

พฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานลึกลับคานกริดเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิตย์

สินีนากู แก้วประสิทธิ์* สายันต์ ศิริมนตรี และ ชนะชัย ทองโคม

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: sineenat.kaew@dome.tu.ac.th

วันที่รับบทความ: 28 ธันวาคม 2566; วันที่ทบทวนบทความ: 8 มีนาคม 2567; วันที่ตอบรับบทความ: 25 มีนาคม 2567

วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 28 เมษายน 2567

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานลึกลับคานกริดเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์โดยทำการทดสอบคาน 2 กลุ่ม ได้แก่คานที่มีอัตราส่วนช่วงการเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ (a/d Ratio) เท่ากับ 1.00 และ 2.00 จำนวนทั้งหมด 6 ตัวอย่าง คานทดสอบมีขนาด $0.20 \times 0.45 \times 2.4$ เมตร รูปแบบการเสริมกำลังมี 2 แบบ ได้แก่ U-wrap และ Fully wrap ผลการทดสอบพบว่าการเสริมกำลังแบบ Fully wrap สามารถเพิ่มกำลังรับแรงเฉือนซึ่งแสดงในรูปของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้มากกว่าแบบ U-wrap นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยเมื่อเทียบกับคานอ้างอิงในคานกลุ่มที่ 2 มีมากกว่าคานกลุ่มที่ 1 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคานลึกลับจะเห็นเด่นชัดเมื่อคานมีค่า a/d Ratio สูง และมีผลน้อยเมื่อคานมี a/d ratio ต่ำอันเป็นผลจากพฤติกรรมแบบกลไกอาร์ช (Arch Action) ซึ่งการถ่ายแรงเฉือนจะประกอบไปด้วย Compression Strut และ Tension Tie ทำให้กำลังรับแรงเฉือนส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคานกริดในแนว Compression Strut

คำสำคัญ: คานลึกลับคานกริดเสริมเหล็ก; เสริมกำลังรับแรงเฉือน; แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

Shear Behavior of Reinforced Concrete Deep Beams Strengthened with Carbon Fiber under Static Loading

Sineenat Kaewprasit^{*}, Sayan Sirimontree and Chanachai Thongchom

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University

^{*} Corresponding author, E-mail: sineenat.kaew@dome.tu.ac.th

Received: 28 December 2023; Revised: 8 March 2024; Accepted: 25 March 2024

Online Published: 28 April 2024

Abstract: This study investigates the shear behavior of reinforced concrete (RC) deep beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP). The experiment was divided into two groups of deep beams, which had a shear span to effective depth ratios (a/d ratios) of 1.00 and 2.00. In total, six 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-wrap and Fully wrap. Experimental results reveal that shear strength, in terms of load carrying capacity of the beams strengthened by Fully wrap type CFRP was higher than that of the beams strengthened by U-wrap type CFRP. The increase in the load carrying capacity compared to the reference beam in Group 2 beams was greater than that in Group 1 beams, indicating that the effectiveness of shear strengthening was evident when the beams had a/d ratio was high and it was little effected when the beam was a low a/d ratio. As a result, when the beam has a lower a/d ratio, the more concrete will play an important role in resisting high shear force as a result of Arch action behavior. The shear force transfer consists of Compression strut and Tension tie. The most of shear strength depended on the compressive strength of the concrete in the compression strut.

Keywords: RC Deep Beams; Shear Strengthening; Carbon Fiber Reinforced Polymer



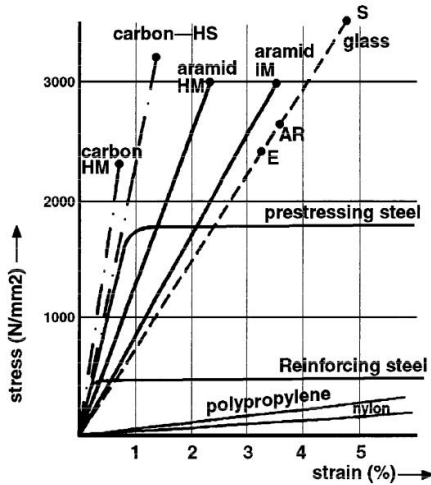
1. บทนำ

การวิบัติด้วยแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก มีลักษณะเป็นการแตกร้าวในแนวทแยงเนื่องจากแรงเฉือนทำให้เกิดหน่วยแรงดึงหลัก (Principle Tensile Stress) บริเวณที่แรงเฉือนสูง เช่น ใกล้จุดรองรับ ในบริเวณที่มีโมเมนต์ดัดสูงขึ้นการวิบัติจะเริ่มด้วยการแตกร้าวในแนวตั้งเนื่องจากโมเมนต์ดัดจากนั้นรอยร้าวจะแผ่ขยายต่อเนื่องเป็นการแตกร้าวในแนวทแยงเนื่องจากแรงเฉือน เรียกว่า “แรงเฉือนดัด”(Flexural Shear) การวิบัติด้วยแรงเฉือนเป็นการวิบัติแบบเปราะ (Brittle) โดยไม่มีการเตือน ดังนั้นหลักการที่สำคัญในออกแบบคือการออกแบบให้กำลังต้านทานแรงเฉือนของหน้าตัดไม่น้อยกว่ากำลังต้านทานแรงดัดในทุกๆ หน้าตัดตลอดความยาวคาน จึงต้องมีการออกแบบให้ปริมาณของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนมีเพียงพอที่จะทำให้คานวิบัติด้วยแรงดัด ซึ่งเป็นการวิบัติแบบเหนียว คานเล็กคือคานที่มีอัตราส่วนช่วงเฉือน (a) ต่อความลึกประสิทธิภาพ (d) (Shear Span/Effective Depth Ratio, a/d) อยู่ระหว่าง 1.00 ถึง 2.00 มีบริเวณที่มีพฤติกรรมการต้านแรงเฉือนแบบกลไกอาร์ช (Arch Action) ที่กำลังต้านทานแรงเฉือนส่วนใหญ่จะมาจากกำลังอัดของคอนกรีตในแนวทแยง (Strut) รับแรงอัด แต่เมื่ออัตราส่วน a/d มีค่ามากขึ้นผลของกลไกอาร์ชจะลดลง ทำให้ความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีตมีค่าลดลง ส่งผลให้เหล็กปลอกมีบทบาทในการทำหน้าที่รับแรงเฉือนเพิ่มมากขึ้น ในกรณีที่มีการออกแบบคานเพื่อรับแรงเฉือนไม่เพียงพอ อาทิ การปรับปรุงการใช้งานโครงสร้างเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้น การเสื่อมสภาพของวัสดุตามอายุการใช้งานและสภาพแวดล้อม [1, 2] อาจจำเป็นต้องทำการเสริมกำลัง

