



พฤติกรรมของคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังรับแรงเฉือน

ด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

โดย

นางสาวสินีนานา แก้วประสิทธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พฤติกรรมของคานลึกลับคองกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังรับแรงเฉือน

ด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

โดย

นางสาวสินีนานา แก้วประสิทธิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

BEHAVIOR OF RC DEEP BEAMS SHEAR STRENGTHENED
WITH CFRP SHEET

BY

MS. SINEENAT KAEWPRASIT

A THESIS OR DISSERTATION SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF CIVIL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

THAMMASAT UNIVERSITY

ACADEMIC YEAR 2023

COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นางสาวสินีนากู แก้วประสิทธิ์

เรื่อง

พฤติกรรมคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

ได้ผ่านการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

เมื่อ วันที่ 22 เมษายน พ.ศ. 2567

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนชัย ทองโถม)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์



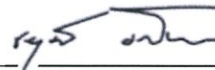
(รองศาสตราจารย์ ดร. สายันต์ ศิริมนตรี)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุตม์ งามโขนง)

คณบดี



(ศาสตราจารย์ ดร. สัญญา มิตรอม)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานกลีคคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์โดยทำการทดสอบคาน 2 กลุ่ม ได้แก่ คานที่มีอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล (a/d ratio) เท่ากับ 1.0 และ 2.0 จำนวนทั้งหมด 10 ตัวอย่าง คานทดสอบมีขนาด $0.20 \times 0.45 \times 2.4$ เมตร รูปแบบการเสริมกำลังมี 2 แบบ ได้แก่ U-wraps และ Fully wraps แต่ละกลุ่มประกอบไปด้วยคานอ้างอิง 1 ตัวอย่าง คานที่ถูกเสริมกำลังหลังการเกิดรอยร้าวเนื่องจากแรงเฉือน 1 ตัวอย่าง คานที่เสริมกำลัง 2 ตัวอย่าง โดยคานทั้งหมดเสริมเหล็กรับแรงเฉือนน้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดและคานที่มีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในปริมาณเท่ากับปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด 1 ตัวอย่าง ผลการทดสอบพบว่า การเสริมกำลังแบบ Fully wrap สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้มากกว่าแบบ U-wrap และการเสริมกำลังคานที่เกิดการแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนโดยการบรรทุกน้ำหนักจนคานเกิดการแตกร้าวและได้รับการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ในคานตัวอย่างกลุ่มที่ 1 มีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยเพิ่มมากขึ้น ส่วนคานตัวอย่างกลุ่มที่ 2 เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดัดแต่กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยไม่เพิ่มขึ้น การเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในแนวตั้งและแนวนอนในปริมาณเท่ากับปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้ดีเมื่อคานมี a/d สูง แต่การแอนตัวลดลงเนื่องจากมีความแข็ง (Stiffness) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยในคานกลุ่มที่ 2 มีมากกว่าคานกลุ่มที่ 1 ประสิทธิภาพของการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคานกลีคจะเห็นได้ชัดเมื่อคานมีค่า a/d ratio สูง และมีผลน้อยเมื่อคานมี a/d ratio ต่ำ เนื่องจากเมื่อคานยังมีค่า a/d ratio น้อย คอนกรีตยังมีบทบาทสำคัญในการรับแรงเฉือนมากทำให้กำลังรับน้ำหนักส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีตในแนว compression strut

ABSTRACT

This study investigates the shear behavior of reinforced concrete (RC) deep beams shear strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP). The experiment was divided into two groups of deep beams, which had shear span to effective depth ratios (a/d ratios) of 1.00 and 2.00. In total, ten identical specimens with dimensions of 0.20 x 0.45 x 2.4 meters were applied by two techniques to strengthen the RC deep beams: U-wraps and fully wraps. Each group consists of one reference beam, a beam that was strengthening after shear crack, two specimens that were strengthening with CFRP all these beams were strengthening with less than the minimum area of shear reinforcement and a beam that was strengthening with the minimum area of shear reinforcement. Experimental results revealed that the fully wraps strengthening outperformed U-wraps strengthening in terms of ultimate strengths. In addition, while the beam in group 1 received an improvement in ultimate load, the beam in group 2 failed in flexural and ultimate load did not rise when beams that had cracked due to shear strength were repaired by loading weight until the beams cracked and strengthened with CFRP sheets. The minimum area of shear reinforcement perpendicular and parallel to the longitudinal axis of the beam, can be to increase the ultimate load when beams have a high a/d ratio, but deflection has decreased as stiffness increases. Moreover, group 2's ultimate load increases at a faster rate than group 1's. With beams that have a high a/d ratio, the effectiveness of shear strengthened in deep beams will be obvious, and it will be less effective with beams that have a low a/d ratio. Concrete is crucial for shear strength in low- a/d beams because it influences load capacity through compression strength in compression struts.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้การช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ในการศึกษา ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สายันต์ ศิริมนตรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในทุกปัญหาที่ประสบ ตรวจสอบและช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ให้ข้อเสนอแนะและแนวทางในการทดสอบและจัดทำบทความทางวิชาการ สนับสนุนและให้กำลังใจ จนสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนะชัย ทองโถม ที่ปรึกษาร่วมและประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรภาพ แก้วสวัสดิ์วงศ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชยุตม์ งามโชนง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจสอบและให้ข้อเสนอแนะที่มีประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณทุนการศึกษาและทุนในการทำวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และขอขอบคุณ Retrofit Structure Special, Co. Ltd. ที่ได้ช่วยเหลือและสนับสนุนวัสดุเสริมกำลังและแรงงานในการติดตั้ง จนสามารถทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จได้

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกและให้การช่วยเหลือต่างๆในการทดสอบคานและ ขอขอบคุณน้องเซง น้องก๊อต น้องโตส น้องก้องตะวัน น้องวาเลนไทน์ และรุ่นน้องที่น่ารักทุกคน ที่คอยช่วยเหลือในทุกขั้นตอนตั้งแต่การทำคานตัวอย่างไปตลอดจนการทดสอบคานและยังคงเป็นกำลังใจเสมอมา รวมถึงบุคคลอื่นๆทุกท่านที่มีได้กล่าวถึงข้างต้นที่ให้การช่วยเหลือด้วยดีเสมอมา และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้ในปัญหาที่เกี่ยวข้องได้ไม่มากนักน้อย

สินีนานู แก้วประสิทธิ์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ. 2567

(4)

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	(1)
ABSTRACT	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญ	(4)
สารบัญตาราง	(9)
สารบัญรูปภาพ	(10)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1.1 คานลึง	4
2.1.2 ลักษณะการวิบัติของคานลึง	5
2.1.3 แบบจำลอง strut and tie	7
2.1.4 การออกแบบด้วย strut and tie model ตามมาตรฐาน ACI 318-19	8

	(5)
	หน้า
2.1.5 วัสดุคอมโพสิต	10
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
บทที่ 3 ขั้นตอนการวิจัย	27
3.1 การออกแบบคานลึกลับคอนกรีตโดยใช้แบบจำลอง Strut and tie	27
3.2 รายละเอียดของตัวอย่างการทดสอบ	30
3.3 การติดตั้งเครื่องมือและการทดสอบ	33
3.4 การทดสอบวัสดุและการผลิตคานตัวอย่าง	36
3.4.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ	36
3.4.1.1 การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีต	36
3.4.1.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม	36
3.4.2 การผลิตคานตัวอย่าง	38
3.4.3 ขั้นตอนการทดสอบคานตัวอย่าง	40
3.4.3.1 การทดสอบคานอ้างอิง	40
3.4.3.2 การเตรียมคานตัวอย่างเพื่อทดสอบการเสริมกำลัง	44
3.4.3.3 การเสริมกำลังคานตัวอย่าง	45
3.4.3.4 การทดสอบคานที่มีการเสริมกำลัง	52
บทที่ 4 ผลการทดสอบ	54
4.1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	54

4.2	พฤติกรรมภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกของคานที่มี	55
	อัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 1.00	
4.2.1	พฤติกรรมของคานอ้างอิงที่มีปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือน น้อยกว่าเหล็กเสริมต่ำสุด (BR1)	55
4.2.2	พฤติกรรมของคานอ้างอิงที่มีปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือน เพียงพอเท่าเหล็กเสริมต่ำสุด (BM1)	59
4.2.3	พฤติกรรมของคานที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วย แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบ U-wrap (B1U)	63
4.2.4	พฤติกรรมของคานที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วย แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบ U-wrap (B1F)	67
4.2.5	พฤติกรรมของคานที่เกิดรอยร้าวทแยงและเสริมกำลังด้วย แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบ Fully wrap (B1DF)	71
4.3	พฤติกรรมภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกของคานที่มี	76
	อัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 2.00	
4.3.1	พฤติกรรมของคานอ้างอิงที่มีปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือน น้อยกว่าเหล็กเสริมต่ำสุด (BR2)	76
4.3.2	พฤติกรรมของคานอ้างอิงที่มีปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือน เพียงพอเท่าเหล็กเสริมต่ำสุด (BM2)	79

	(7)
	หน้า
4.3.3 พฤติกรรมของคานที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วย แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบ U-wrap (B2U)	82
4.3.4 พฤติกรรมของคานที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วย แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบ U-wrap (B2F)	85
4.3.5 พฤติกรรมของคานที่เกิดรอยร้าวทแยงและเสริมกำลังด้วย แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบ Fully wrap (B2DF)	89
4.4 วิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดสอบ	93
4.4.1 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย	93
4.4.2 กลไกการวิบัติ	97
4.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กรับแรงเฉือน	101
4.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กรับแรงดึง	102
4.4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์	104
4.4.6 การเสริมกำลังคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กหลังเกิดรอยร้าวทแยง	105
4.4.7 อภิปรายผลการทดสอบ	106
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	109
5.1 สรุปผลการศึกษา	109
5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย	110
5.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป	111
รายการอ้างอิง	112

ภาคผนวก

- ก. การวิเคราะห์หน้าตัดคานเพื่อหาแรงกระทำสูงสุดที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด 114
- ข. การออกแบบคานตัวอย่างที่เสริมเหล็กรับแรงเฉือนน้อยกว่าปริมาณต่ำสุดโดยใช้แบบจำลอง Strut and tie ตามมาตรฐาน ACI318-19 116
- ค. การออกแบบคานตัวอย่างที่เสริมเหล็กรับแรงเฉือนเพียงพอเท่ากับปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดโดยใช้แบบจำลอง Strut and tie ตามมาตรฐาน ACI318-19 125
- ง. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กรับแรงเฉือนเหล็กเสริมรับแรงดึงและแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ 134

ประวัติการศึกษา

147



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของ Nodal zone	10
3.1 รายละเอียดการเสริมกำลังคานตัวอย่าง	31
4.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ผลิตคานตัวอย่าง	54
4.2 คุณสมบัติของวัสดุเสริมกำลัง	54
4.3 ผลการทดสอบของคานกลุ่มที่ 1	95
4.4 ผลการทดสอบของคานกลุ่มที่ 2	96
4.5 ผลการทดสอบเสริมกำลังคานที่เกิดรอยร้าวทแยง	105

สารบัญรูปภาพ

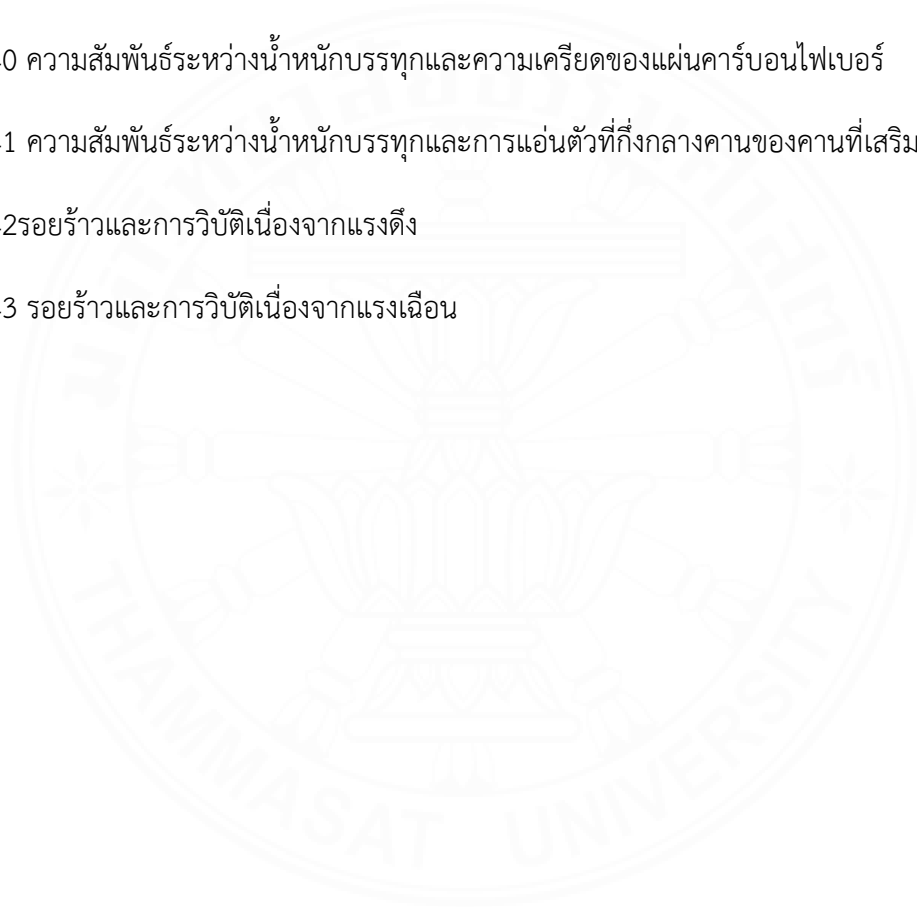
ภาพที่	หน้าที่
2.1.1 ระยะช่วงเฉือน (a) และความลึกประสิทธิผล (d)	4
2.1.2 B-regions และ D-regions	5
2.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล (a/d ratio)	6
2.1.4 การวิบัติของคานเหล็กจาก Shear tension และ Shear compression	6
2.1.5 องค์ประกอบของแบบจำลอง Strut and tie	7
2.1.6 ประเภทของ Node	8
2.1.7 เหล็กเสริมกันรั้วที่ขวางบริเวณ Strut	9
2.1.8 Stress-Strain Relationship ของวัสดุคอมโพสิตและเหล็กเสริม	10
3.1 รายละเอียดการเสริมเหล็กคานที่มีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนน้อยกว่ามาตรฐาน	28
3.2 แบบจำลอง strut and tie	28
3.3 รายละเอียดการเสริมเหล็กคานที่มีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนตามมาตรฐาน	29
3.4 แบบจำลอง strut and tie	29
3.5 ลักษณะการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์	32
3.6 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัด	33
3.7 ตำแหน่ง strain gauges บนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์	35
3.8 เครื่องมือทดสอบและการทดสอบวัสดุ	36
3.9 การเตรียมเหล็กเสริมและการติดตั้ง	38

3.10 การเตรียมเหล็กเสริมในแบบเพื่อรอการเทคอนกรีต	38
3.11 การเทคอนกรีตคานตัวอย่าง	39
3.12 ถอดแบบหลังจากการหล่อคานครบ 7 วัน	39
3.13 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบและอุปกรณ์ตรวจวัดในคานอ้างอิง	41
3.14 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคาน	42
3.15 การติดตั้งคานทดสอบและอุปกรณ์ตรวจวัดคานอ้างอิง	43
3.16 การกดยาลายคานตัวอย่างเพื่อทดสอบการเสริมกำลัง	44
3.17 ตัวอย่างการเตรียมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์	45
3.18 การลบเหลี่ยมคาน	47
3.19 การเตรียมผิวคอนกรีตให้เรียบ	47
3.20 เกร้าผิวคอนกรีตเพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศ	48
3.21 เครื่อง concrete moisture meter	48
3.22 ทา Epoxy Sikadur-330 สำหรับติดเส้นใยเสริมกำลัง	49
3.23 ติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์	49
3.24 ใช้ลูกกลิ้งรีดไล่ฟองอากาศ	50
3.25 การติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ชั้นที่ 2	50
3.26 การติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสร็จเรียบร้อยแล้ว	51
3.27 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบและอุปกรณ์ตรวจวัดในคานที่เสริมกำลัง	52

3.28 การติดตั้งคานทดสอบและอุปกรณ์ตรวจวัดคานที่เสริมกำลัง	53
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอนตัวที่กึ่งกลางคานของคาน BR1	56
4.2 ลักษณะการวิบัติของคาน BR1	56
4.3 รอยร้าวของคาน BR1 ที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ	57
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอนตัวที่กึ่งกลางคานของคาน BM1	59
4.5 ลักษณะการวิบัติของคาน BM1	60
4.6 รอยร้าวของคาน BM1 ที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ	60
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอนตัวที่กึ่งกลางคานของคาน B1U	64
4.8 ลักษณะการวิบัติของคาน B1U	64
4.9 รอยร้าวของคาน B1U ที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ	65
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอนตัวที่กึ่งกลางคานของคาน B1F	67
4.11 ลักษณะการวิบัติของคาน B1F	68
4.12 รอยร้าวของคาน B1F ที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ	69
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอนตัวที่กึ่งกลางคานของคาน B1DF	72
4.14 ลักษณะของรอยร้าวของคาน B1DF ก่อนการเสริมกำลัง	72
4.15 ลักษณะการวิบัติของคาน B1DF	73
4.16 รอยร้าวของคาน B1DF ที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ	73
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอนตัวที่กึ่งกลางคานของคาน BR2	76

4.18 ลักษณะการวิบัติของคาน BR2	77
4.19 รอยร้าวของคาน BR2 ที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ	77
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคาน BM2	79
4.21 ลักษณะการวิบัติของคาน BM2	80
4.22 รอยร้าวของคาน BM2 ที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ	80
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคาน B2U	82
4.24 ลักษณะการวิบัติของคาน B2U	83
4.25 รอยร้าวของคาน B2U ที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ	83
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคาน B2F	85
4.27 ลักษณะการวิบัติของคาน B2F	86
4.28 รอยร้าวของคาน B2F ที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ	86
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคาน B2DF	89
4.30 ลักษณะของรอยร้าวของคาน B2DF ก่อนการเสริมกำลัง	90
4.31 ลักษณะการวิบัติของคาน B2DF	90
4.32 รอยร้าวของคาน B2DF ที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ	91
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน	93
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของกลุ่มที่ 1	94
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของกลุ่มที่ 2	96

4.36 ลักษณะการวิบัติของคานกลุ่มที่ 1	98
4.37 ลักษณะการวิบัติกลุ่มที่ 2	100
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กรับแรงเฉือน	102
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กรับแรงดิ่ง	103
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์	104
4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคานที่เสริมกำลัง	106
4.42 รอยร้าวและการวิบัติเนื่องจากแรงดิ่ง	108
4.43 รอยร้าวและการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน	108



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ชิ้นส่วนโครงสร้างคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC Deep beams) ถูกนำมาใช้ในโครงสร้างขนาดใหญ่มากมายในปัจจุบัน เช่น โครงสร้างสะพาน อาคารสูง โครงสร้างนอกชายฝั่ง เป็นต้น ซึ่งโครงสร้างอาจเกิดการเสื่อมสภาพเมื่อรับแรงเป็นเวลานาน หรือโครงสร้างอาจมีความสามารถในการรับน้ำหนักไม่เพียงพอจึงทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้นได้ โดยส่วนใหญ่คานเหล็กจะมีพฤติกรรมการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนเป็นหลัก ดังนั้นการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังเมื่อเกิดรอยร้าวจึงสำคัญ เพื่อยืดอายุการใช้งานให้โครงสร้าง

ในปัจจุบันการซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิต Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) กำลังเป็นที่นิยมอย่างมาก เนื่องจากมีความสะดวกในการใช้งาน น้ำหนักเบา วิธีการติดตั้งง่าย มีคุณสมบัติทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดี ไม่เกิดสนิม และที่สำคัญมีกำลังรับแรงดึงได้สูง แต่เนื่องจาก CFRP มีราคาสูง และอาจเกิดการวิบัติจากการสูญเสียการยึดรั้ง (debonding) ระหว่างวัสดุเสริมกำลังและผิวคอนกรีตได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษารเปรียบเทียบพฤติกรรมของคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็กสองกลุ่มที่มีค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลต่างกัน ได้แก่ 1.00 และ 2.00 โดยทำการศึกษารเปรียบเทียบคานที่มีการเสริมเหล็กป้องกันรอยร้าวตามแนวตั้งและแนวนอนอย่างเพียงพอเท่ากับปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดและแบบต่ำกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดที่มาตรฐาน ACI318-19 กำหนด ศึกษารูปแบบการเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์และศึกษาความสามารถในการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เมื่อคานเกิดรอยร้าวทแยงจากฐานรองรับไปยังตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของคานเหล็กที่มีการเสริมเหล็กป้องกันรอยร้าวทั้งแนวตั้งและแนวนอนอย่างเพียงพอเท่ากับปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดและแบบต่ำกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดที่มาตรฐาน ACI318-19 กำหนด

1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคานเหล็กที่แตกต่างกัน 2 วิธี

1.2.3 เพื่อศึกษาความสามารถในการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เมื่อคานลึกลับเกิดรอยร้าวทแยงจากฐานรองรับไปยังตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ

1.2.4 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เมื่อคานเกิดรอยร้าวทแยงจากการรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน

1.2.5 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมของคานลึกลับที่มีอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพแตกต่างกัน ได้แก่ 1.00 และ 2.00

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 โครงสร้างคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อคานลึกลับประสิทธิภาพเท่ากับ 1.00 และ 2.00 เท่านั้น

1.3.2 คานเสริมกำลังด้วย Carbon fiber reinforced polymer ชนิด unidirectional เท่านั้น

1.3.3 ใช้คอนกรีตมีกำลังเท่ากับ 210 ksc. และเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD40 ในการหล่อคานทดสอบ

1.3.4 ตัวอย่างคานลึกลับที่ใช้ทดสอบจะออกแบบให้รับน้ำหนักด้วยแรงเฉือนเท่านั้น

1.3.5 การเสริมกำลังตัวอย่างคานจะเป็นการเสริมกำลังรับแรงเฉือนเท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการเสริมกำลังที่แตกต่างกันทั้ง 2 แบบได้

1.4.2 สามารถเข้าใจพฤติกรรมของคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพต่างกันคือ 1.00 และ 2.00

1.4.3 สามารถเห็นข้อแตกต่างของการเสริมเหล็กกันรอยร้าวตามแนวตั้งและแนวนอนในปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนต่ำสุดและในปริมาณที่ต่ำกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดได้อย่างชัดเจน

1.4.4 เห็นความสามารถในการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เมื่อคานเกิดรอยร้าวทแยงแล้ว

1.4.5 โครงการนี้สามารถเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่มีความสนใจในการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมคานลึคคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP และวิศวกรผู้ออกแบบการเสริมกำลังโครงสร้างคานลึคคอนกรีตเสริมเหล็ก



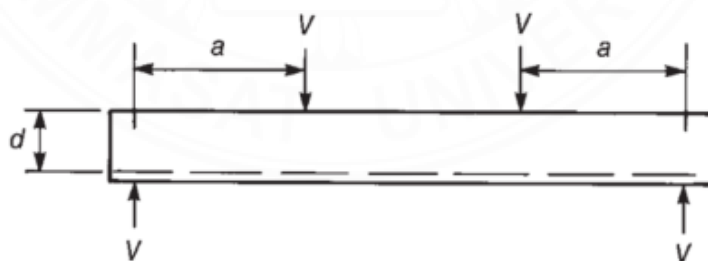
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

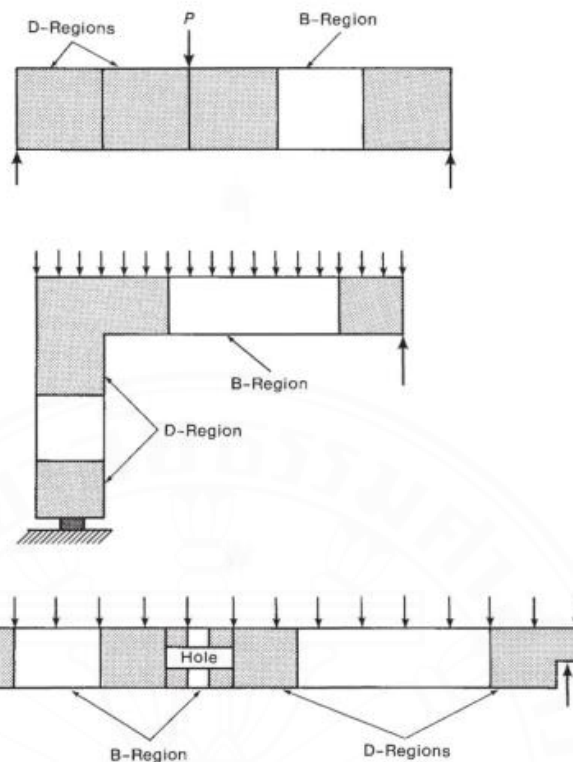
2.1.1 คานลึก

คานลึก (Deep beams) เป็นคานที่มีค่าหน่วยแรงเฉือนสูงและหน่วยแรงดัดจะไม่กระจาย เป็นเส้นตรงแม้ในช่วงอีลาสติก ซึ่งไม่สามารถใช้วิธีการคำนวณขนาดของหน้าตัดและหน่วยแรง โดยทั่วไปได้ คานลึกถูกจำแนกออกจากคานทั่วไปโดยดูจากค่าอัตราส่วนช่วงยาวต่อความลึก (L/h) น้อยกว่าหรือเท่ากับ 4 หรือจากค่าอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล (a/d) ที่น้อยกว่าเท่ากับ 2 ดังแสดงในภาพที่ 2.1.1 ซึ่งมีผลต่อพฤติกรรมกรรับแรงดัดและแรงเฉือนที่ทำให้เกิดรอยร้าวและการวิบัติ พฤติกรรมกรรับน้ำหนักของคานประกอบด้วยสองส่วนได้แก่ พฤติกรรมคาน (B-regions) คือส่วนที่ไม่ถูกรบกวนด้วยแรงเฉือนและมีการกระจายความเครียดเป็นสัดส่วนคงที่กับแกนสะเทินซึ่งมีพฤติกรรมตรงตามทฤษฎีคานของเบอร์นูลีและ พฤติกรรมอาร์ช (D-regions) คือบริเวณที่รับน้ำหนักกระทำเป็นจุดหรือฐานรองรับโดยมีขนาดเท่ากับความลึกประสิทธิผลของคานเมื่อวัดออกไปแต่ละด้าน หรือบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดกะทันหันซึ่งเป็นส่วนที่มีการถ่ายแรงอัดในคอนกรีตและถ่ายแรงดึงในเหล็กเสริมและเป็นส่วนที่มีกำลังต้านแรงเฉือนสูงกว่าบริเวณอื่น ดังแสดงในภาพที่ 2.1.2



ภาพที่ 2.1.1 ระยะช่วงเฉือน (a) และความลึกประสิทธิผล (d)

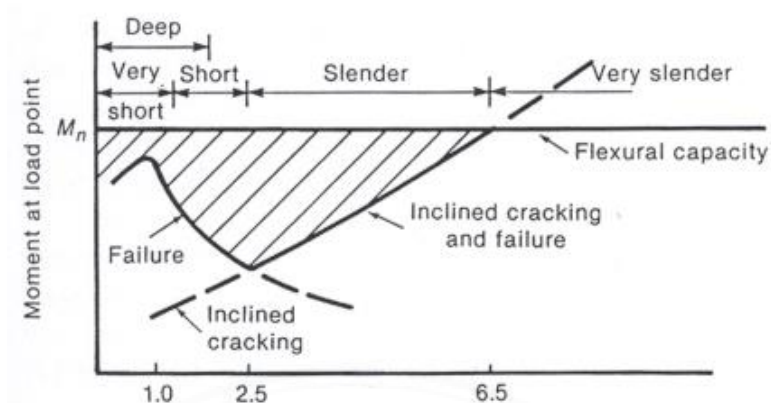
(Macgregor, 1997)



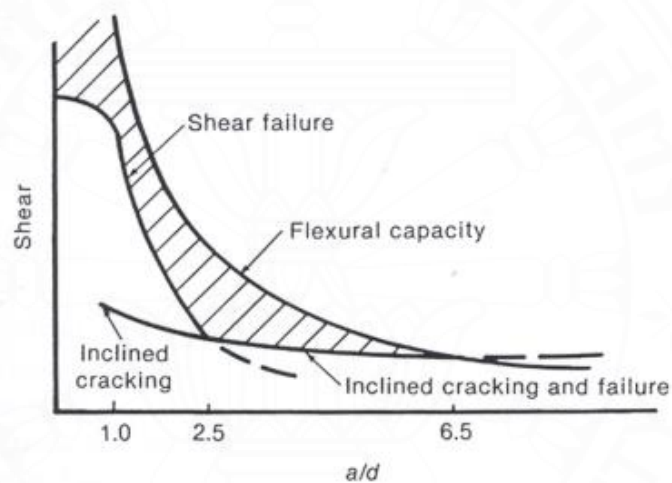
ภาพที่ 2.1.2 B-regions และ D-regions (Macgregor, 1997)

2.1.2 ลักษณะการวิบัติของคานเหล็ก

ลักษณะการวิบัติของคานเหล็กจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ คานจะเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนเป็นหลักเมื่อค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพมีค่าน้อยกว่า 1 รอยร้าวในแนวทแยงจะเกิดตามแนวระหว่างตำแหน่งที่น้ำหนักกระทำและตำแหน่งฐานรองรับ เมื่อคานมีค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพมากกว่า 2.5 แรงคัตจะเริ่มมีผลกับคานมากขึ้นจนกระทั่งคานมีค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพเท่ากับ 6.5 คานจะเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงคัตเป็นหลัก ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพที่มีต่อการเกิดวิบัติของคานแสดงในภาพที่ 2.1.3 และรูปแบบการวิบัติของคานเหล็กแสดงในภาพที่ 2.1.4



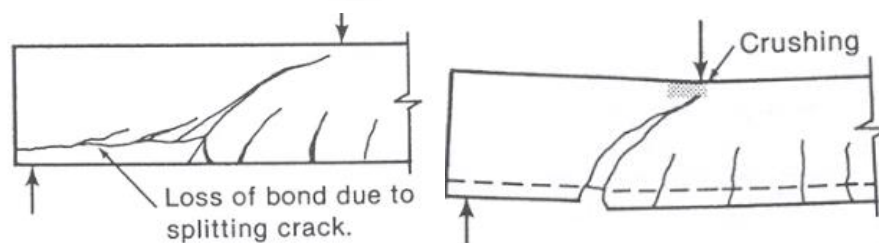
ก. Moment at cracking and failure



ข. Shear at cracking and failure

ภาพที่ 2.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล (a/d ratio)

ที่มีต่อการเกิดวิบัติของคานที่ไม่มีเหล็กเสริมตามขวาง (Macgregor, 1997)

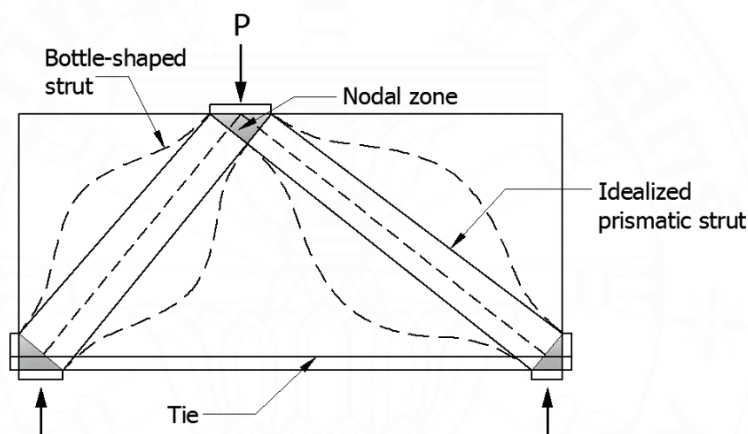


ภาพที่ 2.1.4 การวิบัติของคานเหล็กจาก Shear-tension และ shear compression

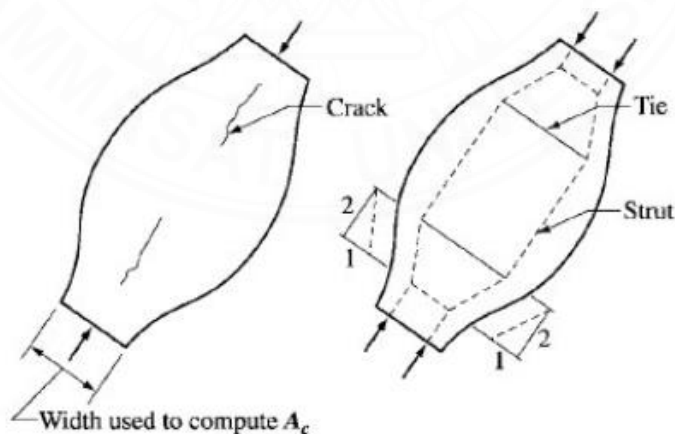
(Macgregor, 1997)

2.1.3 แบบจำลอง strut and tie

แบบจำลอง strut and tie ประกอบด้วยสามส่วนได้แก่ Compression strut ในคอนกรีต Tension tie ในเหล็กเสริมและจุดต่อ (Nodal zone) ซึ่งอยู่ร่วมกันด้วยหลักการสมดุลของแรงจาก ภาพที่ 2.1.5 Compression strut มีการเปลี่ยนแปลงขนาดตามเส้นประเรียกว่า Bottle-shape เมื่อมีการกระจายแรงอัดจะเกิดแรงดึงตามขวางเป็นสาเหตุให้เกิดรอยร้าวตามในแนวทแยงของคาน Tension tie ที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมจะวิบัติเมื่อมี Anchorage zone ไม่เพียงพอซึ่งสัมพันธ์กับ Nodal zone ที่เป็นส่วนสำคัญที่สุดในการออกแบบคานลึกลงด้วยแบบจำลอง strut and tie จุดต่อที่มีแรงเข้าหาทั้งหมดจะเรียกว่า CCC Node มีแรงดึงหนึ่งแรงเรียกว่า CCT Node แรงดึงสองแรงเรียกว่า CTT Node และเป็นแรงดึงทั้งหมดจะเรียกว่า TTT Node ดังแสดงในภาพที่ 2.1.6

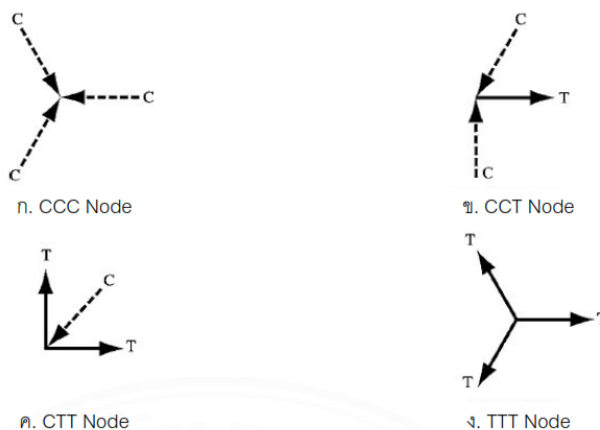


ก. Strut and tie model (Ahmed Ghoraba , 2017)



ข. Bottle-shape (ACI 318-05)

ภาพที่ 2.1.5 องค์ประกอบของแบบจำลอง strut and tie



ภาพที่ 2.1.6 ประเภทของ Node (ACI318-05)

2.1.4 การออกแบบด้วย strut and tie model ตามมาตรฐาน ACI 318-19

การออกแบบคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี strut and tie model ตามมาตรฐาน ACI318-19 โดยการออกแบบกำลังของ strut, tie และ nodal zone จะต้องเป็นไปตาม $\phi S_n \geq U$ ซึ่งประกอบด้วย

สำหรับ Struts
$$\phi F_{ns} \geq F_{us} \quad (2.1)$$

สำหรับ Ties
$$\phi F_{nt} \geq F_{ut} \quad (2.2)$$

สำหรับ Nodal zones
$$\phi F_{nn} \geq F_{us} \quad (2.3)$$

เมื่อ ϕ สำหรับวิธี strut and tie model มีค่าเท่ากับ 0.75

การออกแบบกำลังของ Struts

กำลังรับแรงอัดของ strut, F_{ns} สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.4) และ (2.5)

สำหรับ strut ที่มีเหล็กเสริมตามยาว
$$f_{ce}A_{cs} + A'sf's \quad (2.4)$$

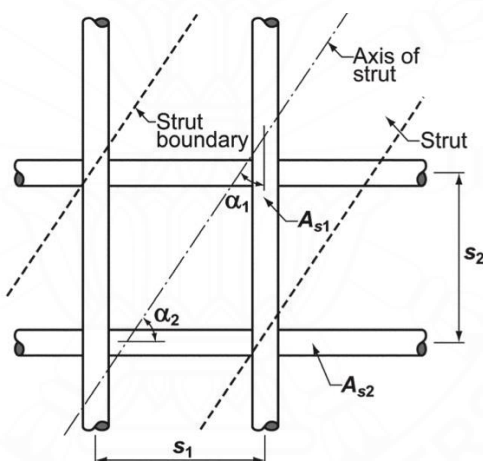
สำหรับ strut ที่ไม่มีเหล็กเสริมตามยาว $f_{ce}A_{cs}$
(2.5)

เมื่อ A_{cs} คือ พื้นที่หน้าตัดที่ปลายของ strut

f_{ce} คือ กำลังอัดประสิทธิภาพผลของคอนกรีต มีค่าเท่ากับ $0.85\beta_s f'_c$ (2.6)

β_s พิจารณาจากปริมาณเหล็กเสริมกันร้าวที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (2.7) ถ้าปริมาณเหล็กเสริมกันร้าวมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.003 ให้ β_s เท่ากับ 0.75 ถ้าต่ำกว่าให้ใช้เท่ากับ 0.60

ปริมาณเหล็กเสริมกันร้าวขั้นต่ำ, $\rho_{vh} = \sum_{i=1}^n \frac{A_{si}}{b_s s_i} \sin \alpha_i \geq 0.003$
(2.7)



ภาพที่ 2.1.7 เหล็กเสริมกันร้าวที่ขวางบริเวณ strut (ACI318-19)

การออกแบบกำลังของ Ties

กำลังรับแรงดึงของ tie, F_{nt} สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.8)

$$F_{nt} = A_{ts}f_y + A_{tp}(f_{se} + \Delta f_p) \quad (2.8)$$

โดย A_{tp} มีค่าเท่ากับ ศูนย์ สำหรับชิ้นส่วนที่เป็น non-prestressed

การออกแบบกำลังของ nodal zone

กำลังรับแรงอัดของจุดต่อ, F_{nn} สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.9)

$$F_{nn} = f_{ce}A_{nz} \quad (2.9)$$

$$f_{ce} = 0.85\beta_n f'_c \quad (2.10)$$

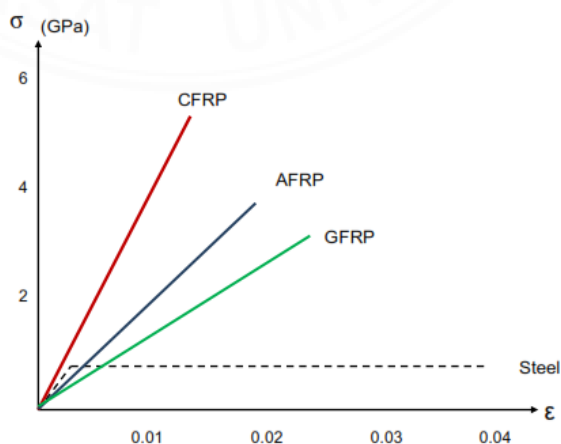
เมื่อ β_n ขึ้นอยู่กับชนิดของจุดต่อ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ของ Nodal zone

ค่าสัมประสิทธิ์ของ Nodal zone	β_n
บริเวณจุดต่อที่ล้อมรอบด้วยองค์อาคารรับแรงอัดทุกด้าน (C-C-C)	1.0
บริเวณจุดต่อที่มีองค์อาคารรับแรงดึงในทิศทางเดียว (C-C-T)	0.8
บริเวณจุดต่อที่มีองค์อาคารรับแรงดึงในสองทิศทาง (C-T-T)	0.6

2.1.5 วัสดุคอมโพสิต

Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) คือวัสดุที่มีพอลิเมอร์เป็นเมทริกซ์และเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนซึ่งนิยมใช้ในการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากมีน้ำหนักเบา มีกำลังรับแรงดึงสูง ทนต่อสภาพแวดล้อมและมีความสะดวกในการใช้งาน การวิบัติของ Fiber reinforced polymer (FRP) เป็นเกิดขึ้นทันทีทันใดโดยการฉีกขาด อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบคุณสมบัติทางกลของ CFRP กับวัสดุอื่นๆจากกราฟ stress-strain ดังแสดงในภาพที่ 2.1.8 พบว่า CFRP มีกำลังรับแรงดึงสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการเสียรูป



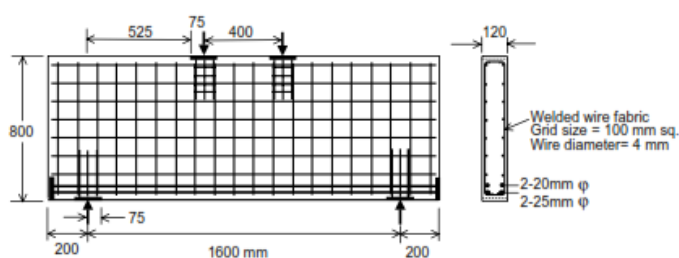
ภาพที่ 2.1.8 Stress-Strain Relationship ของวัสดุคอมโพสิตและเหล็กเสริม (FIB 2001)

2.2งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

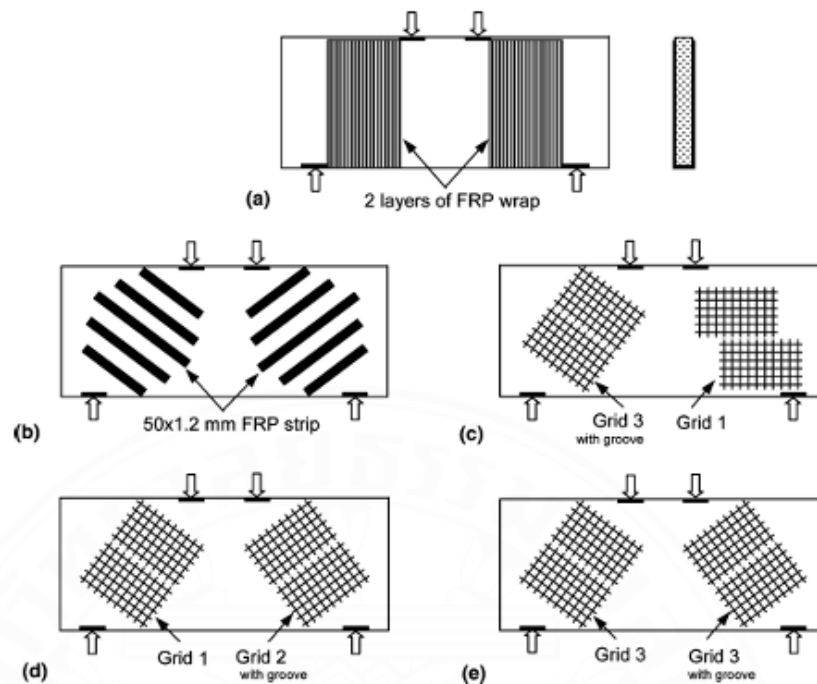
Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FRP system.

(M.R. Islam, M.A. Mansur, M. Malej 2005)

ศึกษาทดลองเพื่อหาความเป็นไปได้ที่จะเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความแข็งแรงไม่เพียงพอโดยใช้วิธีการยึดรั้งภายนอกด้วย fiber reinforced polymer (FRP) การทดสอบจะประกอบด้วยคานเหล็กที่มีอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 0.75 จำนวนทั้งหมด 6 ตัวที่มีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 120 x 800 mm ยาว 2000 mm ดังแสดงในภาพที่ 2.2.1 ประเภทของFRPที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยสามแบบ คือ fiber wrap, strip และ grid ซึ่งทำมาจากคาร์บอนไฟเบอร์ ลักษณะและวิธีการติดตั้งเพื่อเสริมกำลังของคานทั้ง 5 ตัวจะแตกต่างกัน คานB0 เป็นคานที่ไม่มีการเสริมกำลังใช้อ้างอิง คานB1 เสริมกำลังด้วยการ wrap 2 ชั้นเป็นรูปตัวยูตลอดทั้งshear span คานB2 เสริมกำลังด้วยแผ่น strip หนา 1.2 mm กว้าง 50 mm ยาว 450, 600, 700 mm โดยติดตั้งฉากกับเส้นทแยงที่ลากจากตำแหน่ง loading and support point ซึ่งจะแบ่งแผ่นที่ยาว 700 mm ที่กึ่งกลางพอดี คานB3, B4 และ B5 จะเสริมกำลังด้วย grid ที่มีขนาดช่องเปิดขนาด 50 mm เป็นแผ่นกว้างขนาด 300 mm ยาว 500 mm เท่ากันแต่มีขนาดของเส้นลวดไม่เท่ากัน ดังแสดงในภาพที่ 2.2.2 โดยที่ shear span แต่ละข้างของคานหนึ่งตัวจะมีรูปแบบและวิธีการติดตั้งที่แตกต่างกัน grid ที่ใช้จะประกอบด้วยสามขนาด คือ grid1 มีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 6.6 mm², grid2 มีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 17.5 mm² และ grid3 มีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 39.2 mm² คานที่เสริมกำลังด้วย grid2 และ grid3 จะมีการเจาะร่องลึก 3 mm ก่อนทำการติดตั้ง ยกเว้นคานB5 ที่ข้างหนึ่งไม่มีการเจาะร่องก่อนติดตั้ง จากผลการทดลองพบว่าการเสริมกำลังที่แตกต่างกันของคานทั้ง 5 ตัวนั้น ช่วยเสริมความแข็งแรงให้โครงสร้างและสามารถปฏิบัติได้จริง การติดตั้ง grid ในระนาบปกตินี้มีประสิทธิภาพมากกว่าแบบ U wrap และ strip ซึ่งคานตัวอย่างที่สามารถเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้มากที่สุดคือคาน B5 สามารถเพิ่มได้ถึง 43% เมื่อเทียบกับคานอ้างอิงและคานทุกตัววิบัติด้วยแรงเฉือน



ภาพที่ 2.2.1 ขนาดและการเสริมเหล็กของคานเหล็ก



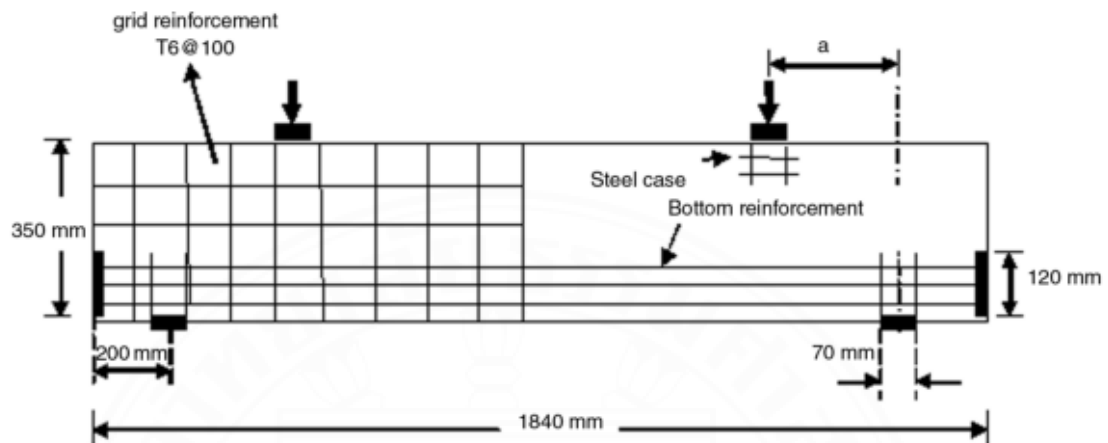
ภาพที่ 2.2.2 รูปแบบการเสริมกำลัง

Modification of strut effectiveness factor for reinforced concrete deep beams strengthened with CFRP laminate

(M.Panjehpour, A.A.A.Ali, Y.L.Voo, F.N.Aznieta 2014)

ทำการศึกษเปรียบเทียบคานจำนวนทั้งหมด 12 ตัวโดยแบ่งออกเป็นสองกลุ่มได้แก่คานที่เสริมกำลังจำนวน 6 ตัว และคานไม่เสริมกำลังอีกจำนวน 6 ตัว คานแต่ละกลุ่มจะมีค่าอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75 และ 2.00 ตัวอย่างคานมีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 140 x 350 mm ยาว 1840 mm ดังแสดงในภาพที่ 2.2.3 โดยคานกลุ่มที่เสริมกำลังจะใช้แผ่นเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ที่ถักในทิศทางเดียว (uni-directionally) โดยติดตั้งให้ทิศทางของเส้นใยอยู่ในแนวตั้งเหมือนกันทั้งกลุ่ม ดังแสดงในภาพที่ 2.2.4 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเพิ่มขึ้นจะทำให้ ultimate shear strength ของคานลดลงทั้งคานที่เสริมกำลังและไม่เสริมกำลังแต่หากเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลที่ 0.75 และ 2.00 จะพบว่าคานที่เสริมกำลังจะมีอัตราส่วนการเพิ่มขึ้นของค่า ultimate shear strength เพิ่มขึ้นจาก 19.60% เป็น 30.02% ตามลำดับ และค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลมีค่าที่เพิ่มขึ้นจาก 0.75 เป็น 2.00 ส่งผลให้ค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานเพิ่มขึ้นจาก 3.29 mm เป็น 3.74 mm สำหรับคานที่ไม่ได้เสริมกำลังและเพิ่มขึ้นจาก 3.99 mm เป็น 5.17 mm สำหรับคานที่เสริมกำลัง แนวโน้มการเกิดการวิบัติแบบเปราะเพิ่มขึ้นในกลุ่มคานที่ไม่ได้

เสริมกำลังเมื่อค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามคานที่เสริมกำลังจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการวิบัติแบบเปราะนั้นน้อยกว่าคานที่ไม่ได้เสริมกำลังและการวิบัติส่วนใหญ่ของคานที่เสริมกำลังคือการฉีกออกบางส่วนของแผ่นCFRP



ภาพที่ 2.2.3 ขนาดของคานลึกลับและรายละเอียดการเสริมเหล็ก



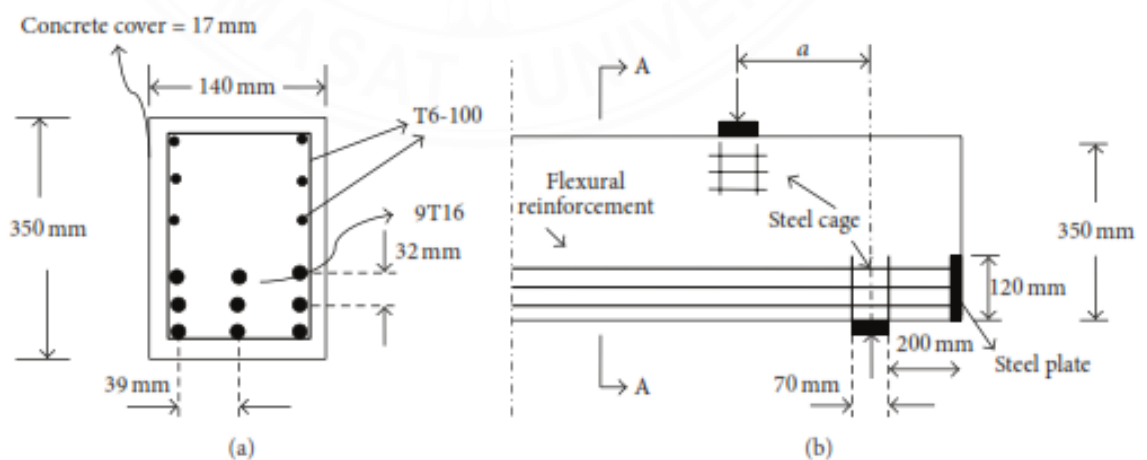
ภาพที่ 2.2.4 ลักษณะการเสริมแรง

Strut Deformation in CFRP Strengthened Reinforced concrete Deep Beams

(Mohammad Panjehpoyr, Hwa Kian Chai, Yen Lei Voo 2014)

ทำการศึกษเปรียบเทียบคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์และคานแบบที่ไม่เสริมกำลัง โดยตัวแปรที่สำคัญคืออัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึก ประสิทธิภาพและระดับการให้น้ำหนักว่ามีผลต่อการเสียรูปของสตรัทและพฤติกรรมเชิงกลของคานลึกลับ

