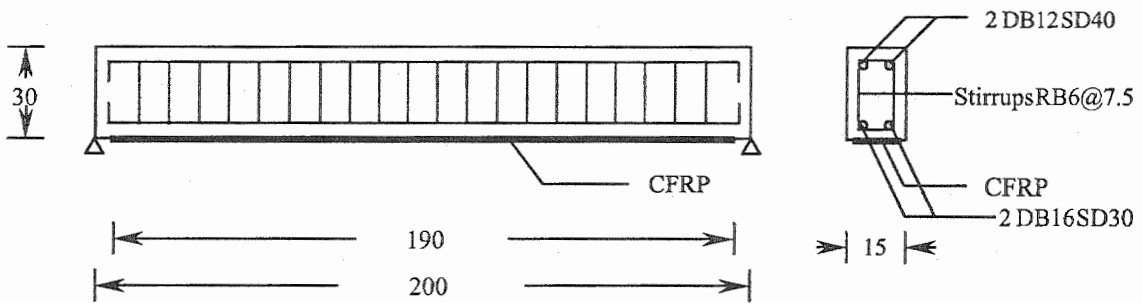
รูปที่ 5.55 แสดงสภาพของคานตัวอย่าง CB2 ทั้งก่อนและหลังการวิบัติ



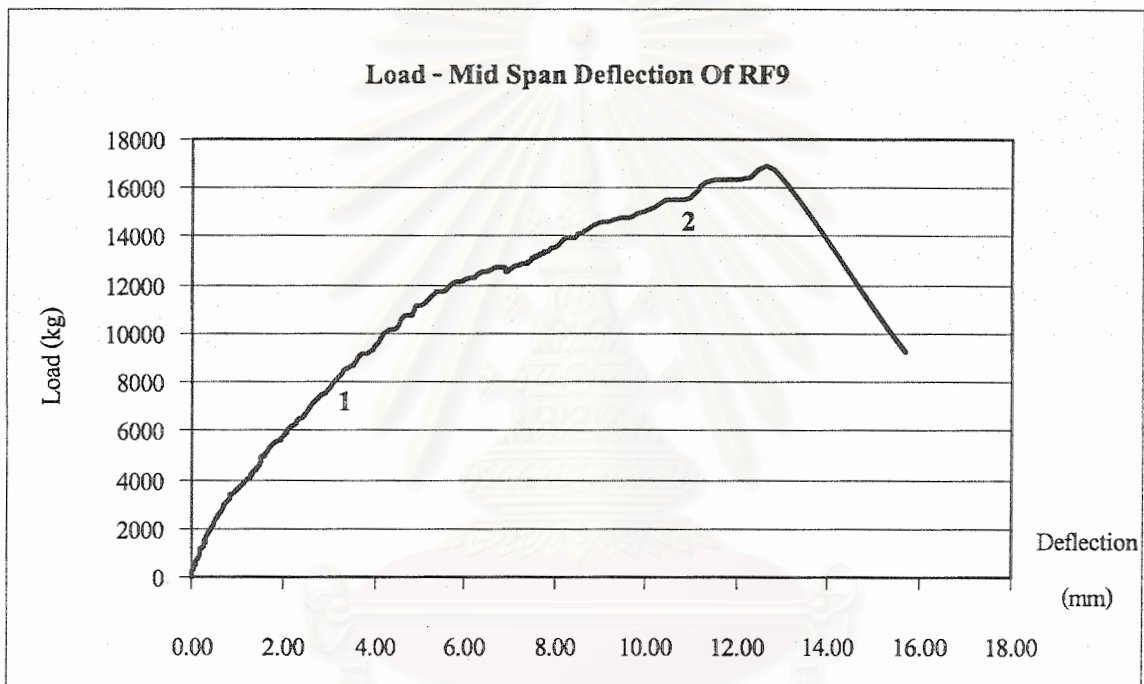
รูปที่ 5.56 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง CB2

5.11 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง RF9

คานตัวอย่าง RF9 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจำนวน 2 แผ่น ความยาวแผ่นละ 1.90 เมตร โดยคานดังกล่าวจะมีการเสริมเหล็กเสริมต่างๆ เหมือนกับคานตัวอย่าง CB2 และมีการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนดังรูปที่ 5.57



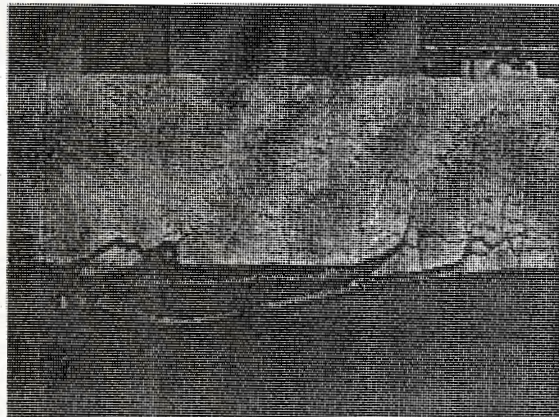
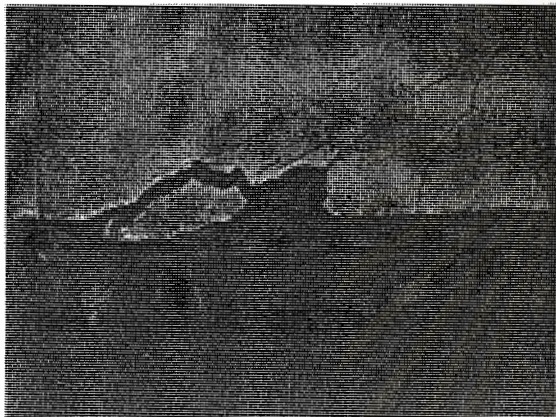
รูปที่ 5.57 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กและการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RF9



รูปที่ 5.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RF9

จากผลการทดสอบเมื่อนำน้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่าง RF9 จนน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 2.8 ตัน พบว่าคานตัวอย่าง RF9 เริ่มเกิดรอยแตกร้าวเล็กๆขึ้นบริเวณท้องคานใต้จุดที่น้ำหนักกระทำ โดยรอยแตกร้าวจะทอดตัวอยู่ในแนวคิ่ง ซึ่งเป็นลักษณะของรอยแตกร้าวที่เกิดจากแรงคัต รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจะขยายตัวและเพิ่มจำนวนตามน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้นตลอดการทดสอบ จนเมื่อนำน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 4.5 ตัน รอยแตกร้าวจะเริ่มกระจายเข้าสู่ช่วงระยะ 75 ซม. จากจุดรองรับ (shear zone) รอยแตกร้าวในบริเวณนี้มีลักษณะเฉียงทำมุมประมาณ 45 องศา กับแนวราบ ในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวเป็นเชิงเส้นตรง ดังส่วนที่ 1 ในรูปที่ 5.58 และเมื่อนำน้ำหนักต่อจนกระทั่งน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 15.5 ตัน คานตัวอย่าง RF9 เกิดเสียงคอนกรีตลั่นและตรวจพบรอยแตกร้าวที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน โดย

รอยแตกร้าวดังกล่าวจะขยายตัวสูงขึ้นเรื่อยๆตามน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้นจนถึงบริเวณแนวเหล็กเสริมรับแรงดึง รอยแตกร้าวจึงเริ่มเอนตัวลงตามแนวเหล็กเสริม และเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่า 16.8 ตันกานตัวอย่าง RF9 เกิดการวิบัติจากแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเกิดการหลุดลอกออกอย่างทันทีทันใด ทำให้น้ำหนักกระทำที่วัดได้ตกลงมาอยู่ที่ 9.3 ตัน โดยค่าการโก่งตัวสูงสุดก่อนการวิบัติมีค่า 12.8 มม. ซึ่งลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่าง RF9 เป็นแบบเฉพาะที่ (local failure) ที่เกิดจากการหลุดลอกของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (debonded failure) ดังแสดงในรูปที่ 5.59



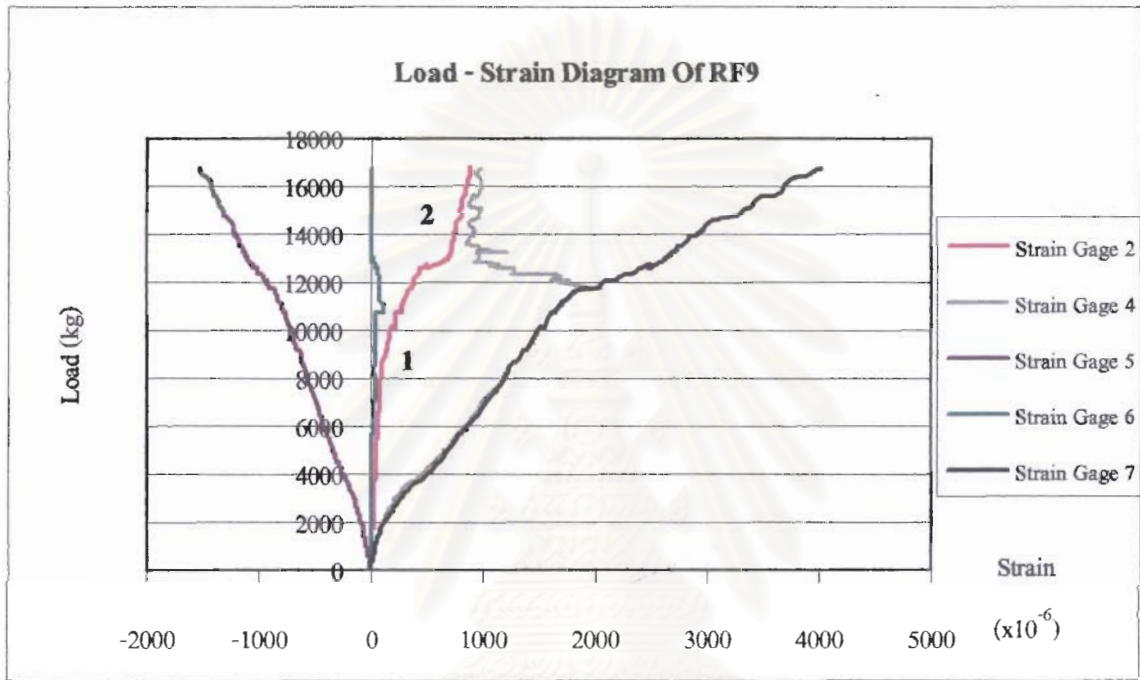
(ก)

(ข)

รูปที่ 5.59 แสดงลักษณะการวิบัติของคาน RF9

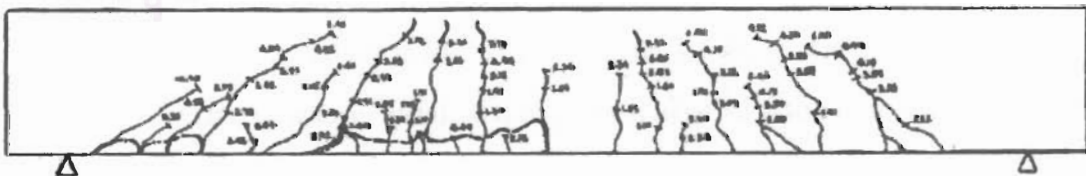
เมื่อพิจารณารูปที่ 5.60 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียด (strain gage) ในตำแหน่งต่างๆของคานตัวอย่าง RF9 (คานตัวอย่าง RF9 ทำการติดมาตรวัดค่าความเครียดทั้งหมด 7 ตำแหน่งตามรูปที่ 4.3 แต่มาตรวัดความเครียดใช้การไม่ได้ 2 ตำแหน่งคือ ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 3) พบว่าเหล็กเสริมรับแรงดึงเกิดการร้าวที่น้ำหนักกระทำประมาณ 11.7 ตัน สังเกตได้จากเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดที่ 4 มีการเปลี่ยนค่าความชันอย่างชัดเจน และค่าความเครียดที่วัดได้ ณ จุดเปลี่ยนค่าความชันมีค่าเท่ากับค่าความเครียดที่จุดร้าวของเหล็กเสริม (ประมาณ 1,800 ไมโคร) ซึ่งน้ำหนักกระทำที่จุดร้าวจากรูปที่ 5.60 สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากรูปที่ 5.58 ที่แสดงให้เห็นการเปลี่ยนค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคานที่น้ำหนักกระทำประมาณ 11.7 ตัน ถึงแม้การเปลี่ยนแปลงค่าความชันจะสังเกตเห็นไม่ชัดเจนก็ตาม และเมื่อพิจารณาเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 2 พบว่าลักษณะของเส้นความสัมพันธ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ 1 ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรง และส่วนที่ 2 ที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 5.60 โดยเส้นความสัมพันธ์จากมาตรวัดที่ 2 จะมีจุดเปลี่ยนค่าความชันที่ประมาณ 12.6 ตัน ในขณะที่เส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 5 จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีค่าติดลบ เนื่องจากมาตรวัดความเครียด

ที่ 5 ทำการติดตั้งบนผิวของคอนกรีตส่วนบนบริเวณกึ่งกลางของคานตัวอย่าง และในส่วนของมาตรวัดที่ 6 ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ผิวบริเวณปลายสุดของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน พบว่าความเครียดที่วัดได้มีค่าแกว่งตัวอยู่ใกล้ศูนย์จนกระทั่งเกิดการวิบัติ ในขณะที่มาตรวัดที่ 7 ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ผิวของพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนบริเวณกึ่งกลางคานตัวอย่าง มีค่าความเครียดที่ใกล้เคียงค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดที่ 4



รูปที่ 5.60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RF9

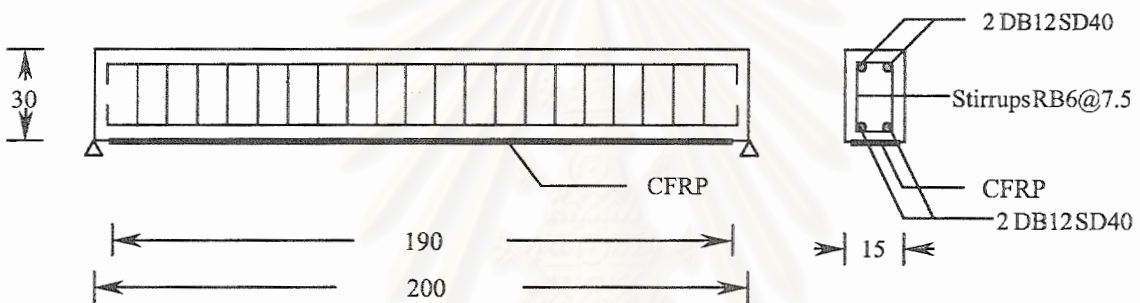
เมื่อพิจารณารอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF9 ภายหลังจากการวิบัติ พบว่าลักษณะรอยแตกร้าวจะเหมือนกับรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF1 คือ จะมีขนาดเล็ก แคบ และกระจายตัวมากกว่าคานตัวอย่าง CBI ลักษณะรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF9 ทั้งคานแสดงดังรูปที่ 5.61



รูปที่ 5.61 แสดงภาพรังลักษณะรอยแตกร้าวของคาน RF9

5.12 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง RP1

คานตัวอย่าง RP1 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ศึกษาเกี่ยวกับการซ่อมแซมด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน โดยคานตัวอย่าง RP1 จะถูกให้น้ำหนักกระทำจนมีค่าการโก่งตัวประมาณ 8.0 มม. ก่อนทำการซ่อมแซม (preloading) เนื่องจากที่ค่าการโก่งตัวประมาณ 8.0 มม. เหล็กเสริมรับแรงดึงจะถึงจุดคราก ซึ่งเป็นไปตามลักษณะการซ่อมแซมจริงที่จะใช้แผ่นรับแรงดึงภายนอกในกรณีที่ต้องค่าการรับน้ำหนักกระทำมากกว่าหรือน้อยกว่าน้ำหนักกระทำที่จุดครากเล็กน้อย และที่ค่าการโก่งตัวนี้รอยแตกร้าวของคานตัวอย่างมีขนาดใหญ่พอที่จะสังเกตเห็น อีกทั้งรอยแตกร้าวยังกว้างพอที่จะฉีดวัสดุประสาน (epoxy injection) เข้าไปซ่อมแซมได้ (แต่คานตัวอย่าง RP1 จะไม่มีการฉีดวัสดุประสาน (epoxy injection)) อนึ่งคานตัวอย่าง RP1 จะมีการเสริมเหล็กเสริมต่างๆและทำการซ่อมแซมด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนดังแสดงในรูปที่ 5.62



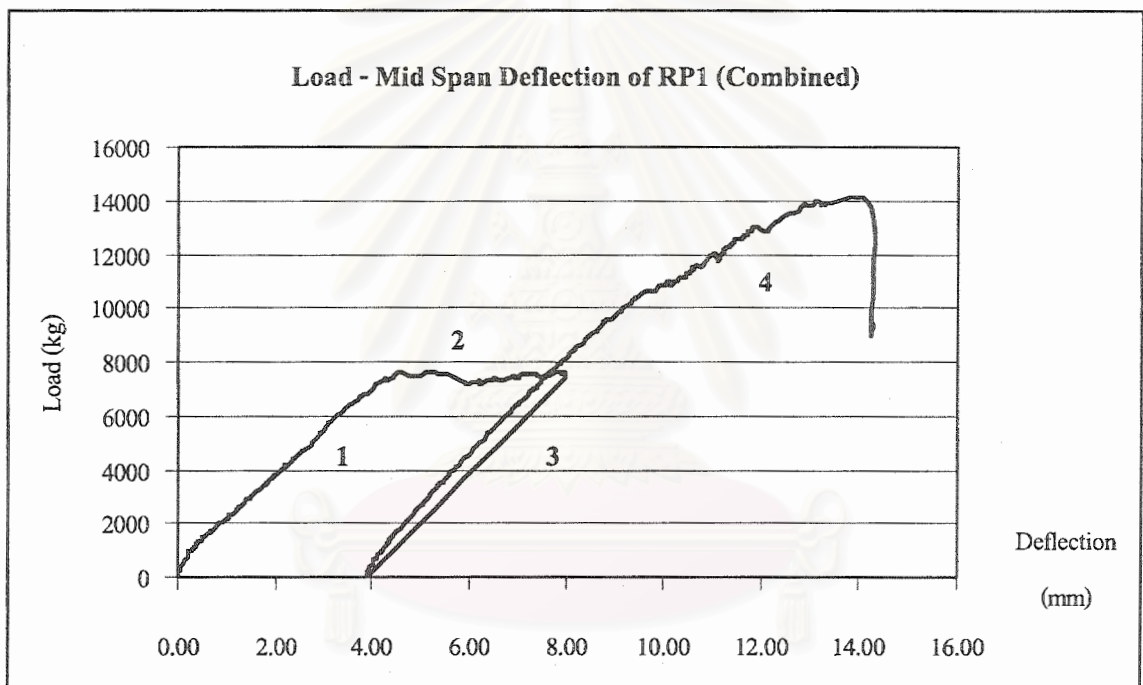
รูปที่ 5.62 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กและการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RP1

การให้น้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่าง RP1 สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงคือ การให้น้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่างก่อนการซ่อมแซม (preloading) และการให้น้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่างภายหลังการซ่อมแซมด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

5.12.1 การให้น้ำหนักกระทำก่อนการซ่อมแซม (preloading)

เมื่อคานตัวอย่าง RP1 บ่มขึ้นจนมีอายุประมาณ 28 วันและขัดผิวหน้าบริเวณใต้ท้องคานตัวอย่างในส่วนที่จะติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนแล้ว จึงให้น้ำหนักกระทำก่อนการซ่อมแซม ซึ่งพฤติกรรมของคานตัวอย่าง RP1 ในช่วงนี้จะคล้ายกับพฤติกรรมของคานตัวอย่าง CB1 กล่าวคือ เมื่อให้น้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่าง RP1 จนมีค่าประมาณ 1.3 ตัน พบว่าคานตัวอย่าง RP1 จะเริ่มเกิดรอยแตกร้าวแรก (cracking state) บริเวณท้องคานใต้จุดที่น้ำหนักกระทำซึ่งเป็นจุดที่มีอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ดัดและค่าแรงเฉือนสูงสุด โดยลักษณะรอยแตกทั้งหมดจะอยู่ในแนวตั้งและเป็นรอยแตกร้าวที่เกิดจากแรงดัด (flexural crack) รอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RP1 จะขยายตัวและเพิ่มจำนวนขึ้นตามน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้น ในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวเป็นเชิงเส้นตรงดังส่วนที่ 1 ในรูปที่ 5.63 เมื่อให้น้ำหนักกระทำต่อจนมีค่าประมาณ

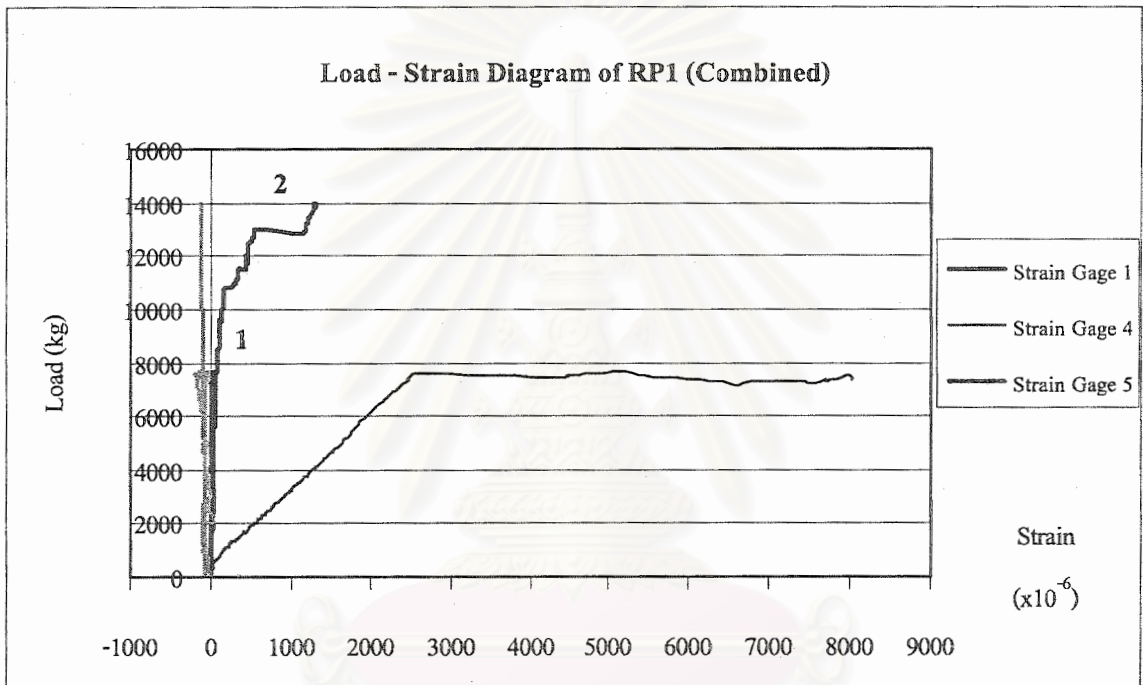
2.6 ตัน พบว่าเริ่มเกิดรอยแตกร้าวในช่วงระยะ 75 ซม. จากจุดรองรับ (shear zone) และเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 7.6 ตัน พบว่าน้ำหนักกระทำที่ให้แก่คานตัวอย่าง RP1 เริ่มมีค่าคงตัวในขณะที่ค่าการโก่งตัวของคานยังเพิ่มขึ้นอยู่เรื่อยๆ ซึ่งเมื่อพิจารณารูปที่ 5.63 พบว่าที่น้ำหนักกระทำดังกล่าว เส้นความสัมพันธ์มีการเปลี่ยนค่าความชัน ทำให้เส้นความสัมพันธ์เปลี่ยนไปอยู่ในแนวราบ ดังแสดงในส่วนของ 2 ในรูปที่ 5.63 ณ ค่าน้ำหนักกระทำนี้จึงเป็นจุดที่เหล็กเสริมรับแรงถึงถึงจุดคราก (yielding state) ภายหลังจากจุดครากคานตัวอย่าง RP1 ยังคงสามารถรับน้ำหนักกระทำได้โดยค่าน้ำหนักมากที่สุดที่คานรับได้คือ 7.7 ตัน จนกระทั่งเมื่อค่าการโก่งตัวประมาณ 8.0 มม. จึงลดน้ำหนักกระทำลงจนมีค่าเป็นศูนย์ โดยยังคงเก็บข้อมูลค่าการโก่งตัวไว้เพื่อสังเกตค่าการโก่งตัวคงค้าง ซึ่งก็พบว่าค่าการโก่งตัวคงค้างมีค่าประมาณ 3.9 มม.



รูปที่ 5.63 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RP1

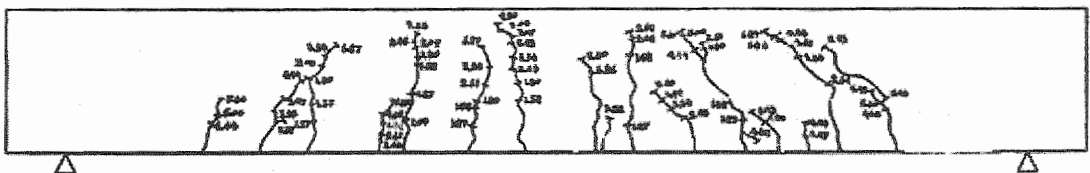
และเมื่อพิจารณารูปที่ 5.64 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียด (strain gage) ในตำแหน่งต่างๆของคานตัวอย่าง RP1 ทั้งก่อนและหลังการซ่อมแซม (คานตัวอย่าง RP1 ทำการติดมาตรวัดค่าความเครียดเพียง 3 ตำแหน่งคือ ตำแหน่งที่ 1 4 และ 5 ตามรูปที่ 4.3) พบว่าเหล็กเสริมรับแรงถึงเกิดการครากที่น้ำหนัก 7.6 ตัน สังเกตได้จากเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดที่ 4 มีการเปลี่ยนค่าความชันอย่างชัดเจน และค่าความเครียดที่วัดได้ ณ จุดเปลี่ยนค่าความชันมีค่าเท่ากับค่าความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริม (ประมาณ 2,500 ไมโคร) ซึ่งน้ำหนักที่จุดครากของรูปที่ 5.64 สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากรูปที่ 5.63 ซึ่งแสดงให้เห็นการเปลี่ยนค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลาง

คานที่น้ำหนักกระทำประมาณ 7.6 ตัน และเมื่อพิจารณาเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 1 พบว่าในช่วงให้น้ำหนักกระทำก่อนการซ่อมแซม ค่าความเครียดที่วัดได้จะมีค่าแกว่งอยู่ใกล้ศูนย์และมีค่าความชันเพียงค่าเดียว ในขณะที่เส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 5 จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีค่าติดลบเหมือนกับคานตัวอย่างอื่นๆ และเมื่อลดน้ำหนักกระทำลงจนมีค่าเป็นศูนย์พบว่าค่าความเครียดของมาตรวัดที่ 1 และ ที่ 5 จะลดลงมาแนวเส้นความสัมพันธ์เดิมจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ แต่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์เนื่องจากเกิดความเค้นคงค้าง (residual stress) ในเนื้อเหล็กเสริม



รูปที่ 5.64 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RP1 ทั้งก่อนและหลังการซ่อมแซม

เมื่อพิจารณารอยแตกร้าวในช่วงการให้น้ำหนักก่อนการซ่อมแซม พบว่ารอยแตกร้าวจะมีขนาดใหญ่และมีการกระจุกคล้ายกับรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่าง CB1 โดยรอยแตกร้าวจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.65



รูปที่ 5.65 แสดงภาพรังลักษณะรอยแตกร้าวก่อนการซ่อมแซมของคาน RP1

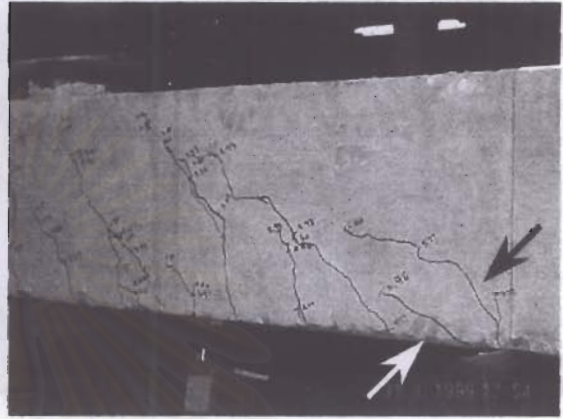
5.12.2 การให้น้ำหนักกระทำภายหลังการซ่อมแซม

เมื่อนำคานตัวอย่าง PR1 ไปติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนและทำการบ่มแห้งในอากาศจนมีวัสดุประสานที่ใช้ยึดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนกับเนื้อคอนกรีตมีอายุประมาณ 7 วันแล้ว จึงนำมาทดสอบอีกครั้ง โดยให้น้ำหนักกระทำในลักษณะเดิม ซึ่งจากการทดสอบพบว่าในช่วงแรกที่ให้น้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่าง RP1 รอยแตกร้าวเดิมของคานตัวอย่างมีการขยายตัวกว้างขึ้น แต่ความยาวไม่เพิ่มขึ้น โดยจากการสังเกตพบว่ารอยแตกร้าวในช่วงแรกของการให้น้ำหนักกระทำภายหลังการซ่อมแซมจะเกิดขึ้นจากการขยายตัวของรอยแตกร้าวเดิม จนกระทั่งน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 4.5 ตัน รอยแตกร้าวใหม่จึงเริ่มปรากฏบริเวณใต้จุดให้น้ำหนักกระทำ (บริเวณลูกศรชี้ในรูปที่ 5.66 (ก)) ซึ่งจากการสังเกตพบว่ารอยแตกร้าวใหม่เกือบทั้งหมดจะเกิดอยู่ในช่วง 75 ซม. จากจุดรองรับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณใกล้ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (รอยแตกร้าวใหม่จะแสดงด้วยเส้นสีแดงในรูปที่ 5.68) และเมื่อให้น้ำหนักกระทำจนมีค่าประมาณ 10.6 ตัน สังเกตพบรอยแตกร้าวเกิดขึ้นจากจุดรองรับดังบริเวณที่ลูกศรสีดำชี้ในรูปที่ 5.66 (ข) ซึ่งลักษณะรอยแตกร้าวดังกล่าวอาจเกิดจากการขีดผิวหน้าของคานตัวอย่าง RP1 ทำให้ผิวสัมผัสระหว่างคานตัวอย่างกับจุดรองรับไม่แนบสนิทเต็มหน้าคาน จึงทำให้เกิดหน่วยแรงกด (bearing stress) สูงในบางจุดของผิวสัมผัสคาน ส่งผลให้บริเวณผิวสัมผัสนั้นเกิดการแตกร้าวขึ้น และเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 13.0 ตัน ได้ยินเสียงคอนกรีตลั่นพร้อมๆกับเกิดรอยแตกร้าวขึ้นบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน โดยรอยแตกร้าวดังกล่าวจะเกิดขึ้นในแนวเฉียงประมาณ 45 องศา แต่ปลายจะเอนลงตามแนวเหล็กเสริมรับแรงดึงดังบริเวณที่ลูกศรสีขาวชี้ในรูปที่ 5.66 (ข) และเมื่อให้น้ำหนักกระทำต่อจนมีค่าประมาณ 13.9 ตัน คานตัวอย่าง RP1 จึงเกิดการวิบัติจากการหลุดล่อนของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนอย่างทันทีทันใด (ลักษณะการวิบัติแสดงดังรูปที่ 5.67) ทำให้น้ำหนักกระทำตกลงมาอยู่ที่ประมาณ 9.0 ตัน ซึ่งค่าการโก่งตัวสูงสุด ณ จุดวิบัติมีค่าประมาณ 14.2 มม. ดังแสดงในส่วนที่ 4 ในรูปที่ 5.63

และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียด (strain gage) ในตำแหน่งต่างๆของคานตัวอย่าง RP1 ภายหลังการซ่อมแซม ดังรูปที่ 5.65 พบว่าเมื่อให้น้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่าง RP1 ค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดที่ 1 และที่ 5 จะเพิ่มขึ้นตามแนวเส้นความสัมพันธ์เดิม และมีค่าเพิ่มขึ้นมาน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้น โดยเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 2 สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ 1 ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรง และส่วนที่ 2 ที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง และมีจุดเปลี่ยนค่าความชันที่ประมาณ 10.8 ตัน ในขณะที่เส้นความสัมพันธ์จากมาตรวัดที่ 5 นั้นจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีค่าความชันเพียงค่าเดียว และค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดที่ 5 มีค่าคิดลบเหมือนกับคานตัวอย่างอื่นๆ ส่วนมาตรวัดที่ 4 นั้นในช่วงการให้น้ำหนักภายหลังการซ่อมแซมไม่สามารถใช้งานต่อได้อีก

จากรูปที่ 5.68 แสดงลักษณะรอยแตกร้าวทั้งก่อนและหลังการซ่อมแซมของคานตัวอย่าง

RPI พบว่าในช่วงก่อนการซ่อมแซมรอยแตกร้าวจะมีลักษณะเหมือนกับคานตัวอย่าง CB1 กล่าวคือมีขนาดใหญ่ และมีการกระจุกตัวอยู่ระหว่างจุดให้น้ำหนักกระทำ ส่วนรอยแตกร้าวภายหลังการซ่อมแซมพบว่าจะมีการกระจายตัวมากขึ้น แต่จำนวนจะไม่มากเหมือนที่เกิดขึ้นในคาน RF1 โดยรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นใหม่ส่วนใหญ่จะเกิดในช่วงระยะ 75 ซม. จากจุดรองรับ



(ก) แสดงรอยแตกร้าวในช่วงแรกของการทดสอบหลังการซ่อมแซม

(ข) แสดงรอยแตกร้าวที่จุดรองรับและปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

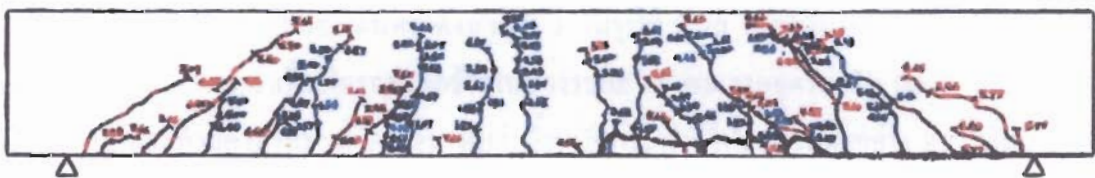
รูปที่ 5.66 แสดงสภาพคานตัวอย่าง RPI ก่อนเกิดการวิบัติ



(ก)

(ข)

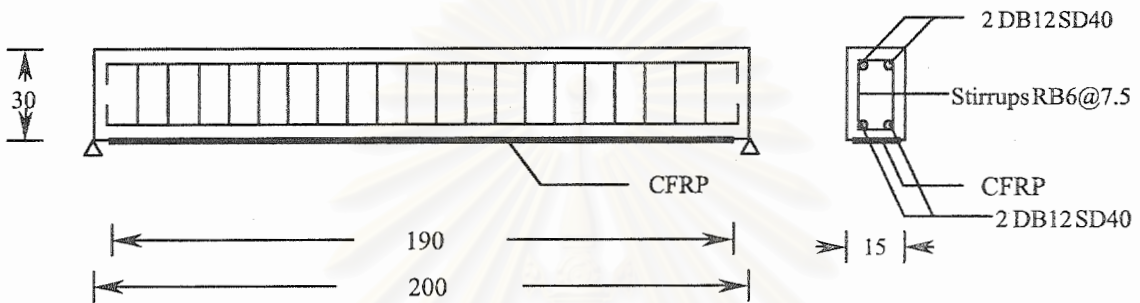
รูปที่ 5.67 แสดงลักษณะการวิบัติของคาน RPI



รูปที่ 5.68 แสดงภาพร่างรอยแตกร้าวทั้งก่อนและหลังการซ่อมแซมของคานตัวอย่าง RPI

5.13 ผลการทดสอบคานตัวอย่าง RP2

คานตัวอย่าง RP2 เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ศึกษาเกี่ยวกับการซ่อมแซมด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเหมือนกับคานตัวอย่าง RP1 แต่จะถูกให้น้ำหนักกระทำจนมีค่าการโก่งตัวประมาณ 10.0 มม. ก่อนทำการซ่อมแซม (preloading) เนื่องจากที่ค่าการโก่งตัวประมาณ 10.0 มม. รอยแตกร้าวจะมีความกว้างมากพอที่จะฉีดวัสดุประสาน (epoxy injection) เข้าไปซ่อมแซมได้ คานตัวอย่าง RP2 จะมีการเสริมเหล็กเสริมต่างๆและทำการซ่อมแซมด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนดังแสดงในรูปที่ 5.69



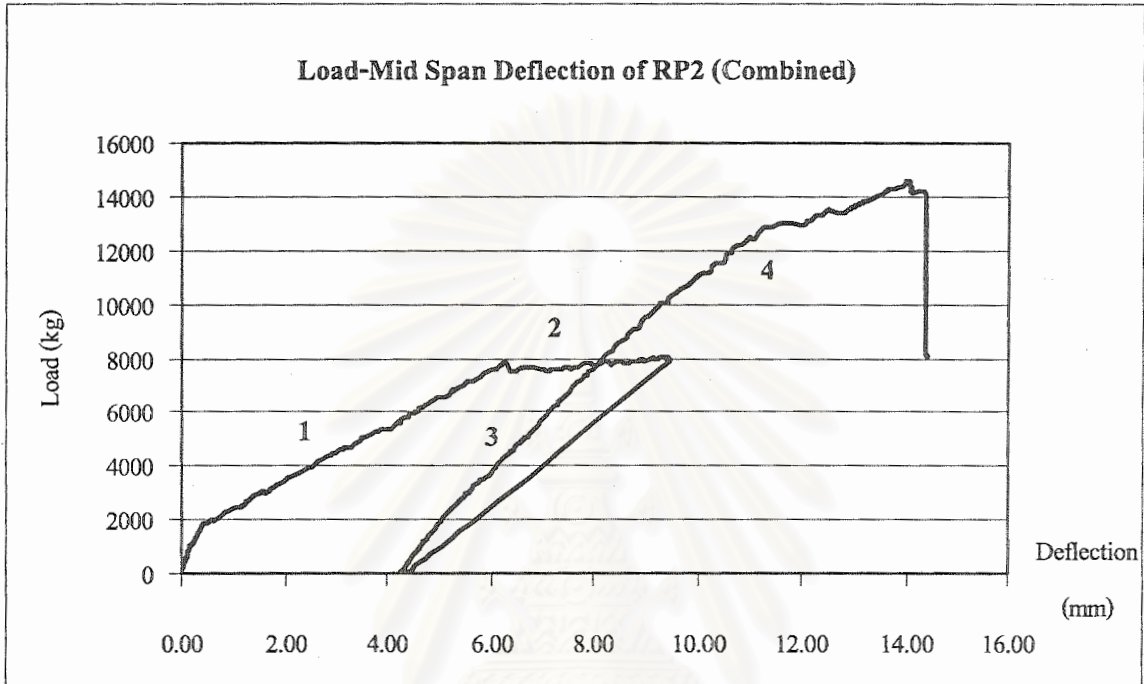
รูปที่ 5.69 แสดงลักษณะการเสริมเหล็กและการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนของคาน RP2

การให้น้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่าง RP2 สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงเหมือนกับคานตัวอย่าง RP1 คือ การให้น้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่างก่อนการซ่อมแซม (preloading) และการให้น้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่างภายหลังการซ่อมแซมด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

5.13.1 การให้น้ำหนักกระทำก่อนการซ่อมแซม (preloading)

เมื่อคานตัวอย่าง RP2 บ่มขึ้นจนมีอายุประมาณ 28 วันและขัดผิวหน้าบริเวณใต้ท้องคานตัวอย่างในส่วนที่จะติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนแล้ว จึงให้น้ำหนักกระทำก่อนการซ่อมแซม ซึ่งพฤติกรรมของคานตัวอย่าง RP2 ในช่วงนี้จะคล้ายกับพฤติกรรมของคานตัวอย่าง CB1 กล่าวคือ เมื่อให้น้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่าง RP2 จนมีค่าประมาณ 1.9 ตัน พบว่าคานตัวอย่าง RP2 จะเริ่มเกิดรอยแตกร้าวแรก (cracking state) บริเวณท้องคานใต้จุดที่น้ำหนักกระทำซึ่งเป็นจุดที่มีอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ดัดและค่าแรงเฉือนสูงสุด โดยลักษณะรอยแตกทั้งหมดจะอยู่ในแนวตั้ง ซึ่งเป็นลักษณะของรอยแตกร้าวที่เกิดจากแรงดัด (flexural crack) รอยแตกร้าวของคานตัวอย่างจะขยายตัวและเพิ่มจำนวนขึ้นตามน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้น ในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวเป็นเชิงเส้นตรงดังส่วนที่ 1 ในรูปที่ 5.70 เมื่อให้น้ำหนักกระทำต่อจนมีค่าประมาณ 3.0 ตัน พบว่าเริ่มเกิดรอยแตกร้าวในช่วงระยะ 75 ซม. จากจุดรองรับ (shear zone) และเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 7.8 ตัน พบว่าน้ำหนักกระทำที่ให้แก่คานตัวอย่าง RP2 เริ่มมีค่าคงตัวในขณะที่ค่าการโก่งตัวของคานยังเพิ่มขึ้นอยู่เรื่อยๆ ซึ่งเมื่อพิจารณารูปที่ 5.70 พบว่าที่น้ำหนักกระทำดังกล่าวเส้นความสัมพันธ์มีการเปลี่ยนค่าความชันทำให้เส้นความสัมพันธ์เปลี่ยนไปอยู่ใน

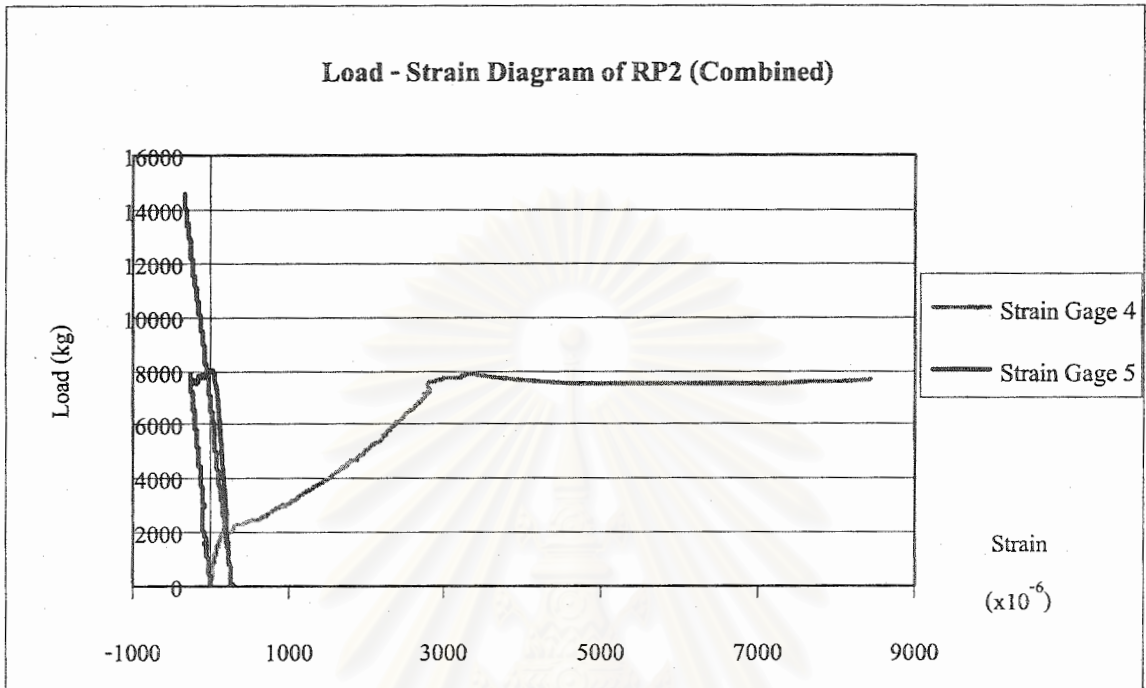
แนวราบ (ส่วนที่ 2 ในรูปที่ 5.70) ณ จุดนี้จึงเป็นจุดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดคราก (yielding state) ซึ่งในช่วงนี้คานตัวอย่าง RP2 ยังคงสามารถรับน้ำหนักกระทำได้ โดยค่าน้ำหนักมากที่สุดที่คานรับได้คือ 8.0 ตัน และเมื่อค่าการโก่งตัวประมาณ 9.5 มม. จึงลดน้ำหนักกระทำลงจนมีค่าเป็นศูนย์ โดยยังคงเก็บข้อมูลค่าการโก่งตัวไว้ ซึ่งพบว่าค่าการโก่งตัวคงค้างมีค่าประมาณ 4.3 มม.



