

การศึกษาเชิงทดลองด้านกำลังดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กกับแรงดึงร่วมกับเหล็กกับแรงอัด  
โดยใช้การยึดติดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนภายนอก  
Experimental Investigation on Flexure Strength of Doubly Reinforced Concrete Beams  
Using Externally Bonded Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plates

วิกร ไตรวาพงศ์<sup>1</sup> ปฏิภาณ จันทรวชิต<sup>2</sup> Damang Dy<sup>3</sup> ธนัท นกเอี้ยงทอง<sup>4</sup> และ ยศ สมพรเจริญสุข<sup>5\*</sup>

<sup>1,4,5</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จ.กรุงเทพฯ

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ จ.กรุงเทพฯ

<sup>3</sup> General Department of Immigration, Ministry of Interior, Phnom Penh, Cambodia

\*Corresponding author; E-mail address: syosyos@mut.ac.th

## บทคัดย่อ

การศึกษาเชิงทดลองสำหรับคานคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรงอัดและเสริมกำลังดัดด้วยการยึดติดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนจากภายนอกที่ผิวหน้ารับแรงดึงของคานคอนกรีตโดยที่ปลายทั้งสองข้างของแผ่น CFRP มีการรัดรอบโดยสมบูรณ์เพื่อป้องกันการวิบัติล่วงหน้าก่อนเวลากำหนดอันเนื่องมาจากการหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสภายในตรงบริเวณปลายแผ่นระหว่างแผ่น CFRP และคานคอนกรีต หรือเกิดการแยกตัวของคานคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมโดยที่คานรับแรงกระทำเพิ่มขึ้นทางเดียวแบบสมมาตรได้มีการนำเสนอไว้ในบทความนี้เพื่อหาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและผลการตอบสนองของการแอ่นตัว ค่าพารามิเตอร์ที่สนใจประกอบไปด้วยกำลังอัดของคานคอนกรีตและตำแหน่งของการให้แรงกระทำที่ส่งผลกระทบท่อน้ำหนักบรรทุกแต่กร้าวแรก น้ำหนักบรรทุกครากน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อน น้ำหนักบรรทุกประลัย อีกทั้งได้มีการพิจารณารูปแบบของการวิบัติ

คำสำคัญ: พอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน, การหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสภายใน, ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก, การวิบัติล่วงหน้าก่อนเวลากำหนด

## Abstract

An experimental investigation for simply supported doubly reinforced concrete beams and strengthened in flexure with externally bonded carbon fiber-reinforced polymer plates to the tension face of concrete where both ends of the CFRP plate have been fully wrapped to prevent the premature failures due to plate-end interfacial debonding between a CFRP plate and a concrete beam or separation of concrete covering, loaded by monotonically increasing symmetrical loads is presented in this paper to determine the load carrying capacity and deflection response. The interested parameters consisting of concrete compressive strengths and the positions of loading that effected to the first cracking load, yielding load, debonding load, ultimate load, and also failure mode are considered.

Keywords: carbon fiber-reinforced polymer, interfacial debonding, load carrying capacity, premature failure

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางว่าคอนกรีตเสริมเหล็ก (คสล) เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมและประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างโครงสร้างอาคารที่พักอาศัยและโครงสร้างพื้นฐานทางสาธารณูปโภคเนื่องจากสะดวกในการใช้งานและคงทน [1] อีกทั้งมีอายุการใช้งานของโครงสร้างที่ยาวนานเมื่อได้รับการพิจารณาซ่อมแซมบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ หากโครงสร้างคสล ได้รับความเสียหายและส่งผลทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกมีค่าลดลง

การเสริมกำลังจากภายนอกให้กับโครงสร้างด้วยการยึดติดแผ่นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (fiber-reinforced polymer: FRP) เป็นทางเลือกที่มีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นโครงสร้างและทำการก่อสร้างขึ้นมาใหม่ ในการเสริมกำลังด้วยวัสดุ FRP มีการศึกษาวิจัยมายาวนานมากกว่า 40 ปี ในกลุ่มประเทศยุโรปและประเทศญี่ปุ่นโดยเริ่มศึกษาวิจัยภายหลังจากปี ค.ศ. 1980 [2] จนสามารถวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างได้อย่างปลอดภัย [3,4] ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบันดังรายละเอียดต่อไปนี้

Garden, Hollaway และ Thorne [5] ศึกษาการเสริมกำลังคาน คสล โดยทำการอัดแรงแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP plate) พบว่าการอัดแรงก่อนในแผ่นเสริมกำลังช่วยลดการเสียรูปของคานและทำให้รอยร้าวที่เกิดขึ้นแคบซึ่งเป็นข้อดีในมุมมองการใช้งาน Taheri, Shahin และ Widiarsa [6] ศึกษาสมรรถนะของคานเสริมกำลังเชิงดัดด้วยการยึดติดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว (CFRP and GFRP plates) พบว่า การใช้แผ่น FRP ที่สั้นโดยมีความยาวแผ่นเฉลี่ยจุดที่มีความเค้นสูงสุดไปไม่มากนักไม่สามารถปรับปรุงกำลังและความแกร่งของคานได้ ส่วนคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่น FRP ที่ยาวและไม่มีการจัดเตรียมพื้นผิววัสดุที่ดียังสามารถให้ค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยและค่าความแกร่งที่ต่ำกว่าไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการจัดเตรียมพื้นผิววัสดุ Zhou, Gou, Zhang และคณะ [7] พัฒนาเทคนิคการยึดเกาะแบบผสมเสียดทานของแผ่น FRP (friction hybrid bonded FRP) ในคาน คสล ที่เสริมกำลังโดยใช้แผ่น CFRP พบว่า น้ำหนักบรรทุกประลัยของคานเสริมกำลังมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2.13 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับคานเสริมกำลังที่มีการใช้การจับยึดหุ้มด้วยแถบรูปตัว Y เมื่อพิจารณาผลของการแตกร้าวและน้ำหนักบรรทุกครากพบว่า มีการปรับปรุงให้ดีขึ้นมากอย่างมีนัยสำคัญโดยรอยร้าวมีการกระจายตัวและมีความกว้างจำกัด Pham และ Hao [8] ศึกษาพฤติกรรมคานเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP และโอบรัดด้วยแถบ FRP รูปตัว Y โดยมีการปรับแต่ง

