

## ประสิทธิภาพของการเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนในคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็ก Efficiency of reinforcement using carbon fiber reinforced polymer sheets in reinforced concrete deep beams.

ณัฐเดช ตันสุวรรณ<sup>1</sup>, ชนะชัย ทองโถม<sup>2\*</sup>, เพ็ญพิชชา สนิทอินทร์<sup>3</sup> และภาณุวัฒน์ จ้อยกัลล์<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

<sup>3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

<sup>4</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

\*Corresponding author, E Mail: [tchanach@engr.tu.ac.th](mailto:tchanach@engr.tu.ac.th), [fengppcs@ku.ac.th](mailto:fengppcs@ku.ac.th)

### บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมใยคาร์บอน(CFRP) โดยตัวแปรที่ศึกษา คือ รูปแบบการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP และอัตราส่วนระหว่างช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ โดยศึกษาผ่านตัวอย่างคานลึก 6 ตัวอย่าง ที่มีขนาดหน้าตัด กว้าง 200 มม. ยาว 2400 มม. และลึก 450 มม. โดยมี คานตัวอย่าง 2 คานเป็นคานควบคุมและ 4 คานเป็นที่ได้รับการเสริมกำลัง คานชนิดเสริมกำลังถูกแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ในแต่ละรูปแบบจะมีการเสริมแรง 2 ชั้น คือ เสริมแบบแถบ (STRIP FULL) และเสริมแบบตัวยู (U-WRAP) ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมใยคาร์บอน(CFRP) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการรับแรงได้ดี โดยรูปแบบการเสริมกำลังการเสริมแบบแถบให้ประสิทธิภาพในการรับกำลังสูงกว่าการเสริมแบบตัวยู เนื่องจากการเสริมแบบตัวยู ส่งผลให้เกิดการหลุดล่อนออกจากกันระหว่างคานและวัสดุเสริมกำลัง(Debonding)

คำสำคัญ: อัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ, คอนกรีต, คานลึก, การเสริมกำลัง, แผ่นพอลิเมอร์เสริมใยคาร์บอน

### Abstract

The purpose of this article is to study the behavior of deep concrete beams reinforced with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets, with the variables being the reinforcement configurations with CFRP sheets and the ratio of shear span to depth. The study was conducted using 6 deep beams with cross-sectional dimensions of 200 mm wide, 2400 mm long, and 450 mm deep. Among these, 2 beams served as control specimens, while 4 beams were strengthened with CFRP sheets. The reinforced beams were divided into 2 types, each with 2 layers of reinforcement: strip reinforcement and U-shaped reinforcement. The test results showed that external reinforcement with CFRP sheets improved load-bearing

efficiency. Strip reinforcement demonstrated higher load-bearing efficiency compared to U-shaped reinforcement, attributed to debonding between the beam and the reinforcement material.

Keywords: a/d ratio, concrete, deep beams, strengthening, CFRP plates

### 1. บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้มีการคิดค้นขึ้นมาตั้งแต่สมัยอดีตจนถึงปัจจุบันซึ่งมีการใช้งานที่แพร่หลาย ก่อให้เกิดนวัตกรรมและการพัฒนาคอนกรีตเสริมเหล็กในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในโครงสร้างแต่ละประเภทอย่างต่อเนื่อง ซึ่งทำให้การใช้งานคอนกรีตเสริมเหล็กกลายเป็นอีกหนึ่งรูปแบบการก่อสร้างที่สำคัญต่อการใช้ชีวิตในปัจจุบัน จะเห็นได้จากความนิยมในการก่อสร้างอาคารทั่วไปที่ทาจากคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งความก้าวหน้าในการพัฒนานี้ ปรากฏให้เห็นในรูปแบบของชิ้นส่วนโครงสร้างในลักษณะคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบปกติ (Reinforced concrete beam, RC) [1-5] ไปจนถึงคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบคานลึก (Reinforced Concrete Deep Beams) [6 -9] ใน การ ศึ ก ข น นี้ จะ ยกตัวอย่างการพิจารณาคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากมีการใช้งานที่มากขึ้น สำหรับโครงสร้างที่ถูกออกแบบให้สามารถรับน้ำหนักได้อย่างมหาศาล ทำให้คานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นที่นิยมนำมาใช้ในปัจจุบัน ซึ่งโครงสร้างที่เป็นที่นิยมคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบบคานลึก มาใช้ ได้แก่ โครงสร้างสะพาน โครงสร้างถนนทางยกระดับ เป็นต้น

โดยพฤติกรรมของคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีการวิบัติช่วงแรงเฉือน (Shear compression failure) การวิบัติแบบนี้อาจทำให้เกิดอันตรายได้ เนื่องจากไม่มีการแจ้งเตือนของการวิบัติ ทำให้การเสริมกำลังภายนอกของคานลึกคอนกรีตเสริมเหล็กจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักและเปลี่ยนพฤติกรรมการวิบัติในช่วงแรงเฉือนนี้เป็นการวิบัติแบบดัด (Flexural compression failure) การวิบัติแบบนี้จะปลอดภัยมากกว่าเนื่องจากมีการแจ้งเตือนที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนที่จะเสียรูป ซึ่ง ณ 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 และได้รับการออกแบบตามพฤติกรรมการรับแรงของโครงสร้างที่จะใช้งานจริง และพิจารณาถึงความเหมาะสมโดยวิศวกรโครงสร้าง เพื่อให้การติดตั้งแผ่น CFRP เป็นไปอย่างถูกต้องเหมาะสม รวมทั้งโครงสร้างอาคารมีความปลอดภัยในการใช้งานตามหลักวิศวกรรม คุณสมบัติและประโยชน์ของแผ่น CFRP ได้แก่ สามารถรับกำลังได้สูง มีน้ำหนักเบาไม่เป็นภาระให้กับโครงสร้างเดิม มีขนาดเล็กไม่ส่งผลต่อรูปแบบสถาปัตยกรรม ติดตั้งสะดวกและรวดเร็วไม่กระทบกับการใช้งานเดิม ทนทานต่อการกัดกร่อนและการสึกหรอ ทนทานต่อสารเคมี เช่น กรด-ด่าง มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน สามารถทาสีหรือปิดทับด้วยวัสดุอื่นเพื่อความสวยงามได้ ดังนั้นการศึกษาครั้งนี้ เพื่อศึกษาพฤติกรรมคานกลีคคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกในรูปแบบต่างๆ รูปแบบใดได้มีประสิทธิภาพมากที่สุดและเป็นประโยชน์ต่อวิศวกรที่กำลังศึกษารูปแบบการเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่น CFRP ในการทำงานต่อไป

## 2. การทดสอบตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

### 2.1 คุณสมบัติวัสดุ

งานวิจัยนี้ใช้วัสดุหลัก 4 ประเภท ได้แก่ แผ่นพอลิเมอร์เสริมใยคาร์บอน (CFRP) ที่มีความหนาของแผ่น 0.129 มม. ตามมาตรฐาน (ASTM D 3039) [21] เหล็กเสริมคอนกรีตใช้เป็นเหล็กข้ออ้อย ขนาด 20 มม. (DB20) ชั้นมาตรฐาน SD40 ที่สามารถรับแรงที่จุดครากได้ 4000 กิโลกรัม ต่อตารางเซนติเมตร และเหล็กปลอกให้เป็นเหล็กเส้นกลมขนาด 6 มม. (RB6) ตามมาตรฐาน (ASTM A615) [22] อีพ็อกซีเรซิน (Sikadur®-330) เป็นที่ไซทอปิกอีพ็อกซี 2 ส่วนผสม ใช้สำหรับเพิ่มความอึดตัวให้เส้นใยเสริมกำลัง ตามมาตรฐาน (ISO 527) [23] และคอนกรีตที่ใช้เป็นคอนกรีตผสมสำเร็จ (Ready Mixed Concrete) [24] โดยส่วนผสมมีอัตราส่วนผสมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรประกอบไปด้วย ซีเมนต์ 260 กิโลกรัม ใ้ล้อย 65 กิโลกรัม น้ำ 180 กิโลกรัม หยาบ 800 กิโลกรัม หิน 1095 กิโลกรัม อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.544 และมีการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. สูง 3000 มม. ที่ 28 วัน จำนวน 3 ตัวอย่าง คุณสมบัติเชิงกลแสดงตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