รูปที่ 5.70 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน RP2

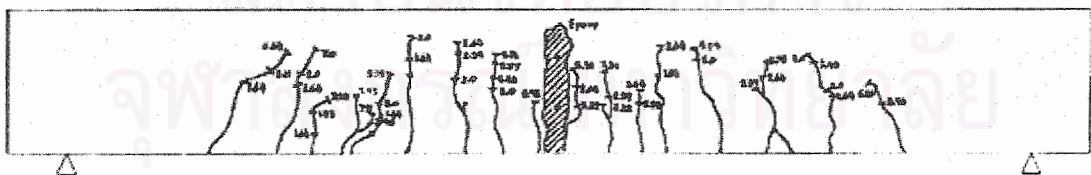
และเมื่อพิจารณารูปที่ 5.71 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียด (strain gage) ในตำแหน่งต่างๆของคานตัวอย่าง RP2 ทั้งก่อนและหลังการซ่อมแซม (คานตัวอย่าง RP2 ทำการติดมาตรวัดค่าความเครียดเพียง 3 ตำแหน่งคือ ตำแหน่งที่ 1 4 และ 5 ตามรูปที่ 4.3 แต่ใช้งานได้เพียง 2 ตำแหน่งคือ ตำแหน่งที่ 4 และตำแหน่งที่ 5) พบว่าเหล็กเสริมรับแรงดึงเกิดการครากที่น้ำหนัก 7.8 ตัน สังเกตได้จากเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดที่ 4 มีการเปลี่ยนค่าความชันอย่างชัดเจน และค่าความเครียดที่วัดได้ ณ จุดเปลี่ยนค่าความชันมีค่าเท่ากับค่าความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริม (ประมาณ 3,000 ไมโคร) ซึ่งน้ำหนักที่จุดครากของรูปที่ 5.71 สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากรูปที่ 5.70 ซึ่งแสดงให้เห็นการเปลี่ยนค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคานที่น้ำหนักกระทำประมาณ 7.7 ตัน ในขณะที่เส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดความเครียดที่ 5 จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีค่าติดลบเหมือนกับคานตัวอย่างอื่นๆ แต่จะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้น (มีค่าเป็นบวกมากขึ้น) ในช่วงท้ายๆของการให้น้ำหนัก ซึ่งเกิดจากรอยแตกร้าวของหน้าตัดยาวเกินระดับของเหล็กเสริมรับแรงอัดทำให้แกนสมมาตรของหน้าตัดขยับตัว จนทำให้เหล็กเสริมรับแรงอัดเปลี่ยนไปรับแรงดึงแทน และเมื่อ

ลดน้ำหนักกระทำลงจนมีค่าเป็นศูนย์ พบว่าค่าความเครียดจากมาตรวัดที่ 5 มีค่าลดลงตามค่าความ
 ชั้นเดิมแต่จะมีค่าความเค้นคงค้าง (residual stress) เป็นหน่วยแรงดึง (tensile stress)



รูปที่ 5.71 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆของคาน RP2
 ทั้งก่อนและหลังการซ่อมแซม

เมื่อพิจารณารอยแตกร้าวในช่วงการให้น้ำหนักก่อนการซ่อมแซม พบว่ารอยแตกร้าวจะมี
 ขนาดใหญ่และมีการกระจุกคล้ายกับรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่าง CB1 โดยรอยแตกร้าวจะ
 มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.72

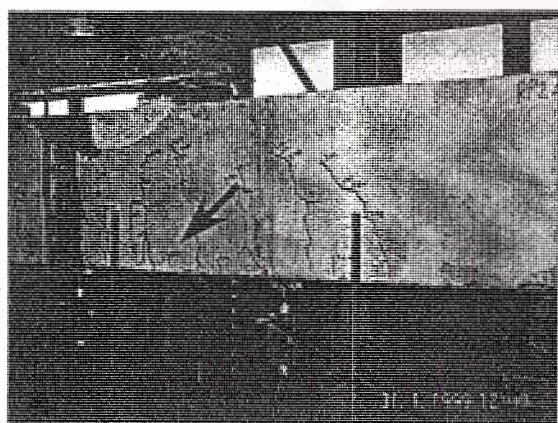


รูปที่ 5.72 แสดงภาพร่างลักษณะรอยแตกร้าวก่อนการซ่อมแซมของคาน RP2

5.13.2 การให้น้ำหนักกระทำภายหลังการซ่อมแซม

เมื่อนำคานตัวอย่าง PR2 ไปติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนและทำการบ่มแห้งใน
 อากาศจนมีวัสดุประสานที่ใช้ยึดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนกับเนื้อคอนกรีตมีอายุประมาณ

7 วันแล้ว จึงนำมาทดสอบอีกครั้งโดยให้น้ำหนักกระทำในลักษณะเดิม ซึ่งจากการทดสอบพบว่าในช่วงแรกที่ให้น้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่าง RP2 รอยแตกร้าวเดิมของคานตัวอย่างมีการขยายตัวกว้างขึ้น แต่ความยาวไม่เพิ่มขึ้น โดยจากการสังเกตพบว่ารอยแตกร้าวในช่วงแรกของการให้น้ำหนักกระทำภายหลังการซ่อมแซมจะเกิดขึ้นจากการขยายตัวของรอยแตกร้าวเดิม จนกระทั่งน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 4.6 ตัน รอยแตกร้าวใหม่จึงเริ่มปรากฏบริเวณใต้จุดให้น้ำหนักกระทำ (บริเวณลูกศรชี้ในรูปที่ 5.73 (ก)) ซึ่งจากการสังเกตพบว่ารอยแตกร้าวใหม่เกือบทั้งหมดจะเกิดอยู่ในช่วง 75 ซม. จากจุดรองรับ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณใกล้ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (รอยแตกร้าวใหม่จะแสดงด้วยเส้นสีแดงในรูปที่ 5.75) เมื่อน้ำหนักกระทำที่ให้แก่คานตัวอย่าง RP2 มีค่าประมาณ 13.0 ตัน ได้ยินเสียงคอนกรีตลั่นพร้อมๆ กับเกิดรอยแตกร้าวขึ้นบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน โดยรอยแตกร้าวดังกล่าวจะเกิดขึ้นในแนวเฉียงประมาณ 45 องศา แต่ปลายจะเอนลงตามแนวเหล็กเสริมรับแรงดึงบริเวณที่ลูกศรชี้ในรูปที่ 5.73 (ข) และเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 13.5 ตัน ได้ยินเสียงคอนกรีตลั่นอีกครั้งพร้อมกับเกิดรอยแตกร้าวขึ้นบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนอีกด้านหนึ่งของคาน จนกระทั่งน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 14.6 ตัน คานตัวอย่าง RP2 จึงเกิดการวิบัติจากการหลุดล่อนของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนอย่างทันทีทันใด ในขณะที่ยังคงค้างน้ำหนักกระทำอยู่ (ลักษณะการวิบัติแสดงดังรูปที่ 5.74) ทำให้น้ำหนักกระทำตกลงมาอยู่ที่ประมาณ 8.3 ตัน ซึ่งค่าการโก่งตัวสูงสุด ณ จุดวิบัติมีค่าประมาณ 14.4 มม. ดังแสดงในส่วนที่ 4 ในรูปที่ 5.70

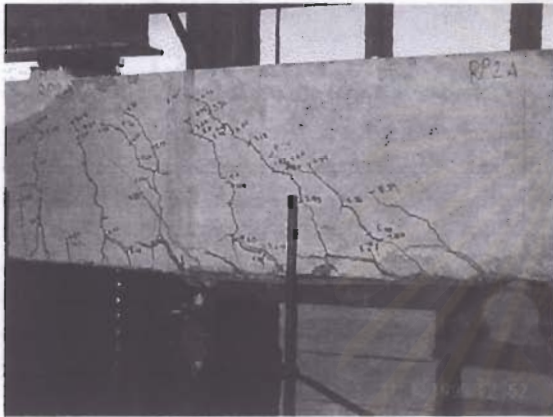


(ก) แสดงรอยแตกร้าวในช่วงแรกของการทดสอบ (ข) แสดงรอยแตกร้าวที่จุดรองรับและปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

รูปที่ 5.73 แสดงรอยแตกร้าวก่อนการวิบัติของคานตัวอย่าง RP2 ภายหลังการซ่อมแซม

และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียด (strain gage) ในตำแหน่งต่างๆของคานตัวอย่าง RP2 ภายหลังการซ่อมแซม ดังรูปที่

5.71 พบว่าเมื่อให้น้ำหนักกระทำแก่คานตัวอย่าง RP2 ค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดที่ 5 จะเพิ่มขึ้นตามแนวเส้นความสัมพันธ์เดิมที่ลดลงมา และมีค่าเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักกระทำที่เพิ่มขึ้น โดยเส้นความสัมพันธ์จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง มีค่าความชันเพียงค่าเดียว และมีแนวโน้มเป็นค่าติดลบ ต่างจากการให้น้ำหนักในช่วงก่อนการซ่อมแซม ซึ่งค่าความเครียดมีค่าเป็นบวกในช่วงท้ายของการให้น้ำหนัก ส่วนมาตรวัดที่ 4 นั้นในช่วงการให้น้ำหนักภายหลังการซ่อมแซมไม่สามารถใช้งานต่อได้อีก



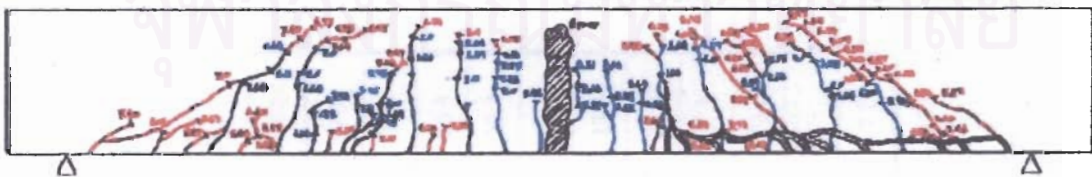
(ก)



(ข)

รูปที่ 5.74 แสดงลักษณะการวิบัติของคาน RP2

จากรูปที่ 5.75 แสดงลักษณะรอยแตกร้าวทั้งก่อนและหลังการซ่อมแซมของคานตัวอย่าง RP2 พบว่าในช่วงก่อนการซ่อมแซมรอยแตกร้าวจะมีลักษณะเหมือนกับคานตัวอย่าง CB1 กล่าวคือ มีขนาดใหญ่ และมีการกระจุกตัวอยู่ระหว่างจุดให้น้ำหนักกระทำ ส่วนรอยแตกร้าวภายหลังการซ่อมแซมพบว่าจะมีการกระจายตัวมากขึ้น แต่จำนวนจะไม่มากเหมือนที่เกิดขึ้นในคาน RF1 โดยรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นใหม่ส่วนใหญ่จะเกิดในช่วงระยะ 75 ซม. จากจุดรองรับ



รูปที่ 5.75 แสดงภาพร่างรอยแตกร้าวทั้งก่อนและหลังการซ่อมแซมของคานตัวอย่าง RP2

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าน้ำหนักกระทำที่ให้แก่คาน (appiled load) และค่าการโก่งตัว ณ จุดกึ่งกลางช่วงคาน (mid span deflection) ของคานตัวอย่างต่างๆ

คาน ตัวอย่าง	น้ำหนักกระทำที่ให้แก่คาน (appiled load)						ค่าการโก่งตัว ณ จุดกึ่งกลางช่วงคาน (mid span deflection)							
	จุดแตกร้าว		จุดคราก		จุดประลัย		จุดแตกร้าว		จุดคราก		จุดประลัย		ที่น้ำหนัก 7.5 ตัน	
	ตัน	ร้อยละ	ตัน	ร้อยละ	ตัน	ร้อยละ	มม.	อัตราส่วน	มม.	อัตราส่วน	มม.	อัตราส่วน	มม.	อัตราส่วน
CB1	2.2	0.0	8.0	0.0	8.0	0.0	0.4	1.0	5.9	1.0	74.2	1.0	5.1	1.0
RF1	2.7	22.7	12.5	56.3	15.3	91.3	0.8	1.9	6.5	1.1	9.8	0.2	3.2	0.6
RF2	3.0	36.4	13.6	70.0	16.7	108.8	0.7	1.6	7.6	1.3	12.5	0.2	3.7	0.7
RF3	2.7	22.7	13.7	71.3	21.3	166.3	0.8	2.0	8.3	1.4	18.4	0.2	3.8	0.7
RF4	2.8	27.3	-	-	12.1	51.3	0.7	1.6	-	-	7.1	0.1	3.5	0.7
RF5	2.5	13.6	-	-	11.3	41.3	0.8	1.8	-	-	6.8	0.1	4.1	0.8
RF6	2.8	27.3	-	-	12.6	57.5	0.8	1.9	-	-	7.0	0.1	3.2	0.6
RF7	2.8	27.3	10.5	31.3	11.6	45.0	0.6	1.4	6.3	1.1	8.3	0.1	4.1	0.8
RF8	2.5	13.6	12.3	53.8	15.0	87.5	0.7	1.6	6.8	1.2	10.3	0.1	3.5	0.7
CB2	2.6	-	7.3	-	8.6	-	0.6	1.0	4.0	1.0	68.5	1.0	4.1	1.0
RF9*	2.8	7.7	11.7	60.3	16.8	95.3	0.6	1.1	5.4	1.4	12.8	0.2	2.9	0.7
RP1	1.3	-40.9	7.6	-5.0	13.9	73.8	0.4	0.9	4.5	0.8	14.2	0.2	7.6	1.5
RP2	1.9	-13.6	7.8	-2.5	14.6	82.5	0.5	1.2	6.2	1.1	14.4	0.2	7.9	1.6

* ผลการทดสอบของคานตัวอย่าง RF9 จะถูกเปรียบเทียบกับคานตัวอย่าง CB2 ในขณะที่ผลทดสอบของคานตัวอย่างอื่นๆ จะถูกเปรียบเทียบกับคานตัวอย่าง CB1



บทที่ 6

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

เมื่อทำการทดสอบเสร็จสิ้น ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบทั้งน้ำหนักกระทำ ค่าการโก่งตัว และค่าความเครียด ณ จุดต่างๆที่จัดเก็บได้จากคานตัวอย่าง จะถูกนำมาจัดระเบียบและแปรผลของข้อมูลในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคาน (load - deflection relationship) และในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าความเครียดที่วัดได้ในตำแหน่งต่างๆของคานตัวอย่าง (load - strain diagram) ก่อนจะนำข้อมูลทีประมวลผลเรียบร้อยแล้วไปทำการวิเคราะห์ โดยในการวิเคราะห์ผลการทดสอบจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 7 หัวข้อหลักๆ ตามตัวแปรที่ได้กำหนดไว้ตามตารางที่ 4.6 ในหัวข้อที่ 4.2 ดังนี้

1. ผลของการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน
2. ผลของระยะการยึดปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน
3. ผลของความยาวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน
4. ผลของความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน
5. อัตราส่วนความหนาของชั้นกาวต่อความหนาของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน
6. ผลของขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง
7. ผลของการใช้วัสดุประสานก่อนการซ่อมแซมด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

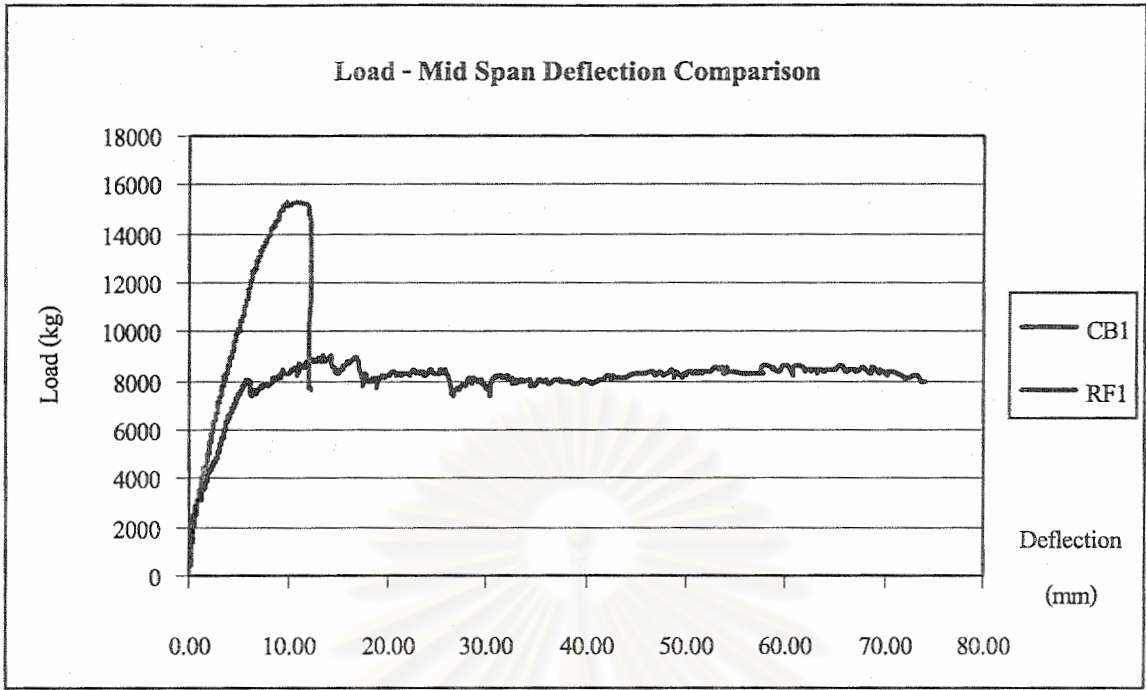
ซึ่งในบทวิเคราะห์จะกล่าวเปรียบเทียบถึงผลของตัวแปรที่มีต่อคานที่เสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณในรูปของ กำลังรับแรงดัดของคาน (flexural strength) ค่าการโก่งตัว (deflection) ลักษณะการวิบัติ (failure mode) ค่าความเหนียวของคาน (ductility) และค่าความเข้มข้นของหน่วยแรงที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (stress concentration at CFRP curtailment)

6.1 ผลของการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

ในการวิเคราะห์ผลของการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน จะนำข้อมูลการทดสอบของคานตัวอย่าง CB1 และ RF1 มาเปรียบเทียบกัน โดยจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นหัวข้อต่างๆดังนี้

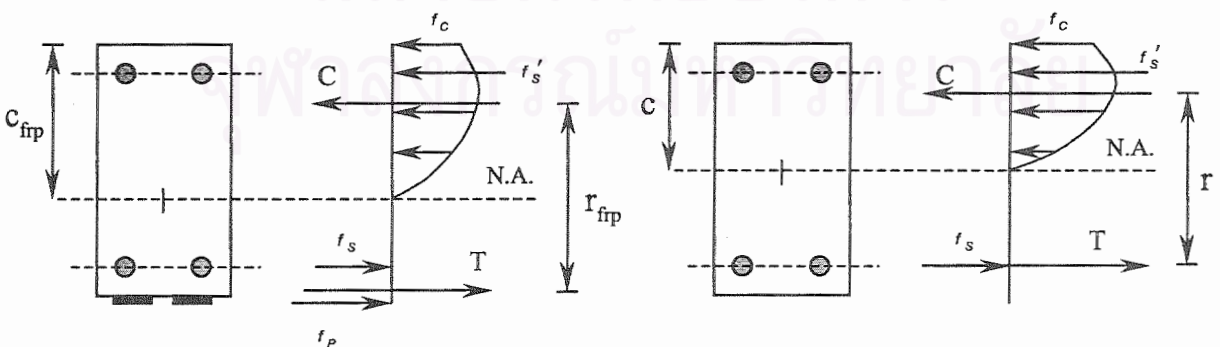
6.1.1 กำลังรับแรงดัด (flexural strength)

เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางของคานตัวอย่าง CB1 และ RF1 มาเขียนลงบนแกนความสัมพันธ์เดียวกันดังรูปที่ 6.1 พบว่าการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจะส่งผลต่อกำลังรับแรงดัดของคานตัวอย่างเป็นอย่างมาก สังเกต



รูปที่ 6.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวของคาน CB1 และ RF1

ได้จาก ณ จุดวิบัติของคานตัวอย่าง RF1 น้ำหนักกระทำจะมีค่าประมาณ 15.3 ตัน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 191.3 ของน้ำหนักที่จุดประลัยของคานตัวอย่าง CB1 (คานตัวอย่าง CB1 มีค่าน้ำหนักประลัยประมาณ 8.0 ตัน) เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่เสริมเข้าไปในส่วนรับแรงดึงของคานตัวอย่าง RF1 จะช่วยรับแรงดึงส่วนหนึ่งจากเหล็กเสริมรับแรงดึง ทำให้แรงดึงลัพท์รับหน้าตัดของคานตัวอย่างเคลื่อนตัวต่ำลงกว่าระดับเดิม ส่งผลให้แนวแกนสะเทิน (neutral axis) เคลื่อนตัวต่ำลงตาม (ดูรูปที่ 6.2 ประกอบ) คอนกรีตส่วนรับแรงอัดจึงมีพื้นที่เพิ่มขึ้น (ระยะ c มีค่าเพิ่มขึ้น) ซึ่งถึงแม้ว่าแนวแกนสะเทินจะเคลื่อนตัวต่ำลง แต่ระยะห่างระหว่างแรงดึงลัพท์และแรงอัดลัพท์บนหน้าตัดจะมีระยะเพิ่มขึ้น จึงทำให้แรงอัดลัพท์บนหน้าตัดจึงมีค่าลดลงเนื่องจากค่า



(ก) คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลัง

(ข) คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีการเสริมกำลัง

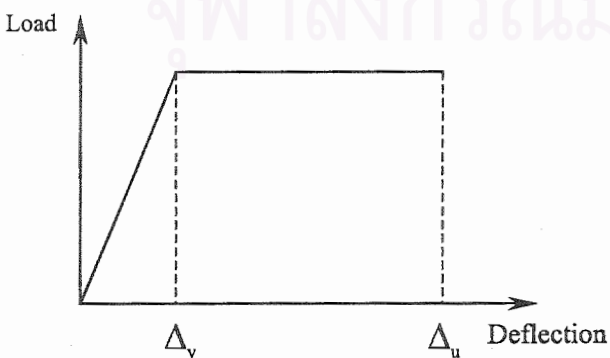
รูปที่ 6.2 แสดงการกระจายตัวของแรงบนหน้าตัดคานเสริมกำลังและคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

แรงลัพท์จะแปรผกผันกับความยาวแขนของโมเมนต์ (เมื่อพิจารณาที่น้ำหนักกระทำเท่ากัน) ค่าความเครียด ณ จุดต่างๆบนหน้าตัดจึงมีค่าน้อยกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน โดยตัวอย่างรายการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข. และจากการที่ค่าความเครียด ณ ตำแหน่งต่างๆบนหน้าตัดมีค่าน้อยลง จึงทำให้คานเสริมกำลังสามารถรับน้ำหนักกระทำได้มากกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เสริมกำลัง

6.1.2 ค่าการโก่งตัว (deflection) และค่าความเหนียว (ductility)

เมื่อพิจารณาที่น้ำหนักกระทำเท่ากันค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง RF1 มีค่าน้อยกว่าคานตัวอย่าง CB1 อย่างชัดเจน เช่นที่น้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 7.5 ตัน (ซึ่งเป็นน้ำหนักกระทำก่อนจุดครากของคานตัวอย่างทั้งสอง) คานตัวอย่าง CB1 จะมีค่าการโก่งตัว 5.09 มม. ในขณะที่คานตัวอย่าง RF1 จะมีค่าการโก่งตัวประมาณ 3.18 มม. หรือคิดเป็นร้อยละ 62.0 ของค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง CB1 เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ในการเสริมกำลังจะช่วยเพิ่มค่าสติฟเนสให้แก่คานตัวอย่าง RF1 อีกทั้งค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนมีค่าประมาณ 1.94×10^6 ksc. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับเหล็ก ดังนั้นค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง RF1 จึงลดลงอย่างมาก เมื่อพิจารณารูปที่ 6.1 พบว่าค่าความชันของความสัมพันธ์ทั้งก่อนและหลังจุดครากมีค่าไม่ต่างกันมาก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากภายหลังจุดครากค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กรับแรงดึงจะมีค่าลดลงอย่างมากจนมีค่าเหลือประมาณร้อยละ 1.0 แต่แถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนซึ่งมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นใกล้เคียงกับเหล็กรับแรงดึง จะเข้ามาช่วยเสริมสติฟเนสที่หายไปของเหล็กรับแรงดึงแทน ดังนั้นค่าสติฟเนสของคานจึงมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งสอดคล้องกับค่าการโก่งตัวที่น้ำหนักประลัยที่พบว่าคานตัวอย่าง CB1 จะมีค่าการโก่งตัว 74.16 มม. ในขณะที่คานตัวอย่าง RF1 จะมีค่าการโก่งตัวประมาณ 9.77 มม. หรือคิดเป็นร้อยละ 13.2 ของค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง CB1 เนื่องจากคาน RF1 มีแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนซึ่งช่วยชดเชยค่าสติฟเนสของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่หายไป ในขณะที่คานตัวอย่าง CB1 ไม่มี

ในส่วน of ค่าความเหนียว (ductility) ของคานตัวอย่าง หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งคือ ความสามารถในการเสียรูปถาวรเนื่องจากผลของความเค้น (stress) ของคานนั้น สามารถเปรียบเทียบกัน



$$\text{ดัชนีความเหนียว (D.I.)} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (6.1)$$

รูปที่ 6.3 แสดงค่าการโก่งตัวที่จุดครากและที่จุดประลัย

ตารางที่ 6.1 แสดงค่าความเหนียวของคานตัวอย่างต่างๆ

คานตัวอย่าง	CB1	RF1	RF2	RF3	RF4	RF5	RF6	RF7	RF8	CB2	RF9	RP1	RP2
การโก่งตัว ที่จุดคราก (มม.)	5.9	6.5	7.6	8.3	-	-	-	6.3	6.8	4.0	5.4	4.5	6.2
การโก่งตัวที่ จุดประลัย (มม.)	74.2	9.8	12.5	18.4	7.1	6.8	7.0	8.3	10.3	68.5	12.8	14.2	14.4
ดัชนีความเหนียว	12.6	1.5	1.6	2.2	-	-	-	1.3	1.5	17.1	2.4	3.2	2.3

ได้จากดัชนีความเหนียว (ductility index) ซึ่งนิยามไว้ว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าการโก่งตัวที่จุดประลัยกับค่าการโก่งตัวที่จุดคราก ดังแสดงในรูปที่ 6.3 และสมการที่ (6.1) และดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่างทั้งหมดเป็นไปตามตารางที่ 6.1 ซึ่งจากตารางที่ 6.1 พบว่าดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่าง RF1 มีค่าเท่ากับ 1.5 คิดเป็นร้อยละ 11.9 ของค่าดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่าง CB1 ซึ่งสาเหตุที่คานตัวอย่าง RF1 มีค่าดัชนีความเหนียวต่ำกว่าคานตัวอย่าง CB1 ทั้งที่มีกำลังรับแรงดัดสูงกว่า เนื่องจากสตีเฟนของคานตัวอย่าง RF1 ที่เพิ่มขึ้นจากแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ทำให้ค่าการโก่งตัวในทุกๆหน้าหน้ากระทำของคานตัวอย่าง RF1 มีค่าน้อยกว่าคานตัวอย่าง CB1 ประกอบกับคานตัวอย่าง RF1 มีการวิบัติเนื่องจากแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนหลุดลอกออก จึงทำให้คานตัวอย่าง RF1 เกิดการวิบัติที่ค่าการโก่งตัวน้อยกว่าที่ควรจะเป็น จากเหตุผลดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่า ดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่างจะขึ้นอยู่กับค่าสตีเฟนและลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างเป็นสำคัญ

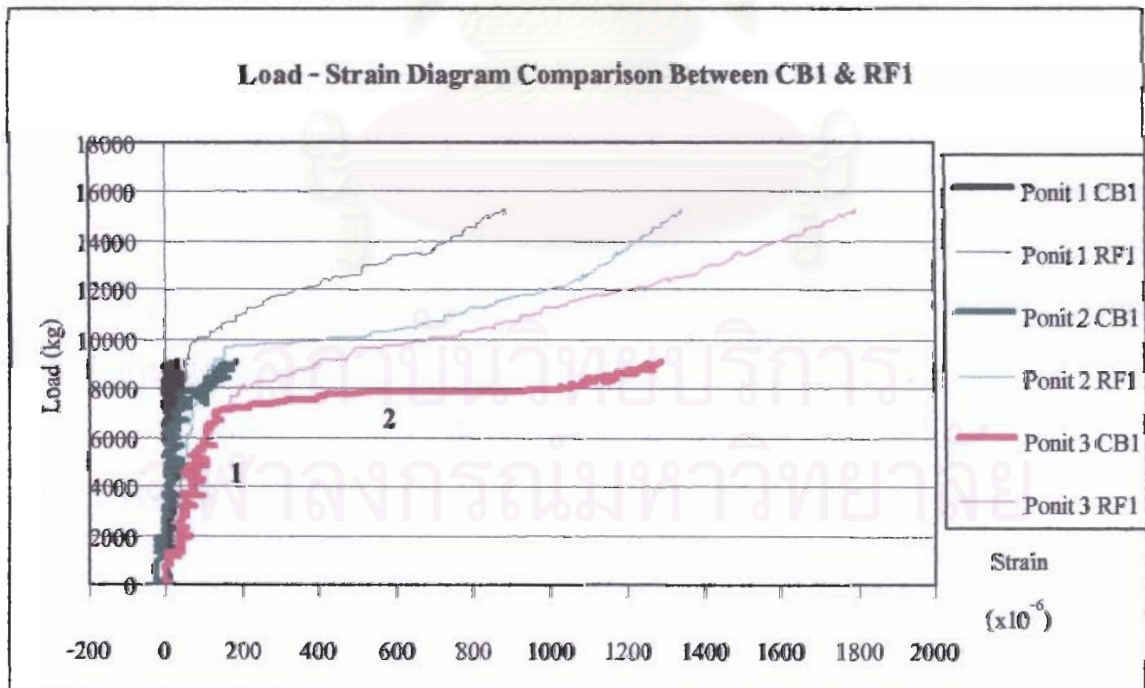
6.1.3 รอยแตกร้าว (crack) และลักษณะการวิบัติ (failure mode)

เมื่อพิจารณารอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น พบว่าแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนสามารถช่วยลดขนาดรอยแตกร้าวทั้งความกว้างและความยาวได้อย่างมาก อีกทั้งยังทำให้รอยแตกร้าวมีการกระจายตัวสูงขึ้นเนื่องจากการเสริมแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจะทำให้แกนสะเทินเคลื่อนตัวต่ำลง ส่งผลให้คอนกรีตส่วนรับแรงดัดมีพื้นที่น้อยลง รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจึงมีความยาวน้อยกว่าคานตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลัง และแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนยังช่วยยึดรั้งคอนกรีตส่วนที่แตกร้าว ทำให้รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นมีความกว้างน้อยลงและกระจายตัวสม่ำเสมอตลอดช่วงคาน ซึ่งลักษณะรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในคานเสริมกำลังจัดเป็นลักษณะรอยแตกร้าวที่ดี เนื่องจากรอยแตกร้าวที่แคบและมีความยาวน้อยจะช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในคอนกรีตได้ดี และการกระจายตัวของรอยแตกร้าวอย่างสม่ำเสมอตลอดช่วงคาน จะทำให้คานมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) มากกว่า ซึ่งจะทำให้พฤติกรรมของคานสอดคล้องกับทฤษฎีของคาน (beam theorem)

ในส่วนของการวิบัติของคานตัวอย่าง CB1 และ RF1 จะมีลักษณะแตกต่างกันอย่างชัดเจน กล่าวคือ คานตัวอย่าง CB1 เกิดการวิบัติจากคอนกรีตถูกอัดแตก (crushing) ภายหลังจากเหล็กเสริมรับแรงถึงจุดคราก (yielding point) ซึ่งเป็นการวิบัติแบบเหนียว (ductile failure) ที่เกิดจากแรงคดโดยสมบูรณ์ (flexural failure) ในขณะที่คานตัวอย่าง RF1 วิบัติเนื่องจากการบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเกิดการลอกตัว (debonded failure) อย่างทันทีทันใด จัดเป็นการวิบัติแบบเฉพาะที่ (local failure) ทำให้คานตัวอย่าง RF1 เกิดการวิบัติแบบเปราะ (brittle failure) ซึ่งเป็นการวิบัติที่อันตรายและไม่พึงประสงค์ในงานทางวิศวกรรมโยธา เนื่องจากองค์อาคารจะวิบัติโดยไม่มีสัญญาณบ่งบอกล่วงหน้า ซึ่งการหลุดลอกของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเกิดเนื่องจากหน่วยแรงเฉือนตามแนวนอน ณ จุดประลัย (horizontal shear stress) ที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นวัสดุประสานและผิวของคอนกรีตมีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุประสานกับคอนกรีต

6.1.4 ค่าความเข้มของหน่วยแรงที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

การวิเคราะห์ตัวแปรดังกล่าวจะนำข้อมูลที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดตั้งไว้บนเหล็กเสริมรับแรงดึง 3 ตำแหน่ง คือ ที่ตำแหน่ง 5 ซม. 15 ซม. และ 25 ซม. จากจุดรองรับมาพิจารณา ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าความเครียด ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าความเครียดของคานตัวอย่าง CB1 และ RF1 ทั้ง 3 ตำแหน่งจะแสดงดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าความเครียดของคาน CB1 และ RF1 ทั้ง 3 ตำแหน่ง

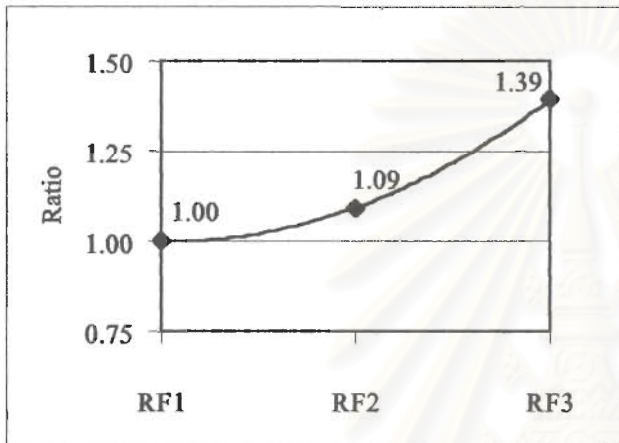
โดยจากรูปที่ 6.4 จะพบว่า ในช่วงแรกของความสัมพันธ์ (ช่วงน้ำหนักกระทำ 0.0 ตันถึง 8.0 ตัน) ค่าความเครียดในตำแหน่งต่างๆของคานตัวอย่าง RF1 จะมีค่าใกล้เคียงกับคานตัวอย่าง CB1 เนื่องจากแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจะมีผลต่อพฤติกรรมของคานอย่างชัดเจนก็ต่อเมื่อคานเกิดการแตกร้าว แต่ในช่วงน้ำหนักดังกล่าวคานตัวอย่างทั้งสอง มีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นไม่มากและส่วนใหญ่เกิดขึ้นในช่วงระหว่างจุดให้น้ำหนักกระทำ (bending zone) บริเวณที่ติดมาตรวัดทั้งสามยังไม่เกิดการแตกร้าว จึงทำให้ในช่วงน้ำหนักดังกล่าวค่าความเครียดของคานตัวอย่างทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อคานเกิดการแตกร้าวมากขึ้น รอยแตกร้าวจะกระจายตัวเข้าใกล้จุดที่ติดมาตรวัดมากขึ้นส่งผลให้สตีเฟนสของหน้าตัดที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียดมีค่าลดลง อีกทั้งค่าความเค้นในส่วนที่เกิดรอยแตกร้าวจะกระจายตัวไปยังส่วนอื่น (stress redistribution) ทำให้บริเวณค่าความเครียดในจุดที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียดเพิ่มมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากมาตรวัดที่ระยะ 25 ซม. ในคานตัวอย่าง CB1 มีการเปลี่ยนค่าความชันของความสัมพันธ์ที่น้ำหนักกระทำ 7.0 ตัน และมาตรวัดที่ระยะ 5 ซม. 15 ซม. และ 25 ซม. ของคานตัวอย่าง RF1 ซึ่งมีการเปลี่ยนค่าความชันที่น้ำหนัก 10.0 ตัน 9.7 ตัน และ 8.3 ตันตามลำดับ ในขณะที่ค่าความเครียดจากมาตรวัดที่ระยะ 5 ซม. และ 15 ซม. ของคานตัวอย่าง CB1 จะมีค่าไม่เปลี่ยนไปจากค่าความเครียดที่จุดครากมากนัก โดยค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดของคานตัวอย่างทั้งสองจะมีค่ามากขึ้นตามระยะห่างจากจุดรองรับ เนื่องจากค่าโมเมนต์ดัด (bending moment) จะมีค่ามากขึ้นตามระยะห่างจากจุดรองรับ ซึ่งสัดส่วนของค่าอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ดัดต่อแรงเฉือน ณ ตำแหน่งที่ติดมาตรวัดที่ระยะ 5 ซม. 15 ซม. และ 25 ซม. มีค่าเท่ากับ 1 : 3 : 5 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่จุดประลัย พบว่าค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดที่ระยะ 5 ซม. และ 15 ซม. ของคานตัวอย่าง RF1 มีค่ามากกว่าค่าความเครียดที่วัดในตำแหน่งเดียวกันของคานตัวอย่าง CB1 เนื่องจากคานตัวอย่าง RF1 เกิดรอยแตกร้าวการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งคาน ทำให้ค่าความเครียดจากรอยแตกร้าวกระจายไปอย่างสม่ำเสมอทุกส่วน อีกทั้งคานตัวอย่าง RF1 เกิดการวิบัติที่น้ำหนักกระทำสูงกว่า จึงทำให้เหล็กเสริมรับแรงดึงในตำแหน่งที่ติดมาตรวัดดังกล่าวมีค่าความเครียดสูงกว่าคานตัวอย่าง CB1

6.2 ผลของระยะการยึดปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

ในการวิเคราะห์ผลของระยะการยึดปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน จะนำข้อมูลการทดสอบของคานตัวอย่าง RF1 RF2 และ RF3 มาเปรียบเทียบกัน ซึ่งวัสดุที่ใช้ยึดปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยคาร์บอนชนิดแผ่น (CFRP sheet) ที่มีคุณสมบัติรับแรงดึงได้ดีในทิศทางขนานกับแนวเส้นใย โดยจะติดตั้งให้แนวเส้นใยของแผ่นเส้นใยคาร์บอนขนานกับแนวให้น้ำหนักกระทำ และตำแหน่งที่ติดตั้งจะเป็นไปดังรูปที่ 5.13 สำหรับคานตัวอย่าง RF2 และรูปที่ 5.19 สำหรับคานตัวอย่าง RF3 ซึ่งการวิเคราะห์ออกเป็นหัวข้อต่างๆดังนี้

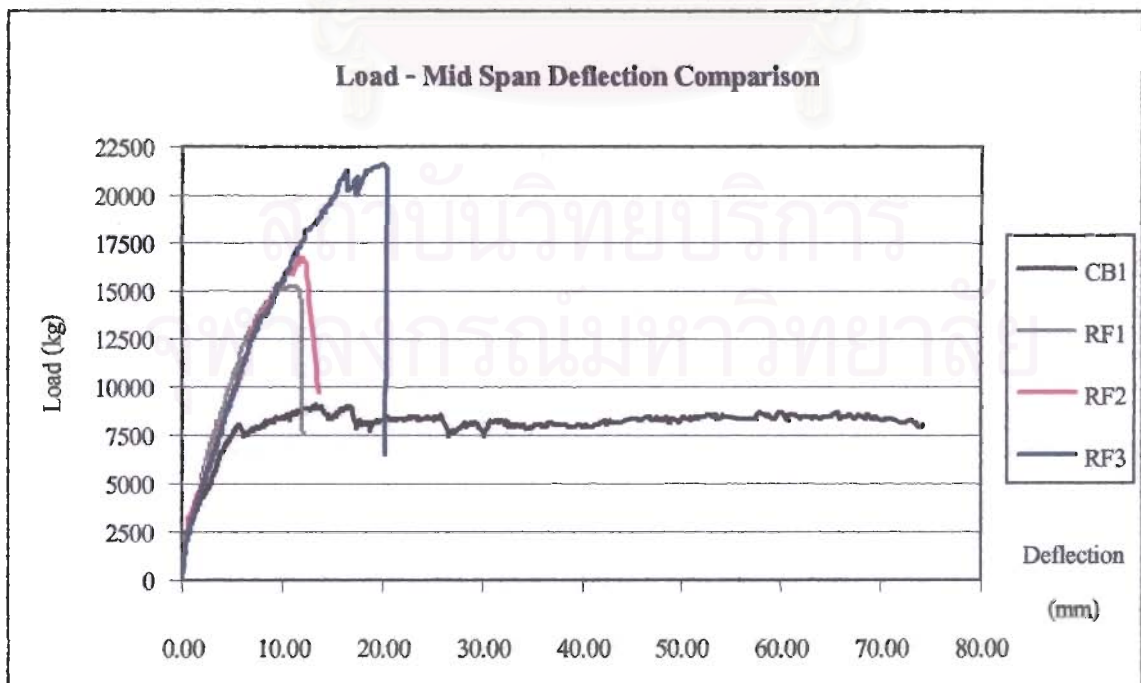
6.2.1 กำลังรับแรงคด (flexural strength)

เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางของคานตัวอย่าง RF1 RF2 และ RF3 มาเขียนลงบนแกนความสัมพันธ์เดียวกันดังรูปที่ 6.6 พบว่าการยึดปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนส่งผลต่อกำลังรับแรงคดของคานตัวอย่างอย่างชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคานตัวอย่าง RF3 ที่มีระยะยึดปลายยาว 75 ซม. จะมีกำลังต้านทานแรงคดมากกว่าคานตัวอย่าง RF1 อยู่ถึงร้อยละ 39.2 ในขณะที่คานตัวอย่าง RF2 ที่มีระยะยึดปลายยาว 40 ซม. จะมีกำลัง