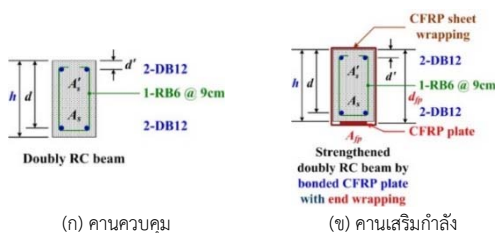
หน้าตัดคานให้โค้งที่มุมเพื่อลดความเข้มข้นของความเค้นในแถบแผ่น FRP รูปตัว Y การศึกษาบ่งชี้ว่า การปรับแต่งหน้าตัดคานสามารถเพิ่มการรับน้ำหนักบรรทุกได้มากขึ้นและยืดเวลาการหลุดล่อนของแผ่น FRP

Papakonstantinou, Kakae และ Gryllakis [9] ทำการตรวจสอบและเปรียบเทียบมาตรฐานการออกแบบการเสริมกำลังคานในชิ้นส่วน คสล โดยการยึดติดวัสดุประเภทต่างๆ จากภายนอก เช่น พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) เส้นใยคาร์บอน (CFRP) เส้นใยบอซอลท์ (BFRP) เส้นใยเหล็ก (SRP) และมอร์ตาร์เสริมเส้นใยถักทอ (textile reinforced mortar: TRM) ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติพบว่า หลายมาตรฐานการออกแบบที่มีอยู่สามารถนำมาใช้กับวัสดุเสริมกำลังประเภทต่างๆ ได้ โดยเฉพาะมาตรฐานของสมาคมวิศวกรโยธาญี่ปุ่น (JSCE) เป็นมาตรฐานที่ดีที่สุดในด้านความปลอดภัย Guo, Wang, Huang และคณะ [10] เสนอแบบจำลองเพื่อทำนายอายุความล้าบนพื้นฐานของความเสียหายเชิงสะสมของคาน คสล กำลังด้วยแผ่น CFRP ที่มีการอัดแรงก่อน ในระหว่างการทดสอบพบว่า รูปแบบรอยร้าวล้าสามารถตรวจพบด้วยเทคนิคการปรับแก้รูปภาพดิจิทัล การใช้แผ่น CFRP ที่ทำการอัดแรงก่อนช่วยลดความเค้นของเหล็กเสริมในคานและปรับปรุงสมรรถนะความล้าได้และเมื่อไม่นานมานี้ Thamrin, Zaidir และ Desharma [11] ศึกษาผลของอัตราส่วนปริมาตรเหล็กเสริมที่มีต่อพฤติกรรมเชิงคานของคาน คสล เมื่อเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP และเสนอแบบจำลองใหม่ที่ใช้ทำนายค่าโมเมนต์หลุดล่อนพบว่า อัตราส่วนปริมาตรเหล็กเสริมมีผลต่อสมรรถนะของคานเสริมกำลัง ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตและของแผ่น FRP และความหนาของแผ่น CFRP พบว่า มีผลต่อค่าโมเมนต์หลุดล่อน

สำหรับบทความนี้ศึกษาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและการตอบสนองต่อการแอ่นตัวของคาน คสล ที่เสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด (doubly RC beams) และทำการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP โดยป้องกันกรวิบัติก่อนเวลาด้วยวิธีการครอบที่ปลายแผ่น CFRP

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

คานทดสอบที่ใช้มีจำนวน 14 ตัวอย่างคาน โดยใช้คอนกรีตผสมเสร็จและทำการหล่อคานในที่ (cast-in-place) ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลักตามกำลังอัดระบุของคอนกรีตรูปทรงกระบอกคือ 240 ksc และ 280 ksc โดยเป็นคานควบคุม 8 ตัวอย่าง และคานเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP จำนวน 6 ตัวอย่าง คานมีหน้าตัดกว้าง (b) 15 cm ลึก (h) 25 cm และยาว 2.4 m ทุกตัวอย่างคานมีการเสริมเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัด DB12 ชั้นคุณภาพ SD40 และเหล็กปลอกรูปตัว Y RB6 ชั้นคุณภาพ SR24 ดังรูปที่ 1 (ก) สำหรับการเสริมกำลังใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนแบบแผ่นแข็ง (CFRP plate) ที่มีหน้ากว้าง 5 cm ยาว 1.9 m และหนา 2.4 mm และยึดติดด้วยอีพ็อกซีที่ไซโครอปิค (Sikadur®-30) ในการรัดรอบปลายแผ่น CFRP นั้นใช้แผ่น CFRP แบบแผ่นอ่อน (sheet) ที่มีหน้ากว้าง 25 cm หนา 0.16 mm ความยาวรัดรอบเมื่อรวมระยะทับคือ 95 cm และยึดติดโดยใช้อีพ็อกซี Sikadur®-330 ดังรูปที่ 1 (ข)