รับแรงเฉือนให้กับคาน การเสริมกำลังรับแรงเฉือนมีหลากหลายวิธีแต่วิธีที่ได้รับความนิยมมากในปัจจุบันคือการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานที่ได้รับการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ที่มีค่าอัตราส่วน a/d มากกว่า 2.5 (Slender Beam) ได้มีนักวิจัยทำการศึกษาเป็นจำนวนมาก งานวิจัยนี้จะศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานเล็กที่มีค่าอัตราส่วน a/d น้อยกว่า 2.5 ที่ได้รับการเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์

คานช่วงเดียวจะมีพฤติกรรมเป็นคานลึก (Deep Beam) เมื่ออัตราส่วน a/d ของคานมีค่าไม่เกิน 2.0 มีการรับแรงเฉือนเป็นแบบกลไกอาร์ช ซึ่งมีเหล็กเสริมรับแรงดัดทำหน้าที่เป็นตัวยึด (Tie) ที่รับแรงดึงขนาดคงที่พาดฐานรองรับทั้งสอง ในขณะที่คอนกรีตจะทำหน้าที่เป็นส่วนรับแรงอัดในแนวทแยง (Strut) โดยรอยร้าวจะเกิดขึ้นและขยายตัวพาดระหว่างจุดของแรงกระทำและฐานรองรับเป็นแนวเอียง รอยร้าวนี้จะทำลายความต้านทานแรงเฉือนตั้งแต่ระดับเหล็กเสริมรับแรงดัดจนถึงคอนกรีตส่วนที่รับแรงอัดทำให้คอนกรีตไม่สามารถรับแรงอัดที่เป็นผลมาจากโมเมนต์ได้คานเกิดการวิบัติอย่างฉับพลัน เรียกว่า Shear Compression Failure

พอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer, FRP) เป็นวัสดุเสริมกำลังที่ใช้อย่างแพร่หลายทดแทนการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยแผ่นเหล็กเนื่องจากมีกำลังรับแรงดึงสูงเมื่อเทียบกับวัสดุเสริมกำลังชนิดอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 มีโมดูลัสยืดหยุ่นสูง และน้ำหนักเบา ทำให้สะดวกแก่การติดตั้งและไม่กระทบต่อน้ำหนักของโครงสร้างเดิม ทนต่อสภาพแวดล้อมและไม่เกิดสนิม [1, 3] การวางทิศทางของเส้นใย FRP ขวางกับแนวแกน



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดภายใต้แรงดึงของวัสดุเสริมกำลังต่างๆ [5]

ของชิ้นส่วนหรือตั้งฉากกับรอยร้าวจากแรงเฉือนที่อาจเกิดขึ้นเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มกำลังรับแรงเฉือน [4]

มีผลการศึกษามากมายเกี่ยวกับผลจากการเสริมกำลังโครงสร้างคานลึกลอนกริดเสริมเหล็กด้วย FRP ทั้งการเปรียบเทียบชนิดของเส้นใยที่แตกต่างกันระหว่างเส้นใย CFRP และ GFRP [6, 7] รูปแบบและทิศทางของเส้นใยที่แตกต่างกัน [6-10] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเพื่อซ่อมแซมโครงสร้างที่เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน [11, 12] และเสริมกำลังโครงสร้างที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ [10]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า รูปแบบการติดตั้ง ชนิดวัสดุเสริมกำลังและทิศทางของเส้นใยที่แตกต่างกันจะให้ประสิทธิภาพในการเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกที่ต่างกัน การเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่น CFRP มักเกิดการวิบัติจากการหลุดล่อนของ CFRP กับผิวคอนกรีต (CFRP Debonding) งานวิจัยนี้

จะทำการศึกษาพฤติกรรมคานลึกลอนกริดเสริมเหล็กที่มีอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพผลต่างกันที่ 1.00 และ 2.00 โดยจะศึกษาพฤติกรรมของคานลึกลอนกริดเสริมเหล็กกับแรงเฉือนต่ำกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุดที่ระบุไว้ตามมาตรฐาน ACI318-19 และเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (CFRP) ในรูปแบบที่แตกต่างกัน 2 รูปแบบ โดยการทดสอบคานตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ

2. วัสดุและวิธีการทดสอบ

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบสถิติของคานลึกลอนกริดเสริมเหล็กที่มีค่าอัตราส่วน a/d เท่ากับ 1.00 และ 2.00 ที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วย CFRP โดยการทดสอบรูปแบบการเสริมกำลังมี 2 วิธี ได้แก่ U-wrap และ Fully Wrap คานตัวอย่างมีจำนวนทั้งหมด 6 ตัวอย่าง จะถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่มตามค่าอัตราส่วน a/d แต่ละกลุ่มจะประกอบไปด้วย คานอ้างอิง 1 ตัว และคานที่เสริมกำลัง 2 ตัว รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบแสดงในตารางที่ 1

2.1 รายละเอียดคานตัวอย่าง

คานตัวอย่างมีขนาดหน้าตัดเท่ากับ $0.20 \times 0.45 \times 2.4$ เมตร มีการเสริมเหล็กกับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนเท่ากันทุกตัวอย่าง การทดสอบจะให้น้ำหนักกระทำสองจุดโดยมีการแปรเปลี่ยนอัตราส่วน a/d เท่ากับ 1.00 และ 2.00 ตามลำดับ คอนกรีตที่ใช้หล่อตัวอย่างถูกออกแบบให้มีกำลังอัดประลัยของตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกที่ 28 วันเท่ากับ 21 MPa เหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัดใช้เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดึงที่จุดคราก