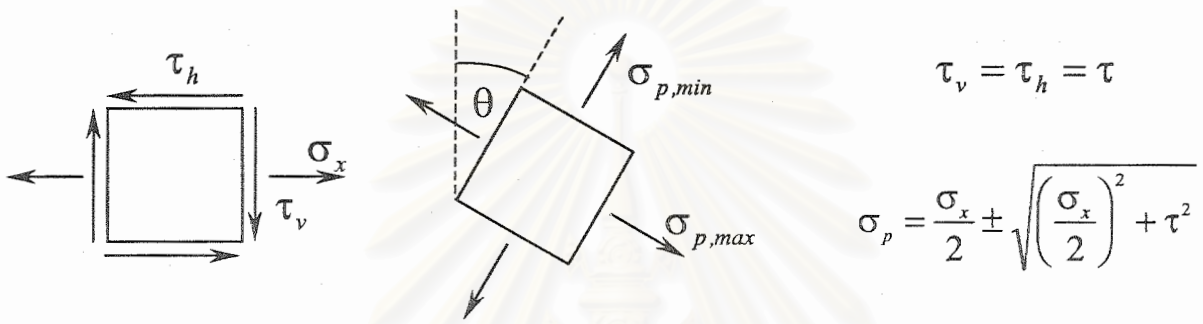
รูปที่ 6.5 แสดงอัตราส่วนกำลังรับแรงคดของคาน RF2 และ RF3 ต่อกำลังรับแรงคดของคาน RF1

ต้านทานแรงคดมากกว่าคานตัวอย่าง RF1 อยู่เพียงร้อยละ 9.2 (คานตัวอย่าง RF1 RF2 และ RF3 มีกำลังรับน้ำหนักประลัย 15.3 ตัน 16.7 ตัน และ 21.3 ตัน ตามลำดับ) โดยอัตราส่วนกำลังต้านทานแรงคดของคานตัวอย่าง RF2 และ RF3 ต่อกำลังต้านทานแรงคดของคานตัวอย่าง RF1 จะเห็นไปดังแสดงในรูปที่ 6.5 สาเหตุที่คานตัวอย่าง RF2 และ RF3 มีกำลังรับแรงคดสูงกว่าคานตัวอย่าง RF1 เนื่องจาก

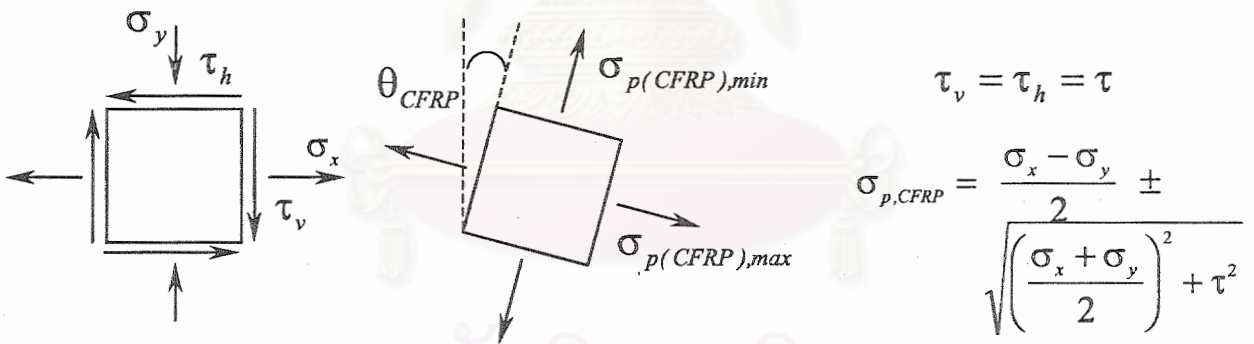


รูปที่ 6.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน CB1 RF1 RF2 และ RF3

วัสดุหุ้มปลายจะช่วยยึดรั้งคอนกรีตส่วนหุ้มเหล็กเสริมรับแรงดึงและแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ซึ่งพยายามจะลอกตัวออกเมื่อคานตัวอย่างรับน้ำหนักกระทำ โดยวัสดุหุ้มปลายจะช่วยเพิ่มหน่วยแรงกด (compressive stress) ในเนื้อคอนกรีต ทำให้หน่วยแรงดึงหลัก (principal tensile stress) ที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตของคานตัวอย่าง RF2 และ RF3 มีค่าน้อยกว่าคานตัวอย่าง RF1 (ดูรูปที่ 6.7) อีกทั้งวัสดุหุ้มปลายซึ่งเป็นแผ่นเส้นใยคาร์บอนยังไปช่วยรับหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตบางส่วน ทำให้หน่วยแรงดึงหลักที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตมีค่าลดลงอีก คานตัวอย่าง RF2 และ RF3 จึงวิบัติที่น้ำหนักกระทำสูงกว่าคานตัวอย่าง RF1



(ก) แสดงความเค้นภายในเนื้อคอนกรีตในคานที่ไม่มีการยึดปลาย



โดย $\theta_{CFRP} < \theta$ และ $\sigma_{p,CFRP} < \sigma_p$

(ข) แสดงความเค้นภายในเนื้อคอนกรีตในคานที่มีการยึดปลาย

รูปที่ 6.7 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตที่มีและไม่มีกรยึดปลาย ณ น้ำหนักกระทำเท่ากัน

6.2.2 ค่าการโก่งตัว (deflection) และค่าความเหนียว (ductility)

จากรูปที่ 6.6 จะพบว่าเส้นความสัมพันธ์ของค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง RF1 RF2 และ RF3 มีค่าใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากแผ่นเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ยึดปลายในคานตัวอย่าง RF2 และ RF3 เป็นเพียงวัสดุช่วยยึดรั้งแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนและช่วยรับหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นใน

เมื่อคอนกรีตเท่านั้น โดยแผ่นเส้นใยคาร์บอนจะมีผลต่อคานตัวอย่างทั้งสองเพียงช่วยเพิ่มสติเฟนสในแนวนานกับแนวแรงกระทำเท่านั้น แต่ไม่มีผลต่อค่าสติเฟนสในแนวตั้งฉากกับแรงกระทำซึ่งเป็นสติเฟนสที่ใช้ต้านทานแรงคดของคานตัวอย่าง ทำให้ค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่างทั้งสามมีค่าใกล้เคียงกัน

ในส่วนของค่าความเหนียวของคานตัวอย่าง โดยอาศัยค่าจากตารางที่ 6.1 พบว่าดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่าง RF1 และคานตัวอย่าง RF2 จะมีค่าใกล้เคียงกันคือมีค่าเท่ากับ 1.5 และ 1.6 ตามลำดับ ถึงแม้ว่าคานตัวอย่าง RF2 จะมีน้ำหนักประลัยมากกว่าคานตัวอย่าง RF1 อยู่ร้อยละ 9.2 ในขณะที่คานตัวอย่าง RF3 มีค่าดัชนีความเหนียวเท่ากับ 2.2 โดยมีค่ามากกว่าดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่าง RF1 คิดเป็นร้อยละ 46.7 ซึ่งสาเหตุที่คานตัวอย่าง RF3 มีค่าดัชนีความเหนียวสูงกว่าคานตัวอย่าง RF1 เนื่องจากคานตัวอย่าง RF3 เกิดการวิบัติที่น้ำหนักประลัยสูงกว่าคานตัวอย่าง RF1 โดยมีค่าสติเฟนสของคานและลักษณะการวิบัติที่คล้ายกัน

6.2.3 รอยแตกร้าว (crack) และลักษณะการวิบัติ (failure mode)

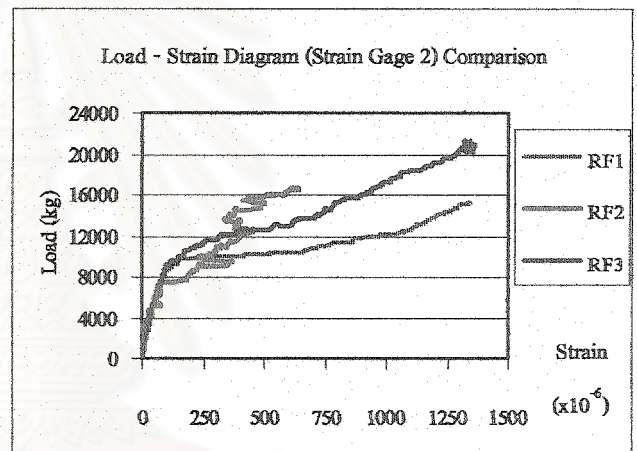
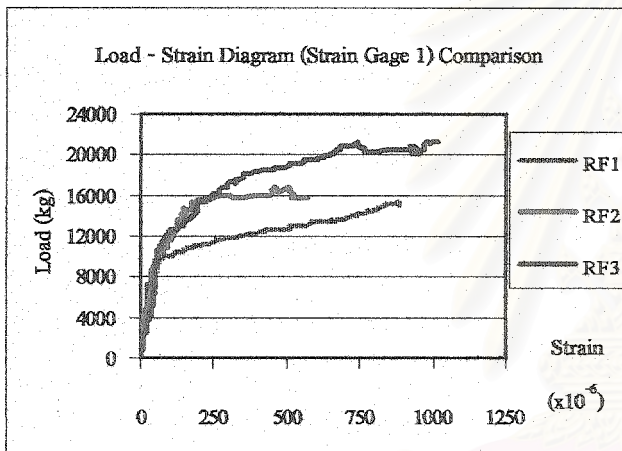
เมื่อพิจารณารอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น พบว่ารอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF2 และ RF3 เท่าที่สามารถสังเกตเห็น มีลักษณะเหมือนรอยแตกร้าวในคานตัวอย่าง RF1 กล่าวคือ เป็นรอยแตกร้าวที่แคบ และกระจายตัวสูง ซึ่งเป็นผลเนื่องจากแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่ใช้เสริมกำลังในคานตัวอย่างทั้งสาม ส่วนอิทธิพลของแผ่นเส้นใยคาร์บอน (CFRP sheet) ที่ใช้ยึดปลายในคานตัวอย่าง RF2 และ RF3 นั้น ไม่สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนเนื่องจากแผ่นเส้นใยคาร์บอนช่วยเสริมสติเฟนสในแนวนานกับแนวแรงกระทำ ซึ่งมีผลต่อค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับแนวคาน เช่น หน่วยแรงเฉือนคด (vertical shearing stress) แต่บริเวณที่สามารถสังเกตเห็นรอยแตกร้าวได้อย่างชัดเจนเป็นส่วนที่ไม่มีแรงเฉือนเกิดขึ้นทำให้ผลของแผ่นเส้นใยคาร์บอนไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อรอยแตกร้าวที่สามารถสังเกตเห็น (ส่วนของคานตัวอย่างที่รับแรงเฉือนถูกแผ่นเส้นใยคาร์บอนปิดทับเกือบทั้งหมด)

ในส่วนของการวิบัติของคานตัวอย่าง RF1 RF2 และ RF3 จะมีลักษณะคล้ายกัน กล่าวคือเป็นการวิบัติแบบเฉพาะที่ (local failure) จากการหลุดลอกตัวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (debonded failure) อย่างทันทีทันใด แต่การวิบัติของคานตัวอย่างทั้งสาม มีข้อแตกต่างกันเล็กน้อยจากตำแหน่งที่แถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเกิดการหลุดลอก โดยที่คานตัวอย่าง RF1 จะเกิดการวิบัติที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ในขณะที่คานตัวอย่าง RF2 จะเริ่มเกิดการหลุดลอกที่ระยะ 40 ซม. จากจุดรองรับ หรือที่จุดสิ้นสุดการยึดปลาย และคานตัวอย่าง RF3 จะเริ่มเกิดการหลุดลอกที่ระยะ 75 ซม. จากจุดรองรับ หรือที่จุดสิ้นสุดการยึดปลายเช่นเดียวกับคานตัวอย่าง RF2 สาเหตุที่ตำแหน่งของการหลุดลอกแตกต่างกันเนื่องจากการยึดปลายจะช่วยเพิ่มความแน่นอัดในเนื้อวัสดุประสานที่ยึดเหนี่ยวแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนกับเนื้อคอนกรีต ซึ่งในบริเวณที่มีการยึดปลาย วัสดุประสานจะมีสามารถรับหน่วยแรงเฉือนได้มากขึ้น แต่บริเวณที่ไม่มี

การยึดปลายวัสดุประสานยังคงรับหน่วยแรงเฉือนได้เท่าเดิม การวิบัติจึงเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุประสาน บริเวณที่ไม่มีการยึดปลาย

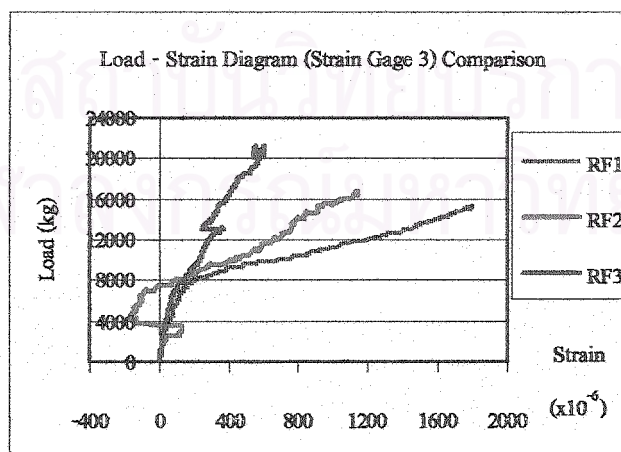
6.2.4 ค่าความเข้มของหน่วยแรงที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

ในหัวข้อการวิเคราะห์นี้จะกล่าวถึงข้อมูลจากคานตัวอย่าง RF1 และ RF3 เป็นหลักเนื่องจากเมื่อพิจารณารูปที่ 6.8 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดตั้งไว้ 3 ตำแหน่งในคานตัวอย่างทั้งสามพบว่า ข้อมูลของคานตัวอย่าง RF2 (ในรูปที่ 6.8 (ข) และ (ค)) มีค่าไม่แน่นอนและมีแนวโน้มไม่ชัดเจน ต่างจากข้อมูลจากคานตัวอย่าง RF1 และ RF3 สาเหตุอาจเนื่องมาจากข้อผิดพลาดจากการเก็บข้อมูลของเครื่องมือเก็บข้อมูล โดยในช่วงแรกของความสัมพันธ์ (ช่วงน้ำหนักกระทำ 0 ตันถึง 8 ตัน) ค่าความเครียดในตำแหน่งต่างๆของ



(ก) ตำแหน่งระยะ 5 ซม. จากจุดรองรับ

(ข) ตำแหน่งระยะ 15 ซม. จากจุดรองรับ



(ค) ตำแหน่งระยะ 25 ซม. จากจุดรองรับ

รูปที่ 6.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าความเครียดของคาน RF1 RF2 และ RF3

คานตัวอย่าง RF3 จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความเครียดที่วัดได้จากคานตัวอย่าง RF1 ทั้งนี้เนื่องจากผลของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 6.1.4 แต่เส้นความสัมพันธ์ของคานตัวอย่าง RF3 จะมีจุดเปลี่ยนค่าความชันที่น้ำหนักกระทำสูงกว่าคานตัวอย่าง RF1 เล็กน้อย เนื่องจากแผ่นเส้นใยคาร์บอนช่วยรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้น ทำให้คานตัวอย่าง RF2 และ RF3 มีการแตกร้าวที่เกิดจากแรงเฉือน (shear crack) น้อยกว่าคานตัวอย่าง RF1 ส่งผลให้ค่าสถิติเบสของคานตัวอย่าง RF2 และ RF3 จึงมีค่ามากกว่าคานตัวอย่าง RF1 และเมื่อพิจารณาที่น้ำหนักกระทำสูงขึ้นไปพบว่าที่น้ำหนักกระทำเท่ากันค่าความเครียดในบริเวณดังกล่าวของคานตัวอย่าง RF2 และ RF3 จะมีค่าน้อยกว่าค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่าง RF1 อย่างชัดเจน ทั้งนี้เกิดจากหน่วยแรงดึงหลัก (principal tensile stress) ในเนื้อคอนกรีตมีค่าลดลงเนื่องจากผลของแผ่นเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ยึดปลายเป็นตัวช่วยลดค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 6.2.1

6.3 ผลของความยาวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

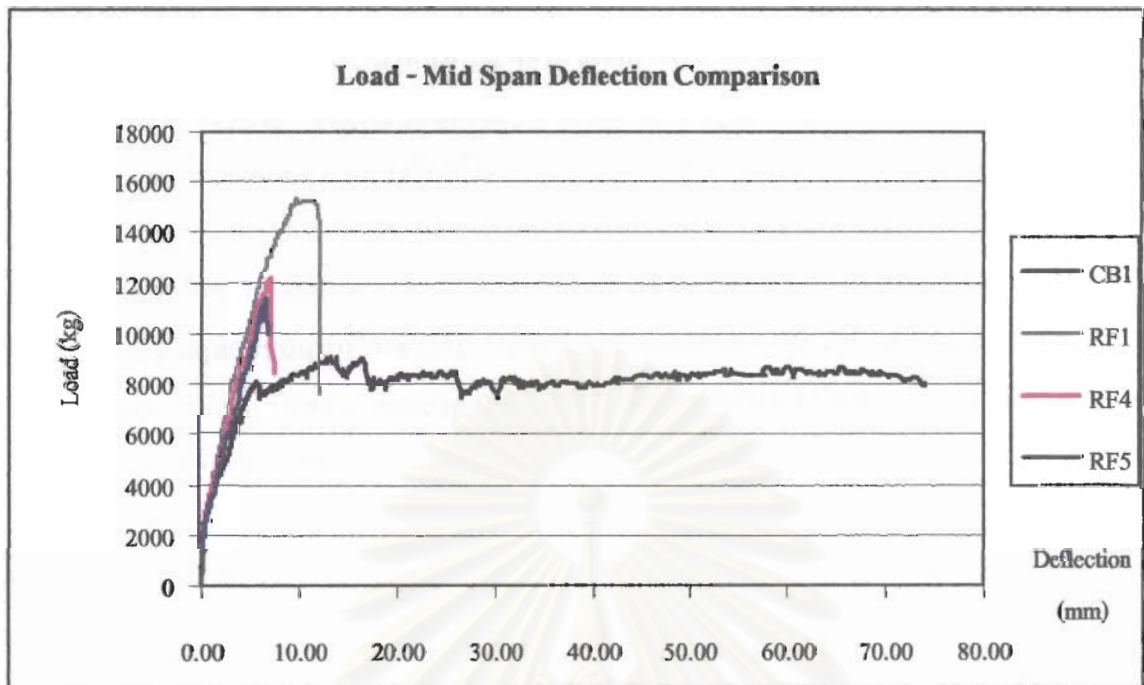
ในการวิเคราะห์ผลของความยาวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน จะนำข้อมูลการทดสอบของคานตัวอย่าง RF1 RF4 และ RF5 มาเปรียบเทียบกัน โดยลักษณะของการเสริมพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานตัวอย่างทั้งสามเป็นไปดังแสดงในตารางที่ 6.2 ซึ่งการวิเคราะห์ออกเป็นหัวข้อต่างๆดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6.2 แสดงลักษณะการเสริมพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคาน RF1 RF4 และ RF5

คานตัวอย่าง	แถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน		การยึดปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน
	จำนวน	ความยาว (ซม.)	
RF1	2	190	ไม่มี
RF4	2	170	ไม่มี
RF5	2	150	ไม่มี

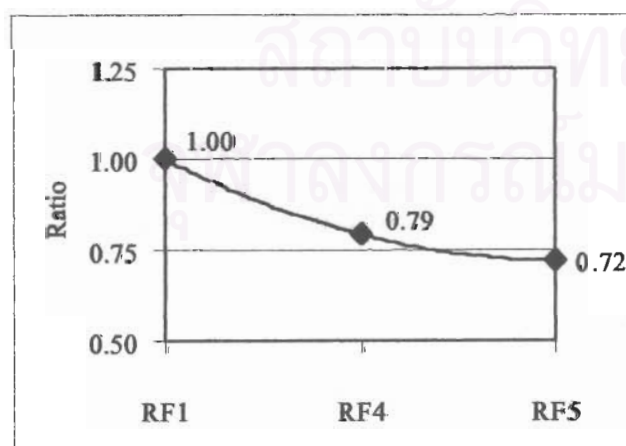
6.3.1 กำลังรับแรงดัด (flexural strength)

เมื่อพิจารณารูปที่ 6.9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน CB1 RF1 RF4 และ RF5 พบว่า ความยาวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนมีผลต่อกำลังรับน้ำหนักประลัยของคานตัวอย่างเป็นอย่างมาก โดยคานตัวอย่างที่มีความยาวแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนมากกว่า ซึ่งปลายของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนอยู่ในตำแหน่งที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ดัดต่อแรงเฉือนต่ำ จะสามารถรับน้ำหนักประลัยได้สูงกว่า ดังจะเห็นได้จาก



รูปที่ 6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการ โกงตัวของคาน CB1 RF1 RF4 และ RF5

คานตัวอย่าง RF4 และ RF5 ซึ่งมีกำลังรับน้ำหนักประลัย 12.1 ตัน และ 11.3 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 79.1 และร้อยละ 73.9 ของกำลังรับน้ำหนักประลัยของคานตัวอย่าง RF1 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจาก การเสริมแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่สั้น จะทำให้ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน อยู่ในตำแหน่งที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์คดต่อแรงเฉือนสูง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีค่าความเข้ม ของหน่วยแรงที่เกิดจากโมเมนต์คดและแรงเฉือนสูงอยู่แล้ว และเมื่อรวมกับค่าหน่วยแรงที่เกิดจาก การดึงตัวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน จึงทำให้ค่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตมีค่า



รูปที่ 6.10 แสดงอัตราส่วนกำลังรับแรงคดของคาน RF4 และ RF5 ต่อกำลังรับแรงคดของคาน RF1

เกินกว่ากำลังต้านทานแรงดึงของ คอนกรีต (tensile strength) คานตัวอย่าง จึงวิบัติที่น้ำหนักกระทำน้อยกว่า การเสริมแถบพลาสติกเสริมเส้นใย คาร์บอนที่ยาวกว่า ซึ่งเหตุผลดังกล่าว สอดคล้องกับลักษณะการวิบัติของ คานตัวอย่างที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

และเมื่อพิจารณารูปที่ 6.10 พบว่ากำลังรับน้ำหนักประลัยของคาน ตัวอย่างไม่เป็นสัดส่วน โดยตรงกับ ความยาวของ แถบพลาสติกเสริมเส้น

ใยคาร์บอน โดยคานตัวอย่าง RF4 และ RF5 ที่มีความยาวแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเท่ากับ 170 และ 150 ซม. สามารถรับน้ำหนักประลัยได้ใกล้เคียงกัน ในขณะที่คานตัวอย่าง RF1 ที่มีความยาวแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเท่ากับ 190 ซม. สามารถรับน้ำหนักได้สูงกว่าคานตัวอย่างทั้งสองมาก ทั้งนี้เนื่องจากหน่วยแรงในเนื้อคอนกรีตที่เกิดจากการดึงตัวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ในแต่ละตำแหน่งของคานมีค่าไม่สัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้นตรง (nonlinear relation) เมื่อรวมกับหน่วยแรงในเนื้อคอนกรีตที่มีผลของการแตกร้าวรวมอยู่ (ภายหลังจากการแตกร้าวคานตัวอย่างจะมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear behavior)) จึงทำให้ค่าหน่วยแรงในแต่ละตำแหน่งมีค่าไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน ส่งผลให้น้ำหนักประลัยในคานตัวอย่างที่มีความยาวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนไม่เท่ากันมีค่าต่างกันไปด้วย

6.3.2 ค่าการโก่งตัว (deflection) และค่าความเหนียว (ductility)

เมื่อพิจารณาในส่วนของค่าการโก่งตัว โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวในรูปที่ 6.9 พบว่าช่วงระยะจากจุดรองรับถึงปลายถึงแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีผลต่อค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่างอย่างชัดเจน โดยคานตัวอย่างที่เสริมแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนให้เข้าใกล้จุดรองรับมากกว่า จะมีการโก่งตัวน้อยกว่าเมื่อพิจารณาที่น้ำหนักกระทำเท่ากัน เช่นที่น้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 7.5 ตัน (ซึ่งเป็นน้ำหนักกระทำก่อนจุดครากของคานตัวอย่างทั้งสอง) คานตัวอย่าง RF1 จะมค่าการโก่งตัว 3.18 มม. ในขณะที่คานตัวอย่าง RF4 และ RF5 มีค่าการโก่งตัวประมาณ 3.48 มม. และ 4.10 มม. ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง RF1 อยู่ร้อยละ 9.4 และ 28.9 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน จะช่วยเพิ่มค่าสติเฟนส์ให้แก่คานตัวอย่าง (ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 6.1.2) ซึ่งการเสริมกำลังคานด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน โดยให้ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเข้าใกล้จุดรองรับมากที่สุด จะทำให้คานตัวอย่างมีค่าสติเฟนส์สม่ำเสมอตลอดช่วงคาน ส่งผลให้การโก่งตัวมีค่าน้อยกว่าคานตัวอย่างที่ให้ปลายของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนออกห่างจากจุดรองรับ ซึ่งจะมีค่าสติเฟนส์ที่ไม่สม่ำเสมอตลอดช่วงคาน (ดังรูปที่ 6.11)



(ก) แถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนสั้น

(ข) แถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนยาว

รูปที่ 6.11 แสดงค่าสติเฟนส์ของคานที่เสริมความยาวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่างกัน

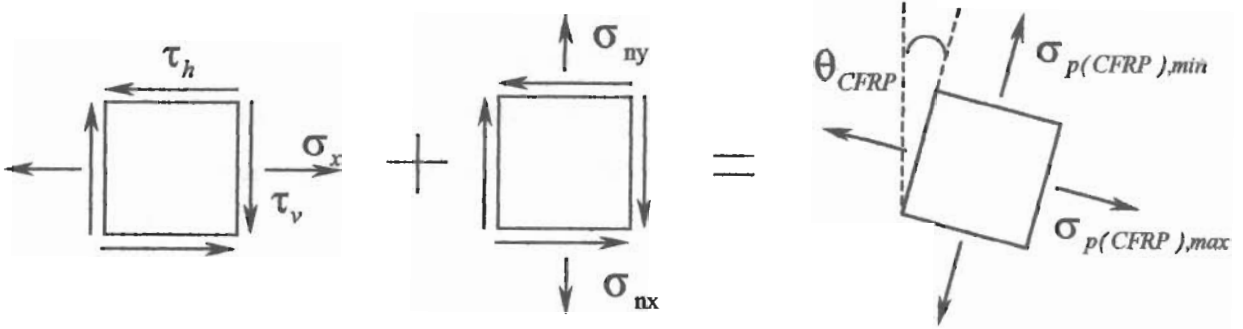
ในส่วนของค่าความเหนียว จากตารางที่ 6.1 พบว่าคานตัวอย่าง RF4 และ RF5 เกิดการวิบัติก่อนที่เหล็กเสริมรับแรงดึงจะถึงจุดคราก สังเกตได้จากค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดที่ 4 ซึ่งติด

ตั้งไว้ที่ผิวเหล็กเสริมรับแรงดึงบริเวณกึ่งกลางคานตัวอย่าง ในรูปที่ 5.27 และรูปที่ 5.33 ไม่มีการเปลี่ยนค่าความชัน โดยลักษณะการวิบัติดังกล่าวเป็นการวิบัติแบบเปราะอย่างชัดเจน และเนื่องจากคานตัวอย่าง RF4 และ RF5 เกิดการวิบัติก่อนที่เหล็กเสริมรับแรงดึงจะถึงจุดครากนี้เอง จึงทำให้ไม่สามารถหาค่าดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่าง RF4 และ RF5 ได้

6.3.3 รอยแตกร้าว (crack) และลักษณะการวิบัติ (failure mode)

เมื่อพิจารณาการรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นพบว่า รอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF4 และ RF5 จะมีลักษณะคล้ายกับรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่าง RF1 คือ มีลักษณะแคบ มีความยาวน้อย และกระจายตัวสูง โดยรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่างทั้งสามจะเกิดเฉพาะในช่วงที่มีการเสริมแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเท่านั้น แต่รอยแตกร้าวในคานตัวอย่าง RF4 และ RF5 จะมีข้อแตกต่างจากคานตัวอย่าง RF1 อยู่มาก มีจำนวนเกิดขึ้นน้อยกว่า ทั้งนี้อาจเกิดจาก คานตัวอย่าง RF4 และ RF5 วิบัติที่น้ำหนักกระทำต่ำกว่า

และเมื่อพิจารณาลักษณะการวิบัติพบว่า ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่าง RF4 และ RF5 แตกต่างไปจากลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่าง RF1 อันเกิดเนื่องจากการหลุดลอกของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนกล่าวคือ คานตัวอย่าง RF4 และ RF5 วิบัติจากคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมรับแรงดึงหลุดลอกออก สืบเนื่องจากค่าความเข้มของหน่วยแรงในเนื้อคอนกรีตบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนมีค่าเกินกำลังต้านทานแรงดึง (tensile strength) ของคอนกรีต โดยปกติแล้วในคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา ค่าหน่วยแรงในเนื้อคอนกรีตจะเกิดจากโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนเป็นหลัก หน่วยแรงเหล่านี้จะก่อให้เกิดหน่วยแรงดึงหลัก (principal stress) (ดังแสดงในรูปที่ 6.7(ก)) ซึ่งถ้าค่าหน่วยแรงดึงหลักที่เกิดขึ้นมีค่าเกินกำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตคอนกรีตจะเกิดการแตกร้าวขึ้น ในกรณีของคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา หน่วยแรงเหล่านี้จะก่อให้เกิดวิบัติบางประเภทไม่พึงประสงค์เช่น การวิบัติจากแรงเฉือน (shear failure) ซึ่งเป็นการวิบัติแบบเปราะ แต่การวิบัติดังกล่าวจะถูกป้องกันไม่ให้เกิดขึ้นโดยการเสริมเหล็กเสริมต่างๆ เช่น เหล็กลูกตั้ง (stirrups) เพื่อให้คานเกิดการวิบัติจากแรงดัดโดยสมบูรณ์ แต่ในกรณีของคานที่เสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจะเกิดหน่วยแรงอีกประเภทหนึ่งทับซ้อนกับหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา นั่นคือหน่วยแรงที่เป็นผลมาจากการดึงตัวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (peeling stress) โดยหน่วยแรงดังกล่าวจะเกิดจากแรงดึงในแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนถ่ายเข้าสู่เนื้อคอนกรีตผ่านวัสดุประสานในรูปของหน่วยแรงเฉือนในแนวระดับ (horizontal shearing stress) และหน่วยแรงดึงในแนวตั้งฉากกับแนวระดับ (normal tensile stress) ซึ่งหน่วยแรงดังกล่าวจะมีผลโดยตรงต่อคอนกรีตส่วนหุ้มเหล็กเสริมรับแรงดึง เนื่องจากการเสริมเหล็กลูกตั้งไว้รับแรงเฉือน ทำให้กำลังต้านทานของคอนกรีตส่วนนี้ไม่เพียงพอต่อหน่วยแรงดึงหลักที่เกิดขึ้น คอนกรีตส่วนดังกล่าวจึงแตกร้าวและหลุดลอกออกมา ดังรูปที่ 5.29 (ก)



หน่วยแรงในคอนกรีต
ที่เกิดจากน้ำหนักกระทำ

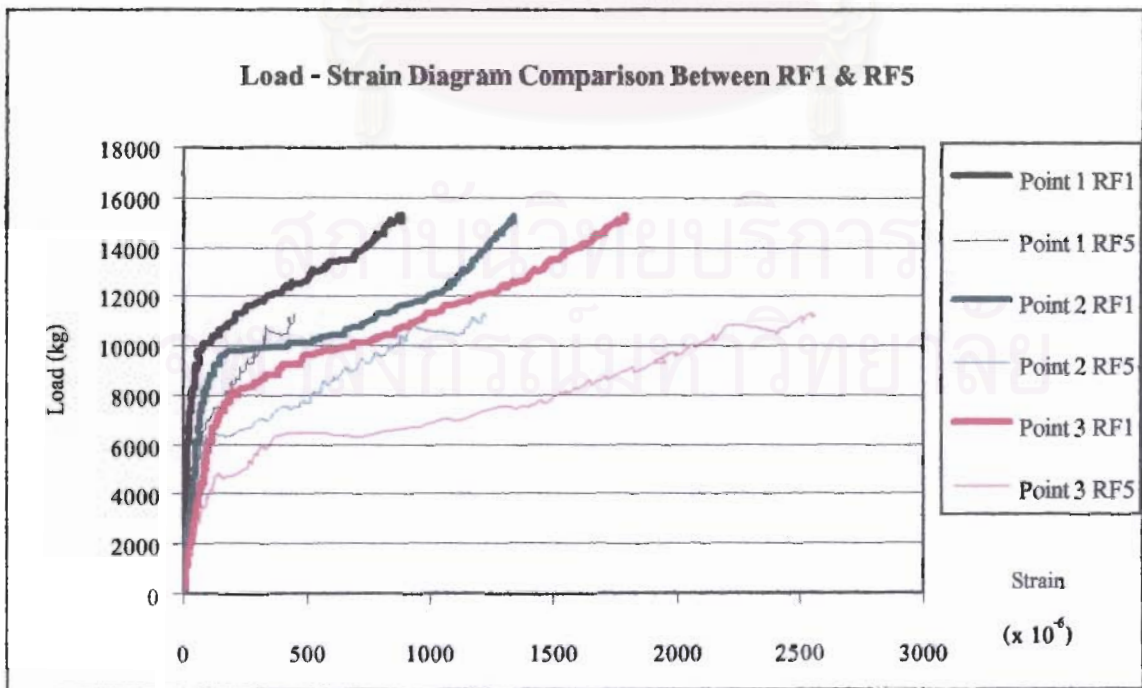
หน่วยแรงในคอนกรีตที่เกิดจาก
แถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

หน่วยแรงดึงหลักในคอนกรีต

รูปที่ 6.12 แสดงการรวมหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีต

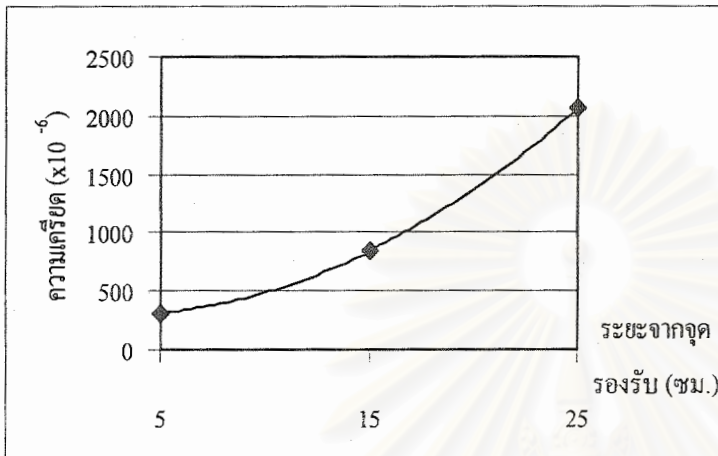
6.3.4 ค่าความเข้มของหน่วยแรงที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักกระทำและค่าเครียด ณ ตำแหน่งต่างๆของคานตัวอย่าง RF1 และ RF5 มาเขียนลงบนแกนความสัมพันธ์เดียวกันดังรูปที่ 6.13 (เหตุที่ไม่นำข้อมูลของคานตัวอย่าง RF4 มาวิเคราะห์ด้วย เนื่องจากข้อมูลจากคานตัวอย่าง RF4 มีข้อผิดพลาดในการจัดเก็บ ทำให้มีการแกว่งตัวของข้อมูลสูง ประกอบกับมีแนวโน้มของข้อมูลที่ไม่ชัดเจน) พบว่าค่าความเครียดที่วัดได้จากคานตัวอย่าง RF5 มีค่ามากกว่าคานตัวอย่าง RF1 ในทุกตำแหน่ง โดยเฉพาะที่ระยะ 25 ซม.จากจุดรองรับ ทั้งนี้เนื่องจากผลของการที่ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนอยู่



รูปที่ 6.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าความเครียดของคาน RF1 และ RF5

ในตำแหน่งที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์คดต่อแรงเฉือนสูง (ในคานตัวอย่าง RF5 คือระยะ 25 ซม. จากจุดรองรับ) ทำให้ค่าความเครียด ณ ตำแหน่งดังกล่าวสูงขึ้นกว่าคานตัวอย่าง RF1 อย่างชัดเจน แต่เมื่อพิจารณาค่าความเครียดที่ระยะ 5 ซม. และ 15 ซม. พบว่า ค่าความเครียดของคานตัวอย่าง RF5 ก็มีค่ามากกว่าคานตัวอย่าง RF1 ถึงแม้ว่าจะเป็นตำแหน่งที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วยแถบ



รูปที่ 6.14 แสดงค่าความเครียดที่ระยะต่างๆในคานตัวอย่าง RF5 ที่น้ำหนักกระทำประมาณ 10 ตัน

พลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากความต่อเนื่องของค่าความเค้น (continuity of stress) ในคานคอนกรีต กล่าวคือค่าความเค้นในตำแหน่งทั้งสองจะไม่ลดค่าลงทันทีทันใด แต่ค่าความเค้นจะค่อยๆลดลงตามระยะห่างจากจุดปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 6.14 โดยค่าผลต่างของความเครียด จะมี

ค่ามาก ในช่วงระหว่างระยะ 15 ซม. และ 25 ซม. จากจุดรองรับ แต่ในช่วงระหว่างระยะ 5 ซม. และ 15 ซม. จากจุดรองรับจะมีค่าน้อยลง และเมื่อพิจารณาเส้นความสัมพันธ์ของคานตัวอย่าง RF5 พบว่า ค่าความชันของเส้นความสัมพันธ์ทั้งสามมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน ในขณะที่เส้นความสัมพันธ์ของคานตัวอย่าง RF1 มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยเส้นความสัมพันธ์ที่ระยะ 5 ซม. จากจุดรองรับจะมีค่าความชันมากที่สุด รองลงไปที่คือเส้นความสัมพันธ์ที่ระยะ 15 ซม. และ 25 ซม. จากจุดรองรับตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลมาจากที่ระยะ 25 ซม. เกิดรอยแตกกว้างขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ค่าสติเฟนสของหน้าตัดคาน ณ ตำแหน่งดังกล่าวมีค่าลดลง ในขณะที่หน้าตัดคานที่ระยะ 5 ซม. และ 15 ซม. จากจุดรองรับไม่พบรอยแตกกว้าง (รอยแตกกว้างเกิดเฉพาะในช่วงที่มีการเสริมแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเท่านั้น) จึงทำให้ค่าสติเฟนสของหน้าตัดคานที่ระยะ 5 ซม. และ 15 ซม. จากจุดรองรับมีค่าสูงกว่า หนึ่งค่าสติเฟนสของหน้าตัดจะมีค่าสูงขึ้นตามระยะห่างจากรอยแตกกว้าง ดังนั้นค่าสติเฟนสที่ระยะ 5 ซม. จึงมีค่ามากกว่าค่าสติเฟนสของหน้าตัดที่ระยะ 15 ซม. ส่งผลให้ค่าความชันของเส้นความสัมพันธ์เป็นไปดังแสดงในรูปที่ 6.13

6.4 ผลของความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

ในการวิเคราะห์ผลของความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน จะนำข้อมูลการทดสอบของคานตัวอย่าง RF1 RF6 และ RF7 มาทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์เป็นหัวข้อต่างๆดัง

แสดงด้านล่าง โดยการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 6.4 นี้จะนำเอาผลของความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีต่อกำลังรับแรงดัด และลักษณะการวิบัติ มาพิจารณาในหัวข้อเดียวกัน เนื่องจากการมีความเกี่ยวข้องกัน หนึ่งลักษณะของการเสริมแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคานตัวอย่างทั้งสามเป็นไปดังตารางที่ 6.3

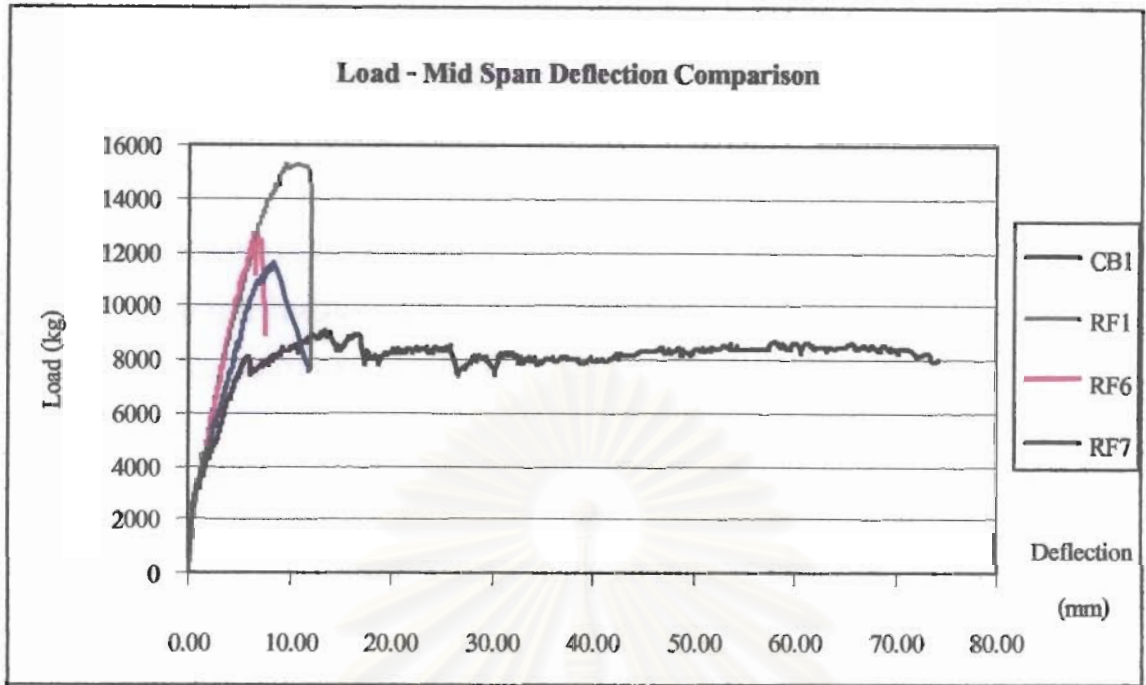
ตารางที่ 6.3 แสดงลักษณะการเสริมพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในคาน RF1 RF6 และ RF7

คานตัวอย่าง	แถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน		การยึดปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน
	จำนวน *	ความยาว (ซม.)	
RF1	2	190	ไม่มี
RF6	3	190	ไม่มี
RF7	1	190	ไม่มี

6.4.1 กำลังรับแรงดัด (flexural strength) และลักษณะการวิบัติ (failure mode)

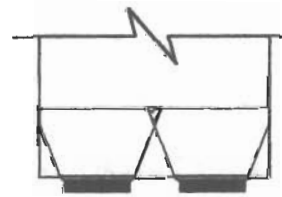
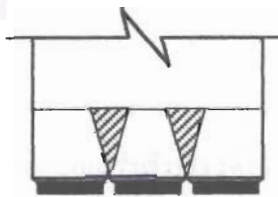
เมื่อพิจารณารูปที่ 6.15 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง CB1 RF1 RF6 และ RF7 พบว่า ความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนมีผลต่อกำลังรับน้ำหนักประลัยของคานตัวอย่างอย่างชัดเจน โดยคานตัวอย่าง RF1 ซึ่งมีจำนวนของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน 2 แถบ หรือมีความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเท่ากับ 10 ซม. จะมีกำลังรับน้ำหนักประลัยสูงสุด รองลงมาคือคานตัวอย่าง RF6 ซึ่งมีความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเท่ากับ 15 ซม. และน้อยที่สุดคือคานตัวอย่าง RF7 ซึ่งมีความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเท่ากับ 5 ซม. โดยกำลังรับน้ำหนักประลัยของคานตัวอย่าง RF6 และ RF7 มีค่าเท่ากับ 12.6 ตัน และ 11.6 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 82.4 และ 75.8 ของกำลังรับน้ำหนักประลัยของคานตัวอย่าง RF1 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังที่เพิ่มขึ้นไม่เป็นอัตราส่วนโดยตรงกับจำนวนหรือความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ทั้งนี้เนื่องจากจำนวนหรือความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนมีผลต่อค่าความเข้มของหน่วยแรงในคานตัวอย่างทั้งสามตัวอย่าง ส่งผลให้ลักษณะของการวิบัติในคานตัวอย่างทั้งสามแตกต่างกันไป โดยคานตัวอย่าง RF1 และ RF7 จะเกิดการวิบัติจากการหลุดลอกของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ในขณะที่คานตัวอย่าง RF6 เกิดการวิบัติจากการหลุดลอกของคอนกรีตส่วนหุ้มเหล็กเสริมรับแรงดึง สาเหตุที่คานตัวอย่าง RF6 เกิดการวิบัติลักษณะดังกล่าว แม้ว่าปลายของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจะอยู่ในตำแหน่งที่ อัตราส่วนระหว่างโมเมนต์ดัดต่อแรงเฉือนมีค่าเท่ากับคานตัวอย่าง

* แถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ศึกษามีความกว้าง 50 มม. และหนา 1.2 มม.