| วัสดุ        | กำลังอัด (MPa) | กำลังจุดคราก (MPa) | แรงดึงสูงสุด (MPa) | ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (MPa) |
|--------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------------|
| คอนกรีต      | 30.54          | -                  | -                  | -                        |
| เหล็กข้ออ้อย | -              | 590                | 683                | 200000                   |
| เหล็กปลอกกลม | -              | 217                | 305                | 200000                   |
| แผ่นCFRP     | -              | -                  | 4000               | 230000                   |
| กาวยึดประสาน | -              | -                  | 30                 | 4500                     |

### 2.2 การเตรียมตัวอย่างคานทดสอบ

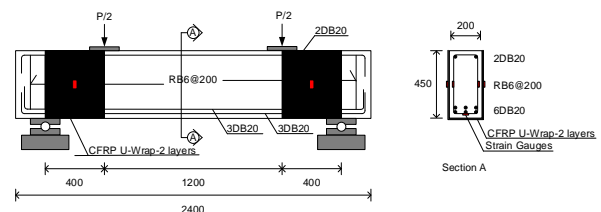
การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของคานกลีคคอนกรีตเสริมเหล็กและพฤติกรรมการวิบัติของคานกลีคคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและรูปแบบการเสริมกำลังภายนอก มีคานตัวอย่าง 6 คาน ขนาดหน้าตัด กว้าง 200 มม. ยาว 2400 มม. และลึก 450 มม. โดยการเสริมเหล็กรับแรงอัด 2DB20 เสริมเหล็กรับแรงดึง 6DB20 และเหล็กเสริมรับแรงเฉือน RB6 ระยะเรียงที่ 200 มม. ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

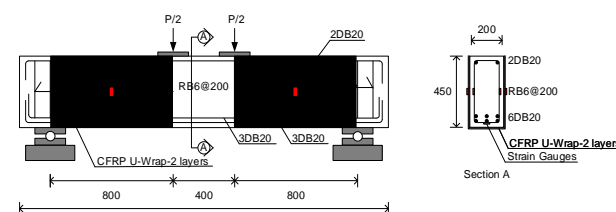
| ชื่อคาน | อัตราส่วน a/d | รูปแบบการเสริม                 | layer | หน้าตัดแผ่น CFRP (มม.) |
|---------|---------------|--------------------------------|-------|------------------------|
| A1      | 1             | ไม่ทำการเสริมกำลัง             | -     | -                      |
| A1U     |               | เสริมกำลังแบบตัวย ช่วงแรงเฉือน | 2     | 4800x0.129x2           |
| A1S     |               | เสริมกำลังแบบแถบ ช่วงแรงเฉือน  | 2     | 775x6x0.129x2          |
| A2      | 2             | ไม่ทำการเสริมกำลัง             | -     | -                      |
| A2U     |               | เสริมกำลังแบบตัวย ช่วงแรงเฉือน | 2     | 9600x0.129x2           |
| A2S     |               | เสริมกำลังแบบแถบ ช่วงแรงเฉือน  | 2     | 775x13x0.129x2         |

### 2.3 การติดตั้งเครื่องมือวัด

รูปแบบขั้นตอนการติดตั้งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน เริ่มจากการตัดแผ่น CFRP ตามขนาดช่วงแรงเฉือนตามรูปแบบที่ต้องการจากนั้นทำการทากาวยึดประสาน บนคอนกรีตและพื้นแผ่น CFRP 2 ชั้น ทิ้งไว้ให้แห้งและทำการบ่มอากาศเป็นเวลา 7 วัน ต่อมาขั้นตอนการติดตั้งสัญญาณวัดความเครียด (Strain gauges) ที่กึ่งกลางของเหล็กเสริมรับแรงอัดและแรงดึงรวมถึงช่วงแรงเฉือน และกึ่งกลางแผ่น CFRP ดังรูปที่ 1

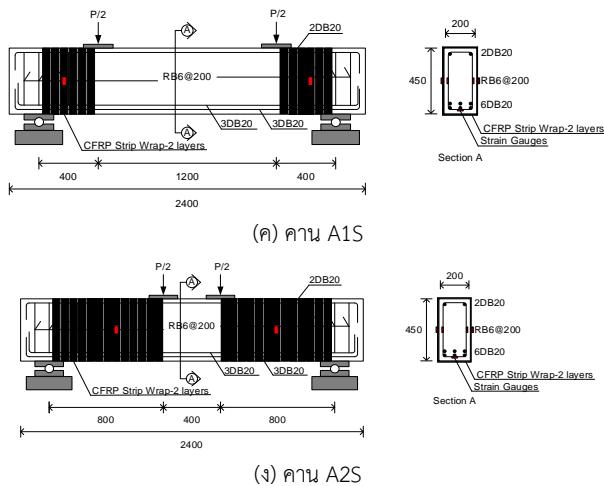


(ก) คาน A1U



(ข) คาน A2U

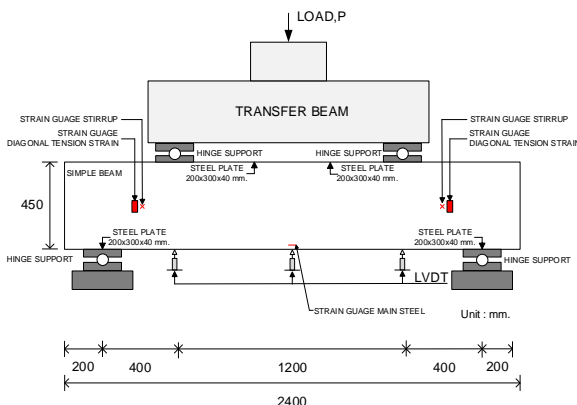
รูปที่ 1 รายละเอียดคานและการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดในคานตัวอย่าง



รูปที่ 1 รายละเอียดคานและการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดในคานตัวอย่าง (ต่อ)

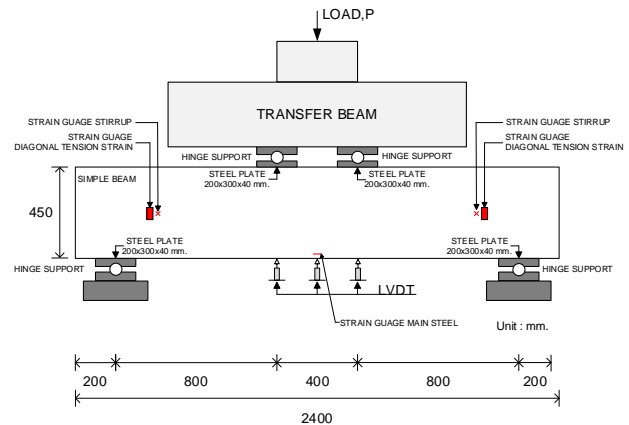
### 2.4 การทดสอบคานควบคุม

คานควบคุมทั้ง 2 กลุ่ม จะถูกทดสอบกำลังบรรทุกรับน้ำหนักบรรทุกภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบสถิต (Static load) โดยแม่แรงไฮดรอลิกผ่านอุปกรณ์ถ่ายแรง (Load cell) ระยะห่างระหว่างจุดฐานรองรับ 2000 มม. และระยะตำแหน่งรับน้ำหนักกระทำมีค่าเท่ากับ 400 มม. และ 800 มม. สำหรับคานที่มีค่าอัตราส่วน  $a/d$  เท่ากับ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้น 10 กิโลนิวตัน / 1 นาที จนกระทั่งวิบัติ และทำการสังเกตรอยร้าวที่เกิดขึ้นทุกระยะการรับน้ำหนักกระทำ รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบและอุปกรณ์ตรวจวัด ดังรูปที่ 2



(ก) คานที่มีอัตราส่วน  $a/d$  เท่ากับ 1

รูปที่ 2 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบและอุปกรณ์ตรวจวัดละเอียดในการควบคุม



(ข) คานที่มีอัตราส่วน  $a/d$  เท่ากับ 2

รูปที่ 2 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบและอุปกรณ์ตรวจวัดละเอียดในการควบคุม (ต่อ)

### 3. การทดสอบและการอภิปรายผล

#### 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัว

จากการทดสอบการเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนทุกตัวอย่างคานจะบันทึกค่ากำลังรับน้ำหนักทุกช่วงของการเกิดรอยร้าวแรก (Load at concrete cracking) บันทึกค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกจุดคราก (Load at yield) บันทึกค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Maximum load) และบันทึกค่าการแอ่นตัวสูงสุด (Deflection maximum load) ที่กระทำต่อทุกคานตัวอย่างจนกระทั่งตัวอย่างคานเกิดการวิบัติ

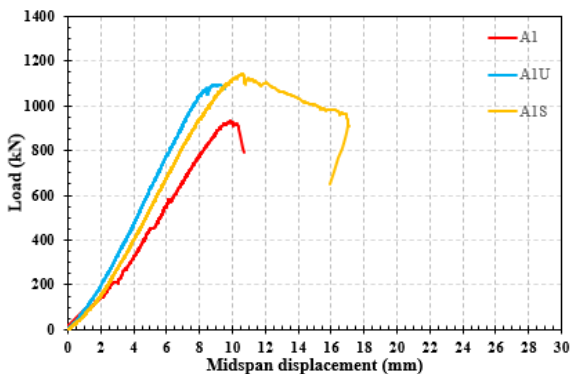
จากรูปที่ 3 ความสัมพันธ์อัตราส่วน  $a/d$  ที่ต่างกันแสดงให้เห็นว่าคานกลุ่มที่ 1 มีอัตราส่วน  $a/d$  เท่ากับ 1.00 นั้นมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยมากกว่าคานกลุ่มที่ 2 จากรูปที่ 4 ที่มีอัตราส่วน  $a/d$  เท่ากับ 2.00 ทั้งที่เป็นคานอ้างอิงและคานที่เสริมกำลัง เนื่องจากคานที่มีอัตราส่วน  $a/d$  น้อยจะมีพฤติกรรมเป็นคานลึกมากกว่าและมีกำลังรับแรงเฉือนที่เป็นสาเหตุหลักของการวิบัติได้มากกว่าคานที่มีอัตราส่วน  $a/d$  ที่มากกว่า แต่ในทางกลับกันแม้คานที่มีอัตราส่วน  $a/d$  น้อย ก็จะมีความสามารถในการรับน้ำหนักน้อยลง คานที่มีพฤติกรรมเป็นคานลึกจะสามารถรับกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยได้มากแต่จะมีการวิบัติได้น้อย ดังนั้นเมื่อเกิดการวิบัติจะเป็นการวิบัติแบบฉับพลัน ไม่มีการเตือนหรือที่เรียกว่าการวิบัติแบบเปราะ (Brittle failure) และจะเห็นว่ากลุ่มที่ 1 ความชันของคานเสริมกำลังภายนอกจะมีความชันที่มากกว่าคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง A1 ซึ่งหมายความว่ามีความแข็งแรง (Stiffness) มากกว่าแต่ความชันในกลุ่มที่ 2 มีความใกล้เคียงกันหมายความว่ามีความแข็งแรง (Stiffness) ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 2 ตารางผลการทดสอบ

| ชื่อคาน | น้ำหนักบรรทุก รอยร้าวแรก (kN) | น้ำหนักบรรทุก ณ จุดคราก (kN) | น้ำหนักบรรทุก สูงสุด (kN) | น้ำหนักบรรทุก ณ การแฉกตัวสูงสุด (kN) | รูปแบบการวิบัติ  |
|---------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|--|
| A1      | 150                           | 925                          | 934                       | 10.6                                 | การวิบัติด้วยแรงเฉือน  |
| A1U     | 180                           | -                            | 1096                      | 9.2                                  | การวิบัติด้วยแรงเฉือน ที่เกิดการแยกตัวของคอนกรีตกับแผ่น CFRP |
| A1S     | 120                           | -                            | 1142                      | 12.1                                 | การวิบัติด้วยแรงเฉือน ที่เกิดการแยกตัวของคอนกรีตกับแผ่น CFRP |
| A2      | 170                           | 289                          | 324                       | 10.4                                 | การวิบัติด้วยแรงเฉือน  |
| A2U     | 100                           | 466                          | 478                       | 8.2                                  | การวิบัติด้วยแรงเฉือน ที่เกิดการแยกตัวของคอนกรีตกับแผ่น CFRP |
| A2S     | 70                            | 517                          | 806                       | 20.8                                 | การวิบัติด้วยการอัด  |

หมายเหตุ \*รอยร้าวแรกที่เกิดขึ้นจากแรงค้ำ

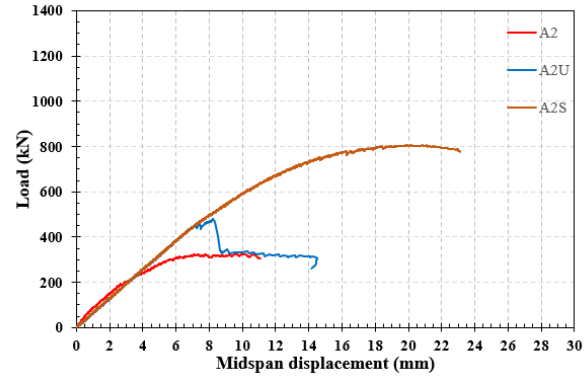
จากรูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการแฉกตัวที่กึ่งกลางคาน ของคานที่มีอัตราส่วนแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 1 เมื่อทำการให้แรงกระทำจนถึงวิบัติคานที่ไม่ได้รับการเสริมกำลัง (A1) รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Maximum load) ที่ 934 กิโลนิวตัน คานที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่น CFRP แบบตัวยู (A1U) รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ 1096 กิโลนิวตัน แบบแถบ (A1S) รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ 1216 กิโลนิวตัน เมื่อคิดเป็นอัตราส่วนเทียบกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง A1 ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นถึง 17% และ 22%, A1U และ A1S ตามลำดับ ทำให้การเสริมกำลังภายนอกส่งผลให้น้ำหนักบรรทุก ณ จุดคราก (Yield point) มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับคานที่ไม่ได้รับการเสริมกำลังภายนอก



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการแฉกตัวที่กึ่งกลางคาน อัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล ( $a/d=1$ )

จากรูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการแฉกตัวที่กึ่งกลางคาน ที่มีอัตราส่วนแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 2 ได้ทำการให้แรงกระทำจนถึงจุดวิบัติของคานที่ไม่ได้รับการเสริมกำลังภายนอก

(A2) รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Maximum load) ที่ 324 กิโลนิวตัน ในส่วนของคานที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่น CFRP แบบตัวยู (A2U) รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ 478 กิโลนิวตันและแบบแถบ (A2S) รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ 806 กิโลนิวตัน โดยคิดเป็นอัตราส่วนเทียบกับคานที่ไม่ได้เสริมกำลัง A2 มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นถึง 47% และ 148%, A2U และ A2S ตามลำดับ ทำให้การเสริมกำลังภายนอกส่งผลให้น้ำหนักบรรทุก ณ จุดคราก (Yield point) มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับคานที่ไม่ได้รับการเสริมกำลังภายนอก



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกระทำกับการแฉกตัวที่กึ่งกลางคาน อัตราส่วนช่วงแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผล ( $a/d=2$ )

### 3.2 การกระจายตัวของรอยร้าวและการวิบัติ

การวิบัติของคาน คาน A1, A2 ที่มีลักษณะการวิบัติบริเวณช่วงหน้าตัดรับแรงเฉือน (Shear mode) โดยรอยร้าวแรกที่เกิดจะเกิดที่จุดกึ่งกลางคานบริเวณด้านล่างผิวคอนกรีต จากนั้นจะเกิดรอยร้าวที่กึ่งกลางของช่วงแรงเฉือนและเกิดรอยร้าวอย่างต่อเนื่อง ออกจากตรงกลางไปถึงจุดรองรับ ดังรูปที่ 5 (ก) และ 5 (ง) ซึ่งคาน A1U, A1S, A2U ดังรูปที่ 5(ข) 5(ค) 5(จ) ตามลำดับ มีลักษณะการวิบัติช่วงหน้าตัดแรงเฉือนคล้าย/ในลักษณะเดียวกัน แต่เนื่องจากการเสริมกำลังภายนอกที่ทำให้ช่วงการวิบัติยืดยาวไปได้อีกจนกระทั่งเกิดการแยกชั้นส่วนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนกับคอนกรีต (Debonding) ดังรูปที่ 5(ข) 5(ค) และคาน A2S แต่คาน A2S เป็นการวิบัติด้วยแรงอัด (Flexural compression failure) เนื่องจากการเสริมกำลังบริเวณช่วงแรงเฉือนกินพื้นที่คานเกือบทั้งหมด ทำให้มีความสามารถในการรับแรงเฉือนมากกว่าการรับแรงค้ำ การวิบัติของคานจึงเป็นการวิบัติด้วยแรงค้ำด้านบนของคาน (Concrete cracking) ดังรูปที่ 5(ฉ)



(ก) คาน A1

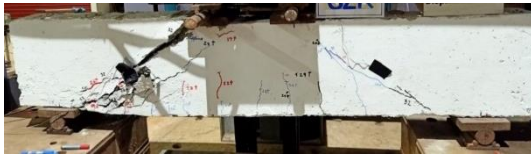
รูปที่ 5 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่าง



(ข) คาน A1U



(ค) คาน A1S



(ง) คาน A2



(จ) คาน A2U



(ฉ) คาน A2S

รูปที่ 5 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่าง (ต่อ)

#### 4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานลึกลับคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและรูปแบบการเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนสรุปได้ดังนี้

1. ค่าอัตราส่วน  $a/d$  ที่มีค่าน้อยจะมีพฤติกรรมเป็นคานลึกลับมากกว่าอัตราส่วน  $a/d$  ที่มากและมีกำลังรับแรงเฉือนที่เป็นสาเหตุหลักของการวิบัติได้มากกว่าคานที่มี อัตราส่วน  $a/d$  ที่มาก แต่ อัตราส่วน  $a/d$  ที่น้อยจะมีความสามารถเสียรูปที่น้อยลงไปด้วย
2. การเสริมกำลังภายนอกช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการรับน้ำหนักบรรทุกและช่วยยับยั้งการขยายตัวของรอยร้าวที่เกิดขึ้นในแนวทแยงได้ดีกว่าแบบที่ไม่ได้เสริมกำลังภายนอกอย่างเห็นได้ชัด
3. การเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนรูปแบบแถบ (Fully Strip) เพิ่มประสิทธิภาพของคานลึกลับได้ดีกว่ารูปแบบการเสริมกำลังแบบตัวยู (U-Wrap) ถึง 30% และ 126% ในอัตราส่วน  $a/d = 1$  และ 2 ตามลำดับ

4. ประสิทธิภาพในการเสริมกำลังเราจะเห็นผลของ CFRP มากในอัตราส่วน  $a/d = 2$  เมื่อเทียบกับ อัตราส่วน  $a/d = 1$

#### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และขอขอบคุณบริษัท ริโทรฟิซเทคเจอร์สเปเชียลลิสต์ จำกัด ที่ได้ช่วยเหลือและสนับสนุนด้านวัสดุเสริมกำลังและแรงงานในการติดตั้งในการทำวิจัยในครั้งนี้

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] Siddika, A., Al Mamun, M. A., Alyousef, R., & Amran, Y. M. (2019). Strengthening of reinforced concrete beams by using fiber-reinforced polymer composites: A review. *Journal of Building Engineering*, 25, 100798.
- [2] Rahmanian, I., Lucet, Y., & Tesfamariam, S. (2014). Optimal design of reinforced concrete beams: A review. *Computers and Concrete, An International Journal*, 13(4), 457-482.
- [3] Meda, A., Minelli, F., & Plizzari, G. A. (2012). Flexural behaviour of RC beams in fibre reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*, 43(8), 2930-2937.
- [4] Adhikary, S. D., Li, B., & Fujikake, K. (2014). Effects of high loading rate on reinforced concrete beams. *ACI Structural journal*, 111(3), 651-660.
- [5] Majdzadeh, F., Soleimani, S. M., & Banthia, N. (2006). Shear strength of reinforced concrete beams with a fiber concrete matrix. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(6), 726-734.
- [6] Kadhim, A. A., & Kadhim, H. M. (2021, March). Loading capacity prediction of rubberized reinforced concrete continuous deep beams. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1090, No. 1, p. 012031). IOP Publishing.
- [7] Bircher, D., Tuchscherer, R., Huizinga, M., Bayrak, O., Wood, S. L., & Jirsa, J. O. (2009). Strength and serviceability design of reinforced concrete deep beams (No. FHWA/TX-09/0-5253-1).
- [8] Jasim, W. A., Tahnat, Y. B. A., & Halahla, A. M. (2020, August). Behavior of reinforced concrete deep beam with web openings strengthened with (CFRP) sheet. In *Structures* (Vol. 26, pp. 785-800). Elsevier.
- [9] Abbood, I. S. (2022). Strut-and-tie model applications on reinforced concrete deep beam: A comprehensive review. *Case Studies in Construction Materials*, e01767.

- [10] Karataş, M. A., & Gökkaya, H. (2018). A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. *Defence Technology*, 14(4), 318-326.
- [11] Zhou, F., Zhang, J., Song, S., Yang, D., & Wang, C. (2019). Effect of temperature on material properties of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) tendons: Experiments and model assessment. *Materials*, 12(7), 1025.
- [12] Ozkan, D., Gok, M. S., & Karaoglanli, A. C. (2020). Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite materials, their characteristic properties, industrial application areas and their machinability. *Engineering Design Applications III: Structures, Materials and Processes*, 235-253.
- [13] Wang, K., Young, B., & Smith, S. T. (2011). Mechanical properties of pultruded carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) plates at elevated temperatures. *Engineering structures*, 33(7), 2154-2161.
- [14] Niemitz, C. W., James, R., & Breña, S. F. (2010). Experimental behavior of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) sheets attached to concrete surfaces using CFRP anchors. *Journal of Composites for Construction*, 14(2), 185-194.
- [15] Xiao, X., Kim, J. J., Oh, S. H., & Kim, Y. S. (2021). Study on the incremental sheet forming of CFRP sheet. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 141, 106209.
- [16] Al-Zubaidy, H., Zhao, X. L., & Al-Mahaidi, R. (2013). Mechanical characterisation of the dynamic tensile properties of CFRP sheet and adhesive at medium strain rates. *Composite Structures*, 96, 153-164.
- [17] Niemitz, C. W., James, R., & Breña, S. F. (2010). Experimental behavior of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) sheets attached to concrete surfaces using CFRP anchors. *Journal of Composites for Construction*, 14(2), 185-194.
- [18] Jarrah, M., Najafabadi, E. P., Khaneghahi, M. H., & Oskouei, A. V. (2018). The effect of elevated temperatures on the tensile performance of GFRP and CFRP sheets. *Construction and Building Materials*, 190, 38-52.
- [19] Al-Rousan, R., & Issa, M. (2011). Fatigue performance of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3520-3529.
- [20] Liu, H. B., Zhao, X. L., & Al-Mahaidi, R. (2010). Effect of fatigue loading on bond strength between CFRP sheets and steel plates. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 10(01), 1-20.
- [21] De Baere, I., Van Paepegem, W., Quaresimin, M., & Degrieck, J. (2011). On the tension-tension fatigue behaviour of a carbon reinforced thermoplastic part I: Limitations of the ASTM D3039/D3479 standard. *Polymer Testing*, 30(6), 625-632.
- [22] Trejo, D., & Pillai, R. G. (2003). Accelerated chloride threshold testing: part I-ASTM A 615 and A 706 reinforcement. *Materials Journal*, 100(6), 519-527.
- [23] Szykiedans, K., Credo, W., & Osifński, D. (2017). Selected mechanical properties of PETG 3-D prints. *Procedia Engineering*, 177, 455-461.
- [24] Puri, B., Brown, B., McKee, H., & Treasaden, I. (1992). *Manual of ready-mixed concrete*. CRC Press.