โดยการทดสอบจะประกอบไปด้วยคานจำนวนทั้งหมด 12 ตัว โดยแบ่งออกเป็นสองกลุ่มได้แก่คานที่เสริมกำลังจำนวน 6 ตัว และคานไม่เสริมกำลังอีกจำนวน 6 ตัว คานแต่ละกลุ่มจะมีค่าอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75 และ 2.00 ตัวอย่างคานมีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 140 x 350 mm ยาว 1840 mm ดังแสดงในภาพที่ 2.2.5 โดยติดตั้งแผ่นเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ที่ถักในทิศทางเดียว (uni-directionally) ให้ทิศทางของเส้นใยอยู่ในแนวตั้งเต็มทั่วช่วงเฉือนดังแสดงในภาพที่ 2.2.6 การเสีรูปร่างของสตรัทจะประเมินจากค่าเฉลี่ยของสเตรนตามแนวและตั้งฉากกับเส้นกึ่งกลางของสตรัทที่วัดได้จากการทดสอบ จากผลการทดลองพบว่าการเสริมกำลังทำให้กำลังรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและคานทั้งสองแบบมีการเสีรูปร่างของสตรัทในแนวขวางมากกว่าในแนวตามเส้นกึ่งกลางของสตรัท และค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า transverse strain และมีการขยายตัวของสตรัทเพิ่มมากขึ้นทั้งในกลุ่มคานที่เสริมกำลังและไม่เสริมกำลัง สำหรับคานที่เสริมกำลังค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการยับยั้งการขยายตัวของรอยร้าวมีมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบการขยายตัวของสตรัทในคานที่ไม่ได้เสริมกำลังและคานที่เสริมกำลังที่ค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากันพบว่าคานที่ไม่ได้เสริมกำลังจะมีการขยายตัวมากกว่าคานที่เสริมกำลังซึ่งจะขยายตัวเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อน้ำหนักกระทำมีค่ามากกว่าค่ากำลังต้านแรงเฉือนประลัยของคานที่ไม่ได้เสริมกำลังประมาณ 40-60% เมื่อค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเพิ่มขึ้นจาก 0.75 เป็น 2.00 ค่าเฉลี่ยของ transverse strain ของคานที่ไม่ได้เสริมกำลังและคานที่เสริมกำลังจะเพิ่มขึ้นประมาณ 8 และ 7 เท่าตามลำดับและผลของการขยายตัวเพิ่มขึ้นของstrut ในการทำให้เกิดการหดตัวเพิ่มขึ้นและในทางกลับกันการหดตัวของstrut นั้นถูกยับยั้งเมื่อ CFRP sheet ยับยั้งการขยายตัวของ strut ดังนั้น การหดตัวของคานที่เสริมกำลังนั้นจะต่ำกว่าคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง



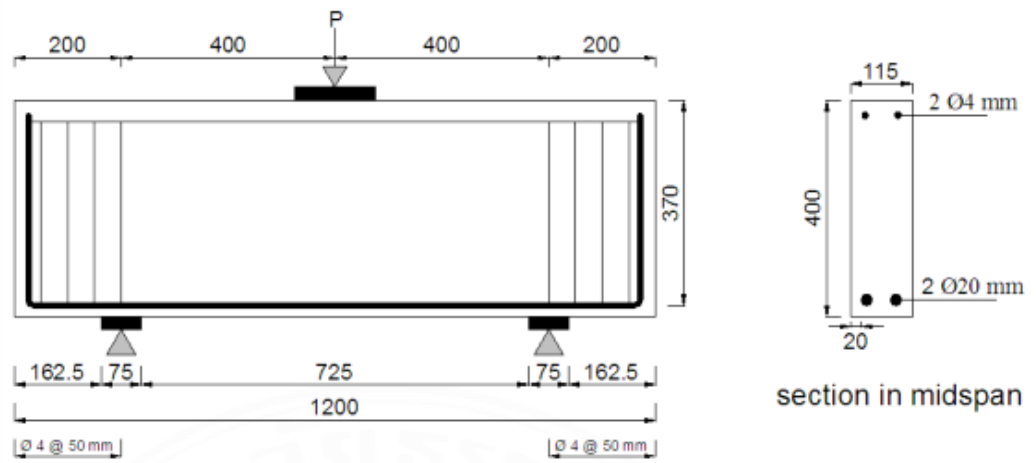
ภาพที่ 2.2.5 ขนาดหน้าตัดคานและรายละเอียดการเสริมเหล็ก



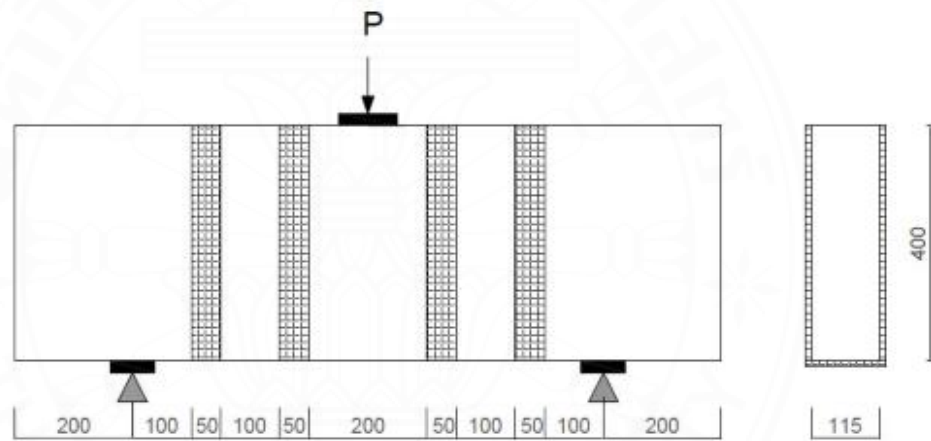
ภาพที่ 2.2.6 ลักษณะการเสริมแรง

Retrofit of Reinforced concrete Deep Beams with Different Shear Reinforcement by Using CFRP (Mohammed Rasheed 2016)

เพื่อศึกษาพฤติกรรมและประสิทธิภาพการซ่อมแซมคานคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) ซึ่งปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนแนวนอนและเหล็กปลอก และอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเป็นตัวแปรที่จะศึกษา ตัวอย่างการทดสอบจะประกอบไปด้วยคานคานคานเหล็กเสริมเหล็กที่วิบัติแล้วจำนวน 9 ตัวด้วยการติดแผ่น CFRP ที่ภายนอกในแนวตั้ง คานมีหน้าตัดกว้างเท่ากับ 115 mm และมีความลึกต่างกัน 3 ขนาดเท่ากับ 333 mm, 400 mm และ 500 mm ยาว 1200 mm ดังแสดงในภาพที่ 2.2.7 คานทุกตัวเสริมเหล็กรับแรงดัดเท่ากันแต่สำหรับเหล็กเสริมที่ช่วงเอวของคานแต่ละตัวมีการเสริมเหล็กแตกต่างกัน อัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลของคานที่ทดสอบได้แก่ 0.8, 1.00 และ 1.2 คานแต่ละตัวจะมีการซ่อมแซมโดยการติดแผ่นเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์แบบ u wrap ที่ช่วง shear span ทั้งสองข้างเป็นแนวตั้งข้างละ 2 แผ่นดังแสดงในภาพที่ 2.2.8 จากการทดลองพบว่าคานที่ถูกปรับปรุงทุกตัวที่ค่า ultimate strength เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของการซ่อมแซมคานเริ่มจาก 8% ถึง 161% ของ ultimate load ของคานที่ยังไม่ปรับปรุง และลักษณะการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนตามยาวเพิ่มประสิทธิภาพในการเสริมความแข็งแรงได้ดีกว่าการเสริมในแนวตั้งที่อัตราส่วนเหล็กเสริมต่อหน้าตัดคานคานคานเท่ากัน แต่เมื่อปริมาณของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนตามยาวเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการเสริมความแข็งแรงลดลง ในขณะที่การเสริมเหล็กรับแรงเฉือนตามแนวตั้งที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการเสริมความแข็งแรงนั้นเพิ่มขึ้นไปด้วย ในคานที่ไม่มีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนเมื่อมีการซ่อมแซมแล้วจะมีประสิทธิภาพในการเสริมความแข็งแรงและมีการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานได้มากกว่าคานที่มีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือน คานที่ซ่อมแซมด้วยแผ่น CFRP จะวิบัติเนื่องจากการ debonding ของแผ่น CFRP หรือเกิดการแตกออกของคานคานคาน



ภาพที่ 2.2.7 ขนาดคานเหล็กและการเสริมเหล็ก

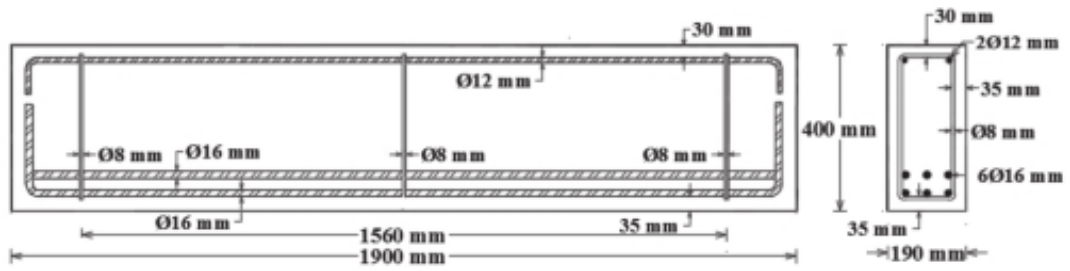


ภาพที่ 2.2.8 ลักษณะการเสริมแรง

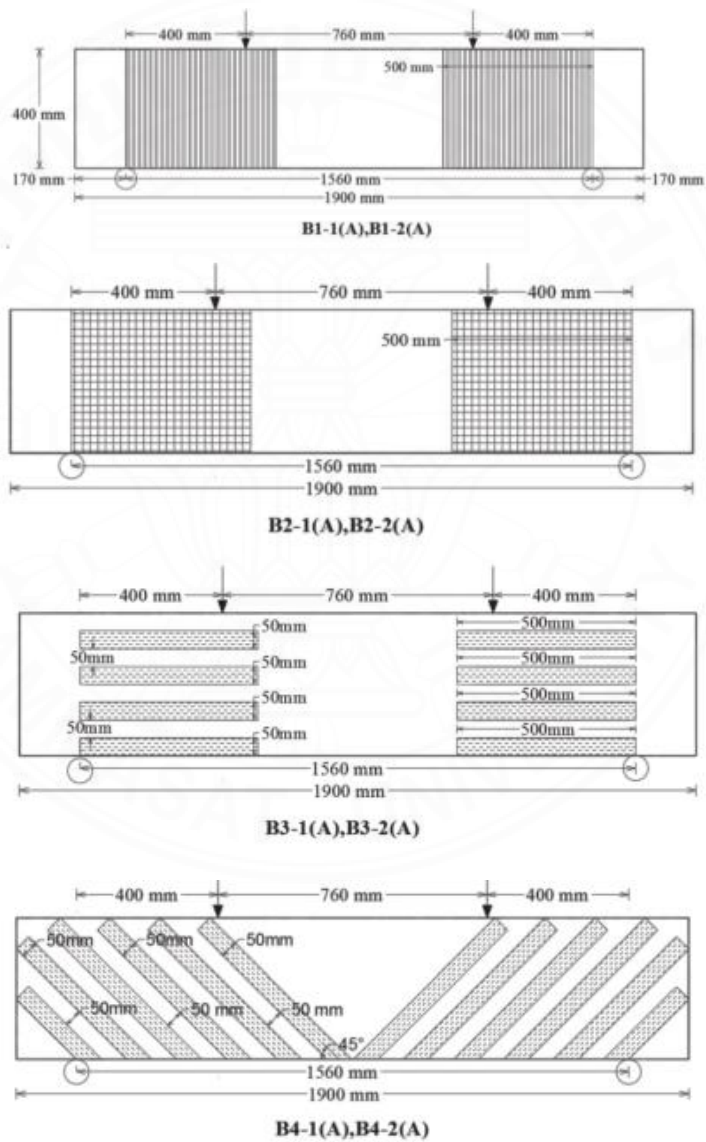
Shear and Flexural Behavior of RC Deep Beam strengthened with CFRP Composite

(Hana Al Ghanim, Aya Al Asi, Mu'tasim Abdel Jaber, Maha Alqam 2017)

ทำการศึกษาลักษณะพฤติกรรมการตัดและเฉือนของคานาลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยการติดแผ่นเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์(CFRP) ที่ผิวภายนอก ประกอบด้วย CFRP 2 ชนิด คือ CFRP sheet และ CFRP laminates จากการทดลองจะพิจารณาความแตกต่างของการเสริมกำลังรับแรงดัดและแรงเฉือน ตัวอย่างคานาลึกลับ 20 ชิ้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรก Group A จะศึกษาพฤติกรรมของการเฉือนมีอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 1.19 และกลุ่มที่สอง Group B จะศึกษาพฤติกรรมของแรงดัดมีอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 1.11 ในแต่ละกลุ่มใหญ่จะมีกลุ่มย่อยอีก 3 กลุ่ม กลุ่มแรกคือ control beams 2 ตัว และอีก 2 กลุ่มจะประกอบด้วยคานาที่เสริมกำลังด้วย CFRP sheet และ CFRP laminates กลุ่มละ 4 ตัว คานาตัวอย่างมีขนาดหน้าตัด 190 x 400 mm ยาว 1900 mm เหมือนกันทุกตัว รายละเอียดของเหล็กเสริมในกลุ่ม A และกลุ่ม B จะต่างกัน คานาในกลุ่ม A ออกแบบเพื่อให้วิบัติโดยแรงเฉือนมากกว่าวิบัติด้วยแรงดัดดังแสดงในภาพที่ 2.2.9 ดังนั้นคานาแต่ละตัวจะเสริมเหล็กหลักเพื่อไม่ให้เกิดผลจาก bending moment รูปแบบการเสริมกำลังของคานาในกลุ่ม A เป็นดังนี้ คานาที่เสริมกำลังด้วย CFRP sheet มี 2 ตัวที่ติดแผ่น CFRP เพียงหนึ่งชั้นในแนวตั้ง และอีก 2 ตัวจะติดแผ่น CFRP 2 ชั้น ในแนวตั้งและแนวนอน ส่วนคานาที่เสริมกำลังด้วย CFRP laminates 2 ตัวแรกจะติดกระจายแบบแนวนอนตลอดความลึกคานา และอีก 2 ตัวจะติดในช่วง shear span ทำมุม 45 องศากับความยาวคานาดังแสดงในภาพที่ 2.2.10 จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของวิธี CFRP ที่เพิ่มทั้ง shear and flexural capacity ของคานาลึกลับนั้นพิสูจน์แล้วว่าเป็นจริง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพจะแตกต่างออกไปตามวัสดุและรูปแบบการเสริมกำลัง ในการเสริมกำลังรับแรงเฉือนที่ใช้ CFRP sheet warp ต่อกัน 2 แผ่น จะเพิ่มค่า Ultimate strength ได้สูงที่สุด ซึ่งมีค่าเกิน 86% เมื่อเทียบกับการเสริมกำลังโดยใช้ laminate ติดในแนวทแยงที่เพิ่มได้แค่ 36% ในทางกลับกัน การเสริมกำลังรับแรงดัดด้วยแผ่น CFRP 2 ชั้น จะเพิ่มประสิทธิภาพประมาณ 51% และ 26% เมื่อเสริมด้วย laminate คานากลุ่ม A เกือบทั้งหมดวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน คานาที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ชั้นเดียวเกิดการแยกออกของแผ่น CFRP และคานาที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP สองชั้น จะเกิดการวิบัติเนื่องจากการแยกชั้นกันของแผ่น CFRP



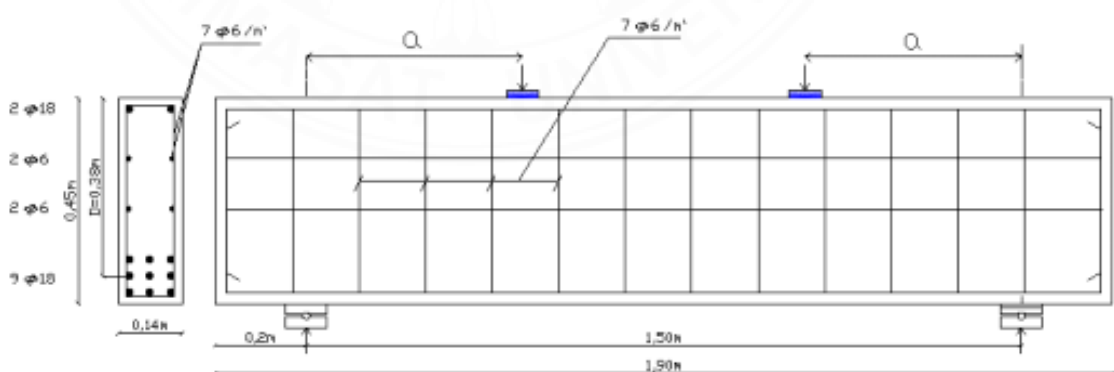
ภาพที่ 2.2.9 ขนาดและรายละเอียดการเสริมเหล็กของกลุ่ม A



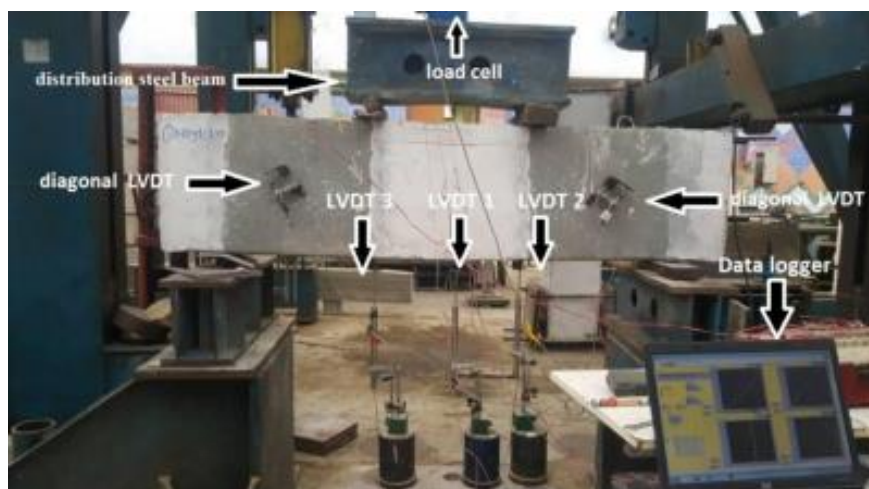
ภาพที่ 2.2.10 ลักษณะการเสริมแรงของคานกลุ่ม A

Strengthening of R.C Deep Beams Using CFRP, GFRP (Mahmoud M. Elsonbaty, Wael M. Montaser, Amr H. Zaher 2018)

ทำการศึกษากฎการของคานเหล็กที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยเส้นใยคาร์บอน (CFRP sheet) และเส้นใยแก้ว (GFRP sheet) เพื่อตรวจสอบเทคนิคต่างๆที่ใช้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของคานเหล็กคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อมีอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลต่างกัน การทดลองจะประกอบด้วยคานตัวอย่างจำนวน 6 ตัว ที่มีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 140×450 mm ยาว 1900 mm และความยาวช่วงระหว่างฐานรองรับ L เท่ากับ 1500 mm ดังแสดงในภาพที่ 2.2.11 ตัวอย่างคานจะถูกแบ่งกลุ่มออกเป็นทั้งหมด 3 กลุ่ม กลุ่มแรกประกอบด้วยคาน 2 ตัว (G1.BC1.1.25, G1.BC2.1.75) เป็นคานที่ใช้อ้างอิง กลุ่มที่สองประกอบด้วยคาน 2 ตัว (G2BCa1.1.25, G2Bca2.1.75)ถูกเสริมกำลังแบบ U shape ที่บริเวณแรงเฉือนด้วย CFRP และกลุ่มที่สามประกอบด้วยคาน 2 ตัว (G3.Bg1.1.25, G3.Bg2.1.75) แต่ละตัวเสริมกำลังแบบ U shape ที่บริเวณแรงเฉือนด้วย GFRP ซึ่งในแต่ละกลุ่มจะประกอบด้วยค่าที่มีอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 1.25 และ 1.75 ดังแสดงในภาพที่ 2.2.12 จากการทดสอบพบว่า คานกลุ่มที่เสริมกำลังด้วยแผ่นCFRP จะมีค่า ultimate load เพิ่มขึ้นมากกว่าคานกลุ่มที่เสริมกำลังด้วย GFRP และเมื่อเทียบกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลังจะมีค่า ultimate load เพิ่มขึ้นประมาณ 59.4% และ 74.6% สำหรับคานที่มีอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 1.25 และ 1.75 ตามลำดับ นอกจากนี้การเสริมกำลังด้วยCFRP ยังลดการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานได้ดีกว่าคานที่เสริมกำลังด้วยGFRP คานทุกตัวมีการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน อัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเป็นตัวแปรสำคัญที่ควบคุมการวิบัติด้วยแรงเฉือนและ ultimate shear strength เพิ่มขึ้นเมื่อ a/d ratio ลดลง และคานที่เสริมกำลังจะมีค่าความเหนียวลดลง



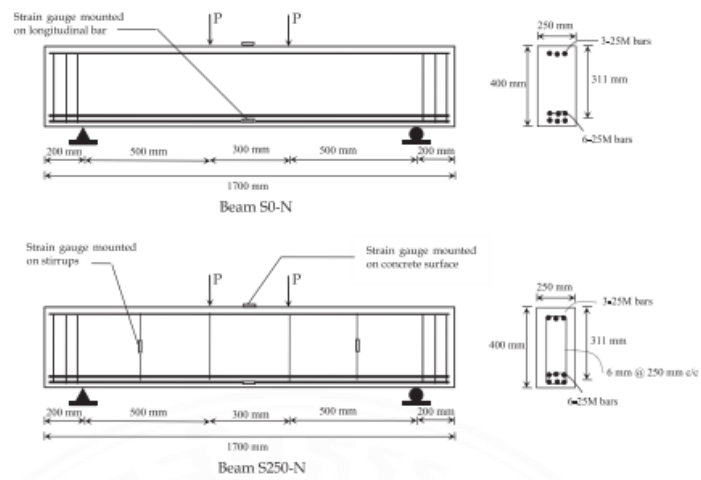
ภาพที่ 2.2.11 ขนาดคานเหล็กและรายละเอียดการเสริมเหล็ก



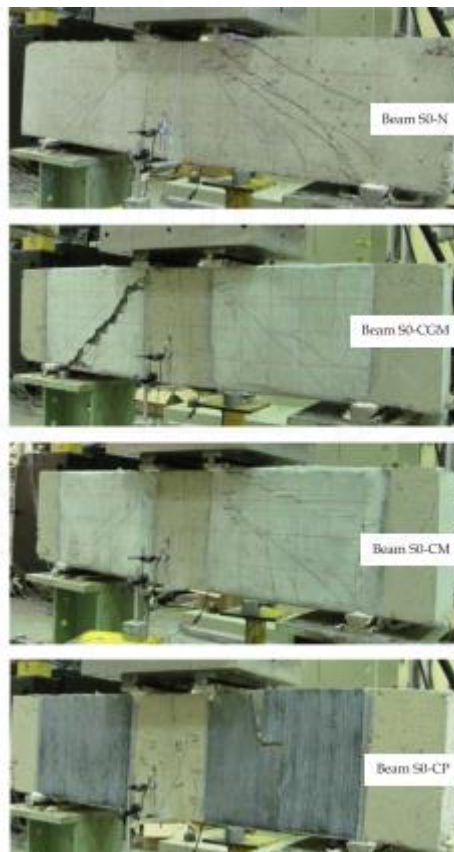
ภาพที่ 2.2.12 ลักษณะการเสริมกำลังและการติดตั้งการทดสอบ

Shear strengthening of RC deep beams with cement-based composites (Rizwan Azam, Khaled Soudki, Jeffrey S. West, Martin Noel 2018)

ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพสูงสุดของ cement based composite systems ที่ใช้ในการเสริมกำลังคานคกรตเสริมเหล็กกับ epoxy based carbon fiber reinforced polymer (CFRP) system โดยวิธี cement based มี 2 ประเภท คือ Carbon fabric reinforced cementitious mortar (CFRCM) and Carbon fiber reinforced polymer grid embedded in mortar ดังแสดงในภาพที่ 2.2.14 ตัวอย่างคานที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยคานคกรจำนวน 8 ตัว มีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 250 x 400 mm ยาว 1700 mm ถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่มได้แก่ S0 series คือกลุ่มที่ไม่มีการเสริมเหล็กปลอก และ series S250 คือกลุ่มที่ใส่เหล็กปลอก RB6@250 mm c/c ดังแสดงในภาพที่ 2.2.13 กลุ่มละ 4 ตัวอย่างโดยมี 1 ตัวเป็นตัวควบคุม ค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพเท่ากับ 1.62 ผลจากการทดลองพบว่าการเสริมกำลังด้วย cement based มีการทำงานได้ดีกว่า epoxy based ในด้านการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนวิกฤติและการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของคานกลุ่ม S0 แต่เสริมกำลังด้วย CFRCM เพิ่มขึ้น 23% เทียบกับคานกลุ่มเดียวกันที่เสริมกำลังด้วย CFRP sheet เพิ่มขึ้น 13% เนื่องจากวิธี cement based มีการใช้เส้นใยถักสองทิศทางมีผลทำให้การยึดรั้งกับผิวคกรตที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับวิธี epoxy base ที่ใช้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เส้นใยทิศทางเดียวและ cement based system มีประสิทธิภาพในการเพิ่ม load carrying capacity ในคานกลุ่ม S0 ที่เสริมกำลังด้วย CFRCM มีค่า ultimate load เพิ่มขึ้น 23% และ 20% สำหรับคานที่เสริมกำลังด้วย CFRP grid คานที่เสริมกำลังด้วย CFRP Sheet จะวิบัติจากการ debonding ของ CFRP Sheet ในทางกลับกันจากการสังเกต คานที่เสริมกำลังด้วยระบบ cement based จะไม่เกิดการ debonding



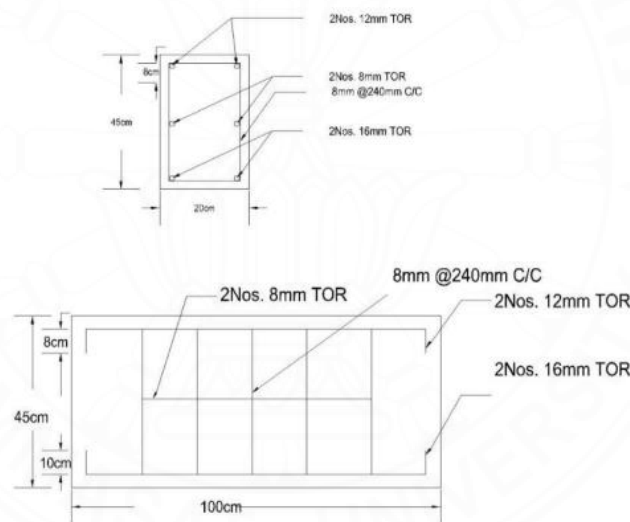
ภาพที่ 2.2.13 ขนาดคานและรายละเอียดการเสริมเหล็ก



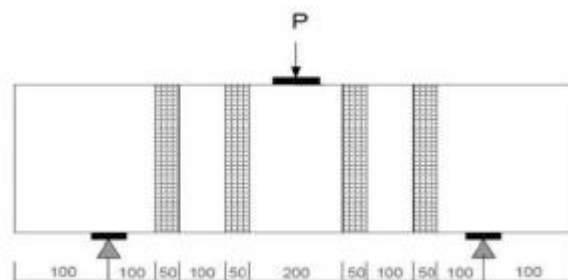
ภาพที่ 2.2.14 ลักษณะการเสริมกำลัง

Shear behavior of RC Deep beams retrofitted with CFRP Sheets (Alexis M S, Pinky Merin Philip 2018)

ทำการศึกษาทดลองพฤติกรรมของการซ่อมแซมคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยการติดแผ่น CFRP โดยพฤติกรรมการเฉือนของคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กที่ซ่อมแซมโดยการติดแผ่น CFRP จะมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างคานที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยคานหนึ่งตัวที่มีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 200 x 450 mm ยาว 1000 mm มีค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพเท่ากับ 1.00 ดังแสดงในภาพที่ 2.2.15 เมื่อคานเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนจะซ่อมแซมโดยการติดแผ่น CFRP แบบ u wrap ที่ช่วง shear span ทั้งสองข้างเป็นแนวตั้งข้างละ 2 แผ่นดังแสดงในภาพที่ 2.2.16 จากผลการทดลองพบว่าการติดแผ่น CFRP ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่ Ultimate load เพิ่มขึ้น 28.8 % และเกิด Deflection น้อยลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้เสริมที่ Ultimate load ตัวอย่างที่เสริมกำลังจะมีค่า strain น้อยกว่าตัวที่ไม่ได้เสริม



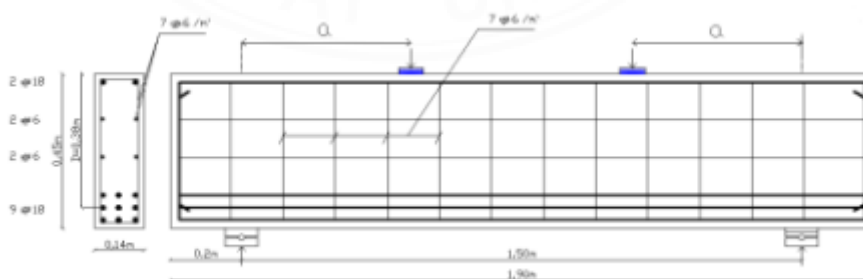
ภาพที่ 2.2.15 ขนาดคานลึกลับและรายละเอียดการเสริมเหล็ก



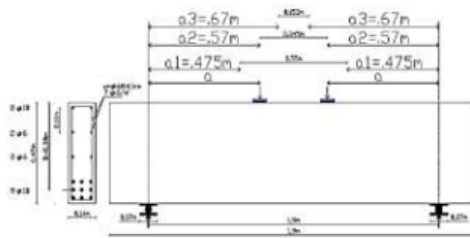
ภาพที่ 2.2.16 ลักษณะการเสริมกำลัง

Strengthening and repairing of RC Deep beams using CFRP and GFRP (Amr H. Zaher, Wael M. Montaser, Mahmoud M. Elsonbaty 2020)

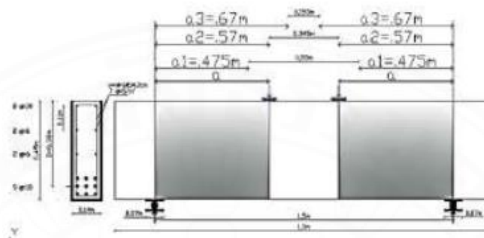
ทำการศึกษาวិธีการพัฒนาประสิทธิภาพของคานาลึกรัดเสริมเหล็กด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน โดยใช้ advanced composite materials เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคานาลึกรัดเสริมกำลังและปรับปรุงการเชื่อมด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว ตัวอย่างคานาที่ใช้ในการทดสอบจำนวน 13 ตัว ที่มีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 140×450 mm ยาว 1900 mm และความยาวช่วงระหว่างฐานรองรับ L เท่ากับ 1500 mm การทดสอบจะอยู่ภายใต้ผลกระทบของน้ำหนักกระทำสองจุดที่มีระยะห่างเท่ากับ 560, 360 และ 160 mm ดังแสดงในภาพที่ 2.2.17 ตัวอย่างคานาจะถูกแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 ประกอบด้วยคานาที่ไม่มีการเสริมกำลังจำนวน 3 ตัว กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยคานาที่เสริมกำลังด้วย CFRP sheet จำนวน 3 ตัว กลุ่มที่ 3 ประกอบด้วยคานาที่เสริมกำลังด้วย GFRP sheet จำนวน 3 ตัว กลุ่มที่ 4 ประกอบด้วยคานาที่เสริมกำลังด้วย CFRP sheet และ GFRP sheet จำนวน 2 ตัว และสุดท้ายกลุ่มที่ 5 จะประกอบด้วยคานา 2 ตัว ที่เกิดการร้าวก่อนแล้วซ่อมแซมด้วย CFRP sheet และ GFRP sheet ดังแสดงในภาพที่ 2.2.18 ซึ่งคานาสามกลุ่มแรกจะประกอบด้วยคานาที่มีค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพเท่ากับ 1.25, 1.50 และ 1.75 และสองกลุ่มสุดท้ายจะประกอบด้วยคานาลึกรัดที่มีค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพเท่ากับ 1.50 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าคานาที่เสริมกำลังด้วย CFRP sheet และ GFRP sheet ทำให้เกิดการปรับปรุง Ultimate load ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 106% และ 81% ตามลำดับ การติดตั้ง CFRP sheet ในแนวทแยงให้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นของ ultimate load, การอ่อนตัวและการลดความกว้างของรอยร้าวได้มากกว่า CFRP sheet ที่ติดตั้งในแนวตั้งเพราะแรงในแนวตั้งมีทิศทางเดียวกันกับแนวของเส้นใย คานาลึกรัดที่ก่อรอยร้าวและซ่อมแซมด้วย CFRP and GFRP sheet เทียบกับคานาควคุมมีค่า ultimate load เพิ่มขึ้นประมาณ 61%, 47.6% ตามลำดับ



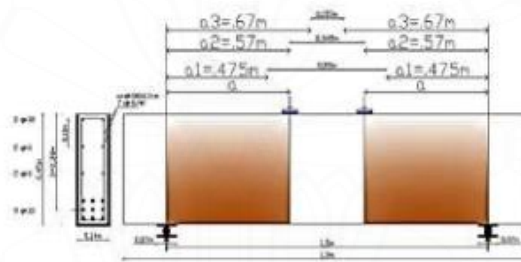
ภาพที่ 2.2.17 ขนาดคานาลึกรัดและรายละเอียดการเสริมเหล็ก



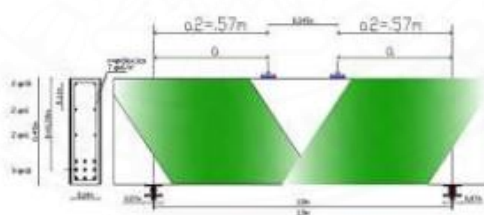
b. Dimensions of G1



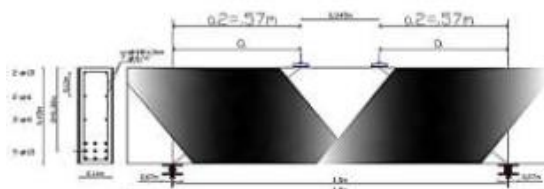
c. Dimensions and strengthening of G2



d. Dimensions and strengthening of G3



e. Dimensions and strengthening of G4

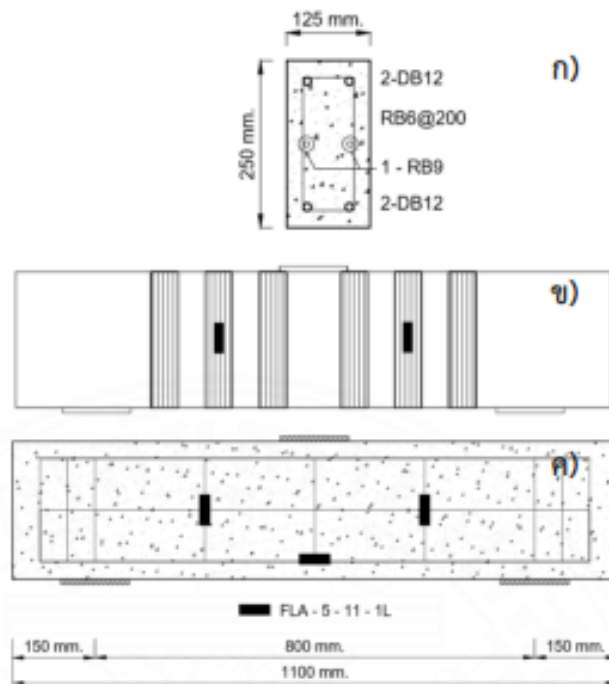


f. Dimensions and repairing of group G5

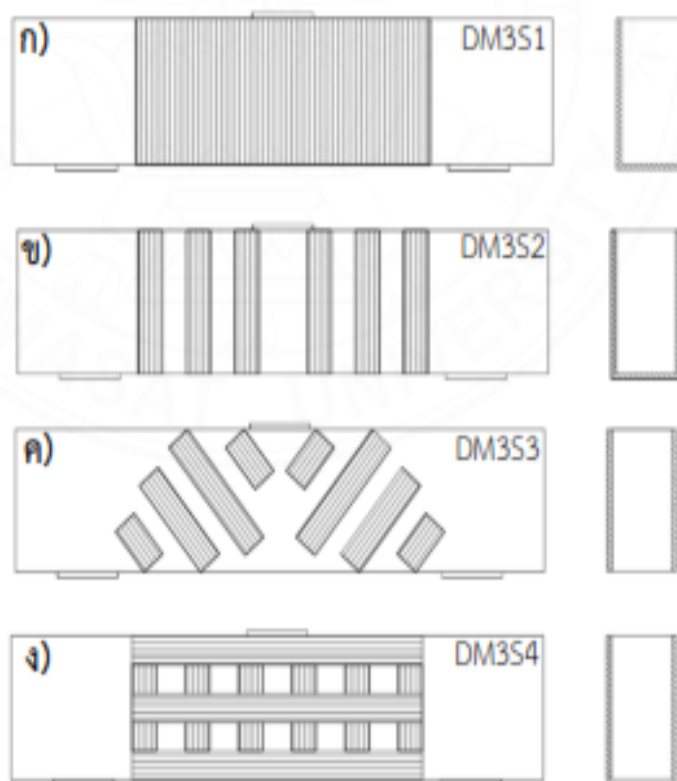
ภาพที่ 2.2.18 ลักษณะการเสริมกำลัง

การเสริมกำลังคานลึกลงกริดเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (รัตนศักดิ์ หงษ์ทอง, อภัย เบ็ญจพงศ์, ธรรมมา เจียรธรวาณิช 2020)

การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคานลึกลงกริดเสริมเหล็กที่เกิดจากคลอไรด์มีความรุนแรงและกินพื้นที่เป็นวงกว้าง เมื่อโครงสร้างคานลึกลงกริดเสริมเหล็กได้รับผลกระทบจากคลอไรด์เหล็กเสริมที่อยู่ภายในจะเกิดการกัดกร่อนจนทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลง ส่งผลต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว และรูปแบบการวิบัติของคาน งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการเสริมกำลังคานลึกลงกริดเสริมเหล็กที่เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในลักษณะที่ต่างกันเพื่อศึกษาหาแนวทางการเสริมกำลังที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ตัวอย่างคานที่ใช้ในการทดสอบมีจำนวนทั้งหมด 6 ตัว คานทั้งหมดมีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 125 x 250 mm ยาว 1100 mm มีอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพเท่ากับ 1.85 ดังแสดงในภาพที่ 2.2.19 โดยแบ่งเป็นคานที่ไม่เกิดการเสื่อมสภาพ (D0M) จำนวน 1 ตัว ตัวอย่างที่เกิดการเสื่อมสภาพ (D3M) จำนวน 1 ตัว และตัวอย่างคานที่เกิดการเสื่อมสภาพและได้รับการเสริมกำลัง (D3MS1-D3MS4) จำนวน 4 ตัว ซึ่งมีลักษณะการเสริมกำลังที่แตกต่างกัน ได้แก่ แบบ u wrap, แบบ u strip ขนาด 5 cm ติดในบริเวณช่วงการเฉือนโดยมีระยะห่างกันแถบละ 4 cm, แบบแถวขนาด 5 cm ติดเอียงทำมุม 45 องศากับความยาวคานโดยมีระยะห่างกันแถบละ 4 cm และแบบที่ใช้แถวขนาด 5 cm ติดกันให้มีลักษณะเป็นตะแกรงดังแสดงในภาพที่ 2.2.20 ผลการศึกษาพบว่า การเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ทั้งหมดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแต่ไม่สามารถเพิ่มความเหนียวของคานที่เกิดการเสื่อมสภาพให้กลับมาใกล้เคียงกับคานที่ไม่เกิดการเสื่อมสภาพได้ การเสริมกำลังที่สามารถเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้สูงสุดคือ การเสริมกำลังในรูปแบบตาราง และการเสริมกำลังรูปแบบที่แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ทำมุม 45 องศากับความยาวคาน สามารถป้องกันรอยร้าวในแนวทแยงได้ดีที่สุด



ภาพที่ 2.2.19 ขนาดคานและการเสริมเหล็ก



ภาพที่ 2.2.20 ลักษณะการเสริมกำลัง

บทที่ 3

ขั้นตอนการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนภายนอกด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์บริเวณช่วงเฉือนทั้งสองข้างของคาน โดยจะทำการทดสอบคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 10 ตัว คานจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ B1 ที่มีค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 1.00 และ B2 ที่มีค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 2.00 จำนวนกลุ่มละ 5 ตัว ในแต่ละกลุ่มจะแบ่งเป็นคานอ้างอิงที่เสริมเหล็กตามแนวตั้งและแนวนอนเพียงพอเท่ากับปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดและแบบต่ำกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดที่มาตรฐาน ACI318-19 กำหนด อย่างละ 1 ตัว คานที่มีการเสริมกำลังต่างกัน 2 ตัว และคานที่มีการเสริมกำลังหลังจากรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานและเกิดริ้วรอยร้าวแล้ว 1 ตัว

3.1 การออกแบบคานลึกโดยใช้แบบจำลอง Strut and tie

ในการออกแบบคานลึกเพื่อศึกษาลักษณะการวิบัติแบบเฉือนจะมีการออกแบบให้มีการเสริมเหล็กต้านทานแรงเฉือนต่ำกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ACI318-19

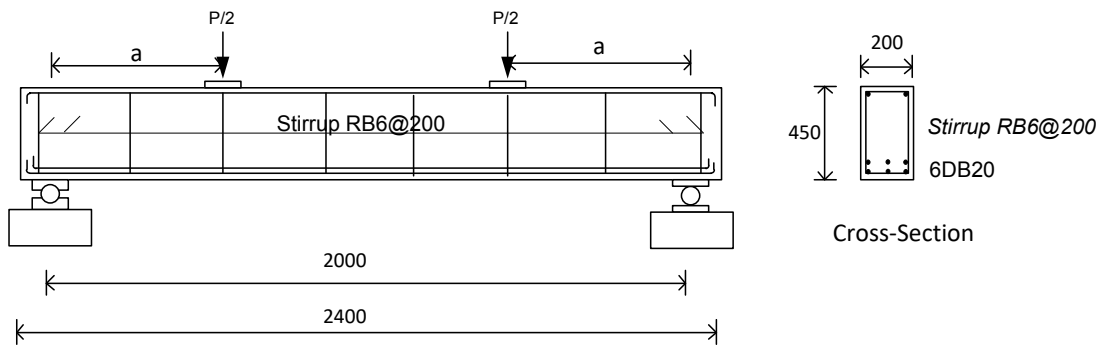
คานตัวอย่างมีขนาดหน้าตัด กว้าง 20 ซม. ลึก 45 ซม. ยาว 2.4 ม. ระยะห่างระหว่างฐานรองรับ 2 ม. คานมีการเสริมเหล็กรับแรงดึง 6DB20 เหล็กเสริมรับแรงอัด 2DB20 และเสริมเหล็กปลอกหนา RB6 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบคาน

$$\text{กำลังอัดประลัยของคอนกรีต, } f'_c = 210 \text{ ksc}$$

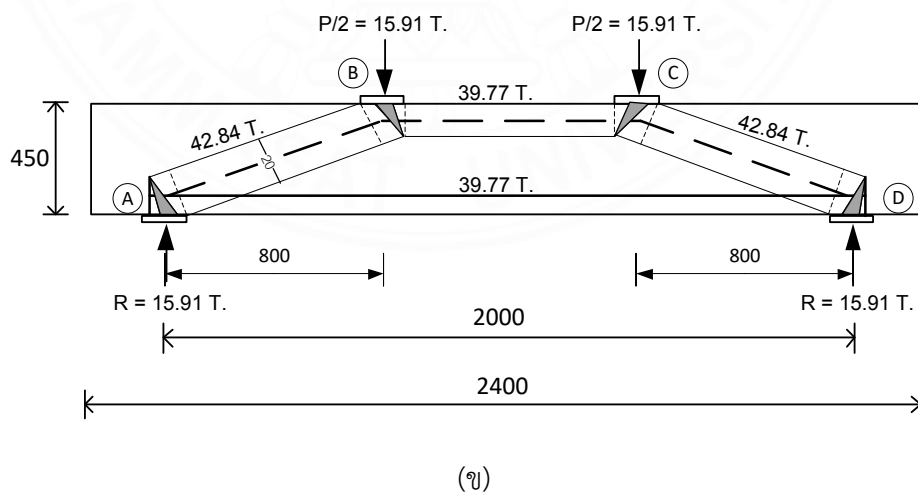
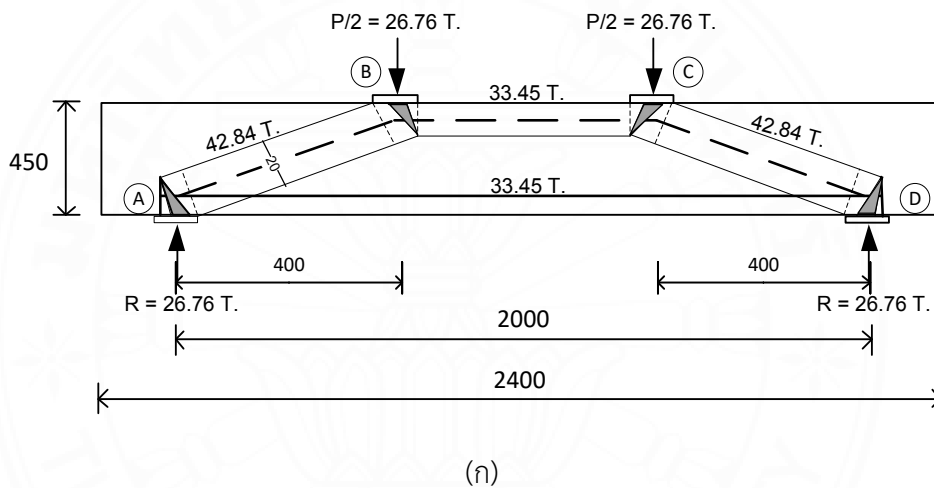
$$\text{กำลังรับแรงดึงครากของเหล็กเสริมหลัก, } f_y = 4,000 \text{ ksc}$$

$$\text{กำลังรับแรงดึงครากของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน, } f_{vy} = 2,400 \text{ ksc}$$

กำหนดให้คานรับน้ำหนักกระทำแบบจุด 2 ตำแหน่ง ในการออกแบบสมมติให้ความกว้างสูงสุดของ strut เท่ากับ 20 ซม. สามารถคำนวณน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยสูงสุดได้เท่ากับ 53.52 ตัน และ 31.82 ตัน เมื่อคานมีอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 1.00 และ 2.00 ตามลำดับ รายละเอียดการออกแบบเป็นดังแสดงในภาพที่ 3.1 และ 3.2

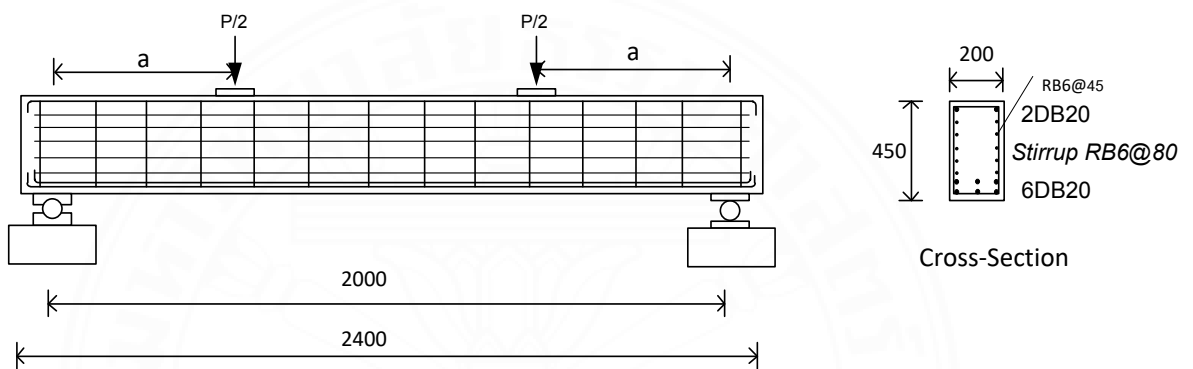


ภาพที่ 3.1 รายละเอียดการเสริมเหล็กคานที่มีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนน้อยกว่ามาตรฐาน
(หน่วย: มิลลิเมตร)

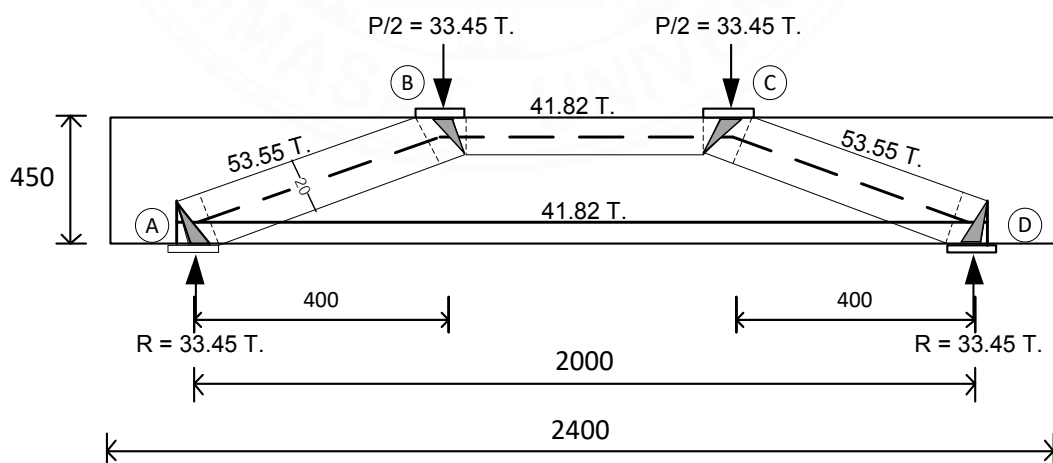


ภาพที่ 3.2 แบบจำลอง Strut and tie สำหรับคานที่มี (ก) $a/d = 1.00$, (ข) $a/d = 2.00$
(หน่วย: มิลลิเมตร)

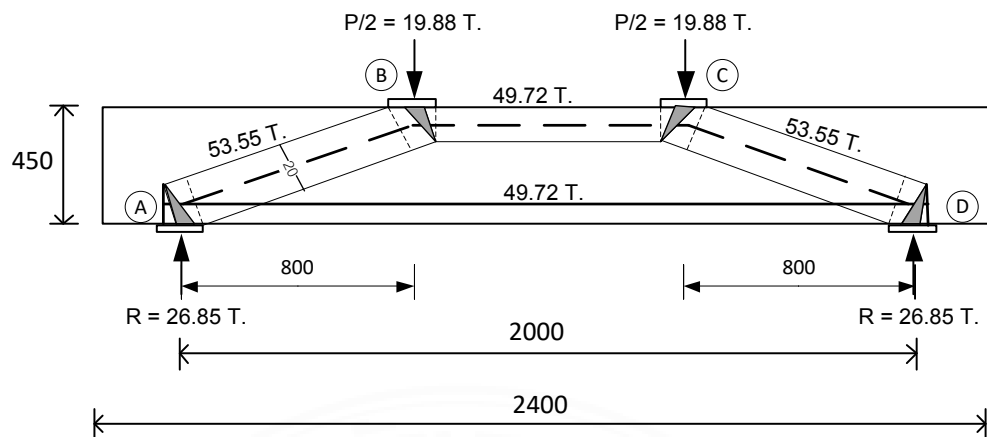
ในการออกแบบคานเหล็กเพื่อศึกษาเปรียบเทียบกับคานที่ถูกกำหนดให้ไว้ดีเนื่องจากแรงเฉือน จึงมีการออกแบบให้มีการเสริมเหล็กต้านทานแรงเฉือนทั้งแนวตั้งและแนวนอนมากกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ACI318-19 โดยขนาดของคานและการเสริมเหล็กรับแรงอัดและเหล็กรับแรงดึงจะเหมือนกันทุกประการ ในการออกแบบสมมติให้ความกว้างสูงสุดของ strut เท่ากับ 20 ซม. สามารถคำนวณน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยสูงสุดได้เท่ากับ 66.91 ตัน และ 39.78 ตัน เมื่อคานมีอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพเท่ากับ 1 และ 2 ตามลำดับ รายละเอียดการออกแบบเป็นดังแสดงในภาพที่ 3.3 และ 3.4