รูปที่ 6.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน CB1 RF1 RF6 และ RF7

RF1 เนื่องจากเมื่อแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนมีพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น แถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจะรับแรงดึงมากขึ้นในขณะที่เหล็กเสริมรับแรงดึงจะรับแรงดึงน้อยลง (ส่วนที่มีค่าสติฟเนส (ค่า EI) สูงกว่าจะรับแรงมากกว่า) ดังนั้นจึงมีแรงดึงและแรงเฉือนที่เกิดจากการดึงตัวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนถ่ายเข้าไปยังเนื้อคอนกรีตสูงกว่าในคานตัวอย่าง RF1 ประกอบกับเกิดการรื้อถอนของหน่วยแรงที่เกิดจากแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนแต่ละแถบ เนื่องจากการติดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนชิดกันเกินไปทำให้หน่วยแรงไม่สามารถกระจายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 6.16 ด้วยเหตุนี้คานตัวอย่าง RF6 จึงเกิดการวิบัติในลักษณะดังกล่าว ในขณะที่คานตัวอย่าง RF7 ซึ่งมีการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน 1 แถบ จะเกิดการวิบัติจากการหลุดออกของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ถึงแม้ว่าแรงดึงที่แถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนรับจะมีค่าน้อยกว่าในคานตัวอย่าง RF6 แต่เนื่องจากพื้นที่ของวัสดุประสาน



(ก) การรื้อถอนของหน่วยแรงในคาน RF6

(ข) การรื้อถอนของหน่วยแรงในคาน RF1

รูปที่ 6.16 แสดงการรื้อถอนของหน่วยแรงในคานตัวอย่าง RF1 และ RF6

(epoxy) ที่ยึดแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนกับเนื้อคอนกรีตมีพื้นที่น้อย จึงทำให้เกิดหน่วยแรงเฉือนบริเวณผิวสัมผัสของวัสดุประสานสูงกว่าในคานตัวอย่าง RF6 คานตัวอย่าง RF7 จึงเกิดการหลุดลอกของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนก่อนการหลุดลอกของคอนกรีตส่วนหุ้มเหล็กเสริมรับแรงดึง

6.4.2 รอยแตกร้าว (crack) ค่าการโก่งตัว (deflection) และค่าความเหนียว (ductility)

เมื่อพิจารณาในส่วนของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่าง RF6 และ RF7 พบว่า รอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF6 จะเหมือนกับคานตัวอย่าง RF1 ทั้งทางด้านความกว้าง ความยาว และการกระจายตัว ในขณะที่รอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF7 จะแตกต่างจากรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF1 คือ มีการกระจายตัวน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการเสริมแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเพียง 1 แถบ ไม่สามารถช่วยเพิ่มการกระจายตัวของรอยแตกร้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งคานตัวอย่าง RF7 เกิดการวิบัติที่น้ำหนักกระทำน้อยกว่าคานตัวอย่าง RF1 รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจึงเกิดการกระจุกตัวสูง

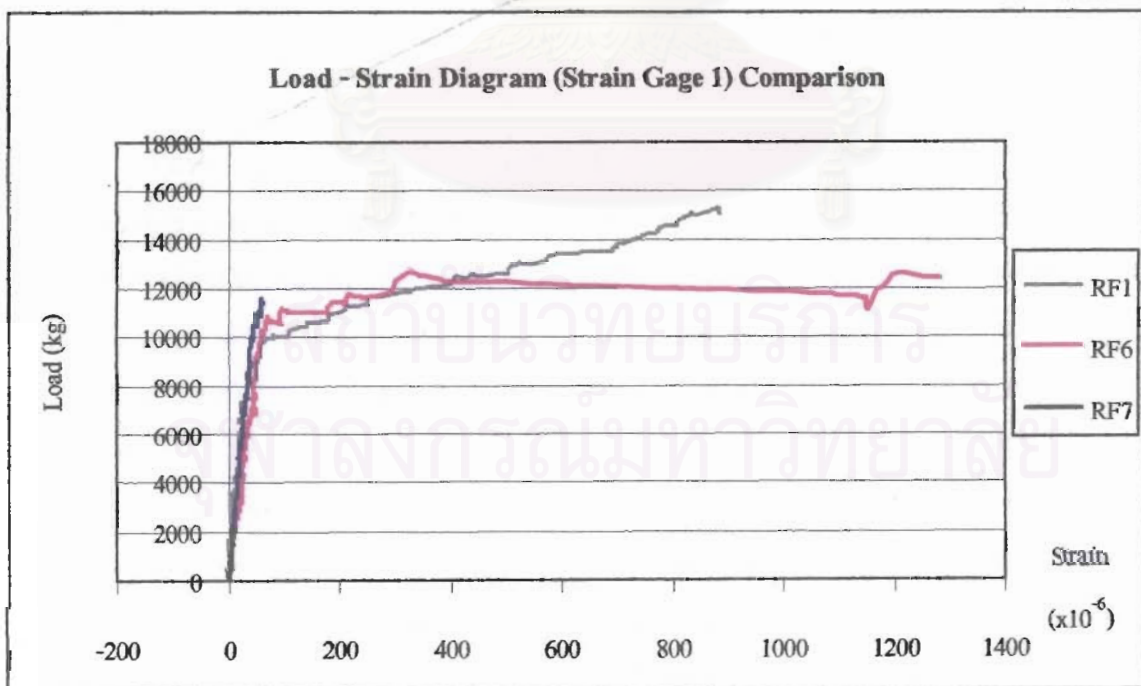
ในส่วนของค่าการโก่งตัว เมื่อพิจารณารูปที่ 6.15 พบว่าความกว้าง หรือจำนวนแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนมีผลต่อค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่างอย่างชัดเจน โดยคานตัวอย่าง RF1 และ RF6 ที่มีการเสริมแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจำนวน 2 แถบ และ 3 แถบตามลำดับ จะมีค่าการโก่งตัวที่ใกล้เคียงกันทุกค่าน้ำหนักกระทำ ในขณะที่คานตัวอย่าง RF7 ซึ่งมีการเสริมแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจำนวน 1 แถบจะมีค่าการโก่งตัวที่มากกว่าคานตัวอย่าง RF1 และ RF6 ในทุกน้ำหนักกระทำ ยกตัวอย่างเช่น ที่น้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 7.5 ตัน คานตัวอย่าง RF1 RF6 และ RF7 จะมีค่าการโก่งตัว 3.18 มม. 3.23 มม. และ 4.08 มม. ตามลำดับ โดยค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง RF6 และ RF7 จะมีค่ามากกว่าค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง RF1 อยู่ร้อยละ 1.6 และ 28.3 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจำนวน 2 แถบและ 3 แถบ จะให้ช่วยเพิ่มค่าสติเฟนส์ให้แก่คานตัวอย่างได้มากกว่าจากการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจำนวน 1 แถบ ส่งผลให้การโก่งตัวของคานตัวอย่าง RF1 และ RF6 มีค่าน้อยกว่าคานตัวอย่าง RF7

ในส่วนของค่าความเหนียว จากตารางที่ 6.1 พบว่าคานตัวอย่าง RF6 เกิดการวิบัติก่อนที่เหล็กเสริมรับแรงดึงจะถึงจุดคราก สังกัดได้จากค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดที่ 4 ซึ่งติดตั้งไว้ที่ผิวเหล็กเสริมรับแรงดึงบริเวณกึ่งกลางคานตัวอย่าง ในรูปที่ 5.39 ไม่มีการเปลี่ยนค่าความชัน โดยลักษณะการวิบัติดังกล่าวเป็นการวิบัติแบบเปราะอย่างชัดเจน และเนื่องจากคานตัวอย่าง RF6 เกิดการวิบัติก่อนที่เหล็กเสริมรับแรงดึงจะถึงจุดครากนี้เองจึงทำให้ไม่สามารถหาค่าดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่าง RF6 ได้ ในขณะที่คานตัวอย่าง RF7 เกิดการวิบัติหลังจากเหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดคราก จึงสามารถหาค่าดัชนีความเหนียวได้เท่ากับ 1.3 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่าง RF1 แม้ว่าคานตัวอย่าง RF7 จะมีน้ำหนักประลัยน้อยกว่าคานตัวอย่าง RF1 อยู่ร้อยละ

24.2 ซึ่งสาเหตุที่คานตัวอย่าง RF1 มีค่าดัชนีความเหนียวสูงกว่าคานตัวอย่าง RF7 เนื่องจากคานตัวอย่าง RF1 เกิดการวิบัติที่น้ำหนักประลัยสูงกว่าคานตัวอย่าง RF7 โดยมีค่าสตีเฟนสของคานและลักษณะการวิบัติที่คล้ายกัน

6.4.3 ค่าความเข้มของหน่วยแรงที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

การวิเคราะห์ในหัวข้อนี้จะพิจารณาค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดตั้งไว้บนผิวเหล็กเสริมรับแรงดึง เพียงตำแหน่งเดียวคือ ที่ระยะ 5 ซม. จากจุดรองรับ เนื่องจากคานตัวอย่าง RF6 และ RF7 ถูกติดตั้งมาตรวัดความเครียดไว้ที่ตำแหน่งดังกล่าวเพียงตำแหน่งเดียว โดยข้อมูลที่ได้จะถูกนำเสนอในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าความเครียดดังแสดงในรูปที่ 6.17 โดยเมื่อพิจารณารูปที่ 6.17 แล้วพบว่าเส้นความสัมพันธ์ของคานตัวอย่าง RF7 จะมีค่าความชันเพียงค่าเดียวตั้งแต่เริ่มให้น้ำหนักกระทำจนกระทั่งเกิดการวิบัติ ซึ่งแตกต่างจากเส้นความสัมพันธ์ของคานตัวอย่าง RF1 และ RF6 ที่มีค่าความชัน 2 ค่า เนื่องจากคานตัวอย่าง RF7 เกิดการวิบัติจากการหลุดลอกของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่น้ำหนักกระทำไม่มาก ทำให้บริเวณโดยรอบของหน้าตัดคานที่ติดตั้งมาตรวัดความเครียดไม่เกิดการแตกร้าว หน้าตัดดังกล่าวจึงไม่มีการเสียสตีเฟนส อีกทั้งแรงดึงในแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนยังมีค่าน้อยจึงก่อให้เกิดหน่วยแรงดึงและหน่วยแรงเฉือนที่ถ่ายไปยังเนื้อคอนกรีตไม่มากนัก ส่งผลให้ค่าความเครียดที่วัดได้ ณ จุดวิบัติจึงมีค่าน้อยกว่าคานตัวอย่าง RF1 และ RF6



รูปที่ 6.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าความเครียดของคาน RF1 RF6 และ RF7

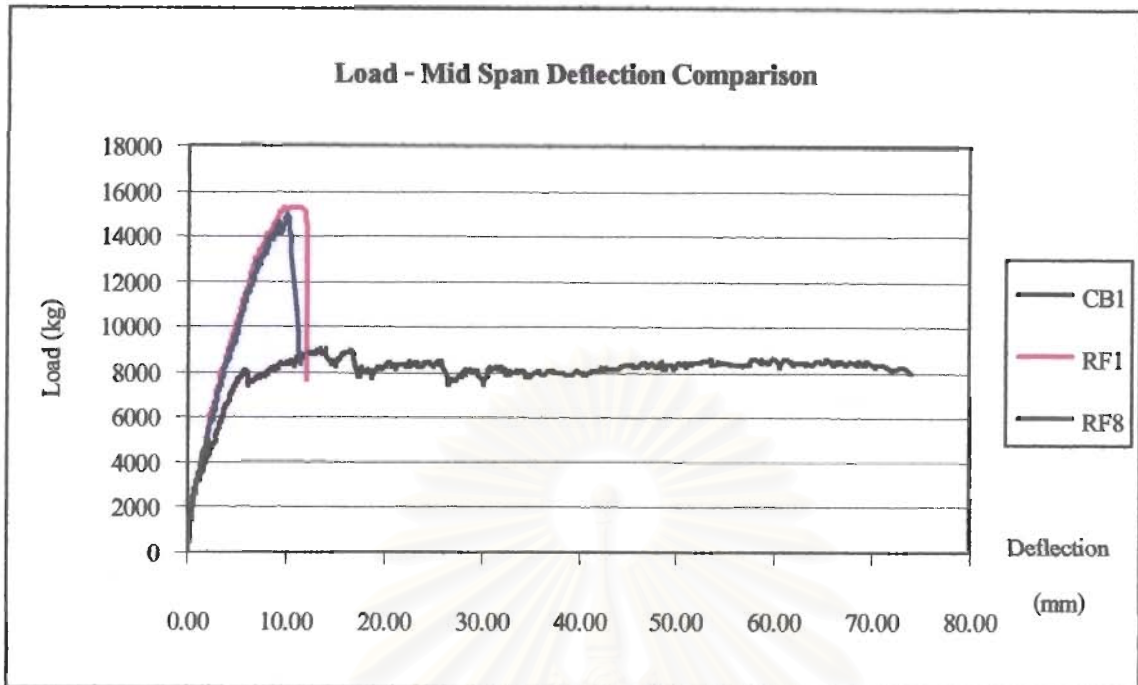
และเมื่อพิจารณาค่าความเครียดของคานตัวอย่าง RF6 ที่น้ำหนักกระทำประมาณ 12.0 ตัน พบว่า ค่าความเครียดที่วัดได้มีค่าสูงกว่าค่าความเครียดที่วัดได้จากคานตัวอย่าง RF1 และ RF7 อย่างชัดเจน ทั้งนี้เป็นผลมาจากการดึงตัวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ทำให้ค่าแรงดึงในแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนถูกถ่ายไปยังเนื้อคอนกรีต (ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 6.3.3) และณ จุดวิบัติ ค่าที่วัดได้จากคานตัวอย่าง RF6 คงมีค่ามากกว่าค่าที่วัดได้จากคานตัวอย่าง RF1 ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทั้งสอง ที่พบว่าคานตัวอย่าง RF1 เกิดการวิบัติจากหน่วยแรงเฉือนที่วัสดุประสาน ในขณะที่คานตัวอย่าง RF6 เกิดการวิบัติจากหน่วยแรงดึงหลักในเนื้อคอนกรีต

6.5 อัตราส่วนระหว่างความหนาของชั้นกาวต่อความหนาของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

ในการวิเคราะห์ผลของอัตราส่วนความหนาของชั้นกาวต่อความหนาของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน จะนำข้อมูลการทดสอบของคานตัวอย่าง RF1 และ RF8 มาพิจารณาเปรียบเทียบกัน ซึ่งโดยปกติแล้วความหนาของวัสดุประสานในการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ในการศึกษาจะมีความหนาประมาณ 2.0 มม. แต่สำหรับคานตัวอย่าง RF8 ความหนาของชั้นวัสดุประสานจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.8 มม. ซึ่งจะทำให้อัตราส่วนระหว่างความหนาของชั้นกาวต่อความหนาของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจะมีค่าประมาณ 0.67 แทนที่จะเป็น 1.67 อนึ่งการวิเคราะห์ในหัวข้อนี้ จะขอกล่าวถึงผลของอัตราส่วนระหว่างความหนาของชั้นกาวต่อความหนาของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีต่อ กำลังรับแรงดัด ค่าการโก่งตัว ค่าความเหนียว รอยแตกร้าว และลักษณะการวิบัติ ซึ่งเป็นพฤติกรรมโดยรวมไว้ในหัวข้อเดียวกัน

6.5.1 พฤติกรรมโดยรวม

เมื่อพิจารณารูปที่ 6.18 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง CB1 RF1 และ RF8 พบว่าอัตราส่วนระหว่างความหนาของชั้นกาวต่อความหนาของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนไม่มีผลต่อกำลังรับแรงดัดและค่าการโก่งตัว รวมถึงค่าดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่าง ดังจะเห็นได้จากค่าน้ำหนักประลัยของคานตัวอย่าง RF1 และ RF8 มีค่าประมาณ 15.3 ตัน และ 15.0 ตันตามลำดับ (น้ำหนักประลัยของคานตัวอย่าง RF8 มีค่าน้อยกว่าคานตัวอย่าง RF1 อยู่ 2.0%) จะเห็นได้ว่าผลต่างนี้แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย จนไม่มีนัยสำคัญในการพิจารณา ในส่วนของค่าการโก่งตัวซึ่งสามารถพิจารณาได้ที่น้ำหนักกระทำใดๆ ยกตัวอย่างเช่นที่น้ำหนักกระทำประมาณ 7.5 ตัน ค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง RF1 และ RF8 มีค่าเท่ากับ 3.18 มม. และ 3.49 มม.ตามลำดับ ซึ่งก็พบว่าค่าที่วัดได้มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเช่นกัน ในขณะที่ดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่างทั้งสองกลับมีค่าเท่ากันคือมีค่าเท่ากับ 1.5 (ตารางที่ 6.1) ทั้งนี้การที่น้ำหนักประลัย ค่าการโก่งตัว และดัชนีความเหนียวมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย อาจเกิดจากการแปรผันของตัวแปรควบคุมที่ควบคุมได้ยากเช่น กำลังของวัสดุ การติดตั้งเครื่องมือเป็นต้น



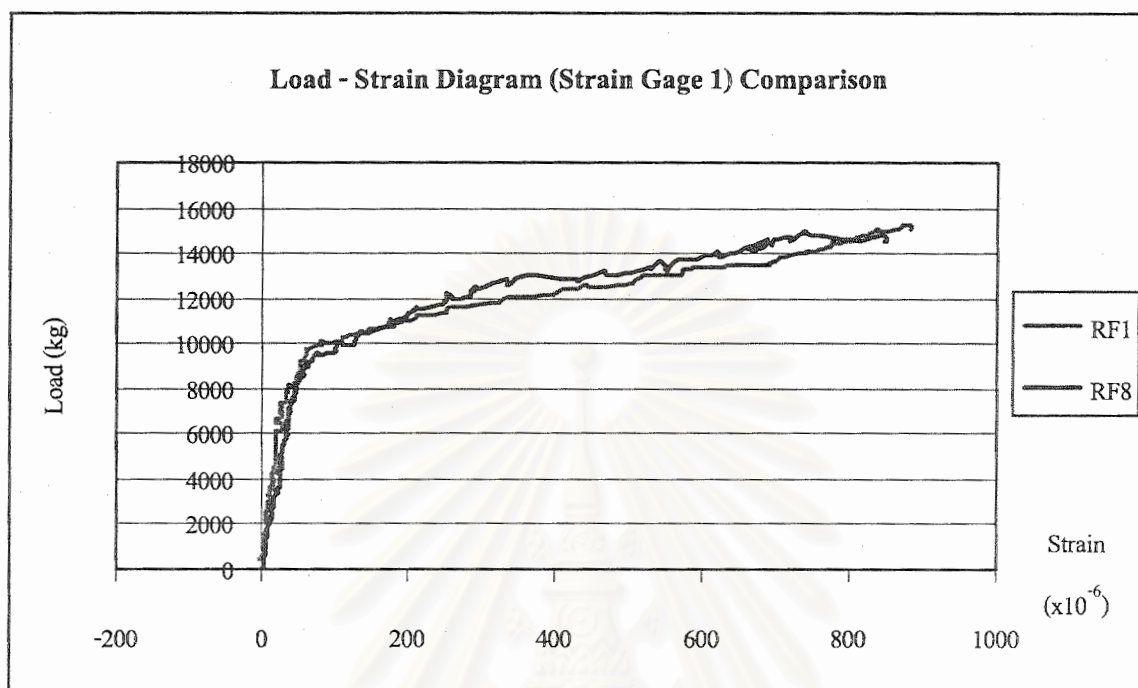
รูปที่ 6.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน CB1 RF1 และ RF8

และเมื่อพิจารณารอยแตกร้าวและลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทั้งสอง พบว่าทั้งรอยแตกร้าวและลักษณะการวิบัติมีลักษณะที่ไม่แตกต่างกัน กล่าวคือ คานตัวอย่างทั้งสองมีรอยแตกร้าวที่แคบและมีการกระจายตัวสูง ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 6.13 และมีการวิบัติจากการหลุดลอกออกของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน เนื่องจากหน่วยแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสของวัสดุประสานกับเนื้อคอนกรีตมีค่ามากกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของวัสดุประสาน ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่าอัตราส่วนความหนาของชั้นกาวต่อความหนาของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่แตกต่างกัน ไม่ทำให้ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างเปลี่ยนไป

6.5.2 ค่าความเข้มของหน่วยแรงที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

การวิเคราะห์ในหัวข้อนี้จะพิจารณาค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียดที่ติดตั้งไว้บนผิวเหล็กเสริมรับแรงดึง เพียงตำแหน่งเดียวคือ ที่ระยะ 5 ซม. จากจุดรองรับ เนื่องจากคานตัวอย่าง RF8 ถูกติดตั้งมาตรวัดความเครียดไว้ที่ตำแหน่งดังกล่าวเพียงตำแหน่งเดียว ซึ่งข้อมูลที่ได้จะถูกนำเสนอในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าความเครียดดังแสดงในรูปที่ 6.19 โดยจากรูปที่ 6.19 พบว่าเส้นความสัมพันธ์ของคานตัวอย่างทั้งสองมีลักษณะคล้ายกันมาก ทั้งลักษณะของเส้นความสัมพันธ์ แนวโน้ม หรือแม้แต่จุดเปลี่ยนค่าความชัน อีกทั้งค่าที่วัดได้ก็มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งจากลักษณะของเส้นความสัมพันธ์ที่คล้ายกันมากนี้ ทำให้ไม่สามารถสรุปได้ว่าค่าความเครียดที่วัดได้จากคานตัวอย่างทั้งสองมีค่าแตกต่างกันเนื่องจากผลของอัตราส่วน

ความหนาของชั้นกาวต่อความหนาของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนหรือเนื่องจากค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในการทดสอบ



รูปที่ 6.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าความเครียดของคาน RF1 และ RF8

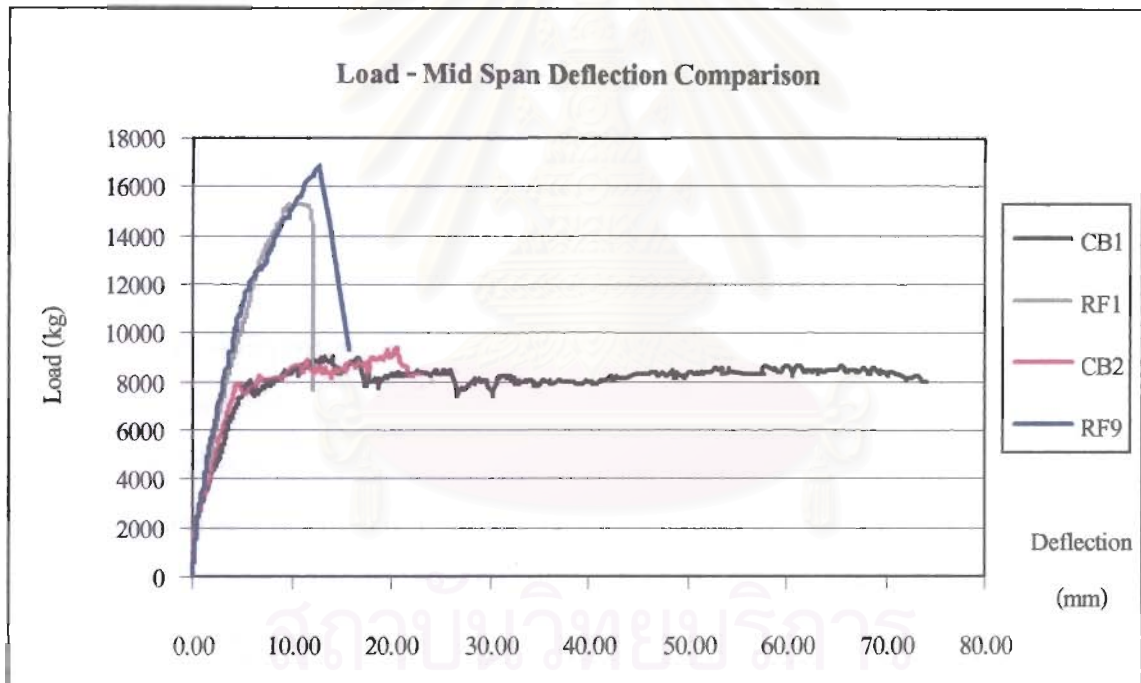
6.6 ผลของขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง

ในการพิจารณาผลของขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง จะนำข้อมูลของคานตัวอย่าง CB1 RF1 CB2 และ RF9 มาเปรียบเทียบกัน โดยในคานตัวอย่าง CB2 และ RF9 จะทำการเปลี่ยนขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึงจาก DB12 มาตรฐาน SD40 เป็น DB16 มาตรฐาน SD30 สาเหตุที่เปลี่ยนมาตรฐานของเหล็กเสริมรับแรงดึงจาก SD40 เป็น SD30 ด้วยนั้น เนื่องจากต้องการให้คานตัวอย่าง CB1 และ CB2 มีน้ำหนักประลัยที่ใกล้เคียงกัน (จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง (strain compatibility method) พบว่าน้ำหนักประลัยของคานตัวอย่าง CB1 และ CB2 มีค่าประมาณ 7.3 ตัน และ 8.5 ตันตามลำดับ และน้ำหนักประลัยจากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 8.0 ตัน และ 8.3 ตัน ตามลำดับ) ซึ่งจะทำให้คานตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่ม ซึ่งได้แก่ คานตัวอย่าง CB1 และ RF1 (กลุ่มที่ใช้เหล็กเสริมรับแรงดึง DB12 มาตรฐาน SD40) และคานตัวอย่าง CB2 และ RF9 (กลุ่มที่ใช้เหล็กเสริมรับแรงดึง DB16 มาตรฐาน SD30) สามารถเปรียบเทียบผลกันง่ายขึ้น โดยลักษณะของคานตัวอย่างทั้งสองจะเป็นไปตามตารางที่ 6.4 อนึ่งการวิเคราะห์ผลของปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงจะแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆดังแสดงด้านล่าง

ตารางที่ 6.4 แสดงลักษณะของคาน CB1 CB2 RF1 และ RF9

คานตัวอย่าง	แอมพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน		เหล็กเสริม รับแรงอัด	เหล็กเสริม รับแรงดึง
	จำนวน	ความยาว (ซม.)		
CB1	2	190	DB12 SD40	DB12 SD40
RF1	2	190	DB12 SD40	DB12 SD40
CB2	2	190	DB12 SD40	DB16 SD30
RF9	2	190	DB12 SD40	DB16 SD30

6.6.1 กำลังรับแรงดัด (flexural strength)



รูปที่ 6.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าการโก่งตัวของคาน CB1 CB2 RF1 และ RF9

เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัว ณ จุดกึ่งกลางของคานตัวอย่าง CB1 CB2 RF1 และ RF9 มาเขียนลงบนแกนความสัมพันธ์เดียวกันดังรูปที่ 6.20 พบว่าการเปลี่ยนแปลงขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึงมีผลต่อกำลังรับแรงดัดของคานตัวอย่างไม่ชัดเจน เนื่องจากน้ำหนักประลัยของคานตัวอย่าง RF9 มีค่ามากกว่าน้ำหนักประลัยของคานตัวอย่าง RF1 อยู่ร้อยละ 9.8 (น้ำหนักประลัยของคานตัวอย่าง RF1 และ RF9 มีค่าประมาณ 15.3 ตันและ 16.8 ตัน ตามลำดับ) ในขณะที่ส่วนต่างของน้ำหนักประลัยของคานตัวอย่าง CB1 และ CB2 ซึ่งคานตัวอย่าง CB2 มีค่ามาก

กว่าน้ำหนักประลัยของคานตัวอย่าง CB1 อยู่ร้อยละ 7.5 ส่วนต่างที่เพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 2.3 มีนัยสำคัญไม่เพียงพอต่อการสรุปว่า การเปลี่ยนขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึงมีผลต่อน้ำหนักประลัยของคานที่เสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ทั้งนี้ค่าที่แตกต่างกันอาจเกิดจากการแปรผันของตัวแปรควบคุมที่ควบคุมได้ยากเช่น กำลังของวัสดุ การติดตั้งเครื่องมือ เป็นต้น

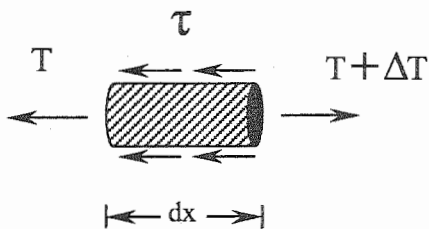
6.6.2 ค่าการโก่งตัว (deflection) และค่าความเหนียว (ductility)

ในส่วนของค่าการโก่งตัว เมื่อพิจารณาจากเส้นความสัมพันธ์ของคานตัวอย่าง RF1 และ RF9 ในรูปที่ 6.20 พบว่า เส้นความสัมพันธ์มีลักษณะและค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ซึ่งเมื่อพิจารณาที่น้ำหนักกระทำใดๆ ยกตัวอย่างเช่นที่น้ำหนักกระทำประมาณ 7.5 ตัน ค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง RF1 และ RF9 มีค่าเท่ากับ 3.18 มม. และ 2.85 มม. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าที่วัดได้มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย โดยค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง RF9 จะมีค่าน้อยกว่าคานตัวอย่าง RF1 เนื่องจากค่าสตีเฟนของคานตัวอย่าง RF9 จะมีค่ามากกว่าค่าสตีเฟนของคานตัวอย่าง RF1 อยู่เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณเหล็กเสริมรับแรงดึงที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาค่าความเหนียวของคานตัวอย่าง โดยอาศัยค่าจากตารางที่ 6.1 พบว่าดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่าง RF9 จะมีค่ามากกว่าดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่าง RF1 อยู่ร้อยละ 60.0 (คานตัวอย่าง RF1 และ RF9 มีค่าดัชนีความเหนียวประมาณ 1.5 และ 2.4 ตามลำดับ) ทั้งนี้เนื่องจากคานตัวอย่าง RF9 เกิดการวิบัติที่น้ำหนักกระทำสูงกว่าคานตัวอย่าง RF1 ทำให้ค่าการโก่งตัว ณ จุดวิบัติมีค่าสูงขึ้น ประกอบกับคานตัวอย่าง RF1 เกิดการครากที่น้ำหนักกระทำมากกว่าคานตัวอย่าง RF9 ค่าการโก่งตัวที่จุดครากจึงมีค่ามากกว่าคานตัวอย่าง RF9 ทำให้ค่าดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่าง RF9 มีค่ามากกว่าคานตัวอย่าง RF1 ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น ในขณะที่การวิบัติของคานตัวอย่างทั้งสองมีลักษณะที่เหมือนกันดังจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

6.6.3 รอยแตกร้าว (crack) และลักษณะการวิบัติ (failure mode)

เมื่อพิจารณารอยแตกร้าวที่เกิดขึ้น พบว่ารอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF9 มีลักษณะคล้ายกับรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบนคานตัวอย่าง RF1 กล่าวคือ เป็นรอยแตกร้าวที่แคบ และกระจายตัวสูงกว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา ซึ่งเป็นผลเนื่องจากแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่ใช้เสริมกำลัง แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบนคานตัวอย่าง RF1 และ RF9 จะสามารถสังเกตเห็นลักษณะที่แตกต่างกันของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบนคานตัวอย่างทั้งสอง ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง กล่าวคือ รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบนคานตัวอย่าง RF9 จะมีความกว้างและกระจุกตัวมากกว่ารอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบนคานตัวอย่าง RF1 ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งเดียวกันและที่น้ำหนักกระทำเท่ากัน ค่าความเค้นเฉือน (shear stress) ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวเหล็กกับคอนกรีตในคานตัวอย่างทั้งสองจะมีค่าแตกต่างกัน โดยจะเป็นอัตราส่วนต่อกัน ดังแสดงในสมการที่ (6.3) (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง.) โดยความเค้นเฉือนเหล่านี้จะถูกเข้าสู่เนื้อคอนกรีตในรูปของแรงดึง ซึ่งเมื่อเนื้อคอนกรีตเกิดการแตกร้าวแล้วค่าความเค้น



$$\tau = \frac{\Delta T}{2\pi r} \tag{6.2}$$

$$\frac{\tau_{16}}{\tau_{12}} = \frac{r_{16}}{r_{12}} \tag{6.3}$$

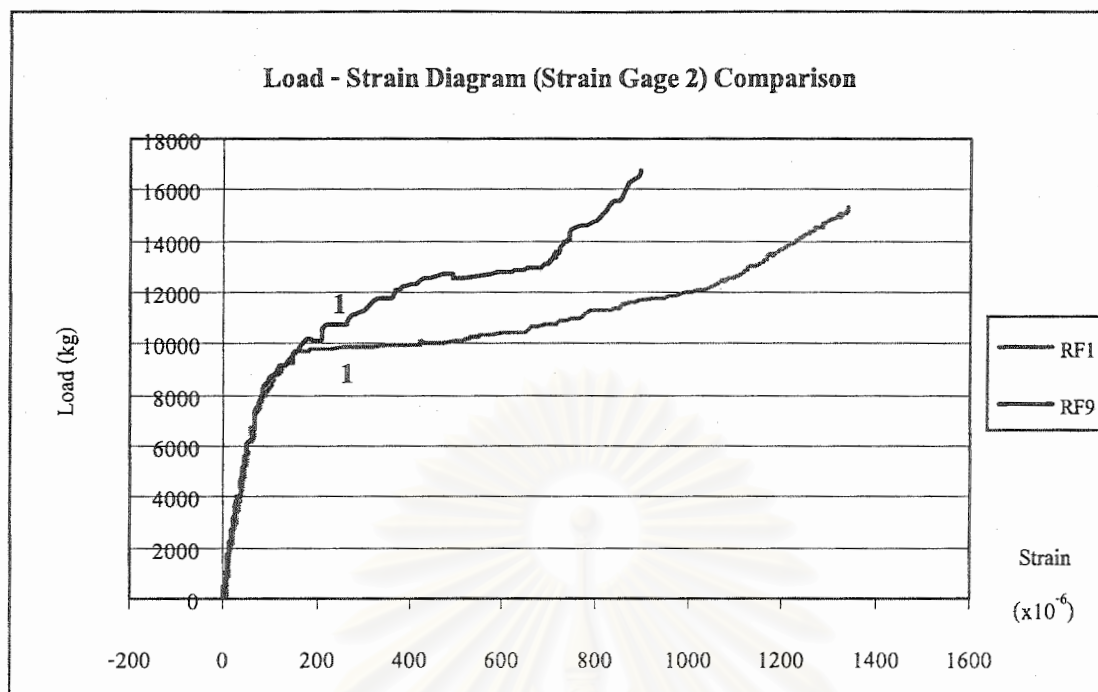
รูปที่ 6.21 แสดงแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อเหล็กเสริมรับดึง

เดือนเหล่านี้จะมีส่วนช่วยขยายรอยแตกร้าวให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยจะดึงรั้งคอนกรีตที่แตกร้าวให้แยกออกจากกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาสมการที่ (6.3) จะพบว่า เมื่อใช้เหล็กเสริมรับแรงดึงที่มีขนาดใหญ่ ค่าความเค้นแรงเดือนระหว่างผิวเหล็กเสริมรับแรงดึงกับเนื้อคอนกรีตจะมีค่าสูงกว่าการใช้เหล็กเสริมรับแรงดึงที่มีขนาดเล็ก ส่งผลให้ค่าแรงดึงที่ดึงรั้งคอนกรีตที่แตกร้าวให้แยกออกจากกันมีค่าเพิ่มขึ้น รอยแตกร้าวในคานคอนกรีตที่เสริมด้วยเหล็กเสริมรับแรงดึงที่มีขนาดใหญ่จึงมีความกว้างมากกว่าคานคอนกรีตที่เสริมด้วยเหล็กเสริมรับแรงดึงที่มีขนาดเล็ก แต่เนื่องจากคานตัวอย่าง RF9 มีการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจึงแคบกว่ารอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบนคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา

ในส่วนของคุณสมบัติของการวิบัติ ถึงแม้ค่าดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่าง RF9 จะมากกว่าคานตัวอย่าง RF1 อยู่ถึงร้อยละ 60.0 ก็ตาม แต่เมื่อนำค่าดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่าง RF9 มาเปรียบเทียบกับค่าดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่าง CB1 หรือ CB2 แล้วจะพบว่ายังมีค่าน้อยกว่ามาก จนทำให้การวิบัติของคานตัวอย่าง RF9 ยังคงมีพฤติกรรมแบบเปราะอยู่อย่างชัดเจน ซึ่งลักษณะการวิบัตินี้ยังคงเหมือนกับคานตัวอย่าง RF1 กล่าวคือ เป็นการวิบัติแบบเฉพาะที่ (local failure) จากการหลุดลอกตัวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (debonded failure) อย่างทันทีทันใด ซึ่งจากลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่าง RF1 และ RF9 ที่เหมือนกันทุกประการนี้จึงอาจสรุปได้ว่าการเสริมเหล็กเสริมรับแรงดึงที่มีขนาดต่างกันไม่มีผลต่อลักษณะการวิบัติแต่อย่างใด

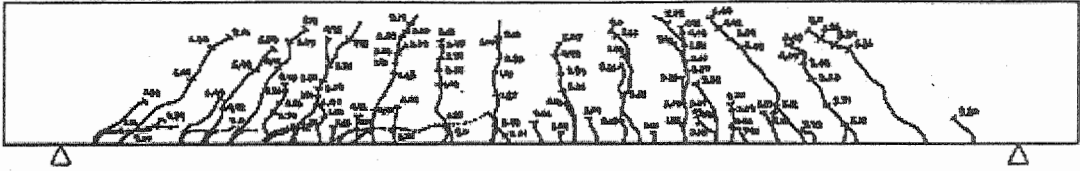
6.6.4 ค่าความเข้มของหน่วยแรงที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

ในคานตัวอย่าง RF1 และ RF9 ได้ทำการติดตั้งมาตรวัดความเครียดเพื่อวัดค่าความเครียดบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน โดยติดตั้งบนผิวเหล็กเสริมรับแรงดึงทั้งหมด 3 ตำแหน่ง คือ ที่ตำแหน่ง 5 ซม. 15 ซม. และ 25 ซม. จากจุดรองรับ แต่มาตรวัดความเครียดทั้งสามตำแหน่งดังกล่าวของคานตัวอย่าง RF9 สามารถใช้งานได้เพียงตำแหน่งเดียวคือ ที่ระยะ 15 ซม. จากจุดรองรับ เนื่องจากข้อผิดพลาดในการติดตั้ง ซึ่งเมื่อนำข้อมูลจากมาตรวัดความเครียดในตำแหน่งดังกล่าวของคานตัวอย่างทั้งสองมาเขียนลงบนแกนความสัมพันธ์เดียวกัน (ดังรูปที่ 6.22) โดยจะพบว่าเส้นความสัมพันธ์ของคานตัวอย่างทั้งสองมีลักษณะคล้ายกัน ทั้งลักษณะของเส้นความสัมพันธ์แนวโน้ม หรือแม้แต่จุดเปลี่ยนค่าความชัน กล่าวคือในช่วงแรกของความสัมพันธ์ (ในช่วงระหว่าง

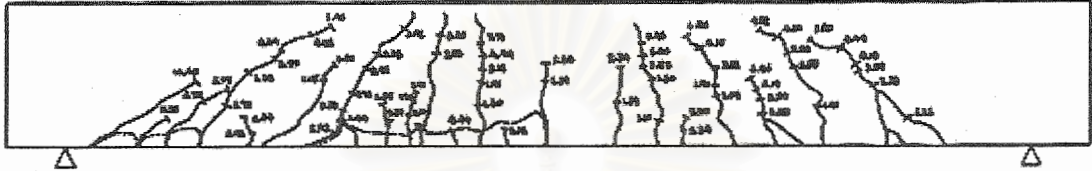


รูปที่ 6.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับค่าความเครียดของคาน RF1 และ RF9