ไม่น้อยกว่า 400 MPa สำหรับเหล็กปลอกใช้เหล็กเส้นกลมผิวเรียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก 200 มิลลิเมตร มีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า 240 MPa รายละเอียดการเสริมเหล็กแสดงในรูปที่ 2

วัสดุที่ใช้เสริมกำลังได้แก่ แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์เส้นใยทิศทางเดียวและใช้อุปกรณ์เสริมซึ่งเป็นวัสดุเชื่อมประสานโดยสมบัติเชิงกลเป็นไปตามรายงานของผู้ผลิต ดังแสดงในตารางที่ 2 การติดตั้งเป็นวิธีการแบบเปียก (Wet Lay-Up) ตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน มยผ.1508-15 [13]

คานตัวอย่าง B1U และ B2U ติดตั้ง CFRP ในลักษณะพันรอบ 3 ด้าน (U-wrap) จำนวน 2 ชั้น ตลอดช่วงการเงื่อนไข คานตัวอย่าง B1F และ B2F ติดตั้ง CFRP ในลักษณะพันรอบ 4 ด้าน (Fully Wrap) จำนวน 2 ชั้น ตลอดช่วงการเงื่อนไข ดังแสดงในรูปที่ 3

2.2 การติดตั้งเครื่องมือวัด

คานทดสอบเป็นคานช่วงเดียวมีฐานรองรับเป็นแบบ Simply Support มีช่วงคานทดสอบ 2,000 มิลลิเมตร ให้นำหนักโดย Hydraulic Jack ผ่าน Load cell มายังคานถ่ายแรง (Transfer Beam) มีการวัดค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานด้วย Displacement Transducer (DT1,DT2) ที่มีค่าความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ความเครียดของเหล็กปลอกรับแรงเฉือน (SG1,SG2) เหล็กเสริมรับแรงดึง (SG3,SG4) และที่แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะวัดค่าโดยเกจวัดความเครียดแบบไฟฟ้า (Electrical Strain Gauge) มีความยาวเกจขนาด 5 มิลลิเมตร อุปกรณ์ทั้งหมดถูกต่อเข้ากับอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (Data Locker) เพื่อส่งและบันทึกข้อมูลในเครื่องคอมพิวเตอร์ รายละเอียดและตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดแสดงในรูปที่ 4

ตารางที่ 1 รายละเอียดการเสริมกำลังคานตัวอย่าง

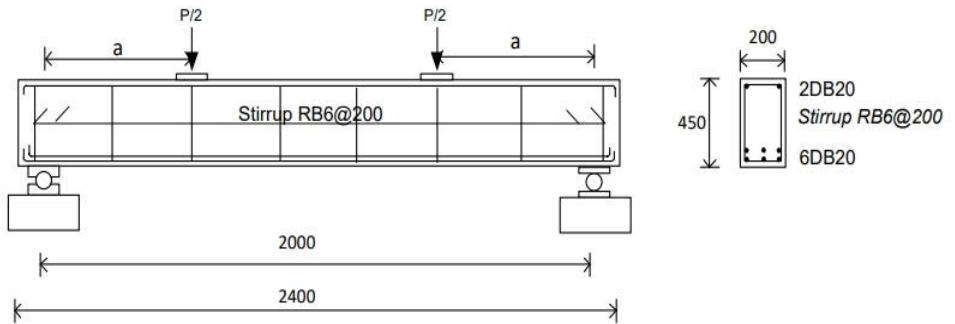
กลุ่ม	a/d Ratio	ชื่อคานตัวอย่าง	รายละเอียดการเสริมกำลัง	แนวของเส้นใย
1	1.00	BR1	-	-
		B1U	U-wrap 2 ชั้น ตลอดช่วงเงื่อนไข	0°และ 90°*
		B1F	Fully wrap 2 ชั้นตลอดช่วงเงื่อนไข	0°และ 90°
2	2.00	BR2	-	-
		B2U	U-wrap 2 ชั้น ตลอดช่วงเงื่อนไข	0°และ 90°
		B2F	Fully wrap 2 ชั้นตลอดช่วงเงื่อนไข	0°และ 90°

* การทำมุมของเส้นใยชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 กับความยาวของคาน

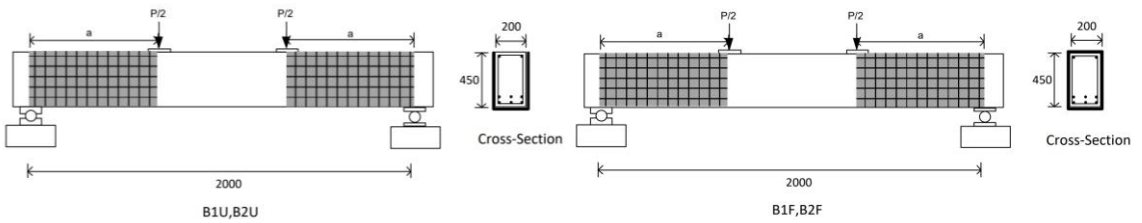
ตารางที่ 2 สมบัติของ CFRP Sheet และ Epoxy Resin

วัสดุ	กำลังรับแรงดึง (MPa)	โมดูลัสยืดหยุ่นต่อแรงดึง (MPa)	อัตราการยืดตัวจนขาด	กำลังรับแรงยึดเกาะต่อแรงดึง (MPa)	ความหนา (mm/ply)
CFRP	4,000	230,000	1.7%	-	0.129
Epoxy	30	4,500	0.9%	>4	-

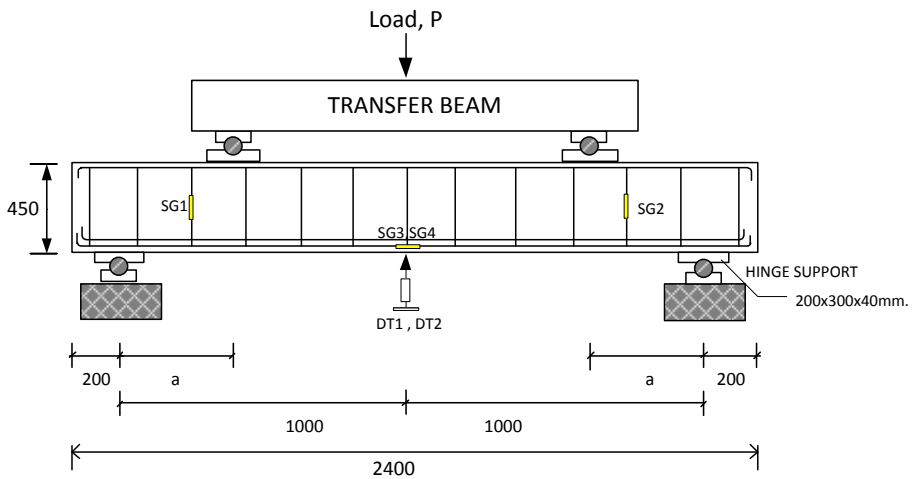
(7 วัน @ +23°C)



รูปที่ 2 รายละเอียดการเสริมเหล็กของคานตัวอย่าง



รูปที่ 3 รูปแบบการเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์



รูปที่ 4 ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัด



3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

คานตัวอย่างจะถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่มได้แก่ กลุ่มที่ 1 และ 2 ที่มีค่าอัตราส่วนช่วงเฉือนต่อความลึกประสิทธิภาพ เท่ากับ 1.00 และ 2.00 ตามลำดับ คานตัวอย่างทั้งหมดถูกทดสอบภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Static Loading) จนกระทั่งวิบัติ พฤติกรรมทางโครงสร้างของคานทดสอบจะถูกนำเสนอและวิเคราะห์ผลในลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเสียรูป กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติ ผลจากการทดสอบสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 3

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเสียรูป

พฤติกรรมภายใต้น้ำหนักบรรทุกของคานทดสอบแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเสียรูป ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัว

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงคานแสดงดังรูปที่ 5 จะเห็นว่าคานทดสอบที่มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 1.00 จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงจนกระทั่งถึงน้ำหนักบรรทุกสูงสุด

จนเกิดการวิบัติและน้ำหนักบรรทุกตกลงอย่างรวดเร็ว แสดงให้เห็นการวิบัติแบบเปราะเนื่องจากแรงเฉือน คานที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนแบบ U-wrap (B1U) รับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเพิ่มขึ้นได้น้อยเมื่อเทียบกับคานอ้างอิง (BR1) ประมาณร้อยละ 7.49 เนื่องจากมีการสูญเสียการยึดเหนี่ยว (Debond) ระหว่าง CFRP และผิวคอนกรีต และมีการปริออก ส่วนคานที่เสริมกำลังรับแรงเฉือนแบบ Fully Wrap (B1F) น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจะเพิ่มมากกว่าคาน B1U เล็กน้อย แต่จะมีความสามารถในการเสียรูปก่อนเกิดการวิบัติมากกว่าคานอ้างอิงและคาน B1U อย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นถึงความเหนียวที่เพิ่มขึ้นของคานที่เสริมกำลังแบบ Fully Wrap

คานทดสอบที่มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 2.00 จะเห็นว่าคานอ้างอิง (BR2) มีการแอ่นตัวก่อนการวิบัติได้มากเมื่อเทียบกับกรณีของคาน BR1 แต่กำลังรับน้ำหนักจะน้อยกว่า BR1 อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อคานมีการเสริมกำลังแบบ U-wrap (B2U) น้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นมากกว่า BR2 ประมาณร้อยละ 28.69 และมีการหลุดร่อนของ CFRP ทำให้การแอ่นตัวที่สภาวะประลัยน้อยกว่าคานอ้างอิง คานที่เสริมกำลังแบบ Fully Wrap (B2F) น้ำหนักบรรทุกสูงสุดและการแอ่นตัวที่สภาวะประลัยสูงกว่าคานอ้างอิง BR2 อย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 3 ผลจากการทดสอบ

กลุ่ม	ชื่อคานตัวอย่าง	น้ำหนักบรรทุกประลัย (kN)	การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกประลัย (%)	การแอ่นตัวสูงสุด (มม.)	รูปแบบการวิบัติ
1	BR1	934	-	9.94	Shear Compression
	B1U	1,004	7.49	9.39	CFRP Debonding
	B1F	1,072	14.78	16.33	Shear Compression
2	BR2	324.8	-	12.06	Shear Compression
	B2U	418	28.69	7.35	CFRP Debonding
	B2F	764	135.22	17.36	Flexural Compression

ค่าแอนตัวสูงสุดที่สภาวะประลัยสามารถแสดงให้เห็นถึงความเหนียว (Ductility) ของโครงสร้าง จากผลการทดสอบในตารางที่ 3 พบว่า คานเสริมกำลังแบบ U-wrap (B1U,B2U) มีค่าการแอนตัวตัวลดลง ในขณะที่คานที่เสริมกำลังแบบ Fully Wrap (B1F,B2F) มีค่าการแอนตัวเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับคานอ้างอิง (BR1,BR2) แสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังแบบ U-wrap ทำให้ความเหนียวของคานมีค่าลดลง มีการหลุดร่อนของ CFRP ที่ส่วนปลาย (Debonding) ของ U-wrap ในขณะที่การเสริมกำลังแบบ Fully Wrap ทำให้ความเหนียวของคานมีค่ามากขึ้น เนื่องจากการโอบริดของ CFRP ช่วยยับยั้งการแตกร้าวแยกออกจากกันของคอนกรีตในแนวทแยง ทำให้เหล็กเสริมรับแรงดึงมีหน่วยแรงใกล้ถึงจุดครากก่อนเกิดการวิบัติได้

คานกลุ่มที่มีอัตราส่วน a/d มากกว่าจะมีค่าการแอนตัวที่สภาวะประลัยสูงกว่า เนื่องจากคานที่มีอัตราส่วน a/d น้อย จะมีพฤติกรรมเป็นแบบคานลึกมากและมีแนวโน้มที่จะวิบัติโดยรอยร้าวทแยงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงทแยงที่มีค่าเกินกำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตก่อนที่เหล็กเสริมรับแรงดึงจะมีหน่วยแรงถึงจุดครากและเกิดการเสียรูปที่มากขึ้นได้

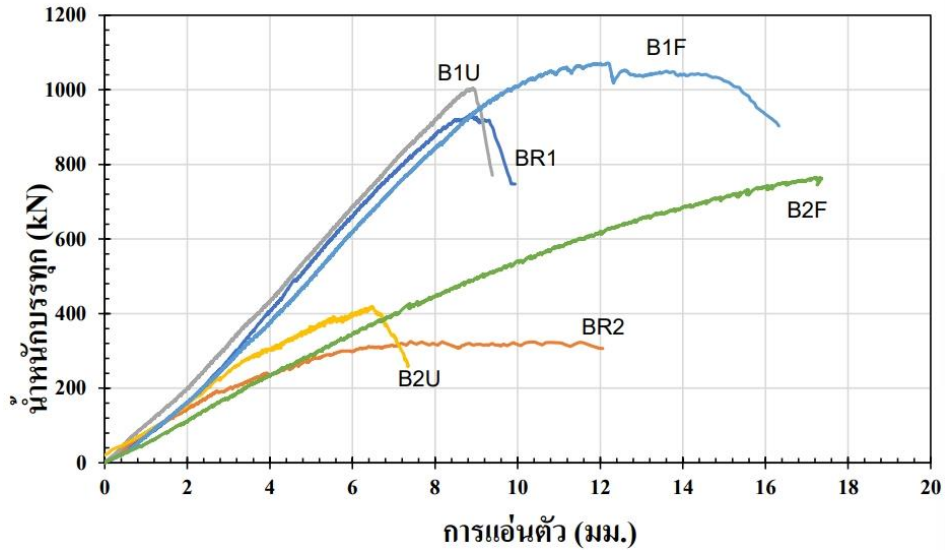
3.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียด

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า ช่วงแรกกราฟจะเป็นเส้นตรงที่มีความชันสูงเนื่องจากหน่วยแรงและความเครียดเกิดขึ้นที่แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์มีค่าน้อย เมื่อคานเกิดรอยร้าวและความกว้างของรอยร้าวขยายมากขึ้น จะเกิดหน่วยแรงดึงที่สูงขึ้นในแผ่น CFRP คานที่เสริมกำลังแบบ

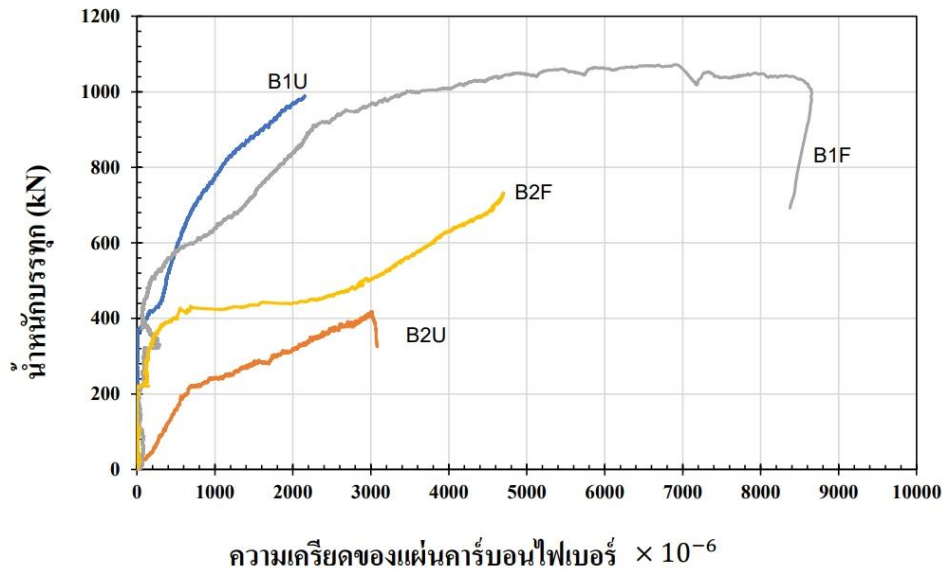
Fully Wrap จะมีความเครียดเกิดขึ้นมากกว่าคานที่เสริมกำลังแบบ U-wrap เนื่องจากไม่เกิดการหลุดร่อน (Debonding) หน่วยแรงในแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ของคานทดสอบกลุ่มที่ 1 เริ่มเพิ่มขึ้นที่น้ำหนักบรรทุกสูงกว่าของคานทดสอบกลุ่มที่ 2 แสดงให้เห็นว่าคานทดสอบที่มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 1.00 นั้นมีกำลังรับหน่วยแรงเฉือนในคอนกรีตสูงกว่าในคานทดสอบที่มีอัตราส่วน a/d เท่ากับ 2.00

3.2 กำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Ultimate Load)

น้ำหนักบรรทุกประลัย คือ น้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่คานสามารถรับได้และแสดงให้เห็นถึงกำลังรับแรงเฉือนของคานทดสอบ จากผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าการเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วย CFRP สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยได้เมื่อเปรียบเทียบคานในแต่ละกลุ่มพบว่า คานเสริมกำลังทั้งหมด (B1U,B2U,B1F,B2F) สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยได้เมื่อเทียบกับคานอ้างอิง (BR1,BR2) โดยจะสังเกตเห็นว่าการเสริมกำลังแบบ Fully Wrap มีความสามารถในการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกประลัยมากกว่าแบบ U-wrap เนื่องจากการพันรอบทั้งสี่ด้านเป็นการพันโอบริดโครงสร้างคานไว้ทั่วทั้งบริเวณช่วงเฉือน เมื่อคานเกิดการแตกร้าวในแนวทแยงเนื่องจากแรงเฉือน CFRP จะทำหน้าที่โอบริดและรับแรงดึงทำให้คานทดสอบสามารถต้านทานแรงเฉือนและรับน้ำหนักบรรทุกประลัยได้สูงขึ้น หากพิจารณาที่อัตราการเพิ่มขึ้นของกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยเมื่อเทียบกับคานอ้างอิงของคานกลุ่มที่ 1 จะมีค่าน้อยกว่ากลุ่มที่ 2 เนื่องจากการเสริมกำลังจะมีผลน้อยในคานที่มีพฤติกรรมเป็นแบบคานลึก (Deep Beam) มาก ผลของการเสริมกำลังจะมีมาก



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน
a/d ratio เท่ากับ 1.00 และ 2.00



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับความเครียดของแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์



เมื่อคานามีพฤติกรรมค่อนข้างไปทางเป็นคานาชะลูด (Slender Beam) ทั้งนี้เป็นเพราะคานาลึกจะมีกลไกสำคัญในการรับแรงเฉือนมาจากคอนกรีตเป็นหลัก หรือที่เรียกว่า Arch action เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 7 และรูปที่ 8 จะแสดงให้เห็นถึงกำลังต้านแรงเฉือนของหน้าตัดคานาเมื่อแปรเปลี่ยนอัตราส่วน a/d ของคานา คอนกรีตเสริมเหล็กรับโมเมนต์ดัดแต่ไม่เสริมเหล็กรับแรงเฉือน เนื่องจากการวิบัติโดยแรงเฉือนเป็นการวิบัติแบบเปราะส่วนการวิบัติโดยโมเมนต์ดัดเป็นการวิบัติแบบเหนียวดังนั้นจึงต้องทำการออกแบบเหล็กปลอกให้เพียงพอที่คานาจะวิบัติด้วยโมเมนต์ดัด กำลังต้านแรงเฉือนจะประกอบด้วยส่วนที่ต้านโดยคอนกรีต และเหล็กรับแรงเฉือน โดยแรงเฉือนต้านทานสูงสุดต้องไม่น้อยกว่า

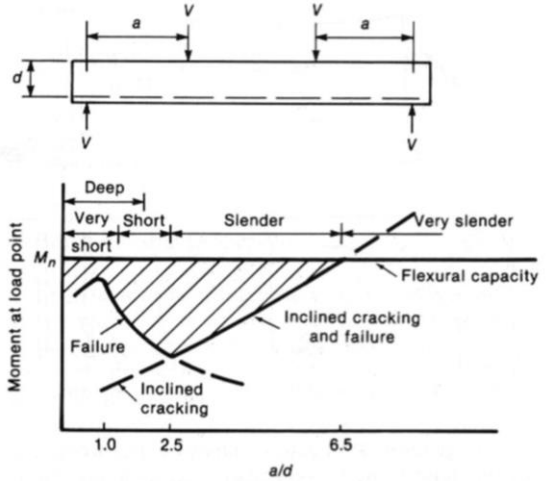
$$V_n = M_n / a \quad (1)$$

เมื่อ M_n คือ โมเมนต์ดัดประลัยของหน้าตัด (Nominal moment capacity)

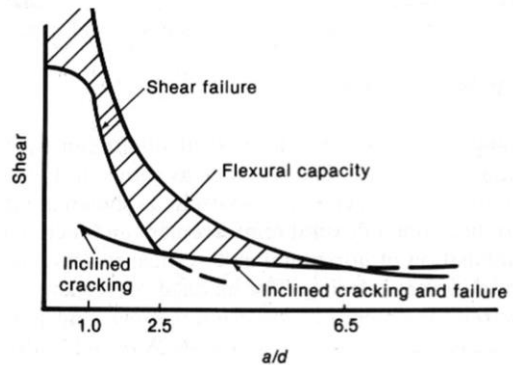
$$M_n = A_s f_y (d - a/2) \quad (2)$$

งานวิจัยนี้ใช้ Strut and Tie Model ในการคำนวณออกแบบคานาดังกล่าว กำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ได้จะให้ผลที่ค่อนข้างปลอดภัยเนื่องจากการวิบัติของคานาลึกเป็นการวิบัติแบบเปราะ น้ำหนักบรรทุกประลัยของคานาอ้างอิง BR1 และ BR2 ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 535 และ 318 kN ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าผลการทดสอบ

พื้นที่แรงเงาแสดงถึงผลของของการเสริมกำลังรับแรงเฉือนด้วยเหล็กปลอกและ CFRP จะเห็นว่าเมื่อคานามีอัตราส่วน a/d ต่ำ ผลของการเสริมกำลังรับแรงเฉือนนั้นจะน้อยมากโดยคอนกรีตจะมีส่วนในการรับ



รูปที่ 7 กำลังต้านแรงเฉือนของหน้าตัดคานา คอนกรีตที่ไม่เสริมกำลังรับแรงเฉือนในรูปของโมเมนต์ดัดที่คานารับได้สูงสุดเมื่อเกิดการวิบัติโดยแรงเฉือน [14]



รูปที่ 8 ผลของอัตราส่วน a/d ที่มีต่อกำลังต้านแรงเฉือนของคานาที่ไม่เสริมกำลังรับแรงเฉือน [15]

แรงเฉือนเป็นหลัก และเมื่ออัตราส่วน a/d มีค่าเพิ่มขึ้น ผลของการเสริมกำลังจะเพิ่มมากขึ้นในขณะที่การต้านทานแรงเฉือนโดยคอนกรีตลดลง การเสริมเหล็กปลอกหรือเสริม CFRP รับแรงเฉือนที่เพียงพอจะทำให้คานาสามารถพัฒนากำลังรับน้ำหนักประลัยไปจนถึงกำลังต้านทานแรงดัดได้



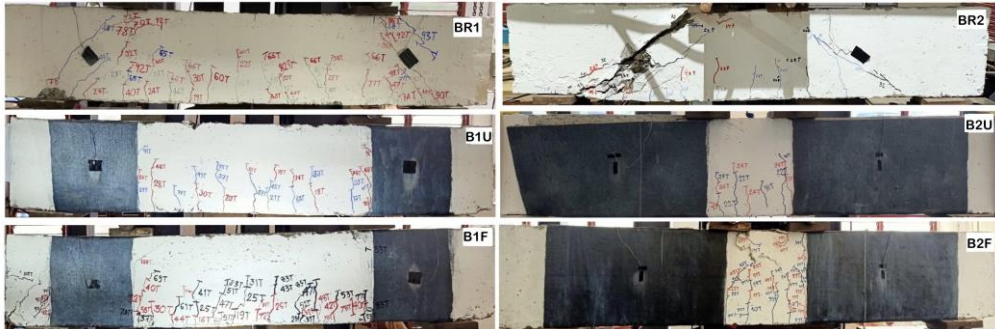
ตารางที่ 4 เปรียบเทียบผลจากงานวิจัยในอดีต

งานวิจัย	ขนาดคาน ตัวอย่าง (มม.)	ชื่อคานตัวอย่าง	a/d Ratio	รายละเอียดการเสริมกำลัง	อัตราการเพิ่มขึ้น ของน้ำหนักบรรทุก ประลัย (%)
		B1U	1.00	U-wrap ด้วย CFRP 2 ชั้น ตลอด ช่วงเฉือน	7.49
S. Kaewprasit (งานวิจัยนี้)	200 x 450 x 2400	B2U	2.00		28.69
		B1F	1.00	Fully Wrap ด้วย CFRP	14.78
		B2F	2.00	2 ชั้น ตลอดช่วงเฉือน	135.22
A.H. Zaher [7]	140 x 450 x 1900	G2.BCa1	1.25	U-wrap	59.4
		G2.BCa2	1.50	ตลอดช่วงเฉือน	62
		G2.BCa3	1.75		74.6
M.M. Hason [16]	150 x 280 x 1400	G2-a/d1-F-p0.4	1.00	Fully Wrap	18.06
		G3-a/d1.75-F-p0.4	1.75	ตลอดช่วงเฉือน	22.65
W. Li [17]	180 x 350 x 2000	B1U	1.00	Strip U-wrap ตลอดช่วงเฉือน	2.5
		B2U	1.50		12.8
		B3U	2.00		31.8

จากการศึกษาผลการทดลองของงานวิจัยในอดีตที่ทำการทดสอบเสริมกำลังรับแรงเฉือนโครงสร้างคานลึกลคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ โดยมีคานตัวอย่างที่มีค่า a/d มากกว่าหนึ่งค่า ดังแสดงข้อมูลต่าง ๆ ในตารางที่ 4 ได้แก่ ขนาดของคานตัวอย่าง กำลังของวัสดุ รายละเอียดการเสริมเหล็กและรูปแบบการเสริมกำลังด้วย CFRP ที่ต่างกัน ทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบโดยตรงได้ อย่างไรก็ตามจากการศึกษาอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกประลัยพบว่า ผลการทดสอบเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือเมื่อคานที่เสริมกำลังมี a/d Ratio เพิ่มขึ้น อัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบรรทุกประลัยก็เพิ่มขึ้นตาม กล่าวคือ a/d Ratio มีผลต่อประสิทธิภาพการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคานลึกลคอนกรีตเสริมเหล็ก การเสริมกำลังจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อคานมี a/d Ratio สูง และจะมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อคานมีค่า a/d Ratio ต่ำ

3.3 ลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติ

การวิบัติโดยทั่วไปของคานลึกลคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีสาเหตุมาจากแรงเฉือนเป็นหลัก ณ ตำแหน่งของ Strut รับแรงอัด (Compression Strut) โดยรอยร้าวทแยงจะเกิดขึ้นเป็นเส้นตรงจากตำแหน่งฐานรองรับไปยังจุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ ทำมุม 45 องศากับแนวคาน รอยร้าวที่เกิดขึ้นไม่ได้มาจากแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear) แต่เกิดจากแรงดึงในแนวทแยงที่มีผลมาจากแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด และรอยร้าวจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดึงในแนวทแยงมีค่าเกินกำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีต คานทดสอบทั้งหมดมีรอยร้าวแรกที่ปรากฏในช่วงกลางคานเนื่องจากแรงดัดและพัฒนาเป็นรอยร้าวในรูปแบบของ Flexural-Shear Crack เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นลักษณะของรอยร้าวและการวิบัติจะแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ลักษณะการแตกร้าวและรูปแบบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

คาน BR1 เกิดการแตกร้าวขึ้นที่บริเวณฐานรองรับในลักษณะเอียงทำมุม 45 องศากับแนวนอนและขยายไปในแนวเฉียงจนถึงตำแหน่งที่แรงกระทำ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงเฉือน (Shear Crack) รอยร้าวมีความกว้างมากขึ้นเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกิดการวิบัติ คาน BR2 เกิดรอยร้าวที่ strut บริเวณช่วงเอวของคาน (Web Shear Crack) และขยายไปจนถึงตำแหน่งฐานรองรับและตำแหน่งที่น้ำหนักกระทำ ความกว้างของรอยร้าวเพิ่มขึ้นและเกิดการทรุดตัวบริเวณจุดที่แรงกระทำทำให้เกิดการระเบิดออกของคอนกรีตใน Strut รับแรงอัด (Strut Crushing) เรียกการวิบัตินี้ว่า Shear Compression Failure

คานที่เสริมกำลังแบบ U-wrap B1U และ B2U เกิดรอยร้าวบริเวณใกล้ขอบของ CFRP ทั้งสองข้าง เมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มมากขึ้นรอยร้าวจะปรากฏออกมาจากช่วงเฉือนทั้งสองข้าง คานเกิดการทรุดตัวเนื่องจากแรงเฉือน (Shear Failure) และมุมบนของแผ่น CFRP จะเริ่มปริและหลุดออกจากผิวคาน (CFRP Debonding) สำหรับคานที่เสริมกำลังแบบ Fully wrap คาน B1F เกิดรอยร้าวที่เสริมบริเวณฐานรองรับจำนวนมากพัดผ่านไปยังตำแหน่งที่น้ำหนักกระทำขอบของ CFRP ปรีออกจากผิวคอนกรีตเล็กน้อย

คอนกรีตในช่วงเฉือนที่ถูกห่อหุ้มด้วย CFRP ถูกบดอัดจนกระทั่งคานเกิดการทรุดตัวและเกิดรอยร้าวทแยงขนาดใหญ่ที่มุมของคาน แต่แผ่น CFRP ไม่มีการฉีกขาดหรือหลุดออกจากผิวคอนกรีตเป็นการวิบัติแบบ Shear Compression Failure คาน B2F เกิดรอยร้าวในช่วงกลางของคานลักษณะเป็นแนวตั้งและขยายไปตามแนวของแผ่น CFRP เมื่อน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น เริ่มปรากฏรอยร้าวจากตำแหน่งที่น้ำหนักกระทำและวิบัติจากการบดอัดของคอนกรีต (Concrete Crushing) บริเวณที่น้ำหนักกระทำ เป็นการวิบัติแบบ Flexural Compression Failure

4. สรุปผลการวิจัย

4.1 การเสริมกำลังภายนอกด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ทั้ง 2 วิธี ได้แก่แบบ U-wrap และ Fully-wrap สามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกประลัยได้โดยรูปแบบที่ดีที่สุดคือ Fully Wrap น้ำหนักบรรทุกประลัยเพิ่มขึ้นร้อยละ 14.78 และ 135.22 สำหรับคานที่ a/d Ratio เท่ากับ 1.00 และ 2.00 ตามลำดับ คานที่เสริมกำลังแบบ U-wrap จะมีการหลุดล่อนของ CFRP บริเวณส่วนปลายสุดของรูปตัวยูขณะรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด



4.2 เมื่ออัตราส่วน a/d มีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าการแอ่นตัวที่สภาวะประลัยของคานอ้างอิงและคานที่เสริมกำลังแบบ Fully Wrap จะเพิ่มขึ้น แต่คานที่เสริมกำลังแบบ U-wrap จะมีค่าการแอ่นตัวลดลงเนื่องจากเกิดการหลุดล่อนของ CFRP เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุด

4.3 การเสริมกำลังด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ช่วยยับยั้งการขยายตัวของรอยร้าวทแยงที่เป็นสาเหตุหลักของการวิบัติโดยแรงเฉือนได้ ทำให้อานสามารถรับน้ำหนักบรรทุกประลัยได้มากขึ้น

4.4 ประสิทธิภาพของการเสริมกำลังรับแรงเฉือนของคานลิกคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นคาร์บอนไฟเบอร์จะเห็นได้ชัดเมื่อคานมีอัตราส่วน a/d สูง และมีผลน้อยเมื่อคานมีอัตราส่วน a/d ต่ำ เนื่องจากเมื่อคานมีอัตราส่วน a/d น้อย คอนกรีตจะมีบทบาทสำคัญในการรับแรงเฉือนมาก อันเป็นผลจากกลไกการต้านแรงเฉือนแบบอาร์ช (Arch Action)

5. กิตติกรรมประกาศ

ในงานวิจัยนี้ได้รับทุกการศึกษาและทุนวิจัยจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และได้รับความอนุเคราะห์จาก Retrofit Structure Special, Co. Ltd. ช่วยสนับสนุนวัสดุเสริมกำลังและผู้เชี่ยวชาญด้านการติดตั้ง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Lenwari, Strengthening of reinforced concrete structures with fiber-reinforced polymers, 1ST Ed., Chulalongkorn University Press, BKK, Thailand, 2018.
- [2] V. Chovichian, Reinforced concrete design (Working Stress Design: WSD), 6th Ed., BKK, Thailand, 2012.
- [3] ISBN 978-974-458-669-8, Guide to Strengthening Building Structures, 1994. (in Thai).
- [4] ACI 440.2R-17, Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, 2007, 31.
- [5] ACI 440R-96, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, 2002, 12.
- [6] M.M. Elsonbaty, W.M. Montaser and A.H. Zaher, Strengthening of R.C deep beams using CFRP and GFRP, Civil Engineering Research Magazine (CERM), 2018, 40(4), 331-345.
- [7] A.H. Zaher, W.M. Montaser and M.M. Elsonbaty, Strengthening and repairing of RC deep beams using CFRP and GFRP, International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), 2020, 11(1), 64-85.
- [8] M.R. Islam, M.A. Mansur and M. Maalej, Shear strengthening of RC deep beams using externally bonded FRP systems, Cement and Concrete Composites, 2004, 413-420.



- [9] H.A. Ghanim, A.A. Asi, M.A. Jaber and M. Alqam, Shear and flexural behavior of reinforced concrete deep beams strengthened with CFRP composites, *Modern Applied Science*, 2017, 110-122.
- [10] R. Hongthong, A. Beniaphong and T. Jairtalawanich, Strengthening of deteriorated reinforced concrete deep beam caused by chloride with carbon fiber sheets, *RMUTP Research Journal*, 2020, 14(2), 160-172. (in Thai).
- [11] M. Rasheed, Retrofit of reinforced concrete deep beams with different shear reinforcement by using CFRP, *Civil and Environmental Research*, 2016, 8(5), 6-14.
- [12] M.S. Alexin and P.M. Philip, Shear behavior of RC deep beams retrofitted with CFRP sheets, *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2018, 6(6), 1-4.
- [13] ISBN 978-974-16-5863-3, Standard for Strengthening Reinforced Concrete Structures with Fiber-Reinforced Composite Materials, 2008. (in Thai).
- [14] J.G. MacGregor, Reinforced concrete mechanics and design, Prentice-Hall. Inc., NJ, USA, 1997.
- [15] T.T.C. Hsu, Unified theory of reinforced concrete, CRC Press., FL, USA, 1993.
- [16] M.M. Hason, A.N. Hanoon, S.J. Saleem, F. Hejazi and A.W.A. Zand, Characteristics of experimental ductility energy index of hybrid CFRP reinforced concrete deep beams, *SN Applied Sciences*, 2021, 3, 200.
- [17] W. Li and C.K.Y. Leung, Effect of shear span depth ratio on mechanical performance of RC beams strengthened in shear with u-wrapping FRP strips, *Composite Structures*, 2017, 141-157.