ภาพที่ 3.3 รายละเอียดการเสริมเหล็กคานที่มีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนตามมาตรฐาน (หน่วย: มิลลิเมตร)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.4 แบบจำลอง Strut and tie สำหรับคานที่มี (ก) $a/d = 1.00$, (ข) $a/d = 2.00$
(หน่วย: มิลลิเมตร)

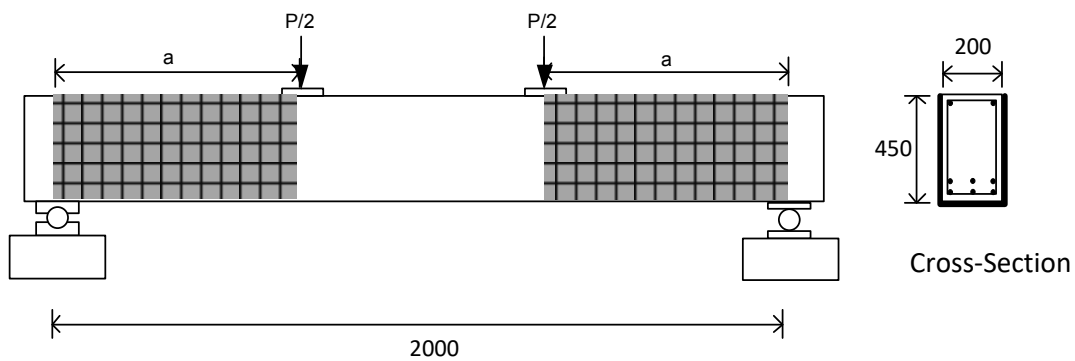
3.2 รายละเอียดของตัวอย่างการทดสอบ

จำนวนตัวอย่างการทดสอบทั้งหมด 10 ตัวอย่าง แบ่งเป็นคานที่ใช้ในการทดสอบจำนวน 8 ตัว จะมีขนาดและการเสริมเหล็กที่เหมือนกันทั้งหมด และมี 2 ตัวที่มีการเสริมเหล็กตามแนวนอนและแนวตั้งตามมาตรฐานเพื่อศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรม ความสามารถในการรับน้ำหนัก และประสิทธิภาพของวิธีการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ได้ แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้มีลักษณะเป็นเส้นใยแบบทิศทางเดียว (Unidirectional) ใช้ epoxy resin เป็นวัสดุเชื่อมประสานคุณสมบัติของ CFRP และ Epoxy resin เป็นไปตามข้อมูลจากผู้ผลิต รายละเอียดการเสริมกำลังดังแสดงในตารางที่ 3.1

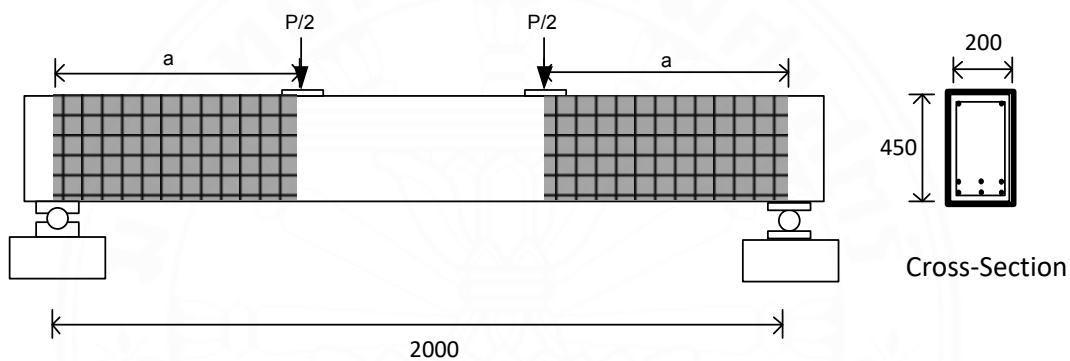
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการเสริมกำลังคานตัวอย่าง

Group	a/d ratio	specimen	Strengthening with	Fiber direction
S1	1.00	BM1	-	-
		BR1	-	-
		B1U	U-wraps 2 ชั้น ตลอดช่วงเงื่อนไข	0° และ 90°*
		B1F	Fully wraps 2 ชั้น ตลอดช่วงเงื่อนไข	0° และ 90°
		B1DF	คานเกิดรอยร้าวทแยงถูกเสริมกำลังแบบ Fully wraps 2 ชั้น ตลอดช่วงเงื่อนไข	0° และ 90°
S2	2.00	BM2	-	-
		BR2	-	-
		B2U	U-wraps 2 ชั้น ตลอดช่วงเงื่อนไข	0° และ 90°
		B2F	Fully wraps 2 ชั้น ตลอดช่วงเงื่อนไข	0° และ 90°
		B2DF	คานเกิดรอยร้าวทแยงถูกเสริมกำลังแบบ Fully wraps 2 ชั้น ตลอดช่วงเงื่อนไข	0° และ 90°

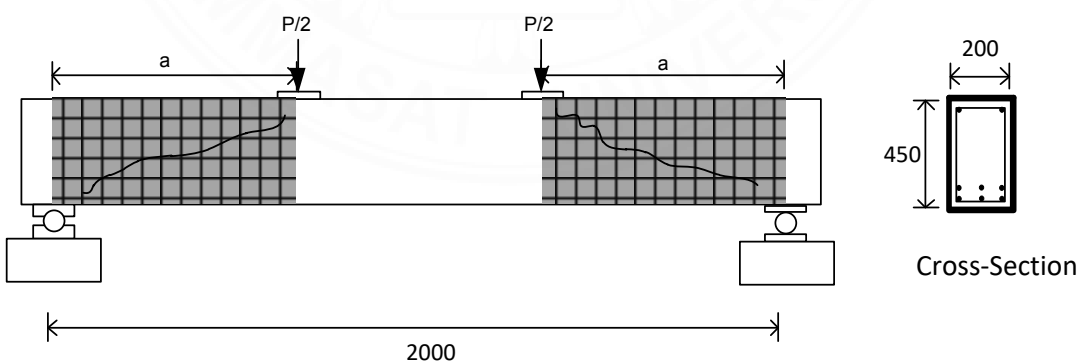
*การทำมุมของเส้นใยชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 กับความยาวคาน



B1U, B2U



B1F, B2F

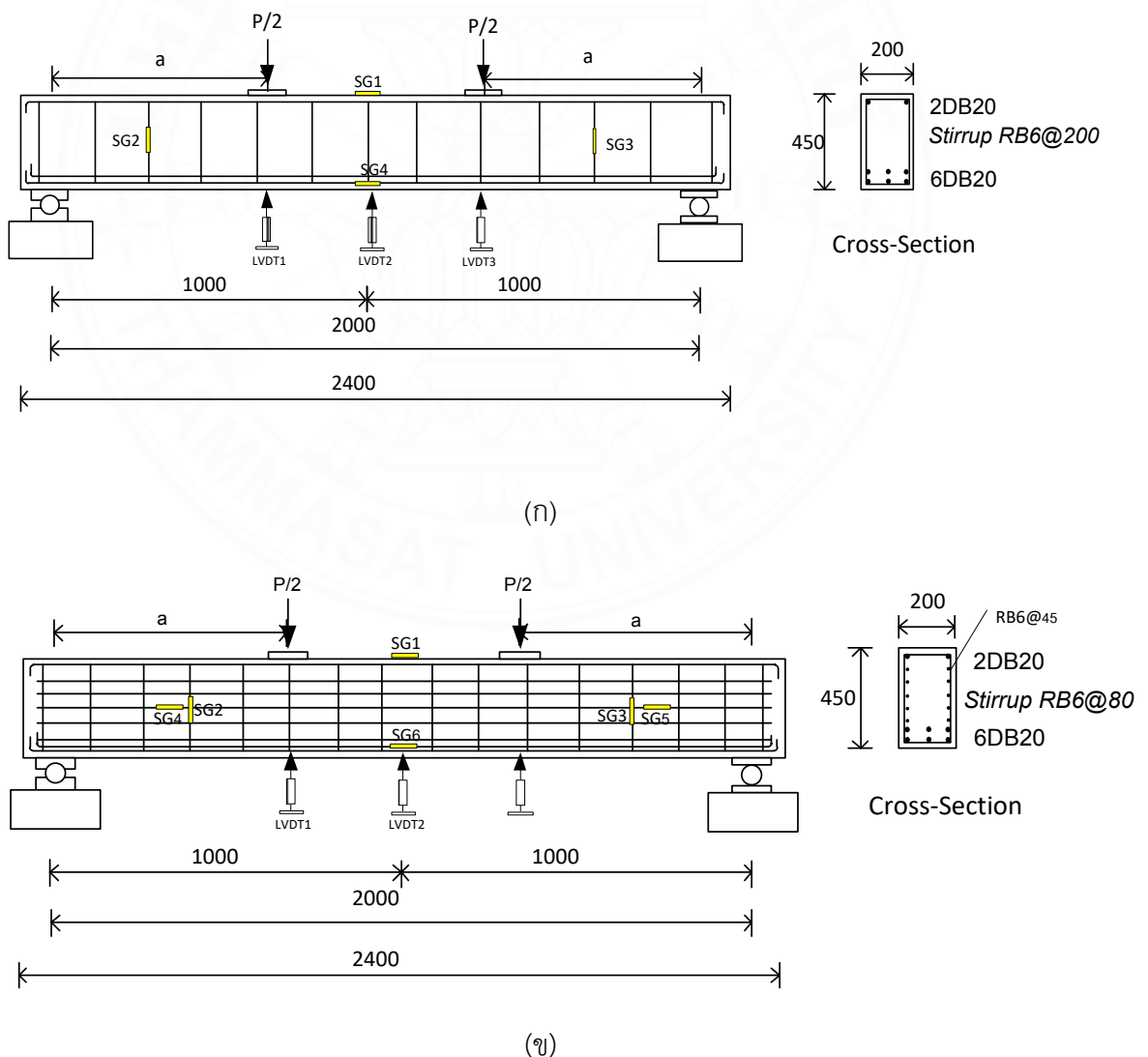


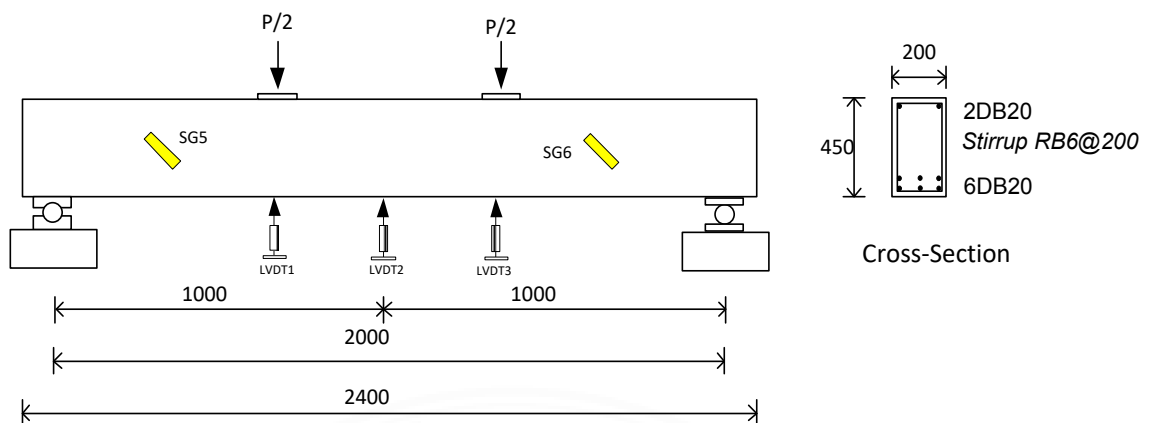
B1DF, B2DF

ภาพที่ 3.5 ลักษณะการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP sheet)

3.3 การติดตั้งเครื่องมือและการทดสอบ

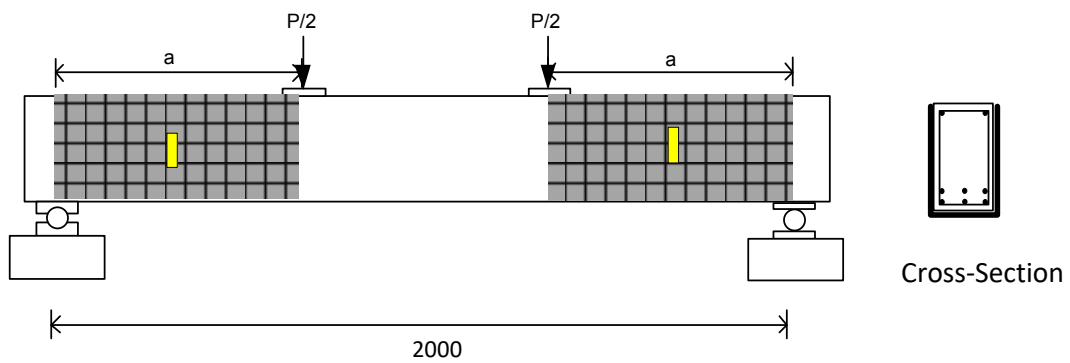
การทดสอบคานเป็นแบบ four point bending ให้น้ำหนักกระทำด้วยเครื่อง hydraulic jack และติดตั้ง strain gauge ที่เหล็กเสริมรับแรงดึงเพื่อวัดค่า tensile strain ของเหล็กเสริมและติดตั้งที่ผิวคอนกรีตบริเวณกึ่งกลางคานด้านบนเพื่อวัดค่า Compressive strain ของคอนกรีต สำหรับคานที่ไม่มีการเสริมกำลังจะติดตั้ง strain gauge เพิ่มที่บริเวณกึ่งกลางของ shear span ทำมุม 45 องศากับความยาวคานเพื่อวัดค่า Diagonal tension strain และ Diagonal compression strain เกิดขึ้น บริเวณที่จะเกิดรอยร้าว LVDTs ถูกติดตั้งที่กึ่งกลางของคานเพื่อวัดค่าการแอ่นตัวของคานดังแสดงในภาพที่ 3.6 ส่วนคานที่มีการเสริมกำลังจะติดตั้ง strain gauge บนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ด้วยเพื่อวัดค่า strain ที่เกิดบนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ดังแสดงในภาพที่ 3.7



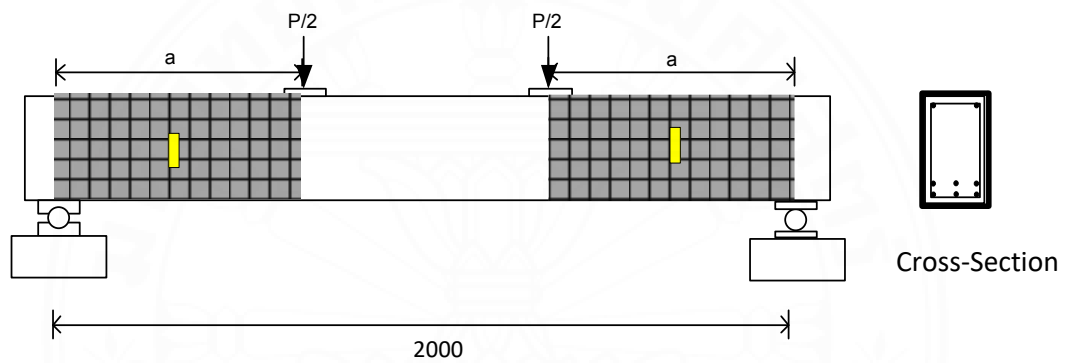


(ค)

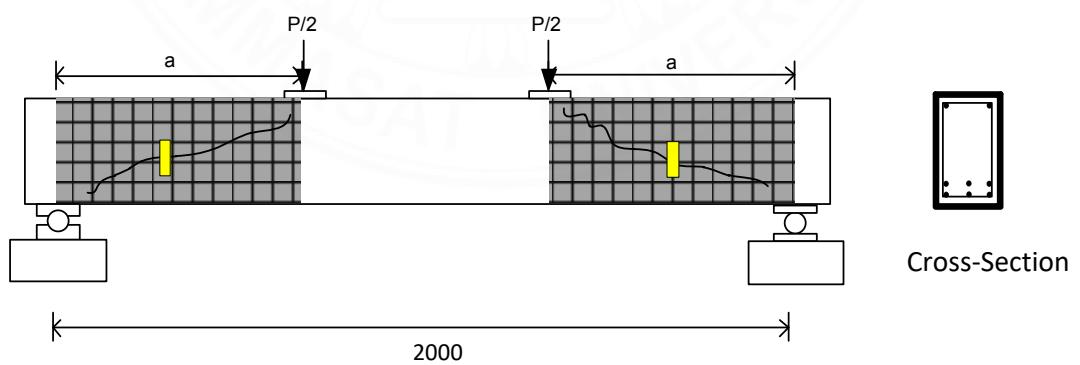
ภาพที่ 3.6 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัด (ก) คานที่มีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนน้อยกว่ามาตรฐาน, (ข) คานที่มีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนตามมาตรฐาน, (ค) คานที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วย CFRP ที่ Shear span



B1U, B2U



B1F, B2F



B1DF, B2DF

ภาพที่ 3.7 ตำแหน่งติดตั้ง Strain gauges บนแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP)

3.4 การทดสอบวัสดุและการผลิตคานตัวอย่าง

3.4.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ประกอบไปด้วย

3.4.1.1 การทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. จำนวนทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดประลัยที่ 28 วัน จำนวน 2 ตัวอย่างและ ณ วันที่ทดสอบคานครั้งละ 2 ตัวอย่าง

3.4.1.2 การทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

ทดสอบกำลังรับแรงดึงที่จุดครากและกำลังรับแรงดึงประลัยของเหล็กเส้นกลมขนาด RB6 ชั้นคุณภาพ SR24 และเหล็กเส้นข้ออ้อยขนาด DB20 ชั้นคุณภาพ SD40 จำนวนขนาดละ 5 ตัวอย่าง เครื่องมือทดสอบและการทดสอบวัสดุแสดงในภาพที่ 3.8



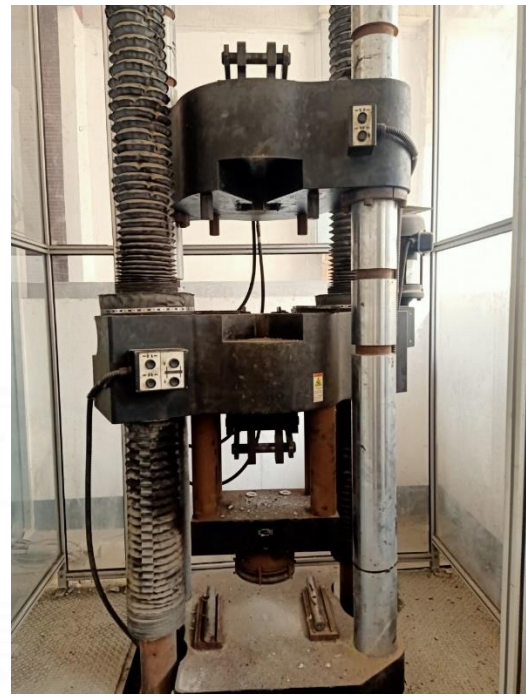
ก. เครื่อง UTM สำหรับทดสอบกำลังวัสดุ



ข. การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต



ค. ทดสอบกำลังดิ่งเหล็กเส้นกลม



ง. ทดสอบกำลังดิ่งเหล็กเส้นข้ออ้อย



จ. ตัวอย่างเหล็กเส้นกลมสำหรับทดสอบ



ฉ. การวิบัติของเหล็กเส้นกลม

ภาพที่ 3.8 เครื่องมือทดสอบและการทดสอบวัสดุ

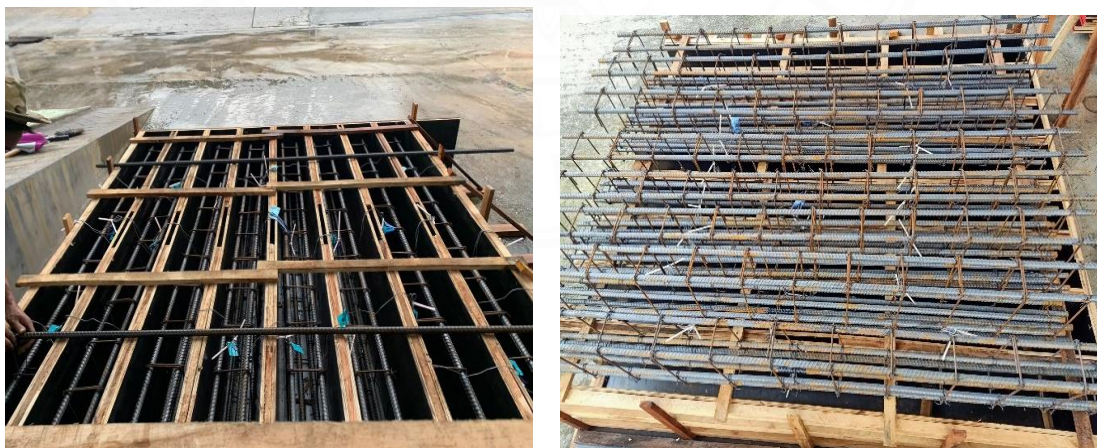
3.4.2 การผลิตคานตัวอย่าง

1. ผูกเหล็กเสริมตามที่ออกแบบและติดตั้ง Strain gauges สำหรับอ่านค่าหน่วยการยืดตัวในเหล็กเสริมและเหล็กปลอก ดังแสดงในภาพที่ 3.9



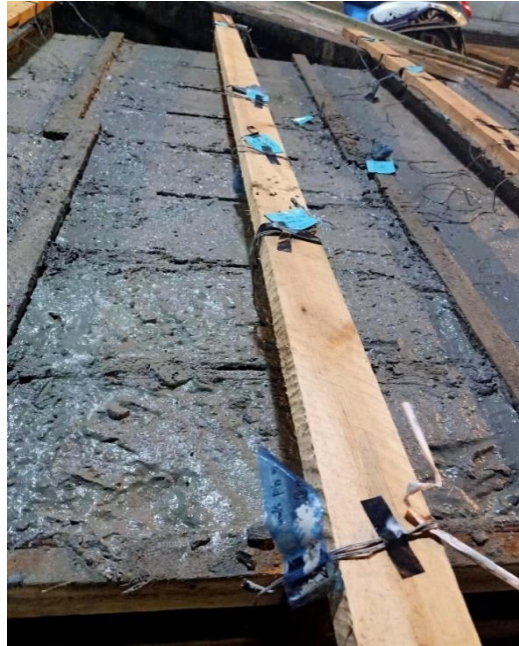
ภาพที่ 3.9 การเตรียมเหล็กเสริมและติดตั้ง

2. นำเหล็กเสริมเข้าแบบสำหรับหล่อคอนกรีต และยกโครงเหล็กให้ได้ระยะหุ้มเหล็กตามที่ออกแบบไว้ ดังแสดงในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 การเตรียมเหล็กเสริมในแบบเพื่อรอการเทคอนกรีต

3. เทคอนกรีต พร้อมเก็บตัวอย่างคอนกรีตสำหรับทดสอบกำลังอัด ดังแสดงในภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 การเทคอนกรีตคานตัวอย่าง

4. ถอดแบบหลังจากหล่อคานครบ 7 วัน และทำการบ่มคานตัวอย่าง 28 วัน ดังแสดงในภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 ถอดแบบหลังจากหล่อคานครบ 7 วัน และทำการบ่มคานตัวอย่าง 28 วัน

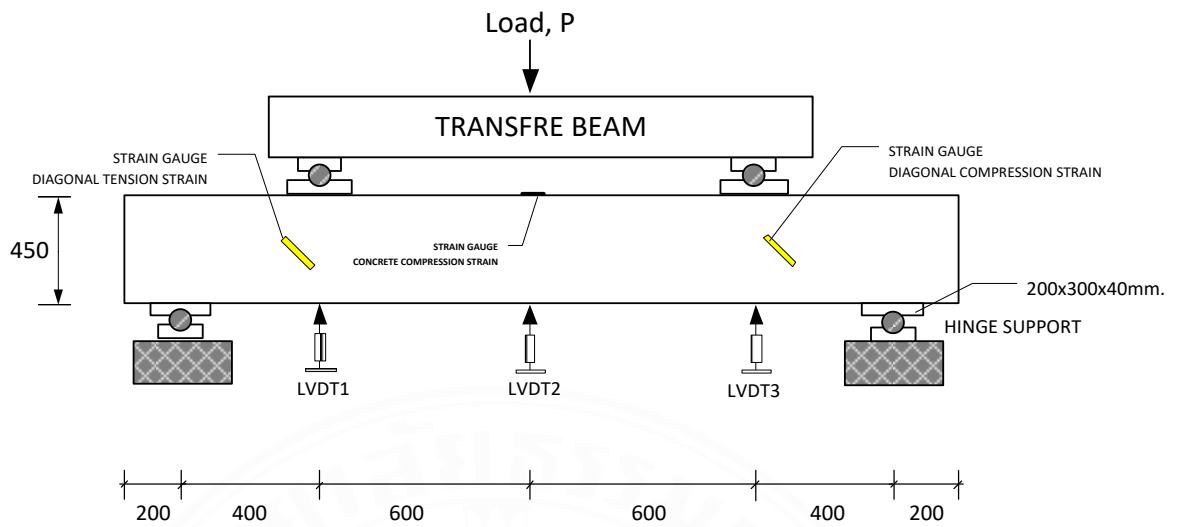
3.4.3 ขั้นตอนการทดสอบคานตัวอย่าง

ทำการทดสอบเพื่อศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับคานที่มีค่าอัตราส่วนช่วงเนื้อต่อความลึกประสิทธิผลต่างกัน คือ 1.00 และ 2.00 ทั้งแบบที่เสริมเหล็กต้านทานแรงเฉือนอย่างเพียงพอเท่ากับปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดและแบบต่ำกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดที่มาตรฐาน ACI318-19 กำหนด ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กและศึกษาการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคานลิกที่เกิดรอยร้าวทแยงจากฐานรองรับถึงตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ การทดสอบจะกระทำภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบสถิต (Static load) โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

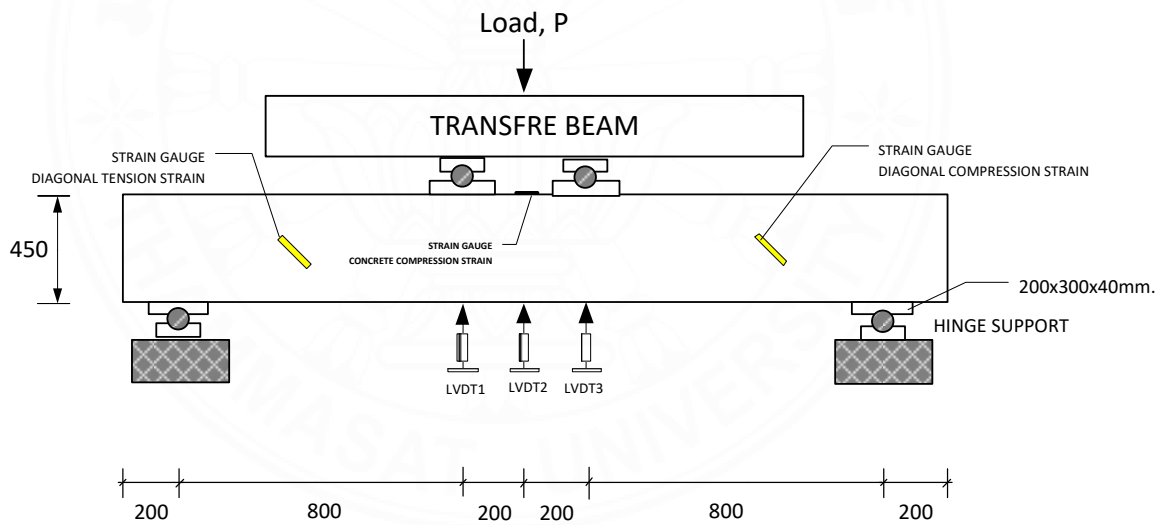
1. กัดคาน BM1 , BR1 และ BM2 , BR2 จนกระทั่งเกิดการวิบัติ และเก็บข้อมูลไว้เพื่อเป็นค่าอ้างอิง
2. กัดคาน B1DF และ B2DF จนกระทั่งเกิดรอยร้าวในแนวทแยงจากฐานรองรับถึงตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกกระทำแต่ยังไม่เกิดการวิบัติแล้วทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์
3. ทำการเสริมกำลังคาน B1U, B1F, B2U, B2F ตามรูปแบบที่กำหนดด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์
4. หลังจากเสริมกำลังได้ครบ 7 วัน นำคาน B1U, B1F, B2U, B2F, B1DF และ B2DF มาทดสอบจนกระทั่งเกิดการวิบัติ
5. นำผลการทดสอบคานทุกตัวมาศึกษาเปรียบเทียบทั้งค่า Ultimate load, การแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน, ลักษณะการวิบัติ และค่า stress ของเหล็กเสริมที่เกิดขึ้น เพื่อหาวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเสริมกำลังคานและความสามารถในการเสริมกำลังคานที่เกิดรอยร้าวเนื่องจากการรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน

3.4.3.1 การทดสอบคานอ้างอิง

คานอ้างอิงทั้ง 2 กลุ่ม ได้แก่ BM1, BR1, BM2 และ BR2 จะถูกทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบสถิต (Static load) โดยแม่แรงไฮดรอลิกผ่าน Load cell ระยะห่างระหว่างฐานรองรับ 2.00 เมตร ระยะห่างจากฐานรองรับและตำแหน่งน้ำหนักกระทำมีค่าเท่ากับ 40 ซม. และ 80 ซม. สำหรับคานที่มีค่า a/d เท่า 1 และ 2 ตามลำดับ น้ำหนักบรรทุกจะกระทำเพิ่มขึ้นครั้งละ 1 ตัน จนกระทั่งคานวิบัติ และทำการสังเกตรอยร้าวที่เกิดขึ้นในทุกๆระยะของน้ำหนักกระทำ รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบและอุปกรณ์ตรวจวัด แสดงในภาพที่ 3.13 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคาน แสดงในภาพที่ 3.14 และการติดตั้งคานทดสอบแสดงในภาพที่ 3.15



(ก.)



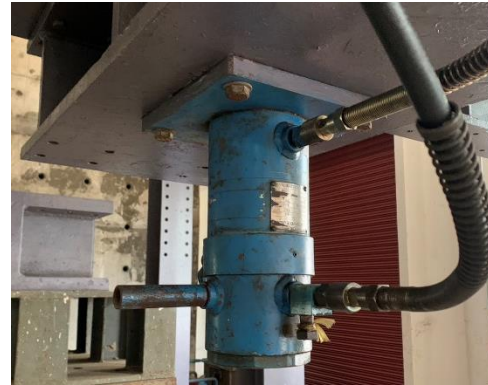
(ข.)

ภาพที่ 3.13 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบและอุปกรณ์ตรวจวัดในคานอ้างอิง

(ก.) $a/d = 1.00$, (ข) $a/d = 2.00$



Load Frame



Hydraulic jack



Linear Variable Differential Transducer



Hinge support

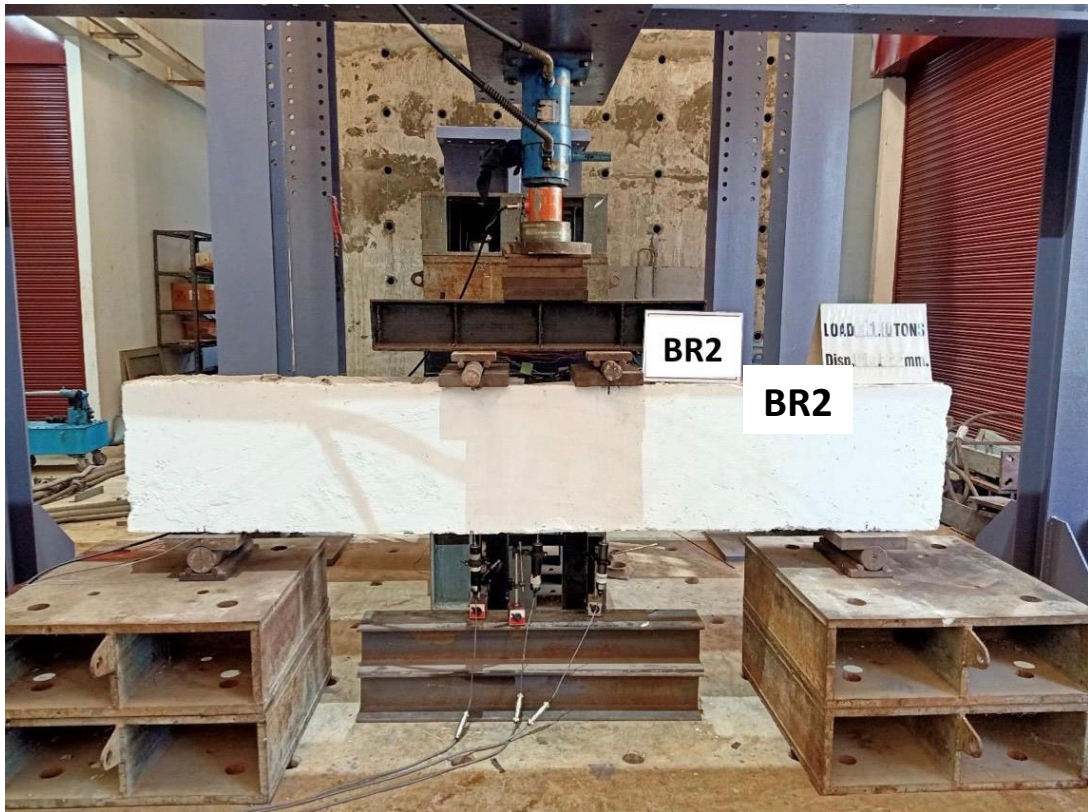


Load cell



Data logger

ภาพที่ 3.14 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคาน



ภาพที่ 3.15 การติดตั้งคานทดสอบและอุปกรณ์ตรวจวัดคานอ้างอิง

3.4.3.2 การเตรียมคานตัวอย่างเพื่อใช้เสริมกำลัง

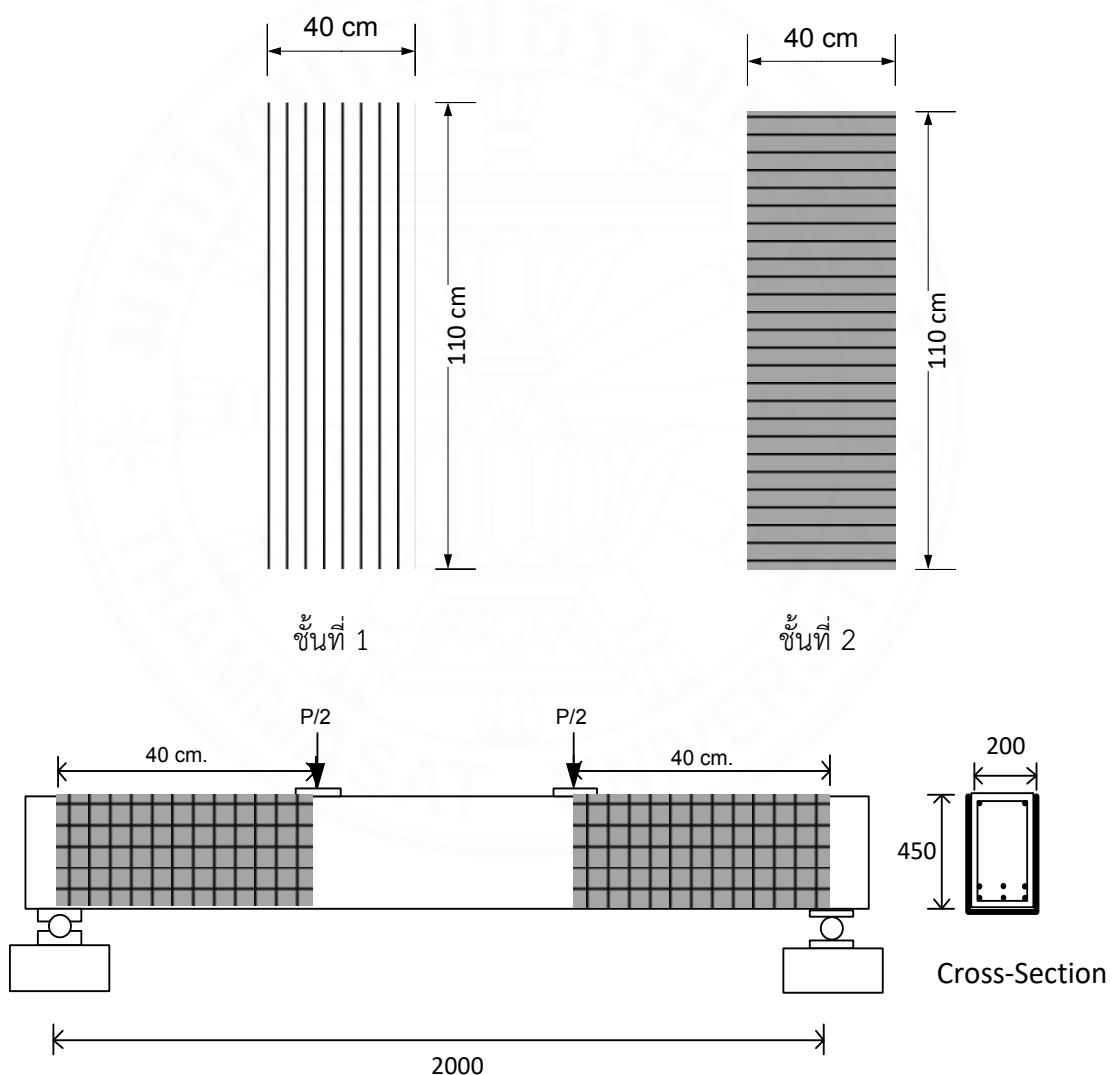
เพื่อการทดสอบสำหรับการเสริมกำลังคานลึกลงกริตเสริมเหล็กที่เกิดรอยร้าวทแยงด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบพันรอบ 4 ด้าน คาน B1DF และ B2DF ก่อนถูกเสริมกำลังจะถูกกดทำลายจนกระทั่งเกิดรอยร้าวในแนวทแยงจากฐานรองรับถึงตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกกระทำแต่ยังไม่เกิดการวิบัติ การติดตั้งเครื่องกดทดสอบในลักษณะเดียวกันกับคานอ้างอิง ลักษณะการทดสอบแสดงในภาพที่ 3.16



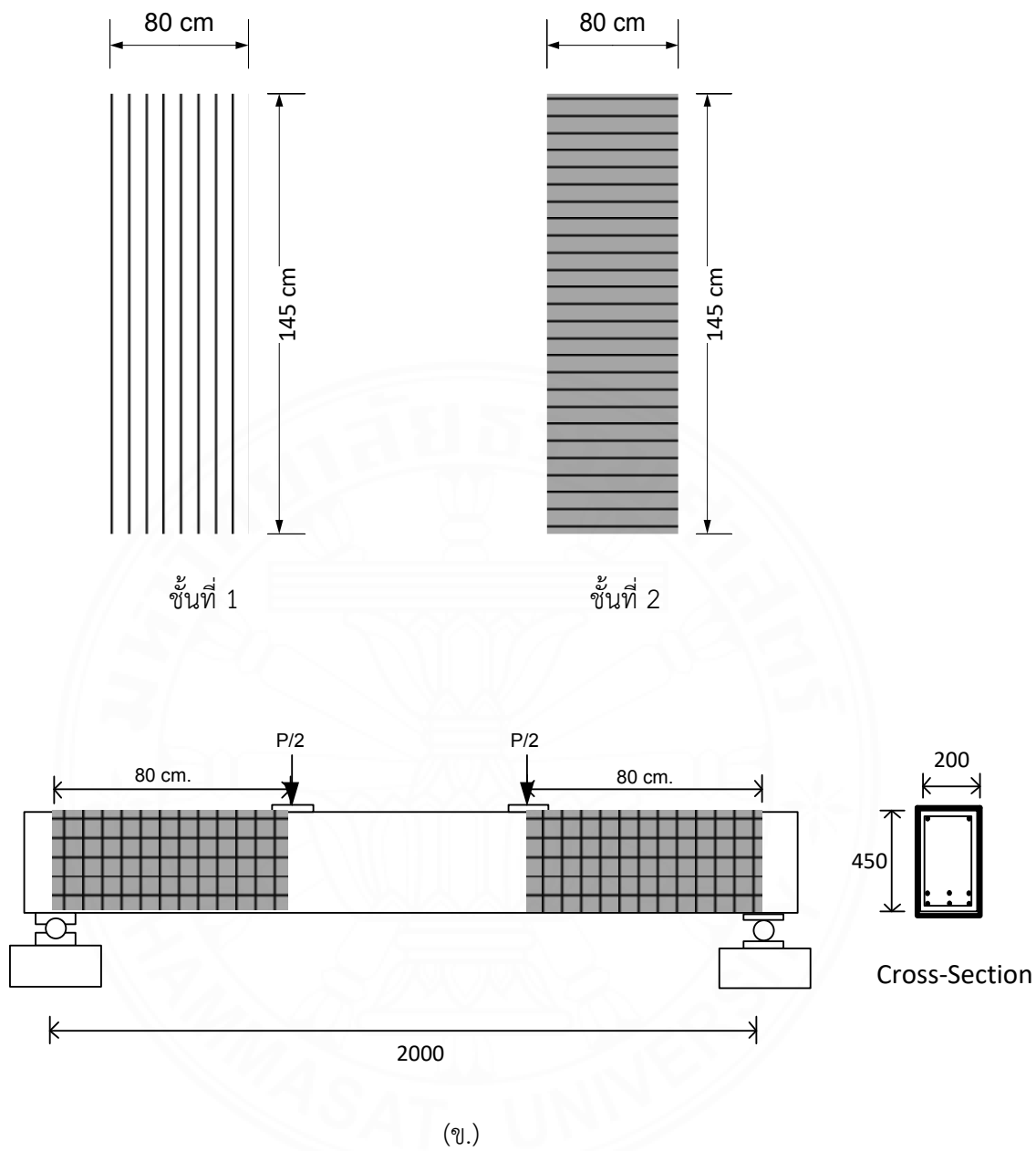
ภาพที่ 3.16 การกดทำลายคานตัวอย่างเพื่อเสริมกำลัง

3.4.3.3 การเสริมกำลังคานตัวอย่าง

วัสดุที่ใช้ในการเสริมกำลังได้แก่แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ชนิดเส้นใยทิศทางเดียว (SikaWrap-230C) และใช้ Epoxy (Sikadur-330) เป็นวัสดุยึดติด อัตราส่วนผสมและวิธีการติดตั้งเป็นไปตามที่ผู้ผลิตแนะนำ ตำแหน่งของการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เสริมกำลังอยู่ในช่วง shear span โดยคานที่มีอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 1 ระยะติดตั้งมีความกว้างข้างละ 40 ซม. และคานที่มีอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 2 ระยะติดตั้งมีความกว้างข้างละ 80 ซม. รายละเอียดการเตรียมแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์และขั้นตอนการติดตั้งแสดงในภาพที่ 3.17-3.26



(ก.)



ภาพที่ 3.17 ตัวอย่างการเตรียมแผ่น CFRP สำหรับ
 (ก.) U-wraps $a/d = 1$ (ข.) Fully wraps $a/d = 2$

ขั้นตอนการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

1. ลบเหลี่ยมขอบคานทั้ง 4 ด้านในช่วง Shear span ดังแสดงในภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 การลบเหลี่ยมคาน

2. เตรียมขัดผิวคอนกรีตให้เรียบบริเวณที่ทำการติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ดังแสดงในภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 การเตรียมผิวคอนกรีตให้เรียบ

3. ใช้ Epoxy (Sikadur-31CF) เกร้าที่ผิวคอนกรีตบริเวณที่มีร่องไม่สม่ำเสมอหรือรูเพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 3.20



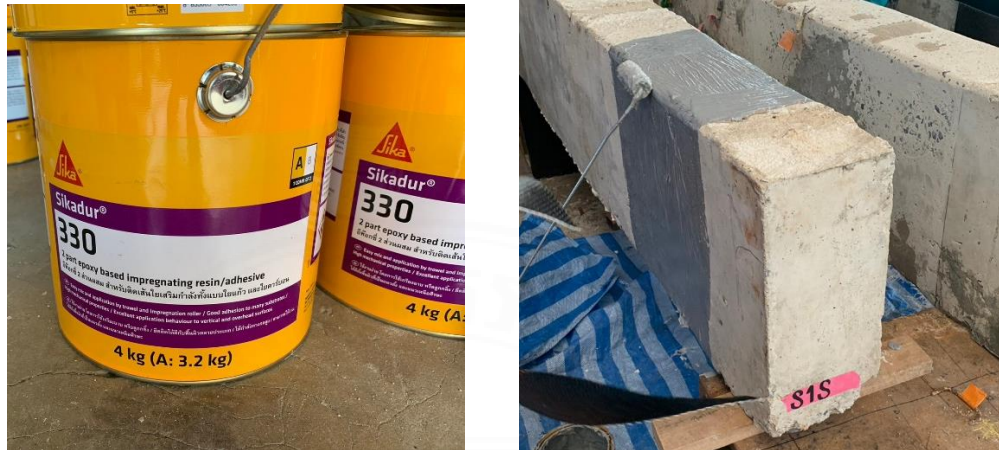
ภาพที่ 3.20 เกร้าที่ผิวคอนกรีตเพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศ

4. วัดความชื้นของคาน ต้องมีค่าไม่เกิดความชื้นของ Epoxy ตามที่ผู้ผลิตกำหนด ดังแสดงในภาพที่ 3.21



ภาพที่ 3.21 เครื่อง concrete moisture meter

5. ทา Epoxy (Sikadur-330) ให้ทั่วบริเวณช่วง shear span ดังแสดงในภาพที่ 3.22



ภาพที่ 3.22 ทา Epoxy Sikadur-330 สำหรับติดเส้นใยเสริมกำลัง

6. ติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ตามรูปแบบที่ออกแบบไว้ ดังแสดงในภาพที่ 3.23



ภาพที่ 3.23 ติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

7. ใช้ลูกกลิ้งรีดแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เพื่อไล่ฟองอากาศและให้เรียบติดไปกับผิวคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 3.24



ภาพที่ 3.24 ใช้ลูกกลิ้งรีดไล่ฟองอากาศ

8. ทา Epoxy (Sikadur-330) ซ้ำให้ทั่วและติดแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ชั้นที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 3.25



ภาพที่ 3.25 การติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ชั้นที่ 2

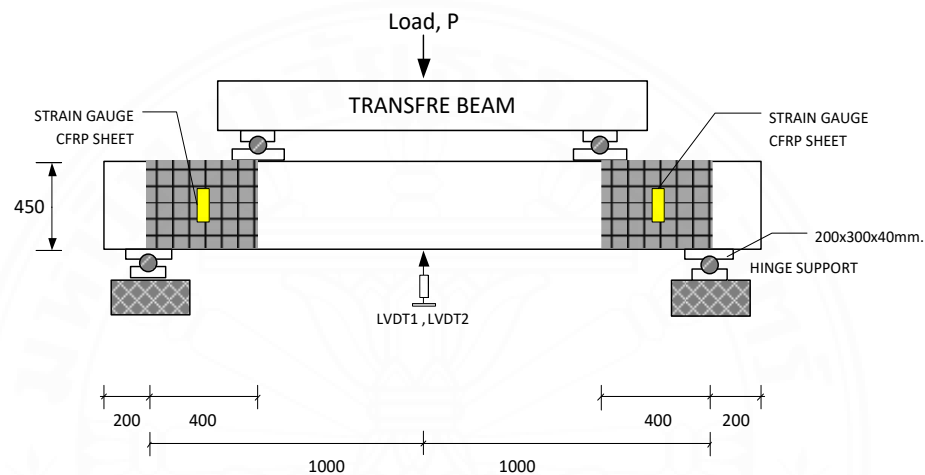
9. ใช้ลูกกลิ้งรีดซ้ำอีกครั้งและทา Epoxy (Sikadur-330) ให้ทั่วทั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์อีกครั้ง เป็นอันเสร็จสมบูรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 3.26



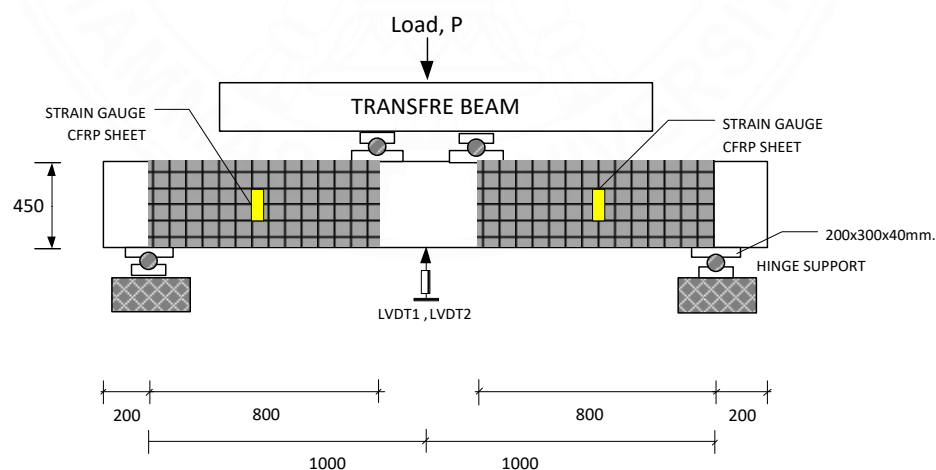
ภาพที่ 3.26 การติดตั้งแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่เสร็จเรียบร้อยแล้ว

3.4.3.4 การทดสอบคานที่มีการเสริมกำลัง

หลังจากเสริมกำลังคานตัวอย่าง B1U, B1F, B2U, B2F, B1DF และ B2DF แล้ว คานทั้งหมดจะถูกทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบสถิต (Static load) โดยแม่แรงไฮดรอลิกผ่าน Load cell จนกระทั่งคานวิบัติ ติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียดเพิ่มเติมที่แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ จำนวน 4 จุด รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบและอุปกรณ์ตรวจวัด แสดงในภาพที่ 3.27 และการติดตั้งคานทดสอบแสดงในภาพที่ 3.28



(ก.)



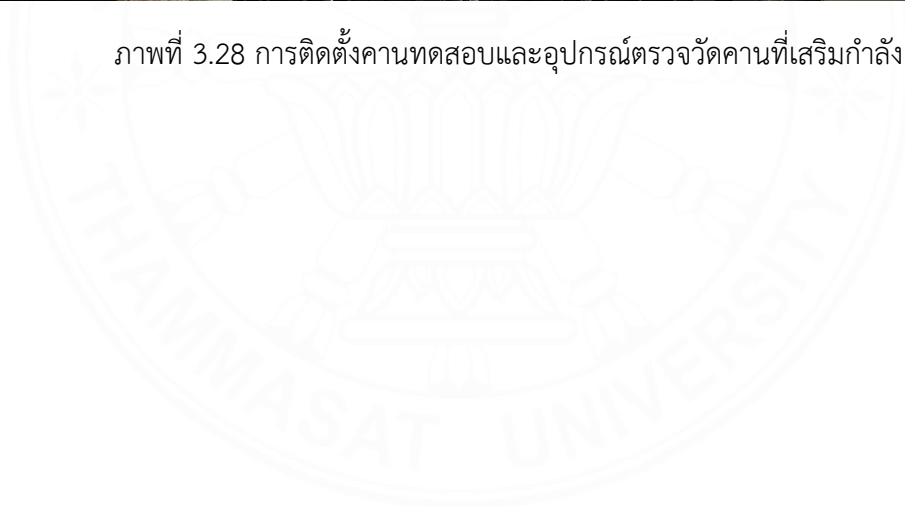
(ข.)