น้ำหนักกระทำ 0.0 ตันถึง 10.0 ตัน) ค่าความเครียดที่วัดได้จากคานตัวอย่างทั้งสองมีค่าเกือบจะเท่ากัน โดยตลอด แต่เมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 10 ตัน ซึ่งเป็นจุดเปลี่ยนค่าความชันของเส้นความสัมพันธ์ทั้งสอง เส้นความสัมพันธ์ทั้งสองเริ่มแยกออกจากกัน โดยนับตั้งแต่จุดเปลี่ยนค่าความชันเป็นต้นไป ค่าความเครียดของคานตัวอย่าง RF9 จะมีค่าน้อยกว่าคานตัวอย่าง RF1 อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากภายหลังจุดเปลี่ยนค่าความชัน หน้าตัด ณ ตำแหน่งที่คิดมาตรวัดความเครียดของคานตัวอย่างทั้งสองจะมีค่าสติเฟเนสที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยคานตัวอย่าง RF9 จะมีค่าสติเฟเนสที่หน้าตัดดังกล่าวสูงกว่า ณ ตำแหน่งเดียวกันของคานตัวอย่าง RF1 (สังเกตได้จากรูปที่ 6.22 ค่าความชันในส่วนที่ 1 ของเส้นความสัมพันธ์ของคานตัวอย่าง RF9 มีค่ามากกว่าค่าความชันในส่วนที่ 1 ของคานตัวอย่าง RF1) ส่งผลให้ที่น้ำหนักกระทำเท่ากันค่าความเครียดของคานตัวอย่าง RF1 จึงมีค่าสูงกว่าคานตัวอย่าง RF9 ทั้งนี้การที่ค่าสติเฟเนส ณ หน้าตัดดังกล่าวของคานตัวอย่าง RF9 มีค่าสูงกว่าคานตัวอย่าง RF1 เนื่องมาจากรอยแตกร้าวของคานตัวอย่าง RF9 มีการกระจุกตัวมากกว่าคานตัวอย่าง RF1 ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 6.6.3 (ดูรูปที่ 6.23 (ก) และ (ข) ประกอบ) ค่าสติเฟเนสในแต่ละหน้าตัดของคานตัวอย่าง RF9 จึงมีค่าไม่สม่ำเสมอเหมือนกับในคานตัวอย่าง RF1 (หน้าตัดของคานตัวอย่าง RF9 ที่ไม่เกิดการแตกร้าวจะมีค่าสติเฟเนสของหน้าตัดสูงกว่าในส่วนที่เกิดการแตกร้าวมาก ในขณะที่คานตัวอย่าง RF1 จะมีค่าสติเฟเนสใกล้เคียงกันในทุกหน้าตัด เนื่องจากรอยแตกร้าวมีการกระจายตัวสูง) ส่งผลให้ตำแหน่งที่คิดมาตรวัดความเครียดของคานตัวอย่าง RF9 ซึ่งเกิดรอยแตกร้าวไม่มาก จึงมีค่าสติเฟเนสสูงกว่าคานตัวอย่าง RF1

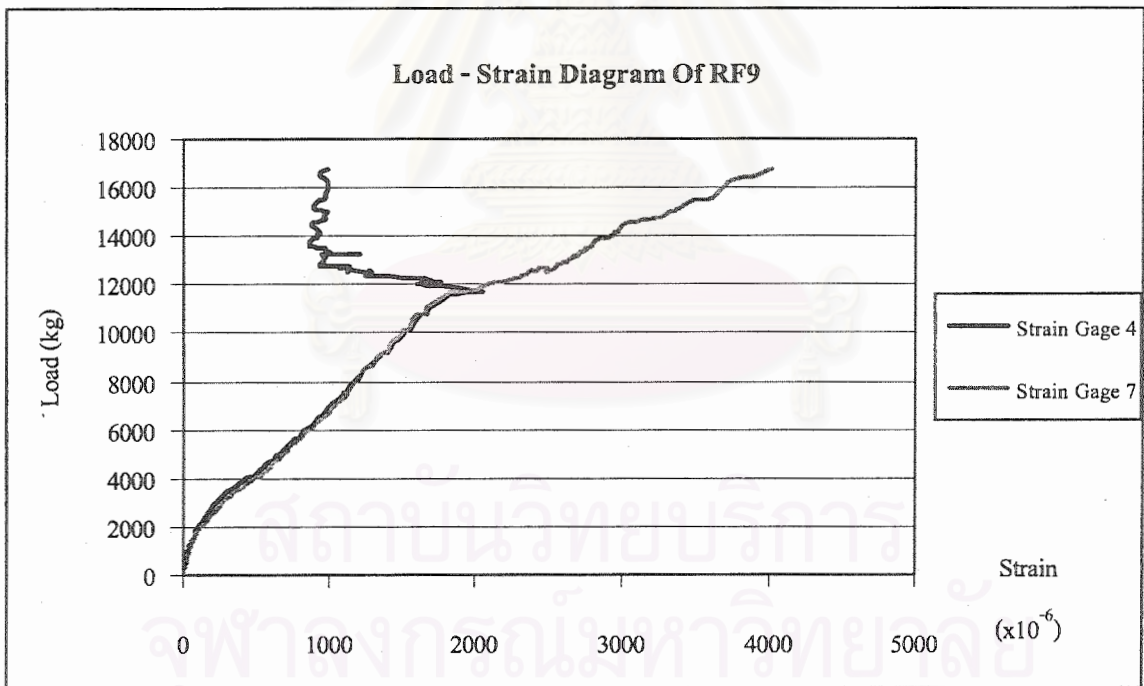


(ก) แสดงรอยแตกร้าวของคาน RF1



(ข) แสดงรอยแตกร้าวของคาน RF9

รูปที่ 6.23 แสดงรอยแตกร้าวของคาน RF1 และ RF9



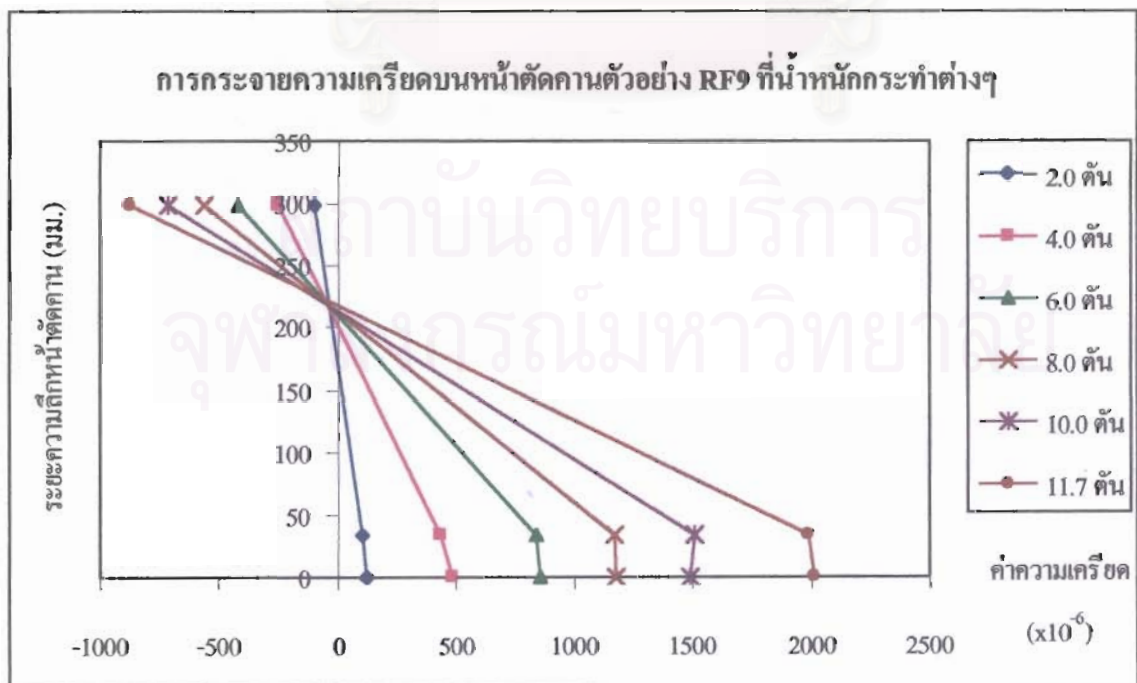
รูปที่ 6.24 แสดงค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียดที่ 4 และ 7 ของคาน RF9

ในขณะเดียวกันเมื่อนำค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียดที่ 4 และมาตรวัดที่ 7 (ตำแหน่งของมาตรวัดต่างๆ ดูรูปที่ 4.3 ประกอบ) มาเขียนลงแกนความสัมพันธ์เดียวกันดังรูปที่ 6.24 พบว่าเส้นความสัมพันธ์ของมาตรวัดทั้ง 2 ซ้อนทับกันจนเกือบเป็นเส้นเดียวกันตั้งแต่เริ่มให้น้ำหนักกระทำจนกระทั่งน้ำหนักกระทำมีค่าประมาณ 11.7 ตัน (ภายหลังจากน้ำหนักกระทำ 11.7 ตัน

มาตรวัดความเครียดที่ 4 ไม่สามารถใช้งานต่อได้) ซึ่งค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดทั้งสองมีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 6.5 และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของความเครียดบนหน้าตัด ณ จุดกึ่งกลางคาน โดยพิจารณาค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียดที่ 4, 5 และ 7 มาเขียนลงบนแกนความสัมพันธ์ โดยให้แกนในแนวนอนแสดงค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดทั้งสามและแกนในแนวตั้งแสดงระยะบนหน้าตัด จะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 6.25

ตารางที่ 6.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดความเครียดที่ 4 และ 7

น้ำหนักกระทำ (ตัน)	ค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดที่ 4 ($\times 10^{-6}$)	ค่าความเครียดที่วัดได้จากมาตรวัดที่ 7 ($\times 10^{-6}$)	ผลต่างของค่าความเครียดจากมาตรวัดที่ 4 และ 7 ($\times 10^{-6}$)	หมายเหตุ
2.0	106	124	18	No crack appear
4.0	435	486	51	-
6.0	842	854	12	-
8.0	1,170	1,180	10	-
10.0	1,503	1,486	17	-
11.7	1,985	2,013	28	Yielding State



รูปที่ 6.25 แสดงการกระจายความเครียดบนหน้าตัดคานตัวอย่าง RF9 ที่น้ำหนักกระทำต่างๆ

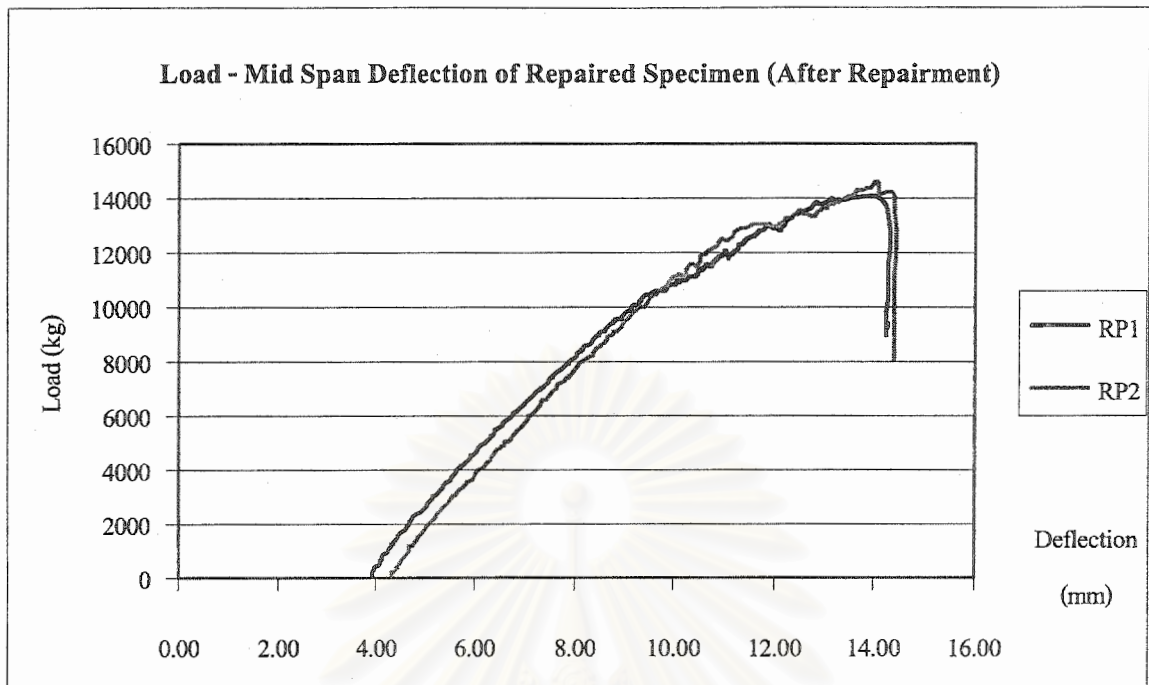
ซึ่งจากรูปที่ 6.25 พบว่าการกระจายตัวของค่าความเครียดที่ระดับผิวเหล็กเสริมรับแรงดึงและแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงต่อเนื่องจากความเครียดที่ผิวบนของคานคอนกรีตอย่างชัดเจนเฉพาะในช่วงนำหนักกระทำน้อยๆ หรือในช่วงที่หน้าตัดคอนกรีตยังเกิดการแตกร้าวไม่มาก (หน้าตัดเกิดการแตกร้าวแรกที่นำหนักกระทำประมาณ 2.8 ตัน) แต่เมื่อนำหนักกระทำมีค่าประมาณ 6.0 ตัน ค่าความเครียด ณ ตำแหน่งทั้งสองจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก (ดังแสดงในตารางที่ 6.5) และไม่กระจายตัวเป็นเส้นตรงต่อเนื่องกับความเครียดที่ผิวบนของคานคอนกรีตอีกต่อไป ทั้งนี้เนื่องจากภายหลังจากที่คอนกรีตส่วนหุ้มเหล็กเสริมรับแรงดึงเกิดการแตกร้าวแล้ว คอนกรีตส่วนดังกล่าวจะสูญเสียสภาพไป ทำให้คอนกรีตส่วนหุ้มเหล็กเสริมไม่สามารถยึดรั้งเหล็กเสริมรับแรงดึงและแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนให้มีการกระจายตัวของค่าความเครียดเป็นเส้นตรงต่อเนื่องกับค่าความเครียดที่ผิวบนของคานคอนกรีตได้

6.7 ผลของการใช้วัสดุประสานก่อนการซ่อมแซมด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

สำหรับการวิเคราะห์ผลของการประสานรอยแตกร้าวของคานตัวอย่างโดยใช้วัสดุประสานก่อนการซ่อมแซมด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน จะพิจารณาเปรียบเทียบข้อมูลการทดสอบของคานตัวอย่าง RP1 และ RP2 ซึ่งเป็นคานตัวอย่างที่ถูกให้นำหนักกระทำจนเหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดครากและมีค่าการโก่งตัวที่จุดอนันนำหนักกระทำประมาณ 10.0 มม. โดยคานตัวอย่างทั้งสองจะมีค่าการโก่งตัวคงค้างเท่ากับ 3.9 มม. และ 4.3 มม. ตามลำดับ ทั้งนี้ภายหลังจากการให้นำหนักกระทำครั้งแรกคานตัวอย่าง RP2 จะถูกซ่อมแซมโดยการประสานรอยแตกร้าวด้วยวัสดุประสาน ในขณะที่คานตัวอย่าง RP1 ไม่มีการใช้วัสดุประสานประสานรอยแตกร้าว จากนั้นจะทำการเสริมกำลังคานตัวอย่างทั้งสองด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน และเมื่อวัสดุประสานที่ใช้ยึดระหว่างแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนกับเนื้อคอนกรีตได้กำลังสูงพอแล้ว (อายุประมาณ 7 วัน) จึงนำคานตัวอย่างทั้งสองขึ้นทดสอบอีกครั้งหนึ่ง โดยผลการทดสอบจากการให้นำหนักกระทำทั้ง 2 รอบ จะถูกแปรผลของข้อมูลใหม่ ก่อนจะนำมาพิจารณาเปรียบเทียบวิเคราะห์ตามหัวข้อต่างๆดังต่อไปนี้

6.7.1 กำลังรับแรงดัด (flexural strength)

เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างค่านำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางภายหลังจากซ่อมแซมของคานตัวอย่าง RP1 และ RP2 มาเขียนลงบนแกนความสัมพันธ์เดียวกันดังรูปที่ 6.26 พบว่าค่านำหนักประลัยของคานตัวอย่าง RP1 และ RP2 มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย กล่าวคือ คานตัวอย่าง RP1 มีน้ำหนักประลัยประมาณ 13.9 ตัน ในขณะที่คานตัวอย่าง RP2 มีน้ำหนักประลัยประมาณ 14.6 ตัน โดยมีค่ามากกว่าคานตัวอย่าง RP1 อยู่ร้อยละ 5.0 ซึ่งส่วนต่างดังกล่าวมีค่าน้อยมากจนไม่มีนัยสำคัญเพียงพอที่จะสรุปได้ว่า เป็นผลสืบเนื่องมาจาก การประสานรอยแตกร้าวด้วยวัสดุประสาน ทั้งนี้ส่วนต่างดังกล่าวอาจเกิดขึ้นจากการแปรผันของตัวแปรควบคุมที่ควบคุมได้ยาก เช่น กำลังของวัสดุ ค่าตลาดเคลื่อนของเครื่องมือ หรือจากการติดตั้งเครื่องมือ เป็นต้น



รูปที่ 6.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวของคาน RP1 และ RP2

และเมื่อนำค่าน้ำหนักประลัยของคานตัวอย่าง RP1 และ RP2 ไปเปรียบเทียบกับคานตัวอย่าง RF1 ซึ่งเป็นคานตัวอย่างที่ใช้ศึกษาการเสริมกำลัง พบว่าค่าน้ำหนักประลัยของคานตัวอย่าง RP1 และ RP2 มีค่าน้อยกว่าค่าน้ำหนักประลัยของคานตัวอย่าง RF1 อยู่ร้อยละ 9.2 และร้อยละ 4.6 ตามลำดับ ถึงแม้ว่าคานตัวอย่างทั้งสองจะมีลักษณะการวิบัติที่เหมือนกับคานตัวอย่าง RF1 กล่าวคือ เกิดการวิบัติจากการหลุดลอกของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน แต่เนื่องจากคานตัวอย่างทั้งสองมีความเค้นค้ำเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุทั้งคอนกรีตและเหล็กเสริมอยู่ก่อนจากการให้น้ำหนักกระทำก่อนการซ่อมแซม จึงทำให้ประสิทธิภาพในการต้านทานแรงค้ำภายหลังการซ่อมแซมดีกว่าคานตัวอย่าง RF1 ซึ่งเป็นคานเสริมกำลังที่ยังไม่เกิดความเค้นค้ำใดๆ

6.7.2 ค่าการโก่งตัว (deflection) และค่าความเหนียว (ductility)

จากรูปที่ 6.26 เมื่อพิจารณาเส้นความสัมพันธ์ของคานตัวอย่างทั้งสองภายหลังการซ่อมแซม พบว่า ค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่างทั้งสองมีค่าใกล้เคียงโดยตลอด ถึงแม้ค่าการโก่งตัวค้ำก่อนการซ่อมแซมของคานตัวอย่างทั้งสองจะมีค่าแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ที่น้ำหนักประลัยค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง RP1 และ RP2 มีค่าประมาณ 14.2 และ 14.4 มม. ตามลำดับ อีกทั้งเมื่อพิจารณาค่าความชันของเส้นความสัมพันธ์ของคานตัวอย่างทั้งสอง จะพบว่าค่าความชันของเส้นความสัมพันธ์มีค่าใกล้เคียงกันมากหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ คานตัวอย่างทั้งสองมีค่าสตีเฟนส์ไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้สืบเนื่องจากคานตัวอย่างทั้งสองมีการเสริมเหล็กเสริมภายใน การให้น้ำหนักกระทำและการซ่อมแซมที่เหมือนกันทุกประการ ถึงแม้ว่าคานตัวอย่าง RP2 จะมีการประสานรอย

แตกร้าวด้วยวัสดุประสานก็ตาม แต่จากข้อมูลการทดสอบที่ได้ บ่งชี้ว่าคานตัวอย่างทั้งสองมีค่าสตีฟเนสที่ไม่แตกต่างกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าวัสดุประสานที่ใช้ประสานรอยแตกร้าวในคานตัวอย่าง RP2 ไม่มีผลต่อค่าการโก่งตัวหรือค่าสตีฟเนสของคานตัวอย่าง ซึ่งวัสดุประสานที่ใช้ประสานรอยแตกร้าวจะช่วยในส่วนของการใช้งาน (serviceability) โดยจะช่วยป้องกันการผุกร่อนของเหล็กเสริมภายใน (corrosion of steel reinforcement)

ในส่วนของคุณค่าความเหนียว ซึ่งพิจารณาโดยอาศัยค่าดัชนีความเหนียวจากตารางที่ 6.1 พบว่าคานตัวอย่าง RP1 มีค่าดัชนีความเหนียวมากกว่าคานตัวอย่าง RP2 อยู่ร้อยละ 39.1 (ดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่าง RP1 และ RP2 มีค่าเท่ากับ 3.2 และ 2.3 ตามลำดับ) ทั้งนี้เนื่องจากคานตัวอย่าง RP2 มีค่าการโก่งตัวที่จุดครากมากกว่าคานตัวอย่าง RP1 อยู่มาก ส่งผลให้ค่าดัชนีความเหนียวมีค่าต่ำกว่าคานตัวอย่าง RP1 ตามไปด้วย ซึ่งถึงแม้ว่าค่าดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่างทั้งสองจะมีค่าแตกต่างกันอยู่ร้อยละ 39.1 แต่พฤติกรรมของคานตัวอย่างทั้งสองยังคงเหมือนกัน (ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป) และมีน้ำหนักประลัยที่ใกล้เคียงกันดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 6.7.1

6.7.3 รอยแตกร้าว (crack) และลักษณะการวิบัติ (failure mode)

เมื่อพิจารณารอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นบนคานตัวอย่างทั้งสอง พบว่ารอยแตกร้าวส่วนใหญ่เป็นรอยแตกร้าวเดิมที่เกิดขึ้นจากการให้น้ำหนักกระทำก่อนการซ่อมแซม โดยรอยแตกร้าวดังกล่าวจะมีจำนวนน้อยแต่จะมีขนาดใหญ่ และกระจายตัวอยู่ตลอดช่วงคาน รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นก่อนการซ่อมแซมนี้จะมีลักษณะเหมือนกับรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่าง CB1 และ CB2 ซึ่งเป็นรอยแตกร้าวที่พบทั่วไปในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (ภายหลังการซ่อมแซม รอยแตกร้าวเหล่านี้จะแคบลง) ส่วนลักษณะของรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นจากการให้น้ำหนักกระทำภายหลังการซ่อมแซม จะมีทั้งที่เป็นรอยแตกร้าวเดิมที่ขยายตัวขึ้นและรอยแตกร้าวใหม่ โดยส่วนใหญ่จะเป็นรอยแตกร้าวใหม่ที่เกิดขึ้นในช่วงระยะ 75 ซม. จากจุดรองรับ ทั้งนี้เนื่องจากคอนกรีตที่มีรอยแตกร้าวอยู่เดิมจะมีค่าสตีฟเนสลดลงจึงทำให้ความเค้นที่เนื้อคอนกรีตส่วนที่แตกร้าวจะต้องรับ กระจายตัวไปยังส่วนที่ยังไม่แตกร้าวแทน ทำให้รอยแตกร้าวใหม่จึงเกิดขึ้นแทน

ในส่วนของคุณลักษณะการวิบัติ คานตัวอย่างทั้งสองมีลักษณะการวิบัติที่เหมือนกันทุกประการและยังคงเหมือนกับลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่าง RF1 กล่าวคือ เป็นการวิบัติแบบเฉพาะที่ (local failure) จากการหลุดลอกของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ถึงแม้ว่าค่าดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่าง RP1 และ RP2 จะมีค่ามากกว่าคานตัวอย่าง RF1 อยู่ถึงร้อยละ 113.3 และร้อยละ 53.3 ก็ตาม แต่ค่าดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่างทั้งสองก็ยังมีค่าน้อยกว่าคานตัวอย่าง CB1 และ CB2 อยู่มาก จึงทำให้พฤติกรรมการวิบัติยังคงเป็นการวิบัติแบบเปราะ

6.7.4 ค่าความเข้มของหน่วยแรงที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

ในคานตัวอย่าง RP1 และ RP2 ได้ติดตั้งมาตรวัดความเครียดไว้ที่ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนในตำแหน่ง 5 ซม. จากจุดรองรับเพียงตำแหน่งเดียว แต่เนื่องจากมาตรวัด

ความเครียดในคนตัวอย่าง RP2 ซ้ำรูปไม่สามารถใช้งานได้ คังนั้น จึงไม่สามารถเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลของการใช้วัสดุประสานซ่อมแซมรอยแตกร้าวก่อนการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่มีต่อค่าความเครียดที่บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับแบบจำลอง

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่มีอยู่แล้ว โดยการนำค่าตัวแปรต่างๆ จากตัวอย่างทดสอบแทนค่าลงในแบบจำลองเพื่อดูความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง ซึ่งในหัวข้อการศึกษานี้มีแบบจำลองที่เกี่ยวข้องและน่าสนใจอยู่ 2 แบบจำลองคือ แบบจำลองของ Malek และคณะ⁸ และแบบจำลองของ T.M. Robert² โดยแบบจำลองทั้งสองต่างก็เป็นแบบจำลองทำนายค่าความเข้มของหน่วยแรงที่บริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน แต่จากงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมาให้รายงานที่ตรงกันว่า แบบจำลองของ Malek และคณะสามารถทำนายค่าหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงดึงฉากได้ใกล้เคียงกับค่าการทดสอบมากกว่าแบบจำลองของ T. M. Robert ดังนั้นการศึกษานี้จึงนำแบบจำลองของ Malek และคณะ มาศึกษาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้

7.1 แบบจำลองของ Malek และคณะ⁸

Malek และคณะ ได้ทำการสร้างแบบจำลองอธิบายการเกิดความเข้มของหน่วยแรงเฉือน (shear stress) และหน่วยแรงดึงฉาก (normal stress) บริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใย โดยมีสมมติฐานว่า

- 1 วัสดุทั้ง 3 ชนิดคือ คอนกรีต พลาสติกเสริมเส้นใย และกาวมีพฤติกรรมยืดหยุ่นแบบเส้นตรงและมีเนื้อเดียวกันตลอด
- 2 ชั้นกาวมีการยึดเหนี่ยวที่สมบูรณ์กับหน้าตัดคอนกรีตและพลาสติกเสริมเส้นใย
- 3 การกระจายตัวของความเคียดเป็นเส้นตรงตลอดทั้งหน้าตัดคาน

โดยสมมติฐานดังกล่าวตั้งอยู่บนพฤติกรรมจริงของวัสดุบริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใยซึ่งเป็นบริเวณที่มีค่าโมเมนต์คดค้ำ ทำให้หน่วยแรงต่างๆ ที่เกิดจากแรงคดมีค่าน้อย จึงทำให้วัสดุในบริเวณดังกล่าวมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเป็นเส้นตรง แบบจำลองของ Malek และคณะจะพิจารณาหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงดึงฉากแยกออกจากกัน โดยแบบจำลองอธิบายการเกิดความเข้มของหน่วยแรงเฉือนและพจน์ต่างๆ ของแบบจำลองแสดงในสมการที่ (7.1) ถึง (7.6) และอาศัยรูปที่ 7.1 ประกอบการพิจารณา อนึ่งนิยามของตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองจะเป็นไปดังแสดงในหน้าที่ 122

$$\tau(x) = t_p [b_3 \sqrt{A} \cosh(\sqrt{A}x) - b_3 \sqrt{A} \sinh(\sqrt{A}x) + 2b_1x + b_2] \quad (7.1)$$

โดยที่

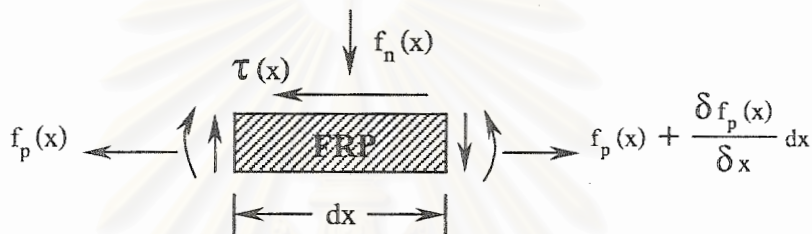
$$A = \frac{G_a}{t_a t_p E_p} \quad (7.2)$$

$$b_1 = \frac{\bar{y} a_1 E_p}{I_{tr} E_c} \quad (7.3)$$

$$b_2 = \frac{\bar{y} E_p}{I_{tr} E_c} (2a_1 L_0 + a_2) \quad (7.4)$$

$$b_3 = E_p \left[\frac{\bar{y}}{I_{tr} E_c} (a_1 L_0^2 + a_2 L_0 + a_3) + 2b_1 \frac{t_a t_p}{G_a} \right] \quad (7.5)$$

$$M(x_0) = a_1 x_0^2 + a_2 x_0 + a_3 \quad (7.6)$$



รูปที่ 7.1 แสดงแบบจำลองความเค้นที่เกิดขึ้นในพลาสติกเสริมเส้นใยของ Malek และคณะ

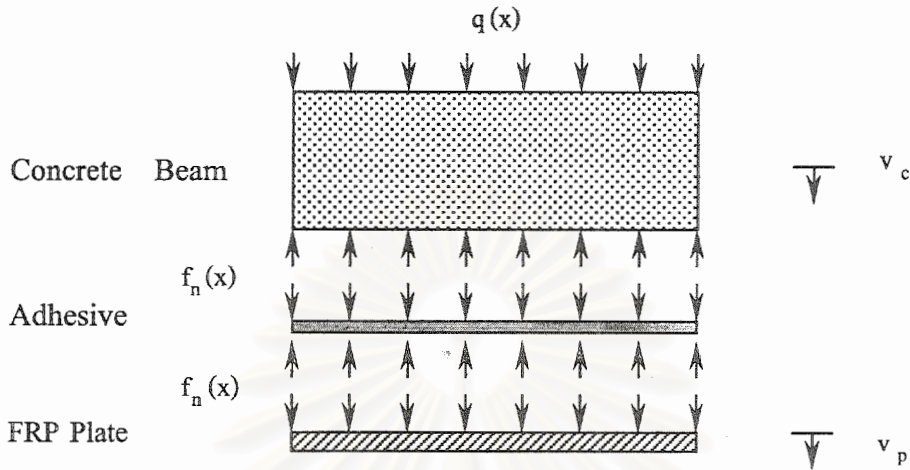
ในส่วนของแบบจำลองทำนายหน่วยแรงเฉือน สมการทั้งหมดที่อยู่ในพจน์ของตัวแปร x จะมีจุดเริ่มต้นอยู่ที่ปลายพลาสติกเสริมเส้นใย โดยคานจะมีโมเมนต์คด ($M(x_0)$) ดังแสดงในสมการที่ (7.6) ซึ่งจุดเริ่มต้นของตัวแปร x_0 จะเป็นจุดใดๆบนคาน แต่เพื่อให้ง่ายต่อการอ้างอิงตำแหน่ง Malek และคณะจึงสมมติให้จุดเริ่มต้นของตัวแปร x ห่างจากจุดเริ่มต้นของตัวแปร x_0 อยู่ L_0 ดังนั้นความสัมพันธ์ของ x และ x_0 จึงเป็น $x_0 = x + L_0$ โดยที่บริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใย ($x=0$) จะได้ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดดังสมการที่ (7.7)

$$\tau_{\max} = t_p (b_3 \sqrt{A} + b_2) \quad (7.7)$$

จากหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะก่อให้เกิดโมเมนต์ต้านทานภายในขึ้นในเนื้อคอนกรีต โดยโมเมนต์ภายในที่เกิดขึ้นนี้จะต้องนำไปรวมกับค่าโมเมนต์ภายในที่เกิดจากแรงกระทำภายนอกด้วย แล้วจึงนำไปคิดหาค่าหน่วยแรงคดภายในเนื้อคอนกรีต (flexural stress, σ_x) ซึ่งค่าโมเมนต์ภายในนี้จะอยู่ในรูปของหน่วยแรงเฉือนดังแสดงในสมการที่ (7.8)

$$M_m = L_0 b_p \bar{y}_c (\tau(x)) \quad (7.8)$$

ในส่วนองแบบจำลองอธิบายการเกิดความเข้มของหน่วยแรงตั้งฉาก ($f_n(x)$) และตัวแปรที่เกี่ยวข้องจะแสดงดังสมการที่ (7.9) ถึง (7.15) โดยพิจารณารูปที่ 7.2 ประกอบ และนิยามของตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองจะเป็นไปดังแสดงในหน้าที่ 122



รูปที่ 7.2 แสดงแบบจำลองความเค้นตั้งฉากในคานคอนกรีตติดพลาสติกเสริมเส้นใยของ Malek

$$f_n(x) = e^{-\beta x} \left[D_1 \cos(\beta x) + D_2 \sin(\beta x) \right] + \frac{q E_p I_p}{b_p E_c I_c} \quad (7.9)$$

$$D_1 = \left(\frac{K_n}{E_p I_p} \right) \left(\frac{v_p}{2\beta^3} \right) - \left(\frac{K_n}{E_c I_c} \right) \left(\frac{v_c + \beta M_0}{2\beta^3} \right) \quad (7.10)$$

$$D_2 = \left(\frac{K_n}{E_c I_c} \right) \left(\frac{M_0}{2\beta^3} \right) \quad (7.11)$$

$$v_c = v_0 + v_c^s \quad \text{และ} \quad v_p = v_p^s \quad (7.12)$$

$$v_c^s = -b_p \bar{y}_c t_p \left(b_3 \sqrt{A} + b_2 \right) \quad (7.13)$$

$$v_p^s = -0.5 b_p t_p^2 \left(b_3 \sqrt{A} + b_2 \right) \quad (7.14)$$

$$\beta = \left(\frac{K_n b_p}{4E_p I_p} \right)^{1/4} \quad (7.15)$$

ซึ่งสมการในแบบจำลองอธิบายการเกิดความเข้มของหน่วยแรงดึงฉาก ($f_n(x)$) และตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมดจะอยู่ในพจน์ของตัวแปร x โดยมีจุดเริ่มต้นอยู่ที่ปลายพลาสติกเสริมเส้นใยเหมือนกันกับสมการในแบบจำลองอธิบายการเกิดความเข้มของหน่วยแรงเฉือน ($\tau(x)$) โดยเมื่อพิจารณาสมการที่ (7.9) บริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใย ($x=0$) จะได้ค่าหน่วยแรงดึงฉากสูงสุดดังสมการที่ (7.16)

$$f_{n,\max} = \frac{K_n}{2\beta^3} \left(\frac{V_p}{E_p I_p} - \frac{V_c + \beta M_0}{E_c I_c} \right) + \frac{q E_p I_p}{b_p E_c I_c} \quad (7.16)$$

- โดย E_p, E_c : โมดูลัสยืดหยุ่นของพลาสติกเสริมเส้นใยและคอนกรีตตามลำดับ
 E_a, G_a : โมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสเฉือนของชั้นวัสดุประสาน
 I_p, I_c : โมเมนต์ความเฉื่อยของพลาสติกเสริมเส้นใยและคอนกรีตตามลำดับ
 I_r : โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแปลงเทียบเท่าหน้าตัดคอนกรีต
 \bar{y} : ระยะจากผิวคอนกรีตส่วนรับแรงอัดถึงแกนสะเทินของหน้าตัดเสริมกำลังที่ยังไม่แตกร้าว
 \bar{y}_c : ระยะจากแนวแกนสะเทินถึงผิวบนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา
 t_a, t_p : ความหนาของชั้นกาวและพลาสติกเสริมเส้นใยตามลำดับ
 b_p : ความกว้างของพลาสติกเสริมเส้นใย
 K_n : สติฟเนสในแนวตั้งฉากกับผิวของชั้นกาว มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นกับความหนาของชั้นวัสดุประสาน
 q : แรงภายนอกที่มากกระทำเป็นน้ำหนักกระทำแผ่สม่ำเสมอ (uniform load)
 M_0, V_0 : โมเมนต์คัตและแรงเฉือนในคานคอนกรีตบริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใยเนื่องจากแรงภายนอกที่มากกระทำ
 V_p^s, V_c^s : แรงเฉือนในพลาสติกเสริมเส้นใยและคอนกรีต เป็นแรงปฏิกิริยาที่ต้านทานแรงเฉือนในชั้นกาวตามลำดับ
 V_p, V_c : แรงเฉือนในพลาสติกเสริมเส้นใยและคอนกรีตบริเวณปลายพลาสติกเสริมเส้นใย

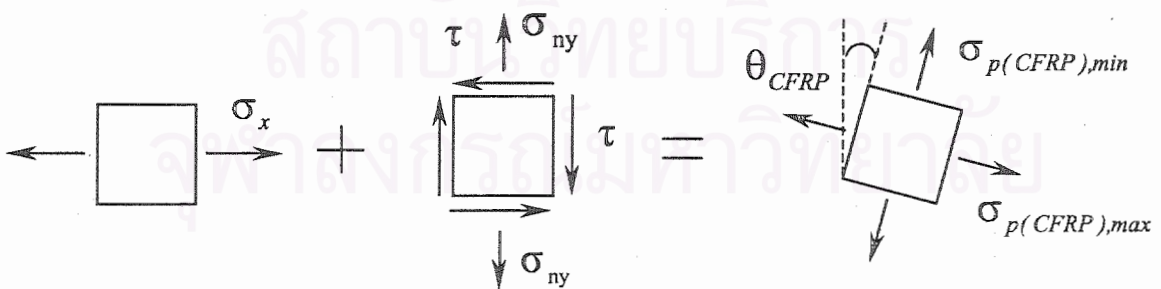
เมื่อคำนวณค่าหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงดึงฉากจากแบบจำลองแล้ว จึงนำค่าหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงดึงฉากที่ได้จากแบบจำลอง มารวมกับค่าหน่วยแรงคด (flexural stress) และหน่วยแรงเฉือน (shear stress) ที่เกิดจากแรงกระทำภายนอก เพื่อหาค่าหน่วยแรงดึงหลัก (principal tensile stress) ที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุต่างๆ ซึ่งจะแสดงในหัวข้อถัดไป

7.2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบกับแบบจำลองของ Malek และคณะ⁸

เมื่อพิจารณาแบบจำลองของ Malek และคณะ ซึ่งทำนายค่าหน่วยแรงเฉือน (shear stress) และหน่วยแรงตั้งฉาก (normal stress) ที่เกิดขึ้น ณ ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตและวัสดุประสาน โดยทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ ณ น้ำหนักกระทำที่ทำให้เกิดการแตกร้าวของคอนกรีตบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนพบว่า แบบจำลองของ Malek และคณะให้ค่าคลาดเคลื่อนไปจากผลการทดสอบเล็กน้อยต่างกันไปในแต่ละคานตัวอย่างดังแสดงในตารางที่ 7.1 (รายละเอียดการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก ค.) โดยจากตารางที่ 7.1 พบว่าแบบจำลองของ Malek และคณะ⁸ ให้ค่าหน่วยแรงดึงหลัก (principal tensile stress) ใกล้เคียงกับกำลังรับแรงดึง (tensile strength) ของคอนกรีตในคานตัวอย่าง RF1 RF8 และ RF9 โดยมีค่าต่างจากผลการทดสอบอยู่เพียงร้อยละ 7 11 14 ตามลำดับ แต่แบบจำลองดังกล่าวจะให้ผลที่มีค่าส่วนต่างสูงขึ้นในคานตัวอย่าง RF6 โดยค่าที่ได้จาก

ตารางที่ 7.1 แสดงค่าเปรียบเทียบผลการทดสอบกับแบบจำลองของ Malek และคณะ

คาน ตัวอย่าง	Flex. stress σ_x (ksc)*	Norm. stress σ_y (ksc)	Shear stress τ (ksc)	Principal stress (ksc)		Tensile strength (ksc)	Difference from testing (%)
				Max.	Min.		
RF1	17.11	8.644	14.59	28.07	-2.32	26.2	7
RF4	45.77	14.764	24.88	59.58	0.95	31.1	92
RF5	75.11	18.404	31.01	88.77	4.74	31.1	185
RF6	16.45	7.615	12.84	25.61	-1.54	32.2	21
RF8	17.32	14.661	19.68	35.71	-3.73	32.2	11
RF9	17.82	9.375	15.81	29.96	-2.77	26.4	14



หน่วยแรงดัดที่เกิด
จากน้ำหนักกระทำ

หน่วยแรงที่เกิดการเสริมกำลัง

หน่วยแรงดึงหลักในคอนกรีต

รูปที่ 7.3 แสดงการรวมหน่วยแรงที่ผิวล่างของคอนกรีตตามการคำนวณในตารางที่ 7.1

* พิจารณาโมเมนต์ส่วนเพิ่มจากแบบจำลองของ Malek และคณะด้วย

การคำนวณจะมีค่าน้อยกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตในคานตัวอย่าง RF6 อยู่ร้อยละ 21 ทั้งนี้เนื่องจากค่าที่ได้การทดสอบของคานตัวอย่าง RF6 มีผลของการซ้อนทับของหน่วยแรง (ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 6.4.1) ทำให้หน่วยแรงของผลการทดสอบจึงมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดสอบของคานตัวอย่าง RF4 และ RF5 พบว่า ผลจากแบบจำลองมีค่าแตกต่างจากผลการทดสอบอยู่ถึงร้อยละ 92 และ 185 ตามลำดับ โดยในการคำนวณค่าหน่วยแรงหลักในคานตัวอย่าง RF5 ถึงแม้จะไม่นำผลของหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงดัดจากที่คำนวณได้จากแบบจำลองของ Malek และคณะมาพิจารณาด้วยก็ตาม ค่าหน่วยแรงดึงหลักที่ได้จากน้ำหนักกระทำก็มีค่าใกล้เคียงกับกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่ทดสอบได้ (ดังแสดงในตารางที่ ค.5 ในภาคผนวก ค.) ซึ่งจากส่วนต่างที่แตกต่างกันมากระหว่างผลจากแบบจำลองของ Malek และคณะกับผลการทดสอบในคานตัวอย่าง RF4 และ RF5 ในขณะที่ค่าส่วนต่างในคานตัวอย่าง RF1 RF8 และ RF9 มีค่าน้อย จึงอาจสรุปได้ว่าแบบจำลองของ Malek และคณะ จะให้ค่าที่ถูกต้องในกรณีที่ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนอยู่ในตำแหน่งใกล้จุดรองรับ (อัตราส่วนโมเมนต์ดัด ณ ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อโมเมนต์ดัดที่มากที่สุด $(\frac{M_0}{M_{Max}})$ มีค่าน้อยที่สุด) ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดรอยแตกกว้างขึ้นน้อยและอยู่ห่างจากรอยแตกกว้างที่มีขนาดใหญ่ค่อนข้างมาก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าเป็นบริเวณที่วัสดุยังคงมีพฤติกรรมยืดหยุ่นแบบเส้นตรง ทำให้ผลที่ได้จากแบบจำลองของ Malek ซึ่งมีสมมติฐานอยู่บนพื้นฐานของวัสดุที่มีพฤติกรรมกรรมยืดหยุ่นแบบเส้นตรง มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริง

โดยทั่วไปเมื่อคอนกรีตเกิดการแตกกว้างขึ้นบนหน้าตัดใดๆ ค่าสติเฟนสของหน้าตัดบริเวณข้างเคียงจะมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อเนื้อคอนกรีตเกิดการแตกกว้าง แรงยึดรั้งระหว่างเนื้อวัสดุจะมีค่าลดน้อยลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ หน้าตัดสูญเสียการต้านทานเปลี่ยนรูป (deformation) ไป ส่งผลให้เนื้อวัสดุในบริเวณข้างเคียงมีอิสระในการยืดหดตัวมากขึ้น โดยค่าหน่วยแรงในเนื้อวัสดุบริเวณข้างเคียงจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากต้องแบกรับแรงภายในแทนส่วนของคอนกรีตที่เกิดการแตกกว้าง ทำให้เนื้อวัสดุของหน้าตัดบริเวณที่อยู่ใกล้รอยแตกกว้างมีพฤติกรรมไม่เป็นแบบเส้นตรงอีกต่อไป (nonlinear behavior) ด้วยเหตุผลดังกล่าวในกรณีของคานตัวอย่าง RF4 และ RF5 ซึ่งมีปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนอยู่ใกล้กับกลุ่มของรอยแตกกว้างที่มีขนาดใหญ่และมีจำนวนมาก แบบจำลองของ Malek และคณะ ซึ่งพัฒนาอยู่บนพื้นฐานที่ว่าวัสดุมีพฤติกรรมยืดหยุ่นแบบเส้นตรง จึงให้ค่าที่คลาดเคลื่อนไปจากผลการทดสอบค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงแบบจำลองของ Malek เพื่อให้สามารถทำนายค่าความเข้มของหน่วยแรงในตำแหน่งที่อัตราส่วนโมเมนต์ดัด ณ ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อโมเมนต์ดัดที่มากที่สุด $(\frac{M_0}{M_{Max}})$ มีค่าสูงโดยอาศัยผลการทดสอบที่ได้เป็นข้อมูลในการปรับปรุง

