

EXPERIMENTAL STUDY OF SHEAR BEHAVIOR OF CFRP-STRENGTHENED REINFORCED CONCRETE DEEP BEAMS

การทดสอบของพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานาลิกคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

दनदेख दनसुररन¹, खनेखय तहणन^{2*}, गणतथ खनवनख³, ऐणुऐखख सनतनतर^{4*}, गणुवणन खणकलत⁵

^{1,3} นักศึกษาปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

⁴ อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

⁵ รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ARTICLE INFO:

Received: 15 March 2023

Received Revised Form: 15 March 2023

Accepted: 2 April 2023

ABSTRACT :

This article aims to study the behavior of deep reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets. The variables studied include the CFRP strengthening configurations and the shear span-to-effective depth ratio (a/d ratio). A total of six deep reinforced concrete beams with cross-sectional dimensions of 200 mm in width, 2400 mm in length, and 450 mm in depth are investigated. Among these, two beams are control samples (without strengthening), and four beams are strengthened with CFRP sheets. The strengthened beams are divided into two categories: beams strengthened with full-section strip reinforcement and beams strengthened with U-wrap reinforcement. The test results show that external strengthening with CFRP sheets significantly enhances shear capacity compared to the control beams. The method of full-section strip reinforcement provides higher load-bearing efficiency than U-wrap reinforcement. This is because U-wrap reinforcement results in debonding between concrete beam and the CFRP sheets.

KEYWORDS : a/d ratio, strengthening, deep beams, CFRP sheets

บทคัดย่อ :

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคานาลิกคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมใยคาร์บอน(CFRP) โดยตัวแปรที่ศึกษา คือ รูปแบบการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP และอัตราส่วนระหว่างช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล (a/d ratio) โดยศึกษาคานาลิกทั้งหมด 6 ตัวอย่าง ที่มีขนาดหน้าตัด กว้าง 200 มม. ยาว 2400 มม. และลึก 450 มม. โดยมี คานตัวอย่าง 2 คานเป็นคานควบคุม (ไม่มีการเสริมกำลัง) และคานจำนวน 4 ตัวอย่าง

*Corresponding Author,
Email address:
tchanach@engr.tu.ac.th,
fengppcs@ku.ac.th

เป็นงานที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP งานที่ทำการเสริมกำลังแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ งานที่เสริมแบบแถบ (strip) เติมน้ำหนักและเสริมแบบตัวยู (U-wrap) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่น CFRP ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการรับแรงเฉือนได้มากเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม โดยรูปแบบการเสริมกำลังการเสริมแบบแถบให้ประสิทธิภาพในการรับกำลังสูงกว่าการเสริมแบบตัวยู เนื่องจากการเสริมแบบตัวยู ส่งผลให้เกิดการหลุดลอกออกจากกัน (debonding) ระหว่างคานคอนกรีตและแผ่น CFRP

คำสำคัญ: อัตราส่วน a/d, การเสริมกำลัง, คานลึก, แผ่นพอลิเมอร์เสริมใยคาร์บอน

1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับการพัฒนาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ก่อให้เกิดนวัตกรรมและการพัฒนาคอนกรีตเสริมเหล็กในหลายรูปแบบ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในโครงสร้างแต่ละประเภท ซึ่งทำให้การใช้งานคอนกรีตเสริมเหล็กกลายเป็นหนึ่งในรูปแบบการก่อสร้างที่สำคัญต่อการใช้ชีวิตในปัจจุบัน เห็นได้จากความนิยมในการก่อสร้างอาคารทั่วไปที่ทำจากคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งรูปแบบของชิ้นส่วนโครงสร้างสามารถมีรูปทรงต่างๆ ที่หลากหลาย เช่น เสา พื้น หรือ คาน สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นเป็นโครงสร้างสำคัญในการรับแรง ทั้งแรงดัด แรงบิด หรือแรงเฉือน เป็นต้น เมื่อมีแรงกระทำที่มากขึ้น คานคอนกรีตปกติ อาจต้องการออกแบบให้รับกำลังที่สูงขึ้น เช่น คานลึก (Deep beams) [1-9] เป็นต้น โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบคานลึกนั้น เป็นที่นิยมในการใช้งานโครงสร้างที่ต้องการรับน้ำหนักมากๆ เช่น สะพาน และโครงสร้างถนนทางยกระดับ เนื่องจากสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าและมีความแข็งแรงมากกว่าโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบปกติ คานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กมักมีพฤติกรรมการเสียรูปช่วงแรงเฉือน ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายได้หากไม่มีการแจ้งเตือนก่อนการเสียรูป ดังนั้น การเสริมกำลังภายนอกของคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักและเปลี่ยนพฤติกรรมการเสียรูปช่วงแรงเฉือนเป็นการเสียรูปแบบดัดซึ่งมีความปลอดภัยมากกว่าเพราะมีการแจ้งเตือนก่อนการเสียรูป

ปัจจุบันแผ่นพอลิเมอร์เสริมใยคาร์บอน (Carbon Fiber-reinforced Polymer, CFRP) [10-14] มีหลายชนิด เช่น แบบแผ่น แบบแท่ง เป็นต้น โดยชนิดแบบแผ่น (Sheet) [15-20] ความหนาทั่วไปประมาณ 0.11 - 0.77 มม. การใช้งานแผ่น CFRP จะต้องมีการสำรวจตรวจสอบ วิเคราะห์ และได้รับการออกแบบ

ตามพฤติกรรมการรับแรงของโครงสร้างที่จะใช้งานจริง และพิจารณาถึงความเหมาะสมโดยวิศวกรโครงสร้าง เพื่อให้การติดตั้งแผ่น CFRP เป็นไปอย่างถูกต้องเหมาะสม รวมทั้งโครงสร้างอาคารมีความปลอดภัยในการใช้งานตามหลักวิศวกรรม คุณสมบัติและประโยชน์ของแผ่น CFRP คือ กำลังรับแรงดึงสูง มีน้ำหนักเบาไม่เป็นการให้กับโครงสร้างเดิม มีขนาดเล็กไม่ส่งผลกระทบต่อรูปแบบสถาปัตยกรรม ติดตั้งสะดวกและรวดเร็วไม่กระทบกับการใช้งานเดิม ทนทานต่อการกัดกร่อนและการสึกหรอ ทนทานต่อสารเคมี เช่น กรด-ด่าง มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน สามารถทาสีหรือปิดทับด้วยวัสดุอื่นเพื่อความสวยงามได้ ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าเพื่อศึกษาพฤติกรรมคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกในรูปแบบต่างๆ อัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน ผ่านการให้แรงเฉือนกับคานตัวอย่าง โดยผลการทดสอบนี้จะแสดงถึงพฤติกรรมการรับแรงเฉือนซึ่งเป็นประโยชน์ต่อวิศวกรที่กำลังศึกษารูปแบบการเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่น CFRP ในการทำงานต่อไป

2. การทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

2.1 คุณสมบัติวัสดุ

วัสดุหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 4 ประเภท ได้แก่ แผ่นพอลิเมอร์เสริมใยคาร์บอน (CFRP sheet) ที่มีความหนาของแผ่น 0.129 มม. ตามมาตรฐาน (ASTM D 3039) [21] เหล็กเสริมคอนกรีตใช้เป็นเหล็กข้ออ้อย ขนาด 20 มม. (DB20) ชั้นมาตรฐาน SD40 ที่สามารถรับแรงที่จุดครากและแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 390 และ 560 MPa ตามลำดับ และเหล็กปลอกให้เป็นเหล็กเส้นกลม ขนาด 6 มม. (RB6) ตามมาตรฐาน (ASTM A615) [22] ที่สามารถรับแรงที่จุดครากและแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 235 และ 385 MPa ตามลำดับ สำหรับวัสดุเชื่อมประสานจะใช้ Sikadur®-330 เป็น

ทิโชทรอปิก 2 ส่วนผสมตามอัตราส่วนของผู้ผลิตแนะนำ ใช้สำหรับเพิ่มความอึดตัวให้เส้นใยเสริมกำลัง ตามมาตรฐาน (ISO 527) [23] และคอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตผสมสำเร็จ (Ready Mixed Concrete) [24] โดยส่วนผสมได้รับการทดสอบตามมาตรฐาน โดยอัตราส่วนผสมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรประกอบด้วย ซีเมนต์ 260 กิโลกรัม แก้วลอย 65 กิโลกรัม น้ำ 180 กิโลกรัม หิน 800 กิโลกรัม หิน 1095 กิโลกรัม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.544 และมีการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. สูง 300 มม. ที่ 28 วัน จำนวน 3 ตัวอย่าง มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 30.54 MPa โดยคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุได้แสดงดังตารางที่ 1

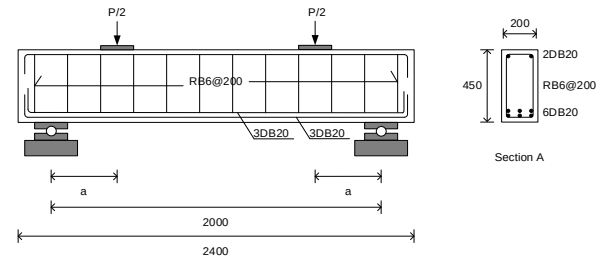
ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

วัสดุ	กำลังอัด (MPa)	กำลังจุดคราก (MPa)	แรงดึงสูงสุด (MPa)	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (MPa)
คอนกรีต	30.54	-	-	-
เหล็กข้ออ้อย	-	390	560	210000
เหล็กปลอกกลม	-	235	385	210000
แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน	-	-	452	230000
วัสดุเชื่อมประสาน	-	-	0.03	4500

2.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของคานลึกลูกคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมใยคาร์บอน (CFRP) และรูปแบบการเสริมกำลังภายนอก โดยมีคานตัวอย่าง 6 คาน ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดคานตัวอย่างทดสอบ ขนาดหน้าตัด กว้าง 200 มม. ยาว 2400 มม. และลึก 450 มม. การเสริมเหล็กรับแรงอัด 2DB20 เสริมเหล็กรับแรงดึง 6DB20 และเหล็กเสริมรับแรงเฉือน RB6 ระยะเรียงที่ 200 มม. ดังรูปที่ 1 โดยในการทดลองมีคานควบคุม จำนวน 2 คาน และคานเสริมกำลังจำนวน 4 คาน โดยคานเสริมกำลังเป็นคานที่เสริมกำลังแบบตัวยู (U-wrap) จำนวน 2 ชั้นตลอดช่วงของแรงเฉือน และเสริมกำลังแบบแถบ (Fully strip) จำนวน 2 ชั้น พันรอบคานแผ่นกว้าง 50 มม. มีระยะเรียง 60 มม. ในช่วงแรงเฉือน เพื่อป้องกันการติดกันของแถบแต่ละแถบหรือการทับซ้อนของแถบ จะทำการติดด้วยวัสดุ

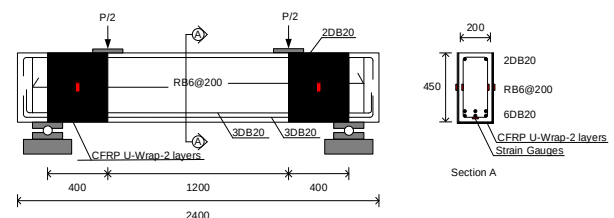
เชื่อมประสานที่ละเอียด และทำการเก็บรายละเอียดวัสดุเชื่อมประสานให้ไม่เกินกว่าระยะที่ติดตั้ง โดยรายละเอียดคานเสริมกำลังแสดงในรูปที่ 2



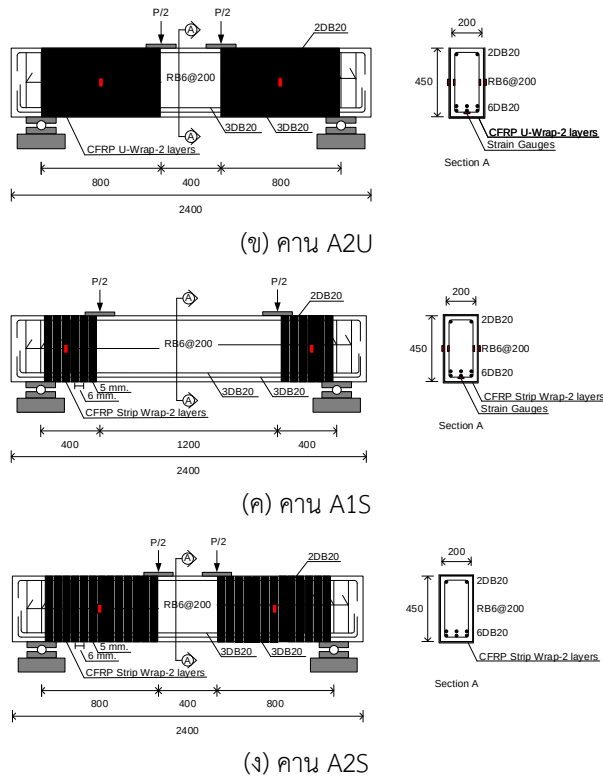
รูปที่ 1 รายละเอียดคานคานตัวอย่างควบคุม (ไม่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP)

ตารางที่ 2 รายละเอียดคานตัวอย่าง

ชื่อคาน	a/d ratio	รูปแบบการเสริมกำลัง	หน้าตัดแผ่น CFRP (มม.)
A1	1	ไม่ทำการเสริมกำลัง	-
A1U		เสริมกำลังแบบตัวยู (U-wrap) 2 ชั้นตลอดช่วงแรงเฉือน	400×0.129×2
A1S		เสริมกำลังแบบแถบ (Fully strip) 2 ชั้น พันรอบคาน แผ่นกว้าง 50 มม. ที่ระยะเรียง 60 มม. ในช่วงแรงเฉือน	60×0.129×2
A2	2	ไม่ทำการเสริมกำลัง	-
A2U		เสริมกำลังแบบตัวยู (U-wrap) 2 ชั้นตลอดช่วงแรงเฉือน	800×0.129×2
A2S		เสริมกำลังแบบแถบ (Fully strip) 2 ชั้น พันรอบคาน แผ่นกว้าง 50 มม. ที่ระยะเรียง 60 มม. ในช่วงแรงเฉือน	130×0.129×2



(ก) คาน A1U



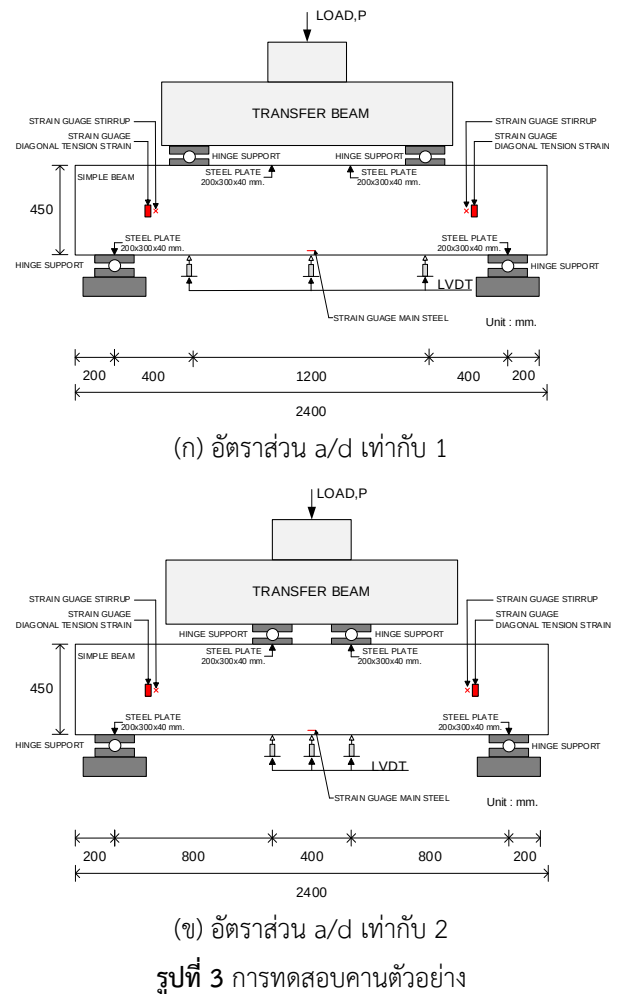
รูปที่ 2 รายละเอียดคานและตำแหน่งการติดตั้งมาตรวัดความเครียด

2.3 การติดตั้งเครื่องมือวัดและการทดสอบคานตัวอย่าง

ขั้นตอนการติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน เริ่มจากการตัดแผ่น CFRP ตามขนาดช่วงของแรงเฉือนตามรูปแบบที่ต้องการติดตั้ง จากนั้นทำการทาวัสตุเชื่อมประสานบนคอนกรีต ภายหลังจากเตรียมผิวคอนกรีตรวมถึงทำความสะอาดพื้นผิว โดยทำการพันแผ่น CFRP 2 ชั้น ทิ้งไว้ให้แห้งและทำการบ่มอากาศเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นคานตัวอย่างได้ถูกติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gage) ที่บริเวณเหล็กตามยาว เหล็กปลอก และแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (สำหรับคานที่เสริมกำลัง) ดังรูปที่ 2

สำหรับการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงเฉือน ตัวอย่างคานจะติดตั้งทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนียวแบบเชิงเส้น (Linear Variable Displacement Transducer, LVDT) จำนวน 3 ตำแหน่ง ที่ตำแหน่งแรงกระทำ 2 จุด และบริเวณกึ่งกลางคาน 1 จุด เพื่อวัดการแอ่นตัวระหว่างการให้แรงกระทำ ดังรูปที่ 3(ก) และ 3(ข) สำหรับคานที่มีค่า อัตราส่วน a/d เท่ากับ 1 และ 2 ตามลำดับ การให้แรงกระทำจะควบคุมโดยแรง (load control) โดยจะเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกเพิ่มขึ้น 10 กิโลนิวตัน / 1 นาที จนกระทั่งคานตัวอย่างวิบัติ และทำการสังเกตรอยร้าวที่

เกิดขึ้นทุกระยะการรับน้ำหนักกระทำ รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบและอุปกรณ์ตรวจวัด ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การทดสอบคานตัวอย่าง

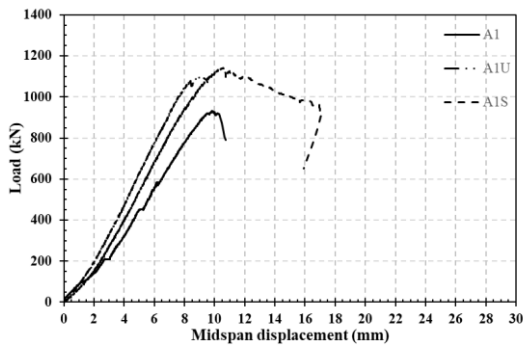
3. การทดสอบและการอภิปรายผล

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัว

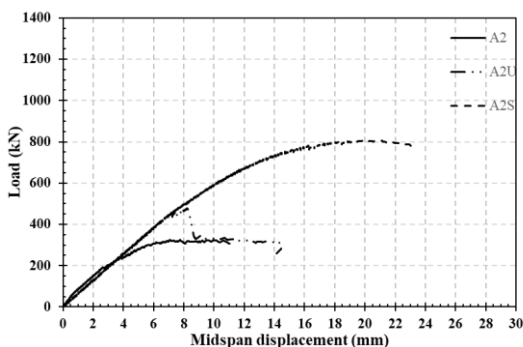
จากการทดสอบคานตัวอย่าง เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน โดยผลการทดสอบประกอบด้วย กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกแตกร้าเริ่มต้น (cracking load), กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกจุดคราก (yielding load) ซึ่งได้จากการสังเกตจากค่าความเครียดที่เหล็กปลอก, กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุด (maximum load) และการแอ่นตัวที่กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุด (deflection corresponding to maximum load) ได้สรุปในตารางที่ 3

จากรูปที่ 4 และ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานที่มีค่าอัตราส่วน a/d เท่ากับ

1 และ 2 ตามลำดับ สำหรับคานควบคุมที่มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 1 มีกำลังมากกว่าคานที่มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 2 และคานที่เสริมกำลังมีค่าสูงกว่าคานที่ไม่เสริมกำลัง และคานที่มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 1 มีค่าความแกร่ง (stiffness) ของคานเสริมกำลัง (A1U และ A1S) มีค่ามากกว่าคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง (A1) แต่สำหรับคานที่มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 2 (A2U และ A2S) มีความใกล้เคียงกันกับคานควบคุม (A2)



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน (อัตราส่วน a/d เท่ากับ 1)



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน (อัตราส่วน a/d เท่ากับ 2)

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบ

ชื่อคาน	รอยแตกแรกแรก (kN)	น้ำหนักบรรทุก ณ จุดคราก (kN)	น้ำหนักบรรทุก สูงสุด (kN)	การแอ่นตัว ณ น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (mm)	รูปแบบการเสียรูป
A1	150	925	934	10.6	การเสียรูปด้วยแรงเฉือน
A1U	180	-	1096	9.2	การเสียรูปด้วยแรงเฉือน และการหลุดล่อนของแผ่น CFRP
A1S	120	-	1142	12.1	การเสียรูปด้วยแรงเฉือน และการหลุดล่อนของแผ่น CFRP
A2	170	289	324	10.4	การเสียรูปด้วยแรงเฉือน
A2U	100	466	478	8.2	การเสียรูปด้วยแรงเฉือน และการหลุดล่อนของแผ่น CFRP
A2S	70	517	806	20.8	การเสียรูปด้วยการแตกอัดของคอนกรีต

จากผลการทดสอบที่แสดงในตารางที่ 3 พบว่า คานควบคุมที่มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 1.00 มีกำลังมากกว่าคานที่มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 2.00 ที่มีกำลังมากกว่า 188% เนื่องจากคานที่มีอัตราส่วน a/d น้อยจะมีพฤติกรรมเป็นคานลิกมากกว่า และมีกำลังรับแรงเฉือนที่เป็นสาเหตุหลักของการวิบัติได้มากกว่า คานที่มีอัตราส่วน a/d ที่มากกว่า แต่ในทางกลับกัน คานที่มีอัตราส่วน a/d น้อย จะมีความสามารถในการเสียรูปน้อยลง คานที่มีพฤติกรรมเป็นคานลิกจะสามารถรับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้มาก แต่จะมีการเสียรูปได้น้อย ดังนั้นเมื่อเกิดการวิบัติจะเป็นการวิบัติแบบฉับพลันไม่มีการเตือน หรือเป็นการวิบัติแบบเปราะ (brittle failure) เมื่อเปรียบเทียบกับสมการทำนายกำลังรับแรงเฉือนโดยใช้แบบจำลองโครงสร้าง ACI318-14 ของคานควบคุมที่มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 535.5 และ 318.2 กิโลนิวตัน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าผลการทดสอบ 43% และ 2% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสมการจาก ACI318-14 มีความปลอดภัยเมื่อเทียบกับผลการทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu et al. [25] กล่าวว่า พฤติกรรมการวิบัติด้วยแรงอัด เนื่องจากการเสริมกำลังภายนอกช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในแรงเฉือนให้มีประสิทธิภาพมากกว่าแรงอัดจึงทำให้การวิบัติไม่เป็นการวิบัติแบบเปราะ

สำหรับคานที่เสริมกำลังที่อัตราส่วน a/d เท่ากับ 1 คานที่เสริมกำลังรูปแบบตัวยู (A1U) และแบบแถบเต็ม (A1S) มีน้ำหนักบรรทุกสูงเท่ากับ 1096 และ 1142 กิโลนิวตัน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 17% และ 22% ตามลำดับ

เมื่อเทียบกับคานควบคุม (A1) สำหรับคานที่เสริมกำลังไม่พบว่ามีจุดร้าวของเหล็กเสริมในคาน ในส่วนของคานที่เสริมกำลังที่อัตราส่วน a/d เท่ากับ 2 คานที่เสริมกำลังรูปแบบตัวยู (A2U) และแบบแถบเต็ม (A2S) มีน้ำหนักบรรทุกที่จุดร้าวและน้ำหนักบรรทุกสูงสุด เท่ากับ (466, 517) กิโลนิวตัน และ (478, 806) กิโลนิวตัน ตามลำดับ ซึ่งน้ำหนักบรรทุกที่จุดร้าวและน้ำหนักบรรทุกสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น (61%, 47%) และ (79%, 148%) ตามลำดับ เมื่อเทียบกับคานควบคุม (A2)

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า รูปแบบการเสริมกำลังแบบแถบเต็มมีค่าสูงกว่าแบบตัวยูในทุกอัตราส่วน a/d เนื่องจากคานที่เสริมกำลังแบบแถบเต็มมีการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่ช้ากว่าคานที่เสริมกำลังแบบตัวยู ซึ่งผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการทดสอบของ Mohamed [26] และ Hason et al. [27]

3.2 ลักษณะการวิบัติ

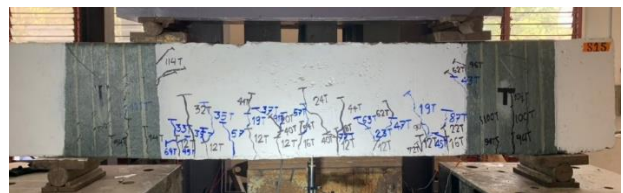
ลักษณะการวิบัติของคานที่ไม่เสริมกำลัง คาน A1, A2 มีลักษณะการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน (shear failure) โดยรอยร้าวแรกที่เกิด บริเวณกึ่งกลางคานบริเวณด้านล่างผิวคอนกรีต จากนั้นจะเกิดรอยร้าวที่กึ่งกลางของช่วงแรงเฉือนและเกิดรอยร้าวอย่างต่อเนื่อง ออกจากตรงกลางไปถึงจุดรองรับ ดังรูปที่ 6(ก) และ 6(ง) ในส่วนของคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย คือ คาน A1U, A1S และ A2U จะเกิดรอยร้าวเริ่มต้นเหมือนกับคานควบคุม เมื่อแรงกระทำเพิ่มมากขึ้น รอยร้าวเนื่องจากแรงเฉือนจะมีความกว้างที่มากขึ้น ทำให้เกิดการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่เริ่มจากรอยร้าวของแรงเฉือนเป็นต้นไป โดยการหลุดล่อนของแผ่น CFRP จะเป็นการหลุดล่อนแบบไม่ฝังใดก็ได้ ฝั่งหนึ่งของคาน ดังรูปที่ 6(ข), 6(ค) และ 6(จ) ตามลำดับ แต่สำหรับคาน A2S มีลักษณะการวิบัติโดยแรงอัดที่คอนกรีตที่บริเวณกึ่งกลางคาน (Flexural compression failure) เนื่องจากคาน A2S เป็นการใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่มากตลอดช่วงของแรงเฉือน ทำให้มีความสามารถในการรับแรงเฉือนมากกว่าการรับแรงดัด ดังรูปที่ 6(ฉ) โดยผลการทดสอบที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hassan [28]



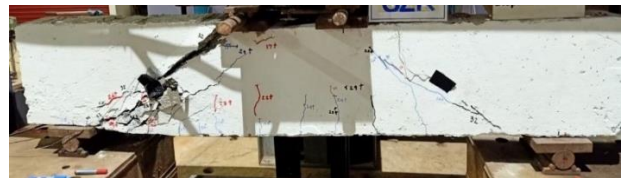
(ก) คาน A1



(ข) คาน A1U



(ค) คาน A1S



(ง) คาน A2



(จ) คาน A2U



(ฉ) คาน A2S

รูปที่ 6 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่าง

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน โดยทำการทดสอบคานตัวอย่างจำนวน 6 คาน มีตัวแปรคือ อัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ (a/d ratio = 1 และ 2) และ รูปแบบการเสริมกำลังภายนอกที่แตกต่างกันคือ รูปตัวยู และ แบบแถบเต็ม (U-wrap และ Fully strip) โดย

พฤติกรรมกรรมการรับแรงเฉือนที่ศึกษาประกอบด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัว และ ลักษณะการวิบัติ โดยมีข้อสรุปการศึกษาจากการทดสอบดังนี้

1) คานที่ไม่ได้รับการเสริมกำลังในอัตราส่วน a/d เท่ากับ 2 มีกำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำกว่าคานที่มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 1 ถึง 188%

2) การเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ทั้ง 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบตัวยู และ แบบแถบเต็ม สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้น 17% และ 22% ตามลำดับ สำหรับอัตราส่วน a/d เท่ากับ 1 และเพิ่มประสิทธิภาพการรับแรงเฉือนเพิ่มขึ้น 47% และ 148% ตามลำดับ สำหรับอัตราส่วน a/d เท่ากับ 2

3) การเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ช่วยยับยั้งการขยายตัวของรอยร้าวและเพิ่มประสิทธิภาพน้ำหนักบรรทุกได้ โดยการเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการรับแรงเฉือนจะมีผลมากในอัตราส่วน a/d ที่มีค่าสูง

4) ลักษณะการวิบัติของคานที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนส่วนใหญ่จะเกิดลักษณะแบบการหลุดล่อน (Debonding)

งานวิจัยนี้แสดงถึงผลการทดสอบของคานลิกที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่รูปแบบการเสริมแตกต่างกัน ทั้งนี้ตัวแปรที่ศึกษา สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ในอนาคต เช่น ปริมาณการเสริมเหล็กตามขวางและเหล็กตามยาว จำนวนชั้นที่เสริมกำลังของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน รวมไปถึงรูปแบบการเสริมอื่นๆ เป็นต้น รวมไปถึง การประยุกต์ใช้แบบจำลองหรือการพัฒนาสมการทำนายพฤติกรรมคานลิกที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนภายใต้แรงเฉือน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และขอขอบคุณบริษัท ไรโรฟิฟสตรัคเจอร์สเปเชียลลิสต์ จำกัด ที่ได้ช่วยเหลือและสนับสนุนด้านวัสดุเสริมกำลังและแรงงานในการติดตั้งในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Siddika, A., Al Mamun, M. A., Alyousef, R., & Amran, Y. M. Strengthening of reinforced concrete beams by using fiber-reinforced polymer composites: A review. *Journal of Building Engineering*, 2019, 25, 100798.
- [2] Rahmanian, I., Lucet, Y., & Tesfamariam, S. Optimal design of reinforced concrete beams: A review. *Computers and Concrete, An International Journal*, 2014, 13(4), pp. 457-482.
- [3] Meda, A., Minelli, F., & Plizzari, G. A. Flexural behaviour of RC beams in fibre reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(8), pp. 2930-2937.
- [4] Adhikary, S. D., Li, B., & Fujikake, K. Effects of high loading rate on reinforced concrete beams. *ACI Structural journal*, 2014, 111(3), pp. 651-660.
- [5] Majdzadeh, F., Soleimani, S. M., & Banthia, N. Shear strength of reinforced concrete beams with a fiber concrete matrix. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2006, 33(6), pp. 726-734.
- [6] Kadhim, A. A., & Kadhim, H. M. (2006). Loading capacity prediction of rubberized reinforced concrete continuous deep beams. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2006, 1090, 1, 012031.
- [7] Bircher, D., Tuchscherer, R., Huizinga, M., Bayrak, O., Wood, S. L., & Jirsa, J. O. Strength and serviceability design of reinforced concrete deep beams. 2009, No. FHWA/TX-09/0-5253-1.
- [8] Jasim, W. A., Tahnat, Y. B. A., & Halahla, A. M. Behavior of reinforced concrete deep beam with web openings strengthened with (CFRP) sheet. In *Structures*, 2020, 26, pp. 785-800.
- [9] Abbood, I. S. Strut-and-tie model applications on reinforced concrete deep beam: A comprehensive review. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, e01767.

- [10] Karataş, M. A., & Gökkaya, H. A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. *Defence Technology*, 2018, 14(4), pp. 318-326.
- [11] Zhou, F., Zhang, J., Song, S., Yang, D., & Wang, C. Effect of temperature on material properties of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) tendons: Experiments and model assessment. *Materials*, 2019, 12(7), 1025.
- [12] Ozkan, D., Gok, M. S., & Karaoglanli, A. C. Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite materials, their characteristic properties, industrial application areas and their machinability. *Engineering Design Applications III: Structures, Materials and Processes*, 2020, pp. 235-253.
- [13] Wang, K., Young, B., & Smith, S. T. Mechanical properties of pultruded carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) plates at elevated temperatures. *Engineering structures*, 2011, 33(7), pp. 2154-2161.
- [14] Niemitz, C. W., James, R., & Breña, S. F. Experimental behavior of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) sheets attached to concrete surfaces using CFRP anchors. *Journal of Composites for Construction*, 2010, 14(2), pp. 185-194.
- [15] Xiao, X., Kim, J. J., Oh, S. H., & Kim, Y. S. Study on the incremental sheet forming of CFRP sheet. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 141, 106209.
- [16] Al-Zubaidy, H., Zhao, X. L., & Al-Mahaidi, R. Mechanical characterisation of the dynamic tensile properties of CFRP sheet and adhesive at medium strain rates. *Composite Structures*, 2013, 96, pp. 153-164.
- [17] Niemitz, C. W., James, R., & Breña, S. F. Experimental behavior of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) sheets attached to concrete surfaces using CFRP anchors. *Journal of Composites for Construction*, 2010, 14(2), pp. 185-194.
- [18] Jarrah, M., Najafabadi, E. P., Khaneghahi, M. H., & Oskouei, A. V. The effect of elevated temperatures on the tensile performance of GFRP and CFRP sheets. *Construction and Building Materials*, 2018, 190, pp.38-52.
- [19] Al-Rousan, R., & Issa, M. Fatigue performance of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(8), 3520-3529.
- [20] Liu, H. B., Zhao, X. L., & Al-Mahaidi, R. Effect of fatigue loading on bond strength between CFRP sheets and steel plates. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2010, 10(01), pp. 1-20.
- [21] De Baere, I., Van Paepegem, W., Quaresimin, M., & Degrieck, J. On the tension-tension fatigue behaviour of a carbon reinforced thermoplastic part I: Limitations of the ASTM D3039/D3479 standard. *Polymer Testing*, 2011, 30(6), pp. 625-632.
- [22] Trejo, D., & Pillai, R. G. Accelerated chloride threshold testing: part I-ASTM A 615 and A 706 reinforcement. *Materials Journal*, 2003, 100(6), pp.519-527.
- [23] Szykiedans, K., Credo, W., & Osiński, D. Selected mechanical properties of PETG 3-D prints. *Procedia Engineering*, 2017, 177, pp. 455-461.
- [24] Puri, B., Brown, B., McKee, H., & Treasaden, I. *Manual of ready-mixed concrete*. CRC Press. 1992.
- [25] Liu, J., & Mihaylov, B. I. A comparative study of models for shear strength of reinforced concrete deep beams. *Engineering Structures*, 2016, 112, pp. 81-89.
- [26] Mohamed, A. Behaviour of GFRP-RC continuous deep beams without web reinforcement (Master's thesis). 2019.
- [27] Hason, M. M., Hanoon, A. N., Saleem, S. J., Hejazi, F., & Al Zand, A. W. Characteristics of experimental ductility energy index of hybrid-CFRP reinforced concrete deep beams. *SN Applied Sciences*, 2021, 3(2), 200.
- [28] Hassan, H., & Hatem, M. Behavior of self-compact reinforced concrete deep beams with small

shear span to depth ratio. In MATEC Web of Conferences,
2018, 162, 04013