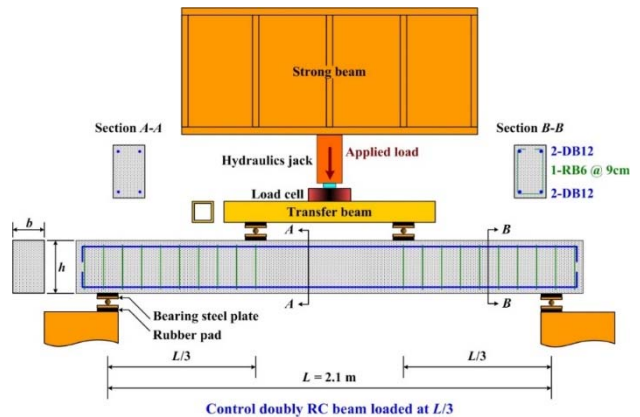
รูปที่ 1 หน้าตัดคานทดสอบที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัด

ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างคานทดสอบ (คานควบคุมและคานเสริมกำลัง)

คาน	ประเภทคาน	กำลังอัดคอนกรีต (ksc)	ระยะนำหนักบรรทุกกระทำจากฐานรองรับ (cm)
CB-1D-L/3	คานควบคุม	240	$L/3 = 70$
CB-1D-1.5h	คานควบคุม	240	$a = 1.5h = 37.5$
FB-1D-1.5h	คานเสริมกำลัง	240	$a = 1.5h = 37.5$
CB-1D-2.0h	คานควบคุม	240	$a = 2.0h = 50$
FB-1D-2.0h	คานเสริมกำลัง	240	$a = 2.0h = 50$
CB-1D-2.5h	คานควบคุม	240	$a = 2.5h = 62.5$
FB-1D-2.5h	คานเสริมกำลัง	240	$a = 2.5h = 62.5$
CB-2D-L/3	คานควบคุม	280	$L/3 = 70$
CB-2D-1.5h	คานควบคุม	280	$a = 1.5h = 37.5$
FB-2D-1.5h	คานเสริมกำลัง	280	$a = 1.5h = 37.5$
CB-2D-2.0h	คานควบคุม	280	$a = 2.0h = 50$
FB-2D-2.0h	คานเสริมกำลัง	280	$a = 2.0h = 50$
CB-2D-2.5h	คานควบคุม	280	$a = 2.5h = 62.5$
FB-2D-2.5h	คานเสริมกำลัง	280	$a = 2.5h = 62.5$

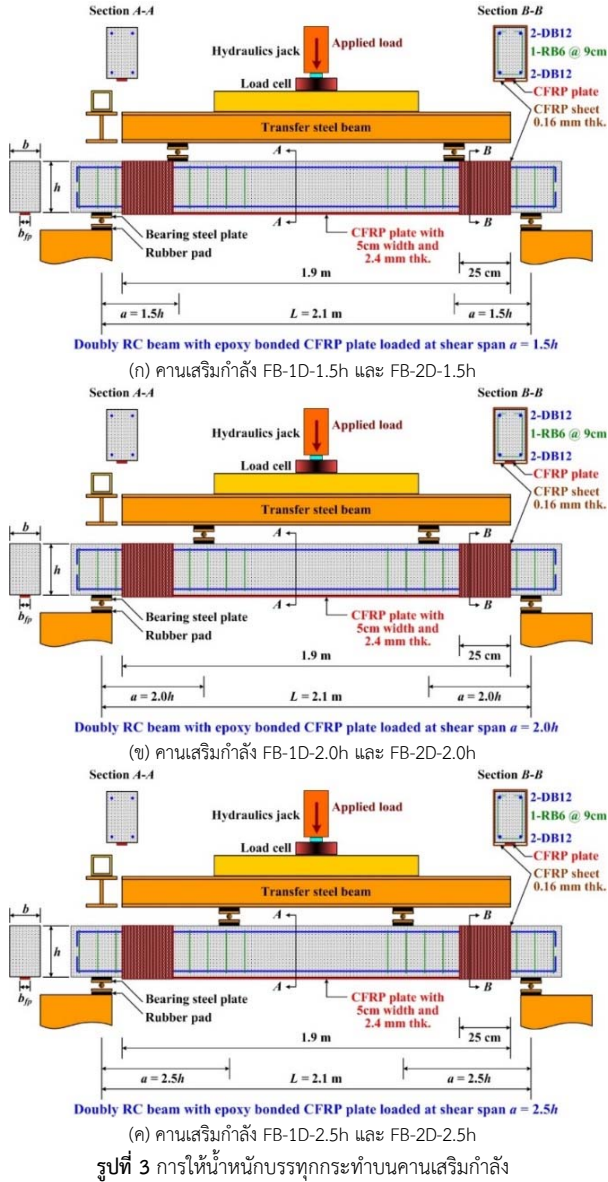
ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ (เหล็กเสริม คอนกรีตและแผ่น CFRP)