ภาพที่ 3.27 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบและอุปกรณ์ตรวจวัดในคานที่เสริมกำลัง

(ก.) $a/d = 1.00$, (ข.) $a/d = 2.00$



ภาพที่ 3.28 การติดตั้งคานทดสอบและอุปกรณ์ตรวจวัดคานที่เสริมกำลัง



บทที่ 4

ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบจะพิจารณาถึงพฤติกรรมภายใต้น้ำหนักบรรทุกของคานาลึ่กคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการออกแบบให้มีปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนทั้งในแนวตั้งและแนวนอนเพียงพอเท่ากับปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดและคานที่มีการออกแบบให้มีเหล็กเสริมรับแรงเฉือนน้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดทั้งกรณีที่ไม่มีการเสริมกำลังและกรณีมีการเสริมกำลังรับแรงเฉือนภายนอกด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ โดยจะพิจารณากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยที่เพิ่มขึ้น (Ultimate strength) น้ำหนักบรรทุกต่อการแอนตัว ค่าความเค้นความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนต่อน้ำหนักบรรทุก และรูปแบบการวิบัติ (Failure mode)

4.1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการผลิตคานตัวอย่าง แสดงในตารางที่ 4.1 และคุณสมบัติของวัสดุเสริมกำลังที่ได้จากผู้ผลิต แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ผลิตคานตัวอย่าง

วัสดุ	ชั้นคุณภาพ	กำลังครากเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	กำลังประลัยเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)	โมดูลัสยืดหยุ่น (กก./ตร.ซม.)
คอนกรีต	-	-	166.82	19.65×10^4
เหล็กเสริม RB6	SD24	2,214.44	3108.36	2.04×10^6
เหล็กเสริม DB20	SD40	6,025.53	6,967.85	2.04×10^6

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของวัสดุเสริมกำลัง

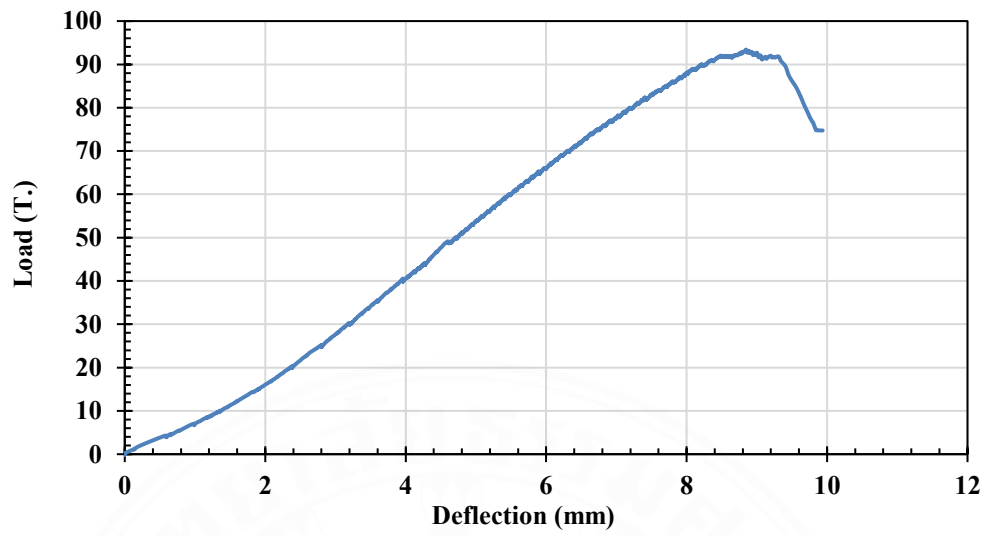
วัสดุ	กำลังรับแรงดึง (นิวตัน/ตร.มม.)	โมดูลัสยืดหยุ่น (นิวตัน/ตร.มม.)	Bond strength (นิวตัน/ตร.มม.)	ความหนาแน่นเชิงเส้นใย (ก./ลบ.ซม.)	ความหนาของเส้นใย (มม./ชั้น)
CFRP sheet	4,000	230,000	-	1.82	0.129
Epoxy 330	30	4500	>4	-	-

4.2 พฤติกรรมภายใต้น้ำหนักบรรทุกของคานที่มีอัตราส่วน

ช่วงการเลื่อนต่อความลึกลับประสิทธิผลเท่ากับ 1.00

4.2.1 พฤติกรรมของคานอ้างอิงที่มีปริมาณเหล็กรับแรงเฉือนน้อยกว่าเหล็กเสริมต่ำสุด (BR1)

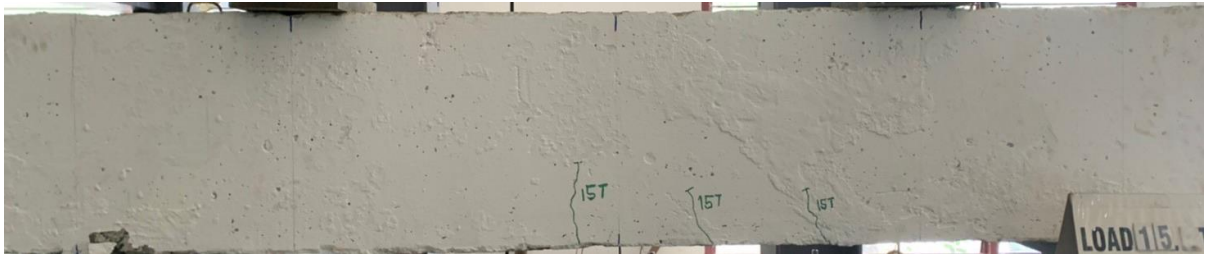
พฤติกรรมคานอ้างอิงคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนน้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดที่มีค่าอัตราส่วน a/d ratio เท่ากับ 1.00 ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบสถิต เมื่อคานได้รับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นถึง 15 ตัน รอยร้าวแรกปรากฏที่บริเวณกึ่งกลางคานจากแรงดัด (Flexural cracking) ลักษณะเป็นแนวตั้งตั้งฉากกับความยาวคานและเหล็กปลอกเริ่มทำงานโดยสังเกตจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กปลอก ดังแสดงในภาพที่ ค.1 ที่เกิดค่าความเครียดเพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในขณะที่รอยร้าวจากแรงดัดก็เพิ่มจำนวนมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นถึง 27 ตัน รอยร้าวทแยงเริ่มปรากฏขึ้นที่ขอบล่างของคานบริเวณใกล้กับฐานรองรับทั้งสองข้างเป็น Flexural shear cracking และรอยร้าวนี้มีความยาวไปยังจุดที่น้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้น และความเครียดในเหล็กปลอกเพิ่มมากขึ้น ความชันของกราฟก็มีความชันลดลงที่น้ำหนักบรรทุก 40 ตัน รอยร้าวทแยงมีความยาวเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และมีความกว้างขยายขึ้นโดยรอยร้าวในระยะต่างๆ แสดงในภาพที่ 4.3 เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมาถึง 93.4 ตัน คานเกิดการวิบัติเนื่องจากรอยร้าวทแยง (Shear compression failure) ที่ข้างขวาของคาน ดังแสดงในภาพที่ 4.2 และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัด ดังแสดงในภาพที่ ค.2 แสดงให้เห็นว่าคานเกิดการวิบัติก่อนที่เหล็กเสริมรับแรงดัดและเหล็กปลอกจะมีกำลังถึงจุดคราก จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการแอ่นตัว ดังแสดงในภาพที่ 4.1 พบว่าที่น้ำหนักบรรทุกประลัยคานมีค่าการแอ่นตัว เท่ากับ 9.94 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคาน BR1



ภาพที่ 4.2 ลักษณะการวิบัติของคาน BR1



น้ำหนักบรรทุกทุก 15 ตัน



น้ำหนักบรรทุกทุก 25 ตัน



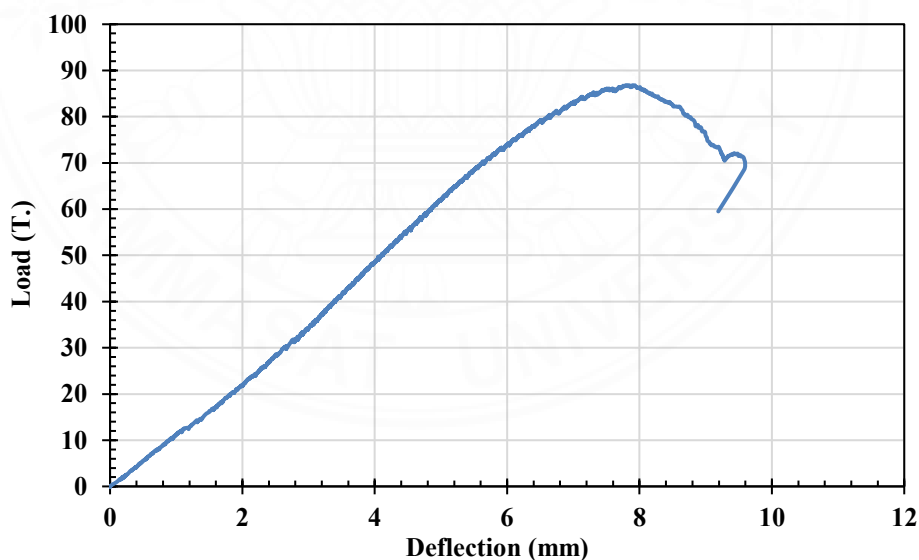
น้ำหนักบรรทุกทุก 40 ตัน



น้ำหนักบรรทุกทุก 50 ตัน

4.2.2 พฤติกรรมของคานที่มีปริมาณเหล็กรับแรงเฉือนเพียงพอเท่าเหล็กเสริมต่ำสุด (BM1)

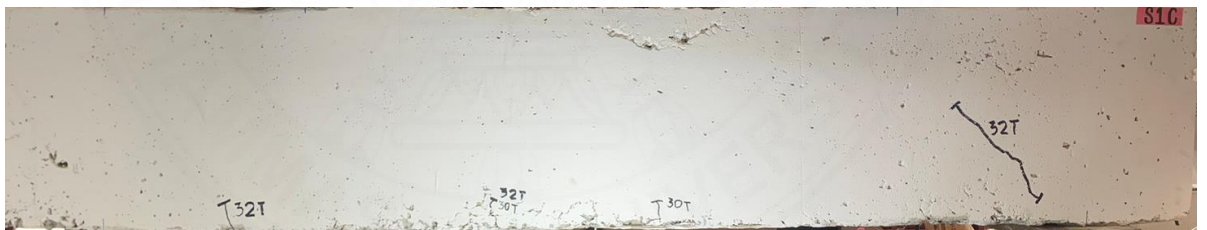
พฤติกรรมของคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนทั้งแนวตั้งและแนวนอนในปริมาณเท่ากับปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวตั้งและแนวนอน ดังแสดงในภาพที่ ค.3 พบว่าเมื่อคานมีรอยร้าวแรกที่ปรากฏที่น้ำหนักบรรทุกทุก 16 ตัน บริเวณกึ่งกลางคานเนื่องจากในแนวตั้งฉากกับความยาวคานเนื่องจาก Flexural cracking ความเครียดของเหล็กปลอกรับแรงเฉือนทั้งสองทิศทางเริ่มเพิ่มขึ้น เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกที่ 32 ตัน จะเกิดรอยร้าวในแนวทแยงบริเวณ strut ด้านขวาเนื่องจาก Shear flexural cracking จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการแอ่นตัว ณ จุดกึ่งกลางของคาน ดังแสดงในภาพที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าความชันของกราฟมีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้น รอยร้าวที่ปรากฏแล้วจะพัฒนายาวมากขึ้นและแผ่ขยายมากขึ้นทั้งบริเวณกึ่งกลางคานและบริเวณแนวของ strut ดังแสดงลักษณะการแตกร้าวในภาพที่ 4.6 เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกถึง 86.8 ตัน มีค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 9.6 มิลลิเมตร และคานเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนแบบ Shear compression failure ที่ด้านซ้ายของคาน ดังแสดงในรูป 4.5 ในขณะที่เหล็กเสริมรับแรงดึงยังมีกำลังไม่ถึงจุดคราก ดังแสดงในภาพที่ ค.4



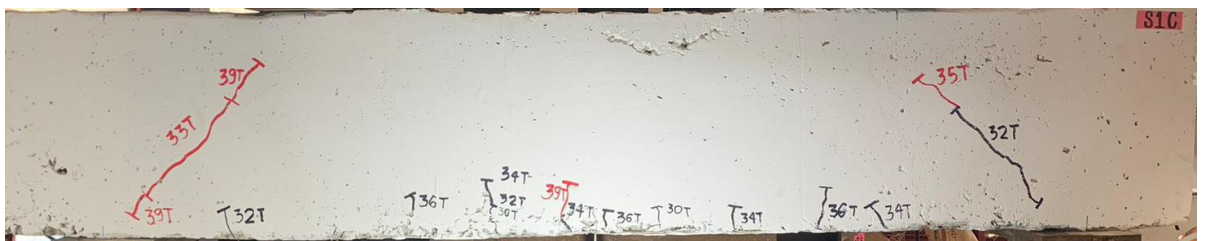
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคาน BM1



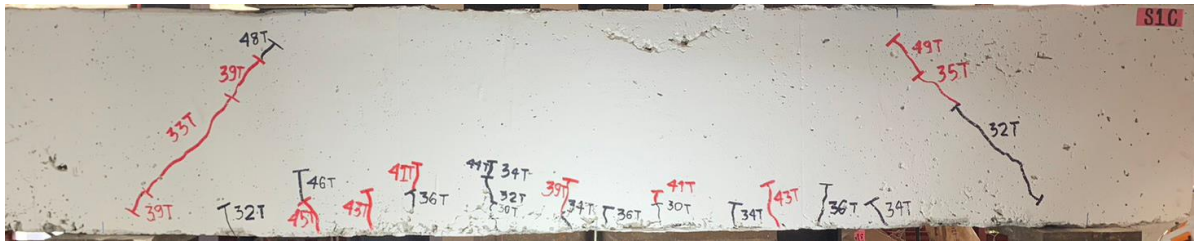
ภาพที่ 4.5 ลักษณะการรื้อตัวของคาน BM1



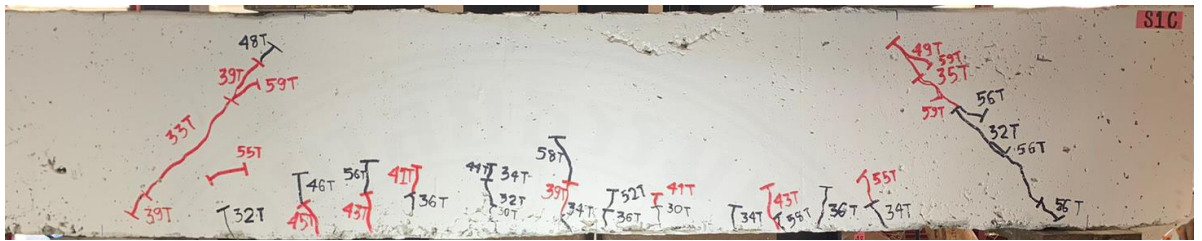
น้ำหนักบรรทุกทุก 32 ตัน



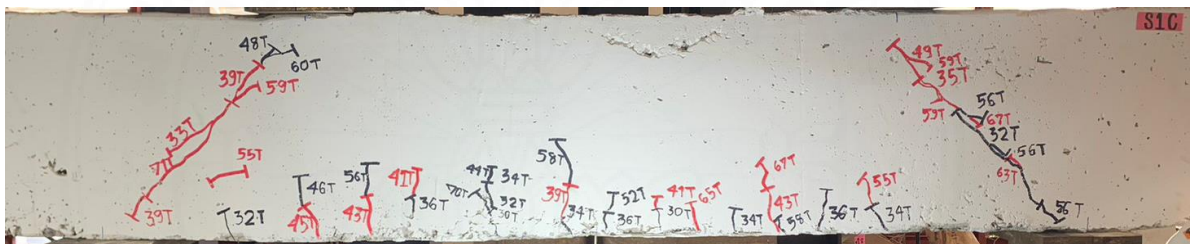
น้ำหนักบรรทุกทุก 39 ตัน



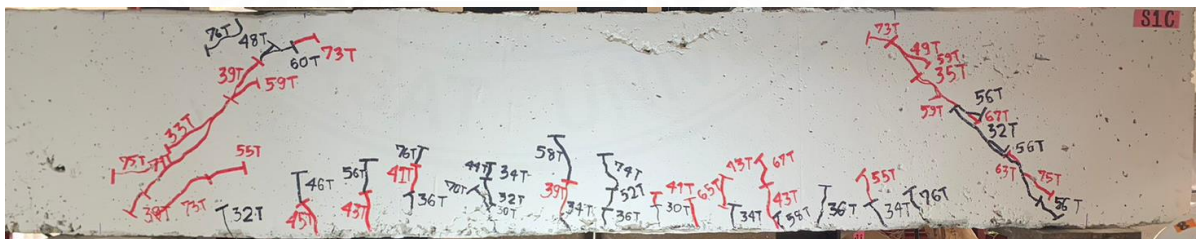
น้ำหนักบรรทุกทุก 50 ตัน



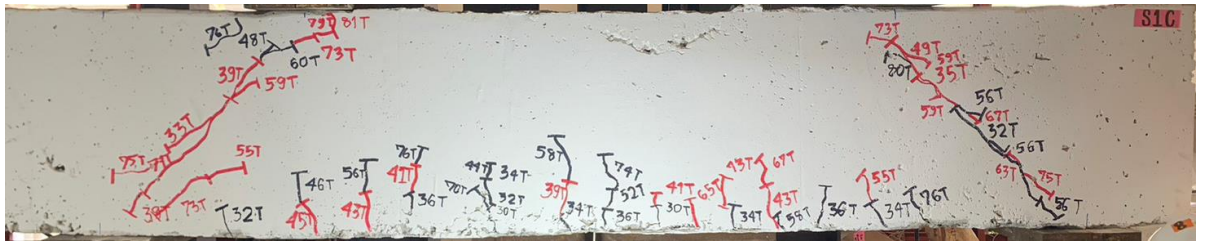
น้ำหนักบรรทุกทุก 59 ตัน



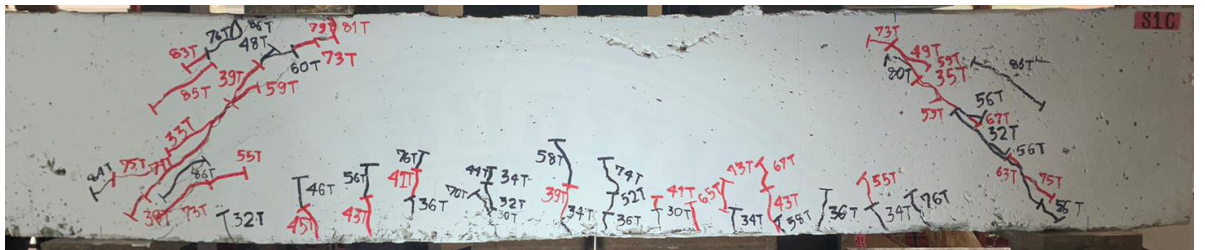
น้ำหนักบรรทุกทุก 71 ตัน



น้ำหนักบรรทุกทุก 78 ตัน



น้ำหนักรรทุก 82 ต้น

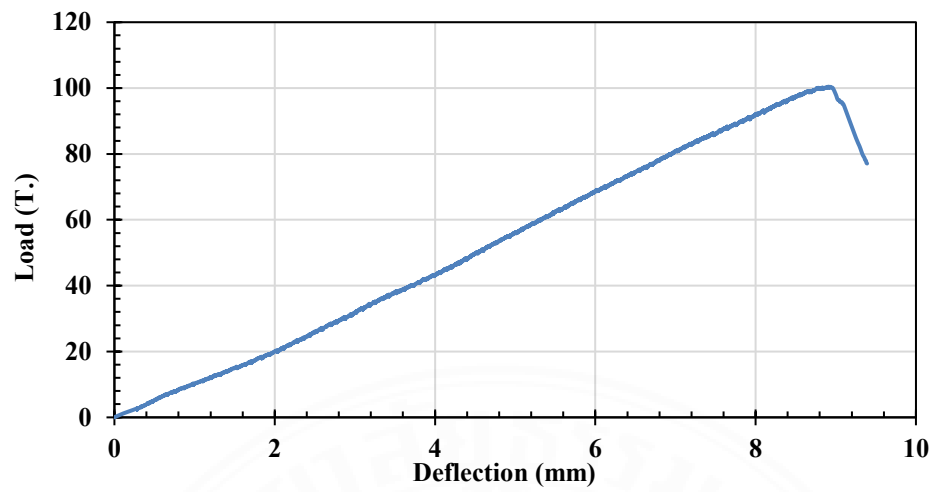


น้ำหนักรรทุกขณะที่วัด

ภาพที่ 4.6 รอยร้าวของคาน BM1 ที่น้ำหนักรรทุกต่างๆ

4.2.3 พฤติกรรมของคานที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบ U-wrap (B1U)

พฤติกรรมคานลึกลูกคองกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในลักษณะพันรอบ 3 ด้าน (U-wrap) จำนวน 2 ชั้น รอยร้าวแรกปรากฏในลักษณะเป็นแนวตั้งฉากกับแนวยาวของคาน (Flexural cracking) บริเวณใกล้กับช่วงเฉือน และรอยร้าวใหม่ๆ ปรากฏเพิ่มมากขึ้นทั่วทั้งบริเวณกลางคานเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้น จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กปลอก ดังแสดงในรูป ค.5 ที่น้ำหนักบรรทุกที่ 30 ตัน พบว่าความเครียดของเหล็กปลอกเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงถึงการทำหน้าที่รับหน่วยแรงที่เกิดขึ้น เนื่องด้วยการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ภายนอกตลอดช่วงเฉือนทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นรอยร้าวทแยงที่จะเกิดขึ้นในบริเวณนั้นได้ แต่สังเกตได้ว่าเมื่อน้ำหนักบรรทุกมีค่ามากขึ้นจะมีรอยร้าวทแยงโผล่เลยมาจากช่วงเฉือนใต้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ดังแสดงในภาพที่ 4.9 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ดังแสดงในภาพที่ ค.7 พบว่า คาร์บอนไฟเบอร์เริ่มทำหน้าที่รับแรงเฉือนเมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกที่ 39 ตัน และเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมาถึง 100.4 ตัน แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ช่วงเฉือนข้างซ้ายของคานเกิดการปริหลุดออกอย่างฉับพลันทั้งสองด้าน (CFRP debonding) และคานเกิดการวิบัติในที่สุด ภายใต้อายุแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์นั้นมีรอยร้าวทแยงเนื่องจากแรงเฉือนในแนวตรงจากฐานรองรับไปยังตำแหน่งที่น้ำหนักกระทำ ดังแสดงในภาพที่ 4.8 เหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรงเฉือนมีกำลังถึงจุดคราก และค่าการแอ่นตัวสูงสุดเท่ากับ 9.39 มิลลิเมตร



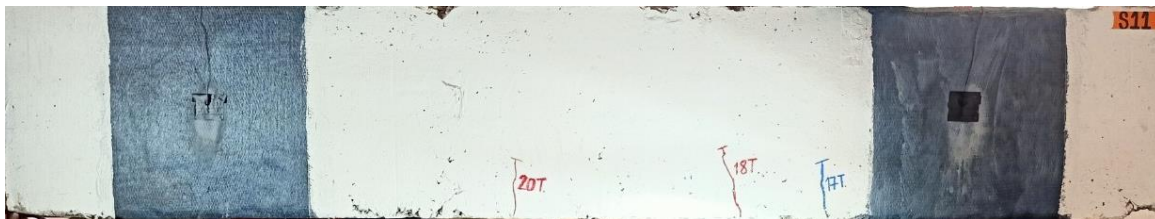
ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคาน B1U



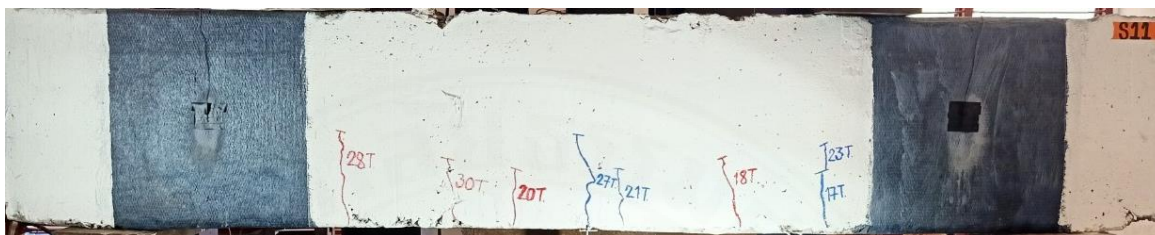
(ก.) ด้านหน้าของคาน

(ข.) ด้านหลังของคาน

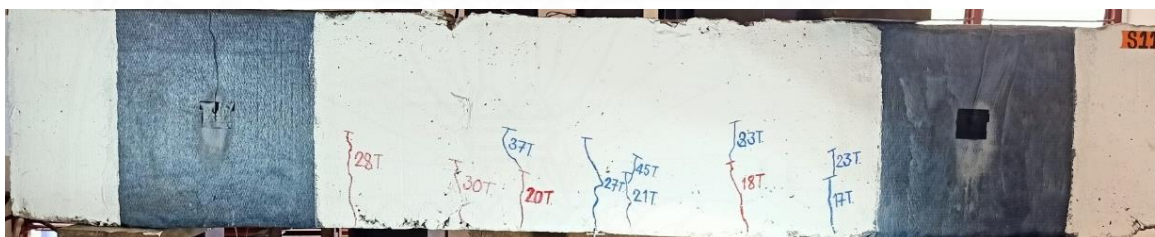
ภาพที่ 4.8 ลักษณะการวิบัติของคาน B1U



น้ำหนักบรรทุก 20 ตัน



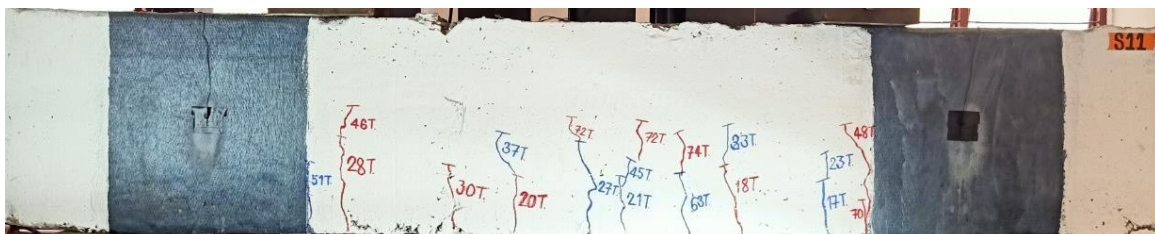
น้ำหนักบรรทุก 30 ตัน



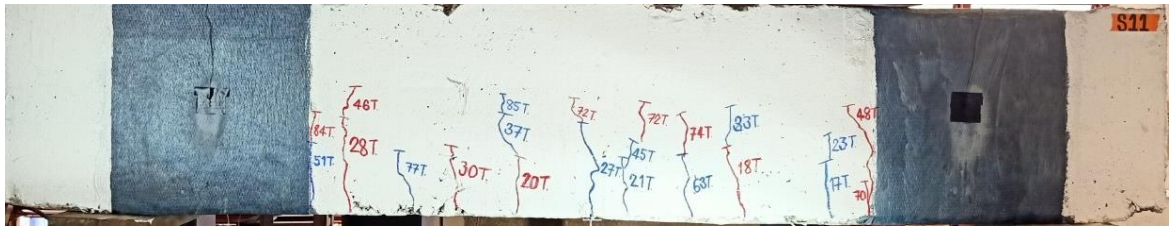
น้ำหนักบรรทุก 45 ตัน



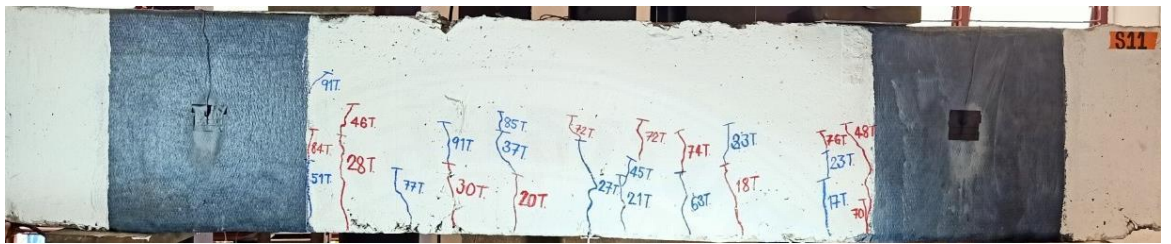
น้ำหนักบรรทุก 65 ตัน



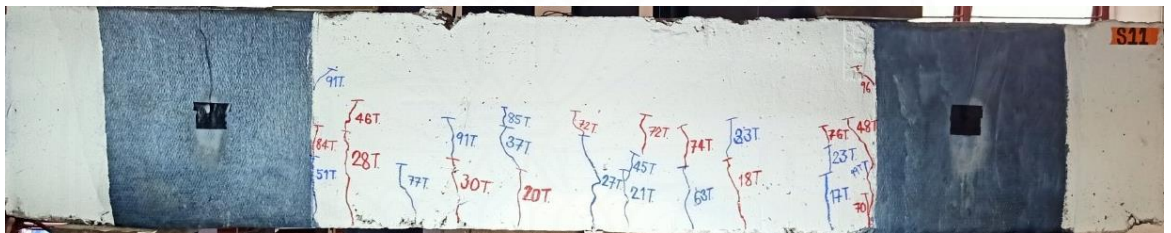
น้ำหนักบรรทุก 75 ตัน



น้ำหนักบรรทุก 85 ตัน



น้ำหนักบรรทุก 91 ตัน

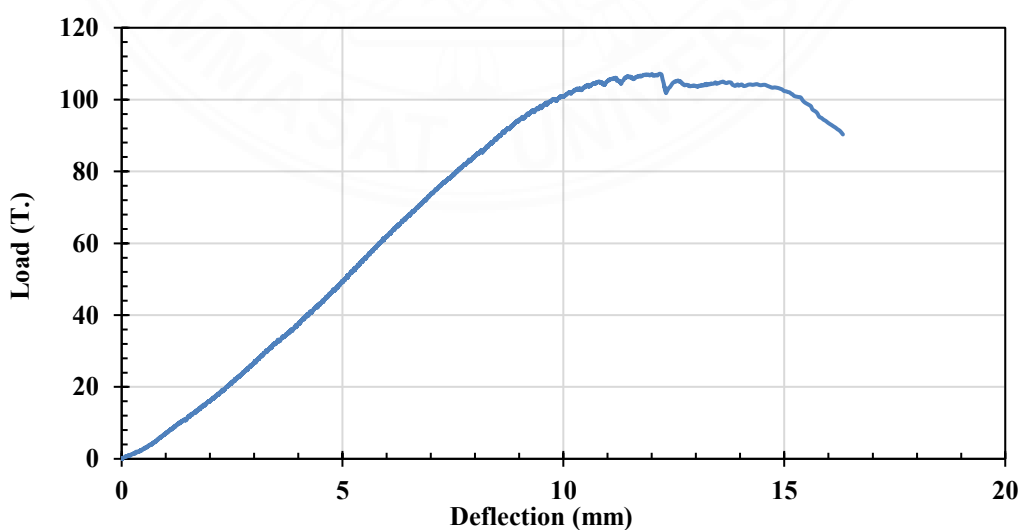


น้ำหนักบรรทุกขณะที่วิบัติ

ภาพที่ 4.9 รอยร้าวของคาน B1U ที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ

4.2.4 พฤติกรรมของคานที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบ Fully wrap (B1F)

พฤติกรรมคานลึกลูกคองกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบ พันรัดรอบทั้ง 4 ด้าน (Fully wrap) จำนวน 2 ชั้น ที่บริเวณช่วงกลางคานปรากฏรอยร้าวเนื่องจาก แรงดัด (Flexural cracking) ที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 16 ตัน เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น รอยร้าว เนื่องจากแรงดัดก็ปรากฏเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 32 ตัน มีรอยร้าวทแยง เกิดขึ้นบริเวณใกล้กับแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ช่วงเฉือนด้านซ้ายของคานและไม่ได้เริ่มจากขอบล่างของ คาน ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการทำหน้าที่รับแรงของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์โดยสังเกตได้จากค่า ความเครียดที่เริ่มเพิ่มขึ้นจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของแผ่น คาร์บอนไฟเบอร์ ดังแสดงในภาพที่ ค.10 เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นอีก รอยร้าวทแยงเดิมได้ขยาย ความยาวลงมาที่ขอบล่างของคานและขยายยาวขึ้นไปทางตำแหน่งน้ำหนักกระทำ น้ำหนักบรรทุก ในช่วงตั้งแต่ 40 ตันขึ้นไป รอยร้าวเนื่องจากแรงดัดและแรงเฉือนขยายเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แต่เนื่องจาก คานมีการเสริมกำลังภายนอกทำให้ไม่สามารถสังเกตรอยร้าวทแยงที่เกิดขึ้นในช่วงเฉือนได้ แต่ถึงอย่าง นั้นเมื่อคานมีน้ำหนักบรรทุกเข้าสู่ช่วง 90 ตัน มีรอยร้าวทแยงปรากฏออกมาจากใต้แผ่นคาร์บอนไฟ เบอร์ที่บริเวณใกล้ฐานรองรับทางด้านซ้ายของคานและขยายยาวไปถึงจุดถ่วงน้ำหนักเมื่อคานรับ น้ำหนักถึง 100 ตัน ลักษณะของรอยร้าวในระยะน้ำหนักกระทำต่างๆแสดงในภาพที่ 4.12 และคาน วิกฤติเนื่องจากแรงเฉือน (Shear compression failure) ที่น้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 107.2 ตัน ดังแสดงในภาพที่ 4.11 และมีค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 16.33 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคาน B1F



(ก.) ด้านหน้าของคาน



(ข.) ด้านหลังของคาน

ภาพที่ 4.11 ลักษณะการวิบัติของคาน B1F



น้ำหนักบรรทุกทุก 24 ตัน



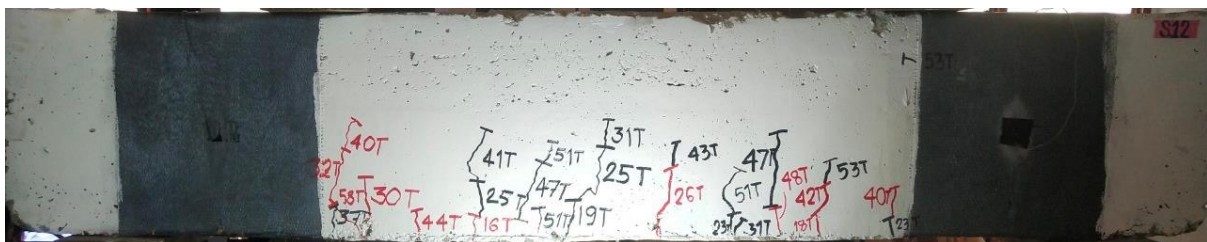
น้ำหนักบรรทุกทุก 30 ตัน



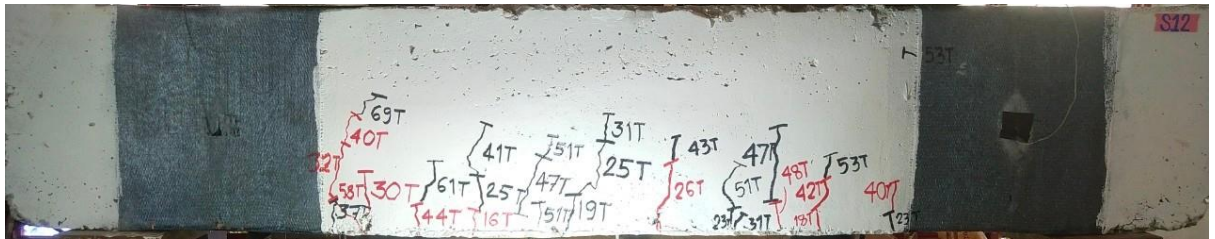
น้ำหนักบรรทุกทุก 40 ตัน



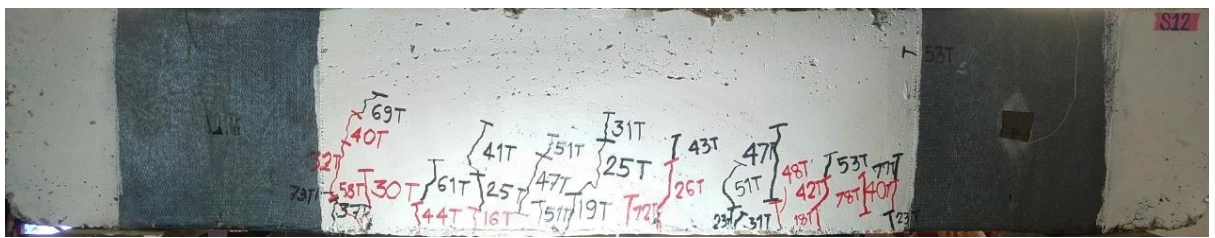
น้ำหนักบรรทุกทุก 50 ตัน



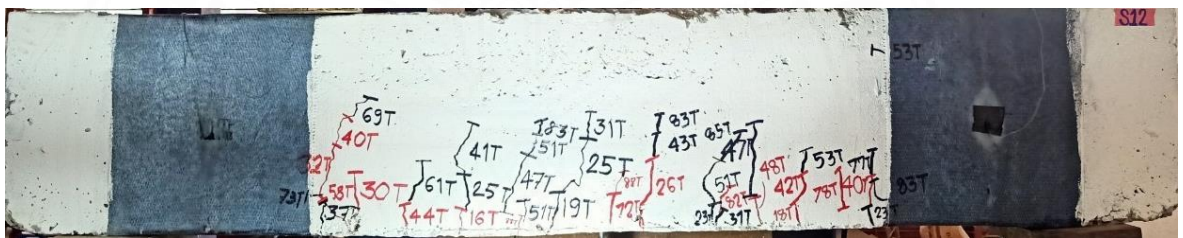
น้ำหนักบรรทุกทุก 60 ตัน



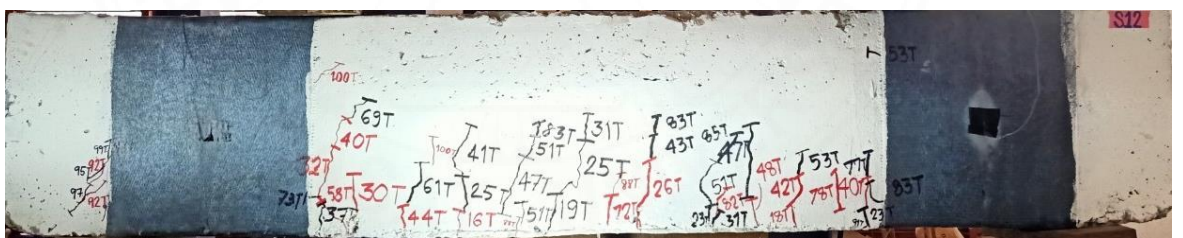
น้ำหนักรรทุก 70 ตัน



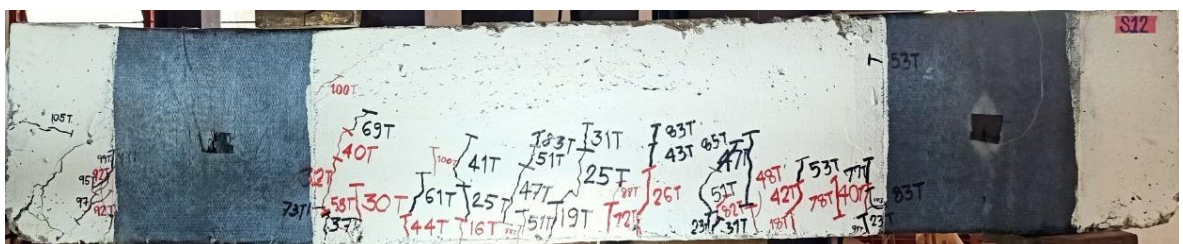
น้ำหนักรรทุก 80 ตัน



น้ำหนักรรทุก 90 ตัน



น้ำหนักรรทุก 100 ตัน

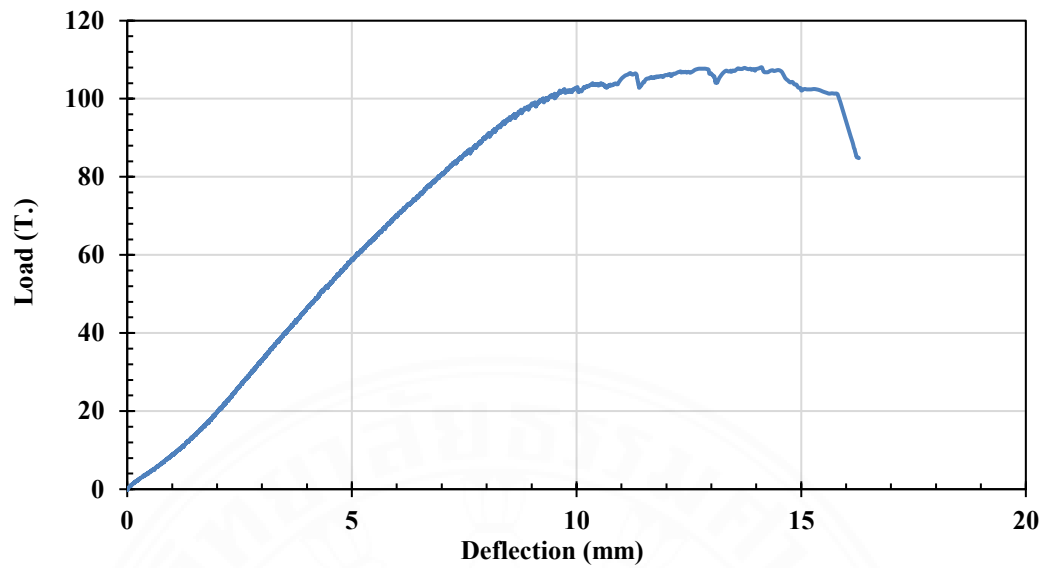


น้ำหนักรรทุกขณะที่วัด

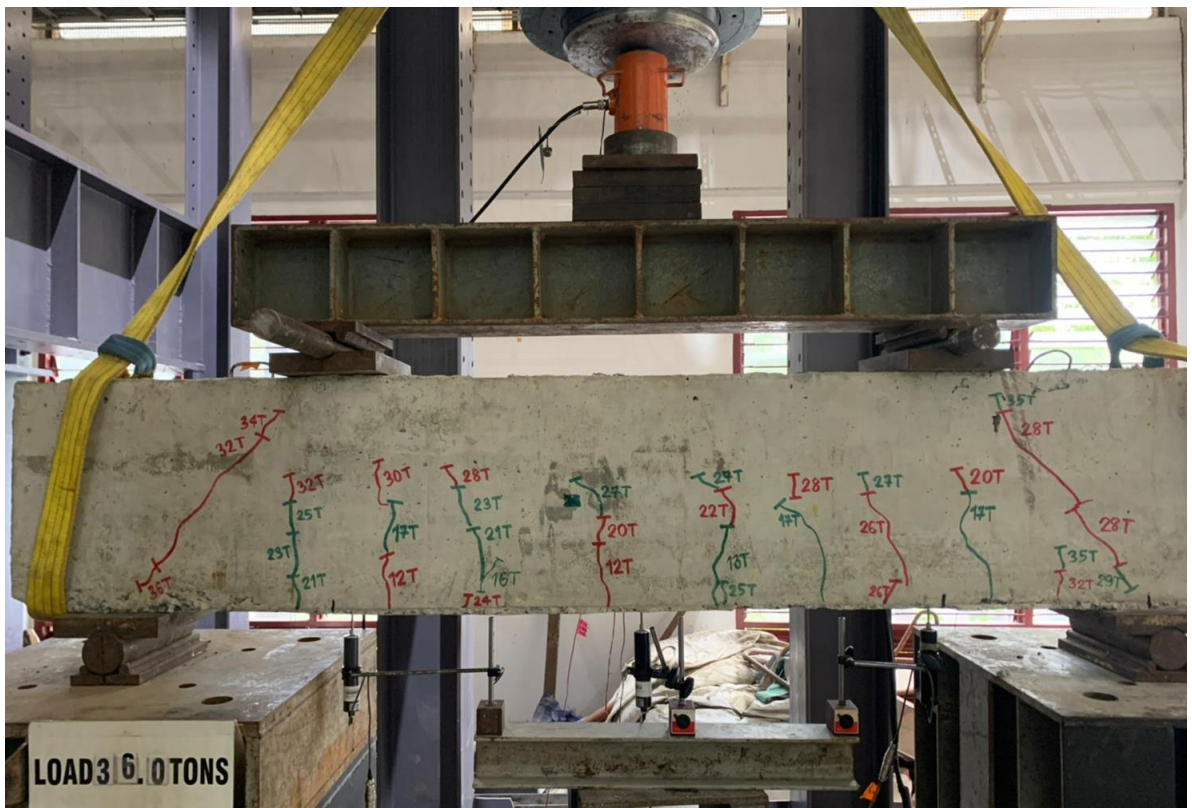
ภาพที่ 4.12 รอยร้าวของคาน B1F ที่น้ำหนักรรทุกต่างๆ

4.2.5 พฤติกรรมของคานที่เกิดรอยร้าวทแยงและเสริมกำลังด้วยด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบ Fully wrap (B1DF)

พฤติกรรมของคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดรอยร้าวทแยงจากการรับน้ำหนักบรรทุกแล้วถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบพันรัดรอบทั้ง 4 ด้าน (Fully wrap) จำนวน 2 ชั้น ก่อนการเสริมกำลัง คานตัวอย่างถูกนำไปรับน้ำหนักบรรทุก โดยปรากฏรอยร้าวแรกที่น้ำหนักเท่ากับ 12 ตัน เป็นรอยร้าวเนื่องจากแรงดัด (Flexural cracking) และแผ่ขยายมากขึ้นเมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกมากขึ้นจนกระทั่งที่ 28 ตัน รอยร้าวทแยงเกิดขึ้นในช่วงเฉือนของคานด้านขวาและขยายไปทางฐานรองรับและตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกกระทำเมื่อน้ำหนักมากขึ้น และเมื่อคานรับน้ำหนักถึง 32 ตัน รอยร้าวทแยงปรากฏขึ้นในช่วงเฉือนทางด้านซ้ายของคานและขยายในลักษณะเดียวกันกับข้างขวา เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 36 ตัน คิดเป็น 38.54% ของคานอ้างอิง BR1 ลักษณะรอยร้าวก่อนการเสริมกำลังแสดงในภาพที่ 4.14 ภายหลังจากการเสริมกำลังแล้วนำคานมาทดสอบพบว่า น้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดรอยร้าวแรกมีค่าน้อยกว่าก่อนการเสริมกำลังคือที่ 9 ตัน เกิดขึ้นในลักษณะเป็นเส้นตรงตั้งฉากกับความยาวคานและแผ่ขยายเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 49 ตัน เกิดรอยร้าวจากขอบคานด้านบนบริเวณจุดที่น้ำหนักกระทำใกล้กับขอบของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ช่วงเฉือนด้านซ้ายของคาน จนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมาถึงช่วง 70 ตัน มีรอยร้าวจำนวนมากเกิดขึ้นบริเวณใกล้ๆขอบของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ช่วงเฉือนของคานทั้งสองข้างในขณะที่รอยร้าวบริเวณช่วงกลางคานก็แผ่ขยายขึ้นมากเช่นกัน เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกถึง 102 ตัน รอยร้าวที่ขอบแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จากขอบบนและขอบล่างคานเริ่มมาบรรจบกัน แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ถูกดันออกจากผิวคานเนื่องจากคอนกรีตบริเวณช่วงเฉือนถูกบดอัดและเมื่อคานรับน้ำหนักถึงน้ำหนักประลัย 108 ตัน เกิดรอยร้าวทแยงจากมุมขอบของคานผ่านช่วงเฉือนไปยังตำแหน่งที่น้ำหนักกระทำ และมีค่าการอ่อนตัวเท่ากับ 16.28 มิลลิเมตร โดยลักษณะการวิบัติและลักษณะของรอยร้าวที่เกิดขึ้นในระยะน้ำหนักบรรทุกต่างๆ จะแสดงในภาพที่ 4.15 และ 14.16



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคาน B1DF



ภาพที่ 4.14 ลักษณะของรอยร้าวของคาน B1DF ก่อนการเสริมกำลัง



(ก.) ด้านหน้าของคาน



(ข.) ด้านหลังของคาน

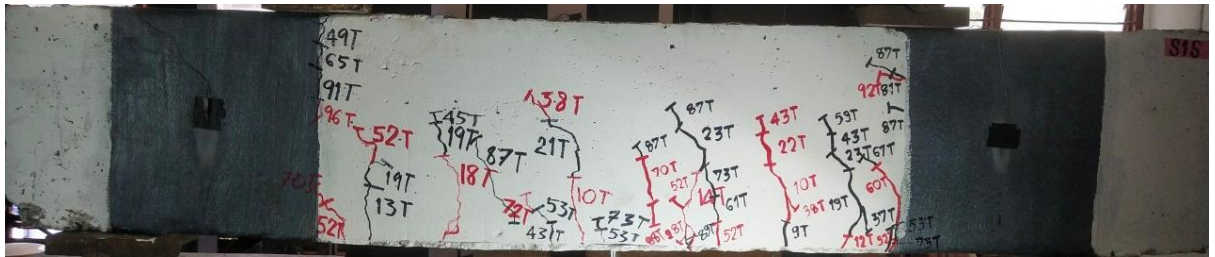
ภาพที่ 4.15 ลักษณะการวิบัติของคาน B1DF



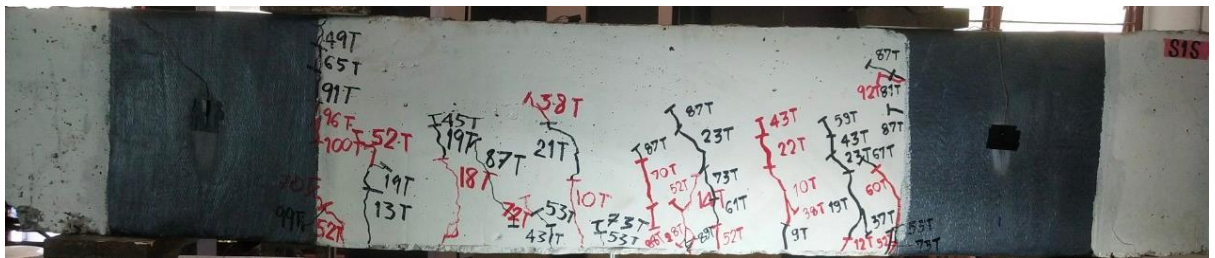
น้ำหนักบรรทุกทุก 10 ตัน



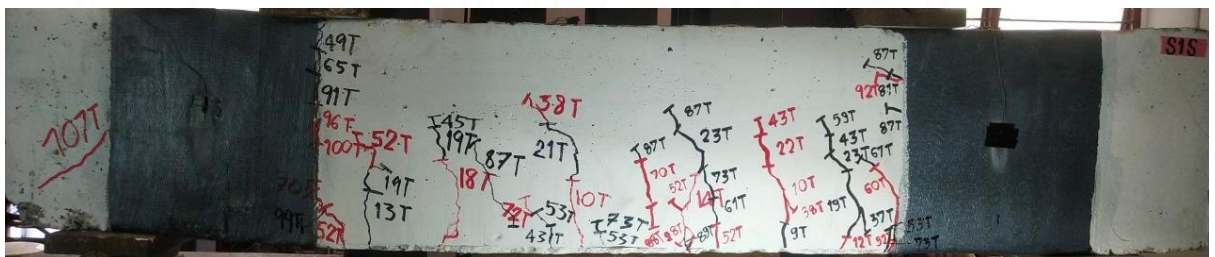
น้ำหนักบรรทุกทุก 20 ตัน



น้ำหนักบรรทุก 95 ตัน



น้ำหนักบรรทุก 102 ตัน



น้ำหนักบรรทุกขณะที่วิบัติ

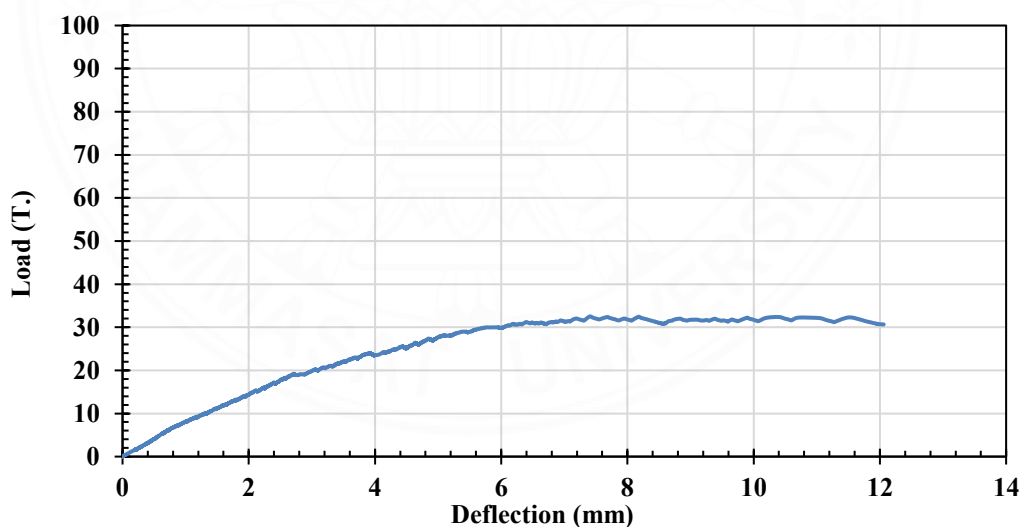
ภาพที่ 4.16 รอยร้าวของคาน B1DF ที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ

4.3 พฤติกรรมภายใต้น้ำหนักบรรทุกของคานที่มีอัตราส่วน

ช่วงการเลื่อนต่อความลึกลับประสิทธิผลเท่ากับ 2.00

4.3.1 พฤติกรรมของคานอ้างอิงที่มีปริมาณเหล็กรับแรงเฉือนน้อยกว่าเหล็กเสริมต่ำสุด (BR2)

พฤติกรรมของคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นคานอ้างอิงที่มีปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนน้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด เกิดรอยร้าวเล็กๆหลายรอยบริเวณช่วงกลางคาน เนื่องจากแรงดัด (Flexural cracking) และรอยร้าวทแยงขนาดใหญ่ (Shear cracking) ที่ช่วงกลางของช่วงเฉือนทั้งสองข้างของคานในขณะที่คานรับน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 24 ตัน และรอยร้าวทแยงนั้นขยายยาวไปที่ฐานรองรับและตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกกระทำเมื่อคานมีการรับน้ำหนักมากขึ้น เมื่อน้ำหนักบรรทุกถึง 32 ตัน ความกว้างของรอยร้าวขยายมากขึ้นจนกระทั่งวิบัติในลักษณะที่คอนกรีตบริเวณที่ช่วงเฉือนถูกบดอัดในแนวทแยง (Shear compression failure) เป็นเส้นตรงและคานเกิดการทรุดตัว ดังแสดงในภาพที่ 4.18 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการแอ่นตัว ดังแสดงในภาพที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าคานเกิดการแอ่นตัวอย่างรวดเร็วหลังจากที่รอยร้าวแรกปรากฏ และมีค่าการแอ่นตัวสูงสุดเมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 12.06 มิลลิเมตร



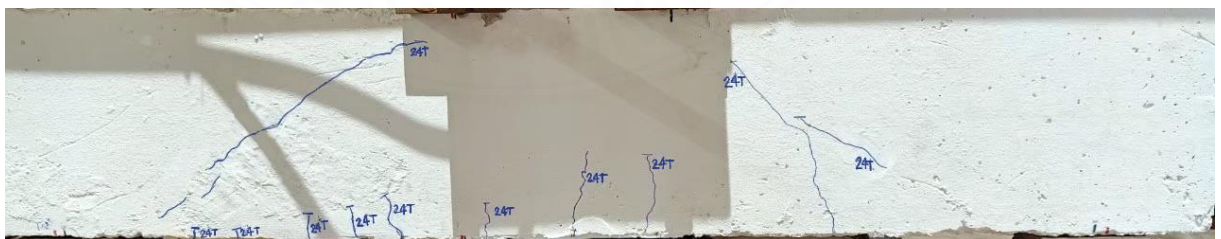
ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคาน BR2



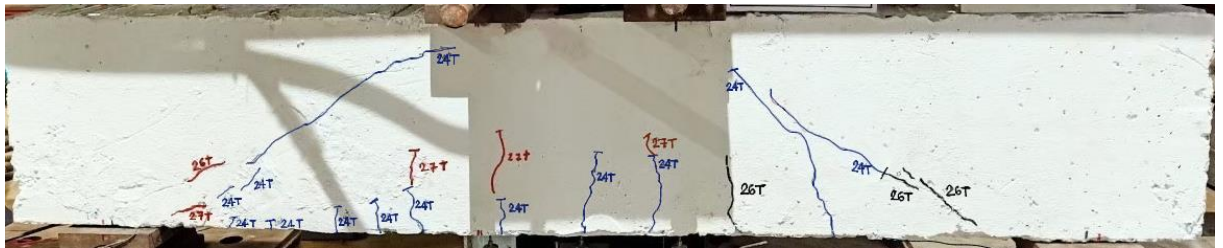
ภาพที่ 4.18 ลักษณะการวิบัติของคาน BR2



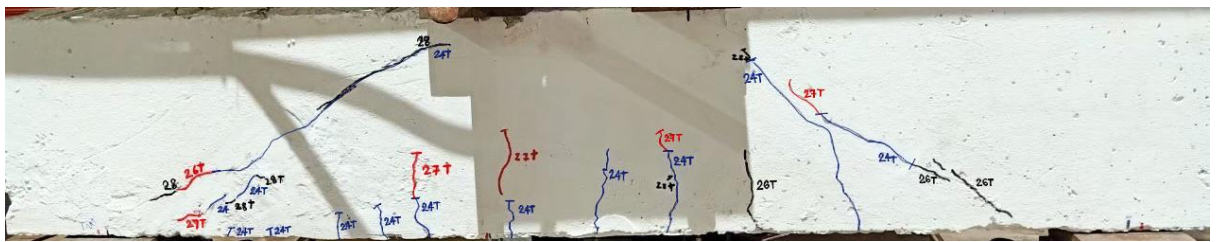
น้ำหนักบรรทุกทุก 10 ตัน



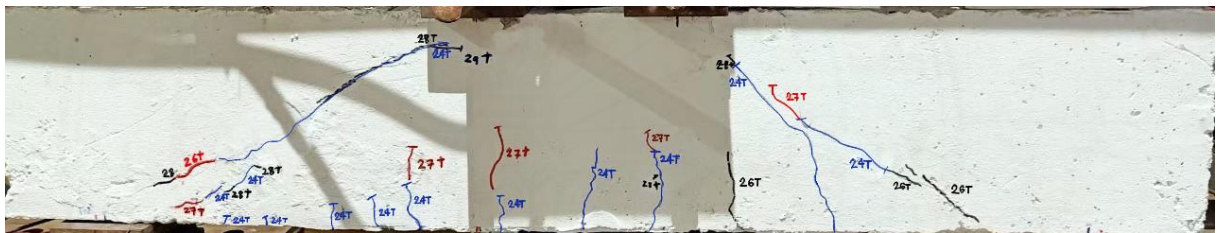
น้ำหนักบรรทุกทุก 24 ตัน



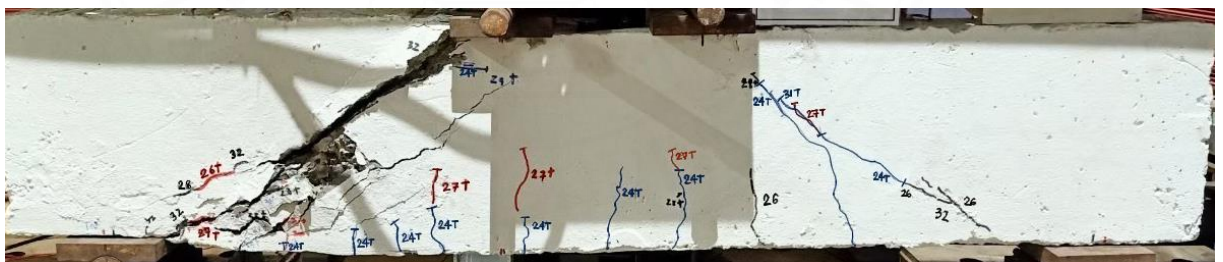
น้ำหนักบรรทุก 27 ตัน



น้ำหนักบรรทุก 28 ตัน



น้ำหนักบรรทุก 29 ตัน

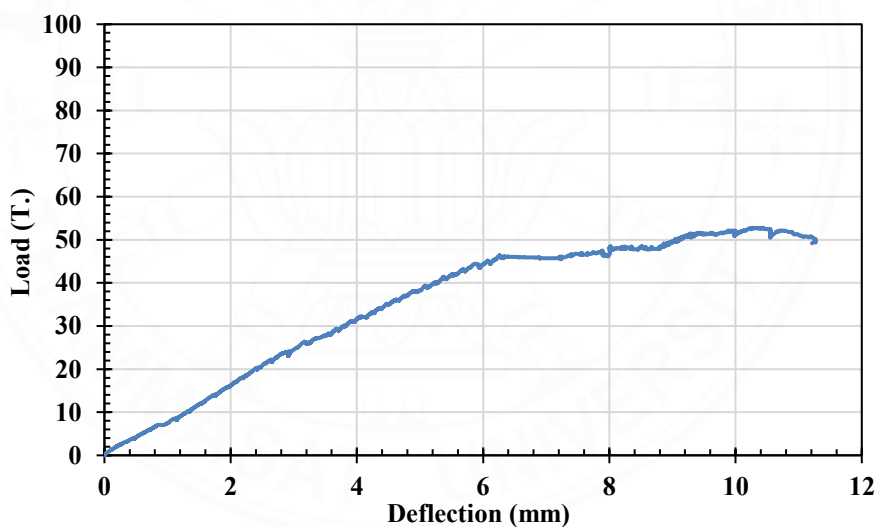


น้ำหนักบรรทุกขณะที่วิบัติ

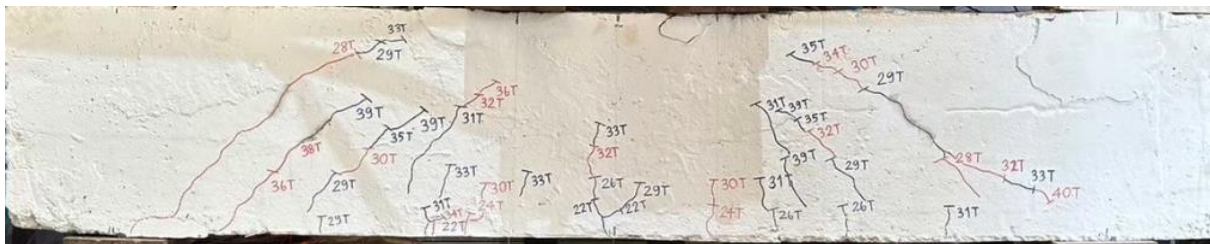
ภาพที่ 4.19 รอยร้าวของคาน BR2 ที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ

4.3.2 พฤติกรรมของคานที่มีปริมาณเหล็กรับแรงเฉือนเพียงพอเท่าเหล็กเสริมต่ำสุด (BM2)

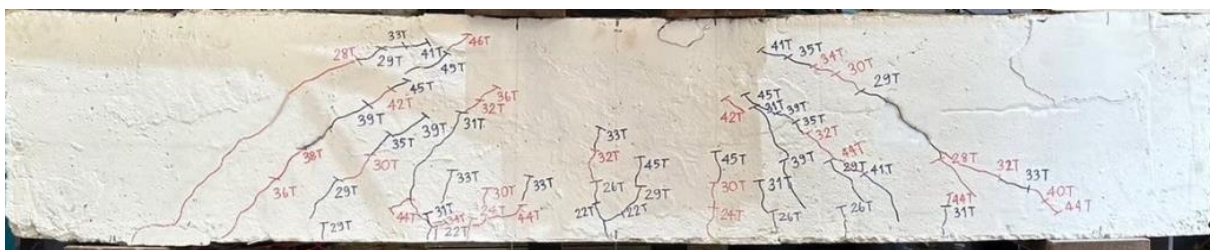
พฤติกรรมคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนในแนวตั้งและแนวนอนเพียงพอเท่ากับปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด ที่น้ำหนักบรรทุก 22 ตัน คานเกิดรอยร้าวจากแรงดัดที่กึ่งกลางคานและปรากฏรอยใหม่ขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งคานรับน้ำหนักถึง 28 ตัน คานเกิดรอยร้าวทแยงจากฐานรองรับไปยังจุดที่น้ำหนักกระทำและรอยร้าวขยายยาวขึ้น เมื่อน้ำหนักบรรทุกมากขึ้น รอยร้าวทแยงในช่วงเฉือนทั้งข้างซ้ายและขวาของคาน และรอยร้าวบริเวณกลางคานพัฒนายาวไกลขึ้นโดยมีแนวโน้มไปยังจุดที่น้ำหนักกระทำ ดังแสดงในภาพที่ 4.22 เมื่อน้ำหนักบรรทุกมาถึงที่ 51 ตัน รอยร้าวทแยงมีความกว้างมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งวิบัติเนื่องจาก Shear compression failure ข้างขวาของคานที่น้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 52.8 ตัน ดังแสดงในภาพที่ 4.21 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการแอ่นตัว ดังแสดงในภาพที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น คานเกิดการแอ่นตัวอย่างรวดเร็วเมื่อคานมีน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 46 ตัน และมีค่าการแอ่นตัวที่น้ำหนักบรรทุกประลัยเท่ากับ 11.27 มิลลิเมตร



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคาน BM2



น้ำหนักรวมทุก 40 ต้น



น้ำหนักรวมทุก 46 ต้น



น้ำหนักรวมทุก 50 ต้น

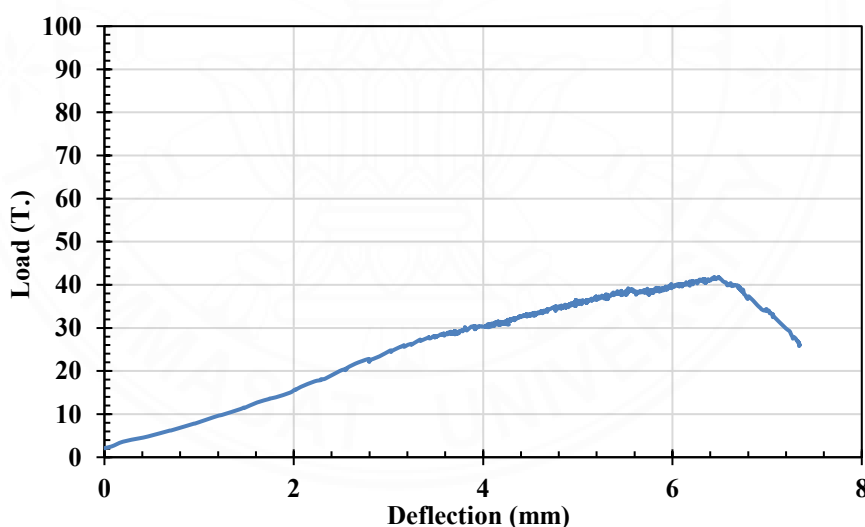


น้ำหนักรวมทุกขณะที่วิบัติ

ภาพที่ 4.22 รอยร้าวของคาน BM2 ที่น้ำหนักรวมทุกต่างๆ

4.3.3 พฤติกรรมของคานที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบ U-wrap (B2U)

พฤติกรรมคานลึกลูกคองกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์โดยพันรอบ 3 ด้าน (U-wrap) จำนวน 2 ชั้น เนื่องจากช่วงเฉือนทั้งสองข้างมีความกว้างมากและถูกปิดทับด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นรอยร้าวอื่นๆที่เกิดขึ้นในบริเวณช่วงเฉือนได้ เมื่อคานมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกถึง 22 ตัน รอยร้าวเนื่องจากแรงดัดปรากฏขึ้นในบริเวณกึ่งกลางคานและขยายเพิ่มขึ้นในแนวตั้งเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อน้ำหนักกระทำที่ 32 ตัน เกิดรอยร้าวที่มีความยาวมาที่บริเวณขอบของคาร์บอนไฟเบอร์และเมื่อน้ำหนักบรรทุกถึง 38 ตัน แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์บริเวณขอบบนใกล้กับขอบของจุดที่น้ำหนักกระทำเริ่มปริออกเล็กน้อยและปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.25 และวิบัติโดยการหลุดลอกออกของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP Debonding) ที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 41.8 ตัน มีค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 7.35 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.25 และภายใต้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่หลุดออกมาแสดงให้เห็นถึงรอยร้าวทแยงเป็นเส้นตรงจากฐานรองรับไปจนถึงจุดที่น้ำหนักกระทำ



ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคาน B2U



(ก.) ด้านหน้าของคาน

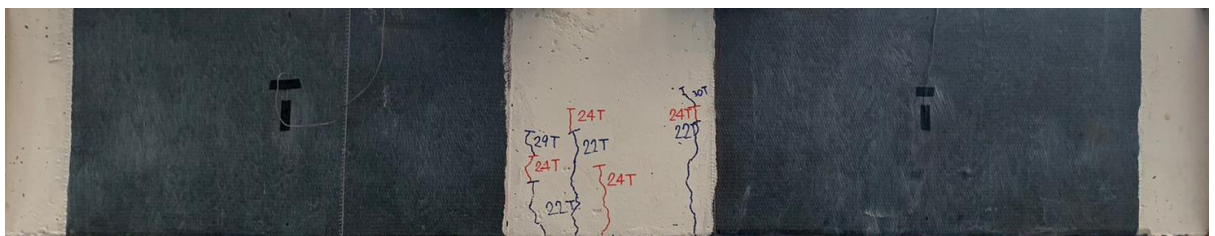


(ข.) ด้านหลังของคาน

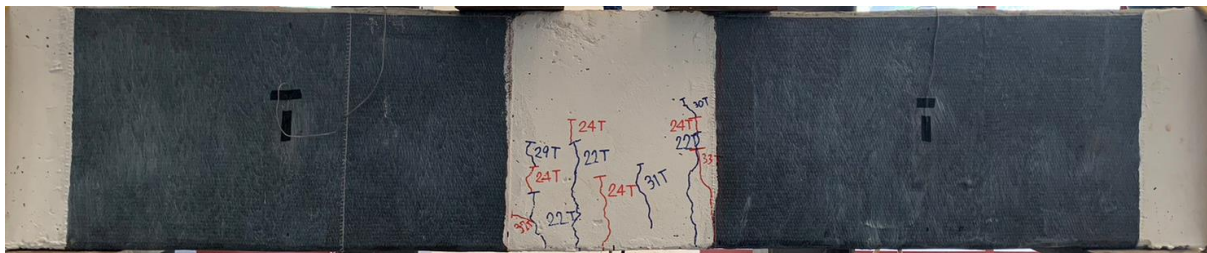
ภาพที่ 4.24 ลักษณะการวิบัติของคาน B2U



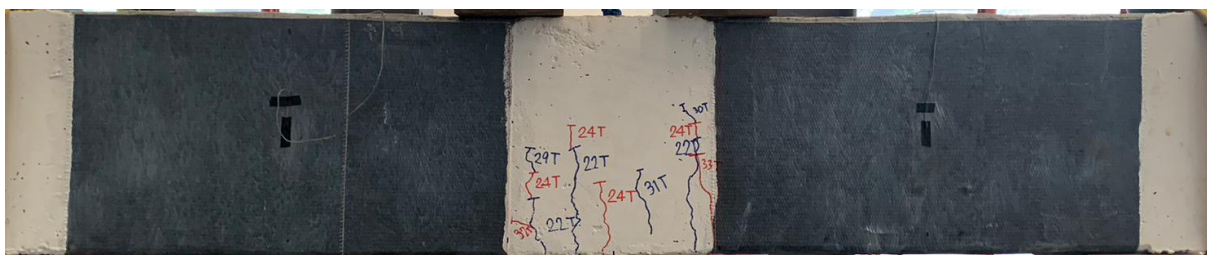
น้ำหนักบรรทุก 22 ตัน



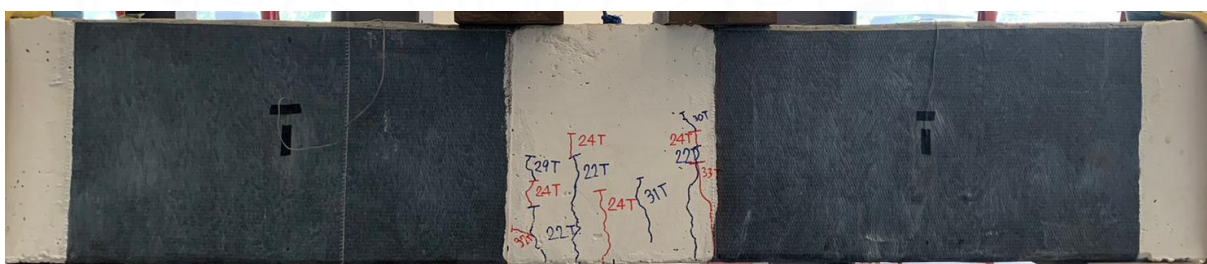
น้ำหนักบรรทุก 30 ตัน



น้ำหนักรรทุก 35 ตัน



น้ำหนักรรทุก 38 ตัน



น้ำหนักรรทุก 41 ตัน

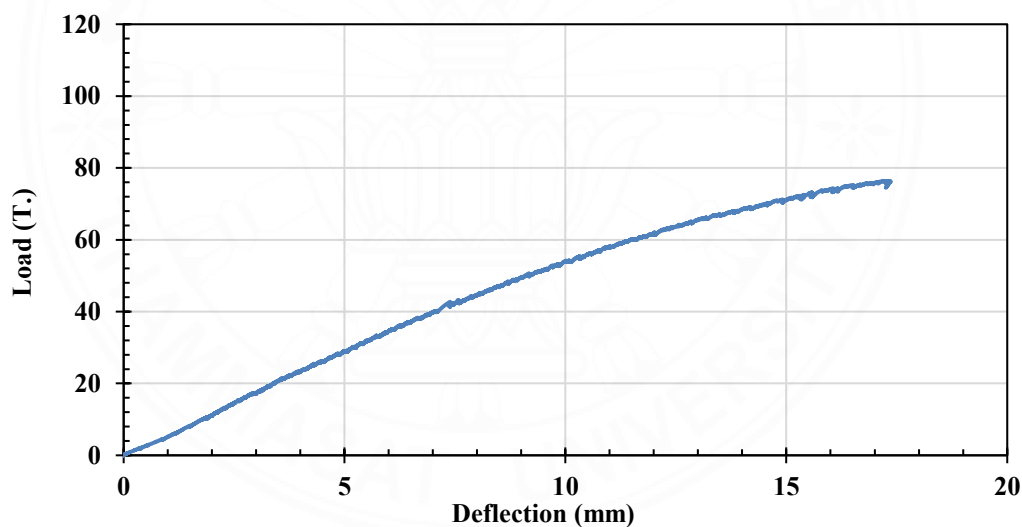


น้ำหนักรรทุกขณะที่วิบัติ

ภาพที่ 4.25 รอยร้าวของคาน B2U ที่น้ำหนักรรทุกต่างๆ

4.3.4 พฤติกรรมของคานที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบ Fully wrap (B2F)

พฤติกรรมคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบพันรอบ 4 ด้าน (Fully wrap) จำนวน 2 ชั้น รอยร้าวแรกปรากฏที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 10 ตัน ที่ช่วงกึ่งกลางคานและรอยร้าวจะขยายขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 22 ตัน เริ่มเกิดรอยร้าวที่ขอบของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ข้างซ้ายของคาน และที่ 23 ตัน เกิดรอยร้าวที่ขอบแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่ด้านขวาเช่นเดียวกัน รอยร้าวต่างๆขยายมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่ง 45 ตัน และไม่สามารถสังเกตเห็นรอยร้าวได้อีกจนกระทั่งน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 54 ตัน รอยร้าวปรากฏจากขอบบนของคานบริเวณจุดที่น้ำหนักกระทำลงมาที่ตัวคานและขยายยาวขึ้นเรื่อย ๆ จนมาบรรจบกันเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.28 รอยร้าวบริเวณจุดที่น้ำหนักกระทำมีความกว้างมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งวิบัติเนื่องจาก Flexural compression failure ที่น้ำหนักประลัยเท่ากับ 76.4 ตัน มีค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 17.36 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.27



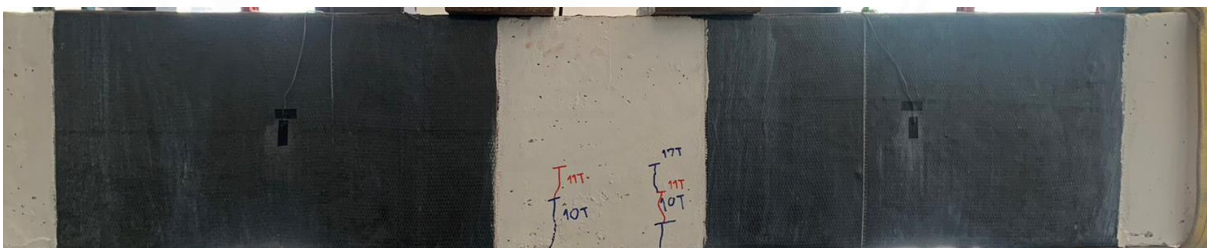
ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคาน B2F



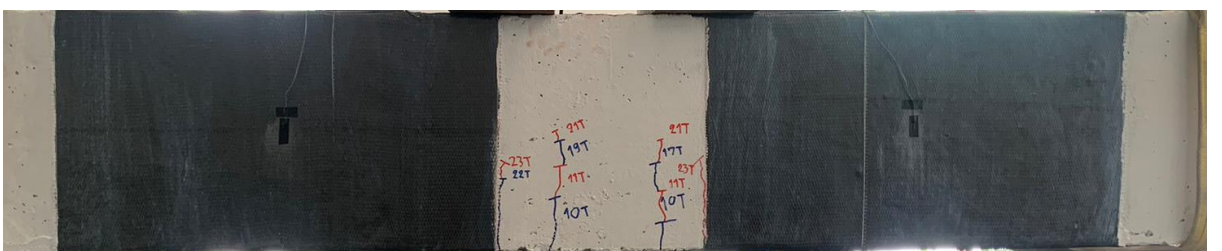
ภาพที่ 4.27 ลักษณะการวิบัติของคาน B2F



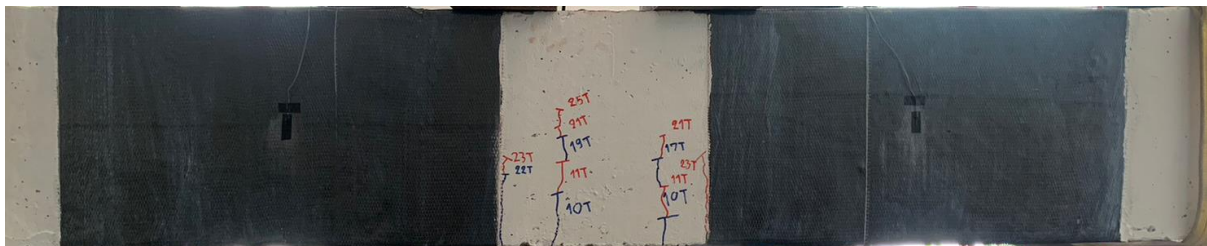
น้ำหนักบรรทุกทุก 10 ตัน



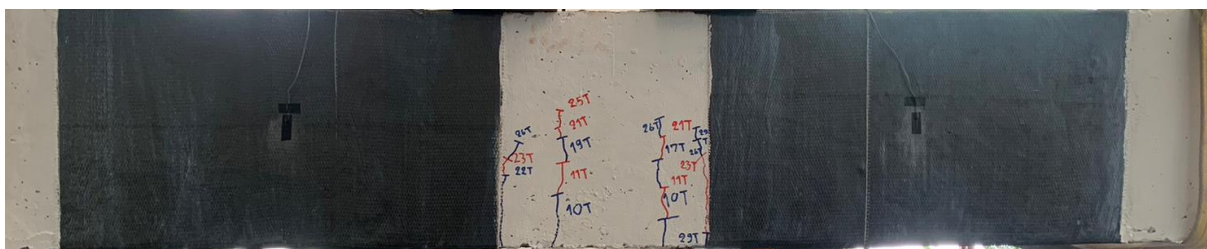
น้ำหนักบรรทุกทุก 17 ตัน



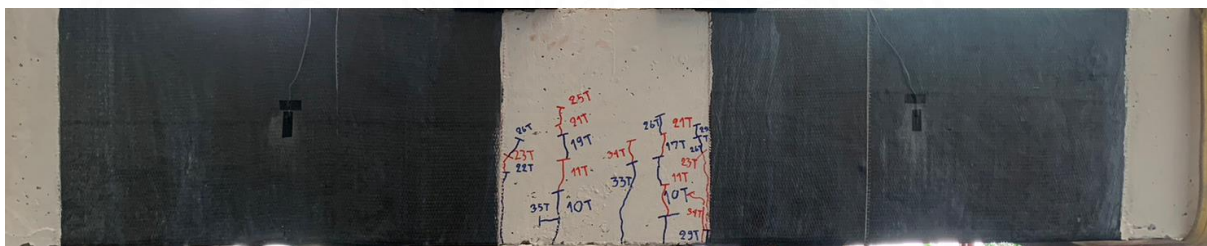
น้ำหนักบรรทุกทุก 23 ตัน



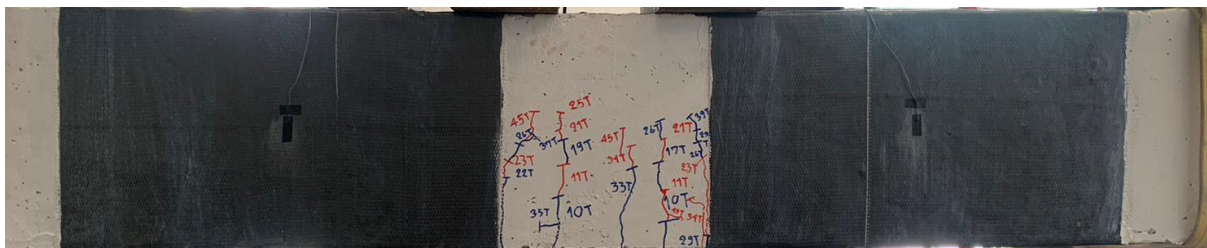
หน้านักบรรทุก 25 ต้น



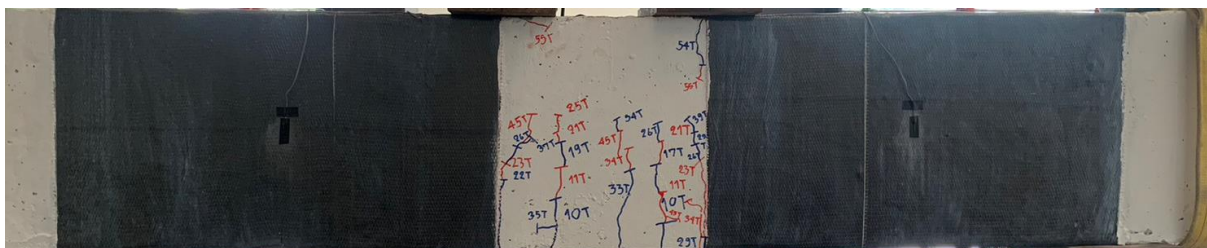
หน้านักบรรทุก 29 ต้น



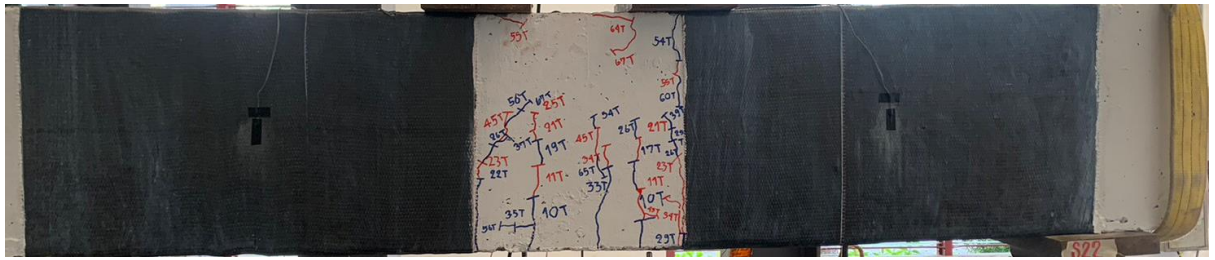
หน้านักบรรทุก 35 ต้น



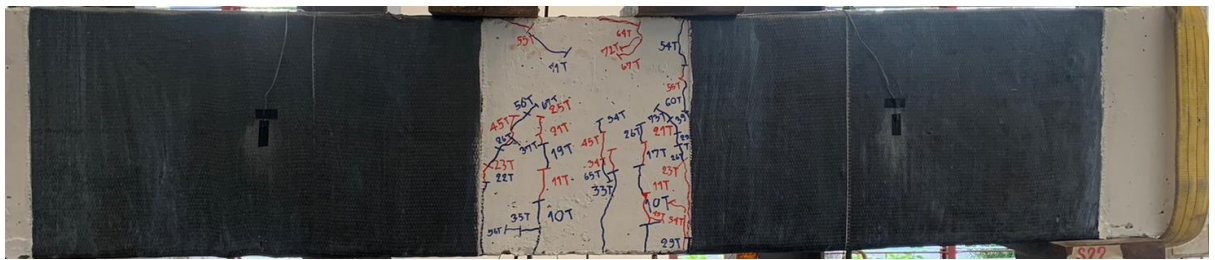
หน้านักบรรทุก 45 ต้น



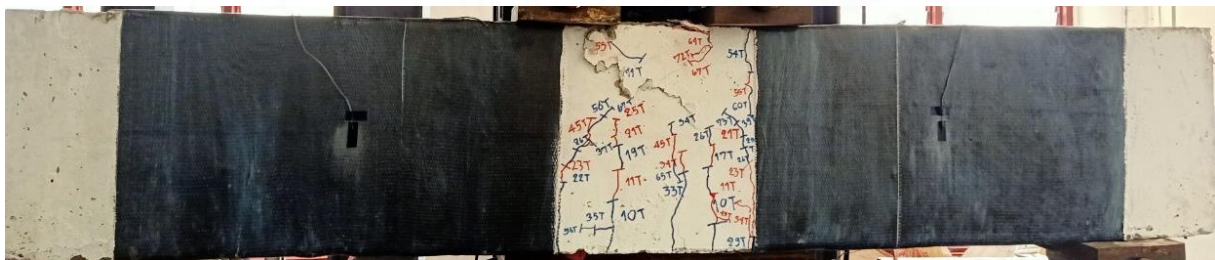
หน้านักบรรทุก 55 ต้น



น้ำหนักรรทุก 68 ตัน



น้ำหนักรรทุก 75 ตัน

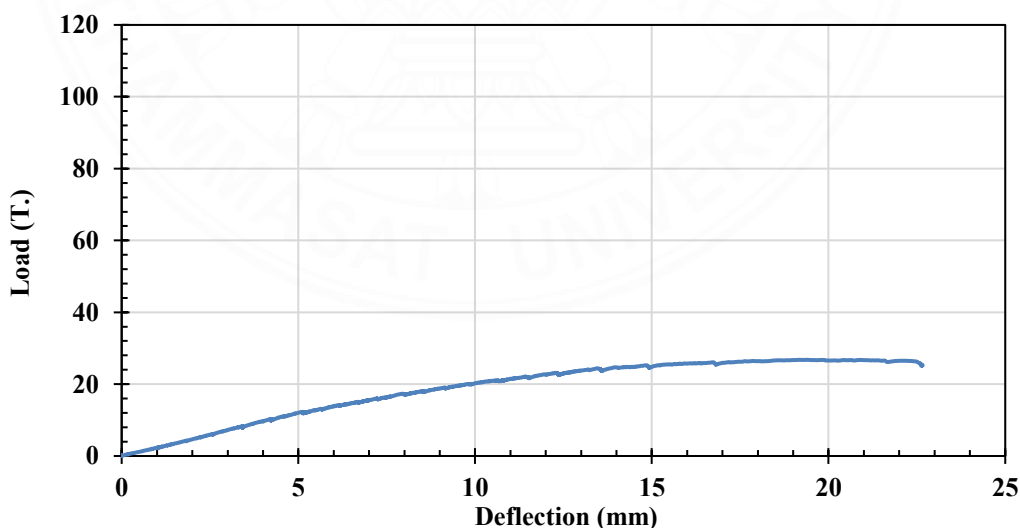


น้ำหนักรรทุกขณะที่วิบัติ

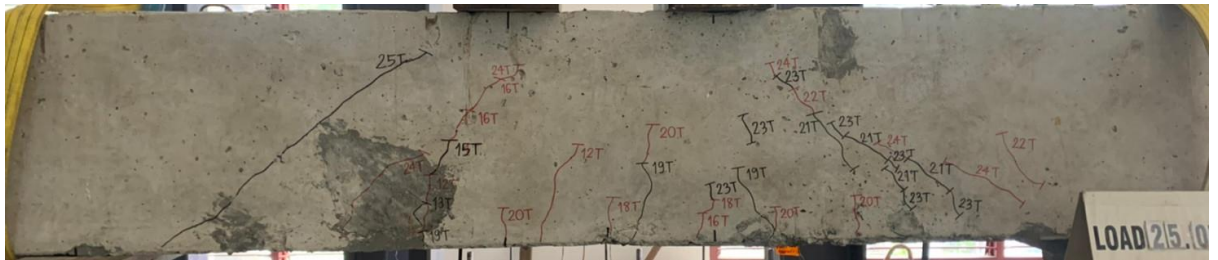
ภาพที่ 4.28 รอยร้าวของคาน B2F ที่น้ำหนักรรทุกต่างๆ

4.3.5 พฤติกรรมของคานที่เกิดรอยร้าวทแยงและเสริมกำลังด้วยด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบ Fully wrap (B2DF)

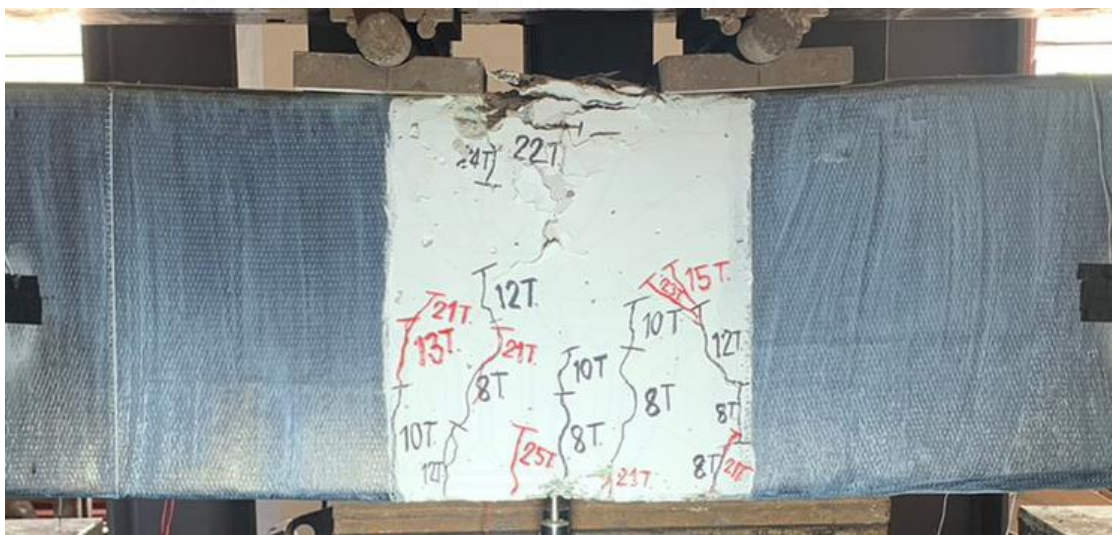
พฤติกรรมคานลึกลับคานกริตเสริมเหล็กที่เกิดรอยร้าวทแยงเนื่องจากรับน้ำหนักบรรทุกและถูกเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์โดยพันรัดรอบ 4 ด้าน (Fully wrap) จำนวน 2 ชั้น ก่อนการเสริมกำลังเมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกกระทำถึง 12 ตัน รอยร้าวจากแรงเฉือนปรากฏที่บริเวณกึ่งกลางคาน เมื่อน้ำหนักเพิ่มขึ้น รอยร้าวใหม่ก็ค่อยๆ เพิ่มขึ้น (Flexural shear cracking) และพัฒนายาวขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่ง 21 ตัน รอยร้าวทแยงเกิดขึ้นที่ช่วงเฉือนบริเวณเอวของคาน (Web shear) และรอยร้าวนั้นขยายยาวไปที่ฐานรองรับและจำที่น้ำหนักกระทำ เมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 25 ตัน ดังแสดงในภาพที่ 4.30 หลังจากนั้นได้ทำการเสริมกำลังคานและนำมาทดสอบอีกครั้งพบว่า รอยร้าวแรกเกิดขึ้นเมื่อน้ำหนักเท่ากับ 8 ตัน และขยายยาวขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งน้ำหนักกระทำเท่ากับ 22 ตัน เกิดรอยร้าวบริเวณจุดที่น้ำหนักกระทำและรอยร้าวที่ขยายกว้างขึ้นยาวลงมาในช่วงตัวคาน และเมื่อคานมีน้ำหนักกระทำที่ 25 ตัน คอนกรีตบริเวณจุดที่น้ำหนักกระทำเกิดการบดอัด (Concrete crushing) ดังแสดงในภาพที่ 4.32 และวิบัติเมื่อน้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 26.76 ตัน ในลักษณะ Flexural compression failure ดังแสดงในภาพที่ 4.31 จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการแอ่นตัว ดังแสดงในภาพที่ 4.29 แสดงให้เห็นว่าคานเกิดการแอ่นตัวอย่างรวดเร็วและเมื่อคานเกิดการวิบัติ คานมีค่าการแอ่นตัวเท่ากับ 22.66 มิลลิเมตร



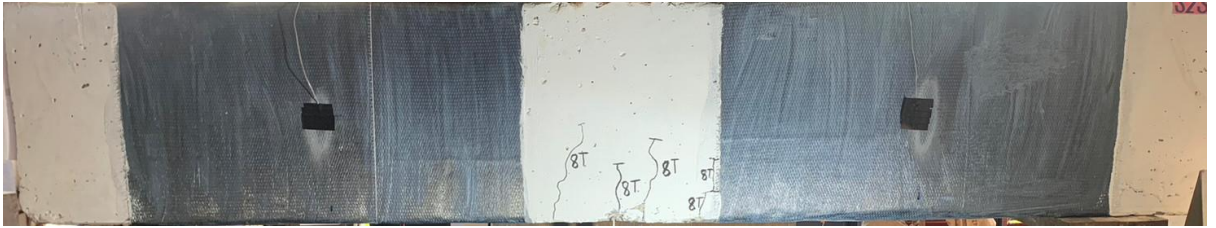
ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคาน B2DF



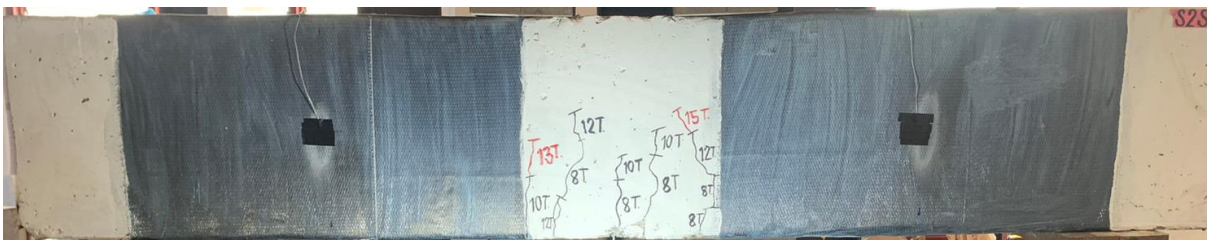
ภาพที่ 4.30 ลักษณะรอยร้าวของคาน B2DF ก่อนการเสริมกำลัง



ภาพที่ 4.31 ลักษณะการวิบัติของคาน B2DF



น้ำหนักบรรทุก 8 ตัน



น้ำหนักบรรทุก 15 ตัน



น้ำหนักบรรทุก 21 ตัน



น้ำหนักบรรทุก 22 ตัน



น้ำหนักบรรทุก 24 ตัน



น้ำหนักบรรทุก 25 ตัน



น้ำหนักบรรทุก 26 ตัน

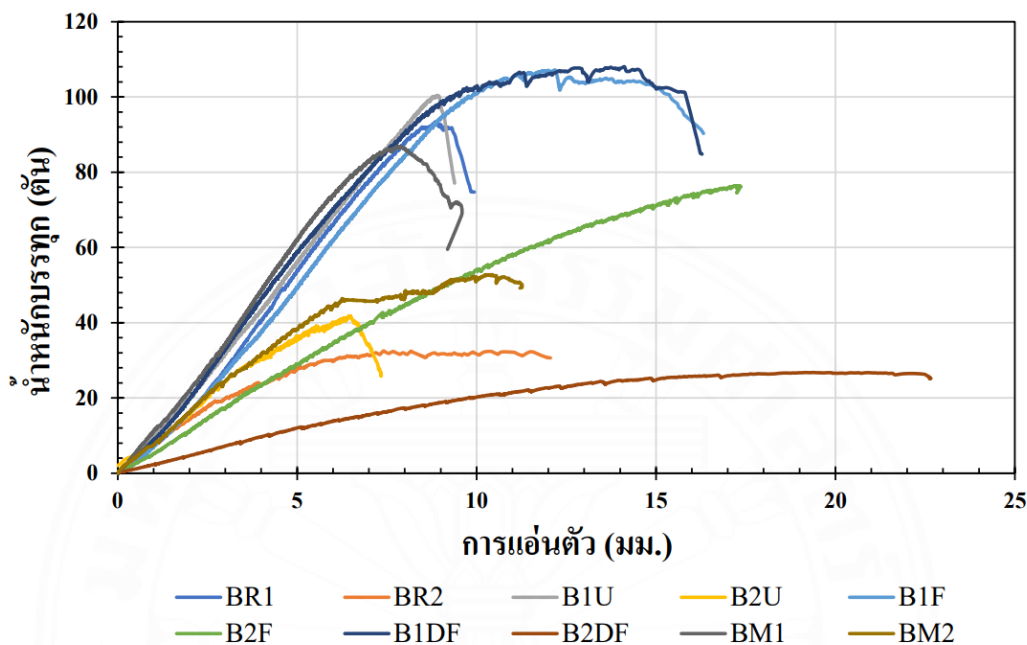


น้ำหนักบรรทุกขณะที่วิบัติ

ภาพที่ 4.32 รอยร้าวของคาน B2DF ที่น้ำหนักบรรทุกต่างๆ

4.4 วิเคราะห์และวิจารณ์ผลการทดสอบ

4.4.1 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Ultimate strength)

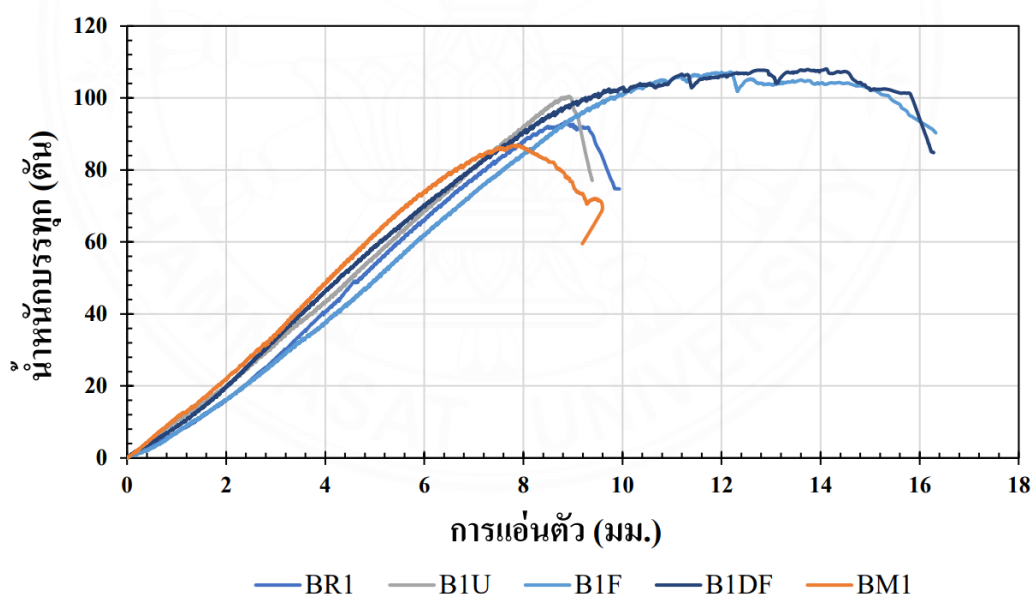


ภาพที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน

จากภาพที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานแสดงให้เห็นว่าคานกลุ่มที่ 1 มีค่าอัตราส่วน a/d ratio เท่ากับ 1.00 นั้นมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยมากกว่าคานกลุ่มที่ 2 ที่มีค่าอัตราส่วน a/d ratio เท่ากับ 2.00 ทั้งที่เป็นคานอ้างอิงและคานที่เสริมกำลัง เนื่องจากคานที่มีอัตราส่วน a/d ratio น้อยๆจะมีพฤติกรรมเป็นคานลึกลงมากกว่าและมีกำลังรับแรงเฉือนที่เป็นสาเหตุหลักของการวิบัติได้มากกว่าคานที่มีค่าอัตราส่วน a/d ratio ที่มากกว่า กราฟเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย แสดงในภาพที่ ค.24 แต่ในทางกลับกันแม้คานที่มีอัตราส่วน a/d ratio น้อยๆ ก็จะมีความสามารถในการเสียรูปน้อยลงไปด้วย กราฟเปรียบเทียบการเสียรูป แสดงในภาพที่ ค.25 กล่าวคือคานที่มีพฤติกรรมเป็นคานลึกลงจะสามารถรับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้มากแต่จะมีการเสียรูปได้น้อยดังนั้นเมื่อเกิดการวิบัติจะเป็นการวิบัติแบบฉับพลันไม่มีการเตือน หรือที่เรียกว่าการวิบัติแบบเปราะ (Brittle failure)

4.4.1.1 คานที่มีอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกเท่ากับ 1.00

จากการสรุปผลการทดลองคานกลุ่มที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าคานที่เสริมกำลัง B1U และ B1F สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้ 7.49% และ 14.78% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคานอ้างอิง (BR1) ซึ่งสังเกตเห็นว่าการเสริมกำลังแบบ Fully wrap มีความสามารถในการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยมากกว่าแบบ U-wrap และคานที่ถูกเสริมกำลังหลังเกิดรอยร้าวด้วย CFRP แบบ Fully wrap (B1DF) ก็สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้ถึง 15.63 % เมื่อเทียบกับคาน BR1 ในส่วนของคาน BM1 ที่มีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนแนวตั้งและแนวนอนในปริมาณเท่ากับปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด พบว่ามีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยต่ำกว่าคาน BR1 อยู่ 7.6% แต่เมื่อสังเกตจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคานกลุ่มที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 4.34 จะพบว่าคาน BM1 มีความชันมากกว่าคาน BR1 ซึ่งหมายความว่ามีความแข็งแรง (Stiffness) มากกว่า จึงสามารถสรุปได้ว่าในคานที่มีอัตราส่วน a/d ratio เท่ากับ 1.00 มีความแตกต่างของการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดกับการเสริมในปริมาณที่น้อยกว่านั้นไม่มากนัก เนื่องจากกลไกการรับแรงเฉือนส่วนใหญ่มาจากกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต



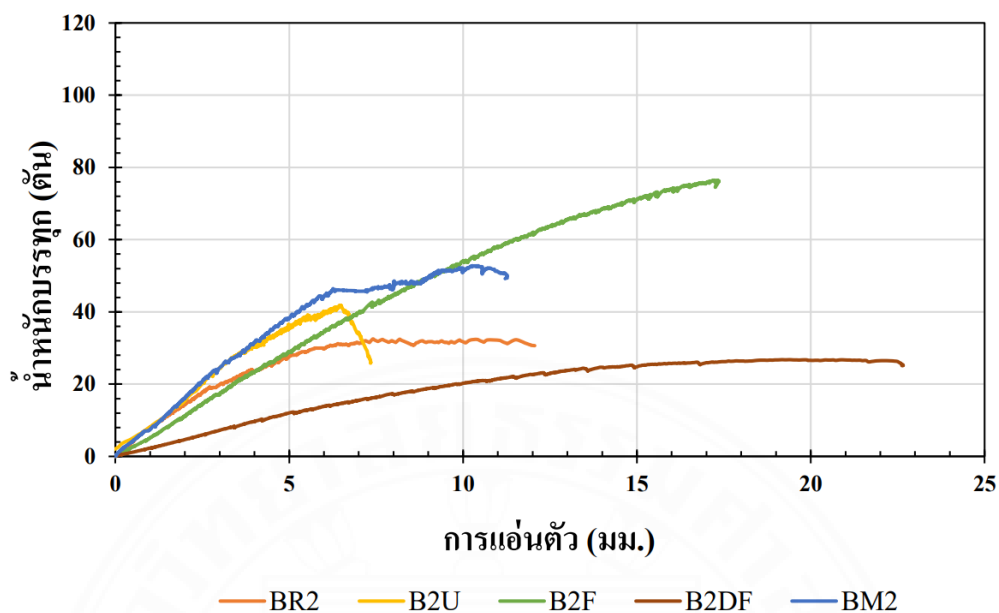
ภาพที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคานกลุ่มที่ 1 (B1)

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบของคานกลุ่มที่ 1

กลุ่ม	ชื่อคาน ตัวอย่าง	น้ำหนักประลัย (ตัน)	การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักประลัย (%)	การแอ่นตัว (มม.)	การวิบัติ
1	BR1	93.4	-	9.94	Shear compression
	BM1	86.8	- 7.6	9.6	Shear compression
	B1U	100.4	7.49	9.39	CFRP Debonding
	B1F	107.2	14.78	16.33	Shear compression
	B1DF	108	15.63	16.28	CFRP Spitting

4.4.1.2 คานที่มีอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกเท่ากับ 2.00