7.3 การปรับปรุงแบบจำลองของ Malek และคณะ

เมื่อพิจารณาแบบจำลองของ Malek และคณะ พบว่าพจน์ที่ควรได้รับการปรับปรุงมากที่สุด ได้แก่ พจน์ b_3 ซึ่งเป็นพจน์ที่อยู่ในรูปของหน่วยแรง (มีหน่วยเป็น ksc) โดยสาเหตุที่เลือกพจน์ b_3 ในการปรับปรุงแบบจำลอง เนื่องจากพจน์ b_3 มีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับค่าโมเมนต์ที่เกิดจากแรงกระทำจากภายนอกโดยตรง ในขณะที่พจน์อื่นๆจะขึ้นอยู่กับลักษณะของหน้าตัดและคุณสมบัติของวัสดุเป็นสำคัญ อีกทั้งพจน์ b_3 ยังมีค่าเกี่ยวข้องกับพจน์ต่างๆในแบบจำลองที่มีผลต่อค่าหน่วยแรงที่คำนวณได้ค่อนข้างมาก เช่น ค่าโมเมนต์ส่วนเพิ่ม (M_m) สัมประสิทธิ์ C_1 และ C_2 เป็นต้น ดังนั้นพจน์ b_3 จึงถูกเลือกใช้ในการปรับปรุงแบบจำลอง โดยการนำผลของอัตราส่วนโมเมนต์คัต ฌ ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อโมเมนต์คัตที่มากที่สุด ($\frac{M_0}{M_{Max}}$) มาพิจารณาร่วมด้วย โดยจากแบบจำลองของ Malek และคณะ พจน์ b_3 จะอยู่ในรูปดังแสดงในสมการที่ (7.5)

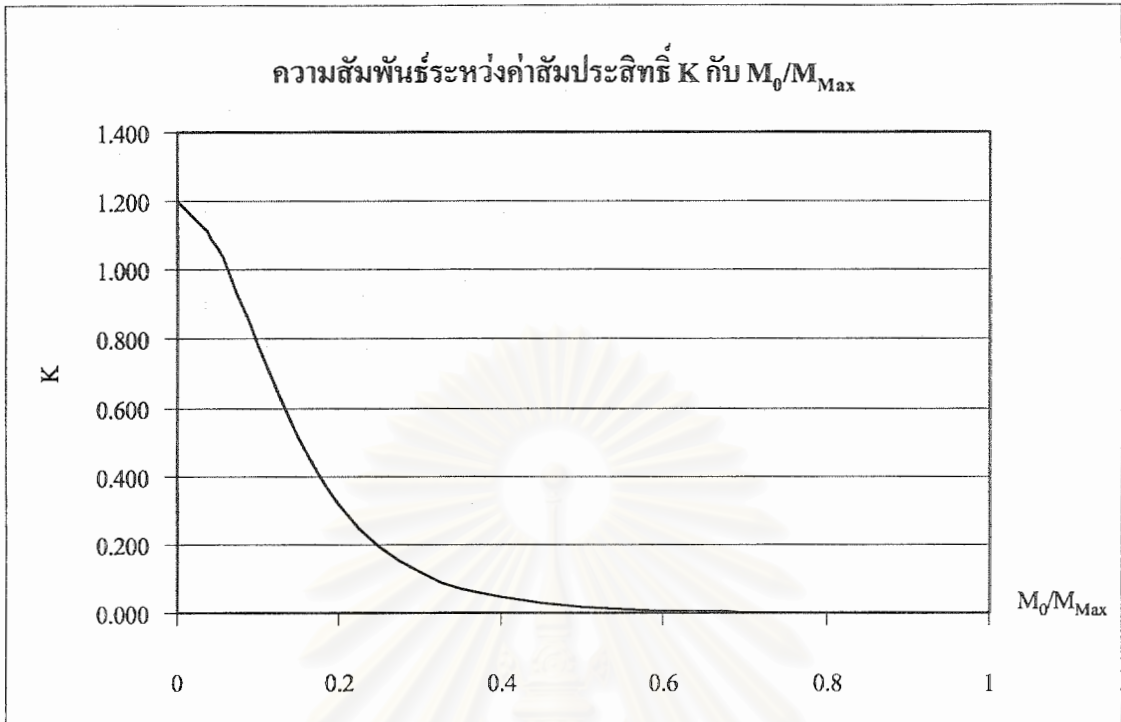
$$b_3 = E_p \left[\frac{y}{I_{tr} E_c} (a_1 L_o^2 + a_2 L_o + a_3) + 2b_1 \frac{t_a t_p}{G_a} \right] \quad (7.5)$$

ซึ่งจากค่าตัวแปรต่างๆ พบว่า พจน์ที่เกิดจากแรงกระทำจากภายนอก ซึ่งได้แก่พจน์ b_1 และพจน์ $a_1 L_o^2 + a_2 L_o + a_3$ ควรมีการปรับแก้ให้มีค่าถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยการศึกษานี้ได้เสนอค่าปรับแก้พจน์ดังกล่าวดังสมการที่ (7.17)

$$K = \frac{1.2}{\text{Cosh} \left(N \left(\frac{M_0}{M_{max}} \right) \right)} \quad (7.17)$$

โดย 1.2 เป็นค่าปรับแก้หน่วยแรงที่คำนวณได้ เนื่องจากแบบจำลองมีสมมติฐานว่าหน้าตัดของคานตัวอย่างไม่มีรอยแตกร้าวทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง N เป็นสัมประสิทธิ์ปรับแก้ค่า อัตราส่วนโมเมนต์คัต ฌ ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อโมเมนต์คัตที่มากที่สุด ($\frac{M_0}{M_{Max}}$) หากค่าได้การทายค่า (trail and error)

ค่าสัมประสิทธิ์ K ที่ได้จะมีค่าอยู่ในช่วง $(0,1.2)$ ตามค่าอัตราส่วนโมเมนต์คัต ฌ ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อโมเมนต์คัตที่มากที่สุด ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วง $[0,1]$ โดยเส้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ K กับค่าอัตราส่วนโมเมนต์คัต ฌ ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อโมเมนต์คัตที่มากที่สุด ($\frac{M_0}{M_{Max}}$) จะเป็นไปดังรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ K กับค่า $\frac{M_0}{M_{Max}}$

ดังนั้นสมการที่ (7.5) จะมีค่าเปลี่ยนไปเป็นดังสมการที่ (7.18)

$$b_3 = K \left[E_p \left(\frac{y}{I_{tr} E_c} (a_1 L_0^2 + a_2 L_0 + a_3) + 2b_1 \frac{t_a t_p}{G_a} \right) \right] \quad (7.18)$$

จากผลการทดสอบพบว่า ค่า N ที่เหมาะสมสำหรับการศึกษารังนี้มีค่าประมาณ 10.0 ซึ่งจะให้ค่าคลาดเคลื่อนดังแสดงในตารางที่ 7.2 โดยค่าคลาดเคลื่อนของคานตัวอย่าง RF1 RF8 และ RF9 จะมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ค่าคลาดเคลื่อนของคานตัวอย่าง RF4 และ RF5 จะมีค่าลดลงอย่างมาก และเมื่อนำผลการทดสอบที่แสดงไว้ในบทความของ Malek มาเปรียบเทียบกับสัมประสิทธิ์ปรับแก้ค่าหน่วยแรงที่ได้เสนอ โดยให้ค่า N มีค่าเท่ากับ 10.0 พบว่าค่าคลาดเคลื่อนมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยดังแสดงในตารางที่ 7.2 โดยมีตัวแปรดังตารางที่ ก.1 และรายการคำนวณดังตารางที่ ก.2 ถึง ก.4

ตารางที่ 7.2 แสดงค่าหน่วยแรงต่างๆจากแบบจำลองดั้งเดิมของ Malek และแบบจำลองของ Malek ที่ถูกปรับปรุง

Specimens	Summary moment from Malek's model (kg-cm)		Flexural stress Malek's model (ksc)		Normal stress Malek's model (ksc)		Shear stress Malek's model (ksc)		Max. principal stress		Tensile strength (ksc)	Difference from testing (%)	
	Original	Modified	Original	Modified	Original	Modified	Original	Modified	Original	Modified		Original	Modified
RF1	46,236	46,008	17.11	17.02	8.64	8.47	14.59	14.29	28.07	27.66	26.2	7	6
RF4	123,704	87,779	45.77	32.48	14.76	5.39	24.88	8.98	59.58	35.18	31.1	92	13
RF5	203,001	100,269	75.11	37.10	18.40	2.314	31.01	3.72	88.77	37.49	31.1	185	21
RF6	46,002	45,701	16.45	16.34	7.62	7.458	12.84	12.57	25.61	25.23	32.2	21	22
RF8	46,817	46,490	17.32	17.20	14.66	14.34	19.68	19.24	35.71	35.07	32.2	11	9
RF9	50,654	50,407	17.82	17.73	9.38	9.18	15.81	15.48	29.96	29.52	26.4	14	12
Malek	190,518	187,003	24.00	23.56	4.36	3.89	5.99	5.34	25.68	24.92	31.7	19	21

บทที่ 8



สรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุป

จากการศึกษาการเกิดความเข้มของหน่วยแรงในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ซึ่งใช้คานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดหน้าตัดกว้าง 15 ซม. ลึก 30 ซม. ยาว 225 ซม. ความยาวช่วงคาน 200 ซม. จำนวน 13 ตัวอย่าง ในจำนวนนี้เป็นคานตัวอย่างควบคุม 2 ตัวอย่าง คานตัวอย่างที่ใช้ศึกษาการเสริมกำลัง 9 ตัวอย่าง และคานตัวอย่างที่ใช้ศึกษาการซ่อมแซม 2 ตัวอย่าง โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้อยู่ 7 ตัวแปร ได้แก่

1. ผลของการเสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน
2. ผลของระยะการยึดปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน
3. ผลของความยาวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน
4. ผลของความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน
5. อัตราส่วนความหนาของชั้นกาวต่อความหนาของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน
6. ผลของขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง
7. ผลของการใช้วัสดุประสานก่อนการซ่อมแซมด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

พบว่าผลการศึกษาและการวิเคราะห์พฤติกรรมต่างๆของคานตัวอย่างทดสอบสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. คานตัวอย่างที่เสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจะมีกำลังรับแรงดัดประลัยสูงขึ้นร้อยละ 41 ถึง 166 เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างควบคุม และมีค่าการโก่งตัว ณ จุดประลัยคิดเป็นร้อยละ 9 ถึง 25 ของคานตัวอย่างควบคุม โดยกำลังรับแรงดัดและค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่างจะขึ้นอยู่กับลักษณะการติดตั้งแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเป็นสำคัญ อนึ่งคานตัวอย่างที่ใช้ศึกษาการซ่อมแซมจะมีกำลังรับแรงดัดประลัยต่ำกว่าคานตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาการเสริมกำลัง เมื่อมีรูปแบบการติดตั้งแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่เหมือนกัน

2. ในส่วนของรอยแตกร้าว คานตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนจะมีรอยแตกร้าวที่มีขนาดเล็กและกระจายตัวสูงกว่าในคานตัวอย่างควบคุม ซึ่งเป็นลักษณะรอยแตกร้าวที่ดี สามารถช่วยป้องกันการสีกกร่อนของเหล็กเสริมภายใน

3. คานตัวอย่างที่เสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน จะมีค่าสตีเฟนสของหน้าตัดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับคานตัวอย่างควบคุม โดยสังเกตได้จากค่าการโก่งตัวที่มีค่าลดลงเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่าเท่ากัน แต่ในขณะเดียวกัน ค่าความเหนียวของคานตัวอย่างที่เสริมกำลังจะมีค่าน้อยกว่าคานตัวอย่างควบคุมอย่างชัดเจน

4. พฤติกรรมการวิบัติของคานตัวอย่างที่เสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่พบในการศึกษาครั้งนี้เป็นการวิบัติแบบเปราะทั้งหมด โดยมีลักษณะการวิบัติ 2 ลักษณะคือ การวิบัติจากการหลุดลอกของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน และการวิบัติจากการฉีกตัวออกของคอนกรีตส่วนหุ้มเหล็กเสริมรับแรงดึง โดยการวิบัติทั้งสองลักษณะจะเริ่มเกิดจากปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

5. การเสริมกำลังคานตัวอย่างด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน โดยมีค่าอัตราส่วนความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อความกว้างของหน้าตัดคานที่สูง จะเพิ่มกำลังรับแรงดัดประลัยได้น้อยกว่าการใช้อัตราส่วนความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อความกว้างของหน้าตัดคานที่มีค่าเหมาะสม เนื่องจากการซ้อนทับของหน่วยแรง ทำให้คานวิบัติที่น้ำหนักต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ในขณะที่หากอัตราส่วนความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อความกว้างของหน้าตัดคานมีค่าน้อยเกินไป กำลังรับแรงดัดประลัยของคานตัวอย่างที่ได้ก็จะมีค่าต่ำ ในส่วนของค่าการโก่งตัวพบว่าค่าการโก่งตัวจะมีค่าลดลงตามอัตราส่วนความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อความกว้างของหน้าตัดคานที่เพิ่มขึ้น อนึ่งค่าอัตราส่วนความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อความกว้างของหน้าตัดคานจะส่งผลต่อรูปแบบการวิบัติของคานตัวอย่างด้วย โดยเมื่ออัตราส่วนความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อความกว้างของหน้าตัดคานมีค่าสูง ลักษณะการวิบัติจะเกิดจากการฉีกตัวออกของคอนกรีตส่วนหุ้มเหล็กเสริมรับแรงดึง ในขณะที่ถ้าอัตราส่วนความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อความกว้างของหน้าตัดคานมีค่าต่ำ ลักษณะการวิบัติจะเกิดจากการหลุดลอกออกของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน

6. กำลังรับแรงดัดประลัยของคานตัวอย่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอัตราส่วนความยาวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อความยาวของช่วงคานที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าการโก่งตัวจะมีค่าลดลงตามค่าอัตราส่วนความยาวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อความยาวของช่วงคานที่เพิ่มขึ้น และจากการทดสอบพบว่าอัตราส่วนความยาวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อความยาวของช่วงคานจะมีผลต่อลักษณะการวิบัติด้วย โดยเมื่ออัตราส่วนความยาวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อความยาวของช่วงคานมีค่าสูง ลักษณะการวิบัติจะเกิดจากการหลุดลอกออกของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ในขณะที่ถ้าอัตราส่วนความยาวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อความยาวของช่วงคานมีค่าต่ำ ลักษณะการวิบัติจะเกิดจากการฉีกตัวออกของคอนกรีตส่วนหุ้มเหล็กเสริมรับแรงดึง

7. อัตราส่วนความหนาของชั้นกาวต่อความหนาของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนและขนาดของเหล็กเสริมรับแรงดึงมีผลต่อพฤติกรรมของคานตัวอย่างไม่ชัดเจน โดยพฤติกรรมโดยรวมของคานตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่ขนาดของเหล็กเสริมรับแรงดึงจะมีต่อลักษณะ

ของรอยแตกร้าวค่อนข้างชัดเจน กล่าวคือรอยแตกร้าวจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเหล็กเสริมรับแรงดึงมีขนาดใหญ่ขึ้น

8. การซ่อมแซมรอยแตกร้าวด้วยการฉีดวัสดุประสานจะไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมโดยรวมของคานตัวอย่างที่ซ่อมแซมด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน แต่จะช่วยในด้านสถานะการใช้ โดยจะช่วยลดการสึกกร่อนของเหล็กเสริมรับแรงดึงภายใน

9. แบบจำลองการทำนายพฤติกรรมการเกิดค่าความเข้มของหน่วยแรงของ Malek และคณะสามารถให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ได้ในกรณีที่ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนอยู่ในตำแหน่งใกล้จุดรองรับ (อัตราส่วนโมเมนต์คัต ณ ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อโมเมนต์คัตที่มากที่สุด $(\frac{M_0}{M_{Max}})$ มีค่าน้อยที่สุด) แต่จะให้ค่าที่มีความคลาดเคลื่อนสูง ในกรณีที่อัตราส่วนโมเมนต์คัต ณ ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อโมเมนต์คัตที่มากที่สุด $(\frac{M_0}{M_{Max}})$ มีค่ามาก

10. สัมประสิทธิ์การปรับแก้พจน์ b_3 ในแบบจำลองของ Malek และคณะมีค่าดังแสดงด้านล่าง

$$K = \frac{1.2}{\text{Cosh} \left(N \left(\frac{M_0}{M_{max}} \right) \right)}$$

โดยสัมประสิทธิ์ดังกล่าวจะปรับค่าหน่วยแรงให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยลงในกรณีที่อัตราส่วนโมเมนต์คัต ณ ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อโมเมนต์คัตที่มากที่สุด $(\frac{M_0}{M_{Max}})$ มีค่ามาก แต่จะให้ค่าคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นหรือลดลงเพียงเล็กน้อยในกรณีที่อัตราส่วนโมเมนต์คัต ณ ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อโมเมนต์คัตที่มากที่สุด $(\frac{M_0}{M_{Max}})$ มีค่าน้อย ซึ่งค่า N ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้มีค่าเท่ากับ 10.0

8.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาครั้งนี้ สามารถสรุปข้อเสนอแนะได้ดังนี้

1. ในการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมองค์อาคาร ควรพิจารณาถึงสภาพและกำลังขององค์อาคารเดิมด้วยความระมัดระวังก่อนทำการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมองค์อาคารนั้น

2. การเสริมกำลังหรือซ่อมแซมองค์อาคารรับแรงค้ำด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ควรพิจารณาเป็นอย่างมากในเรื่องค่าความเหนียวขององค์อาคารที่ลดลง เนื่องจากพฤติกรรมการวิบัติขององค์อาคารจะเป็นการวิบัติแบบเปราะ ทำให้จะไม่สามารถเห็นค่าการโก่งตัวก่อนการวิบัติได้ชัดเจน

3. การวิเคราะห์หน้าตัดขององค์อาคารที่เสริมกำลังหรือซ่อมแซมองค์อาคารรับแรงค้ำด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน โดยใช้วิธีความเครียดสอดคล้อง สามารถวิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริง แต่ควรพิจารณาการวิบัติจากการหลุดลอกของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน หรือการฉีกตัวออกของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมรับแรงค้ำ ซึ่งเป็นการวิบัติก่อนที่จะเกิดการวิบัติแบบค้ำโดยสมบูรณ์

4. การเสริมกำลังหรือซ่อมแซมองค์อาคารรับแรงค้ำด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ควรให้มีค่าอัตราส่วนความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อความกว้างของหน้าตัดคานที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการซ้อนทับของหน่วยแรง ซึ่งทำให้องค์อาคารเกิดการวิบัติที่น้ำหนักต่ำกว่าที่ควรจะเป็น

5. การเสริมกำลังหรือซ่อมแซมองค์อาคารรับแรงค้ำด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน ควรให้อัตราส่วนความยาวของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนต่อความยาวช่วงคานมีค่าสูง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ควรให้ปลายของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนอยู่ใกล้จุดรองรับมากที่สุด เพื่อให้การเสริมกำลังหรือการซ่อมแซมมีประสิทธิภาพมากที่สุด

6. การหุ้มปลายสามารถช่วยเพิ่มกำลังรับแรงค้ำได้อย่างชัดเจน โดยจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่แถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน และช่วยลดรอยแตกร้าวที่เกิดจากแรงเฉือนที่เกิดจากแรงกระทำภายนอก

7. ในการใช้งานจริง เมื่อคอนกรีตบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเกิดการแตกร้าว ควรลดน้ำหนักกระทำที่กระทำต่อองค์อาคารที่มีการเสริมกำลังหรือซ่อมแซมด้วยแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนนั้นทันที เนื่องจากผลการทดสอบพบว่าคานตัวอย่างจะวิบัติหลังจากคอนกรีตบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเกิดการแตกร้าวไม่นาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รายการอ้างอิง

1. Calcote, Lee R. The Analysis of Laminated Composite Structure. New York : Van Nostrand Reinhold Company, 1969.
2. Robert T. M. Approximate Analysis of Shear and Normal Stress Concentrations in The Adhesive Layer of Plated RC Beam. Structural Engineer (London) Vol.67 No.12 (1989) : 228-233.
3. Philip A. Ritchie, Davis A. Thomas, Le-Wu Le and Guy M. Connelly. External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastic. ACI Structural Journal Vol.88 No.4 (July – August 1991) : 490-500.
4. Alfarabi Sharif, G. J. Al-Sulaimani, I. A. Basunbul, M. H. Baluch and B. N. Ghaleh. Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plate. ACI Structural Journal Vol.91 No.2 (March – April 1994) : 160-168.
5. Hamid Saadatmanesh. Fiber Composite for New And Existing Structures. ACI Structural Journal Vol.91 No.3 (May – June 1994) : 346-354.
6. Y. N. Ziraba, M. H. Baluch, I. A. Basunbul, A. M. Sharif, A. K. Azad and G. J. Al-Sulaimani. Guidelines Toward The Design of Reinforced Concrete Beams with External Plates. ACI Structural Journal Vol.91 No.6 (November – December 1994) : 639-646.
7. Marco Arduini, Angelo Di Tommaso and Antonio Nanni. Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams. ACI Structural Journal Vol.94 No.4 (July – August 1997) : 363-370.
8. Amir M. Malek, Hamid Saadatmanesh and Mohammad R. Ehsani. Prediction of Failure Load of RC Beams Strengthened with FRP Plate due to Stress Concentration at The Plate End. ACI Structural Journal Vol.95 No.2 (March – April 1998) : 142-152.
9. N. F. Grace, G. A. Sayed, A. K. Soliman and K. R. Saleh. Strengthening Reinforced Concrete Beams Using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Laminates. ACI Structural Journal Vol.96 No.5 (September – October 1999) : 865-874.
10. G. Tumialan, P. Serra, A. Nanni and A. Belarbi. Concrete Cover Delamination in Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheet. ACI Special Publication SP188-63 Vol.188 (1999) : 725-735.

11. P. Mukhopadhyaya and R. N. Swamy. Critical Review of Plate Anchorage Stresses in Premature Debonding Failure of Plate Bonded RC Beams. ACI Special Publication SP188-33 Vol.188 (1999) : 359-368.
12. Sika CarboDur Heavy – Duty CFRP Strengthening System. บริษัท ซิกา (ประเทศไทย) จำกัด.
13. ASTM C39-94 Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual Book of ASTM Standards Section 4 Vol. 04.02 (1996) : 17-21.
14. ASTM C496-96 Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual Book of ASTM Standards Section 4 Vol.04.02 (1996) : 262-265.
15. ASTM E8 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. Annual Book of ASTM Standards Section 3 Vol.03.01 (1996) : 56-76.
16. ASTM D3039 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Annual Book of ASTM Standards Section 15 Vol.15.03 (1996) : 111-121.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



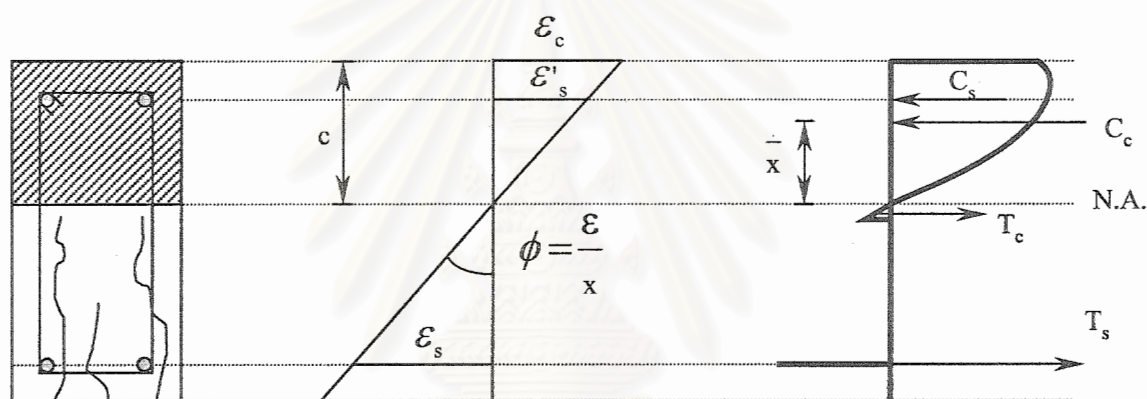
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

การวิเคราะห์หน้าตัดคานตัวอย่างด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง

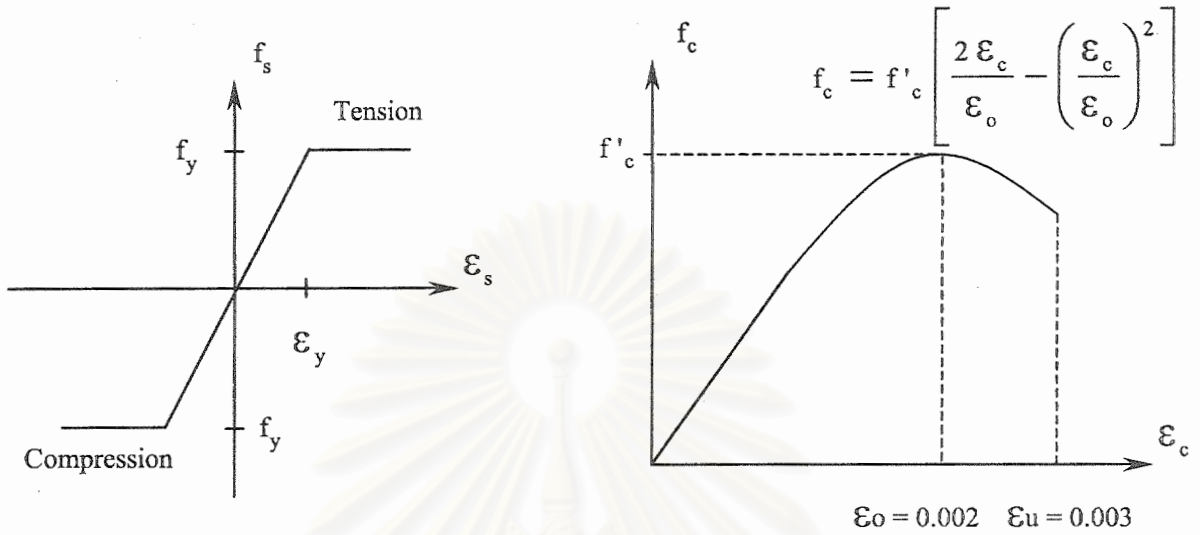
เมื่อให้น้ำหนักกระทำต่อคานตัวอย่าง แรงภายนอกที่มากระทำจะก่อให้เกิดแรงภายในบนหน้าตัด โดยผลรวมของแรงภายในที่เกิดขึ้นจะสมดุลกับแรงภายนอกที่มากระทำ แรงภายในที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการหมุน (rotation) ของหน้าตัด ซึ่งจะก่อให้เกิดความเครียดในตำแหน่งต่างๆของหน้าตัด และความเครียดเหล่านี้จะถูกแปลงเป็นหน่วยแรง (stress) ตามความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดของแต่ละวัสดุ โดยการกระจายตัวของความเครียดและหน่วยแรงบนหน้าตัดคานจะเป็นไปดังแสดงในรูป ก.1



รูปที่ ก.1 แสดงการกระจายตัวของความเครียดและหน่วยแรงบนหน้าตัดของคานตัวอย่าง

โดย	C_c	แรงอัดลัพท์ภายในเนื้อคอนกรีต
	C_s	แรงอัดลัพท์ภายในเนื้อเหล็กเสริมรับแรงอัด
	T_c	แรงดึงลัพท์ภายในเนื้อคอนกรีต
	T_s	แรงดึงลัพท์ภายในเนื้อเหล็กเสริมรับแรงดึง
	\bar{x}	ตำแหน่งของแรงอัดลัพท์ในเนื้อคอนกรีตเทียบกับแกนสะเทิน
	ϕ	เป็นมุมการหมุนของหน้าตัด (curvature)
	x	เป็นระยะใดๆบนหน้าตัดเทียบกับแนวแกนสะเทิน
	ϵ_c	เป็นความเครียดที่ผิวคอนกรีตด้านบน
	ϵ'_s, ϵ_s	เป็นความเครียดของเหล็กเสริมด้านบนและด้านล่างตามลำดับ
	c	เป็นระยะจากผิวบนของคานถึงแกนสะเทิน (neutral axis)

ในการคำนวณพฤติกรรมของคานตัวอย่างด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง (strain compatibility) จะอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริมภายในดังรูป ก.2



(ก) แบบจำลองของเหล็กเสริม

(ข) แบบจำลองคอนกรีตของ Park & Kent 1978

รูปที่ ก.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริมภายใน

เมื่อพิจารณาแบบจำลองคอนกรีตของ Park & Kent และการกระจายตัวของความเครียดบนหน้าตัด $\epsilon = \phi x$ ดังนั้นจะได้

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\phi x}{\epsilon_o} - \left(\frac{\phi x}{\epsilon_o} \right)^2 \right] \quad (ก.1)$$

จากสมการ (ก.1) สามารถหาค่าแรงอัดบนหน้าตัดคอนกรีตได้จากการอินทิเกรตรวมแรงอัดในเนื้อคอนกรีตทุกจุดบนหน้าตัด ดังแสดงในสมการที่ (ก.2) ถึง (ก.4)

$$C_c = \int_0^c f'_c \left[\frac{\epsilon \phi x}{\epsilon_o} - \left(\frac{\phi x}{\epsilon_o} \right)^2 \right] b dx \quad (ก.2)$$

$$= f'_c \left[\frac{\phi x^2}{\epsilon_o} - \frac{\phi^2 x^3}{3(\epsilon_o)^2} \right]_0^c .b \quad (ก.3)$$

$$C_c = f'_c \frac{\phi}{\epsilon_o} c^2 \left[1 - \frac{\phi c}{3\epsilon_o} \right] .b \quad (ก.4)$$

และตำแหน่งของแรงอัดลัพธ์ในเนื้อคอนกรีตเทียบจากแกนสะเทินเป็นไปดังแสดงในสมการที่ (ก.5) ถึง (ก.7)

$$\bar{x} = \frac{\int_0^c f'_c \left[\frac{2\phi x}{\epsilon_o} - \left(\frac{\phi x}{\epsilon_o} \right)^2 \right] x b dx}{C_c} \quad (ก.5)$$

$$= \frac{f'_c \left[\frac{2\phi x^3}{3\epsilon_o} - \frac{\phi^2 x^4}{4(\epsilon_o)^2} \right]_0^c .b}{C_c} \quad (ก.6)$$

แทนค่า C_c จากสมการ (ก.4) ลงในสมการ (ก.6) จะได้

$$\bar{x} = c \left[\frac{8\epsilon_o - 3\phi c}{12\epsilon_o - 4\phi c} \right] \quad (ก.7)$$

ในส่วนของแบบจำลองเหล็กเสริม ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดจะเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's Law) โดยเมื่อเหล็กเสริมมีค่าความเครียดมากกว่าค่าความเครียดที่จุดคราก (ϵ_y) แล้วจะถือว่าเหล็กมีค่าหน่วยแรงเท่ากับหน่วยแรงที่จุดคราก

การวิเคราะห์จะแบ่งการคำนวณออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงก่อนหน้าตัดเกิดการแตกร้าว ช่วงตั้งแต่หน้าตัดเกิดการแตกร้าวจนถึงเหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดคราก และช่วงเหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดครากจนถึงคอนกรีตรับแรงอัดถูกอัดแตก โดยรายการคำนวณจะแสดงดังตารางด้านล่าง

Properties of section of specimen CB1

ความกว้าง (b)	15	cm.	กำลังรับแรงที่จุดคราก (f_y)	4,791	ksc.
ความลึก (t)	30	cm.	Modulus of Elasticity (E_s)	2,143,697	ksc.
ระยะประสิทธิผล (d)	26.3	cm.	ระยะจากผิวนอกถึงเหล็กรับแรงดึง	3.7	cm.
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f_c)	300	ksc.	ปริมาณเหล็กรับแรงดึง (A_s)	2.26	cm. ²
Modulus of Elasticity (E_c)	263,445	ksc.	ระยะจากผิวนอกถึงเหล็กรับแรงอัด (d')	4.0	cm.
Modulus of Rupture (f_r)	34.64	ksc.	ปริมาณเหล็กรับแรงอัด (A_s')	2.26	cm. ²

Initial state - Cracking state (CB1)

B. concrete strain	c (cm)	Curvature, ϕ	B. steel strain, ϵ_s	Top steel strain, ϵ_s	B. steel stress (ksc)	Top steel stress (ksc)	C_c (kg)	C_s (kg)	T_s (kg)	T_c (kg)	Bending moment (kg-m)	Load (kg)
0.000E+00	0.000	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0	0	0	0	0	0	0	0
2.000E-05	14.568	1.296E-06	1.520E-05	1.370E-05	33	-29	-617	-66	74	610	138	369
4.000E-05	14.579	2.594E-06	3.040E-05	2.744E-05	65	-59	-1233	-133	147	1219	276	737
6.000E-05	14.591	3.894E-06	4.559E-05	4.124E-05	98	-88	-1848	-200	221	1827	414	1105
8.000E-05	14.603	5.196E-06	6.078E-05	5.509E-05	130	-118	-2461	-267	295	2434	552	1472
1.000E-04	14.614	6.499E-06	7.595E-05	6.898E-05	163	-148	-3074	-335	368	3040	689	1838
1.200E-04	14.625	7.805E-06	9.112E-05	8.293E-05	195	-178	-3685	-402	442	3645	826	2204
1.315E-04	14.632	8.556E-06	9.983E-05	9.097E-05	214	-195	-4036	-441	484	3993	905	2414

Cracking state - Yielding state (CB1)

B. steel strain	c (cm)	Curvature, ϕ	B. steel strain, ϵ_s	Top steel strain, ϵ_s'	B. steel stress (ksc)	Top steel stress (ksc)	C_c (kg)	C_s (kg)	T_s (kg)	T_c (kg)	Bending moment (kg-m)	Load (kg)
9.983E-05	14.632	8.556E-06	9.983E-05	9.097E-05	214	-195	-4036	-441	484	3993	905	2414
1.400E-04	12.621	1.023E-05	1.400E-04	8.823E-05	300	-189	-3589	-428	679	3338	717	1911
3.260E-04	8.638	1.846E-05	3.260E-04	8.561E-05	699	-184	-3016	-415	1581	1851	559	1492
5.120E-04	7.457	2.717E-05	5.120E-04	9.393E-05	1098	-201	-3285	-455	2483	1257	687	1831
6.980E-04	6.989	3.615E-05	6.980E-04	1.081E-04	1496	-232	-3806	-524	3385	945	869	2316
8.840E-04	6.772	4.527E-05	8.840E-04	1.255E-04	1895	-269	-4432	-608	4286	755	1067	2846
1.070E-03	6.662	5.449E-05	1.070E-03	1.450E-04	2294	-311	-5112	-703	5188	627	1273	3394
1.256E-03	6.605	6.377E-05	1.256E-03	1.661E-04	2692	-356	-5820	-806	6090	536	1482	3951
1.442E-03	6.577	7.311E-05	1.442E-03	1.884E-04	3091	-404	-6546	-914	6992	467	1692	4512
1.628E-03	6.567	8.250E-05	1.628E-03	2.117E-04	3490	-454	-7281	-1027	7894	414	1903	5076
1.801E-03	6.567	9.127E-05	1.801E-03	2.343E-04	3861	-502	-7971	-1136	8733	374	2100	5600
2.235E-03	6.594	1.134E-04	2.235E-03	2.942E-04	4791	-631	-9712	-1426	10837	301	2594	6918

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Yielding state - Ultimate state (CB1)

T. concrete strain	c (cm)	Curvature, ϕ	B. steel strain, ϵ_s	Top steel strain, ϵ_s	B. steel stress (ksc)	Top steel stress (ksc)	C_c (kg)	C_s (kg)	T_s (kg)	T_c (kg)	Bending moment (kg-m)	Load (kg)
7.478E-04	6.594	1.134E-04	2.235E-03	2.942E-04	4791	-631	-9712	-1426	10837	301	2594	6918
1.400E-03	4.322	3.239E-04	7.120E-03	1.042E-04	4791	-223	-10437	-505	10837	105	2673	7128
1.600E-03	4.080	3.921E-04	8.713E-03	3.145E-05	4791	-67	-10772	-152	10837	87	2688	7168
1.800E-03	3.915	4.597E-04	1.029E-02	-3.889E-05	4791	83	-11100	189	10837	74	2700	7200
2.000E-03	3.802	5.260E-04	1.183E-02	-1.040E-04	4791	223	-11407	505	10837	65	2708	7222
2.200E-03	3.726	5.905E-04	1.333E-02	-1.620E-04	4791	347	-11680	785	10837	58	2713	7236
2.400E-03	3.677	6.528E-04	1.477E-02	-2.110E-04	4791	452	-11913	1023	10837	52	2716	7243
2.600E-03	3.649	7.125E-04	1.614E-02	-2.500E-04	4791	536	-12097	1212	10837	48	2717	7244
2.800E-03	3.639	7.694E-04	1.744E-02	-2.777E-04	4791	595	-12227	1346	10837	44	2715	7240
3.000E-03	3.644	8.232E-04	1.865E-02	-2.929E-04	4791	628	-12299	1420	10837	41	2712	7231

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Properties of section of specimen CB2

ความกว้าง (b)	15	cm	กำลังรับแรงที่จุดคราก (f_y)	3,742	ksc
ความลึก (t)	30	cm	Modulus of Elasticity (E_s)	2,143,697	ksc
ระยะประสิทธิผล (d)	26.1	cm	ระยะจากผิวนอกถึงเหล็กรับแรงดึง	3.9	cm
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f_c)	300	ksc	ปริมาณเหล็กรับแรงดึง (A_s)	4.02	cm ²
Modulus of Elasticity (E_c)	263,445	ksc	ระยะจากผิวนอกถึงเหล็กรับแรงอัด	4.2	cm
Modulus of Rupture (f_r)	34.64	ksc	ปริมาณเหล็กรับแรงอัด (A_s')	2.26	cm ²

Initial state - Cracking state (CB2)

B. concrete strain	c (cm)	Curvature, ϕ	B. steel strain, ϵ_s	Top steel strain, ϵ_s	B. steel stress (ksc)	Top steel stress (ksc)	C_c (kg)	C_s (kg)	T_s (kg)	T_c (kg)	Bending moment (kg-m)	Load (kg)
0.000E+00	0.000	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0	0	0	0	0	0	0	0
2.000E-05	14.880	1.323E-06	1.484E-05	1.413E-05	32	-30	-657	-69	128	597	147	392
4.000E-05	14.892	2.648E-06	2.967E-05	2.831E-05	64	-61	-1312	-137	256	1194	294	783
6.000E-05	14.904	3.975E-06	4.450E-05	4.254E-05	95	-91	-1967	-206	384	1790	440	1174
8.000E-05	14.916	5.304E-06	5.932E-05	5.683E-05	127	-122	-2620	-276	511	2384	587	1564
1.000E-04	14.928	6.635E-06	7.412E-05	7.118E-05	159	-153	-3272	-345	639	2978	733	1954
1.200E-04	14.940	7.968E-06	8.892E-05	8.558E-05	191	-183	-3922	-415	767	3571	878	2342
1.315E-04	14.947	8.735E-06	9.742E-05	9.388E-05	209	-201	-4295	-455	840	3911	962	2565

Cracking state - Yielding state (CB2)

B. steel strain	c (cm)	Curvature, ϕ	B. steel strain, ϵ_s	Top steel strain, ϵ_s	B. steel stress (ksc)	Top steel stress (ksc)	C_c (kg)	C_s (kg)	T_s (kg)	T_c (kg)	Bending moment (kg-m)	Load (kg)
9.742E-05	14.947	8.735E-06	9.742E-05	9.388E-05	209	-201	-4295	-455	840	3911	962	2565
1.400E-04	12.982	1.067E-05	1.400E-04	9.372E-05	300	-201	-3953	-454	1207	3201	802	2139
3.260E-04	9.643	1.981E-05	3.260E-04	1.078E-04	699	-231	-4012	-523	2810	1725	824	2198
5.120E-04	8.785	2.957E-05	5.120E-04	1.356E-04	1098	-291	-4912	-657	4414	1155	1115	2972
6.980E-04	8.483	3.962E-05	6.980E-04	1.697E-04	1496	-364	-6056	-823	6017	862	1454	3878
8.840E-04	8.364	4.984E-05	8.840E-04	2.075E-04	1895	-445	-7299	-1006	7620	685	1809	4823
1.070E-03	8.320	6.018E-05	1.070E-03	2.479E-04	2294	-531	-8590	-1202	9224	568	2169	5783
1.256E-03	8.312	7.061E-05	1.256E-03	2.903E-04	2692	-622	-9903	-1408	10827	484	2531	6750
1.442E-03	8.326	8.113E-05	1.442E-03	3.347E-04	3091	-718	-11229	-1623	12430	421	2894	7718
1.628E-03	8.352	9.173E-05	1.628E-03	3.809E-04	3490	-817	-12560	-1847	14034	372	3257	8687
1.746E-03	8.374	9.847E-05	1.746E-03	4.110E-04	3742	-881	-13401	-1993	15047	347	3487	9298

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Yielding state - Ultimate state (CB2)

T. concrete strain	c (cm)	Curvature, ϕ	B. steel strain, ϵ_s	Top steel strain, ϵ_s	B. steel stress (ksc)	Top steel stress (ksc)	C_c (kg)	C_s (kg)	T_s (kg)	T_c (kg)	Bending moment (kg-m)	Load (kg)
8.246E-04	8.374	9.847E-05	1.746E-03	4.110E-04	3742	-881	-13401	-1993	15047	347	3487	9298
1.200E-03	6.184	1.941E-04	3.865E-03	3.850E-04	3742	-825	-13357	-1867	15047	176	3568	9515
1.600E-03	5.184	3.086E-04	6.456E-03	3.037E-04	3742	-651	-13686	-1473	15047	111	3614	9636
1.800E-03	4.901	3.673E-04	7.787E-03	2.573E-04	3742	-552	-13893	-1248	15047	93	3629	9676
2.000E-03	4.699	4.256E-04	9.109E-03	2.124E-04	3742	-455	-14097	-1030	15047	80	3640	9706
2.200E-03	4.556	4.828E-04	1.040E-02	1.720E-04	3742	-369	-14284	-834	15047	71	3647	9726
2.400E-03	4.457	5.385E-04	1.165E-02	1.383E-04	3742	-296	-14440	-671	15047	63	3652	9738
2.600E-03	4.391	5.921E-04	1.285E-02	1.132E-04	3742	-243	-14556	-549	15047	58	3653	9742
2.800E-03	4.353	6.433E-04	1.399E-02	9.810E-05	3742	-210	-14624	-476	15047	53	3651	9736
3.000E-03	4.337	6.917E-04	1.505E-02	9.477E-05	3742	-203	-14637	-460	15047	49	3646	9722

Properties of section of specimen RF1

ความกว้าง (b)	15	cm.	กำลังรับแรงที่จุดคราก (f_y)	4,791	ksc.
ความลึก (t)	30	cm.	Modulus of Elasticity (E_s)	2,143,697	ksc.
ระยะประสิทธิผล (d)	26.3	cm.	ระยะจากผิวนอกถึงเหล็กรับแรงดึง	3.7	cm.
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f_c)	300	ksc	ปริมาณเหล็กรับแรงดึง (A_s)	2.26	cm. ²
Modulus of Elasticity (E_c)	263,445	ksc	ระยะจากผิวนอกถึงเหล็กรับแรงอัด (d')	4.0	cm.
กำลังรับแรงที่จุดประลัยของแผ่น CFRP (f_{CFRP})	32,867	ksc	ปริมาณเหล็กรับแรงอัด (A_s')	2.26	cm. ²
Modulus of Elasticity of CFRP (E_{FRP})	1,942,000	ksc.	ความกว้างของ CFRP	10.0	cm.
ความหนาของ Epoxy	0.20	cm.	ความหนาของ CFRP	0.12	cm.