วัสดุ	ค่าระบุออกแบบ	ค่าจากการทดสอบวัสดุ
กำลังคานเหล็ก DB12	4000 ksc	5484 ksc
กำลังคานเหล็ก RB6	2400 ksc	4129 ksc
มอดูลัสเหล็กเสริม	$2.04 \times 10^6$ ksc	-
คอนกรีตกำลังอัด 240 ksc	240 ksc	259.58 ksc
มอดูลัสคอนกรีต	235632 ksc	245056 ksc
คอนกรีตกำลังอัด 280 ksc	280 ksc	279.39 ksc
มอดูลัสคอนกรีต	254512 ksc	254235 ksc
กำลังดึงประลัยแผ่น CFRP	29000 ksc	-
มอดูลัสแผ่น CFRP	$1.65 \times 10^6$ ksc	-



รูปที่ 2 การให้น้ำหนักบรรทุกบนคานควบคุม CB-1D-L/3 และ CB-2D-L/3

ตารางที่ 1 กำหนดการเรียกชื่อตัวอย่างคาน สำหรับตารางที่ 2 แสดงค่าคุณสมบัติวัสดุที่ระบุค่าออกแบบและค่าจากผลทดสอบ ในการทดสอบคานทำโดยให้น้ำหนักบรรทุกเป็นแบบจุดผ่านกระบอกแม่แรงไฮดรอลิกส์ขนาด 30 ตัน ที่ตกลงบนคานส่งถ่ายแรง (transfer beam) และส่งผ่านลงบนคานทดสอบแบบ 2 จุด ดังรูปที่ 2 ในกรณีคานควบคุม CB-1D-L/3 และ CB-2D-L/3 และรูปที่ 3 ในกรณีคานเสริมกำลังและคานควบคุมเมื่อมีระยะกดเดียวกัน สำหรับนิยามอัตราส่วนช่วงเฉือน [2] ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ  $a/h$  โดยที่  $a$  คือ ระยะช่วงเฉือนที่ทำการวัดจากฐานรองรับไปถึงตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำแบบจุด ส่วน  $h$  คือ ความลึกคาน ในการศึกษานี้กำหนดให้มีค่าอัตราส่วนช่วงเฉือน ( $a/h$ ) เท่ากับ 1.5 2.0 และ 2.5



รูปที่ 3 การให้น้ำหนักบรรทุกกระทำบนคานเสริมกำลัง



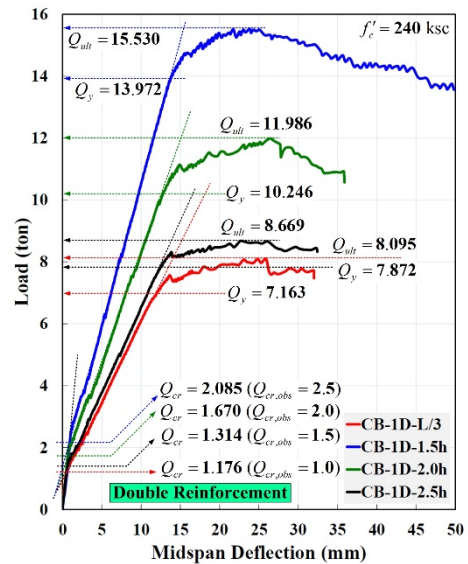
รูปที่ 4 คานเสริมกำลัง FB-1D-2.5h ก่อนให้น้ำหนักบรรทุกกระทำ

ตัวอย่างของภาพถ่ายคานเสริมกำลัง FB-1D-2.5h แสดงในรูปที่ 4 และรูปที่ 5 ทั้งก่อนและหลังการทดสอบ ตามลำดับ สังเกตได้ว่า รอยแตกร้าวมี

รูปแบบการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและรอยร้าวมีความลึกจากท้องคานสูงเลยครึ่งความลึกคาน



รูปที่ 5 คานเสริมกำลัง FB-1D-2.5h เมื่อหยุดให้น้ำหนักบรรทุกกระทำ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุมที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีต 240 ksc

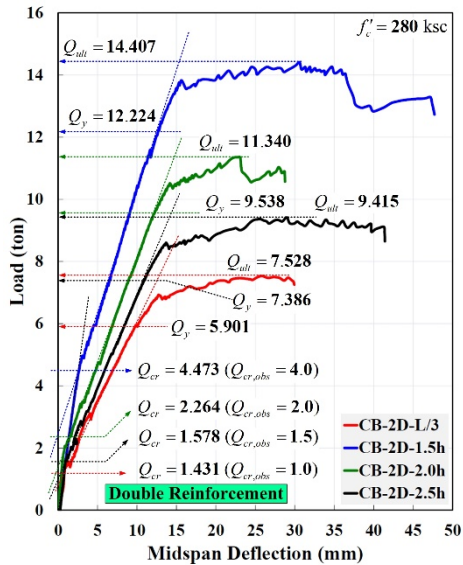
### 3. ผลการทดสอบ

ผลลัพธ์เบื้องต้นจากการทดสอบคานสามารถได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงพาดคานจากการเก็บข้อมูลของมาตรวัดแรง (load cell) และอุปกรณ์ตรวจวัดค่าการเคลื่อนที่ LVDTs โดยค่าการแอ่นตัวได้จากผลเฉลี่ยการแอ่นตัวของคานทดสอบที่ด้าน A และด้าน B รูปที่ 6 และรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวในกรณีของคานควบคุมต่างๆ ที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีตที่ใช้คือ 240 ksc และ 280 ksc ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละรูปนั้นได้ระบุค่าของน้ำหนักบรรทุกแตกร้าวมเริ่มแรก ( $Q_{cr}$ ) น้ำหนักบรรทุกคราก ( $Q_y$ ) และน้ำหนักบรรทุกประลัย ( $Q_{ult}$ ) จากการทดสอบคานในทำนองเดียวกันกับความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวในแบบ 3 เส้นตรง [1] นอกจากนี้ได้ระบุค่าน้ำหนักบรรทุกแตกร้าวมที่สังเกต ( $Q_{cr, obs}$ ) ได้ในระหว่างทำการทดสอบ ส่วนรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ให้ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุมและคานเสริมกำลัง

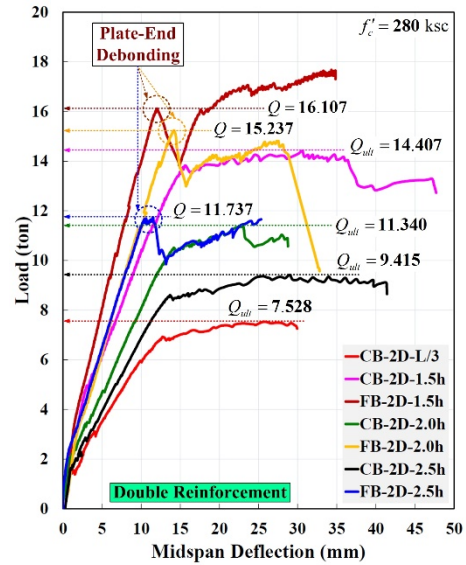


ที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีตคือ 240 ksc และ 280 ksc โดยมีระยะของ  
น้ำหนักบรรทุกกระทำที่ตำแหน่งเดียวกัน ตามลำดับ ทั้งนี้ ได้มีการระบุค่า  
น้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อน (Q) ของแผ่น CFRP ในคานเสริมกำลัง

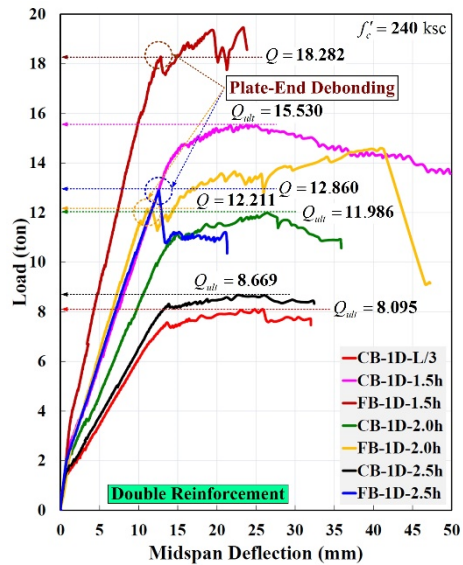
รูปที่ 12 ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่า คำน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนของ  
คานเสริมกำลังที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีต 280 ksc มีค่าสูงกว่ากรณี  
กำลังอัดระบุของคอนกรีต 240 ksc



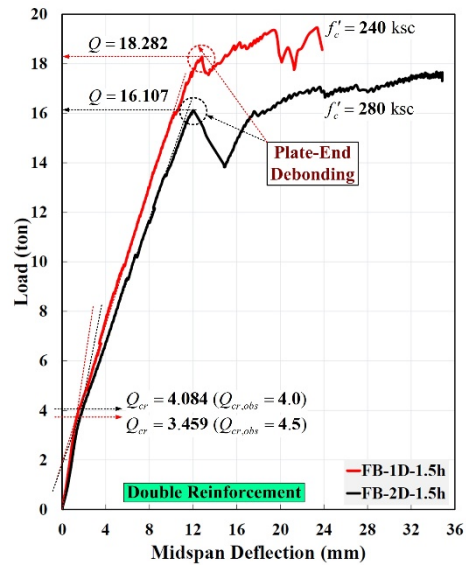
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุมที่มี  
กำลังอัดระบุของคอนกรีต 280 ksc



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุมและ  
คานเสริมกำลังที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีต 280 ksc



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุมและ  
คานเสริมกำลังที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีต 240 ksc

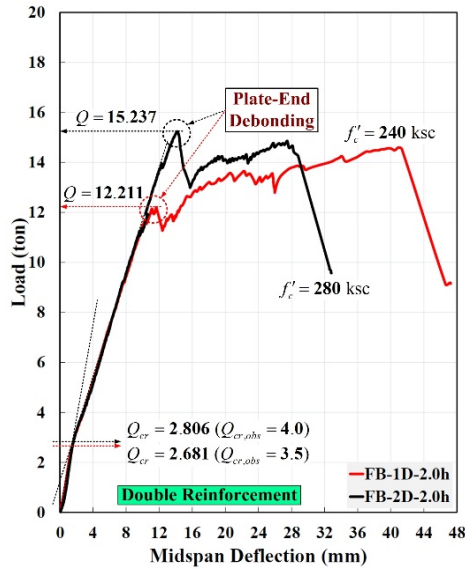


รูปที่ 10 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัว  
ของคานเสริมกำลัง FB-1D-1.5h และ FB-2D-1.5h

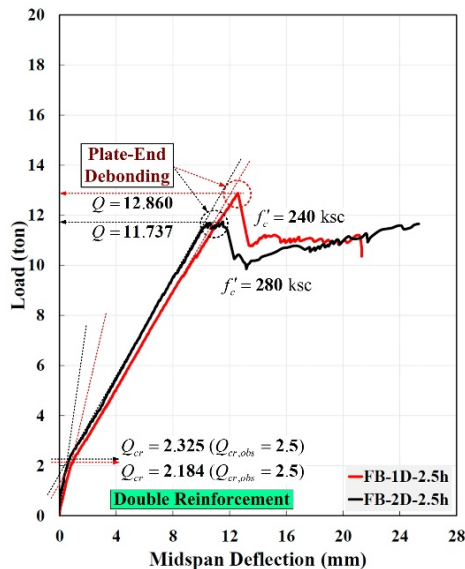
#### 4. อภิปรายผลการทดสอบ

พิจารณาคานในรูปที่ 6 และรูปที่ 7 พบว่า คำน้ำหนักบรรทุกต่างๆ มี  
ค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำมีการขยับเข้าใกล้  
ฐานรองรับและมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อกำลังอัดระบุของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น  
สำหรับคาน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนของแผ่น CFRP (Q) ดังในรูปที่  
8 และรูปที่ 9 เห็นได้ว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกขยับเข้าใกล้  
ฐานรองรับและมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อคอนกรีตมีกำลังอัดระบุเพิ่มขึ้น เมื่อ  
ทำการเปรียบเทียบเฉพาะคานเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP และมีตำแหน่ง  
ของน้ำหนักบรรทุกกระทำบนคานที่มีระยะเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 10 ถึง

ตารางที่ 3 ได้ทำการสรุปค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยและค่าโมเมนต์ดัด  
ประลัยที่ได้จากผลการทดสอบคาน ค่าโมเมนต์ดัดประลัยจากการคำนวณ  
โดยใช้กำลังวิกฤตจากผลการทดสอบและจากกำลังระบุที่ให้ไว้ในตารางที่  
2 ส่วนตารางที่ 4 แสดงค่าน้ำหนักบรรทุกและโมเมนต์ดัดแตกกร้าวที่ได้จาก  
การสังเกตรอยร้าวเริ่มแรกในระหว่างกาทดสอบคานและค่าที่ได้มาจาก  
การคำนวณจากกำลังระบุและจากผลการทดสอบวัสดุที่สามารถหามาได้  
สำหรับตารางที่ 5 เป็นการสรุปค่าน้ำหนักบรรทุกกระทำต่างๆ ที่ได้จาก  
ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานทดสอบ  
จำนวน 14 ตัวอย่าง โดยคานควบคุมพิจารณาจากความสัมพันธ์ในรูปที่ 13



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานเสริมกำลัง FB-1D-2.0h และ FB-2D-2.0h



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานเสริมกำลัง FB-1D-2.5h และ FB-2D-2.5h

รายละเอียดของค่าต่างๆ ที่ให้ไว้ในตารางที่ 3 และตารางที่ 4 สามารถอธิบายวิธีการคำนวณได้ดังนี้ ค่าของ  $M_{ult, test}$  และ  $M_{cr, test}$  ของตัวอย่างคานทดสอบสามารถคำนวณได้จากสมมูลของแรงและแผนภาพโมเมนต์ตัด ส่วนค่าของ  $M_{ult, mat}$  และ  $M_{ult, des}$  คำนวณมาจากสมมูลของแรงที่กระทำบนหน้าตัดคานและทำการหาค่าโมเมนต์ตัดของหน้าตัดรอบแกนใดแกนหนึ่ง ทั้งนี้ คานควบคุมหาได้จากวิธีกำลัง [1] ส่วนคานเสริมกำลังตัดจากภายนอกด้วยการยึดติดแผ่น CFRP ใช้วิธีการคำนวณตามแนวทางของ ACI [3] สำหรับการคำนวณโมเมนต์ตัดแตกร้า  $M_{cr, mat}$  และ  $M_{cr, des}$  สามารถหาค่ามาได้ด้วยวิธีการพิจารณาค่าโมดูลัสแตกหัก (modulus of rupture:  $f_r$ ) ของคอนกรีตที่ใช้หลักการพื้นฐานของวิธีการแปลงหน้าตัดคาน [1,2,4]

ทั้งนี้ค่า  $M_{ult, mat}$  ของคานเสริมกำลังในตารางที่ 3 หามาจากค่ากำลังดึงประลัยระบุของแผ่น CFRP เนื่องจากไม่มีผลการทดสอบวัสดุ ส่วนค่า  $M_{ult, des}$  ของคานควบคุมและคานเสริมกำลังมีค่าเท่ากันในแต่ละค่ากำลังอัด

ระบุของคอนกรีตและไม่ขึ้นกับตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อคานเนื่องจากการคำนวณค่ากำลังตัดของหน้าตัดคานที่ได้จากกำลังระบุของวัสดุเมื่อพิจารณาที่หน้าตัดตรงบริเวณกลางช่วงพาดของคานและให้ค่าสูงกว่า  $M_{ult, test}$  เพราะเกิดการหลุดล่อนของแผ่น CFRP ในคานทดสอบแต่ให้ค่าต่ำกว่าค่า  $M_{ult, mat}$  จากผลการทดสอบวัสดุในทุกกรณี เมื่อพิจารณาค่าโมเมนต์ตัดแตกร้าในตารางที่ 4 พบว่า ค่าจากการคำนวณมีค่าคงที่ในแต่ละคานควบคุมและคานเสริมกำลังโดยไม่ขึ้นกับตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกกระทำและมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการสังเกตในระหว่างการทดสอบคาน ส่วนตารางที่ 5 แสดงค่าน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ที่ได้จากการพิจารณาความสัมพันธ์ในรูปแบบที่ 6 ถึงรูปที่ 12 พบว่า ค่า  $Q_y$  และ  $Q_{ult}$  ไม่สามารถระบุได้เด่นชัดจากความสัมพันธ์ในกรณีของคานเสริมกำลัง สำหรับกรณีของคานควบคุมทุกตัวอย่างนั้นสามารถระบุค่าของ  $Q_{cr}$ ,  $Q_y$  และ  $Q_{ult}$  ได้ในลักษณะเช่นเดียวกับกับเกณฑ์ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวอย่างง่ายแบบ 3 เส้นตรงดังรูปที่ 13 [1]

ตารางที่ 3 น้ำหนักบรรทุกประลัยและโมเมนต์ตัดประลัย

คาน	$Q_{ult, test}$ (ton)	$M_{ult, test}$ (ton-m)	$M_{ult, mat}$ (ton-m)	$M_{ult, des}$ (ton-m)
CB-1D-L/3	8.095	2.833	2.220	1.664
CB-1D-1.5h	15.530	2.912	2.220	1.664
FB-1D-1.5h	19.460	3.649	11.062	10.622
CB-1D-2.0h	11.986	2.997	2.220	1.664
FB-1D-2.0h	14.594	3.649	11.062	10.622
CB-1D-2.5h	8.669	2.709	2.220	1.664
FB-1D-2.5h	12.877	4.024	11.062	10.622
CB-2D-L/3	7.528	2.635	2.238	1.697
CB-2D-1.5h	14.407	2.701	2.238	1.697
FB-2D-1.5h	17.677	3.314	11.228	10.913
CB-2D-2.0h	11.340	2.835	2.238	1.697
FB-2D-2.0h	15.237	3.809	11.228	10.913
CB-2D-2.5h	9.415	2.942	2.238	1.697
FB-2D-2.5h	11.737	3.668	11.228	10.913

$Q_{ult, test}$  และ  $M_{ult, test}$  คือ น้ำหนักบรรทุกและโมเมนต์ตัดประลัยจากการทดสอบคาน  
 $M_{ult, mat}$  และ  $M_{ult, des}$  คือ โมเมนต์ตัดประลัยจากค่าทดสอบวัสดุและค่าระบุออกแบบ

ตารางที่ 4 น้ำหนักบรรทุกแตกร้าและโมเมนต์ตัดแตกร้า

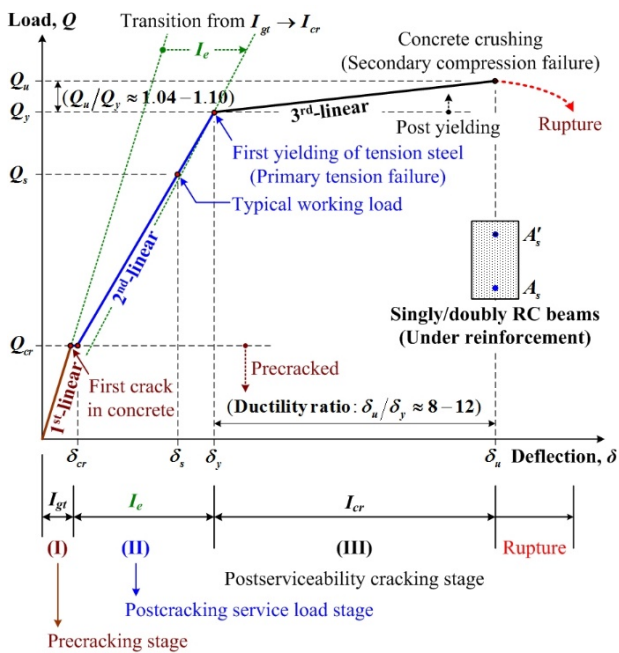
คาน	$Q_{cr, test}$ (ton)	$M_{cr, test}$ (ton-m)	$M_{cr, mat}$ (ton-m)	$M_{cr, des}$ (ton-m)
CB-1D-L/3	1.0	0.350	0.553	0.533
CB-1D-1.5h	2.5	0.469	0.553	0.533
FB-1D-1.5h	4.5	0.844	0.593	0.574
CB-1D-2.0h	2.0	0.500	0.553	0.533
FB-1D-2.0h	3.5	0.875	0.593	0.574
CB-1D-2.5h	1.5	0.469	0.553	0.533
FB-1D-2.5h	2.5	0.781	0.593	0.574
CB-2D-L/3	1.0	0.350	0.573	0.576
CB-2D-1.5h	4.0	0.750	0.573	0.576
FB-2D-1.5h	4.0	0.750	0.615	0.620
CB-2D-2.0h	2.0	0.500	0.573	0.576
FB-2D-2.0h	4.0	1.000	0.615	0.620
CB-2D-2.5h	1.5	0.469	0.573	0.576
FB-2D-2.5h	2.5	0.781	0.615	0.620

$Q_{cr, test}$  และ  $M_{cr, test}$  คือ น้ำหนักบรรทุกและโมเมนต์แตกร้าที่สังเกตจากคานทดสอบ  
 $M_{cr, mat}$  และ  $M_{cr, des}$  คือ โมเมนต์ตัดแตกร้าจากการทดสอบวัสดุ  
 $M_{cr, des}$  คือ โมเมนต์ตัดแตกร้าจากค่าระบุออกแบบ

ตารางที่ 5 น้ำหนักบรรทุกกระทำต่างๆ ที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัว

คาน	$Q_{cr}$ (ton)	$Q_y$ (ton)	$Q_{ult}$ (ton)	$Q_{debond}$ (ton)
CB-1D-L/3	1.176	7.163	8.095	-
CB-1D-1.5h	2.085	13.972	15.530	-
FB-1D-1.5h	3.459	-	-	18.282
CB-1D-2.0h	1.670	10.246	11.986	-
FB-1D-2.0h	2.681	-	-	12.211
CB-1D-2.5h	1.314	7.872	8.669	-
FB-1D-2.5h	2.184	-	-	12.860
CB-2D-L/3	1.431	5.901	7.528	-
CB-2D-1.5h	4.473	12.224	14.407	-
FB-2D-1.5h	4.084	-	-	16.107
CB-2D-2.0h	2.264	9.538	11.340	-
FB-2D-2.0h	2.806	-	-	15.237
CB-2D-2.5h	1.578	7.386	9.415	-
FB-2D-2.5h	2.325	-	-	11.737

$Q_{cr}$  คือ น้ำหนักบรรทุกแตกร้าว;  $Q_y$  คือ น้ำหนักบรรทุกคราก  
 $Q_{ult}$  คือ น้ำหนักบรรทุกประลัย;  $Q_{debond}$  คือ น้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อน



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคาน คสล. อย่างง่ายในแบบ 3 เส้นตรง (tri-linear model) [1]

## 5. สรุป

ผลลัพธ์จากการทดสอบคานและการคำนวณทางทฤษฎีสามารถสรุปผลได้ตามประเภทของคานดังนี้ คานควบคุมมีพฤติกรรมเป็นแบบเหนียวจากการครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงและคานเกิดการวิบัติแบบบดอัดแตกของคอนกรีตที่หลังคานตรงบริเวณกึ่งกลางความยาวช่วงพาด ค่าน้ำหนักบรรทุกแตกร้าว น้ำหนักบรรทุกครากและน้ำหนักบรรทุกประลัยให้ค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนช่วงเฉือนมีค่าลดลงในแต่ละกำลังอัดของคอนกรีต สำหรับคานน้ำหนักบรรทุกครากและน้ำหนักบรรทุกประลัยมีแนวโน้มที่ลดลง แต่ค่าน้ำหนักบรรทุกแตกร้าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น กรณีคานเสริมกำลังพบว่า ค่าของน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนช่วงเฉือนเพิ่มขึ้นและมีค่าลดลงตามการ

เพิ่มขึ้นของกำลังอัดคอนกรีตยกเว้นคานที่มีอัตราส่วนช่วงเฉือนเท่ากับ 2.0 คือ FB-1D-2.0h และ FB-2D-2.0h เมื่อเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดประลัยระหว่างคานออกแบบตามกำลังระบุและค่าจากการทดสอบคานตัวอย่างพบว่า ค่าจากการทดสอบให้ค่าที่ต่ำกว่าด้วยเหตุผลที่ว่าคานเสริมกำลังมีการสูญเสียพฤติกรรมคอมโพสิตจากผลการหลุดล่อนของแผ่น CFRP ดังนั้นจึงควรให้ความสำคัญประเด็นนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Nawy, E.G. (2000). *Reinforced Concrete: A Fundamental Approach*. 4<sup>th</sup> Ed. Prentice Hall Inc., New Jersey.
- [2] Hollaway, L.C. and Leeming, M.B. (2001). *Strengthening of Reinforced Concrete Structures: Using Externally-Bonded FRP Composites in Structural and Civil Engineering*. Woodhead Publishing, Cambridge.
- [3] ACI 440.2R-17. (2017). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. American Concrete Institute (ACI) Committee 440, Michigan.
- [4] Kotynia, R. (2019). *FRP Composites for Flexural Strengthening of Concrete Structures: Theory, Testing, Design*. Lodz University of Technology Press, Lodz.
- [5] Garden, H.N., Hollaway, L.C. and Thorne, A.M. (1998). The strengthening and deformation behaviour of reinforced concrete beams upgraded using prestressed composite plates. *Materials and Structures*, 31, pp. 247-258.
- [6] Taheri, F., Shahin, K. and Widiarsa, I. (2002). On the parameters influencing the performance of reinforced concrete beams strengthened with FRP plates. *Composite Structures*, 58, pp. 217-226.
- [7] Zhou, Y., Gou, M., Zhang, F., Zhang, S. and Wang, D. (2013). Reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer by friction hybrid bond technique: Experimental investigation. *Materials and Design*, 50, pp. 130-139.
- [8] Pham, T.M. and Hao, H. (2017). Behavior of fiber-reinforced polymer-strengthened reinforced concrete beams under static and impact loads. *International Journal of Protective Structures*, 8, pp. 3-24.
- [9] Papakonstantinou, C.G., Kakae, C. and Gryllakis, N. (2018). Can existing design codes be used to design flexural reinforced concrete elements strengthened with externally bonded novel materials?. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 371, article no. 012031.
- [10] Guo, X.-Y., Wang, Y.-L., Huang, P.-Y., Zheng, X.-H. and Yang, Y. (2019). Fatigue life prediction of reinforced concrete beams strengthened with CFRP: Study based on an accumulative damage model. *Polymers*, 11, article no. 130.
- [11] Thamrin, R., Zaidir, Z. and Desharma, S. (2021). Debonding failure analysis of reinforced concrete beams strengthened with CFRP plates. *Polymers*, 13, article no. polym 13162738.