จากการสรุปผลการทดสอบคานกลุ่มที่ 2 ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า คานที่เสริมกำลัง B2U และแบบ B2F สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้ 28.69 % และ 135.22 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคานอ้างอิง (BR2) ซึ่งสังเกตเห็นว่าการเสริมกำลังแบบ Fully wrap มีความสามารถในการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้มากกว่าแบบ U-wrap คาน BM2 ที่มีปริมาณเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเท่ากับปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด มีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยเพิ่มขึ้น 62.52 % เมื่อเทียบกับคาน BR2 ในขณะที่คานที่ถูกเสริมกำลังหลังเกิดรอยร้าวด้วย CFRP แบบ Fully wrap (B2DF) พบว่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยลดลงไป 17.61 % แต่มีค่าการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นจาก 12.06 มิลลิเมตร เป็น 22.66 มิลลิเมตร เนื่องจากการที่คานมีค่าอัตราส่วน a/d ratio เท่ากับ 2.00 นั้นถูกนำมารับน้ำหนักบรรทุกจนเกิดรอยร้าวทแยงจะมีค่าการแอ่นตัวมากเนื่องจากผลของแรงดัดค่อนข้างมากและถึงแม้จะถูกนำมาเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบพันรัดรอบ 4 ด้าน (Fully wrap) แล้ว ก็ไม่ได้มีผลต่อการเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกแต่เหมือนเป็นการช่วยพยุงไม่ให้คานแตกหักเนื่องจากรอยร้าวเฉือนเท่านั้น ซึ่งจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน ในภาพที่ 4.35 พบว่าคาน B2DF เกิดการแอ่นตัวอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานของคานกลุ่มที่ 2 (B2)

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองของคานกลุ่มที่ 2

กลุ่ม	ชื่อคานตัวอย่าง	น้ำหนักประลัย (ตัน)	การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักประลัย (%)	การแอ่นตัว (มม.)	การวิบัติ
2	BR2	32.48	-	12.06	Shear compression
	BM2	52.8	62.56	11.27	Shear compression
	B2U	41.8	28.69	7.35	CFRP Debonding
	B2F	76.4	135.22	17.36	Flexural compression
	B2DF	26.76	- 17.61	22.66	Flexural compression



4.4.2 กลไกการวิบัติ (Failure mechanism)

4.4.2.1 คานที่มีอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกเท่ากับ 1.00

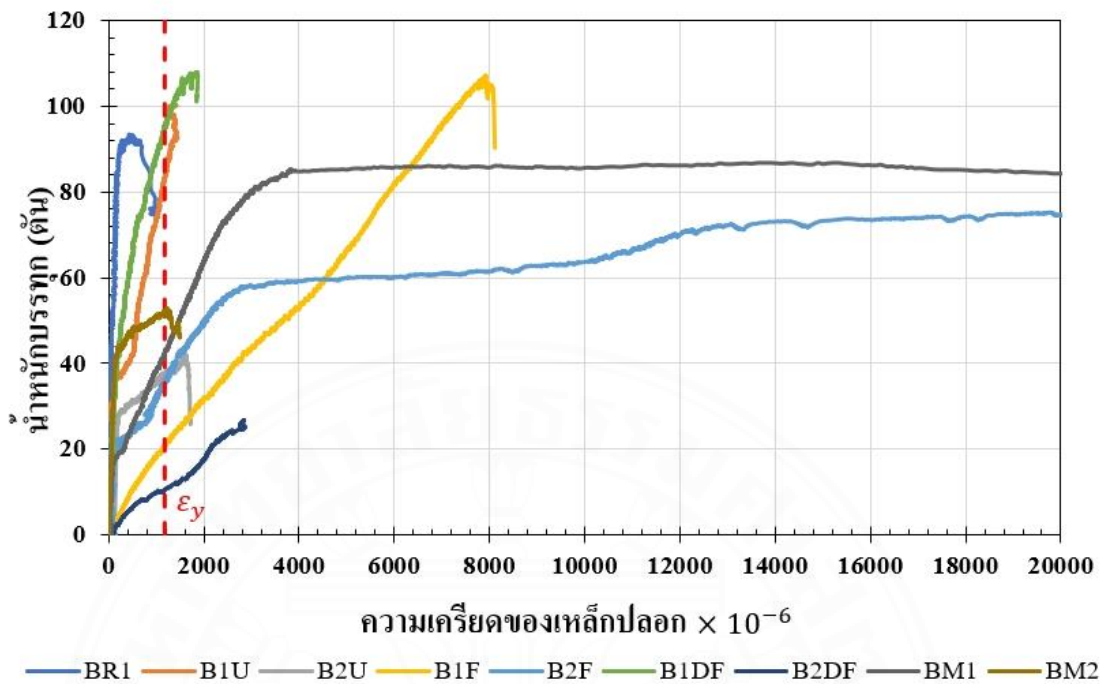
คานทดสอบกลุ่มที่ 1 ที่มีค่าอัตราส่วน a/d ratio เท่ากับ 1.00 พบว่าคานทั้งหมดวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน (Shear failure) ในลักษณะที่เกิดรอยร้าวทแยงจากตำแหน่งฐานรองรับไปยังตำแหน่งที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ แม้ในคานที่มีการเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ตลอดช่วงเฉือนจะไม่สามารถสังเกตเห็นรอยร้าวทแยงได้ชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 4.36 กลไกการวิบัติของคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กเริ่มจากการเกิดรอยร้าวบริเวณกึ่งกลางคานในลักษณะตั้งฉากกับความยาวคานเนื่องจากแรงดัด (Flexural cracking) เมื่อแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดเกิดเป็นแรงดึงทแยง (Diagonal tension) มีค่าเกินกำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต รอยร้าวทแยงจะปรากฏ เมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้น รอยร้าวเนื่องจากแรงดัดจะพัฒนาเป็นรอยร้าวเนื่องจากแรงเฉือนและแรงดัด (Flexural shear cracking) และรอยร้าวทแยงจะขยายไปยังฐานรองรับและจุดที่น้ำหนักกระทำและแรงอัดในท่อนรับแรงอัด (Compression strut) มีความกว้างเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งวิบัติ ในคานที่มีการเสริมกำลังพบว่ารอยร้าวแรกที่ปรากฏขึ้นมีสาเหตุมาจากแรงดัดและถูกพัฒนาเป็นรอยร้าวเนื่องจากแรงดัดและแรงเฉือนในช่วงบริเวณกลางคานนอกเหนือจากช่วงการเฉือนทั้งสองข้าง เมื่อรอยร้าวทแยงที่เกิดในช่วงเฉือนภายใต้แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เริ่มขยายตัวเพิ่มขึ้น แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะเริ่มปริแยกออกจากผิวของคอนกรีตและเกิดการวิบัติเนื่องจากการหลุดล่อนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ในคาน B1U ในส่วนของคาน B1F เนื่องจากการเสริมกำลังโดยการพันรัดรอบทั้ง 4 ด้าน ทำให้มี End Anchorage มาก แม้จะเกิดรอยร้าวทแยงในบริเวณช่วงเฉือนและรอยร้าวที่ขยายตัวเพิ่มขึ้นแต่แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะไม่เกิดการหลุดล่อนทำให้คานยังคงสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้นแม้คอนกรีตในช่วงเฉือนจะถูกบดอัดและจะแรงดึงทแยงที่เกิดเพิ่มมากขึ้นนั้นจะขยายออกไปยังนอกบริเวณช่วงเฉือนส่งผลให้คานเกิดการวิบัติ เช่นเดียวกันกับคาน B1DF

4.4.2.2 คานที่มีอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกเท่ากับ 2.00

คานตัวอย่างกลุ่มที่ 2 ที่มีค่าอัตราส่วน a/d ratio เท่ากับ 2.00 พบว่า รอยร้าวแรกที่ปรากฏมีสาเหตุมาจากแรงดัด (flexural cracking) และพัฒนาเป็นรอยร้าวเนื่องจากแรงดัดและแรงเฉือน (Flexural shear cracking) เนื่องจากบริเวณช่วงเฉือนของคานกลุ่มนี้ในระยะเท่ากับความลึกประสิทธิผลวัดจากตำแหน่งที่น้ำหนักกระทำออกไปยังปลายคานนั้นเป็นบริเวณที่แรงเฉือนและแรงดัดมีอิทธิพลร่วมกัน คาน BR2, BM2 และ B2U เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน (Shear compression failure) ความสามารถในการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกระหว่างการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนแนวตั้งและแนวนอนในปริมาณเท่ากับเหล็กเสริมต่ำสุดในคาน BM2 และการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนน้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดของคาน BR2 สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อค่า a/d ratio เพิ่มขึ้น ในส่วนของคาน B2F และ B2DF ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์แบบพันรัดรอบ 4 ด้าน วิบัติด้วยแรงดัด (Flexural compression failure) ดังแสดงในภาพที่ 4.37 เนื่องจากบริเวณช่วงเฉือนทั้งสองข้างที่กินพื้นที่คานเกือบทั้งหมดและการเสริมกำลังแบบ Fully wrap มี End Anchorage ทำให้มีความสามารถในการรับแรงเฉือนจนทำให้คานมีกำลังต้านทานแรงเฉือนมากกว่ากำลังต้านทานแรงดัดได้ในคาน B2F ในขณะที่คาน B2DF เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดัดแต่กำลังรับแรงประลัยมีค่าน้อยกว่าคานอ้างอิงที่ไม่ได้เสริมกำลังมีสาเหตุมาจากการทำให้คานเกิดรอยร้าวทแยงในคานที่มี a/d ratio เท่ากับ 2.00 นั้น คานจะเกิดความเสียหายเนื่องจากแรงดัดและแรงเฉือนมากเมื่อเทียบกับคานที่มี a/d ratio เท่ากับ 1.00 ทำให้กำลังต้านทานแรงดัดลดลง ก่อนการเสริมกำลังคานเกิดการแอ่นตัวเท่ากับ 5.50 มิลลิเมตร ที่น้ำหนักบรรทุกเท่ากับ 25.73 ตัน เมื่อเสริมกำลังแล้วการพันรัดรอบทั้งช่วงเฉือนของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ทำหน้าที่เพียงช่วงพุงคานไว้ไม่ให้วิบัติเนื่องจากแรงเฉือนและเนื่องจากความเสียหายเดิมที่มีอยู่แล้วทำให้กำลังรับแรงดัดของคานลดลงมากและวิบัติเนื่องจากแรงดัดในที่สุด

4.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน

การวิบัติโดยทั่วไปของคานาลึ่คองกรีตเสริมเหล็กจะมีสาเหตุมาจากแรงเฉือนเป็นหลัก ณ ตำแหน่งของท่อนรับแรงอัด (Compression strut) โดยรอยร้าวทแยงจะเกิดขึ้นเป็นเส้นตรงจากตำแหน่งฐานรองรับไปยังจุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ ทำมุม 45 องศากับความยาวคาน รอยร้าวที่เกิดขึ้นไม่ได้มาจากแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear) แต่เกิดจากแรงดึงในแนวทแยงที่มีผลมาจากแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด และรอยร้าวจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดึงในแนวทแยงมีค่าเกิดกำลังต้านทานแรงดึงของคองกรีต ดังนั้นการเสริมเหล็กปลอกเพื่อช่วยรับแรงเฉือนจึงมีความจำเป็นอย่างมาก ในงานวิจัยนี้ได้ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียด (Strain gauge) ณ ตำแหน่งที่กึ่งกลางของความลึกคานที่เหล็กปลอกอันที่อยู่กึ่งกลางของช่วงเฉือนของคานทั้งสองข้าง จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่เหล็กปลอกรับแรงเฉือน ดังแสดงในภาพที่ 4.38 พบว่า ในช่วงแรกกราฟจะเป็นเส้นตรงที่มีความชันสูงเนื่องจากหน่วยแรงเกิดขึ้นที่เหล็กปลอกมีค่าน้อย รอยร้าวทแยงยังไม่ปรากฏเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มมากขึ้นและเกิดรอยร้าวทแยงหน่วยแรงที่เหล็กปลอกจะเพิ่มขึ้น น้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เหล็กปลอกถึงจุดครากในคาน BM1, BM2, B1U, B1F, B1DF, B2U, B2F และ B2DF มีค่าเท่ากับ 42, 52, 83, 20, 92, 38, 35 และ 10 ตัน ตามลำดับ แต่คานตัวอย่าง BR2 ไม่สามารถบันทึกค่าได้เนื่องจากเครื่องวัดความเครียดเกิดการชำรุดและคาน BR1 วิบัติก่อนที่เหล็กปลอกจะถึงจุดคราก เมื่อเทียบกับคานอ้างอิงที่ไม่ได้เสริมกำลังกับคานที่เสริมกำลังในกลุ่มเดียวกันแล้วจะเห็นว่าการเสริมกำลังช่วยเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักได้โดยการทำเหล็กปลอกสามารถทำหน้าที่รับแรงเฉือนได้ โดยการยับยั้งการขยายตัวของรอยร้าวทำให้คานไม่วิบัติเนื่องจากการบดอัดของท่อนรับแรงอัดเสียก่อน

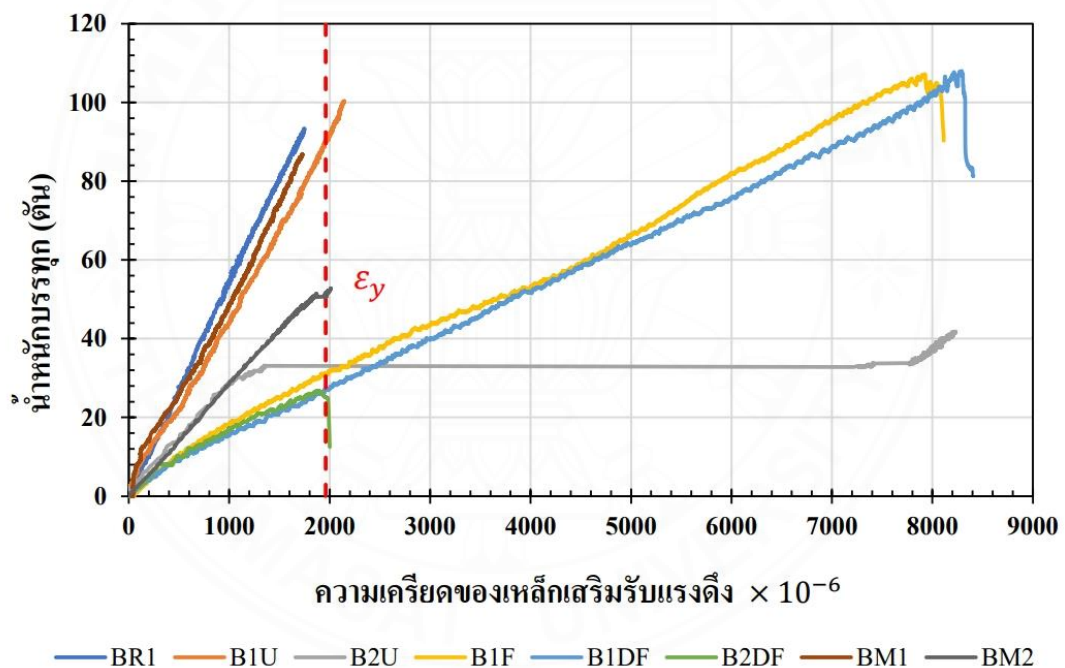


ภาพที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กปลอก

4.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดึง

เมื่อทดสอบคานตัวอย่างพบว่าเมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นจนกระทั่งผิวล่างของคานเกิดหน่วยแรงดึงที่มีค่ามากกว่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต รอยร้าวจะปรากฏที่ผิวล่างของคานในทิศทางตั้งฉากกับความยาวคาน ซึ่งเป็นรอยร้าวเนื่องจากแรงดัด ส่งผลให้เหล็กเสริมเริ่มทำหน้าที่ต้านทานหน่วยแรงดึงที่เกิดขึ้นแทนคอนกรีตที่ไม่สามารถถ่ายแรงผ่านรอยแยกนี้ได้ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการติดตั้งเครื่องมือวัดความเครียด (Strain gauge) ที่เหล็กเสริมรับแรงดึงที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานที่มีหน่วยแรงดึงสูงที่สุด เมื่อศึกษาเปรียบเทียบจากน้ำหนักบรรทุก ณ จุดครากของคานแต่ละตัวแล้วพบว่า คาน BM2, B1U, B1F, B1DF, B2U และ B2DF มีน้ำหนักบรรทุก ณ จุดครากเท่ากับ 51, 90, 32, 26, 34 และ 24 ตัน ตามลำดับ แต่คานตัวอย่าง BR2 และ B2F ไม่สามารถบันทึกค่าได้เนื่องจากเครื่องวัดความเครียดเกิดการชำรุดและ คาน BR1 วิบัติก่อนที่เหล็กเสริมยังไม่ถึงจุดครากซึ่งแสดงให้เห็นว่า คานวิบัติเนื่องจากการบดอัดในท่อนรับแรงอัดก่อนที่เหล็กเสริมรับแรงดึงจะมีหน่วยแรงถึงจุดครากเมื่อเทียบกับคาน B1U และ B1F พบว่าการเสริมกำลังที่ช่วยยับยั้งการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนทำให้คานยังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นได้ หน่วยแรงดัดที่คานต้องรับจึงมากขึ้นทำให้เหล็กเสริมรับแรงดึงสามารถมีกำลังถึงจุดครากได้ หากเปรียบเทียบระหว่างการเสริมกำลังแบบ U-wrap กับแบบ

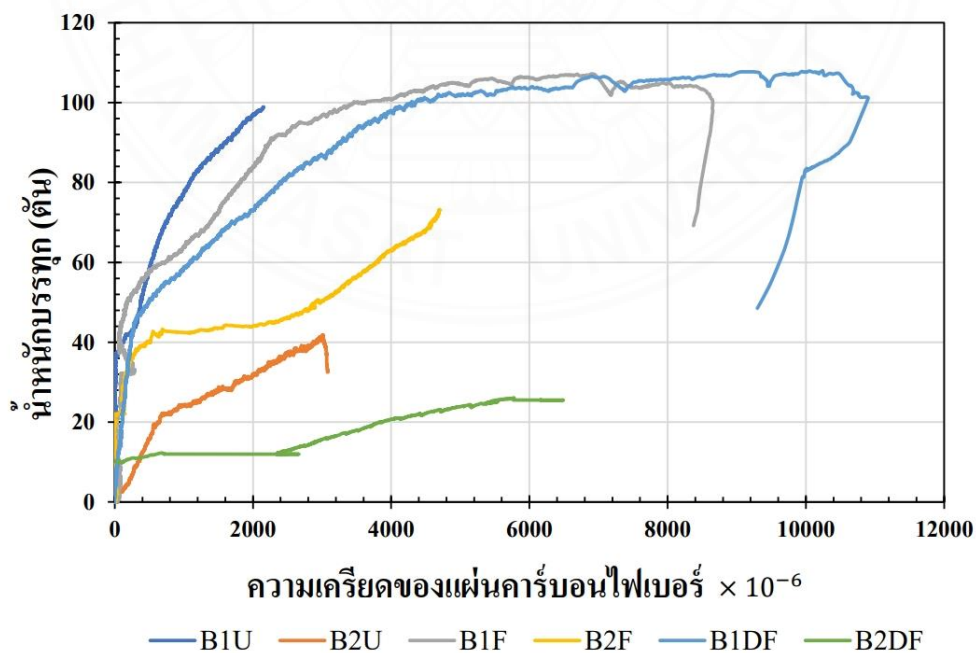
Fully wrap ของคานตัวอย่างกลุ่มที่ 1 จะสังเกตเห็นว่าการเสริมกำลังแบบ Fully wrap จะมีน้ำหนักบรรทุก ณ จุดครากที่ต่ำกว่าเพราะการรัดรอบทั้งสี่ด้านตลอดช่วงเฉือนนั้น ช่วยยับยั้งการขยายตัวของรอยร้าวทำให้การวิบัติในแนวทแยงเกิดขึ้นได้ยากกว่าการเสริมกำลังแบบ U-wrap ส่งผลให้โครงสร้างคานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้นและเหล็กเสริมมีหน่วยแรงถึงจุดคราก แต่เมื่อเปรียบเทียบคานที่เสริมกำลังแบบ U-wrap ของคานที่มีค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล (a/d ratio) เท่ากับ 1.00 และ 2.00 พบว่า คานมี a/d เท่ากับ 2.00 มีน้ำหนักบรรทุก ณ จุดครากต่ำกว่าคานที่มี a/d เท่ากับ 1.00 อยู่มาก เนื่องจากคานที่มี a/d เท่ากับ 1.00 มีการกระจายตัวของรอยร้าวเนื่องจากแรงดัดมากกว่าต่างจากคานที่มี a/d เท่ากับ 2.00 ที่มีรอยร้าวเนื่องจากแรงดัดรวมตัวกันอยู่ ณ กึ่งกลางคาน ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงดัด แสดงในภาพที่ 4.39



ภาพที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กรับแรงดัด

4.4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่นำมาใช้ในการเสริมกำลังเป็นแบบเส้นใยทิศทางเดียว (uni-directional) ที่นำมาเสริมกำลัง 2 ชั้น โดยชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 มีทิศทางของเส้นใยตั้งฉากกันให้มีลักษณะคล้ายเป็นแบบเส้นใยสองทิศทาง (bi-directional) เพื่อทำหน้าที่ยับยั้งการขยายตัวของรอยร้าวและป้องกันการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนเหมือนกับเหล็กปลอกรับแรงเฉือน จากการศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ที่แสดงในภาพที่ 4.40 พบว่า ช่วงแรกกราฟจะมีความชันสูง คานยังไม่เกิดรอยร้าวทแยง จึงทำให้ยังไม่เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นที่แผ่นCFRP ต่อมาเมื่อคานเกิดรอยร้าวและความกว้างของรอยร้าวขยายมากขึ้น จะเกิดหน่วยแรงดึงในแผ่นCFRP และหน่วยแรงดึงจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ คานที่เสริมกำลังแบบ Fully wrap จะมีความเครียดเกิดขึ้นมากกว่าคานที่เสริมกำลังแบบ U-wrap เนื่องจากไม่เกิดการหลุดล่อน (Debonding) พฤติกรรมของแผ่น CFRP แตกต่างจากเหล็กเสริมเนื่องจากไม่มีจุดครากแต่จะเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด จากการทดสอบพบว่า คานที่เสริมกำลังแบบ U-wrap ทั้ง 2 ตัว B1U และ B2U เกิดการวิบัติโดยเกิดการหลุดล่อนออกของแผ่น CFRP ส่วนคานที่เสริมกำลังแบบ Fully wrap ทั้ง 4 ตัว พบว่า B2F และ B2DF ไม่เกิดการหลุดล่อนหรือฉีกขาดเลยเนื่องจากคานวิบัติด้วยแรงดัด แต่คาน B1F และ B1DF เกิดการหลุดล่อนเพียงเพียงเล็กน้อยตามขอบของแผ่น CFRP และมีการฉีกขาดเล็กน้อยที่ตำแหน่งใกล้ขอบล่างของคานที่คาน B1DF



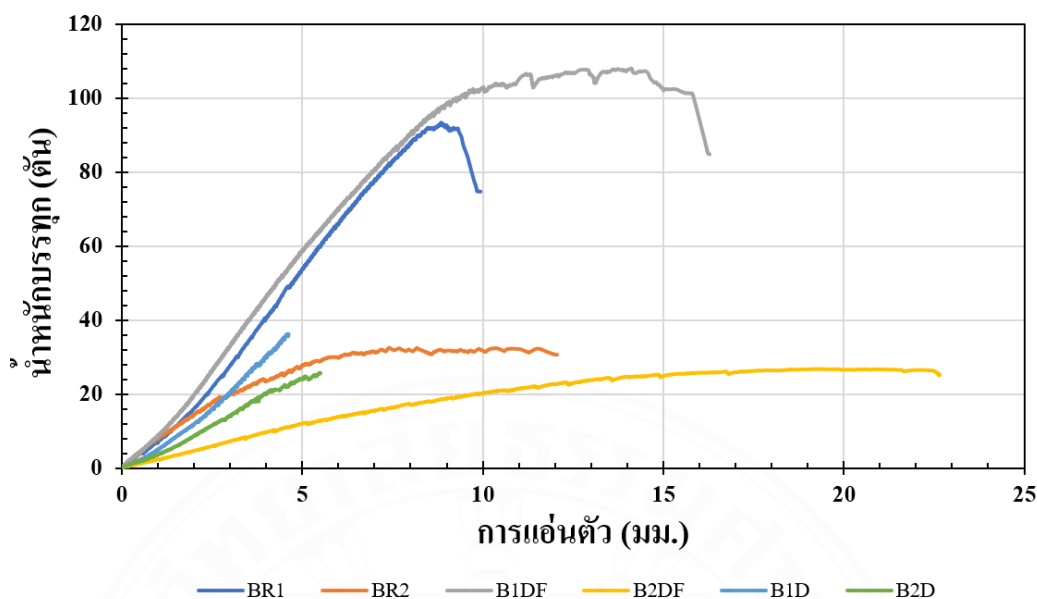
ภาพที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

4.4.6 การเสริมกำลังคานลึกลงกริตเสริมเหล็กหลังเกิดรอยร้าวทแยง

จากการทดสอบเสริมกำลังคานลึกลงกริตเสริมเหล็กที่ได้รับน้ำหนักบรรทุกกระทำจนเกิดการแตกร้าวในแนวทแยงเนื่องจากแรงเฉือน จากนั้นจึงเสริมกำลังด้วยการติดตั้ง CFRP ในลักษณะพันรอบ 4 ด้าน (Fully wraps) จำนวน 2 ชั้น ตลอดช่วงการเฉือน ได้แก่คาน B1DF และ B2DF จากภาพที่ 4.41 และตารางที่ 4.5 B1D และ B2D คือคานที่ถูกทดสอบจนเกิดการแตกร้าวในแนวทแยงเนื่องจากแรงเฉือนก่อนได้รับการเสริมกำลัง ผลการเสริมกำลังคานกลุ่มที่ 1 นั้นช่วยให้คานมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้มากขึ้นถึง 15.63 % ของคานอ้างอิงเนื่องจากการความเสียหายที่ได้รับจากการกดทำลายนั้นมีน้อยมาก โดยน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดความเสียหายคิดเป็นเพียงร้อยละ 40 ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานอ้างอิง BR1 ทำให้การเสริมกำลังนั้นมีประสิทธิภาพ เมื่อเทียบกับคานกลุ่มที่ 2 การเสริมกำลังไม่สามารถเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้เนื่องจากได้รับความเสียหายมาก โดยน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดความเสียหายคิดเป็นร้อยละ 80 ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานอ้างอิง BR2 ส่งผลให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยลดลงถึง 17.61 % แต่การเสริมกำลังช่วยให้ลักษณะการวิบัติเปลี่ยนแปลงไปจากการวิบัติจากแรงเฉือนเป็นการวิบัติที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดัด (Flexural compression) ดังนั้นข้อควรระวังในการเสริมกำลังโครงสร้างคานลึกลงกริตเสริมเหล็กคือระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นก่อนการเสริมกำลังและเพื่อประสิทธิภาพในการซ่อมแซมและเสริมกำลังควรมีการซ่อมแซมโดย epoxy injection หรือการเกร้าท์ด้วยซีเมนต์ไม่หดตัว (Non-shrink cement) เพื่อคืนสภาพให้กับคานคอนกรีตก่อนการเสริมกำลัง

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบเสริมกำลังคานที่เกิดรอยร้าวทแยง

กลุ่ม	ชื่อคานตัวอย่าง	น้ำหนักประลัย (ตัน)	การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักประลัย (%)	การแอ่นตัว (มม.)	การวิบัติ
1	BR1	93.4	-	9.94	Shear compression
	B1D	36.27	-	4.62	-
	B1DF	108	15.63	16.28	CFRP Spitting
2	BR2	32.48	-		Shear compression
	B2D	25.6	-	5.5	-
	B2DF	26.76	-17.61	22.66	Flexural compression



ภาพที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอนตัวที่กึ่งกลางคานของคานที่เสริมกำลัง

4.4.7 อภิปรายผลการทดสอบ

คานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กมีลักษณะการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน มีพฤติกรรมเป็นแบบเปราะขาด ไม่มีการเตือน ซึ่งหลักการสำคัญในการออกแบบคือกำลังรับแรงเฉือนต้องมีค่าไม่น้อยกว่ากำลังรับแรงดัดในทุกๆหน้าตัด จากการทดลองการเสริมกำลังรับแรงเฉือนโครงสร้างคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์พบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับน้ำหนักประลัยของคานกลุ่มที่ 1 มีค่า

น้อยกว่าของคานกลุ่มที่ 2 กล่าวคือ การเสริมกำลังจะไม่ค่อยมีประสิทธิภาพมากนักในคานที่มีพฤติกรรมเป็นคานลึก (Deep Beam) ที่มีค่า a/d ratio เท่ากับ 1.00 และการเสริมกำลังจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อคานมีพฤติกรรมค่อนข้างเป็นคานชะลูด (Slender Beam) ที่มีค่า a/d ratio เท่ากับ 2.00 เนื่องจากในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีพฤติกรรมเป็นคานลึกจะมีกลไกสำคัญในการรับแรงเฉือนมาจากคอนกรีตเป็นหลัก หรือที่เรียกว่า Arch action จากภาพที่ 4.42 กำลังต้านทานแรงเฉือนของหน้าตัดคานคอนกรีตที่ไม่เสริมกำลังรับแรงเฉือนในรูปแบบโมเมนต์ดัดที่คานรับได้สูงสุดเมื่อเกิดการวิบัติโดยแรงเฉือน และภาพที่ 4.43 ผลของอัตราส่วน a/d ที่มีต่อกำลังต้านแรงเฉือนของคานที่ไม่เสริมกำลังรับแรงเฉือน แสดงให้เห็นถึงกำลังต้านทานแรงเฉือนของหน้าตัดคานเมื่อแปรเปลี่ยนอัตราส่วน a/d ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับโมเมนต์ดัดแต่ไม่เสริมเหล็กรับแรงเฉือน คานที่มีค่า a/d ratio น้อยๆ คอนกรีตจะสามารถรับแรงเฉือนได้มากกว่าคานที่มีค่า a/d ratio ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการวิบัติโดยแรงเฉือนเป็นการวิบัติแบบเปราะส่วนการวิบัติโดยโมเมนต์ดัดเป็นการวิบัติแบบเหนียว ดังนั้นจึงต้องทำการออกแบบเหล็กปลอกให้เพียงพอที่คานจะวิบัติด้วยโมเมนต์ดัด

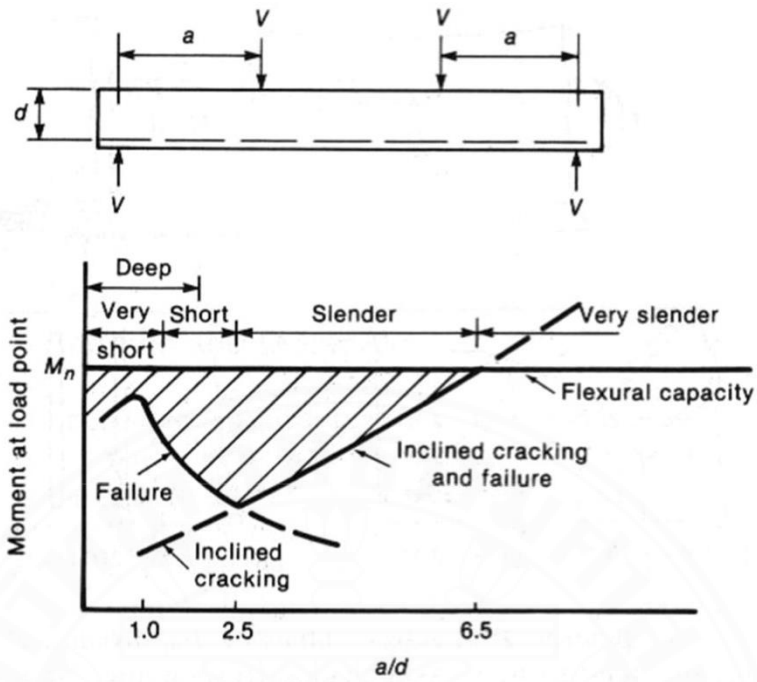
กำลังต้านแรงเฉือนจะประกอบด้วยส่วนที่ต้านโดยคอนกรีตและเหล็กรับแรงเฉือน โดยแรงต้านทานสูงสุดต้องไม่น้อยกว่า

$$V_n = M_n / a \quad (1)$$

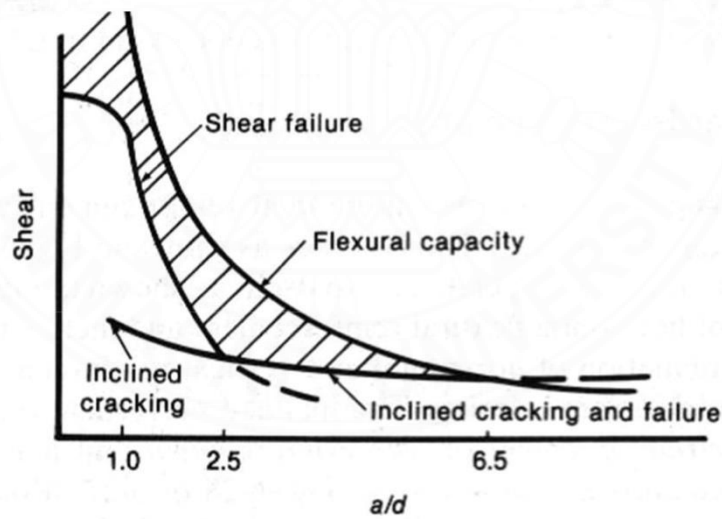
เมื่อ M_n = โมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัด (Nominal moment capacity)

$$M_n = A_s f_y (d - a/2) \quad (2)$$

และการเสริมเหล็กปลอกรับแรงเฉือนที่เพียงพอจะทำให้คานสามารถพัฒนากำลังรับน้ำหนักประลัยไปจนถึงกำลังต้านทานแรงดัดได้ พื้นที่แรงเงาแสดงถึงอิทธิพลในการรับแรงเฉือนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนและ CFRP ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อคานมีค่า a/d ratio น้อยๆ เหล็กปลอกและ CFRP มีอิทธิพลต่อการรับแรงเฉือนน้อยมากเมื่อเทียบกับอิทธิพลต่อการรับแรงเฉือนของคอนกรีต และเหล็กเสริมเริ่มมีอิทธิพลเพิ่มมากขึ้นเมื่อคานมีค่า a/d ratio เพิ่มมากขึ้นในขณะที่ยังการต้านทานแรงเฉือนโดยคอนกรีตลดลง เป็นสาเหตุให้การเสริมกำลังรับแรงเฉือนในคานที่มีค่า a/d ratio น้อยไม่ค่อยเห็นผลต่างมากเท่าไรนักในแง่ของการเพิ่มกำลังรับน้ำหนักประลัย ในทางกลับกันการเสริมรับแรงเฉือนจะแสดงให้เห็นผลต่างของกำลังรับน้ำหนักประลัยได้มากขึ้น จะเห็นได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กปลอกที่แสดงให้เห็นว่าความเครียดในคานกลุ่มที่ 1 ที่มีค่า a/d ratio เท่ากับ 1 จะมีค่าน้อย เนื่องจากเหล็กปลอกไม่ได้รับแรงเฉือนมากนัก ในขณะที่ความเครียดในคานกลุ่มที่ 2 ที่มีค่า a/d ratio เท่ากับ 2.00 จะมีค่ามากเพราะเหล็กปลอกมีหน้าที่สำคัญในการรับแรงเฉือน เช่นเดียวกันกับการพความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ จะพบว่าที่ค่าความเครียดเท่ากันคานในกลุ่มที่ 1 จะมีน้ำหนักบรรทุกสูงกว่าในคานกลุ่มที่ 2



ภาพที่ 4.42 กำลังต้านทานแรงเฉือนของหน้าตัดคานคอนกรีตที่ไม่เสริมกำลังรับแรงเฉือนในรูปขงโมเมนต์ดัดที่คานรับได้สูงสุดเมื่อเกิดการวิบัติโดยแรงเฉือน



ภาพที่ 4.43 ผลของอัตราส่วน a/d ที่มีต่อกำลังต้านทานแรงเฉือนของคานที่ไม่เสริมกำลังรับแรงเฉือน

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมคานลึกลงกรีดเสริมเหล็กที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนภายนอกด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์บริเวณช่วงเฉือนทั้งสองข้างของคาน โดยจะทำการทดสอบคานลึกลงกรีดเสริมเหล็กที่มีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 20×45 เซนติเมตร ยาว 240 เซนติเมตร จำนวน 10 ตัว คานจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ B1 ที่มีค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 1.00 และ B2 ที่มีค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 2.00 จำนวนกลุ่มละ 5 ตัว ในแต่ละกลุ่มจะแบ่งเป็นคานอ้างอิงที่เสริมเหล็กตามแนวตั้งและแนวนอนเพียงพอเท่ากับปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดและแบบต่ำกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดที่มาตรฐาน ACI318-19 กำหนดอย่างละ 1 ตัว คานที่มีการเสริมกำลังต่างกัน 2 ตัว และคานที่มีการเสริมกำลังหลังจากรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน 1 ตัว โดยศึกษาพฤติกรรมภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบสถิตในลักษณะของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย ความสามารถในการเสียรูปและพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของโครงสร้างคานลึกลงกรีดเสริมเหล็กที่เสริมกำลังและไม่มีการเสริมกำลังของคานที่มีค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 1.00 และ 2.00

1. การเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ทั้ง 2 วิธี ได้แก่ U-wrap และ Fully wrap สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยให้กับโครงสร้างคานลึกลงกรีดเสริมเหล็กได้ โดยรูปแบบที่ดีที่สุดคือ Fully wrap น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยเพิ่มขึ้น 14.78% และ 135.22% สำหรับคานที่ a/d เท่ากับ 1.00 และ 2.00 ตามลำดับ
2. การเพิ่มขึ้นของค่า a/d ratio ทำให้ค่าการแอ่นตัวสูงสุดที่สถานะประลัยเพิ่มขึ้น จาก 9.94 มม. เป็น 12.06 มม. สำหรับคานอ้างอิง แต่ลดลงจาก 9.39 มม. เป็น 7.35 มม. สำหรับคานที่เสริมกำลังแบบ U-wrap เพิ่มขึ้นจาก 16.33 มม. เป็น 17.36 มม. สำหรับคานที่เสริมกำลังแบบ Fully wrap และเพิ่มขึ้นจาก 16.28 มม. เป็น 22.66 มม. สำหรับคานที่เสริมกำลังหลังเกิดรอยร้าว
3. การเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ช่วยยับยั้งการขยายตัวของรอยร้าวทแยงที่เป็นสาเหตุหลักของการวิบัติโดยแรงเฉือนได้ ทำให้คานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้มากขึ้น

4. อัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยแสดงถึงประสิทธิผลของการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะเห็นได้ชัดเมื่อคานมีอัตราส่วน a/d สูง และมีผลน้อยเมื่อคานมีอัตราส่วน a/d ต่ำ เนื่องจากเมื่อคานมีค่าอัตราส่วน a/d น้อย คอนกรีตจะมีบทบาทสำคัญในการรับแรงเฉือนมาก อันเป็นผลจากกลไกการต้านแรงเฉือนแบบอาร์ช (Arch action)
5. คานที่มีลักษณะและรูปแบบการเสริมกำลังแบบเดียวกัน เมื่อ a/d มีค่าเพิ่มขึ้น กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยที่รับได้จะลดลง เนื่องจากกลไกต่อต้านทานแรงเฉือนโดยคอนกรีตแบบ Arch action จะลดลงและมีลักษณะค่อนข้างไปทาง Beam action
6. การเสริมกำลังรับแรงเฉือนหลังเกิดรอยร้าวของคานกลุ่มที่ 1 สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้เนื่องจากมีความเสียหายเพียงเล็กน้อยในขณะที่คานกลุ่มที่ 2 ไม่สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้เพราะมีความเสียหายมาก แต่การเสริมกำลังช่วยให้คานเกิดการแอ่นตัวได้มากและเสียรูปเนื่องจากแรงตัด ดังนั้นการเสริมกำลังคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กควรคำนึงถึงระดับความเสียหายด้วย
7. กำลังรับแรงเฉือนที่แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์รับได้ในการใช้งานจริงน้อยกว่ากำลังที่ได้จากการคำนวณเนื่องจากการหลุดล่อน (Debonding)

5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะน้ำหนักบรรทุกแบบสถิต การนำไปใช้งานในลักษณะน้ำหนักบรรทุกแบบกระทำซ้ำควรมีการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักเพิ่มเติมก่อนนำไปใช้งาน
2. ในงานวิจัยนี้มีการเสริมกำลังในรูปแบบ Fully wrap ที่มี End Anchorage มากซึ่งปฏิบัติได้ยากในการใช้งานจริง
3. การวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยโดยแบบจำลอง Strut and tie เหมาะสำหรับคานที่มีช่วงการเฉือนต่อความลึกประลัยน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2

5.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

1. ควรมีการศึกษาการเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ในกรณีที่มีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนในแนวตั้งและแนวนอนในปริมาณเพียงพอหรือมากกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดที่กำหนดในมาตรฐาน
2. ควรมีการศึกษาหาวิธีการเพิ่ม End anchorage และการยึดรั้งกันระหว่างแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์และโครงสร้างคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็ก
3. ควรมีการศึกษาพฤติกรรมของคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังรับแรงดัดและกำลังรับแรงเฉือนพร้อมกัน
4. ควรมีการศึกษาระดับความเสียหายของคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผลต่อการซ่อมแซมและเสริมกำลัง
5. ควรพิจารณาซ่อมแซมรอยร้าวโดย Epoxy injection หรือ Non-shrink grout ก่อนการเสริมกำลังที่อาจมีผลต่อการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน

เอกสารอ้างอิง

- อัศววัชร เล่นวารี่ ” การเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใย”
พิมพ์ครั้งที่ 1, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2561.
- วินิต ช่อวิเชียร “การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน” พิมพ์ครั้งที่ 6,
กรุงเทพมหานคร, 2555.
- กรมโยธาธิการและผังเมือง, คู่มือการเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างอาคาร, 2537
- กรมโยธาธิการและผังเมือง “มาตรฐานการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพ
สิตเสริมเส้นใย” (มยพ. 1508-51), 2551
- รัตนศักดิ์ หงส์ทอง อภัย เบ็ญพงศ์ และ ธรรมมา เจียรธรวาณิช “การเสริมกำลังคานลึกลงคอนกรีต
เสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์” วารสารวิชาการและ
วิจัย มทร.พระนคร ปีที่ 14 ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2563 หน้าที่ 160-172
- MacGregor J G., Reinforced Concrete Mechanics and Design., Prentice-Hall. Inc., New
Jersey. 1997.
- Hsu T. T. C., Unified Theory of Reinforced Concrete., CRC Press., Florida, 1993.
- ACI, “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-19) and
Commentary (318RM-14)”, 2014
- ACI Committee 440, Guide for design and construction of externally bonded FRP
systems for strengthening concrete structures (ACI 440.2R-17), American
Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2007.
- ACI Committee 440, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP)
Reinforcement for Concrete Structures (ACI 440R-96), American Concrete
Institute, Farmington Hills, MI, 2002.

- Azam, R., Soudki, K., West, J.S., and Noël, M., "Shear Strengthening of RC Deep Beams with Cement-Based Composites" **Engineering Structures**, Vol.172, 2018, pp.929-937
- Alexin, M.S., and Philip, P.M., "Shear Behavior of RC Deep Beams Retrofitted with CFRP Sheet" **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, Vol.6, Actical 06, 2018
- Elsonbaty, M.M., Montaser, W.M., and Zaher, A.H., "Strengthening of R.C. Deep Beams Using CFRP, GFRP" **Al-Azhar University Civil Engineering Research Magazine (CERM)**, Vol.40, No.4, 2018
- Ghanim, H.A., Asi, A.A., Jaber, M.A., and Alqam, M., "Shear and Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Deep Beams Strengthened with CFRP Composites" **Modern Applied Science**, Voi.11, No.10, 2017
- Islam, M.R., Mansur, M.A., and Maalej, M., "Shear Strengthening of RC Deep Beams Using Externally Bonded FRP Systems" **Cement and Concrete Composite**, Vol.27, No.3, 2005, pp.413-420.
- Panjehpour, M., Ali, A.A.A., Voo, Y.L., and Aznieta, F.N., "Modification of Strut Effectiveness Factor for Reinforced Concrete Deep Beams Strengthened with CFRP Laminates" **Materiales De Construcción**, Vol.64, Artical 314, 2014
- Panjehpour, M., Chai, H.K., and Voo, Y.L., "Strut Deformation in CFRP-Strengthened Reinforced Concrete Deeo Beams" **The Scientific World Journal**, Vol.2014, Article ID 265879, 2014, pp.9
- Rasheed, M., "Retrofit of Reinforced Concrete Deep Beams with Different Shear Reinforcement by Using CFRP" **Civil and Environmental Research**, Voi.8, No.5, 2016
- Zaher, A.H., Montaser, W.M., and Elsonbaty, M.M., "Strengthening and Repairing of RC Deep Beams Using CFRP and CFRP" **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, Vol.11, Actical 1, 2020, pp.64-85

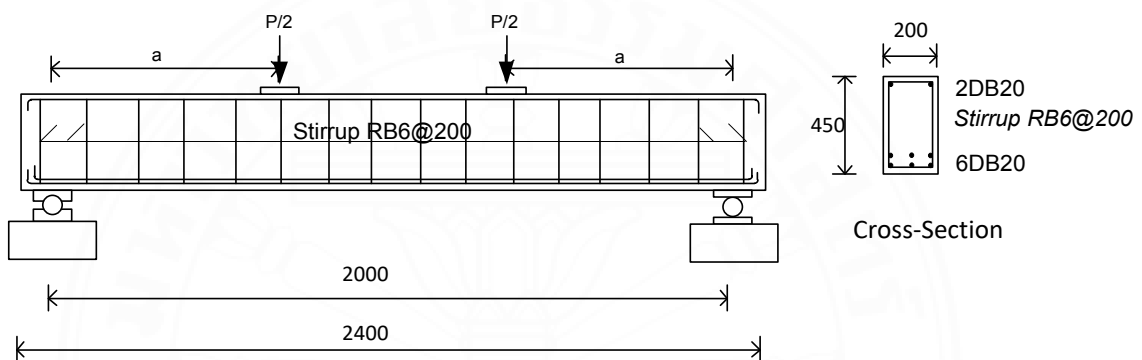


ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ก. การวิเคราะห์หน้าตัดคานเพื่อหาแรงกระทำสูงสุดที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด

คานตัวอย่างมีหน้าตัดขนาด กว้าง 20 ซม. ลึก 45 ซม. ความยาว 240 ซม. ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ 2 ม. เสริมเหล็กรับแรงดึงขนาด DB20 จำนวน 6 เส้น และเหล็กเสริมรับแรงอัดขนาดเดียวกันจำนวน 2 เส้น เหล็กเสริมรับแรงเฉือนขนาด RB6 ระยะเรียง 20 ซม.



ภาพที่ ก.1 รายละเอียดการเสริมเหล็กของคานตัวอย่าง

การออกแบบสำหรับคานทดสอบใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติดังนี้

$$\text{กำลังอัดประลัยของคอนกรีต, } f'_c = 210 \text{ ksc}$$

$$\text{กำลังรับแรงดึงครากของเหล็กเสริมหลัก, } f_y = 4,000 \text{ ksc}$$

$$\text{กำลังรับแรงดึงครากของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน, } f_{vy} = 2,400 \text{ ksc}$$

พื้นที่ทั้งหมดของหน้าตัดเหล็กเสริม

$$A_s = 6 \times (3.14) = 18.84 \text{ cm}^2$$

$$A'_s = 2 \times (3.14) = 6.28 \text{ cm}^2$$

$$A_{s1} = 18.84 - 6.28 = 12.56 \text{ cm}^2$$

สมมติให้เหล็กเสริมรับแรงดัดส่วนที่ 1 ถึงจุดคราก ($0.85f'_c b a = A_{s1} f_y$)

$$a = A_{s1} f_y / 0.85 f'_c b = 14.07 \text{ cm}$$

$$\beta_1 = 0.85$$

$$C = 14.07/0.85 = 16.56 \text{ cm}$$

ตรวจสอบเหล็กเสริมว่าถึงจุดครากหรือไม่

$$\epsilon_y = f_y/E_s = 0.00196$$

เมื่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมเท่ากับ 2.04×10^6 ksc.

$$\epsilon_s = 0.003 \frac{d}{c} - 0.003 = 0.004248$$

เหล็กเสริมไม่ถึงจุดคราก เนื่องจาก $\epsilon_y < \epsilon_s$ เป็นหน้าตัดแบบ Under reinforcement

คำนวณหาโมเมนต์ดัดประลัยที่เกิดขึ้น

$$M_{n1} = A_{s1}f_y(d - \frac{a}{2}) = 1,656,090.5 \text{ kg - cm}$$

$$M_{n2} = A'_{s}f_y(d - d') = 879,200 \text{ kg - cm}$$

$$M_n = M_{n1} + M_{n2} = 2,535,290.5 \text{ kg - cm}$$

$$M_u = \phi M_n = 2,281,761.5 \text{ kg - cm หรือ } 22.82$$

t - m

เมื่อ ϕ สำหรับโมเมนต์ดัดมีค่าเท่ากับ 0.9

คำนวณหาแรงกระทำสูงสุดที่ทำให้เกิดโมเมนต์ดัดประลัย

$$\text{เมื่อ } M_u = \frac{Pa}{2}$$

$$22.82 = \frac{Pa}{2}$$

$$P = \frac{45.64}{a}$$

$$\text{ณ คานที่มีค่า } a/d = 1 ; a = 0.4 \text{ m} \quad P = 114.09 \text{ ton}$$

$$\text{ณ คานที่มีค่า } a/d = 2 ; a = 0.8 \text{ m} \quad P = 57.04 \text{ ton}$$

ภาคผนวก ข.

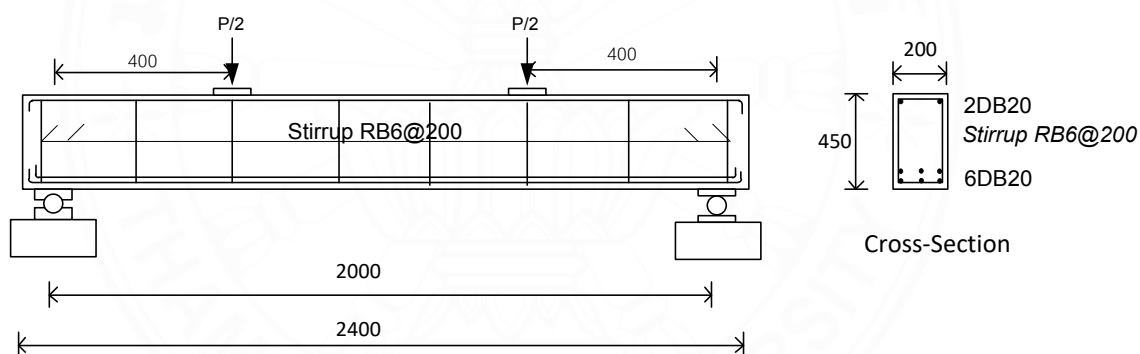
การออกแบบคานตัวอย่างที่เสริมเหล็กรับแรงเฉือนน้อยกว่าปริมาณต่ำสุด

โดยใช้แบบจำลอง Strut and tie ตามมาตรฐาน ACI 318-19

ข.1 วิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของคาน

ที่มีช่วงการเฉือนต่อความลึกประลัยเท่ากับ 1.00

คานที่มีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนน้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด ที่จุดฐานรองรับและบริเวณที่น้ำหนักกระทำทั้งหมดมีแผ่นเหล็กกว้าง 30 ซม.หนา 2.5 ซม. ยาวตลอดความกว้างของหน้าตัดคาน สมมติ Node อยู่บริเวณกึ่งกลางของบริเวณที่น้ำหนักบรรทุกกระทำและฐานรองรับ และอยู่ห่างจากขอบบนและล่างเท่ากับ 6.5 ซม.