Initial state - Cracking state (RF1)

B. Concrete strain	c (cm)	Curvature, ϕ	B. steel strain, ϵ_s	Top steel strain, ϵ_s'	CFRP strain ϵ_{CFRP}	B. steel stress (ksc)	Top steel stress (ksc)	CFRP stress (ksc)	C_c (kg)	C_s (kg)	T_s (kg)	T_c (kg)	T_{CFRP} (kg)	Moment (kg-m)	Load (kg)
0.000E+00	0.000	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.000E-05	14.835	1.319E-06	1.512E-05	1.429E-05	2.034E-05	32	-31	40	-651	-69	73	599	47	148	395
4.000E-05	14.845	2.639E-06	3.023E-05	2.862E-05	4.069E-05	65	-61	79	-1300	-139	147	1198	95	296	789
6.000E-05	14.858	3.962E-06	4.534E-05	4.302E-05	6.103E-05	97	-92	119	-1949	-209	220	1795	142	444	1183
8.000E-05	14.869	5.287E-06	6.044E-05	5.747E-05	8.137E-05	130	-123	158	-2596	-279	293	2392	190	591	1576
1.000E-04	14.881	6.614E-06	7.553E-05	7.197E-05	1.017E-04	162	-154	198	-3241	-349	366	2987	237	738	1969
1.315E-04	14.900	8.708E-06	9.927E-05	9.492E-05	1.338E-04	213	-203	260	-4256	-460	481	3923	312	969	2585

Cracking state – Yielding state (RF1)

B. steel strain	c (cm)	Curvature, ϕ	B. steel strain, ϵ_s	Top steel strain, ϵ_s'	CFRP strain ϵ_{CFRP}	B. steel stress (ksc)	Top steel stress (ksc)	CFRP stress (ksc)	C_c (kg)	C_s (kg)	T_s (kg)	T_c (kg)	T_{CFRP} (kg)	Moment (kg-m)	Load (kg)
9.927E-05	14.900	8.708E-06	9.927E-05	9.492E-05	1.338E-04	213	-203	260	-4256	-460	481	3923	312	969	2585
1.400E-04	12.981	1.051E-05	1.400E-04	9.440E-05	1.816E-04	300	-202	353	-3895	-458	679	3250	423	812	2165
3.260E-04	9.454	1.935E-05	3.260E-04	1.055E-04	4.026E-04	699	-226	782	-3773	-512	1581	1765	938	806	2150
5.120E-04	8.511	2.878E-05	5.120E-04	1.298E-04	6.260E-04	1098	-278	1216	-4499	-629	2483	1187	1459	1077	2873
6.980E-04	8.168	3.850E-05	6.980E-04	1.604E-04	8.504E-04	1496	-344	1652	-5476	-778	3385	887	1982	1400	3734
8.840E-04	8.025	4.837E-05	8.840E-04	1.947E-04	1.076E-03	1895	-417	2089	-6556	-944	4286	706	2506	1739	4638
1.078E-03	7.963	5.880E-05	1.078E-03	2.330E-04	1.311E-03	2312	-500	2546	-7735	-1130	5229	581	3056	2100	5599
1.256E-03	7.945	6.843E-05	1.256E-03	2.700E-04	1.527E-03	2692	-579	2965	-8839	-1309	6090	499	3558	2432	6486
1.442E-03	7.949	7.858E-05	1.442E-03	3.103E-04	1.753E-03	3091	-665	3405	-10008	-1505	6992	435	4086	2782	7418
1.628E-03	7.966	8.880E-05	1.628E-03	3.522E-04	1.980E-03	3490	-755	3844	-11184	-1708	7894	385	4613	3131	8350
1.814E-03	7.993	9.909E-05	1.814E-03	3.957E-04	2.206E-03	3889	-848	4285	-12363	-1919	8796	345	5142	3481	9283
2.000E-03	8.027	1.095E-04	2.000E-03	4.408E-04	2.433E-03	4287	-945	4726	-13544	-2137	9698	312	5671	3831	10215
2.186E-03	8.066	1.199E-04	2.186E-03	4.875E-04	2.661E-03	4686	-1045	5167	-14721	-2364	10600	285	6201	4180	11146
2.235E-03	8.077	1.226E-04	2.235E-03	5.001E-04	2.721E-03	4791	-1072	5283	-15031	-2425	10837	279	6340	4271	11391

สถาบันวิจัยบวร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Yielding state – Ultimate state (RF1)

T. concrete strain	c (cm)	Curvature, ϕ	B. steel strain, ϵ_s	Top steel strain, ϵ_s	CFRP strain ϵ_{CFRP}	B. steel stress (ksc)	Top steel stress (ksc)	CFRP stress (ksc)	C_c (kg)	C_s (kg)	T_s (kg)	T_c (kg)	T_{CFRP} (kg)	Moment (kg-m)	Load (kg)
9.906E-04	8.077	1.226E-04	2.235E-03	5.001E-04	2.721E-03	4791	-1072	5283	-15031	-2425	10837	279	6340	4271	11391
1.200E-03	7.655	1.568E-04	2.923E-03	5.730E-04	3.544E-03	4791	-1228	6882	-16535	-2778	10837	218	8258	4807	12820
1.400E-03	7.423	1.886E-04	3.561E-03	6.455E-04	4.307E-03	4791	-1384	8365	-17926	-3130	10837	181	10038	5299	14132
1.600E-03	7.289	2.195E-04	4.173E-03	7.220E-04	5.042E-03	4791	-1548	9792	-19243	-3501	10837	156	11751	5768	15381
1.800E-03	7.220	2.493E-04	4.757E-03	8.027E-04	5.744E-03	4791	-1721	11156	-20468	-3892	10837	137	13387	6210	16561
2.000E-03	7.197	2.779E-04	5.309E-03	8.883E-04	6.410E-03	4791	-1904	12448	-21590	-4308	10837	123	14937	6624	17665
2.200E-03	7.208	3.052E-04	5.827E-03	9.791E-04	7.036E-03	4791	-2099	13664	-22597	-4748	10837	112	16396	7009	18690
2.400E-03	7.248	3.311E-04	6.309E-03	1.075E-03	7.620E-03	4791	-2305	14798	-23483	-5215	10837	103	17758	7361	19629
2.600E-03	7.312	3.556E-04	6.752E-03	1.178E-03	8.160E-03	4791	-2525	15847	-24239	-5710	10837	96	19016	7680	20479
2.800E-03	7.398	3.785E-04	7.154E-03	1.286E-03	8.653E-03	4791	-2757	16804	-24857	-6236	10837	90	20165	7963	21233
3.000E-03	7.505	3.998E-04	7.514E-03	1.401E-03	9.097E-03	4791	-3003	17666	-25328	-6793	10837	85	21199	8208	21887

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Properties of section of specimen RF6

ความกว้าง (b)	15	cm	กำลังรับแรงที่จุดคราก (f_y)	4,791	ksc
ความลึก (t)	30	cm	Modulus of Elasticity (E_s)	2,143,697	ksc
ระยะประสิทธิผล (d)	26.3	cm	ระยะจากผิวนอกถึงเหล็กรับแรงดึง	3.7	cm
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f_c)	300	ksc	ปริมาณเหล็กรับแรงดึง (A_s)	2.26	cm ²
Modulus of Elasticity (E_c)	263,445	ksc	ระยะจากผิวนอกถึงเหล็กรับแรงอัด	4.0	cm
กำลังรับแรงที่จุดครากของแผ่น CFRP (f_{CFRP})	32,867	ksc	ปริมาณเหล็กรับแรงอัด (A_s')	2.26	cm ²
Modulus of Elasticity of CFRP (E_{FRP})	1,942,000	ksc	ความกว้างของ CFRP	15	cm
ความหนาของ Epoxy	0.20	cm	ความหนาของ CFRP	0.12	cm

Initial state - Cracking state (RF6)

B. Concrete strain	c (cm)	Curvature, ϕ	B. steel strain, ϵ_s	Top steel strain, ϵ_s'	CFRP strain ϵ_{CFRP}	B. steel stress (ksc)	Top steel stress (ksc)	CFRP stress (ksc)	C_c (kg)	C_s (kg)	T_s (kg)	T_c (kg)	T_{CFRP} (kg)	Moment (kg-m)	Load (kg)
0.000E+00	0.000	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.000E-05	14.965	1.330E-06	1.508E-05	1.459E-05	2.035E-05	32	-31	40	-668	-71	73	594	71	153	408
4.000E-05	14.975	2.662E-06	3.015E-05	2.922E-05	4.069E-05	65	-63	79	-1334	-142	146	1187	142	306	816
6.000E-05	14.986	3.996E-06	4.521E-05	4.390E-05	6.104E-05	97	-94	119	-1999	-213	219	1780	213	458	1222
8.000E-05	14.999	5.333E-06	6.027E-05	5.866E-05	8.139E-05	129	-126	158	-2663	-284	292	2371	284	611	1629
1.000E-04	15.011	6.672E-06	7.532E-05	7.346E-05	1.017E-04	161	-157	198	-3326	-356	365	2962	356	763	2034
1.315E-04	15.031	8.784E-06	9.899E-05	9.690E-05	1.338E-04	212	-208	260	-4367	-470	480	3889	468	1002	2671

Cracking state – Yielding state (RF6)

B. steel strain	c (cm)	Curvature, ϕ	B. steel strain, ϵ_s	Top steel strain, ϵ_s	CFRP strain ϵ_{CFRP}	B. steel stress (ksc)	Top steel stress (ksc)	CFRP stress (ksc)	C_c (kg)	C_s (kg)	T_s (kg)	T_c (kg)	T_{CFRP} (kg)	Moment (kg-m)	Load (kg)
9.899E-05	15.031	8.784E-06	9.899E-05	9.690E-05	1.338E-04	212	-208	260	-4367	-470	480	3889	468	1002	2671
1.400E-04	13.155	1.065E-05	1.400E-04	9.750E-05	1.822E-04	300	-209	354	-4050	-473	679	3208	637	860	2292
3.260E-04	9.828	1.979E-05	3.260E-04	1.153E-04	4.044E-04	699	-247	785	-4161	-559	1581	1726	1414	930	2479
5.120E-04	8.978	2.956E-05	5.120E-04	1.471E-04	6.290E-04	1098	-315	1222	-5124	-713	2483	1156	2199	1273	3394
6.980E-04	8.683	3.962E-05	6.980E-04	1.855E-04	8.549E-04	1496	-398	1660	-6336	-900	3385	862	2988	1666	4443
8.840E-04	8.568	4.985E-05	8.840E-04	2.277E-04	1.081E-03	1895	-488	2100	-7648	-1104	4286	685	3780	2075	5534
1.070E-03	8.528	6.021E-05	1.070E-03	2.726E-04	1.308E-03	2294	-584	2541	-9008	-1322	5188	567	4574	2490	6641
1.256E-03	8.524	7.066E-05	1.256E-03	3.197E-04	1.536E-03	2692	-685	2983	-10392	-1550	6090	483	5369	2908	7755
1.442E-03	8.542	8.120E-05	1.442E-03	3.688E-04	1.764E-03	3091	-791	3425	-11790	-1788	6992	421	6165	3327	8871
1.628E-03	8.573	9.183E-05	1.628E-03	4.199E-04	1.992E-03	3490	-900	3868	-13192	-2036	7894	372	6962	3746	9988
1.814E-03	8.612	1.026E-04	1.814E-03	4.730E-04	2.220E-03	3889	-1014	4311	-14596	-2294	8796	333	7761	4164	11105
2.000E-03	8.659	1.134E-04	2.000E-03	5.283E-04	2.449E-03	4287	-1132	4756	-15998	-2561	9698	301	8561	4583	12220
2.186E-03	8.712	1.243E-04	2.186E-03	5.857E-04	2.678E-03	4686	-1256	5201	-17396	-2840	10600	275	9362	5000	13333
2.235E-03	8.727	1.272E-04	2.235E-03	6.012E-04	2.739E-03	4791	-1289	5318	-17763	-2915	10837	269	9573	5109	13625

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Yielding state – Ultimate state (RF6)

T. concrete strain	c (cm)	Curvature, ϕ	B. steel strain, ϵ_s	Top steel strain, ϵ_s'	CFRP strain ϵ_{CFRP}	B. steel stress (ksc)	Top steel stress (ksc)	CFRP stress (ksc)	C_c (kg)	C_s (kg)	T_s (kg)	T_c (kg)	T_{CFRP} (kg)	Moment (kg-m)	Load (kg)
1.110E-03	8.727	1.272E-04	2.235E-03	6.012E-04	2.739E-03	4791	-1289	5318	-17763	-2915	10837	269	9573	5109	13625
1.200E-03	8.590	1.397E-04	2.474E-03	6.412E-04	3.027E-03	4791	-1375	5879	-18554	-3109	10837	245	10582	5386	14363
1.400E-03	8.387	1.669E-04	2.990E-03	7.323E-04	3.651E-03	4791	-1570	7091	-20254	-3551	10837	205	12763	5979	15944
1.600E-03	8.278	1.933E-04	3.483E-03	8.269E-04	4.248E-03	4791	-1773	8251	-21855	-4010	10837	177	14851	6541	17443
1.800E-03	8.233	2.186E-04	3.950E-03	9.255E-04	4.816E-03	4791	-1984	9352	-23340	-4487	10837	156	16834	7069	18851
2.000E-03	8.233	2.429E-04	4.389E-03	1.028E-03	5.351E-03	4791	-2204	10392	-24698	-4986	10837	141	18706	7561	20162
2.200E-03	8.267	2.661E-04	4.799E-03	1.136E-03	5.853E-03	4791	-2434	11366	-25918	-5506	10837	128	20458	8014	21371
2.400E-03	8.331	2.881E-04	5.177E-03	1.248E-03	6.318E-03	4791	-2674	12269	-26991	-6050	10837	119	22085	8427	22471
2.600E-03	8.419	3.088E-04	5.522E-03	1.365E-03	6.745E-03	4791	-2925	13099	-27909	-6617	10837	111	23578	8797	23459
2.800E-03	8.531	3.282E-04	5.833E-03	1.487E-03	7.132E-03	4791	-3188	13851	-28662	-7211	10837	104	24932	9122	24325
3.000E-03	8.664	3.462E-04	6.106E-03	1.615E-03	7.477E-03	4791	-3462	14521	-29242	-7831	10837	99	26138	9399	25065

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Properties of section of specimen RF7

ความกว้าง (b)	15	cm	กำลังรับแรงที่จุดคราก (f_y)	4,791	ksc
ความลึก (t)	30	cm	Modulus of Elasticity (E_s)	2,143,697	ksc
ระยะประสิทธิผล (d)	26.3	cm	ระยะจากผิวนอกถึงเหล็กรับแรงดึง	3.7	cm
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f_c)	300	ksc	ปริมาณเหล็กรับแรงดึง (A_s)	2.26	cm ²
Modulus of Elasticity (E_c)	263,445	ksc	ระยะจากผิวนอกถึงเหล็กรับแรงอัด	4.0	cm
กำลังรับแรงที่จุดครากของแผ่น CFRP (f_{CFRP})	32,867	ksc	ปริมาณเหล็กรับแรงอัด (A_s')	2.26	cm ²
Modulus of Elasticity of CFRP (E_{FRP})	1,942,000	ksc	ความกว้างของ CFRP	5	cm
ความหนาของ Epoxy	0.20	cm	ความหนาของ CFRP	0.12	cm

Initial state - Cracking state (RF7)

B. concrete strain	c (cm)	Curvature, ϕ	B. steel strain, ϵ_s	Top steel strain, ϵ_s'	CFRP strain ϵ_{CFRP}	B. steel stress (ksc)	Top steel stress (ksc)	CFRP stress (ksc)	C_c (kg)	C_s (kg)	T_s (kg)	T_c (kg)	T_{CFRP} (kg)	Moment (kg-m)	Load (kg)
0.000E+00	0.000	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.000E-05	14.705	1.308E-06	1.516E-05	1.400E-05	2.034E-05	33	-30	40	-634	-68	74	604	24	143	382
4.000E-05	14.715	2.617E-06	3.032E-05	2.804E-05	4.068E-05	65	-60	79	-1267	-136	147	1208	47	286	763
6.000E-05	14.725	3.928E-06	4.547E-05	4.213E-05	6.102E-05	97	-90	119	-1898	-204	220	1811	71	429	1144
8.000E-05	14.737	5.241E-06	6.061E-05	5.628E-05	8.136E-05	130	-121	158	-2528	-273	294	2413	95	571	1524
1.000E-04	14.749	6.557E-06	7.574E-05	7.048E-05	1.017E-04	162	-151	198	-3158	-342	367	3013	119	714	1903
1.315E-04	14.767	8.632E-06	9.955E-05	9.294E-05	1.337E-04	213	-199	260	-4145	-451	483	3958	156	937	2499

Cracking state – Yielding state (RF7)

B. steel strain	c (cm)	Curvature, ϕ	B. steel strain, ϵ_s	Top steel strain, ϵ_s	CFRP strain ϵ_{CFRP}	B. steel stress (ksc)	Top steel stress (ksc)	CFRP stress (ksc)	C_c (kg)	C_s (kg)	T_s (kg)	T_c (kg)	T_{CFRP} (kg)	Moment (kg-m)	Load (kg)
9.955E-05	14.767	8.632E-06	9.955E-05	9.294E-05	1.337E-04	213	-199	260	-4145	-451	483	3958	156	937	2499
1.400E-04	12.803	1.037E-05	1.400E-04	9.131E-05	1.811E-04	300	-196	352	-3741	-443	679	3294	211	764	2038
3.260E-04	9.058	1.891E-05	3.260E-04	9.563E-05	4.009E-04	699	-205	778	-3391	-464	1581	1807	467	683	1821
5.120E-04	8.006	2.799E-05	5.120E-04	1.121E-04	6.228E-04	1098	-240	1210	-3885	-544	2483	1221	726	882	2352
6.980E-04	7.607	3.734E-05	6.980E-04	1.347E-04	8.459E-04	1496	-289	1643	-4632	-653	3385	915	986	1134	3025
8.840E-04	7.431	4.685E-05	8.840E-04	1.607E-04	1.070E-03	1895	-345	2077	-5482	-779	4286	729	1246	1403	3742
1.070E-03	7.348	5.646E-05	1.070E-03	1.890E-04	1.294E-03	2294	-405	2512	-6385	-917	5188	605	1507	1679	4476
1.256E-03	7.311	6.614E-05	1.256E-03	2.190E-04	1.518E-03	2692	-469	2948	-7314	-1062	6090	516	1769	1957	5219
1.442E-03	7.300	7.589E-05	1.442E-03	2.504E-04	1.743E-03	3091	-537	3384	-8258	-1214	6992	450	2030	2237	5965
1.628E-03	7.304	8.570E-05	1.628E-03	2.831E-04	1.967E-03	3490	-607	3821	-9213	-1373	7894	399	2292	2517	6713
1.814E-03	7.318	9.556E-05	1.814E-03	3.170E-04	2.192E-03	3889	-680	4258	-10171	-1537	8796	357	2555	2798	7462
2.000E-03	7.338	1.055E-04	2.000E-03	3.521E-04	2.418E-03	4287	-755	4695	-11131	-1707	9698	324	2817	3079	8210
2.186E-03	7.365	1.154E-04	2.186E-03	3.884E-04	2.643E-03	4686	-833	5133	-12092	-1883	10600	296	3080	3359	8958
2.235E-03	7.372	1.181E-04	2.235E-03	3.982E-04	2.703E-03	4791	-854	5248	-12344	-1931	10837	289	3149	3433	9155

สถาบันวิจัยปวรส
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Yielding state – Ultimate state (RF7)

T. concrete strain	c (cm)	Curvature, ϕ	B. steel strain, ϵ_s	Top steel strain, ϵ_s	CFRP strain ϵ_{CFRP}	B. steel stress (ksc)	Top steel stress (ksc)	CFRP stress (ksc)	C_c (kg)	C_s (kg)	T_s (kg)	T_c (kg)	T_{CFRP} (kg)	Moment (kg-m)	Load (kg)
8.705E-04	7.372	1.181E-04	2.235E-03	3.982E-04	2.703E-03	4791	-854	5248	-12344	-1931	10837	289	3149	3433	9155
1.200E-03	6.461	1.857E-04	3.685E-03	4.571E-04	4.420E-03	4791	-980	8584	-13955	-2216	10837	184	5151	4013	10703
1.400E-03	6.186	2.263E-04	4.553E-03	4.947E-04	5.449E-03	4791	-1060	10582	-14938	-2399	10837	151	6349	4354	11610
1.600E-03	6.015	2.660E-04	5.395E-03	5.360E-04	6.449E-03	4791	-1149	12524	-15880	-2599	10837	128	7514	4681	12482
1.800E-03	5.913	3.044E-04	6.207E-03	5.823E-04	7.412E-03	4791	-1248	14394	-16762	-2823	10837	112	8637	4992	13312
2.000E-03	5.857	3.415E-04	6.980E-03	6.342E-04	8.333E-03	4791	-1359	16182	-17572	-3075	10837	100	9709	5285	14094
2.200E-03	5.837	3.769E-04	7.713E-03	6.923E-04	9.206E-03	4791	-1484	17878	-18298	-3357	10837	91	10727	5560	14826
2.400E-03	5.844	4.107E-04	8.402E-03	7.572E-04	1.003E-02	4791	-1623	19474	-18933	-3671	10837	83	11685	5814	15503
2.600E-03	5.874	4.427E-04	9.042E-03	8.294E-04	1.079E-02	4791	-1778	20964	-19471	-4022	10837	77	12578	6046	16123
2.800E-03	5.924	4.727E-04	9.631E-03	9.093E-04	1.150E-02	4791	-1949	22339	-19904	-4409	10837	72	13404	6255	16680
3.000E-03	5.993	5.006E-04	1.017E-02	9.975E-04	1.215E-02	4791	-2138	23593	-20225	-4837	10837	68	14156	6439	17172

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Properties of section of specimen RF9

ความกว้าง (b)	15	cm	กำลังรับแรงที่จุดคราก (f_y)	3,742	ksc
ความลึก (t)	30	cm	Modulus of Elasticity (E_s)	2,143,697	ksc
ระยะประสิทธิผล (d)	26.1	cm	ระยะจากผิวนอกถึงเหล็กรับแรงดึง	3.9	cm
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (f_c)	300	ksc	ปริมาณเหล็กรับแรงดึง (A_s)	4.02	cm ²
Modulus of Elasticity (E_c)	263,445	ksc	ระยะจากผิวนอกถึงเหล็กรับแรงอัด	4.2	cm
กำลังรับแรงที่จุดครากของแผ่น CFRP (f_{CFRP})	32,867	ksc	ปริมาณเหล็กรับแรงอัด (A_s')	2.26	cm ²
Modulus of Elasticity of CFRP (E_{FRP})	1,942,000	ksc	ความกว้างของ CFRP	10	cm
ความหนาของ Epoxy	0.20	cm	ความหนาของ CFRP	0.12	cm

Initial state - Cracking state (RF9)

B. concrete strain	c (cm)	Curvature, ϕ	B. steel strain, ϵ_s	Top steel strain, ϵ_s	CFRP strain ϵ_{CFRP}	B. steel stress (ksc)	Top steel stress (ksc)	CFRP stress (ksc)	C_c (kg)	C_s (kg)	T_s (kg)	T_c (kg)	T_{CFRP} (kg)	Moment (kg-m)	Load (kg)
0.000E+00	0.000	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.000E-05	15.132	1.345E-06	1.475E-05	1.471E-05	2.035E-05	32	-32	40	-691	-71	127	588	47	157	418
4.000E-05	15.145	2.693E-06	2.950E-05	2.947E-05	4.070E-05	63	-63	79	-1380	-143	254	1174	95	313	836
6.000E-05	15.158	4.043E-06	4.423E-05	4.430E-05	6.105E-05	95	-95	119	-2069	-215	381	1760	142	470	1252
8.000E-05	15.170	5.394E-06	5.896E-05	5.918E-05	8.140E-05	126	-127	158	-2755	-287	508	2344	190	626	1668
1.000E-04	15.183	6.749E-06	7.368E-05	7.412E-05	1.018E-04	158	-159	198	-3441	-359	635	2928	237	781	2083
1.315E-04	15.203	8.886E-06	9.684E-05	9.778E-05	1.338E-04	208	-210	260	-4517	-474	835	3844	312	1026	2736

Cracking state – Yielding state (RF9)

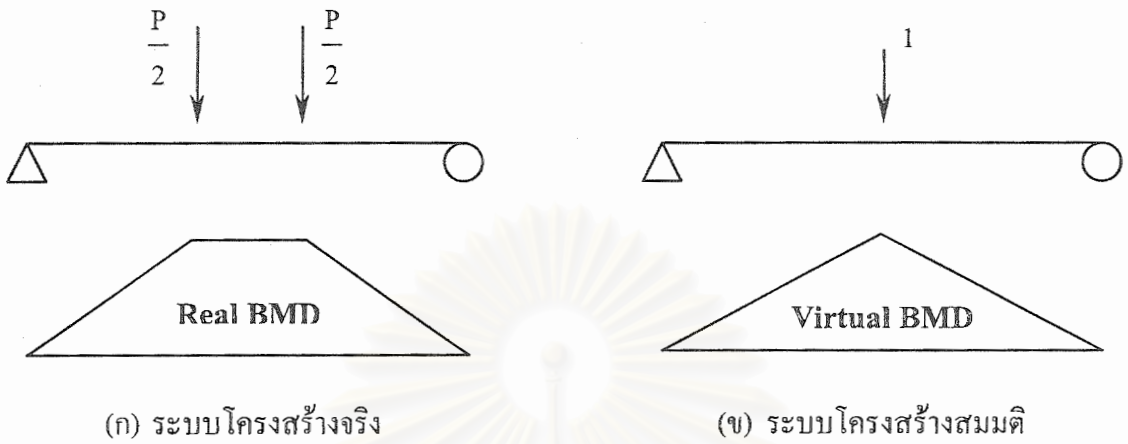
B. steel strain	c (cm)	Curvature, ϕ	B. steel strain, ϵ_s	Top steel strain, ϵ_s	CFRP strain ϵ_{CFRP}	B. steel stress (ksc)	Top steel stress (ksc)	CFRP stress (ksc)	C_c (kg)	C_s (kg)	T_s (kg)	T_c (kg)	T_{CFRP} (kg)	Moment (kg-m)	Load (kg)
9.684E-05	15.203	8.886E-06	9.684E-05	9.778E-05	1.338E-04	208	-210	260	-4517	-474	835	3844	312	1026	2736
1.400E-04	13.325	1.096E-05	1.400E-04	1.000E-04	1.856E-04	300	-214	360	-4272	-485	1207	3117	432	899	2398
3.260E-04	10.345	2.069E-05	3.260E-04	1.272E-04	4.121E-04	699	-273	800	-4805	-617	2810	1651	960	1072	2858
5.120E-04	9.644	3.111E-05	5.120E-04	1.694E-04	6.414E-04	1098	-363	1246	-6185	-821	4414	1098	1495	1505	4014
6.980E-04	9.420	4.185E-05	6.980E-04	2.184E-04	8.721E-04	1496	-468	1694	-7806	-1059	6017	816	2032	1985	5295
8.840E-04	9.348	5.277E-05	8.840E-04	2.717E-04	1.104E-03	1895	-582	2143	-9522	-1317	7620	647	2572	2480	6613
1.078E-03	9.339	6.433E-05	1.078E-03	3.306E-04	1.346E-03	2312	-709	2614	-11360	-1603	9295	531	3137	3001	8003
1.256E-03	9.360	7.503E-05	1.256E-03	3.872E-04	1.568E-03	2692	-830	3045	-13060	-1877	10827	455	3654	3480	9280
1.442E-03	9.401	8.635E-05	1.442E-03	4.491E-04	1.801E-03	3091	-963	3498	-14846	-2177	12430	396	4198	3981	10616
1.628E-03	9.453	9.780E-05	1.628E-03	5.138E-04	2.035E-03	3490	-1101	3952	-16634	-2491	14034	349	4742	4481	11950
1.746E-03	9.492	1.051E-04	1.746E-03	5.562E-04	2.183E-03	3742	-1192	4239	-17762	-2697	15047	325	5087	4797	12792

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Yielding state – Ultimate state (RF9)

T. concrete strain	c (cm)	Curvature, ϕ	B. steel strain, ϵ_s	Top steel strain, ϵ_s	CFRP strain ϵ_{CFRP}	B. steel stress (ksc)	Top steel stress (ksc)	CFRP stress (ksc)	C_c (kg)	C_s (kg)	T_s (kg)	T_c (kg)	T_{CFRP} (kg)	Moment (kg-m)	Load (kg)
9.976E-04	9.492	1.051E-04	1.746E-03	5.562E-04	2.183E-03	3742	-1192	4239	-17762	-2697	15047	325	5087	4797	12792
1.200E-03	8.819	1.361E-04	2.351E-03	6.285E-04	2.917E-03	3742	-1347	5666	-19049	-3048	15047	251	6799	5285	14094
1.400E-03	8.415	1.664E-04	2.942E-03	7.012E-04	3.634E-03	3742	-1503	7058	-20322	-3400	15047	205	8469	5752	15340
1.600E-03	8.163	1.960E-04	3.516E-03	7.767E-04	4.331E-03	3742	-1665	8412	-21550	-3766	15047	174	10094	6199	16531
1.800E-03	8.009	2.248E-04	4.066E-03	8.560E-04	5.001E-03	3742	-1835	9712	-22704	-4151	15047	152	11655	6622	17658
2.000E-03	7.923	2.524E-04	4.589E-03	9.397E-04	5.639E-03	3742	-2014	10951	-23768	-4557	15047	135	13141	7018	18714
2.200E-03	7.887	2.789E-04	5.080E-03	1.028E-03	6.241E-03	3742	-2205	12119	-24726	-4987	15047	122	14543	7385	19692
2.400E-03	7.892	3.041E-04	5.538E-03	1.123E-03	6.803E-03	3742	-2407	13211	-25569	-5444	15047	112	15853	7720	20588
2.600E-03	7.929	3.279E-04	5.958E-03	1.223E-03	7.322E-03	3742	-2621	14219	-26286	-5929	15047	104	17063	8023	21394
2.800E-03	7.996	3.502E-04	6.339E-03	1.329E-03	7.796E-03	3742	-2850	15140	-26867	-6446	15047	98	18168	8290	22105
3.000E-03	8.090	3.708E-04	6.679E-03	1.443E-03	8.221E-03	3742	-3092	15966	-27304	-6995	15047	92	19159	8518	22716

จากหลักการของงานสมมติ (virtual work) (ดูรูปที่ ก.3 ประกอบ) จะถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง โดยค่าการโก่งตัวจะมีค่าดังสมการ (ก.8)



รูปที่ ก.3 แสดงลักษณะโมเมนต์ในระบบโครงสร้างจริงและระบบโครงสร้างสมมติ

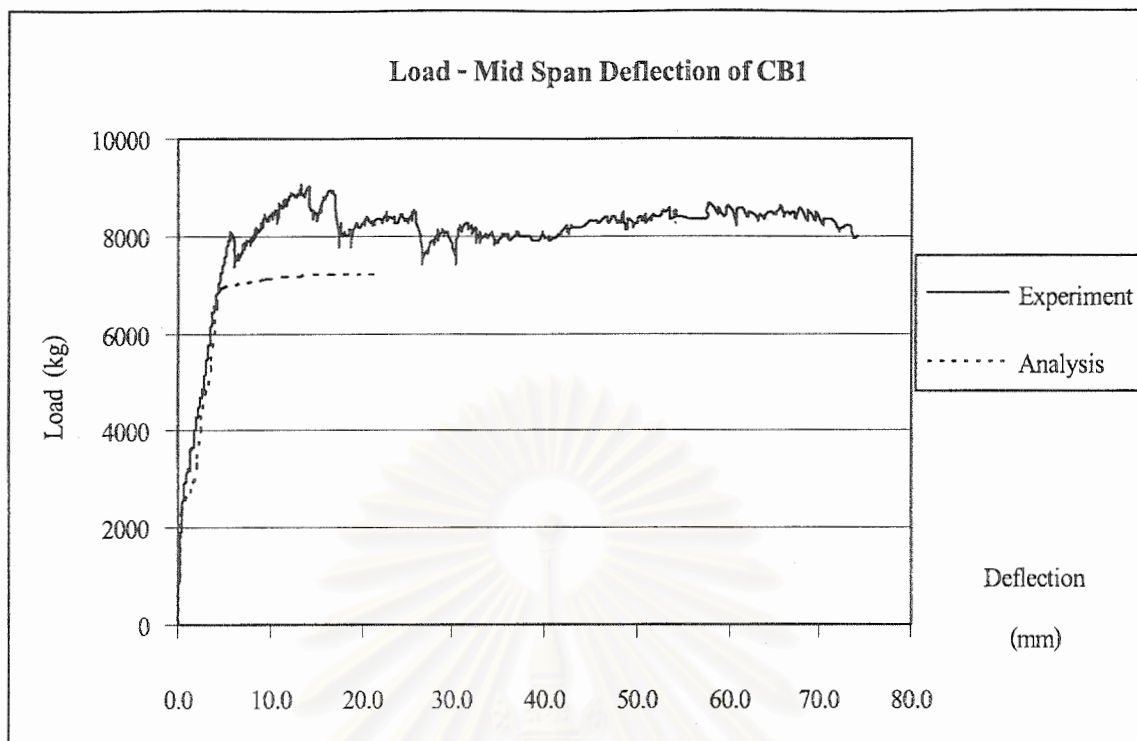
$$\Delta = \int_0^L \frac{Mm}{EI} dx \quad (\text{ก.8})$$

แต่จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง จึงสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{M}{EI}$ และค่ามุมการหมุนไปของหน้าตัด (curvature, ϕ) ได้ ดังนั้น

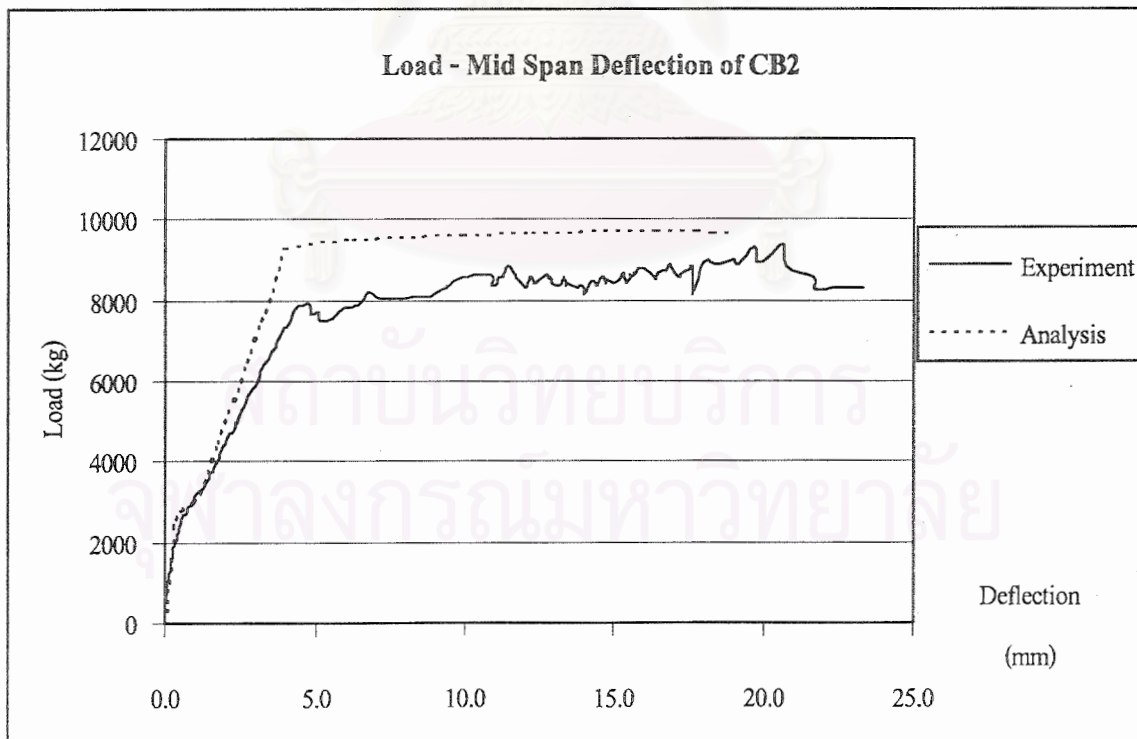
$$\Delta = \int_0^L \phi m dx \quad (\text{ก.9})$$

โดยการอินทิเกรตจะใช้การอินทิเกรตเชิงตัวเลขแบบ Simpson ซึ่งผลของการวิเคราะห์เทียบกับผลการทดสอบจะเป็นไปดังรูป ก.4 ถึง ก.9 ซึ่งในการวิเคราะห์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้องจะหยุดการวิเคราะห์เมื่อความเครียดที่ผิวคอนกรีตส่วนรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 0.003 ดังนั้นในคานตัวอย่าง CB1 และ CB2 ค่าการโก่งตัวที่จุดประลัยจึงมีค่าต่ำกว่าผลการทดสอบ

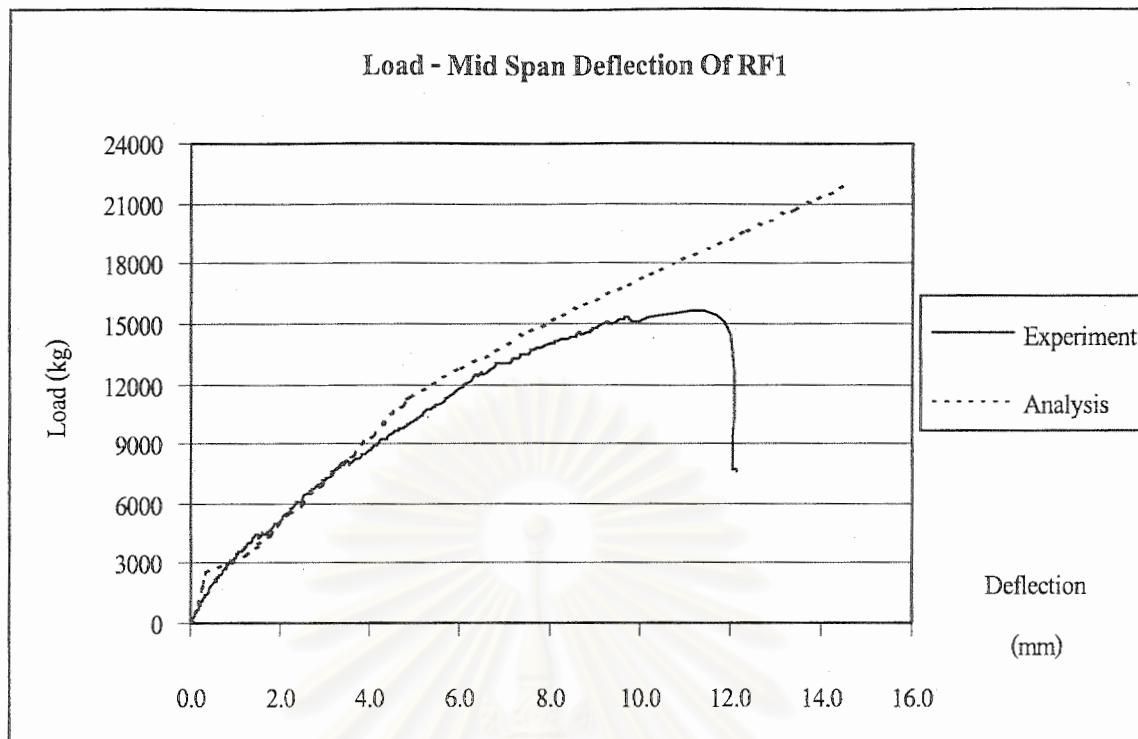
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



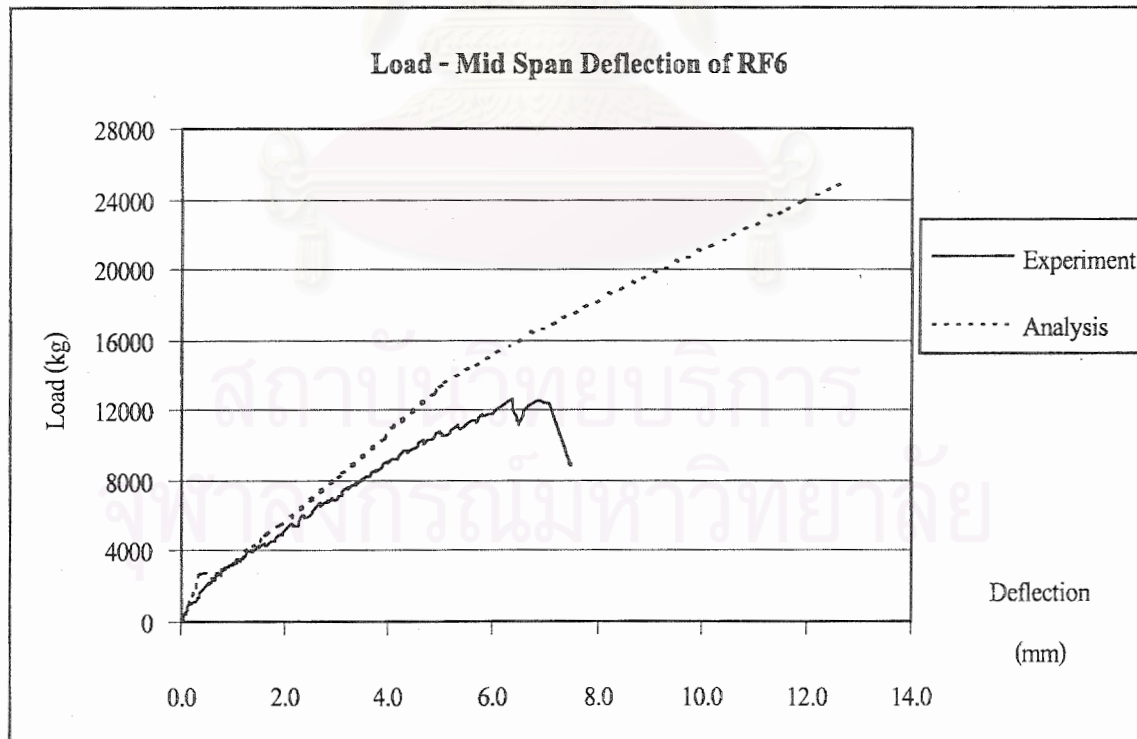
รูปที่ ก.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง CB1