รูป ข.1.1 รายละเอียดคานเสริมเหล็กรับแรงเฉือนน้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด เมื่อ $a/d = 1$

คำนวณกำลังประลัยใน Strut

พิจารณาว่า Strut A-B และ Strut C-D มีรูปร่างเป็น Bottle shape ที่มีการเสริมเหล็กในแนวตั้งและแนวนอนน้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด คำนวณหากำลังรับแรงอัดประลัยผลของคอนกรีต, f_{ce} มีค่า

$$f_{ce} = 0.85\beta_s f'_c = 0.85 \times 0.60 \times 210 = 107.1 \text{ ksc.}$$

การคำนวณกำลังประลัยใน Nodal zone

คำนวณกำลังรับแรงอัดประสิทธิภาพของคอนกรีตใน Nodal Zone, f_{ce} Node A และ D ล้อมด้วย Strut, Bearing area และ Tie เป็นแบบ CCT Node

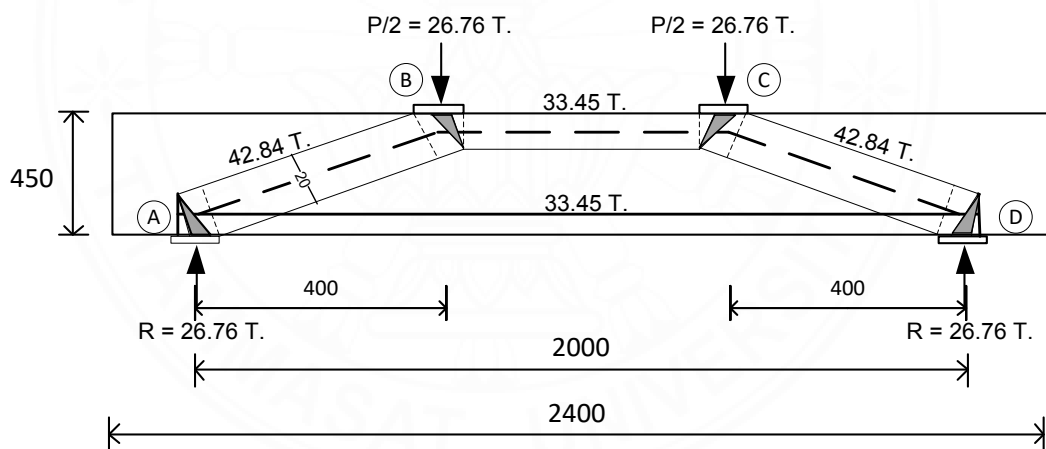
$$f_{ce} = 0.85\beta_n f'_c = 0.85 \times 0.80 \times 210 = 142.8 \text{ ksc.}$$

Node B และ C ล้อมรอบด้วย Strut และ Bearing area เป็นแบบ CCC Node

$$f_{ce} = 0.85\beta_n f'_c = 0.85 \times 1 \times 210 = 178.5 \text{ ksc.}$$

จากหน้าตัดของคานสามารถหาค่ากำลังสูงสุดของคานได้โดยสมมติว่าคานเกิดการวิบัติเนื่องจากการวิบัติของ Compression strut ในแนวทแยง โดยพิจารณาจากความกว้างของ Strut ที่มากที่สุดที่เป็นไปได้จากขนาดของคานและแผ่นเหล็กที่บริเวณฐานรองรับและบริเวณที่น้ำหนักกระทำ สมมติให้ขนาดความกว้างของ strut มีค่าเท่ากับ 20 ซม. Strut ในแนวทแยงเป็นแบบ Bottle shape ที่มีการเสริมเหล็กแนวอนและแนวตั้งน้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด แรงสูงสุดใน strut มีค่า

$$107.1 \times 20 \times 20 / 1000 = 42.84 \text{ ตัน}$$



ภาพที่ ข.1.2 แรงภายในของคานที่มีช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพเท่ากับ 1

ตรวจสอบกำลังที่ Node

ในการคำนวณหาค่ากำลังของ Node โดยปกติกำลังของ Node, Strut และ Tie อยู่บนพื้นฐานที่ว่า $\phi F_n \geq F_u$ ในกรณีนี้ไม่พิจารณาตัวคูณลดกำลัง สำหรับแบบจำลอง Strut and tie ($\phi = 1$) จากการกระจายแรง คานมีน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยเท่ากับ 53.52 ตัน ความกว้างของ Compression strut ในส่วนบน (Prismatic strut) มีค่าเท่ากับ

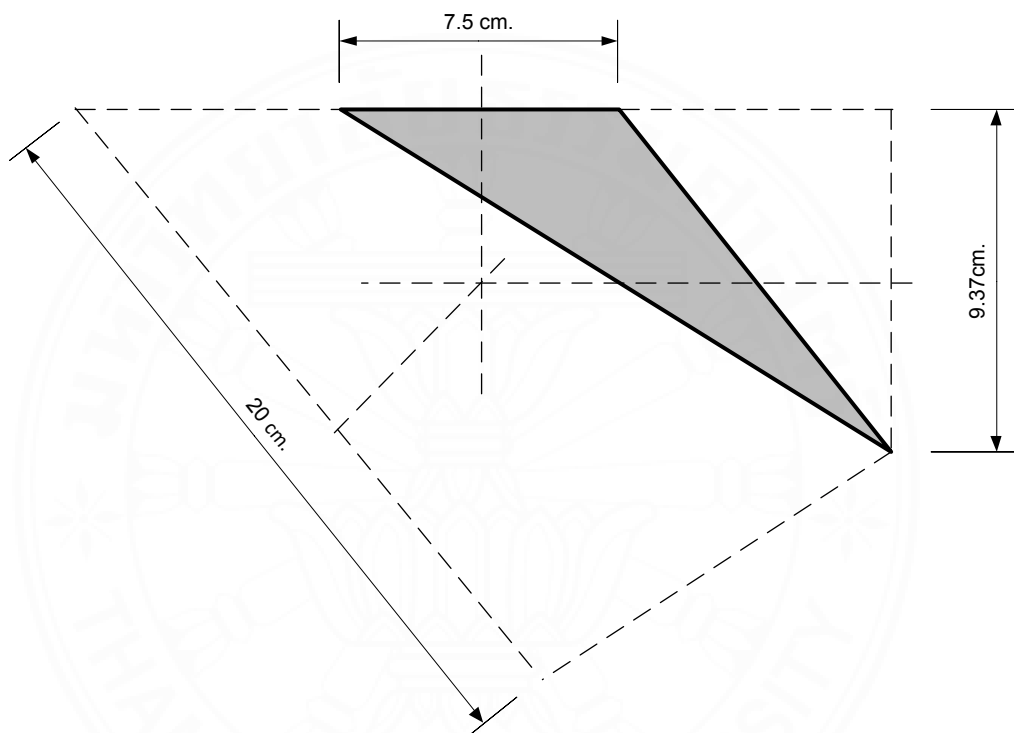
$$\frac{33450}{1 \times 178.5 \times 20} = 9.37 \text{ ซม.}$$

ตรวจสอบรูปร่างของ Truss geometry

พิจารณาว่าที่ Node B และ C เป็น Extend nodal zone

ความกว้างของ Nodal zone ในส่วนบน

$$\frac{26760}{1 \times 178.5 \times 20} = 7.5 \text{ ซม.}$$



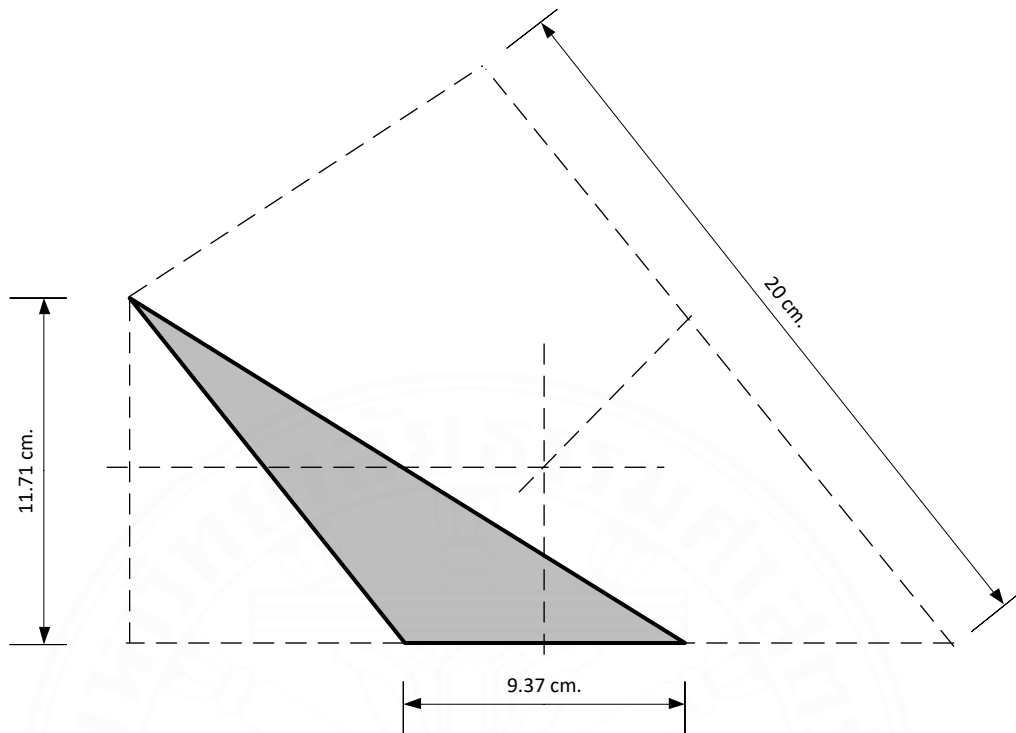
ภาพที่ ข.1.3 รูปร่างของ Node B และ C

ตรวจสอบความกว้างของ Strut

$$\frac{42840}{1 \times 107.1 \times 20} = 20.00 \text{ ซม.}$$

ความกว้างที่ฐานรองรับที่ Node A และ D เท่ากับ

$$\frac{26760}{1 \times 142.8 \times 20} = 9.37 \text{ ซม.}$$



ภาพที่ ข.1.4 รูปร่างของ Node A และ D

ขนาดของ Node สำหรับรับแรงดึงใน Tie

$$\frac{33450}{1 \times 142.8 \times 20} = 11.713 \text{ ซม.}$$

ขนาดของหน่วยแรงใน Tie มีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงดึงที่จุดคราก

$$\frac{33450}{6 \times 3.14} = 1,775.61 \text{ ksc.} < 4,000 \text{ ksc.}$$

จากสมมติฐานที่ว่าคานจะวิบัติเนื่องจากหน่วยแรงใน Strut ในแนวทแยงมีค่ามากกว่ากำลังรับแรงอัดประสิทธิภาพเป็นจริง โดยมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย 53.52 ตัน

ปริมาณเหล็กเสริมใน tension tie

$$A_s = \frac{F_u}{\phi f_y} = \frac{33450}{1 \times 4000} = 8.363 \text{ cm}^2$$

$$\text{ปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด} = 2.8 \text{ cm}^2$$

เลือกใช้เหล็ก DB20 จำนวน 6 เส้น มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 18.84 cm^2

ปริมาณเหล็กเสริมในแนวตั้งต่ำสุดในคาน

$$\text{มีการเสริมเหล็กในแนวตั้งน้อยกว่าสมการ } \sum \frac{A_{si}}{b_s s_i} \sin \alpha_i \geq 0.003$$

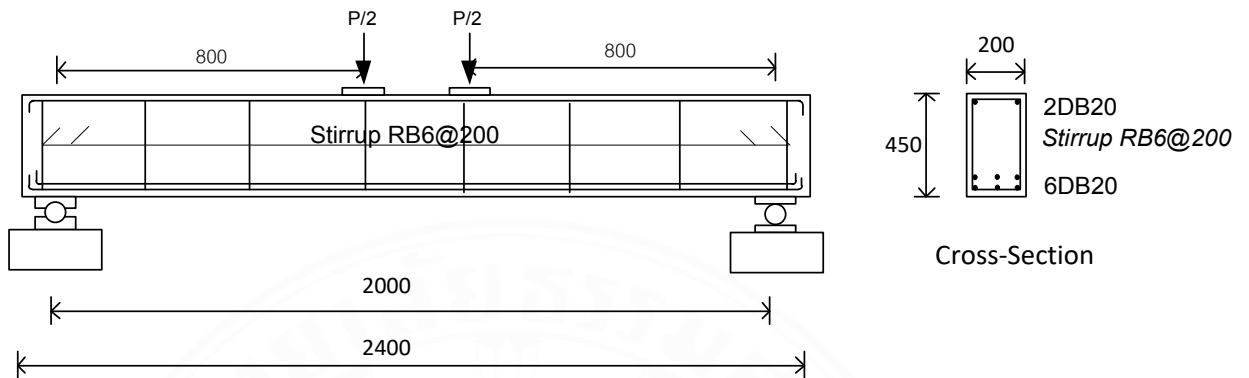
โดยใช้เหล็กปลอกขนาด RB6 ระยะเรียงเท่ากับ 20 ซม.

$$\frac{2 \times 0.28}{20 \times 20} \sin 65.58 = 0.00129 < 0.003$$

$$\begin{aligned} \text{Nominal tensile strength of a tie, } F_{nt} &= A_{ts} f_y \\ &= 18.84 \times 4,000 \\ &= 75,360 \text{ kg.} > F_u = 33,450 \text{ kg.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Normal compressive strength, } F_{ns} &= A_{cs} f_{ce} \\ &= 20 \times 20 \times 107.1 \\ &= 42,840 \text{ kg.} = F_u = 42,840 \text{ kg.} \end{aligned}$$

ข.2 วิเคราะห์คานที่มีช่วงการเอนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 2.00

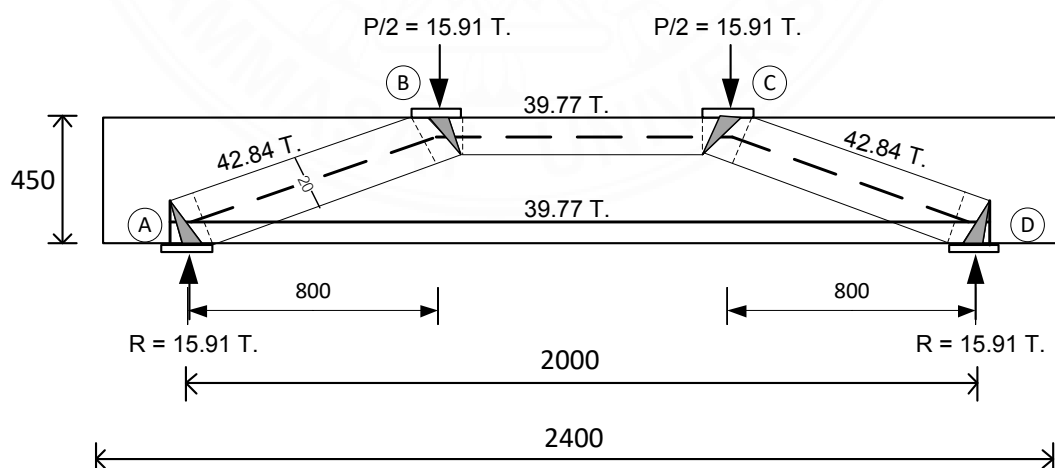


รูป ข.2.1 รายละเอียดคานเสริมเหล็กรับแรงเฉือนน้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด เมื่อ $a/d = 2$

สร้างแบบจำลอง Strut and tie และคำนวณหาแรงภายใน

พิจารณาจากความกว้างของ Strut ที่มากที่สุดที่เป็นไปได้จากขนาดของคานและแผ่นเหล็กที่บริเวณฐานรองรับและบริเวณที่น้ำหนักกระทำ สมมติให้ขนาดความกว้างของ strut มีค่าเท่ากับ 20 ซม. Strut ในแนวทแยงเป็นแบบ Bottle shape ที่มีการเสริมเหล็กแนวอนและแนวตั้งน้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด แรงสูงสุดใน strut มีค่า

$$107.1 \times 20 \times 20 / 1000 = 42.84 \text{ ตัน}$$



รูป ข.2.2 แบบจำลองการถ่ายแรงของคานที่มีช่วงการเอนต่อความลึกเท่ากับ 2

ตรวจสอบกำลังที่ Node

จากการกระจายแรง คานมีน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยเท่ากับ 31.82 ตัน ความกว้างของ Compression strut ในส่วนบน (Prismatic strut) มีค่าเท่ากับ

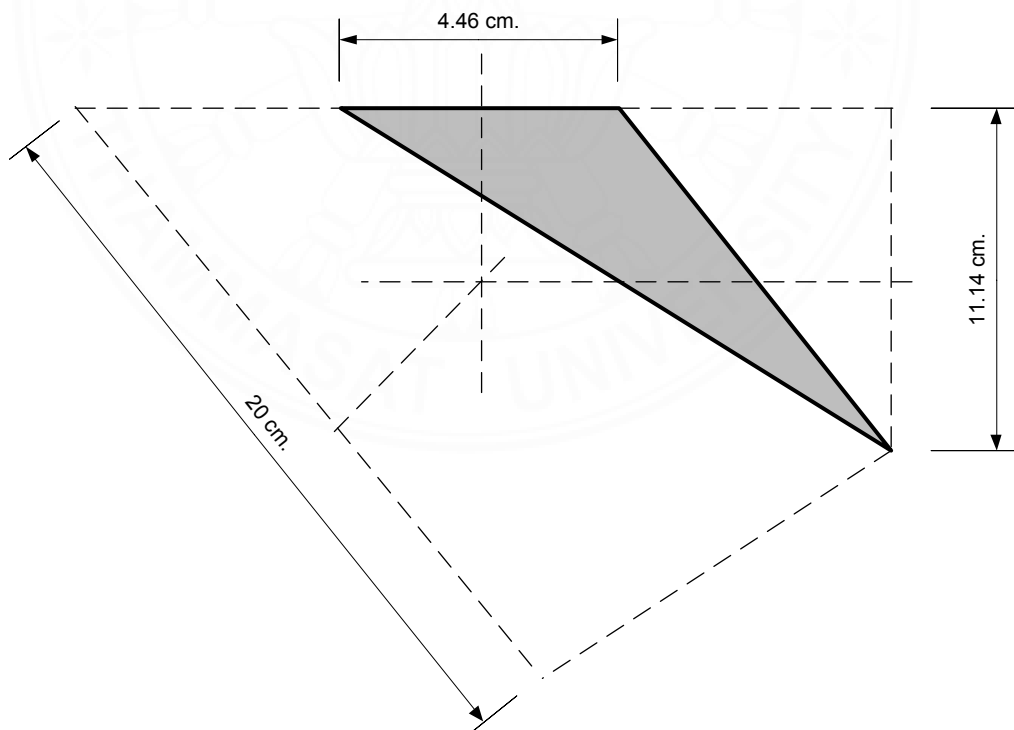
$$\frac{39780}{1 \times 178.5 \times 20} = 11.142 \text{ ซม.}$$

ตรวจสอบรูปร่างของ Truss geometry

พิจารณาว่าที่ Node B และ C เป็น Node ที่มีการขยายออก (Extend nodal zone)

ความกว้างของ Nodal zone ส่วนบน

$$\frac{15910}{1 \times 178.5 \times 20} = 4.46 \text{ ซม.}$$



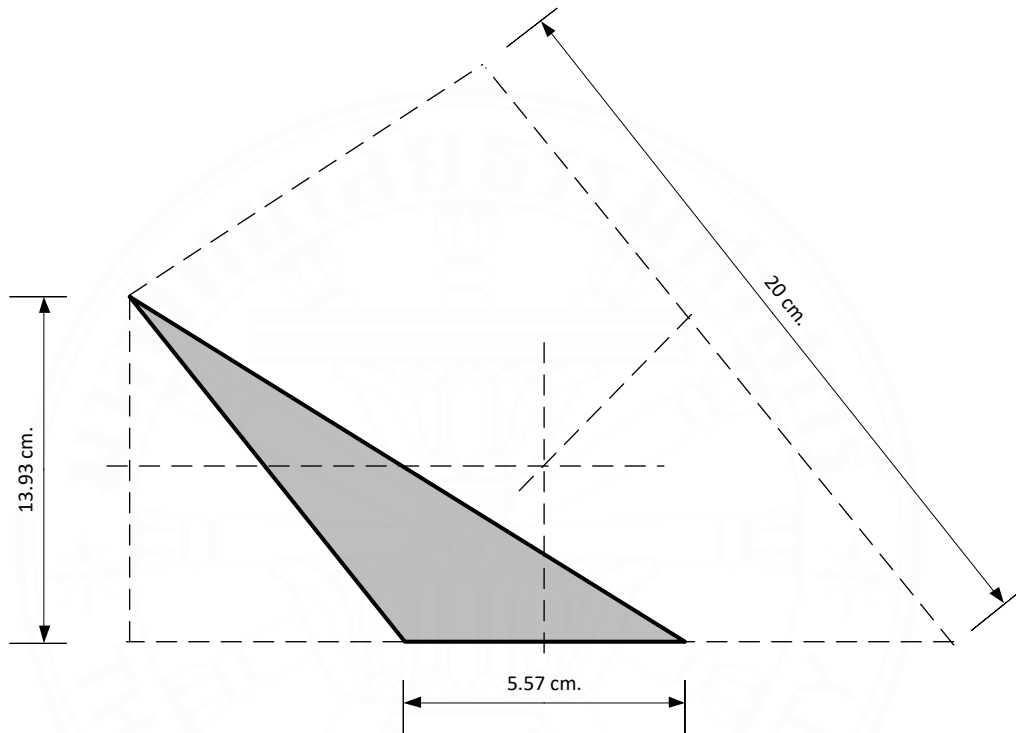
ภาพที่ ข.2.3 รูปร่างของ Node B และ C

ตรวจสอบความกว้างของ Strut

$$\frac{42840}{1 \times 107.1 \times 20} = 20.00 \text{ ซม.}$$

ความกว้างของจุดรองรับที่ Node A และ D เท่ากับ

$$\frac{15910}{1 \times 142.8 \times 20} = 5.571 \text{ ซม.}$$



ภาพที่ ข.2.4 รูปร่างของ Node A และ D

ขนาดของ Node สำหรับรับแรงดึงใน Tie

$$\frac{39780}{1 \times 142.8 \times 20} = 13.93 \text{ ซม.}$$

ขนาดของหน่วยแรงใน Tie มีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงดึงที่จุดคราก

$$\frac{39780}{6 \times 3.14} = 2,111.25 \text{ ksc.} < 4,000 \text{ ksc.}$$

จากการคำนวณพบว่าคานจะมีการวิบัติเนื่องจากหน่วยแรงใน Strut แนวทแยงมีค่ามากกว่ากำลังรับแรงอัดประสิทธิผล โดยมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย 31.82 ตัน

ปริมาณเหล็กเสริมในแนวตั้งต่ำสุดในคาน

$$\text{มีการเสริมเหล็กในแนวตั้งน้อยกว่าสมการ } \sum \frac{A_{si}}{b_s s_i} \sin \alpha_i \geq 0.003$$

โดยใช้เหล็กปลอกขนาด RB6 ระยะเรียงเท่ากับ 20 ซม.

$$\frac{2 \times 0.28}{20 \times 20} \sin 62.62 = 0.00125 < 0.003$$

$$\begin{aligned} \text{Nominal tensile strength of a tie, } F_{nt} &= A_{ts} f_y \\ &= 18.84 \times 4,000 \\ &= 75,360 \text{ kg.} > F_u = 39,780 \text{ kg.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Normal compressive strength, } F_{ns} &= A_{cs} f_{ce} \\ &= 20 \times 20 \times 107.1 \\ &= 42,840 \text{ kg.} = F_u = 42,840 \text{ kg.} \end{aligned}$$

ภาคผนวก ค.

การออกแบบคานตัวอย่างที่เสริมเหล็กรับแรงเฉือน

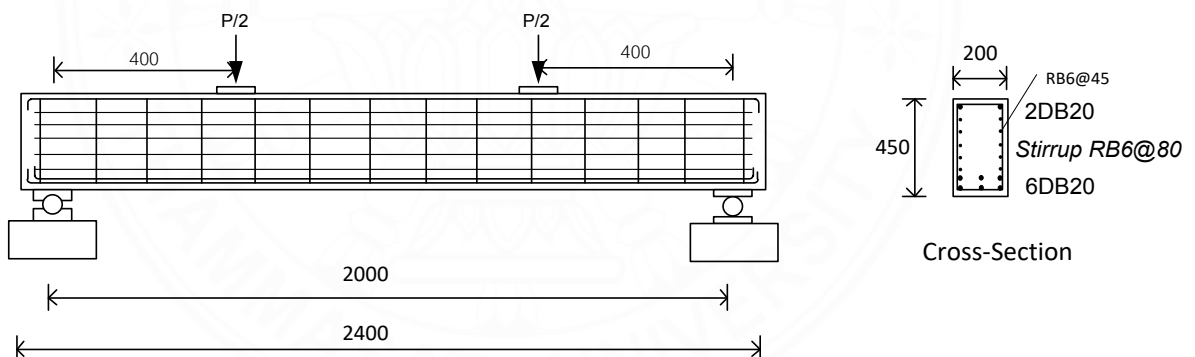
เพียงพอเท่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด

โดยใช้แบบจำลอง Strut and tie ตามมาตรฐาน ACI 318-19

ค.1 วิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของคาน

ที่มีช่วงการเฉือนต่อความลึกประลัยเท่ากับ 1.00

คานมีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนอย่างเพียงพอเท่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด ที่จุดฐานรองรับ และบริเวณที่น้ำหนักกระทำทั้งหมดมีแผ่นเหล็กกว้าง 30 ซม.หนา 2.5 ซม. ยาวตลอดความกว้างของหน้าตัดคาน สมมติ Node อยู่บริเวณกึ่งกลางของบริเวณที่น้ำหนักบรรทุกกระทำและฐานรองรับ และอยู่ห่างจากขอบบนและล่างเท่ากับ 6.5 ซม.



รูป ค.1.1 รายละเอียดคานเสริมเหล็กรับแรงเฉือนเพียงพอเท่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด เมื่อ $a/d = 1.00$

คำนวณกำลังประลัยใน Strut

พิจารณาว่า Strut A-B และ Strut C-D มีรูปร่างเป็น Bottle shape ที่มีการเสริมเหล็กในแนวตั้งและแนวนอนน้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด คำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต, f_{ce} มีค่า

$$f_{ce} = 0.85\beta_s f'_c = 0.85 \times 0.75 \times 210 = 133.875 \text{ ksc.}$$

การคำนวณกำลังประสิทธิภาพใน Nodal zone

คำนวณกำลังรับแรงอัดประสิทธิภาพของคอนกรีตใน Nodal Zone, f_{ce} Node A และ D ล้อมด้วย Strut, Bearing area และ Tie เป็นแบบ CCT Node

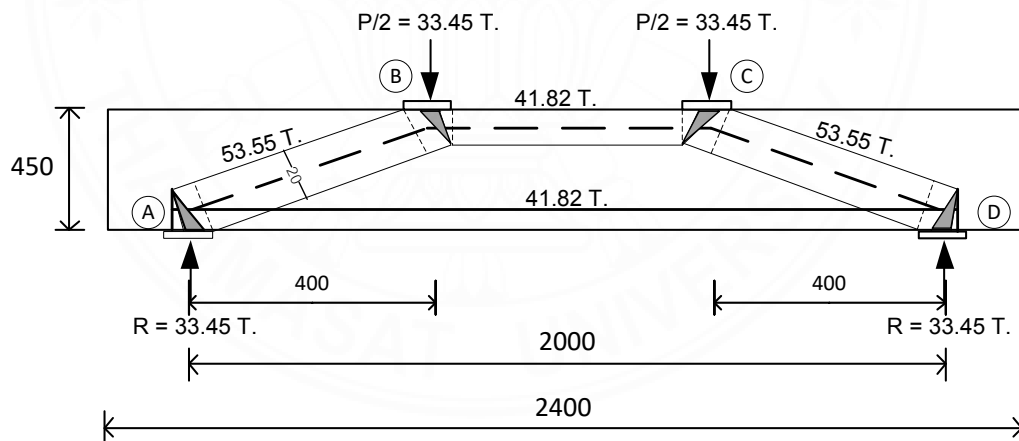
$$f_{ce} = 0.85\beta_n f'_c = 0.85 \times 0.80 \times 210 = 142.8 \text{ ksc.}$$

Node B และ C ล้อมรอบด้วย Strut และ Bearing area เป็นแบบ CCC Node

$$f_{ce} = 0.85\beta_n f'_c = 0.85 \times 1 \times 210 = 178.5 \text{ ksc.}$$

จากหน้าตัดของคานสามารถหาลำดับสูงสุดของคานได้โดยสมมติว่าคานเกิดการวิบัติเนื่องจากการวิบัติของ Compression strut ในแนวทแยง โดยพิจารณาจากความกว้างของ Strut ที่มากที่สุดที่เป็นไปได้จากขนาดของคานและแผ่นเหล็กที่บริเวณฐานรองรับและบริเวณที่น้ำหนักระทำ สมมติให้ขนาดความกว้างของ strut มีค่าเท่ากับ 20 ซม. Strut ในแนวทแยงเป็นแบบ Bottle shape ที่มีการเสริมเหล็กแนวอนและแนวตั้งน้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด แรงสูงสุดใน strut มีค่า

$$133.8 \times 20 \times 20 / 1000 = 53.55 \text{ ตัน}$$



ภาพที่ ค.1.2 แรงภายในของคานที่มีช่วงการเชื่อมต่อความลึกประสิทธิภาพเท่ากับ 1

ตรวจสอบกำลังที่ Node

จากการกระจายแรง คานมีน้ำหนักรรทุกประลัยเท่ากับ 66.91 ตัน ความกว้างของ Compression strut ในส่วนบน (Prismatic strut) มีค่าเท่ากับ

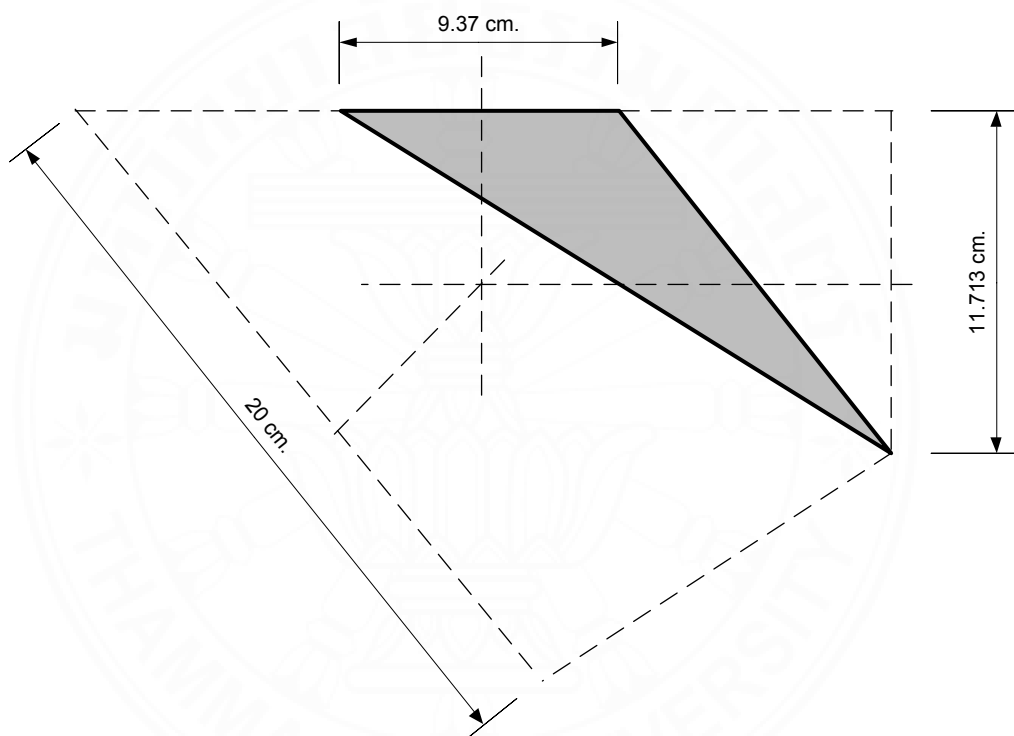
$$\frac{41820}{1 \times 178.5 \times 20} = 11.713 \text{ ซม.}$$

ตรวจสอบรูปร่างของ Truss geometry

พิจารณาว่าที่ Node B และ C เป็น Extend nodal zone

ความกว้างของ Nodal zone ในส่วนบน

$$\frac{33450}{1 \times 178.5 \times 20} = 9.37 \text{ ซม.}$$



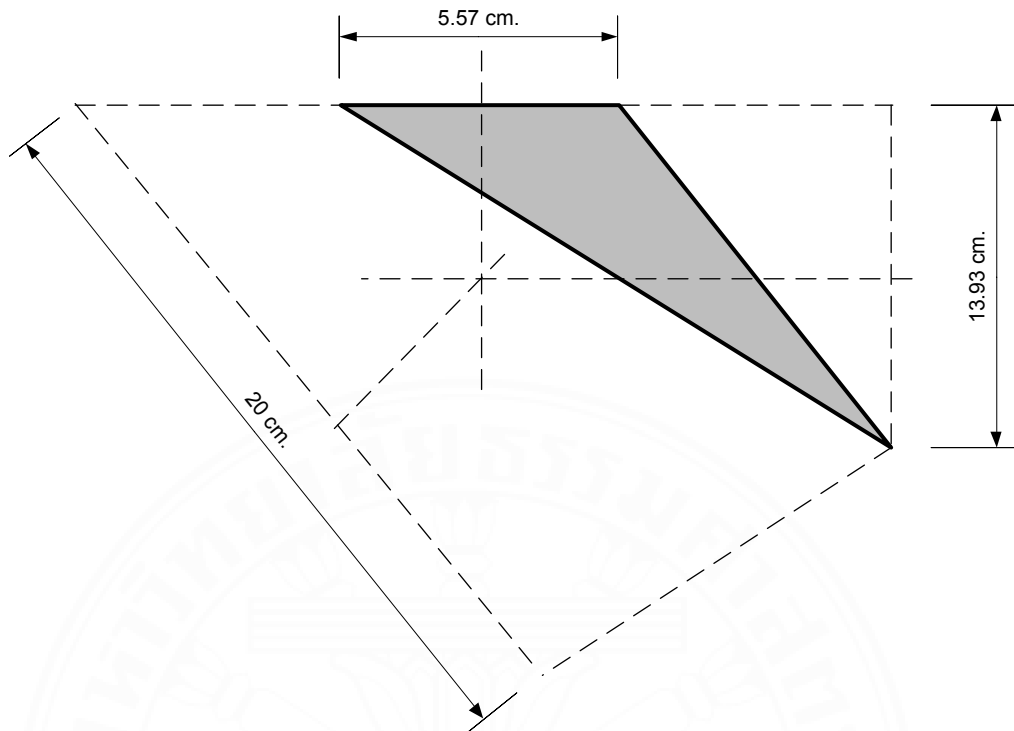
ภาพที่ ค.1.3 รูปร่างของ Node B และ C

ตรวจสอบความกว้างของ Strut

$$\frac{53550}{1 \times 133.875 \times 20} = 20.00 \text{ ซม.}$$

ความกว้างที่ฐานรองรับที่ Node A และ D เท่ากับ

$$\frac{33450}{1 \times 142.8 \times 20} = 11.71 \text{ ซม.}$$



ภาพที่ ค.1.4 รูปร่างของ Node A และ D

ขนาดของ Node สำหรับรับแรงดึงใน Tie

$$\frac{41820}{1 \times 142.8 \times 20} = 14.64 \text{ ซม.}$$

ขนาดของหน่วยแรงใน Tie มีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงดึงที่จุดคราก

$$\frac{41820}{6 \times 3.14} = 2,219.508 \text{ ksc.} < 4,000 \text{ ksc.}$$

จากสมมติฐานที่ว่าคานจะวิบัติเนื่องจากหน่วยแรงใน Strut ในแนวทแยงมีค่ามากกว่ากำลังรับแรงอัดประสิทธิภาพเป็นจริง โดยมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเฉลี่ย 66.91 ตัน

ปริมาณเหล็กเสริมใน tension tie

$$A_s = \frac{F_u}{\phi f_y} = \frac{41820}{1 \times 4000} = 10.45 \text{ cm}^2$$

$$\text{ปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด} = 2.8 \text{ cm}^2$$

เลือกใช้เหล็ก DB20 จำนวน 6 เส้น มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 18.84 cm^2

ปริมาณเหล็กเสริมในแนวตั้งและแนวนอนต่ำสุดในคาน

$$\text{มีการเสริมเหล็กในแนวตั้งและแนวนอนตามสมการ } \sum \frac{A_{si}}{b_s S_i} \sin \alpha_i \geq 0.003$$

โดยใช้เหล็กปลอกแนวตั้งขนาด RB6 ระยะเรียงเท่ากับ 8 ซม.

$$\frac{2 \times 0.28}{8 \times 20} \sin 74.19 = 0.0034 > 0.003$$

และใช้เหล็กแนวนอนขนาด RB6 ระยะเรียงเท่ากับ 4.5 ซม.

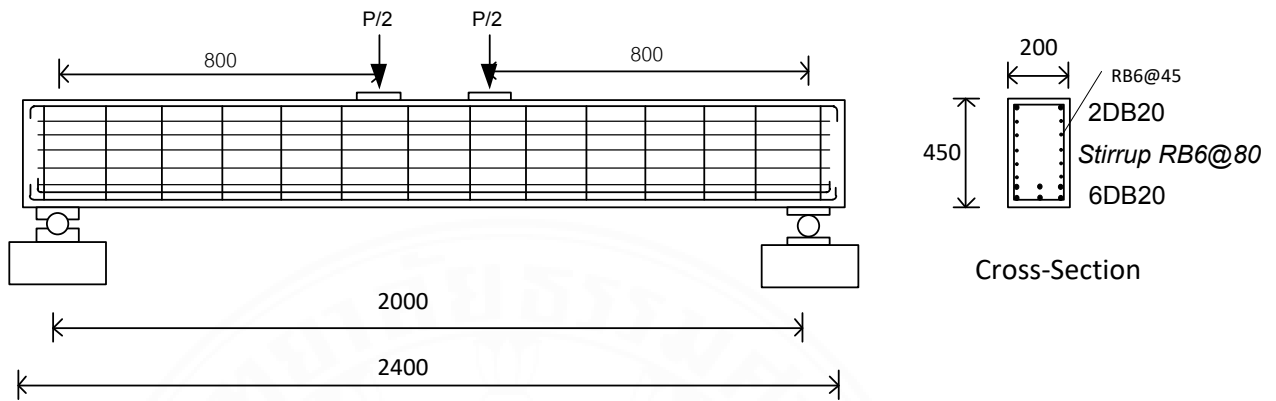
$$\frac{2 \times 0.28}{5 \times 20} \sin 15.81 = 0.00171 < 0.003$$

$$\text{รวมปริมาณเหล็กเสริมคานการแตกร้า} = 0.00511 > 0.003$$

$$\begin{aligned} \text{Nominal tensile strength of a tie, } F_{nt} &= A_{ts} f_y \\ &= 18.84 \times 4,000 \\ &= 75,360 \text{ kg. } > F_u = 41,820 \text{ kg.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Normal compressive strength, } F_{ns} &= A_{cs} f_{ce} \\ &= 20 \times 20 \times 133.8 \\ &= 53,550 \text{ kg. } = F_u = 53,550 \text{ kg.} \end{aligned}$$

ค.2 วิเคราะห์คานที่มีช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 2.00

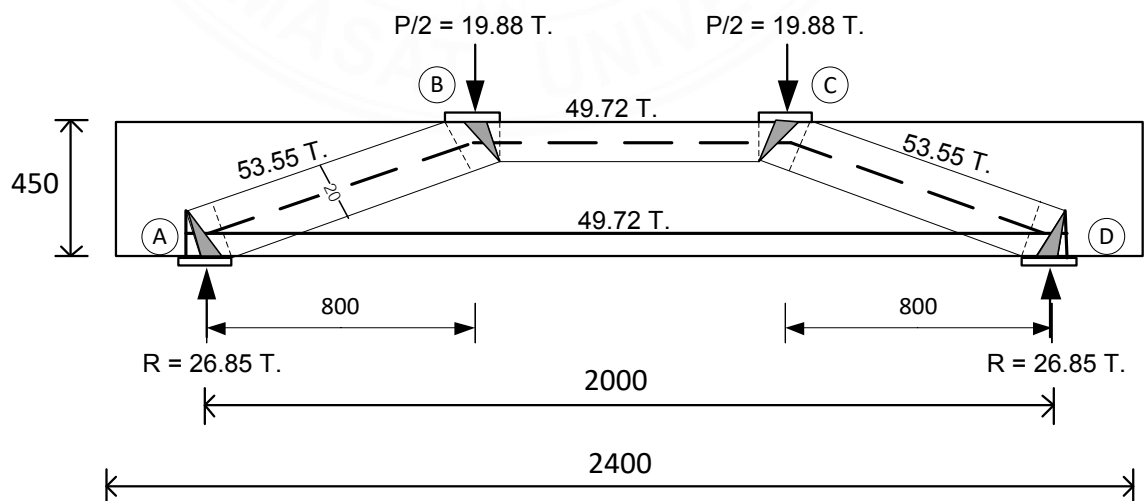


รูป ค.2.1 รายละเอียดคานเสริมเหล็กรับแรงเฉือนเพียงพอเท่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด เมื่อ $a/d = 2.00$

สร้างแบบจำลอง Strut and tie และคำนวณหาแรงภายใน

พิจารณาจากความกว้างของ Strut ที่มากที่สุดที่เป็นไปได้จากขนาดของคานและแผ่นเหล็กที่บริเวณฐานรองรับและบริเวณที่น้ำหนักกระทำ สมมติให้ขนาดความกว้างของ strut มีค่าเท่ากับ 20 ซม. Strut ในแนวทแยงเป็นแบบ Bottle shape ที่มีการเสริมเหล็กแนวนอนและแนวตั้งน้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด แรงสูงสุดใน strut มีค่า

$$133.8 \times 20 \times 20 / 1000 = 53.55 \text{ ตัน}$$



รูป ค.2.2 แบบจำลองการถ่ายแรงของคานที่มีช่วงการเฉือนต่อความลึกเท่ากับ 2

ตรวจสอบกำลังที่ Node

จากการกระจายแรง คานมีน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยเท่ากับ 39.78 ตัน ความกว้างของ Compression strut ในส่วนบน (Prismatic strut) มีค่าเท่ากับ

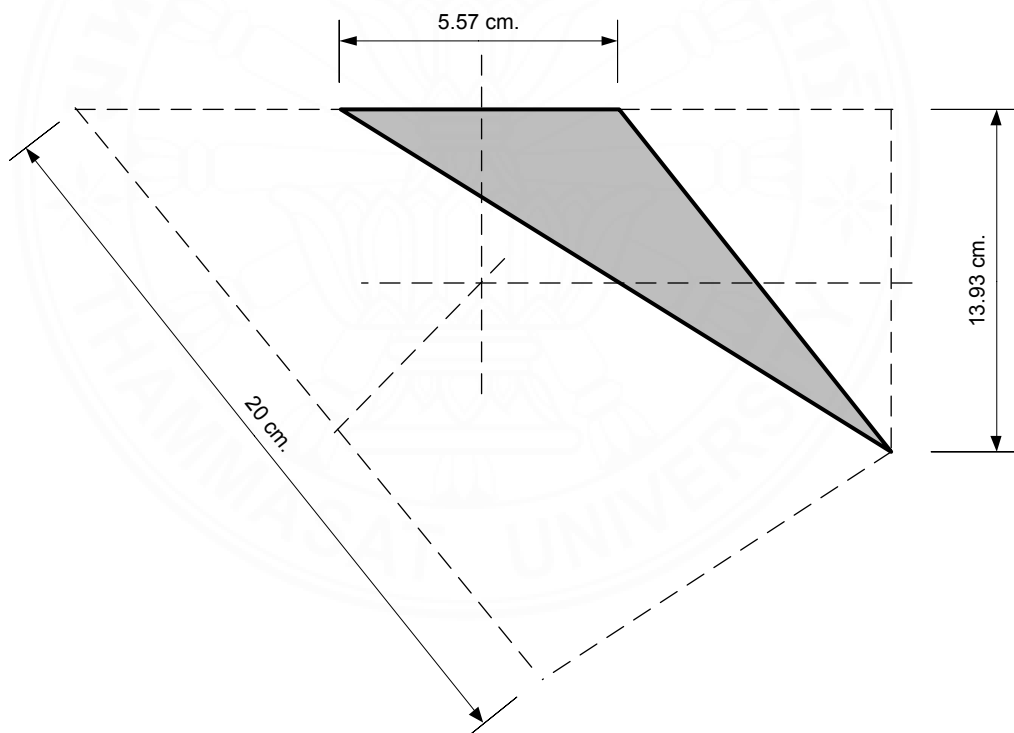
$$\frac{49720}{1 \times 178.5 \times 20} = 13.927 \text{ ซม.}$$

ตรวจสอบรูปร่างของ Truss geometry

พิจารณาว่าที่ Node B และ C เป็น Node ที่มีการขยายออก (Extend nodal zone)

ความกว้างของ Nodal zone ส่วนบน

$$\frac{19890}{1 \times 178.5 \times 20} = 5.57 \text{ ซม.}$$



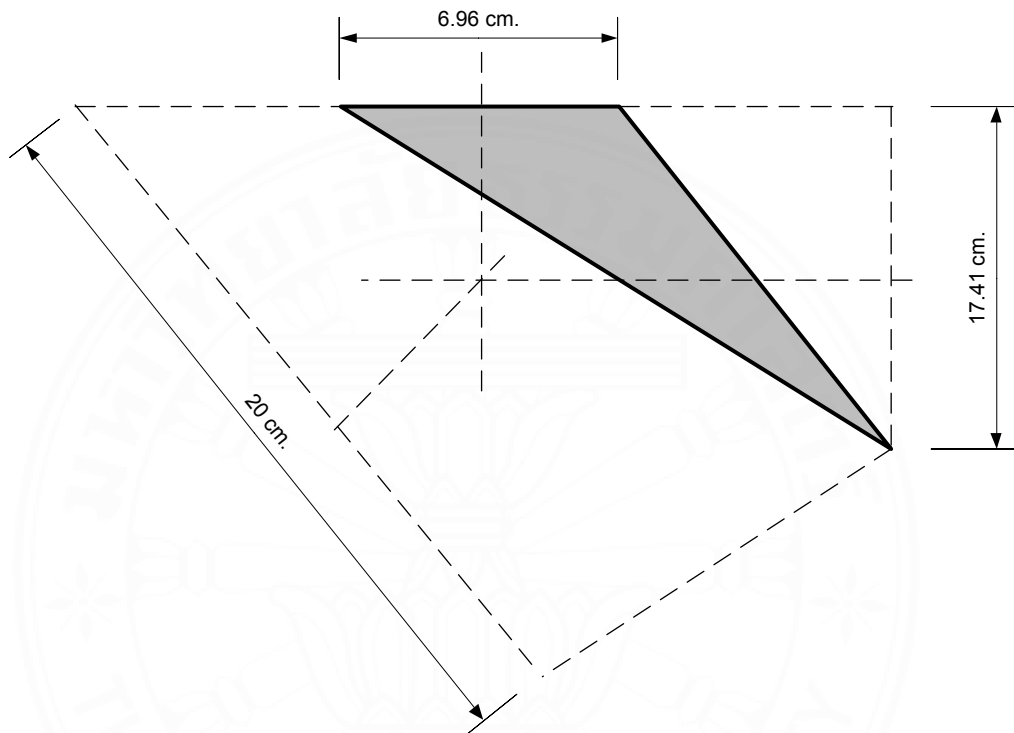
ภาพที่ ค.2.3 รูปร่างของ Node B และ C

ตรวจสอบความกว้างของ Strut

$$\frac{53550}{1 \times 133.8 \times 20} = 20.00 \text{ ซม.}$$

ความกว้างของจุดรองรับที่ Node A และ D เท่ากับ

$$\frac{19890}{1 \times 142.8 \times 20} = 6.96 \text{ ซม.}$$



ภาพที่ ค.2.4 รูปร่างของ Node A และ D

ขนาดของ Node สำหรับรับแรงดึงใน Tie

$$\frac{49720}{1 \times 142.8 \times 20} = 17.41 \text{ ซม.}$$

ขนาดของหน่วยแรงใน Tie มีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงดึงที่จุดคราก

$$\frac{49720}{6 \times 3.14} = 2,639.062 \text{ ksc.} > 4,000 \text{ ksc.}$$

จากการคำนวณพบว่าคานอาจจะมีการวิบัติเนื่องจากหน่วยแรงใน Tension tie มีค่ามากกว่ากำลังรับแรงดึงประสิทธิผล โดยมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย 39.776 ตัน

ปริมาณเหล็กเสริมในแนวตั้งและแนวนอนต่ำสุดในคาน

$$\text{มีการเสริมเหล็กในแนวตั้งและแนวนอนตามสมการ } \sum \frac{A_{si}}{b_s S_i} \sin \alpha_i \geq 0.003$$

โดยใช้เหล็กปลอกแนวตั้งขนาด RB6 ระยะเรียงเท่ากับ 8 ซม.

$$\frac{2 \times 0.28}{8 \times 20} \sin 69.47 = 0.00331 > 0.003$$

และใช้เหล็กแนวนอนขนาด RB6 ระยะเรียงเท่ากับ 4.5 ซม.

$$\frac{2 \times 0.28}{5 \times 20} \sin 20.53 = 0.0022 < 0.003$$

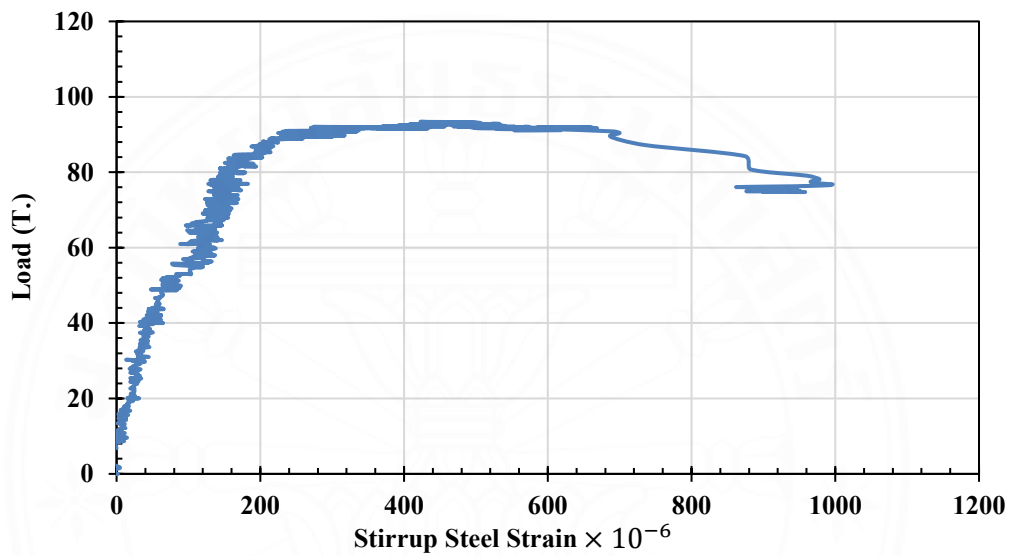
$$\text{รวมปริมาณเหล็กเสริมคุมการแตกร้า} = 0.0055 > 0.003$$

$$\begin{aligned} \text{Nominal tensile strength of a tie, } F_{nt} &= A_{ts} f_y \\ &= 18.84 \times 4,000 \\ &= 75,360 \text{ kg.} < F_u = 49,720 \text{ kg.} \end{aligned}$$

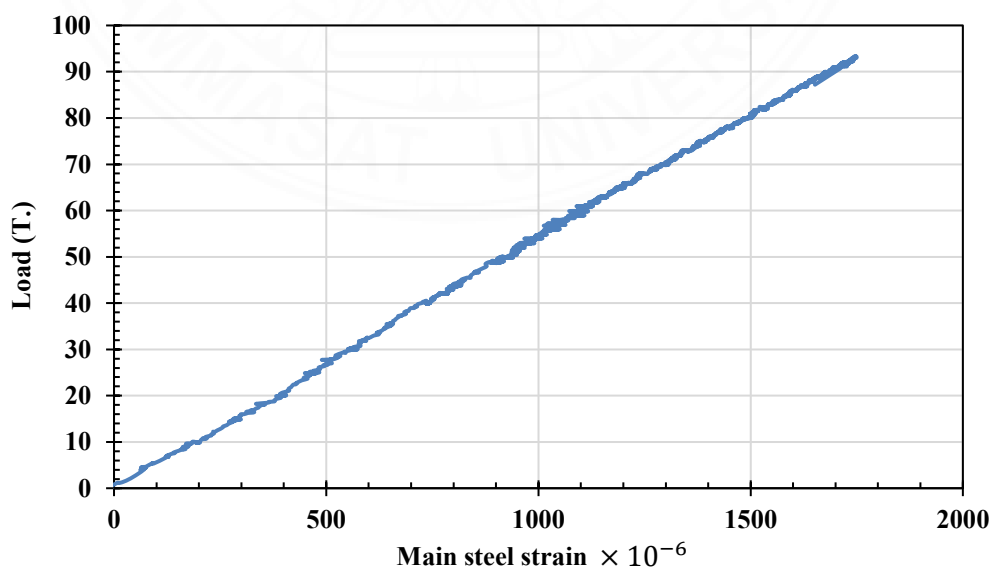
$$\begin{aligned} \text{Normal compressive strength, } F_{ns} &= A_{cs} f_{ce} \\ &= 20 \times 20 \times 133.8 \\ &= 53,550 \text{ kg.} = F_u = 53,550 \text{ kg.} \end{aligned}$$

ภาคผนวก ง.

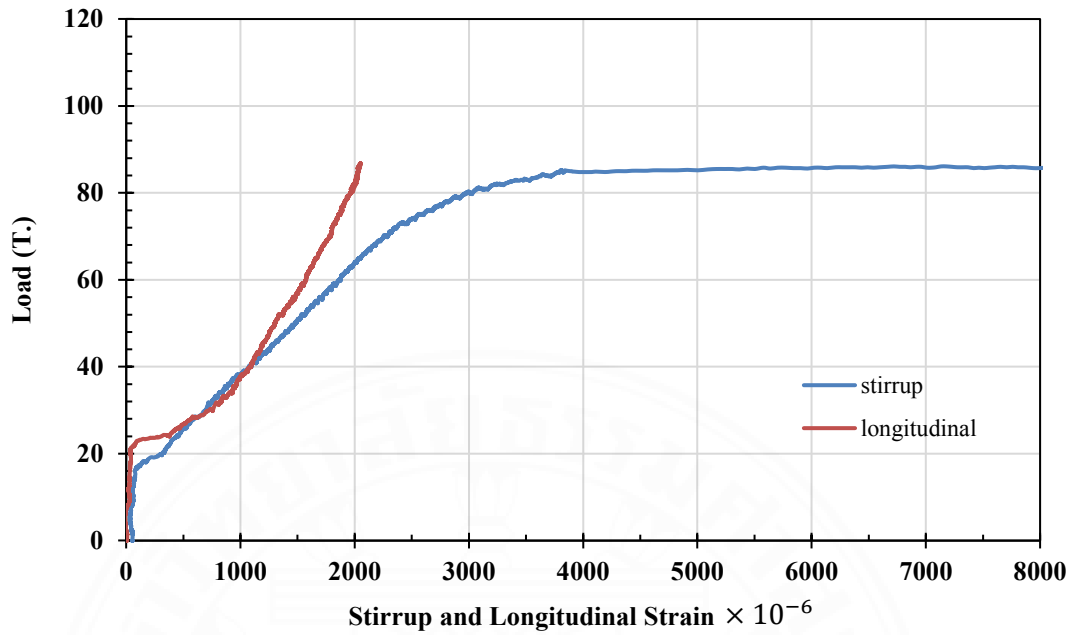
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน
เหล็กเสริมรับแรงดึง และแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์



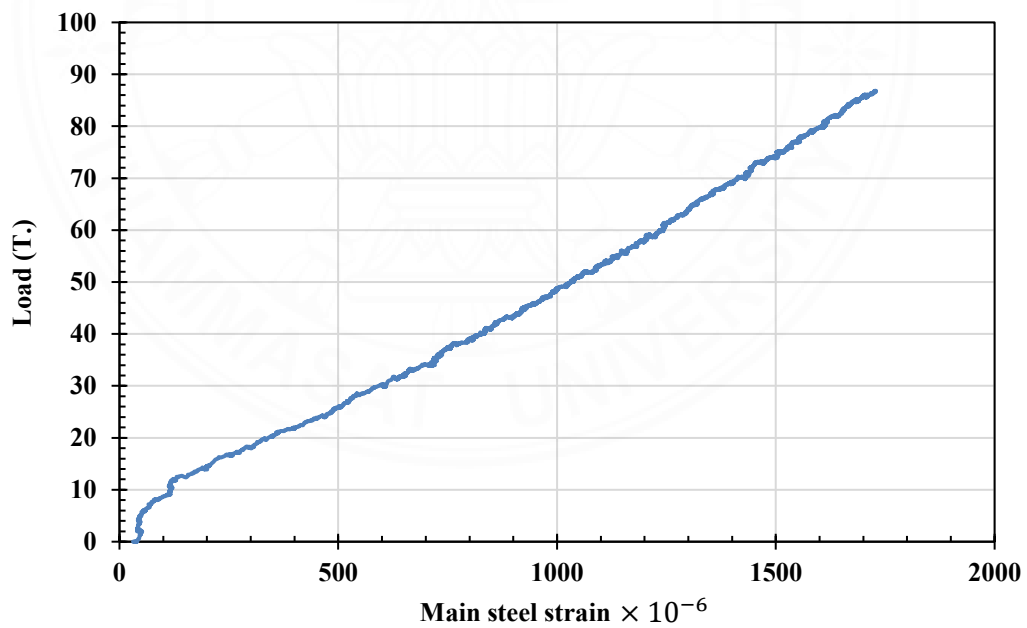
ภาพที่ ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กปลอกของคาน BR1



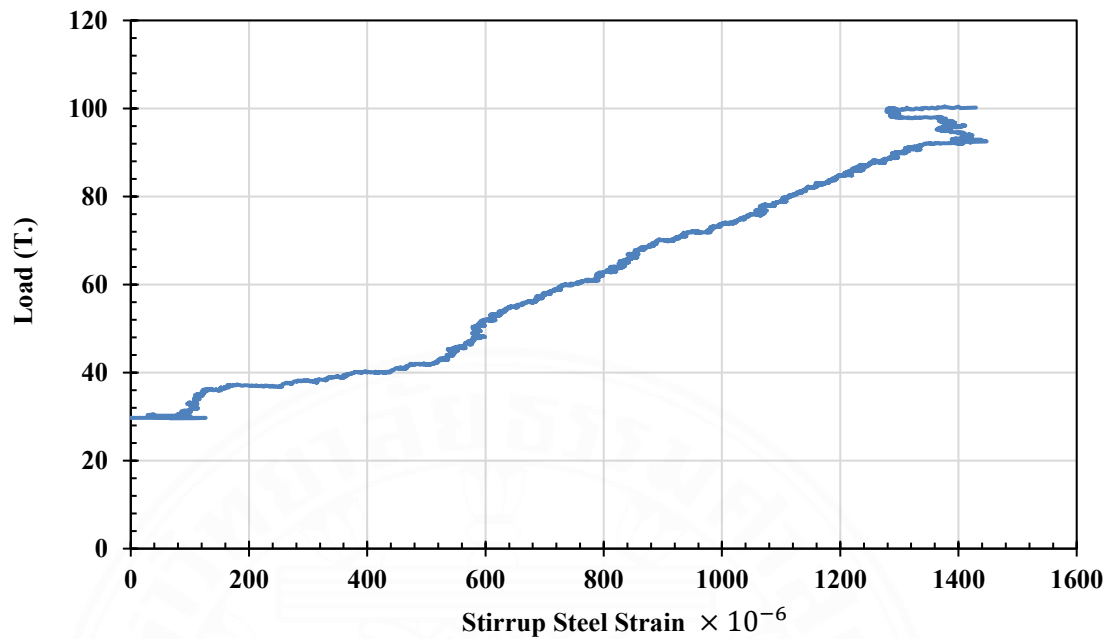
ภาพที่ ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กรับแรงดึงของคาน BR1



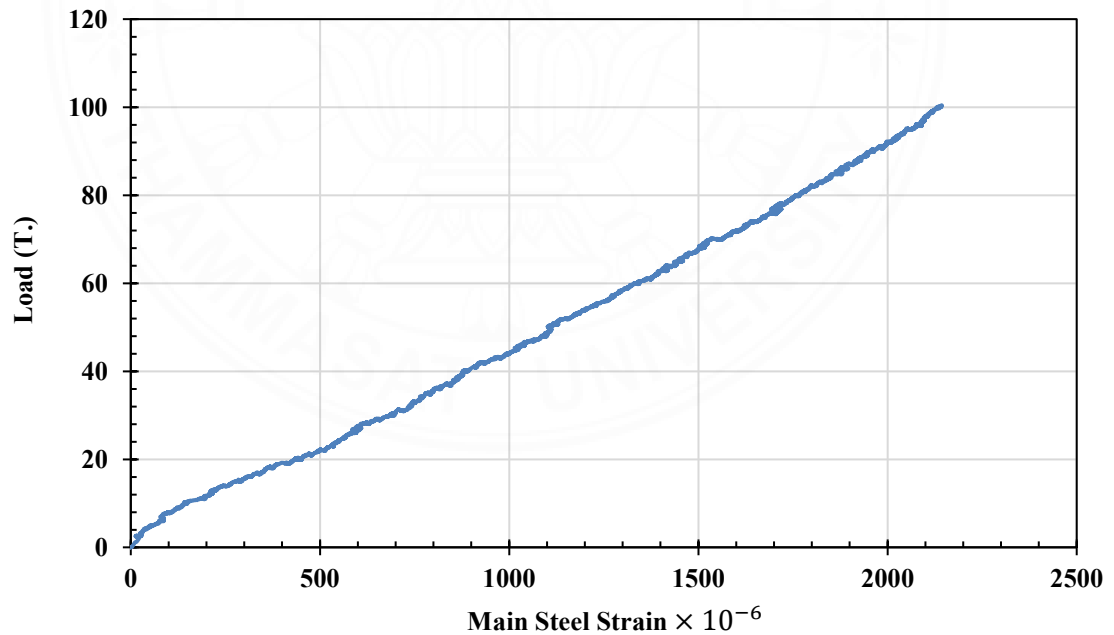
ภาพที่ ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กปลอกของคาน BM1



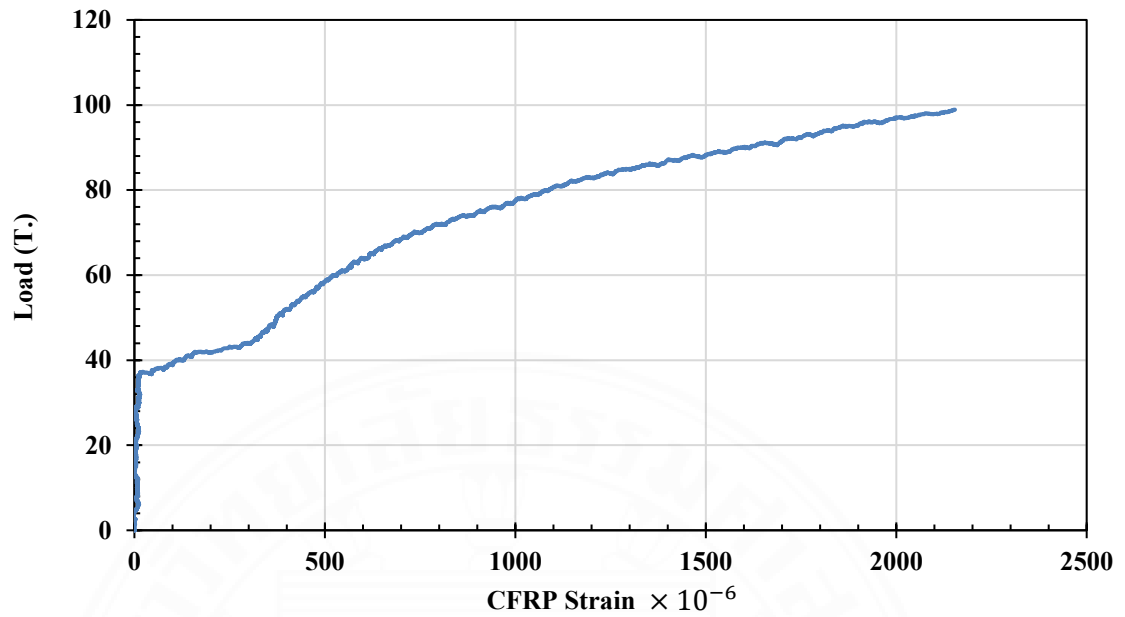
ภาพที่ ค.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กรับแรงดึงของคาน BM1



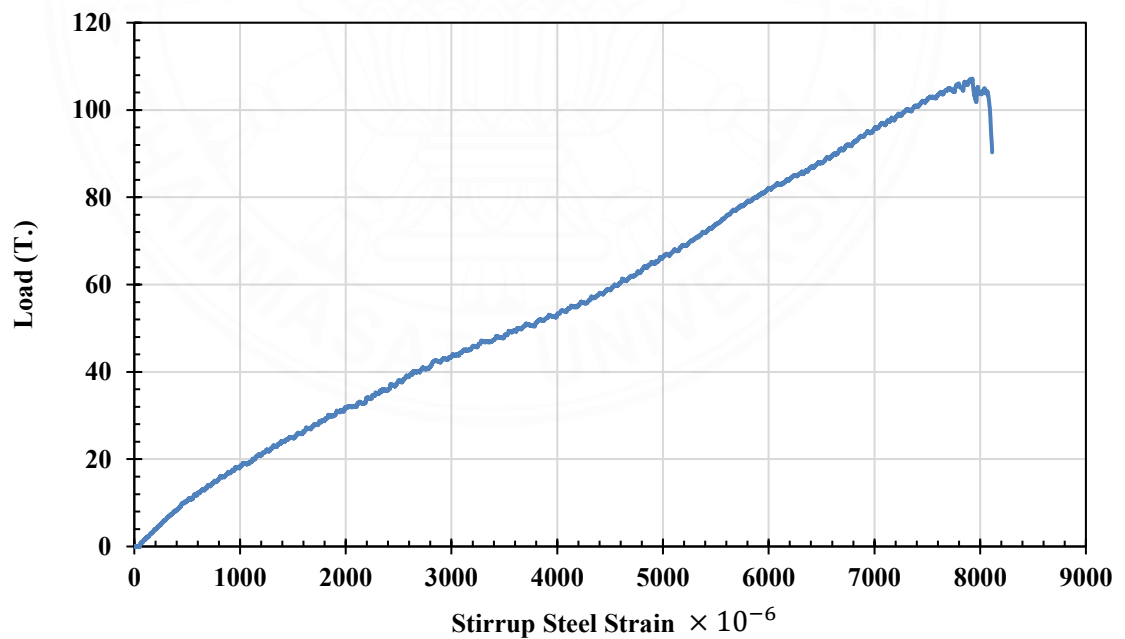
ภาพที่ ค.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กปลอกของคาน B1U



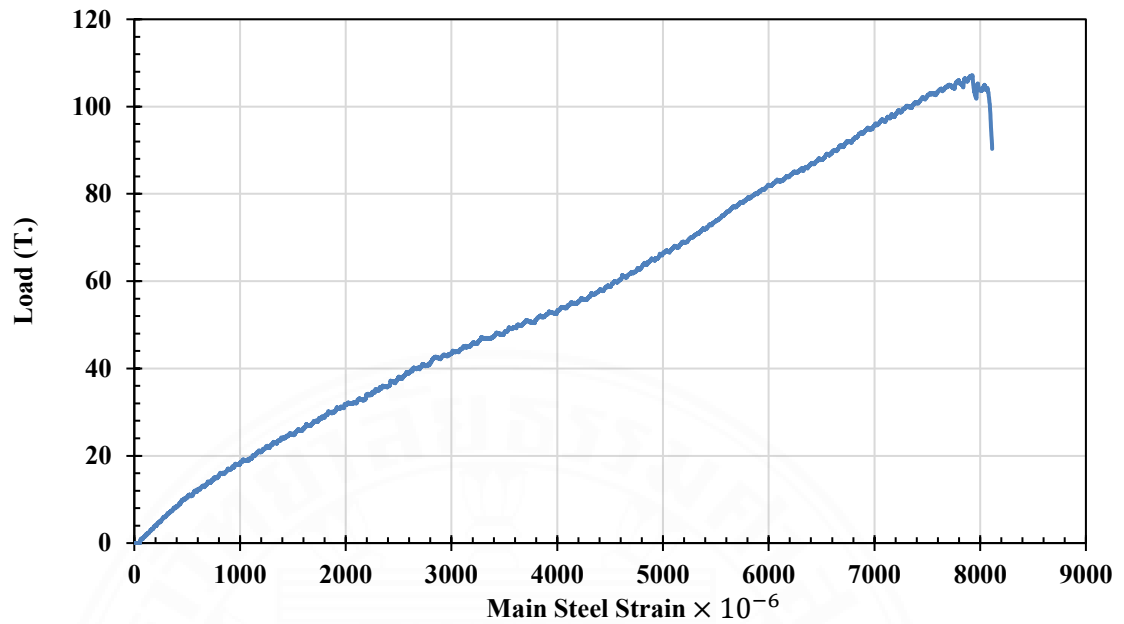
ภาพที่ ค.6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กรับแรงดึงของคาน B1U



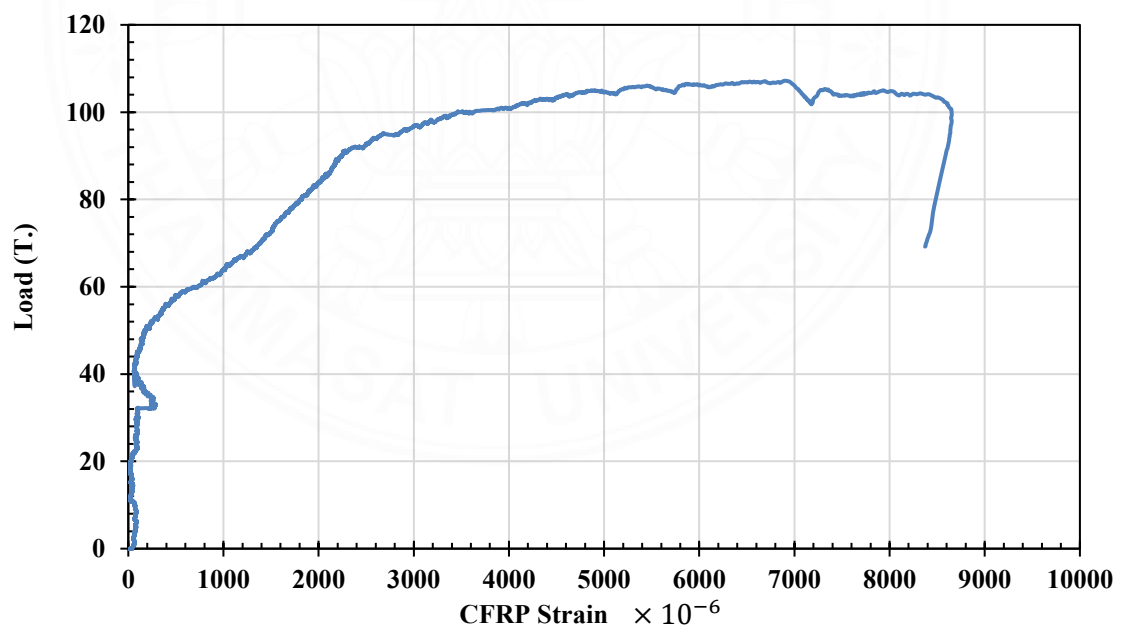
ภาพที่ ค.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ของคาน B1U



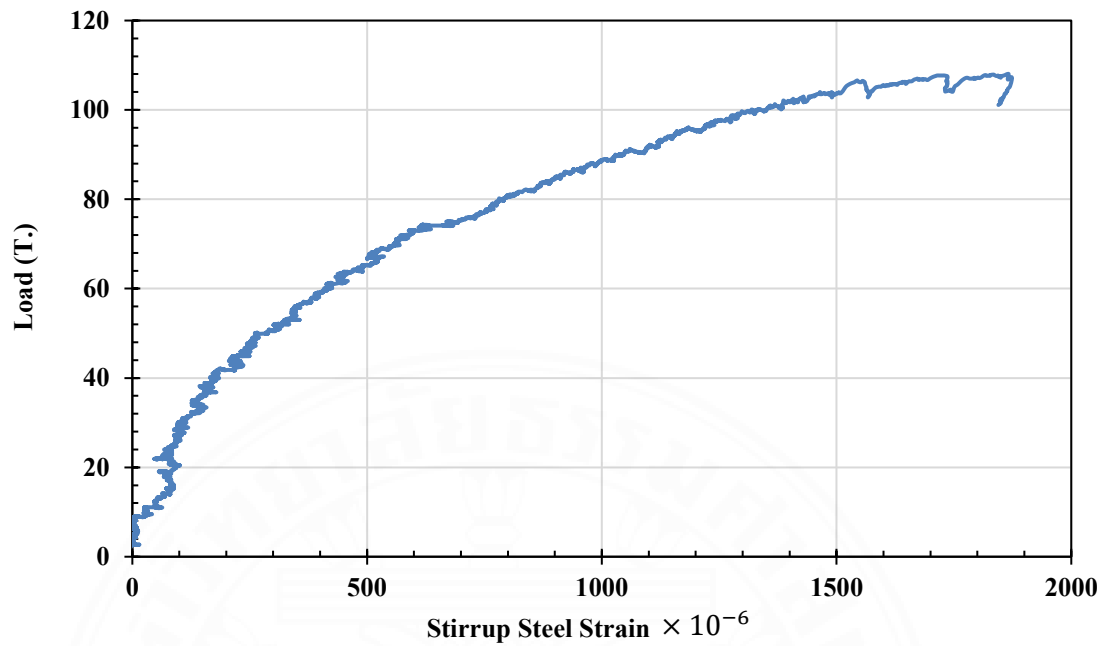
ภาพที่ ค.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กปลอกของคาน B1F



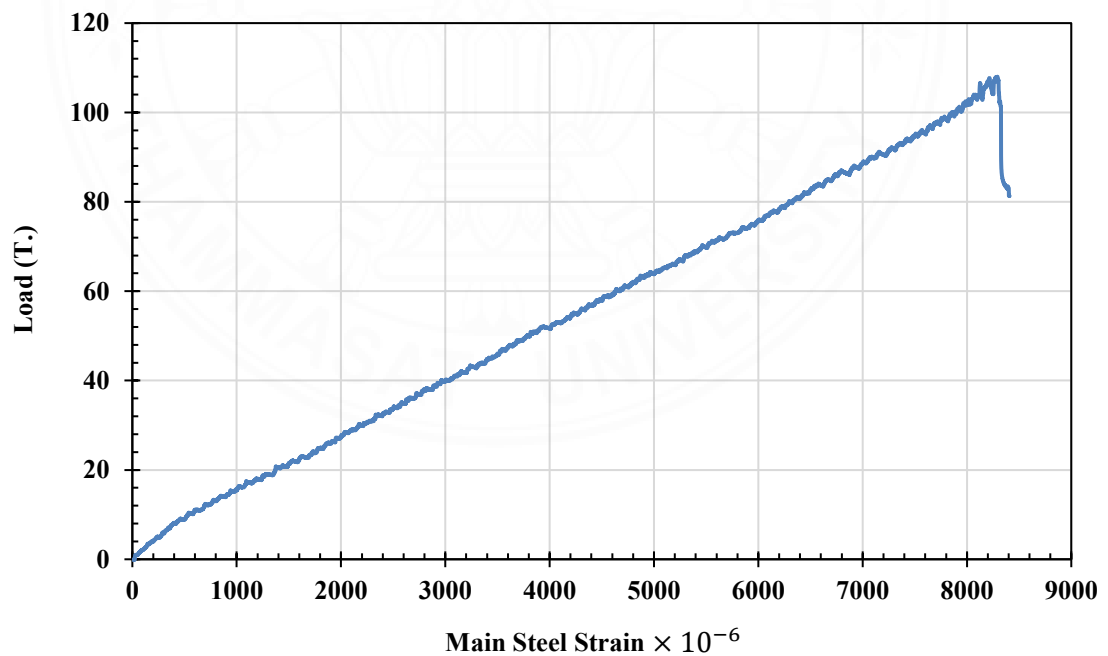
ภาพที่ ค.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กรับแรงดึงของคาน B1F



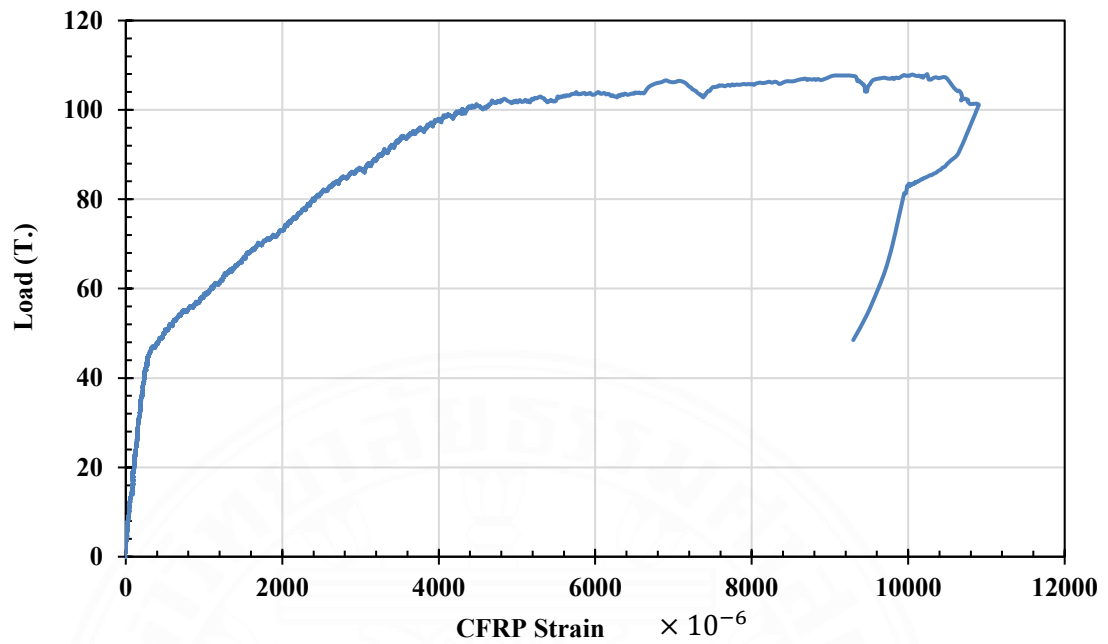
ภาพที่ ค.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ของคาน B1F



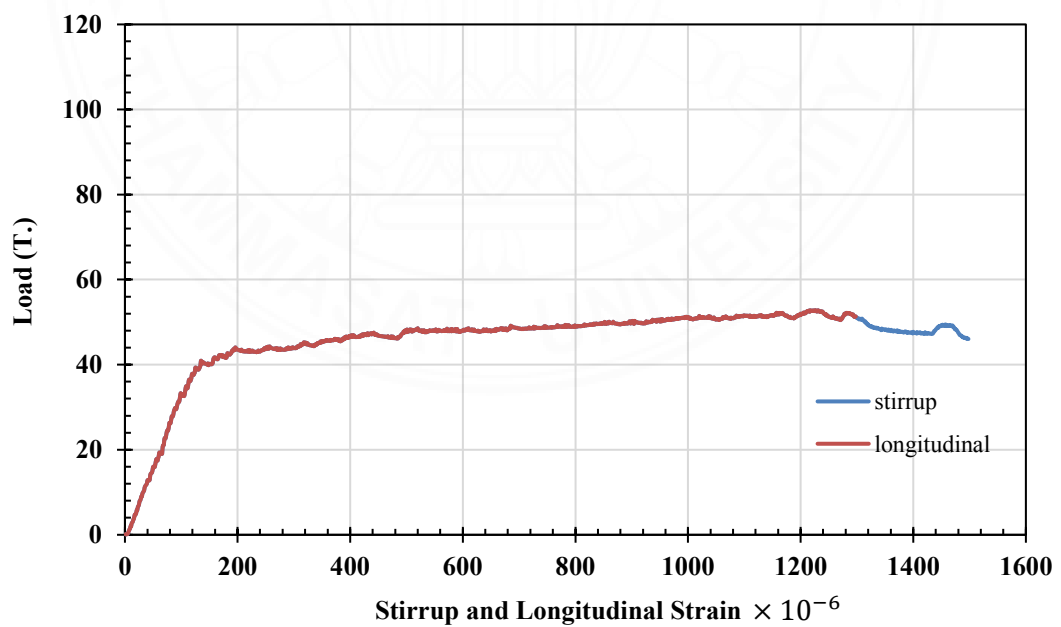
ภาพที่ ค.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กปลอกของคาน B1DF



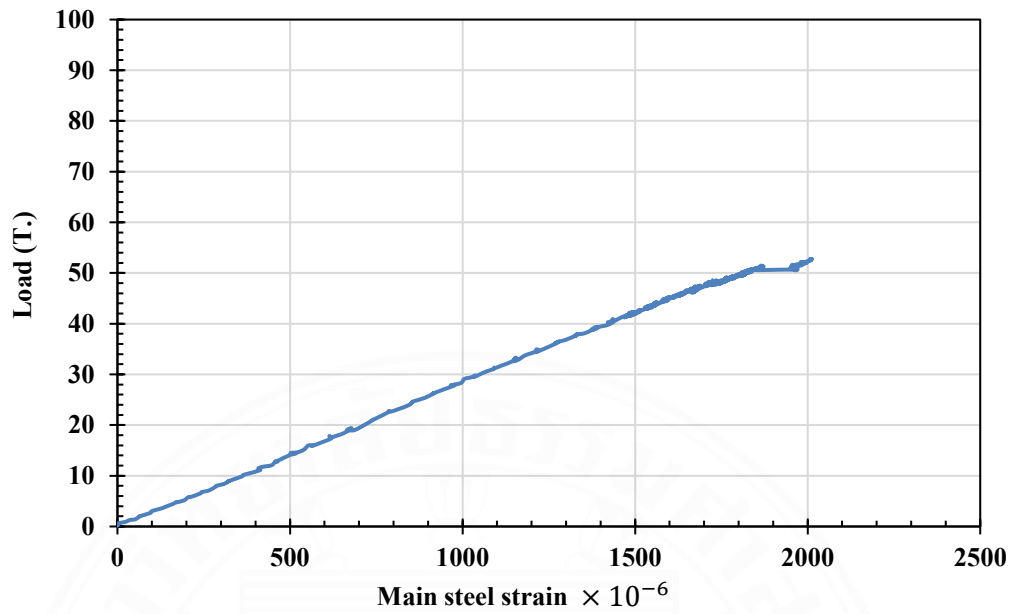
ภาพที่ ค.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กรับแรงดึงของคาน B1DF



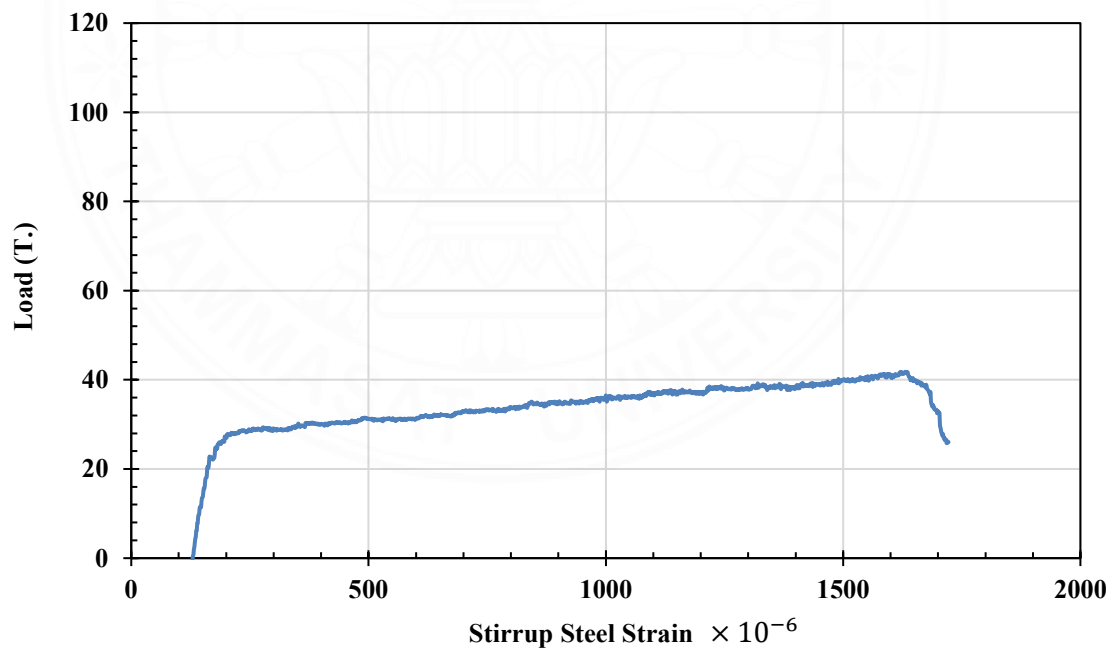
ภาพที่ ค.13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ของคาน B1DF



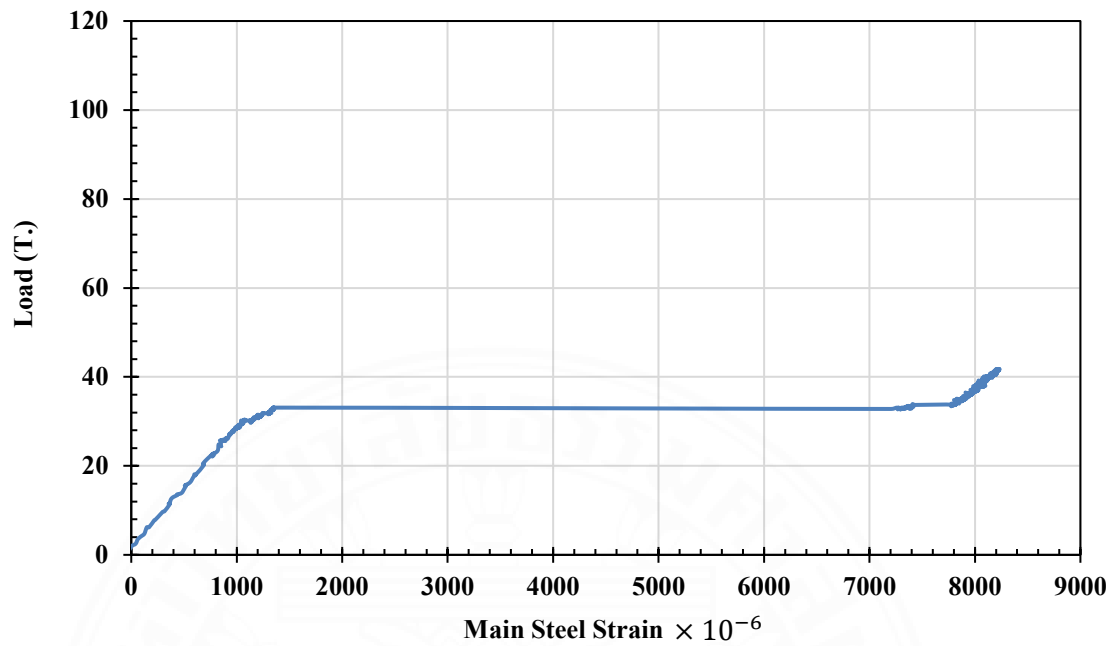
ภาพที่ ค.14 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กปลอกของคาน BM2



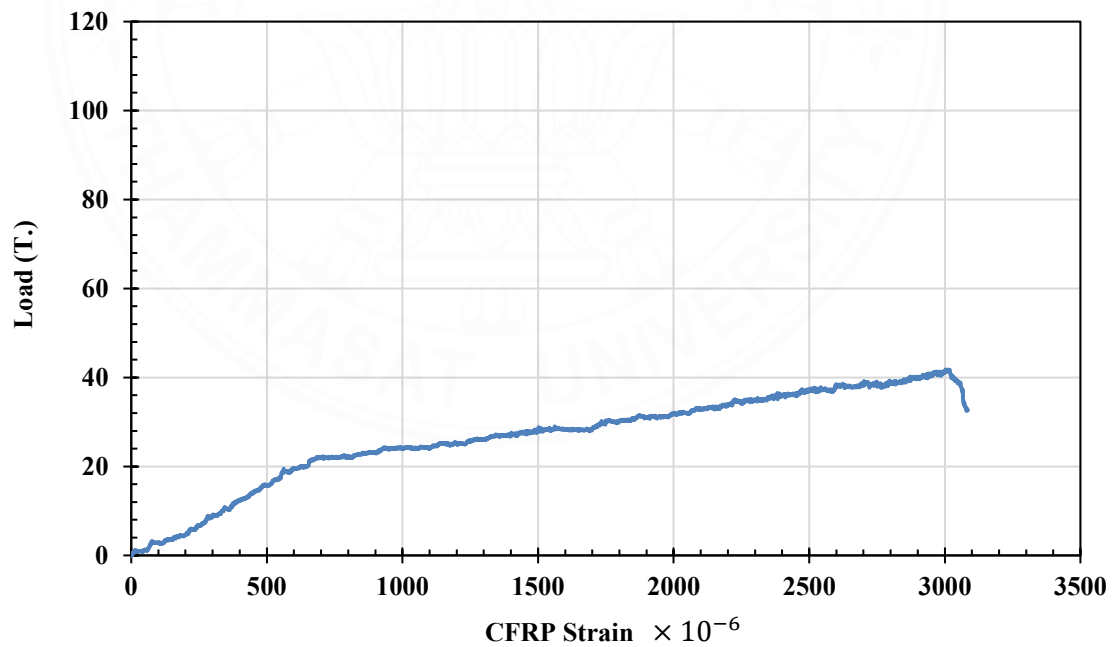
ภาพที่ ค.15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กรับแรงดึงของคาน BM2



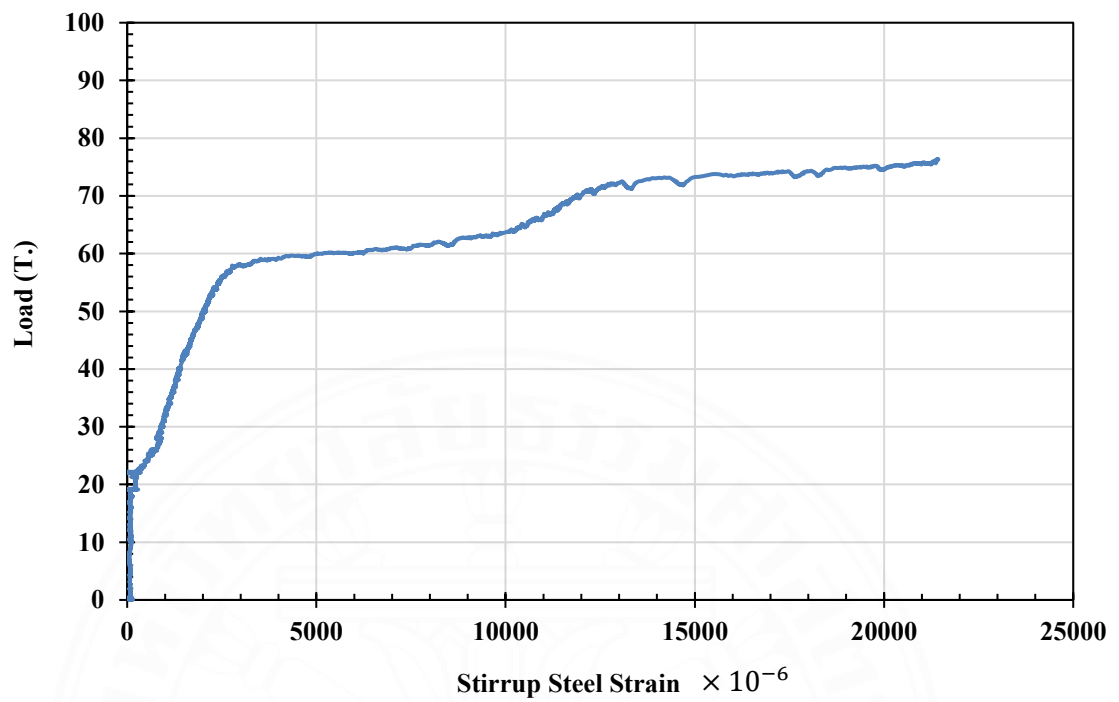
ภาพที่ ค.16 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กปลอกของคาน B2U



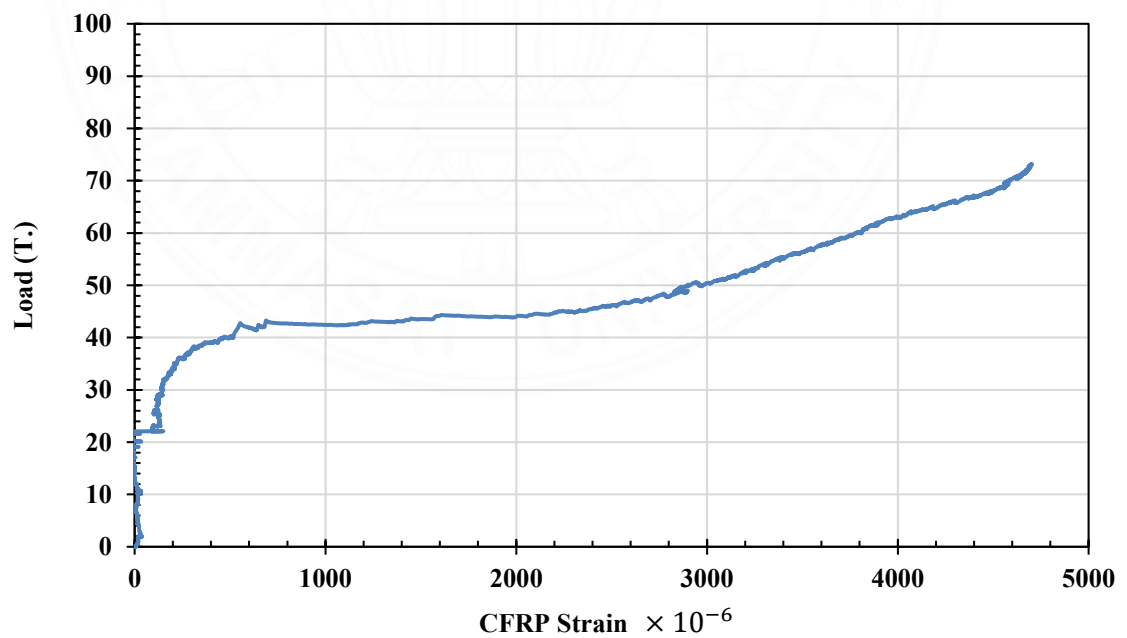
ภาพที่ ค.17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กรับแรงดึงของคาน B2U



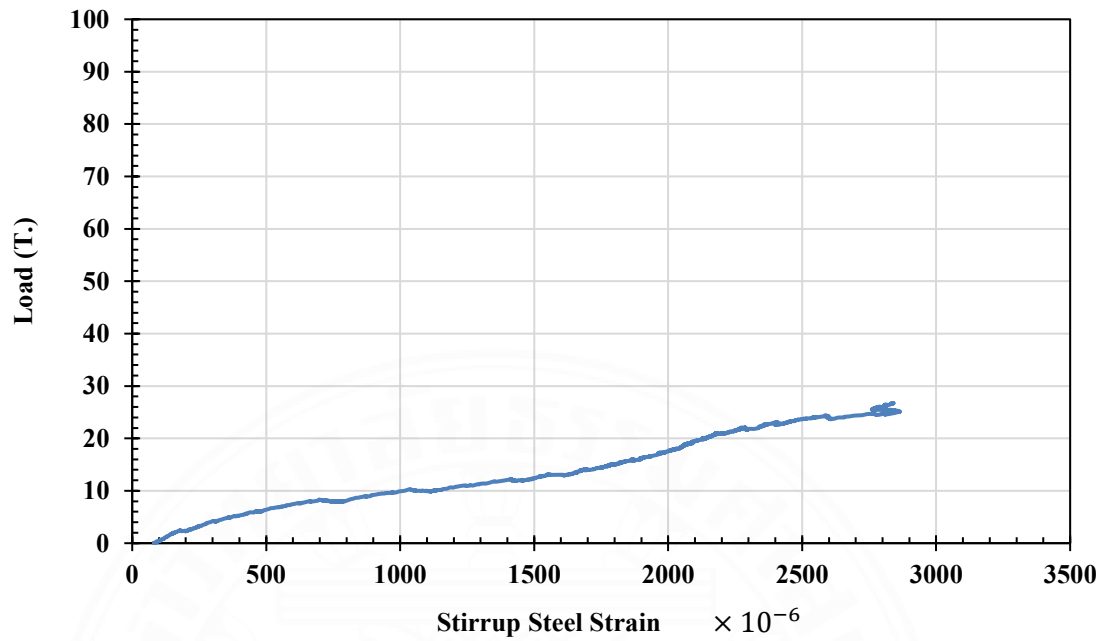
ภาพที่ ค.18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ของคาน B2U



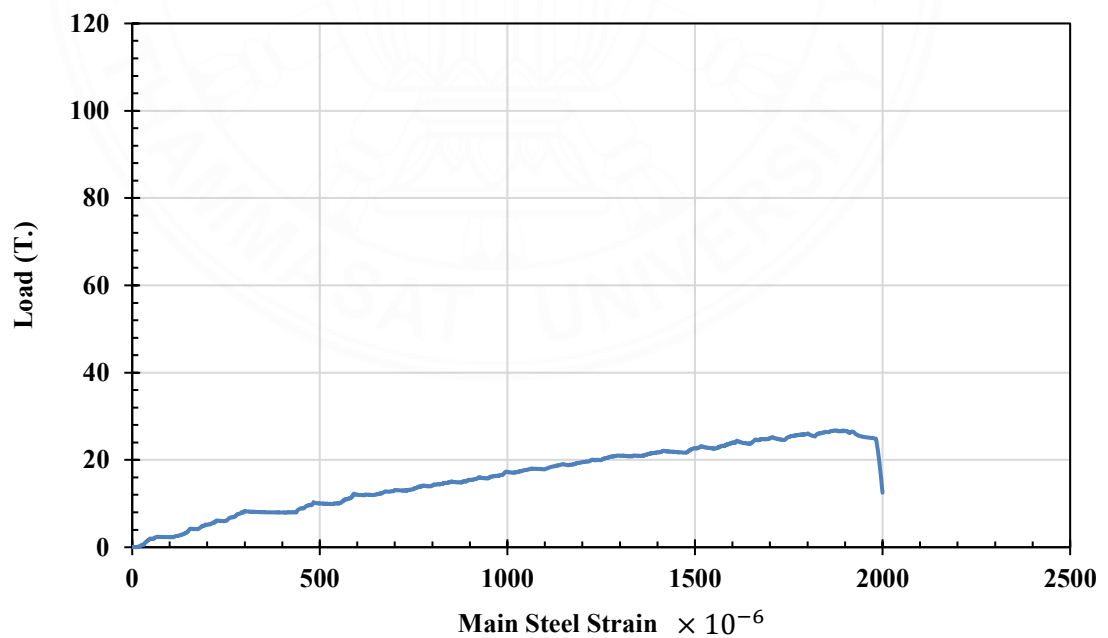
ภาพที่ ค.19 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กปลอกของคาน B2F



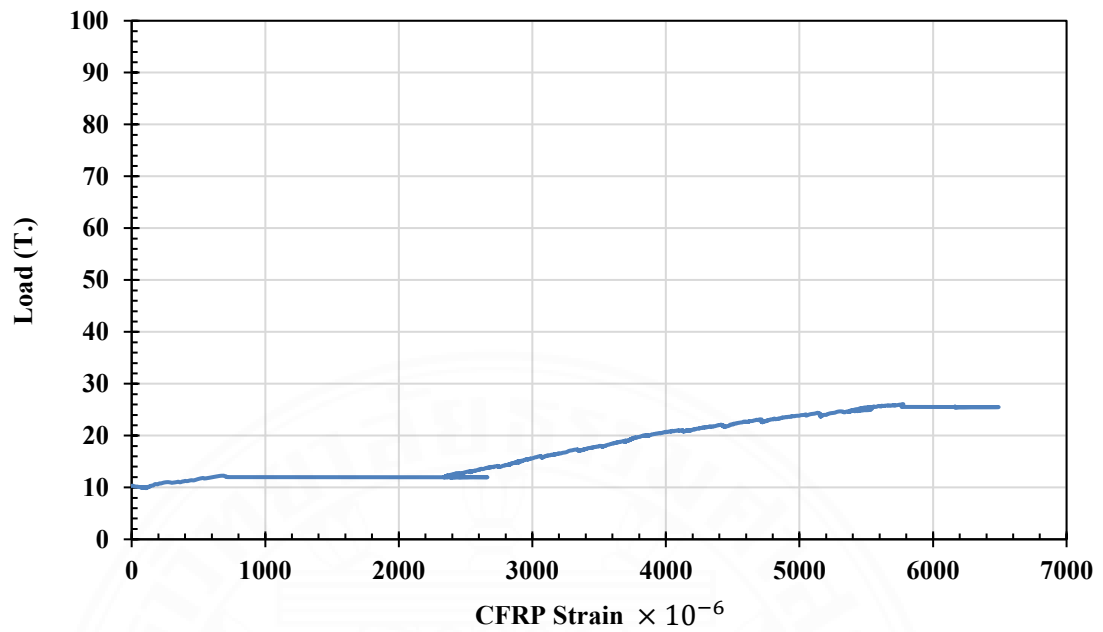
ภาพที่ ค.20 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ของคาน B2F



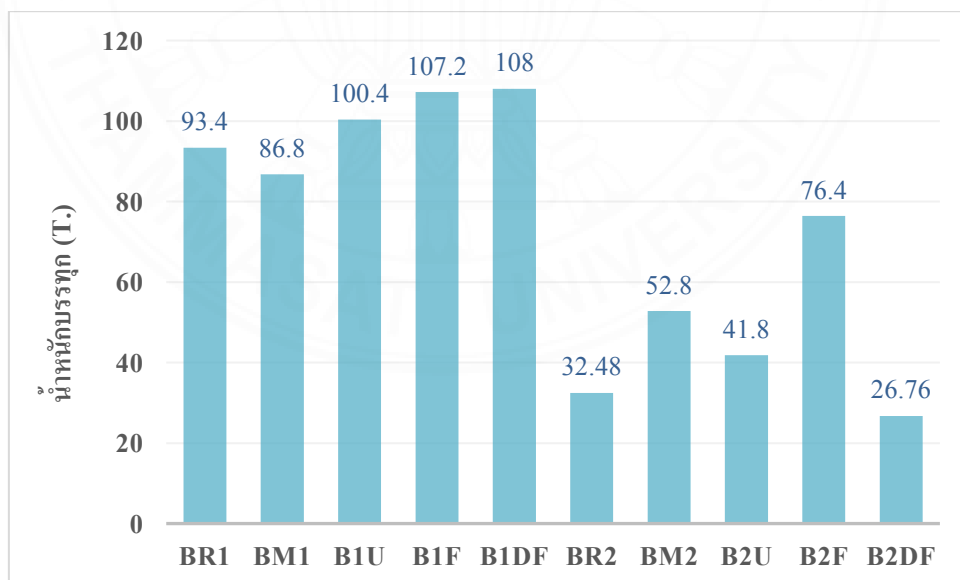
ภาพที่ ค.21 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กปลอกของคาน B2DF



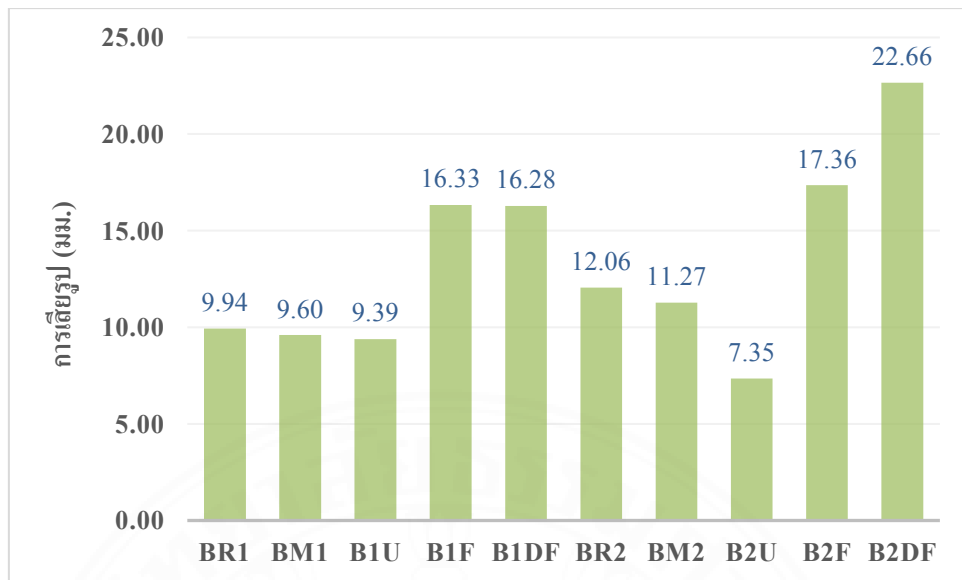
ภาพที่ ค.22 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของเหล็กรับแรงดึงของคาน B2DF



ภาพที่ ค.23 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ของคาน B2DF



ภาพที่ ค.24 กราฟเปรียบเทียบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยของคานตัวอย่าง



ภาพที่ ค.25 กราฟเปรียบเทียบการเสียรูปของคานตัวอย่าง

ประวัติการศึกษา

ชื่อ นางสาวสินีนานา แก้วประสิทธิ์

วันเดือนปีเกิด 13 ธันวาคม 2540

วุฒิการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ 2562