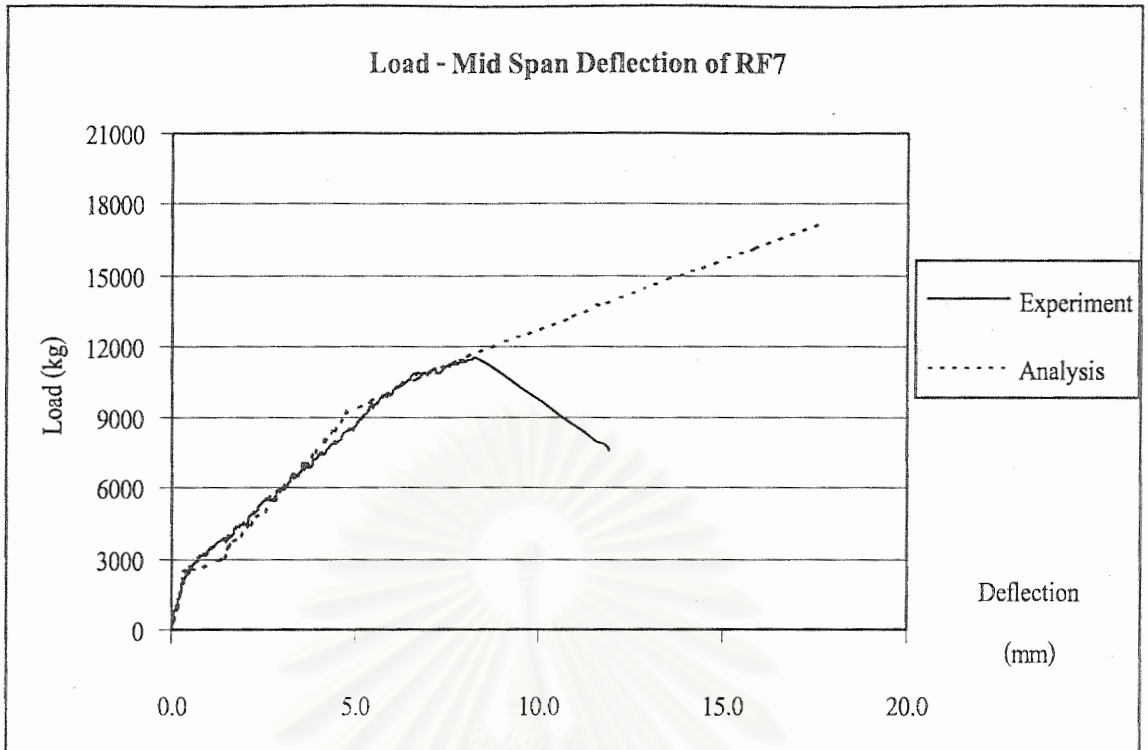
รูปที่ ก.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง CB2



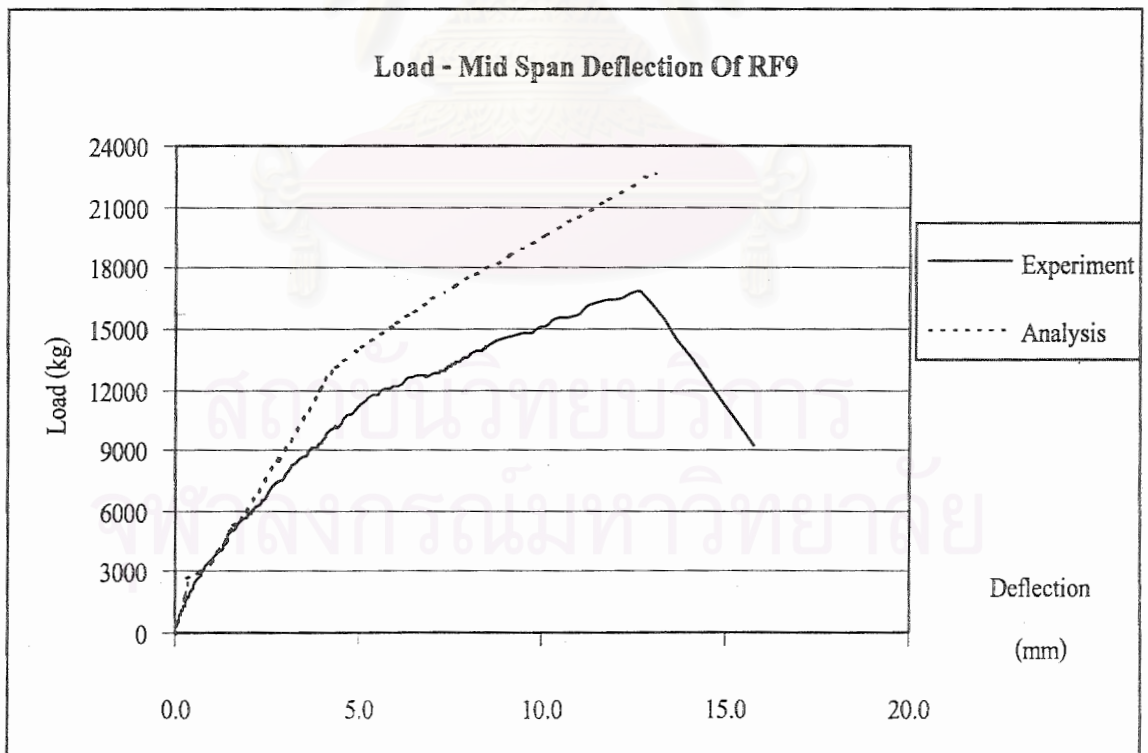
รูปที่ ก.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง RF1



รูปที่ ก.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง RF6



รูปที่ ก.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง RF7



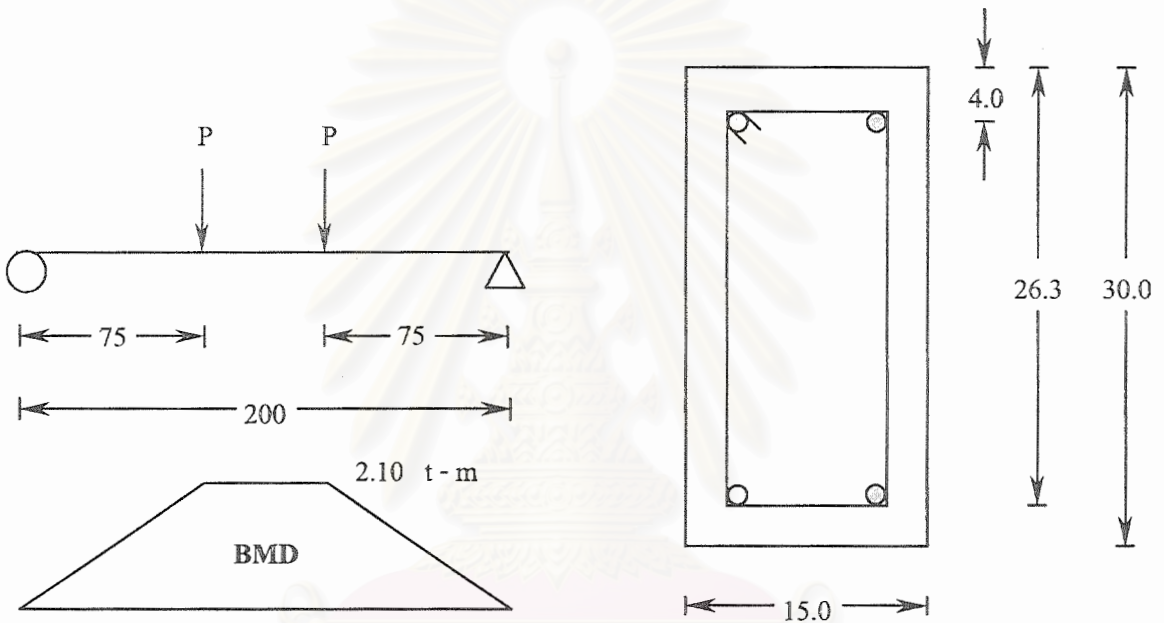
รูปที่ ก.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำและค่าการโก่งตัวของคานตัวอย่าง RF9

ภาคผนวก ข.

การเปรียบเทียบค่าความเครียดบนหน้าตัดของคาน CB1 และ RF1

แสดงรายละเอียดการคำนวณหาค่าความเครียดและหน่วยแรงในเนื้อวัสดุของคานตัวอย่าง ที่น้ำหนักกระทำ (2P) 5.6 ตัน ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง โดยอาศัยค่าจากภาคผนวก ก.

คานตัวอย่าง CB1



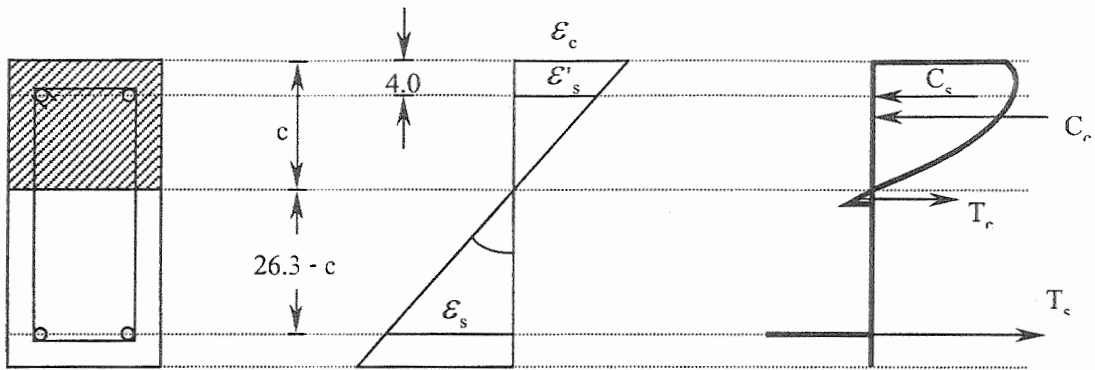
รูปที่ ข.1 แสดงลักษณะและค่าโมเมนต์คัตที่เกิดขึ้น
เมื่อน้ำหนักกระทำต่อคานตัวอย่าง 5.8 ตัน

รูปที่ ข.2 แสดงลักษณะหน้าตัดของคานตัวอย่าง
CB1

รายละเอียดการคำนวณ

จากภาคผนวก ก. พบว่า ที่น้ำหนักกระทำ 5.6 ตัน เหล็กเสริมรับแรงดึงในคานตัวอย่าง CB1 จะมีค่าความเครียดประมาณ 1.801×10^{-3} cm/cm ซึ่งเป็นน้ำหนักกระทำที่เหล็กเสริมรับแรงดึงยังไม่ถึงจุดครากแต่หน้าตัดคานตัวอย่างเกิดการแตกร้าวแล้ว (พิจารณารูปที่ ข.1 ข.2 และ ข.3 ประกอบ) โดยการคำนวณจะเริ่มจากการสมมติระยะแกนสะเทิน (c) โดยเทียบจากผิวบนของคานคอนกรีต ซึ่งที่น้ำหนักกระทำ 5.6 ตันคานตัวอย่าง CB1 จะมีค่า c เท่ากับ 6.567 ซม.

$$\text{Curvature ; } \phi = \frac{1.801 \times 10^{-3}}{26.3 - 6.567} = 9.127 \times 10^{-5} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$$



รูปที่ ข.3 แสดงการกระจายตัวของค่าความเครียดและความเค้นของหน้าตัดคานตัวอย่าง CB1
ณ น้ำหนักกระทำ 5.8 ตัน

Strain ; $\epsilon_s = 1.801 \times 10^{-3}$

$$\epsilon'_s = \phi(c - 4.0)$$

$$= (9.127 \times 10^{-5})(6.567 - 4.0) = 2.343 \times 10^{-4} \text{ ksc.}$$

Forces ; $T_s = (\epsilon_s E_s) A_s$

$$= (1.801 \times 10^{-3})(2.144 \times 10^6)(2.26) = 8,733 \text{ kg.}$$

$$C_s = (\epsilon'_s E_s) A_s$$

$$= (2.343 \times 10^{-4})(2.144 \times 10^6)(2.26) = 1,136 \text{ kg.}$$

$$T_c = \frac{b(f_r)^2}{2\phi E_c}$$

$$= \frac{(15)(2\sqrt{300})^2}{2(9.127 \times 10^{-5})(263,445)} = 374 \text{ kg.}$$

$$C_c = bf_c \phi c^2 \left[1 - \frac{\phi c}{3\epsilon_o} \right]$$

$$= 15(300)(9.127 \times 10^{-5})(6.567)^2 \left[1 - \frac{(9.127 \times 10^{-5})(6.567)}{3(0.002)} \right]$$

$$= 7,971 \text{ kg.}$$

Equilibrium ; $\Sigma F_x = 0$

$$- 7,971 - 1,136 + 8,733 + 374 = 0$$

Resisting moment ; $M_{\text{resist}} = T_s(26.3 - c) + T_c \left(\frac{2f_r}{3\phi E_c} \right) + C_c X + C_s(c - 4)$

$$= [8,733(26.3 - 6.567)] + \left[374 \frac{(2)(2\sqrt{300})}{3(9.127 \times 10^{-5})(263,445)} \right]$$

$$+ 7,971 \left[6.567 \left[\frac{(8)(0.002) - (3)(9.127 \times 10^{-5})(6.567)}{12(0.002) - (4)(9.127 \times 10^{-5})(6.567)} \right] \right]$$

$$+ 1,136(6.567 - 4.0)$$

$$= 2,100 \quad \text{kg - m}$$

Actual load ; $2P = \frac{2M_{\text{resis}}}{0.75}$

$$= \frac{2(2,100)}{0.75} = 5,600 \text{ kg.}$$

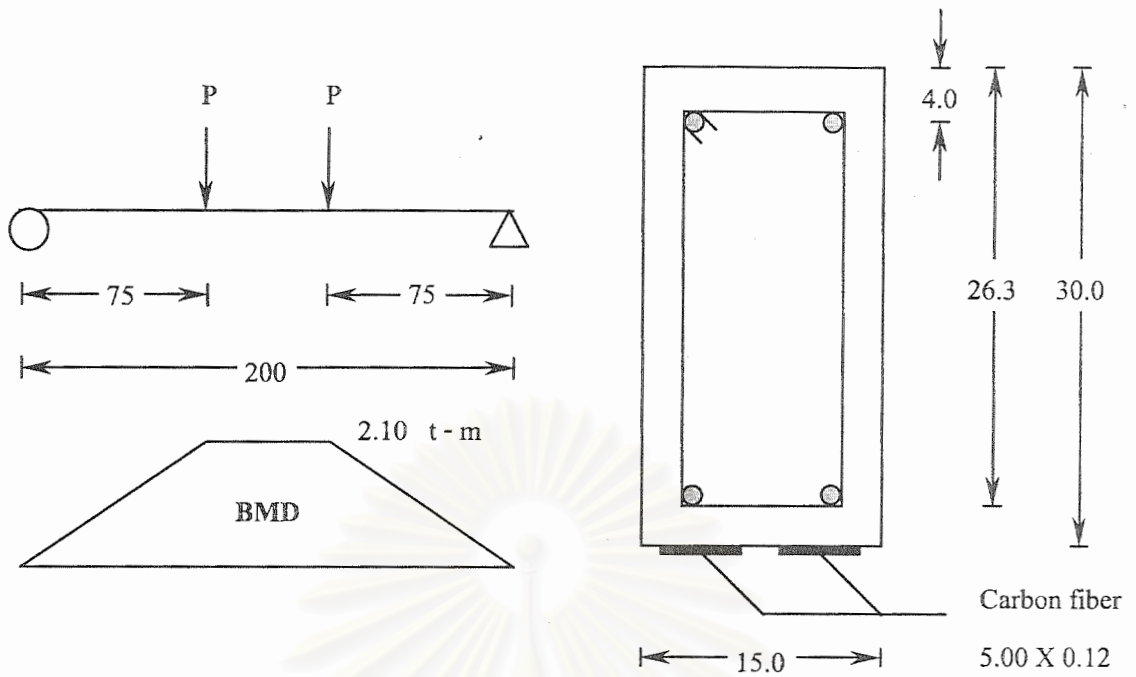
กานตัวอย่าง RF1

รายละเอียดการคำนวณ

จากภาคผนวก ก. พบว่าที่น้ำหนักกระทำ 5.6 ตัน เหล็กเสริมรับแรงดึงของกานตัวอย่าง RF1 จะมีค่าความเครียดประมาณ $1.078 \times 10^{-3} \text{ cm/cm}$ ซึ่งเป็นจุดที่เหล็กเสริมรับแรงดึงยังไม่ถึงจุดคราก แต่หน้าตัดกานตัวอย่าง RF1 เกิดการแตกร้าวแล้ว (ดูรูปที่ ข.4 ข.5 และ ข.6 ประกอบ) โดยการคำนวณจะเริ่มจากการสมมติระยะแกนสะเทิน (c) โดยเทียบจากผิวบนของกานคอนกรีต ซึ่งที่น้ำหนักกระทำ 5.6 ตัน กานตัวอย่าง RF1 จะมีค่า c เท่ากับ 7.963 ซม.

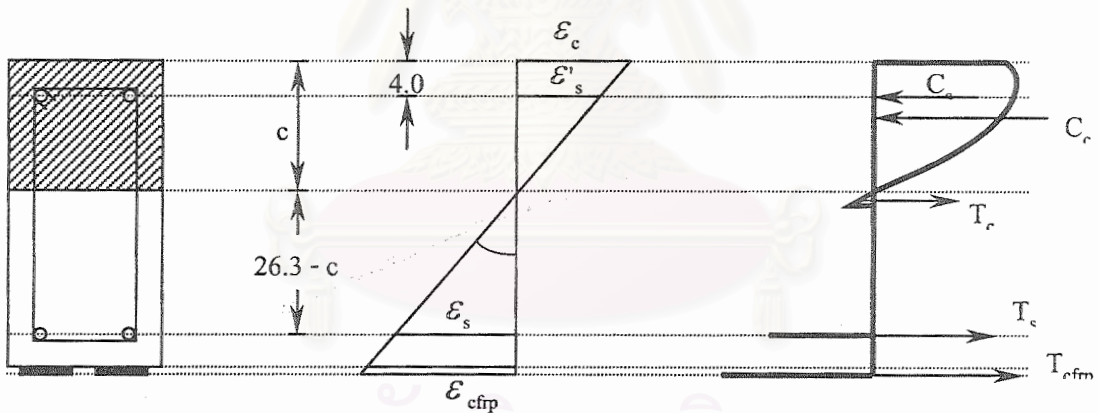
Curvature ; $\phi = \frac{1.078 \times 10^{-3}}{26.3 - 7.963} = 5.880 \times 10^{-5} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$

Strain ; $\epsilon_s = 1.078 \times 10^{-3}$



รูปที่ ข.4 แสดงลักษณะและค่าโมเมนต์คัตที่เกิดขึ้น
เมื่อมีน้ำหนักกระทำต่อคานตัวอย่าง 5.6 ตัน

รูปที่ ข.5 แสดงลักษณะหน้าตัดของคาน
ตัวอย่าง RF1



รูปที่ ข.6 แสดงการกระจายตัวของค่าความเครียดและความเค้นของหน้าตัดคานตัวอย่าง RF1
ณ น้ำหนักกระทำ 5.6 ตัน

$$\begin{aligned} \epsilon'_s &= \phi(c - 4.0) \\ &= (5.880 \times 10^{-5})(7.963 - 4.0) \\ &= 2.330 \times 10^{-4} \text{ ksc.} \end{aligned}$$

Forces ;

$$\begin{aligned} T_s &= (\epsilon_s E_s) A_s \\ &= (1.078 \times 10^{-3})(2.144 \times 10^6)(2.26) \\ &= 5,229 \text{ kg.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_s &= (\epsilon'_s E_s) A_s \\
 &= (2.330 \times 10^{-4})(2.144 \times 10^6)(2.26) = 1,130 \text{ kg.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_c &= \frac{b(f_r)^2}{2\phi E_c} \\
 &= \frac{(15)(2\sqrt{300})^2}{2(5.880 \times 10^{-5})(263,445)} = 581 \text{ kg.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_c &= bf_c \phi_c^2 \left[1 - \frac{\phi_c}{3\epsilon_o} \right] \\
 &= 15(300)(5.880 \times 10^{-5})(7.963)^2 \left[1 - \frac{(5.880 \times 10^{-5})(7.963)}{3(0.002)} \right] \\
 &= 7,735 \text{ kg.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_{\text{cfpr}} &= (\phi E_{\text{cfpr}} (t + t_{\text{epoxy}} + \frac{t_{\text{cfpr}}}{2} - c)) A_{\text{cfpr}} \\
 &= (5.880 \times 10^{-5})(1.942 \times 10^6)(30.0 + 0.2 + \frac{0.12}{2} - 7.963)(10.0 \times 0.12) \\
 &= 3,055 \text{ kg.}
 \end{aligned}$$

Equilibrium ; $\sum F_x = 0$

$$-7,735 - 1,130 + 5,229 + 581 + 3,055 = 0$$

Resisting moment ;

$$\begin{aligned}
 M_{\text{resist}} &= T_s(26.3 - c) + T_c \left(\frac{2f_r}{3\phi E_c} \right) + C_c X + C_s(c - 4) + T_{\text{cfpr}} \left(t + t_{\text{epoxy}} + \frac{t_{\text{cfpr}}}{2} - c \right) \\
 &= \left[5,229(26.3 - 7.963) \right] + \left[581 \frac{(2)(2\sqrt{300})}{3(5.880 \times 10^{-5})(263,445)} \right] + 1,130(7.963 - 4.0) \\
 &\quad + 7,735 \left[7.963 \frac{(8)(0.002) - (3)(5.880 \times 10^{-5})(7.963)}{12(0.002) - (4)(5.880 \times 10^{-5})(7.963)} \right] \\
 &\quad + 3,055 \left(30.0 + 0.2 + \frac{0.12}{2} - 7.963 \right) = 2,100 \text{ kg - m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Actual load ;} \quad 2P &= \frac{2M_{\text{resis}}}{0.75} \\
 &= \frac{2(2,100)}{0.75} \\
 &= 5,600 \text{ kg.}
 \end{aligned}$$

ซึ่งจากรายการคำนวณข้างต้นพบว่า ค่าความเครียดและแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุของคานตัวอย่าง CB1 และ RF1 จะมีค่าดังแสดงในตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเครียดในเนื้อวัสดุระหว่างคานตัวอย่าง CB1 และ RF1

คานตัว อย่าง	ระยะแกน สะเทิน (cm)	ค่าความเครียดในเนื้อวัสดุ (cm ⁻¹)		แรงที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ (kg.)			
		เหล็กเสริม รับแรงอัด	เหล็กเสริม รับแรงดึง	คอนกรีต (แรงอัด)	เหล็กเสริม รับแรงอัด	เหล็กเสริม รับแรงดึง	Carbon Fiber (แรงดึง)
CB1	6.567	2.343×10^{-4}	1.801×10^{-3}	7,971	1,136	8,733	-
RF1	7.963	2.330×10^{-4}	1.078×10^{-3}	7,735	1,130	5,229	3,055

โดยจากตารางที่ ข.1 แสดงให้เห็นว่าแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนสามารถช่วยลดค่าหน่วยแรงในเนื้อวัสดุของหน้าตัดคาน และยังส่งผลให้แนวแกนสะเทินเลื่อนตัวต่ำลงกว่าคานตัวอย่างที่ไม่มีการเสริมกำลังดังที่ได้วิเคราะห์ไปแล้วในหัวข้อ 6.1.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

การคำนวณหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงตั้งฉากตามแบบจำลองของ Malek และคณะ

จากผลการทดสอบที่ได้ นำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Malek และคณะตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2 ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบ ณ น้ำหนักกระทำต่อคานที่ทำให้คอนกรีตบริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนเกิดการแตกร้าว โดยจะมีคุณสมบัติต่างๆของหน้าตัดดังแสดงในตารางที่ ค.1 ซึ่งสัญลักษณ์ต่างๆของหน้าตัดในตารางที่ ค.1 มีดังต่อไปนี้

- b_p : ความกว้างของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน*
- t_p : ความหนาของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน*
- E_p : โมดูลัสยืดหยุ่นของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่ได้จากการทดสอบ
- t_a : ความหนาของวัสดุประสาน โดยปกติจะมีค่าประมาณ 2 มม.**
- E_a : โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุประสานมีค่าเท่ากับ 130,479 ksc**
- G_a : โมดูลัสเฉือนของวัสดุประสานคำนวณจากโมดูลัสยืดหยุ่น โดยใช้อัตราส่วนปัวร์ซองเท่ากับ 0.35
- L_0 : ระยะจากจุดเริ่มต้นของโมเมนต์ค้ำของคาน (ในที่นี้คือจุดรองรับ) ถึงปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน
- \bar{y} : ระยะจากผิวคอนกรีตส่วนรับแรงอัดถึงแกนสะเทินของหน้าตัดเสริมกำลังที่ยังไม่แตกร้าว
- \bar{y}_c : ระยะจากแนวแกนสะเทินถึงผิวนอกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา
- I_p : โมเมนต์ความเฉื่อยของแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน
- I_c : โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแปลงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา
- I_r : โมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดแปลงของคานการเสริมกำลัง
- E_c : โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
- q : แรงกระทำภายนอกเป็นน้ำหนักกระทำแผ่สม่ำเสมอ (uniform load)
- M_m : โมเมนต์ส่วนเพิ่ม ณ ปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน คำนวณจาก

$$M_m = L_0 t_p b_p y_c (b_3 \sqrt{A} + b_2)$$

* แถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ในการศึกษา แต่ละแถบมีความกว้าง 50 มม. หนา 1.2 มม.

** ข้อมูลจากบริษัท ชิก้า (ประเทศไทย) จำกัด

ตารางที่ ค.1 แสดงคุณสมบัติต่างๆของหน้าตัดคานตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

Specimens	Properties of section											
	E_a (ksc)	G_a (ksc.)	t_a (cm)	b_p (cm)	t_p (cm)	L_o (cm)	\bar{y} (cm)	I_p (cm ⁴)	I_c (cm ⁴)	I_{tr} (cm ⁴)	E_p (ksc)	E_c (ksc)
RF1	130,479	48,326	0.20	10.0	0.12	5.0	15.28	1.440E-03	37,766	39,785	1.942E+06	263,445
RF4	130,479	48,326	0.20	10.0	0.12	15.0	15.28	1.440E-03	37,766	39,785	1.942E+06	263,445
RF5	130,479	48,326	0.20	10.0	0.12	25.0	15.28	1.440E-03	37,766	39,785	1.942E+06	263,445
RF6	130,479	48,326	0.20	15.0	0.12	5.0	15.42	2.160E-03	37,766	40,770	1.942E+06	263,445
RF8	130,479	48,326	0.08	10.0	0.12	5.0	15.28	1.440E-03	37,766	39,785	1.942E+06	263,445
RF9	130,479	48,326	0.20	10.0	0.12	5.0	15.55	1.440E-03	39,129	41,075	1.942E+06	263,445
Malek	8,298	3,028	0.15	15.2	0.60	15.5	23.2	2.736E-01	161,000	177,000	3.795E+05	285,321

ตารางที่ ค.2 แสดงการคำนวณค่าหน่วยแรงเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับวัสดุประสานจากแบบจำลองของ Malek และคณะ

Specimens	Load (kg)	$M(x_0) = a_1x_0^2 + a_2x_0 + a_3$			$\tau(x) = t_p [C_1 \sqrt{A} \cosh(\sqrt{A} x) + C_2 \sqrt{A} \sinh(\sqrt{A} x) + 2b_1x + b_2]$							
		a_1	a_2	a_3	A	b_1	b_2	b_3	C_1	C_2	x (cm)	τ (ksc)
RF1	14,100	0	7,050	0	1.04	0.00	19.96	99.80	99.80	-99.80	0.0	14.59
RF4	9,000	0	4,500	0	1.04	0.00	12.74	191.10	191.10	-191.10	0.0	24.88
RF5	6,900	0	3,450	0	1.04	0.00	9.77	244.19	244.19	-244.19	0.0	31.01
RF6	12,600	0	6,300	0	1.04	0.00	17.56	87.82	87.82	-87.82	0.0	12.84
RF8	12,800	0	6,400	0	2.59	0.00	18.12	90.60	90.60	-90.60	0.0	19.68
RF9	15,500	0	7,750	0	1.04	0.00	21.63	108.14	108.14	-108.14	0.0	15.81
Malek	20,388	0	10,194	0	0.09	0.00	1.78	27.55	27.55	-27.55	0.0	5.99

ตารางที่ ค.3 แสดงการคำนวณค่าหน่วยแรงตั้งฉากที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับวัสดุประสานจากแบบจำลองของ Malek และคณะ

Specimens	q (kg)	M _m (kg-cm) due to stress concentration*	K _n	$f_n(x) = e^{-\beta x} [D_1 \cos(\beta x) + D_2 \sin(\beta x)] + \frac{qE_p I_p}{b_p E_c I_C}$							
				β	M ₀ (kg-cm)	V _p (kg)	V _c (kg)	D ₁	D ₂	x (cm)	Normal stress (ksc)**
RF1	0	10,986	6.524E+05	4.914E+00	35,250	-8.8	-26,141	-8.644	9.738E-03	0.0	-8.64
RF4	0	-14,692	6.524E+05	4.914E+00	67,500	-14.9	768	-14.764	1.865E-02	0.0	-14.76
RF5	0	80,383	6.524E+05	4.914E+00	86,250	-18.6	-1,201	-18.404	2.383E-02	0.0	-18.40
RF6	0	14,502	6.524E+05	4.914E+00	31,500	-11.6	3,411	-7.615	8.702E-03	0.0	-7.62
RF8	0	14,817	1.631E+06	6.179E+00	32,000	-11.8	3,448	-14.661	1.112E-02	0.0	-14.66
RF9	0	11,904	6.524E+05	4.914E+00	38,750	-9.5	5,379	-9.375	1.033E-02	0.0	-9.38
Malek	0	32,516	5.531E+04	1.193E+00	158,002	-27.3	8,123	-4.355	5.605E-02	0.0	-4.36

* เป็นโมเมนต์ส่วนเพิ่ม ณ บริเวณปลายแถบพลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน เกิดการหน่วยแรงเฉือน

** หน่วยแรงอัดมีเครื่องหมายเป็น (+) หน่วยแรงดึงมีเครื่องหมายเป็น (-)

โมเมนต์ส่วนเพิ่มจากหน่วยแรงเฉือนจะถูกนำไปรวมกับ โมเมนต์จากแรงภายนอก โดยมีค่าเท่ากับ

$$M_m = L_o b_p y_c \bar{\tau}(x)$$

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าหน่วยแรงที่ได้จากแบบจำลองและค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบ (คิดโมเมนต์ส่วนเพิ่ม)

Specimens	Σ Moment (kg-cm)	Flex. stress σ_x (ksc)	Norm. stress σ_y (ksc)	Shear stress τ (ksc)	Principal stress (ksc)*		Tensile strength (ksc)	Difference from testing (%)
					Max.	Min.		
RF1	46,236	17.11	8.64	14.59	28.07	-2.32	26.0	7
RF4	123,704	45.77	14.76	24.88	59.58	0.95	31.1	92
RF5	203,001	75.11	18.40	31.01	88.77	4.74	31.1	185
RF6	46,002	16.45	7.62	12.84	25.61	-1.54	32.2	21
RF8	46,817	17.32	14.66	19.68	35.71	-3.73	32.2	11
RF9	50,654	17.82	9.38	15.81	29.96	-2.77	26.4	14
Malek	190,518	24.00	4.36	5.99	25.68	2.67	31.7	19

* หน่วยแรงอัดมีเครื่องหมายเป็น (-) หน่วยแรงดึงมีเครื่องหมายเป็น (+)

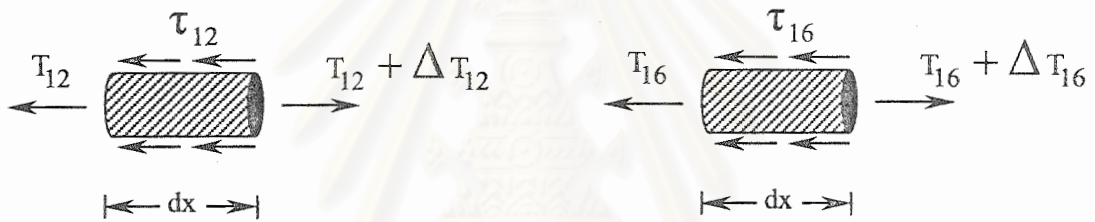
ตารางที่ ค.5 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าหน่วยแรงที่ได้จากแบบจำลองและค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบ (ไม่คิดโมเมนต์ส่วนเพิ่ม)

Specimens	Ext. moment (kg-cm)	Flex. stress σ_x (ksc)	Norm. stress σ_y (ksc)	Shear stress τ (ksc)	Principal stress (ksc)*		Tensile strength (ksc)	Difference from testing (%)
					Max.	Min.		
RF1	35,250	13.04	8.64	14.59	25.60	-3.91	26.2	2
RF4	67,500	24.97	14.76	24.88	45.27	-5.53	31.1	46
RF5	86,250	31.91	18.40	31.01	56.89	-6.58	31.1	83
RF6	31,500	11.26	7.62	12.84	22.41	-3.53	32.2	30
RF8	32,000	11.84	14.66	19.68	32.98	-6.48	32.2	2
RF9	38,750	13.63	9.38	15.81	27.46	-4.45	26.4	4
Malek	158,002	19.91	4.36	5.99	21.94	2.32	31.7	31

* หน่วยแรงอัดมีเครื่องหมายเป็น (-) หน่วยแรงดึงมีเครื่องหมายเป็น (+)

การคำนวณอัตราส่วนค่าหน่วยแรงเฉือนในคานที่ใช้เหล็กเสริมขนาดต่างกัน

เมื่อพิจารณาคานตัวอย่าง RF1 และ RF9 ที่น้ำหนักกระทำเท่ากัน พบว่าโมเมนต์ดัดภายใน (internal bending moment) ที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่างทั้งสองจะมีค่าเท่ากันในทุก ๆ ตำแหน่งของคาน เนื่องจากน้ำหนักที่กระทำต่อคานตัวอย่างทั้งสองมีรูปแบบที่เหมือนกัน ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่หน้าตัดใดๆ ของคานตัวอย่างทั้งสองในตำแหน่งเดียวกัน โดยนำชิ้นส่วนเล็กๆ ของเหล็กเสริมรับแรงดึง ณ หน้าตัดดังกล่าวที่มีความยาว dx มาพิจารณา ดังรูปที่ ง.1 จะพบว่าหน่วยแรงเฉือน (τ) จะมีค่าเท่ากับ ส่วนต่างของแรงดึงในเหล็กเสริมรับแรงดึงดังสมการที่ (ง.1) ซึ่งหน่วยแรงเฉือนนี้ถูกพิจารณาให้มีค่าคงที่ตลอดความยาวชิ้นส่วนเล็กๆนี้



(ก) แสดงแรงต่างๆในชิ้นส่วนเหล็กเสริมรับแรงดึงของคานตัวอย่าง RF1

(ข) แสดงแรงต่างๆในชิ้นส่วนเหล็กเสริมรับแรงดึงของคานตัวอย่าง RF9

รูปที่ ง.1 แสดงแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อเหล็กเสริมรับดึง

$$\tau = \frac{\Delta T}{2 \pi r} \quad (ง.1)$$

โดยเมื่ออาศัยสมการที่ (ง.1) จะสามารถเขียนค่าของหน่วยแรงเฉือนที่ผิวของเหล็กเสริมรับแรงดึงในคานตัวอย่าง RF1 ซึ่งใช้เหล็กเสริมรับแรงดึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ได้ใหม่ดังสมการที่ (ง.2)

$$\tau_{12} = \frac{\Delta T_{12}}{2 \pi r_{12}} \quad (ง.2)$$

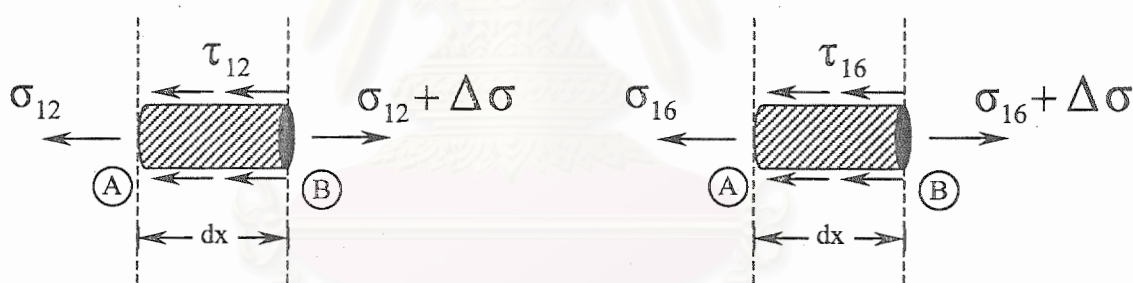
ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาคานตัวอย่าง RF9 ซึ่งใช้เหล็กเสริมรับแรงดึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. หน่วยแรงเฉือนในสมการที่ (ง.1) จะเขียนได้ใหม่ดังสมการที่ (ง.3)

$$\tau_{16} = \frac{\Delta T_{16}}{2\pi r_{16}} \quad (ง.3)$$

และเนื่องจากชิ้นส่วนดังกล่าวถูกพิจารณาจากตำแหน่งเดียวกันของคานตัวอย่าง RF1 และ RF9 โดยมีรูปแบบของน้ำหนักกระทำที่เหมือนกัน ดังนั้นจะสามารถหาอัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่าง RF9 และคานตัวอย่าง RF1 ในชิ้นส่วนดังกล่าว โดยการนำสมการที่ (ง.3) มารดด้วยสมการที่ (ง.2) ซึ่งจะได้ดังสมการที่ (ง.4)

$$\frac{\tau_{16}}{\tau_{12}} = \left(\frac{r_{12}}{r_{16}} \right) \left(\frac{\Delta T_{16}}{\Delta T_{12}} \right) \quad (ง.4)$$

ซึ่งเมื่อพิจารณาชิ้นส่วนดังกล่าวอีกครั้งดังรูปที่ ง.2 จะพบว่าค่าหน่วยแรงดึง (tensile stress, σ) ในหน้าตัด A และ หน้าตัด B ของคานตัวอย่าง RF1 และ RF9 จะมีค่าไม่เท่ากัน แต่ค่าส่วนต่างของหน่วยแรงดึง ($\Delta\sigma$) ระหว่างหน้าตัด A และ B จะมีค่าเท่ากัน (สมการที่ (ง.5)) เนื่องจากโมเมนต์ดัดในทุกๆหน้าตัดของคานตัวอย่าง RF1 และ RF9 มีค่าเท่ากัน



(ก) แสดงหน่วยแรงต่างๆในชิ้นส่วนเหล็ก

(ข) แสดงหน่วยแรงต่างๆในชิ้นส่วนเหล็ก

เสริมรับแรงดึงของคานตัวอย่าง RF1

เสริมรับแรงดึงของคานตัวอย่าง RF9

รูปที่ ง.2 แสดงหน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อเหล็กเสริมรับดึง

$$\Delta\sigma_{16} = \Delta\sigma_{12} \quad (ง.5)$$

แต่หน่วยแรงดึงมีค่าเท่ากับแรงดึงหารด้วยพื้นที่หน้าตัดรับแรงดึง $\left(\sigma = \frac{T}{\pi r^2} \right)$ ดังนั้นสมการที่

(ง.5) จึงเขียนได้ใหม่ดังสมการที่ (ง.6)

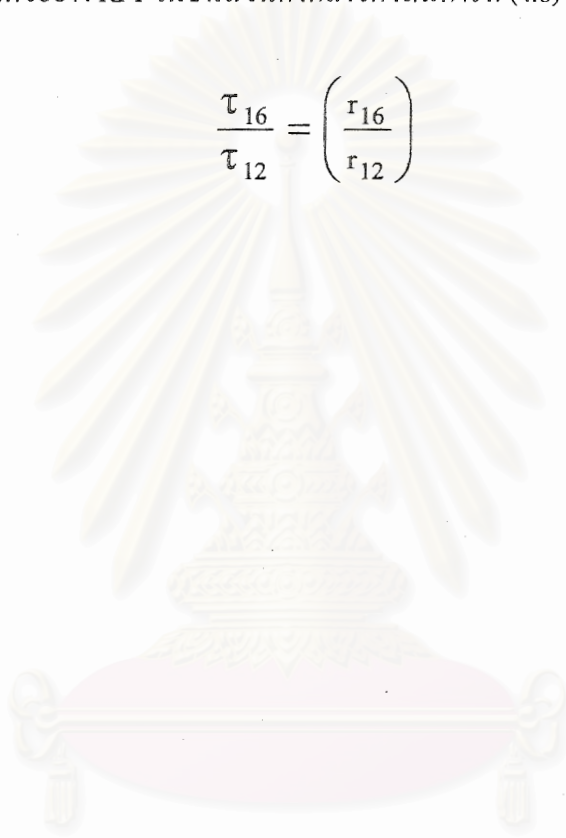
$$\frac{\Delta T_{16}}{\pi r_{16}^2} = \frac{\Delta T_{12}}{\pi r_{12}^2} \quad (ง.6)$$

จัดรูปสมการที่ (ง.6) ใหม่ดังสมการที่ (ง.7)

$$\frac{\Delta T_{16}}{\Delta T_{12}} = \left(\frac{r_{16}}{r_{12}} \right)^2 \quad (\text{ง.7})$$

แทนค่าสมการที่ (ง.7) ลงในสมการที่ (ง.4) จะได้อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคาน ตัวอย่าง RF9 และคานตัวอย่าง RF1 ในชั้นส่วนดังกล่าวดังสมการที่ (ง.8)

$$\frac{\tau_{16}}{\tau_{12}} = \left(\frac{r_{16}}{r_{12}} \right) \quad (\text{ง.8})$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปิยะ รัตนวุฒิสูววรรณ เกิดเมื่อวันที่ 23 ตุลาคม พ.ศ. 2521 ณ จังหวัดกรุงเทพมหานคร เป็นบุตรคนที่หนึ่งในจำนวนพี่น้องสามคน ศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนปานะพันธุ์วิทยา ในพระบรมราชูปถัมภ์ ระดับมัธยมต้นและมัธยมปลายที่โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) ในหลักสูตรมัธยมปลาย 2 ปีการศึกษา เข้าศึกษาต่อที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีพุทธศักราช 2538 โดยสำเร็จการศึกษาในปีพุทธศักราช 2541 ในสาขาวิศวกรรมโยธา และเข้าศึกษาต่อที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ในปีพุทธศักราช 2542 ซึ่งได้เสนอรายงานวิจัยฉบับนี้แก่คณะกรรมการเพื่อขอจบการศึกษา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย