

กำลังเชิงดัดของการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กกับแรงดึง ด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนยึดติดจากภายนอก Flexural Strength of Singly Reinforced Concrete Beams Strengthening with Externally Bonded Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plates

วิกร โตวราพงศ์¹, ธนัตศักดิ์ ชีระเกตุ¹, ดามอง ดี², ปฎิภาณ จันทรวชิต^{3*},
วิษเนศ วงศ์วานิชวัฒนา¹, สัจจา บุญยฉัตร⁴, ยศ สมพรเจริญสุข^{1#}
Vigone Tovarapong¹, Thanutsak Theeraket¹, Damang Dy², Patiphan Chantarawichit^{3*},
Wikhanes Wongwanishwatana¹, Sutja Boonyachut⁴, Yos Sompornjaroensuk^{1#}

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร

²กรมตรวจคนเข้าเมืองทั่วไป กระทรวงการภายใน พนมเปญ กัมพูชา

³ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ กรุงเทพมหานคร

⁴กรรมการสภา สมาคมวิชาการแห่งอาเซียนทางวิศวกรรมและเทคโนโลยี กัวลาลัมเปอร์ มาเลเซีย

¹Department of Civil Engineering, School of Engineering and Industrial Technology
Mahanakorn University of Technology, Bangkok, Thailand

²General Department of Immigration, Ministry of Interior, Phnom Penh, Cambodia

³Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering
Rajamangala University of Technology Krungthep, Bangkok, Thailand

⁴Council Member, ASEAN Academy of Engineering and Technology, Kuala Lumpur, Malaysia

*Major corresponding author. E-mail: patiphan.c@mail.rmutk.ac.th

#Minor corresponding author. E-mail: syossyos@mut.ac.th

บทคัดย่อ

ปรากฏการณ์ที่ไม่พึงปรารถนาของการวิบัติจากการหลุดล่อนโดยเริ่มต้นที่บริเวณปลายของแผ่น FRP เป็นสาเหตุทำให้แผ่น FRP ลอกออกก่อนที่จะนำหน้ากับรทุกอกแบบจะเข้าสู่ค่าที่เหมาะสมดังที่ได้คาดการณ์ไว้ ใน การศึกษาเชิงทดลองนี้คำนึงถึงการตอบสนองเชิงดัดและความสามารถด้านกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กกับ แรงดึงอย่างเดียวยที่เสริมกำลังโดยการยึดติดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) ภายนอกคานด้วยอีพ็อก ซีร์ร่วมกับการจัดเตรียมการรัดที่ปลายของแผ่นทั้ง 4 ด้านของหน้าตัดคาน วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้มี 2 ประการ ประการแรกคือเพื่อศึกษาความสามารถในการแบกรับน้ำหนักบรรทุกและพฤติกรรมการแอ่นตัวของ คานและประการที่สองคือเพื่อทดสอบผลกระทบของตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกกระทำและกำลังของคอนกรีตที่มี ผลต่อคานเสริมกำลัง ผลลัพธ์จากการทดสอบนำเสนอในรูปแบบของกราฟในพจน์ของความสัมพันธ์ระหว่างแรง กระทำและการแอ่นตัว น้ำหนักบรรทุกแตกกร้าวแรกและน้ำหนักบรรทุกประลัยสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กหา ได้จากทั้งการทดลองและการคำนวณเชิงทฤษฎี นอกจากนี้ น้ำหนักบรรทุกครากและน้ำหนักบรรทุกจากการหลุด ล่อนสามารถสังเกตและหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวสำหรับคานควบคุมและ คานเสริมกำลังตามลำดับ

Received 18-05-2022
Revised 01-08-2022
Accepted 09-10-2022

คำสำคัญ : พอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน การวิบัติจากการหลุดล่อน การยึดติดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากภายนอก การเสริมกำลังดัด คานคอนกรีตเสริมเหล็ก ความสามารถด้านกำลัง

ABSTRACT

The undesired phenomenon of debonding failure initiated at the ends of the FRP plates can cause these bonded FRP plates to peel off before the design load is reached to the expected appropriate value. In this experimental study, it is concerned with the flexural response and strength capacity of the singly reinforced concrete beams strengthened by externally epoxy bonded carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) plates together with providing plate-end wrapping on four sides of the beam section. The objective of the study has two-fold. The first is to investigate the load carrying capacity and deflection behavior of the beams and the second is to examine the effects of applied load position and concrete strength on the strengthened beams. The tested results are presented graphically in terms of load-deflection relationships. The first cracking load and the ultimate load for reinforced concrete beams are determined from both experiments and theoretical calculations. Furthermore, the yielding load and debonding load can be observed and obtained from the load-deflection relationships for control beams and strengthened beams, respectively.

Keyword: Carbon fiber-reinforced polymer: Debonding failure: Externally bonded FRP plate: Flexural strengthening: Reinforced concrete beam: Strength capacity

1. บทนำ

กลไกสำคัญที่ทำให้องค์อาคารของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีกำลังในการต้านทานต่อน้ำหนักบรรทุกกระทำจากภายนอกที่ได้ประเมินเอาไว้แล้วในขั้นตอนของการออกแบบโครงสร้างหรือส่วนหนึ่งส่วนใดของโครงสร้างนั้นคือ คอนกรีตทำหน้าที่ในการรับแรงอัดส่วนเหล็กเสริมทำหน้าที่ในการรับแรงดึง ทั้งนี้เนื่องมาจากคอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงอัดที่สูงแต่มีความสามารถในการรับแรงดึงที่ต่ำ ส่วนของเหล็กเสริมนั้นมีความสามารถในการรับแรงดึงและแรงอัดที่สูง ดังนั้นเมื่อนำข้อดีของวัสดุทั้งสองมารวมกันทำหน้าที่ในการแบกรับน้ำหนักบรรทุกในบริเวณหรือตำแหน่งที่เหมาะสมจะทำให้ได้โครงสร้างที่มีความปลอดภัยและประหยัด [1-3] เมื่อองค์

อาคารของโครงสร้างมีการชำรุดหรือมีความเสียหายเกิดขึ้น การซ่อมแซมหรือการเสริมกำลังจึงมีความจำเป็นเพื่อให้โครงสร้างนั้นกลับมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพดังเดิม เนื่องจากความก้าวหน้าทางด้านวัสดุศาสตร์ร่วมกับการศึกษาวิจัยและการประยุกต์ความรู้ในเชิงวิศวกรรมโครงสร้างทำให้การเสริมกำลังจากภายนอกด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (fiber-reinforced polymer: FRP) ในรูปแบบแผ่น (FRP plate) ได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบันด้วยเหตุผลดังต่อไปนี้คือ FRP เป็นวัสดุที่มีค่ากำลังรับแรงดึงและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นสูง มีน้ำหนักเบา สามารถผลิตให้มีขนาดตามความต้องการ สะดวกต่อการขนส่งและการติดตั้ง และทนต่อการกัดกร่อน [4-8]

ผลจากการศึกษาวิจัยต่าง ๆ ที่มีมาในอดีตทำให้มีการพัฒนาแนวทางในการออกแบบการเสริมกำลังจากภายนอกด้วยการยึดติดแผ่น FRP ได้อย่างปลอดภัย [9] และสามารถใช้นำมาพยากรณ์พฤติกรรมเชิงโครงสร้างได้อย่างถูกต้องเพียงพอ การศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วัสดุ FRP ในการเสริมกำลังโครงสร้างได้มีการศึกษากันอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบัน Chajes, Thomson, Januszka และ Finch [10] ศึกษาผลของการเสริมกำลังจากภายนอกในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (คสล) โดยทำการยึดติดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอารามิด (aramid FRP) เส้นใยแก้ว (glass FRP) และเส้นใยแกรไฟท์ (graphite FRP) ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าความสามารถเชิงดัดของคาน (flexural capacity) เพิ่มขึ้น 36-57% และค่าความแกร่งเชิงดัด (flexural stiffness) เพิ่มขึ้น 45-53% นอกจากนี้ยังพบว่า มีการวิบัติแบบฉีกขาด (rupture failure) เกิดขึ้นในกรณีของการเสริมด้วยแผ่น glass FRP และ graphite FRP ในอาณาบริเวณของคานที่มีโมเมนต์ดัดสูงสุด (maximum moment region) ส่วนการวิบัติแบบบดอัดแตกในคอนกรีตเกิดขึ้นกับการเสริมด้วยแผ่น aramid FRP

Varastehpour และ Hamelin [11] แนะนำแบบจำลองเชิงวิเคราะห์แบบการวนซ้ำ (iterative analytical model) มาใช้จำลองพฤติกรรมการยึดเกาะและเลื่อนไถล (bond-slip) และความไร้เชิงเส้นของวัสดุ (material nonlinearity) ที่อยู่บนพื้นฐานความเข้ากันได้ของการเสียรูปร่าง (compatibility of deformations) และสมดุลของแรง (equilibrium of forces) เพื่อการทำนายค่าแรงปฏิกิริยา การแอ่นตัว และความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งงอ (moment-curvature relationships)

Ramana, Kant, Morton และคณะ [12] ได้พิจารณาผลของตึกรีในการเสริมกำลัง (degree of strengthening) ของคาน คสล ด้วยการติดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) โดยทำการทดสอบคานภายใต้ผลของการให้แรงกระทำแบบควบคุมการ

เคลื่อนที่ (displacement control) จากการศึกษาพบว่า กำลังเชิงดัด (flexural strength) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อความกว้างของแผ่นเสริมกำลัง (plate width) เพิ่มขึ้น ส่วนผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี (theoretical analysis) ที่อยู่บนพื้นฐานของความเข้ากันได้ของความเครียดพบว่า สามารถนำมาใช้ทำนายกำลังปฏิกิริยาและพฤติกรรมระหว่างค่าโมเมนต์และค่าการแอ่นตัวของคานได้ Azevedo, Juvandes และ Henriques [13] ทำการศึกษาโดยเปรียบเทียบเกณฑ์การออกแบบระหว่างแนวทางของ ACI และ FIB ในแผ่นพื้น คสล ที่ทำการเสริมกำลังจากภายนอกด้วยแผ่น FRP พบว่า การทำนายความสามารถเชิงกำลังของเกณฑ์การออกแบบทั้งสองให้ผลลัพธ์ที่คล้ายกันและให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการประยุกต์ใช้ค่าตัวประกอบปรับลดกำลัง (strength reduction factors) ของวัสดุ FRP ตามคำแนะนำของ ACI พบว่าให้ค่าความสามารถเชิงกำลังใกล้เคียงมากกับผลการทดสอบ

Rosenboom และ Rizkalla [14] ศึกษาผลของการหลุดล่อนอันเนื่องมาจากการเกิดขึ้นของรอยร้าวภายในคาน (intermediate crack debonding: IC debonding) และเสนอแบบจำลองสำหรับทำนายค่าตรวจวัดที่ได้จากการทดสอบสำหรับคานคอนกรีตอัดแรงที่มีช่วงพาดยาว (long-span prestressed concrete beam) ที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP แต่ไม่มีการโอบรัดด้วยแถบรูปตัวยู (U-wraps) พบว่า การวิบัติที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปเป็นแบบการหลุดล่อนเนื่องจากรอยร้าวภายใน (IC debonding) และเมื่อมีการใช้แถบ U-wraps ตลอดความยาวคานพบว่า สามารถเพิ่มความเครียดดึง (tensile strain) ในแผ่น CFRP ได้อีกประมาณ 20% ของการเกิดการวิบัติแบบ IC debonding

Perera และ Bueso-Inchausti [15] นำเสนอวิธีการสเปกตรัล (spectral method) มาประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาเชิงสถิตย์และเชิงพลศาสตร์ (static and dynamic problems) ของ

การศึกษาพฤติกรรมคาน คสล เสริมกำลังด้วยแผ่น FRP พบว่า ปัญหาที่พิจารณานั้นสามารถทำการจำลองการวิบัติแบบหลุดล่อนด้วยแบบจำลองเชิงกล (mechanical modeling) ได้โดยทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของทั้งคอนกรีตและเหล็กเสริม สำหรับผิวสัมผัสระหว่างแผ่น FRP และคอนกรีตได้ทำการจำลองโดยการใช้กฎการยึดเกาะและการเลื่อนไถลเฉพาะที่แบบ 2 เส้นตรง (bilinear local bond-slip law) Hamed และ Bradford [16] ศึกษาพฤติกรรมการแตกร้าวเชิงคดที่แปรผันตามเวลา (time-dependent flexural cracking behavior) และพฤติกรรมภายหลังการแตกร้าว (post-cracking behavior) ของคาน คสล ที่เสริมกำลังด้วยการติดแผ่น FRP ภายนอก โดยสนใจผลกระทบจากการคืบ (creep) อีกทั้งได้ทำการพัฒนาแบบจำลองเชิงทฤษฎีที่มีการพิจารณารวมผลของการคืบ ผลการแตกร้าวที่แปรผันตามเวลาและผลของการเกิดปรากฏการณ์การเกร็งตัวเพิ่มขึ้นจากการดึง (tension-stiffening phenomenon) นอกจากนี้ ได้พิจารณาผลการเสียรูปได้ของชิ้นวัสดุประสานจากการเชื่อมตลอดความหนาในแบบจำลอง Bykov และ Kalugin [17] นำเสนอแบบจำลองด้วยวิธีการอย่างง่ายสำหรับการคำนวณหาความเครียดหลุดล่อนของแผ่น FRP (FRP debonding strain) และทำการประเมินความน่าเชื่อถือ (reliability assessment) โดยได้มีการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองในอดีต จากนั้นได้มีการนำเสนอสูตรการคำนวณค่าที่ใช้ในการออกแบบ (design value) สำหรับค่าความเครียดหลุดล่อนใน FRP

Ding, Wang, Huang และ Chen [18] สนใจศึกษาและพิจารณาผลของความยาวแผ่น CFRP ที่มีผลต่อรูปแบบการวิบัติ (failure mode) รูปแบบรอยร้าว (crack pattern) และการแผ่ขยายของรอยร้าว (crack propagation) ในคานเสริมกำลังที่มีรอยบากเริ่มแรก (initial notch) อยู่ก่อน ผลการศึกษาพบว่า คานเสริมกำลังมีการปรับปรุงความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นได้ และรูปแบบการวิบัติมีความ

แตกต่างกันไปตามความยาวของแผ่น CFRP ที่ใช้ และเมื่อพิจารณากรณีที่ปลายของแผ่น CFRP อยู่ห่างจากฐานรองรับเป็นระยะ 0.10 ม พบว่า มีการรูปแบบการวิบัติการรอยร้าวเอียง (inclined crack) ที่ปลายแผ่น CFRP และเมื่อปลายอยู่ห่างจากฐานรองรับเป็นระยะ 0.10 – 0.30 ม พบว่า รูปแบบการวิบัตินั้นเกิดจากการแผ่ขยายของรอยร้าวเล็กๆ (smeared crack propagation) ตรงบริเวณที่มีรอยบากเริ่มแรกไปตามแนวผิวสัมผัสของแผ่น CFRP Bennegadi, Hadjazi, Sereir และคณะ [19] ได้เสนอแบบจำลองเพื่อทำนายการกระจายของความเค้นเฉือนและความเค้นดัดฉากที่ผิวสัมผัสจากการเกิดรอยร้าวตัดภายในแผ่น FRP ของคานเสริมกำลัง โดยในแบบจำลองเชิงทฤษฎีได้ใช้สมมติฐานของกฎการยึดเกาะและการเลื่อนไถลแบบ 2 เส้นตรงสำหรับการหลุดล่อนจากรอยร้าวภายในแผ่น (intermediate crack-induced debonding) จากผลลัพธ์ที่ได้พบว่า เมื่อความหนาของแผ่น FRP เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกของคานเสริมกำลังเพิ่มขึ้น การพิจารณาค่าน้ำหนักบรรทุกที่ขีดจำกัดในขั้นตอนของการอ่อนตัว (softening) ของคอนกรีตและการหลุดล่อน (debonding) ของแผ่น FRP พบว่า มีค่ามากกว่าในกรณีที่พิจารณาผลของความหนาของแผ่น FRP ในแบบจำลอง

Mostafa และ Razaqpur [20] ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพลศาสตร์ไร้เชิงเส้น LS-DYNA วิเคราะห์และทำนายพฤติกรรมหลังเกิดการหลุดล่อนของแผ่น FRP (post delamination behavior) ในคาน คสล ที่เสริมกำลังด้วยแผ่น FRP และทำการเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ พบว่า ถึงแม้ว่าคานจะมีการเกิดการหลุดล่อนขึ้นมาบางส่วน (partial delamination) ซึ่งเป็นผลนำไปสู่การลดลงของความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคาน แต่เมื่อการเสียรูปมีการเพิ่มมากขึ้นต่อไปอีก พบว่า คานมีการเพิ่มค่าขึ้นของความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกได้อีกภายใต้การเพิ่มค่าของการเสียรูปที่มีค่ามาก (large deformation) ซึ่งพฤติกรรมเช่นนี้บ่งชี้ว่าคานมีความเหนียวที่ดี โดยที่การรายงานผล

การศึกษาในอดีตนั้น ส่วนใหญ่ได้ระบุไว้ว่าคานามีพฤติกรรมเป็นแบบเปราะ (brittle behavior)

Nguyen- Minh, Phan- Vu, Tran- Thanh และคณะ [21] ทำการศึกษาพฤติกรรมเชิงคานาคาน คสล ที่ทำการอัดแรงก่อนแบบไม่มีการยึดเกาะ (unbonded post-tensioned concrete beam) และมีการเสริมกำลังจากภายนอกด้วยแผ่น CFRP ผลการศึกษา พบว่า อัตราส่วนของปริมาณการเสริมแผ่น FRP มีผลในการควบคุมความสามารถเชิงคาน ความกว้างรอยร้าว (crack width) การแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน (mid-span deflection) และความเหนียว (ductility) ของคาน ซึ่งประสิทธิภาพของการเสริมกำลัง (strengthening efficiency) มีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มจำนวนชั้นของแผ่น CFRP นอกจากนี้แล้ว การเพิ่มตัวจับยึด (anchorage) ด้วยแถบ CFRP รูปตัวยู (U-wrapped anchors) ในบริเวณช่วงการเฉือน (shear span) ส่งผลกระทบท่อรูปแบบการวิบัติและพฤติกรรมของคานเสริมกำลัง

Chen, Wang, Sui และคณะ [22] ได้ศึกษาเชิงทดลองและสร้างแบบจำลองเชิงวิเคราะห์มาใช้ศึกษาอิทธิพลของความหนาของแผ่น FRP และผลกระทบของการโอบรัด (confining effect) ที่มีต่อสมรรถนะเชิงคาน (flexural performance) ของคานที่เสริมกำลังโดยใช้การยึดเกาะแบบผสม (hybrid bonded: HB) ผลลัพธ์จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของแผ่น FRP เพิ่มขึ้นและมีการโอบรัดที่มาก เมื่อพิจารณาสมรรถนะด้านความเหนียว (ductility performance) พบว่า จะให้ค่าดีที่สุดเมื่อพบการหลุดออกของตัวจับยึด (fastener detachment) ไปพร้อมกันกับการฉีกขาดของแผ่น FRP ต่อมา Zhou, Guo, Wang และคณะ [23] เสนอการแก้ปัญหาการหลุดลอกและพัฒนาการใช้ระบบสมอจับยึดที่ปลายแบบผสมเชิงนวัตกรรม (innovative hybrid end-anchorage system) ในการจับยึดได้ด้วยตัวเอง (self-locking) ของแผ่น CFRP ที่ยึดติดจากภายนอก (externally bonded CFRP sheets) จากผลการ

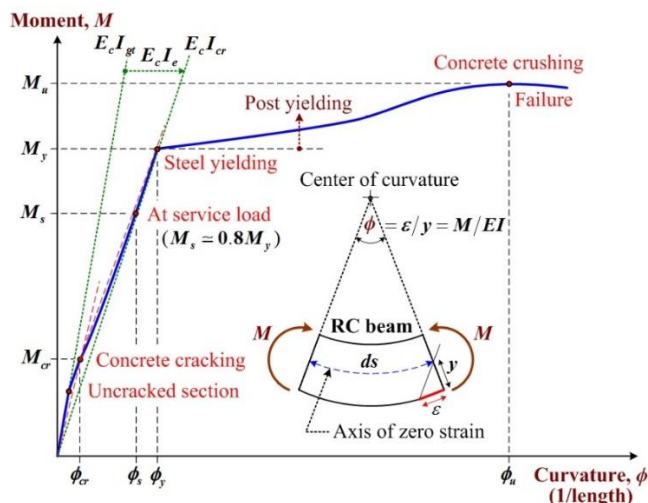
ทดลองพบว่า การใช้แผ่น CFRP ที่มีแถบกว้างส่งผลต่อการเสริมกำลังที่มากขึ้นโดยเฉพาะเมื่อกำลังของคอนกรีตที่ใช้มีค่าสูงขึ้น Al-Negheimish, El-Sayed, Al-Saawani และ Alhozaimy [24] ศึกษาผลกระทบของปริมาณเหล็กปลอก (steel stirrups) ที่ส่งกระทบท่อคาน้ำหนักบรรทุกทุกวิบัติแบบหลุดลอกที่ปลายแผ่น (plate-end debonding failure load) ของคานเมื่อเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP จากผลการศึกษาพบว่า คาน คสล ที่เสริมกำลังและมีปริมาณของเหล็กปลอกมาก (large amounts of stirrups) เกิดการวิบัติจากการหลุดลอกที่ปลายแผ่นเนื่องจากการแยกตัวออกของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม ในขณะที่คานเสริมกำลังและมีปริมาณเหล็กปลอกที่น้อย (lower amounts of stirrups) พบการวิบัติจากการหลุดลอกระหว่างผิวสัมผัสที่ปลายแผ่น หรือมีการวิบัติจากการหลุดลอกอื่นเนื่องมาจากรอยร้าวทแยงวิกฤติ (critical diagonal crack-induced debonding failure)

เมื่อไม่นานมานี้ Zhou, Wu และ Yin [25] นำเสนอสนามความเค้นเชิงนวัตกรรมที่อยู่บนพื้นฐานของแนวทางเชิงวิเคราะห์ (innovative stress field-based analytical approach) เพื่อใช้ประเมินกำลังวิบัติของการแยกตัวออกของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมบริเวณปลายแผ่น ร่วมกับการใช้แนวทางเชิงวิเคราะห์ของหน้าตัดขยาย (extended sectional analytical approach) ที่ได้พิจารณาผลขององค์ประกอบความเครียดดึงประสิทธิภาพของ FRP (components of effective tensile strain of FRP) ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการตัดและการเฉือนมาทำการประเมินความสามารถของคานเสริมกำลัง

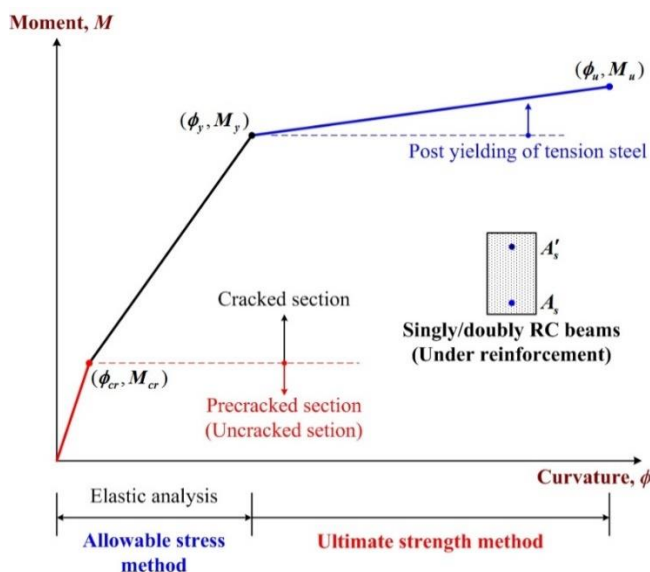
ก่อนการพิจารณาทำการเสริมกำลังให้กับองค์อาคารในส่วนหนึ่งส่วนใดของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจำเป็นต้องทราบถึงพฤติกรรมภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกจากภายนอกขององค์อาคารนั้น ทั้งนี้เพื่อที่จะได้ทำการเสริมกำลังในตำแหน่งที่เหมาะสมและทำให้การเสริมกำลังมีประสิทธิภาพอย่างเต็มที่

สำหรับการเสริมกำลังให้กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น คาน คสล เป็นองค์อาคารที่ใช้ต้านทานโมเมนต์ดัดเป็นหลักเนื่องจากผลของน้ำหนักบรรทุกกระทำตั้งฉากกับความยาวคาน โดยทำการออกแบบหน้าตัดคานให้มีอัตราส่วนของปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมที่สภาวะสมดุลของแรงอัดจากคอนกรีตและแรงดึงจากเหล็กเพราะต้องการให้

คาน คสล แสดงพฤติกรรมเป็นแบบเหนียวเกิดขึ้นคือต้องการให้เหล็กเสริมเกิดการยืดตัวมากหรือที่เรียกว่าการคราก (yielding) ก่อนที่จะมีการวิบัติจากการบดอัดแตกของคอนกรีต (concrete crushing) ที่เป็นการวิบัติแบบเปราะเพื่อส่งสัญญาณเตือนในระหว่างการใช้งานองค์อาคารให้รับทราบก่อนเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด [2,3]



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งงอของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งงอแบบ 3 เส้นตรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

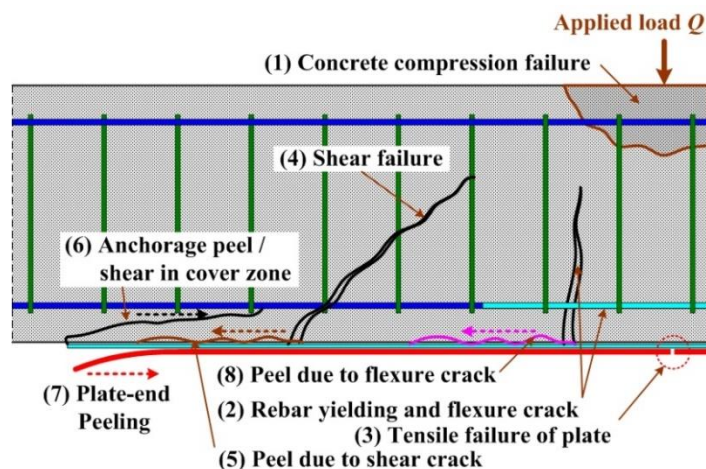
พฤติกรรมโดยทั่วไปของคาน คสล ที่มีปริมาณการเสริมเหล็กน้อยสามารถแสดงได้ในความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัด (M) และความโค้ง (ϕ) ดังภาพที่ 1 [3] ซึ่งเมื่อภายหลังจากที่เหล็กเสริมมีการครากเกิดขึ้นสามารถสังเกตได้ว่า ค่าความโค้งจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากภายใต้การเพิ่มขึ้นของโมเมนต์ดัดที่น้อย โดยที่ค่าความโค้งนี้สัมพันธ์กับปริมาณการแอ่นตัวของคาน สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมของคาน คสล นั้น โดยส่วนใหญ่นิยมใช้แบบจำลองพฤติกรรมอย่างง่ายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งในรูปแบบ 3 เส้นตรง (tri-linear model) ดังภาพที่ 2 [2,3]

สำหรับการพิจารณาการเสริมกำลังให้กับคาน คสล โดยใช้วิธีการยึดติดแผ่นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากภายนอกคาน (externally bonded FRP plates) ด้วยอีพ็อกซีเรซิน (epoxy resin adhesive) พบว่า คานที่ได้รับการเสริมกำลังยังคงมีการปรากฏพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกับคาน คสล ก่อนทำการเสริมกำลังหากได้รับการพิจารณาทำการออกแบบได้อย่างเหมาะสม โดยให้คานเสริมกำลังมีพฤติกรรมเป็นแบบเหนียวเกิดขึ้นก่อนมีการวิบัติเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์

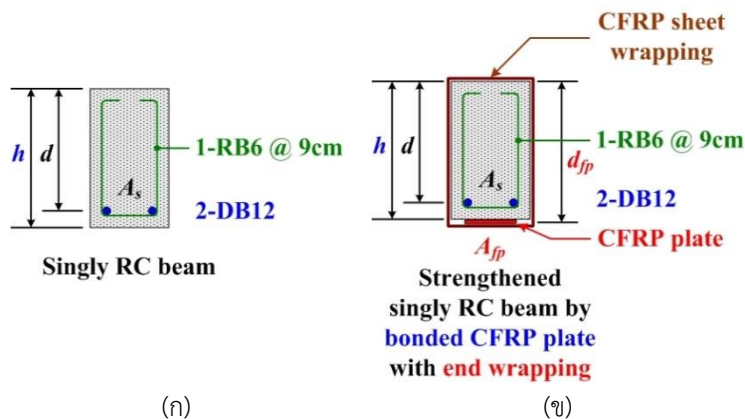
จากผลการวิจัยในอดีตที่ได้ทำการศึกษามาอย่างต่อเนื่องสามารถทำการสรุปรูปแบบของการ

วิบัติที่อาจจะเป็นได้ในรูปแบบต่าง ๆ ของคาน คสล ที่มีการเสริมกำลังจากภายนอกด้วยวิธีการที่ได้กล่าวถึงนี้แสดงในภาพที่ 3 [4] โดยที่การวิบัติในรูปแบบที่ 6 (การลอกออกที่ปลายแผ่น) และรูปแบบที่ 7 (การลอกออกของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม) ดังแสดงไว้ในภาพนั้นเป็นการวิบัติก่อนเวลากำหนด (premature failures) ซึ่งส่งผลให้การเสริมกำลังให้กับคาน คสล มีการใช้งานได้อย่างไม่เต็มประสิทธิภาพและที่สำคัญมากประการหนึ่งคือ เป็นการวิบัติที่เกิดขึ้นในแบบทันทีทันใดโดยคานเสริมกำลังมีพฤติกรรมแบบเปราะ [5-8] ดังนั้นการศึกษาวิจัยส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นศึกษาเพื่อทำการแก้ปัญหาต่างๆ เหล่านี้

สำหรับวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและพฤติกรรมการตอบสนองของคานเสริมกำลัง อีกทั้งศึกษาถึงผลกระทบของตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำและค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีต่อคาน โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ได้มีการนำเสนอไว้ในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำและค่าการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบ รวมไปถึงการระบุหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำในสถานะต่างๆ และมีการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบและการคำนวณเชิงทฤษฎี



ภาพที่ 3 รูปแบบการวิบัติที่อาจเกิดขึ้นได้ของคานเสริมกำลัง



ภาพที่ 4 ตัวอย่างคานทดสอบ (ก) คานควบคุมและ (ข) คานเสริมกำลัง

2. วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

แผนดำเนินการศึกษาวิจัยประกอบไปด้วย (1) ขั้นตอนของการออกแบบการศึกษาเชิงทดลอง (2) ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างคานทดสอบ (3) ขั้นตอนของการเตรียมเครื่องมือตรวจวัดการทดสอบตัวอย่างคาน (4) ขั้นตอนดำเนินการทดสอบและ (5) ขั้นตอนการแปลผลการทดสอบ โดยมีรายละเอียดของการศึกษาวิจัยดังต่อไปนี้

เริ่มต้นด้วยการกำหนดให้มีการหล่อเตรียมตัวอย่างคานในที่ (cast-in-place) โดยได้มีการใช้คอนกรีตผสมเสร็จ (ready mixed concrete) ที่ใช้ในการศึกษาทดสอบเป็นจำนวนทั้งสิ้น 14 ตัวอย่างคาน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ตามค่ากำลังอัดระบุของคอนกรีตรูปทรงกระบอก (nominal concrete cylinder compressive strengths) คือมีค่า 240 ksc และ 280 ksc และได้กำหนดให้เป็นคานควบคุม (control beams) จำนวน 8 ตัวอย่าง และมีการยึดติดด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP plates) จำนวน 6 ตัวอย่าง

โดยตัวอย่างคานทดสอบทุกตัวอย่างนั้นมีการกำหนดให้มีหน้าตัดกว้าง (b) 15 cm ลึก (h) 25 cm และคานมีความยาวรวม 2.4 m และมีความยาวช่วงพาดระหว่างฐานรองรับ (L) ทั้งสองข้างคือ 2.1 m

สำหรับในทุกตัวอย่างคานมีการเสริมเหล็กรับแรงดึงภายในที่ใช้คือ DB12 ชั้นคุณภาพ SD40 และมีการใช้เหล็กปลอกรับแรงเฉือนรูปตัว U (U-shape) รััดเหล็กเสริมตามแนวยาวคือ RB6 ชั้นคุณภาพ SR24 ดังภาพที่ 4 (ก)

สำหรับการเสริมกำลังให้กับคานใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนแบบแผ่นแข็ง (plate) โดยมีกำลังดึงประลัยระบุ 29000 ksc และมีค่ามอดุลัสยืดหยุ่น 1.65×10^6 ksc ที่มีความกว้าง (b_{fp}) 5 cm ยาว 1.9 m และหนา (t) 2.4 mm และทำการยึดติดโดยใช้อีพ็อกซีที่ไซทราดอป (Sikadur®-30) สำหรับใช้ยึดติดงานเสริมกำลัง และนอกจากนี้ได้ทำการรัดรอบปลายแผ่น CFRP plate ทั้งสองข้างด้วยแผ่น CFRP แบบแผ่นอ่อน (sheet) โดยมีความกว้าง 25 cm และหนา 0.16 mm ความยาวที่ใช้รัดรอบเมื่อรวมระยะทาบลแล้วคือ 95 cm และทำการยึดติดโดยใช้อีพ็อกซี Sikadur®-330 ดังภาพที่ 4 (ข)

รายละเอียดของการเรียกชื่อสำหรับตัวอย่างคานที่ใช้ทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 ส่วนตารางที่ 2 แสดงค่าคุณสมบัติของวัสดุที่กำหนดค่าระบุในการคำนวณออกแบบและค่าที่ได้จากการทดสอบ

สำหรับการทดสอบตัวอย่างคานทำโดยการให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำเป็นแบบจุดด้วยแม่แรงไฮดรอลิกสัณฐาน 30 ตัน กดลงบนคานส่งถ่ายแรง (transfer

beam) และส่งผ่านน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำลงบนคาน
ทดสอบเป็นแบบ 2 จุด ดังภาพที่ 5 ถึง ภาพที่ 11

ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างคานทดสอบ

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

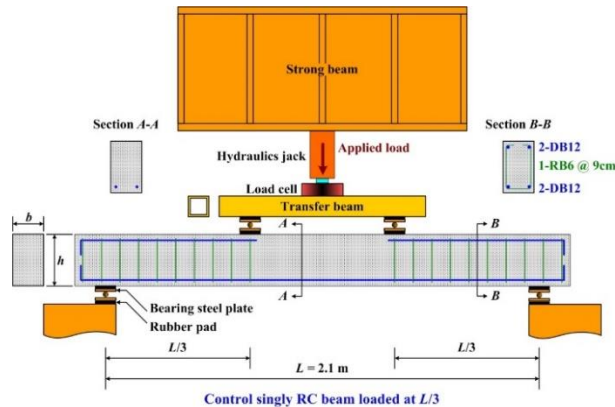
ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้

วัสดุ	ค่าระบุออกแบบ	ค่าจากการทดสอบวัสดุ
กำลังครากเหล็ก DB12	4000 ksc	5484 ksc
กำลังครากเหล็ก RB6	2400 ksc	4129 ksc
มอดูลัสเหล็กเสริม	2.04×10^6 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	1.65×10^6 ksc	-

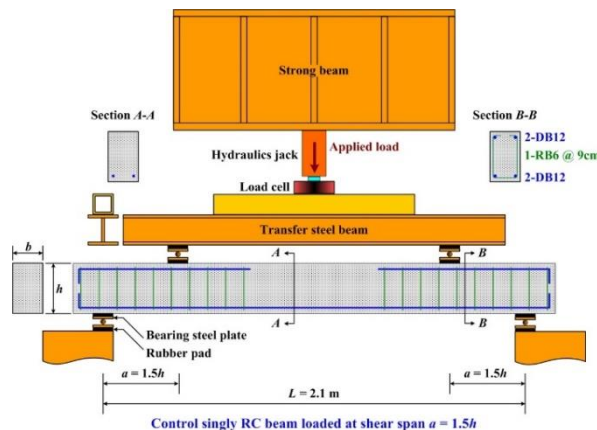
ภาพที่ 12 ให้นิยามของอัตราส่วนช่วงเฉือน [4] ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ a/h หรือ a/d โดยที่ค่า a คือ ระยะช่วงเฉือนเมื่อวัดจากฐานรองรับไปถึงตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำเป็นแบบจุด ส่วน h คือ ความลึกคานและ d คือ ความลึกประสิทธิภาพที่วัดจากผิวรับแรงอัดของคอนกรีตถึงตำแหน่งศูนย์ถ่วง

ของเหล็กเสริมรับแรงดึง ในการศึกษานี้กำหนดให้อัตราส่วนช่วงเฉือนเป็น a/h สำหรับภาพที่ 13 แสดงตำแหน่งตรวจวัดค่าการแอ่นตัวของคานด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดค่าการเคลื่อนที่แปรเปลี่ยนแบบเชิงเส้น (linear variable differential transformer: LVDT) ใน 3 หน้าตัดตรงบริเวณครึ่งความลึกคานที่ตำแหน่ง

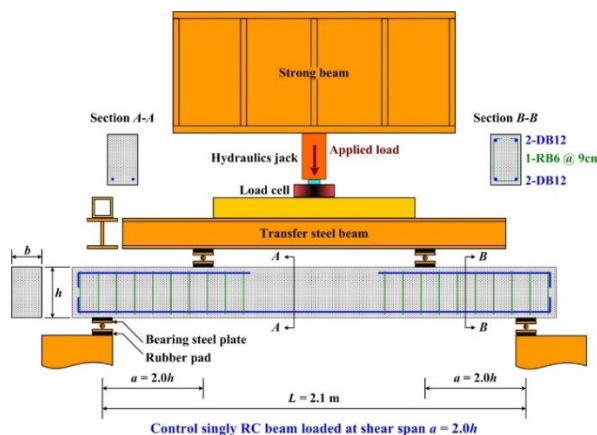
ของน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำเป็นแบบจุดทางซ้ายและ แต่สะพานตัดได้ทำการตรวจวัดอยู่ 2 ตำแหน่งคือ ทางขวาและที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาวคานโดยใน ด้านหน้า (หน้า A) และด้านหลัง (หน้า B)



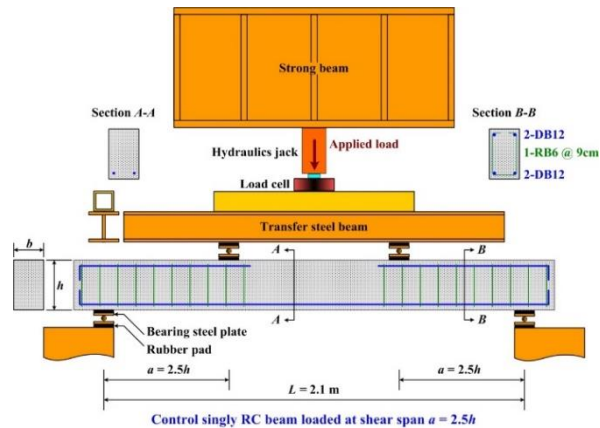
ภาพที่ 5 การให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำบนคานควบคุม CB-1S-L/3 และ CB-2S-L/3



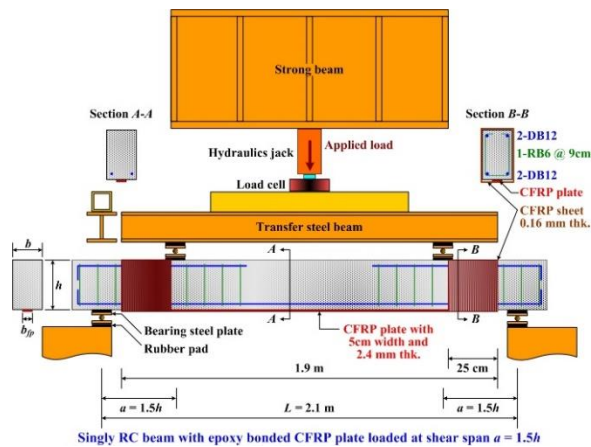
ภาพที่ 6 การให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำบนคานควบคุม CB-1S-1.5h และ CB-2S-1.5h



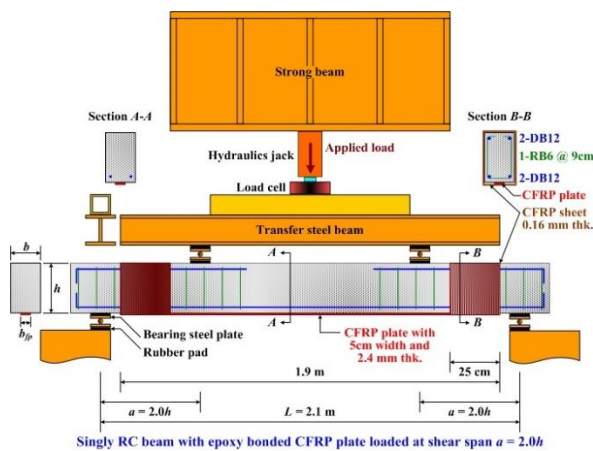
ภาพที่ 7 การให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำบนคานควบคุม CB-1S-2.0h และ CB-2S-2.0h



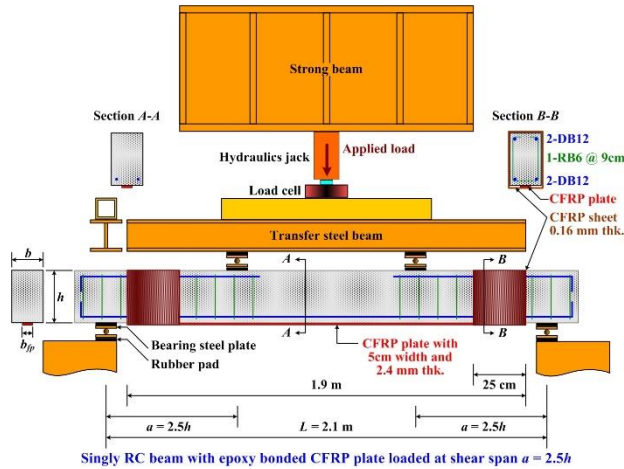
ภาพที่ 8 การให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำบนคานควบคุม CB-1S-2.5h และ CB-2S-2.5h



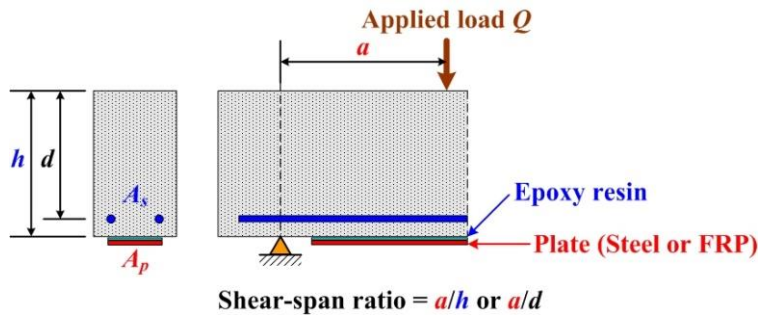
ภาพที่ 9 การให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำบนคานเสริมกำลัง FB-1S-1.5h และ FB-2S-1.5h



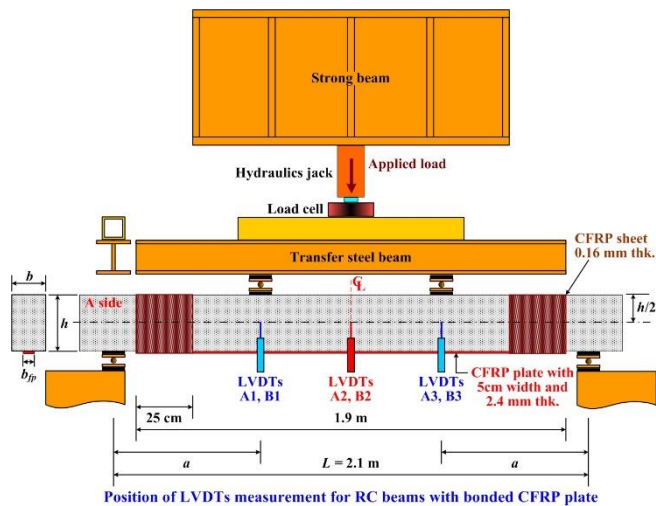
ภาพที่ 10 การให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำบนคานเสริมกำลัง FB-1S-2.0h และ FB-2S-2.0h



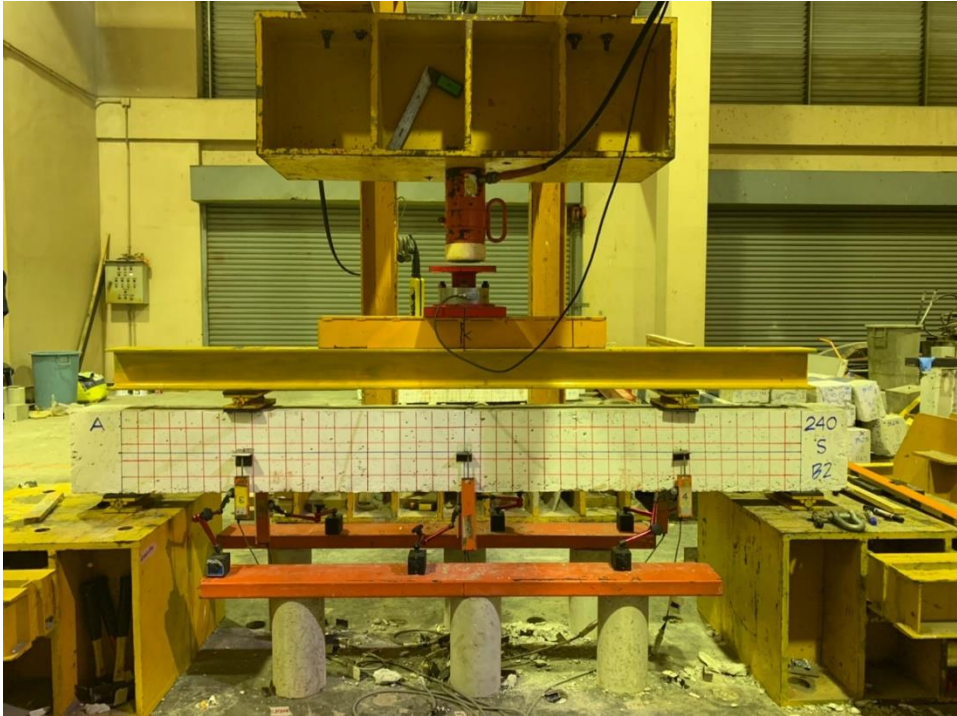
ภาพที่ 11 การให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำบนคานเสริมกำลัง FB-1S-2.5h และ FB-2S-2.5h



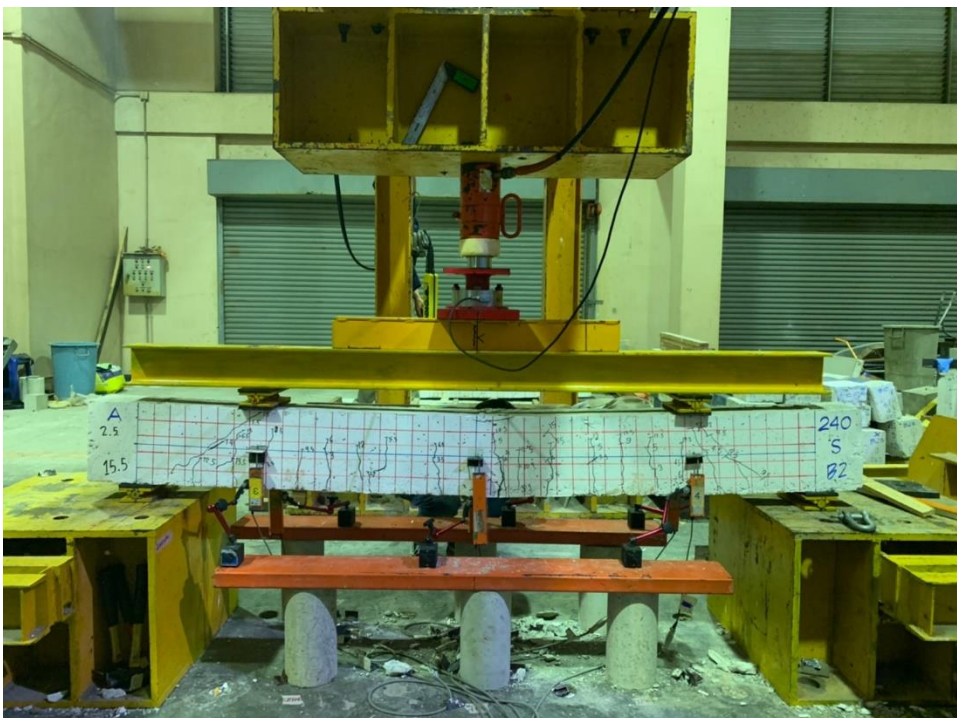
ภาพที่ 12 การให้นิยามของค่าอัตราส่วนช่วงเฉือน (shear-span ratio)



ภาพที่ 13 ตำแหน่งการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวของคานด้านหน้า (หน้า A) ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัด LVDTs



ภาพที่ 14 คานควบคุม CB-1S-1.5h ก่อนให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ



ภาพที่ 15 คานควบคุม CB-1S-1.5h เมื่อหยุดให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ



ภาพที่ 16 คานเสริมกำลัง SB-1S-1.5h ก่อนให้น้ำหนักบรรทุกกระทำ



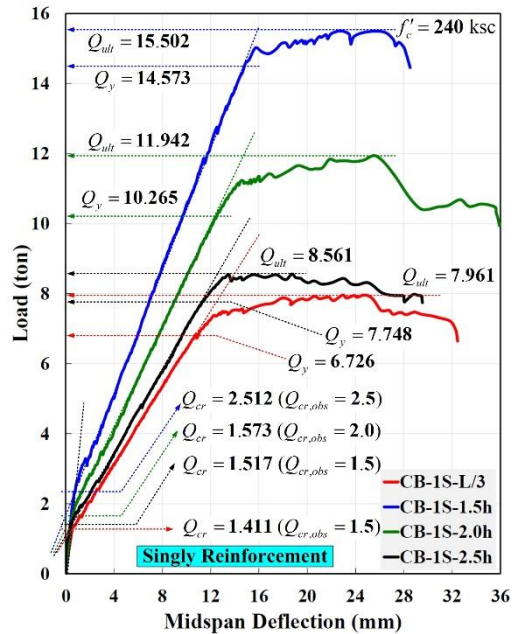
ภาพที่ 17 คานเสริมกำลัง SB-1S-1.5h เมื่อหยุดให้น้ำหนักบรรทุกกระทำ

ตัวอย่างของภาพถ่ายสำหรับคานทดสอบในการศึกษานี้แสดงไว้ในภาพที่ 14 และภาพที่ 15 ซึ่งแสดงตัวอย่างของคานควบคุม CB-1S-1.5h ทั้งก่อนให้และหยุดให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ ตามลำดับ ส่วนภาพที่ 16 และภาพที่ 17 เป็นภาพถ่ายของคานเสริมกำลัง SB-1S-1.5h ทั้งก่อนให้และหยุดให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ ตามลำดับ

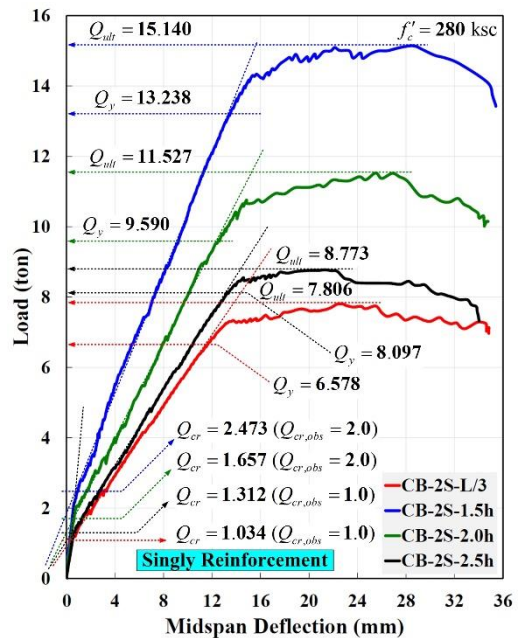
3. ผลลัพธ์จากการทดสอบ

ภายหลังจากการทดสอบตัวอย่างคานทั้ง 14 ตัวอย่างจนกระทั่งคานเกิดการวิบัติสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำจากแม่แรงไฮดรอลิกส์ (Q) และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงพาด (δ) ของคานทดสอบซึ่งได้มาจากการเก็บบันทึกข้อมูลของมาตรวัดแรง (load cell) และอุปกรณ์การตรวจวัดค่าการเคลื่อนที่ LVDTs ด้วยชุดอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล (data acquisition) โดยที่ค่าของการแอ่นตัวที่ได้เป็นการหามาจากผลเฉลี่ยของการแอ่นตัวของตัวอย่างคานทดสอบที่ด้าน A และด้าน B ของคาน

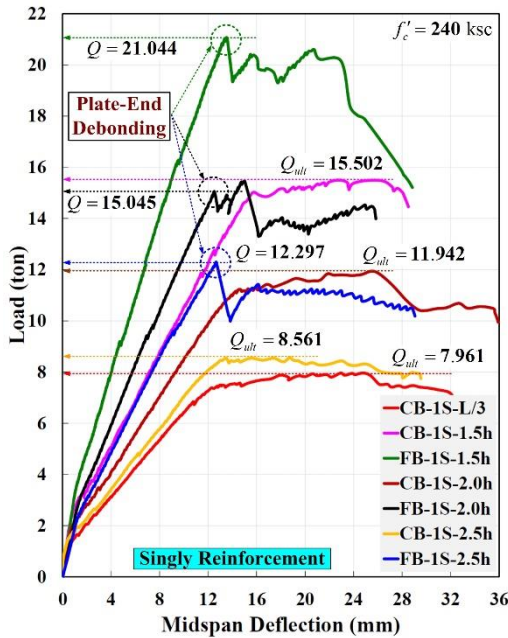
ภาพที่ 18 และภาพที่ 19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำและการแอ่นตัวสำหรับกรณีของคานควบคุมต่างๆ ที่มีค่ากำลังอัดระบุของคอนกรีตที่ใช้คือ 240 ksc และ 280 ksc ตามลำดับ โดยในแต่ละภาพนั้นได้มีการแสดงค่าของน้ำหนักบรรทุกแรกเริ่มแรก (Q_{cr}) ค่าน้ำหนักบรรทุกคราก (Q_y) และค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย (Q_{ult}) ที่ได้จากการพิจารณาผลของการทดสอบตัวอย่างของคานในทำนองเดียวกันกับความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและค่าความโค้งไว้ในแบบ 3 เส้นตรง ดังแสดงไว้ในภาพที่ 2 สำหรับภาพที่ 20 และภาพที่ 21 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำและการแอ่นตัวของคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่มีค่ากำลังอัดระบุของคอนกรีตที่ใช้คือ 240 ksc และ 280 ksc ตามลำดับ และมีการระบุค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อน (Q) ของแผ่น CFRP ในคานเสริมกำลังและค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย (Q_{ult}) ของคานควบคุม



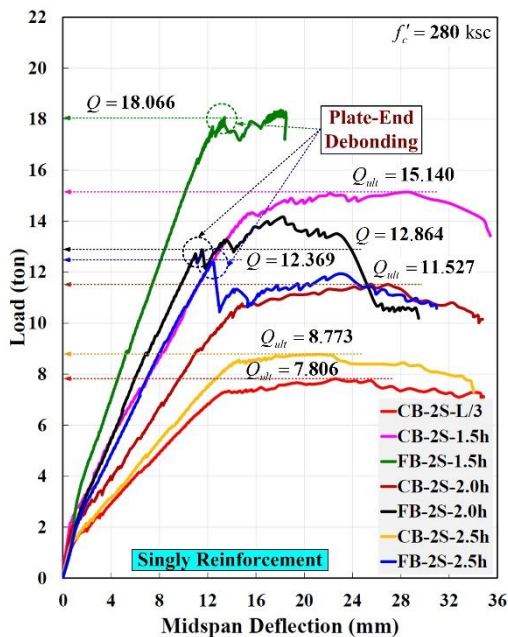
ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานควบคุมที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีต 240 ksc



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานควบคุมที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีต 280 ksc



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีต 240 ksc

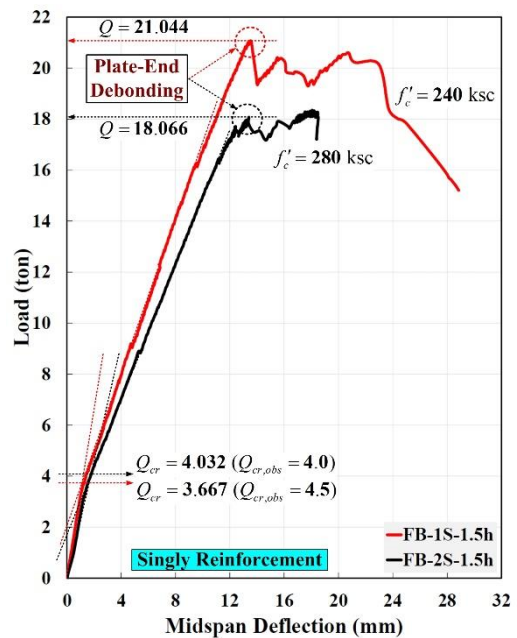


ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีต 280 ksc

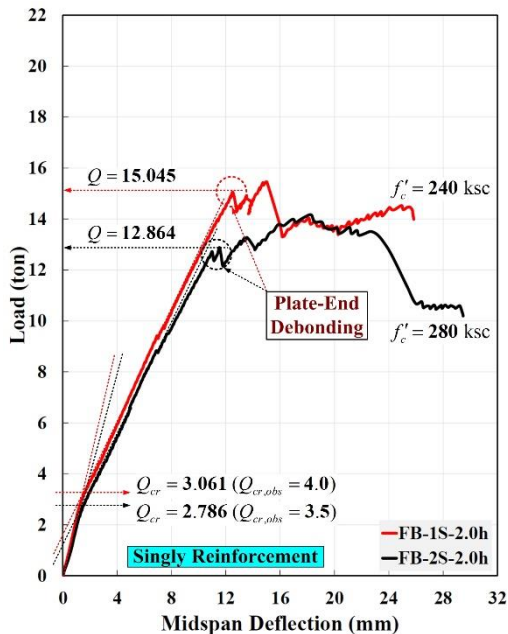
สังเกตว่าในภาพที่ 19 และภาพที่ 20 ยังได้มีการระบุค่าของน้ำหนักบรรทุกแตกร้าเริ่มแรกที่ได้มาจากการสังเกตด้วยสายตาในระหว่างทำการทดสอบคาน ($Q_{cr,obs}$) เมื่อมีการเพิ่มน้ำหนักบรรทุก ดังนั้น ค่าที่ได้จึงมีความแตกต่างไปจากค่าที่ได้จากความสัมพันธ์ในภาพ

4. อภิปรายผลการศึกษาวิจัย

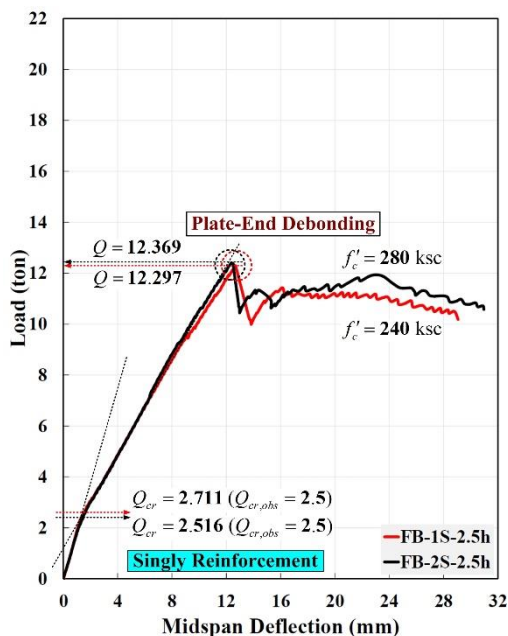
เมื่อพิจารณาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานควบคุมในภาพที่ 18 และภาพที่ 19 พบว่า ค่าน้ำหนักบรรทุกแตกร้าเริ่มแรก ค่าน้ำหนักบรรทุกครากและค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำมีการขยับเข้าใกล้ฐานรองรับ และค่าน้ำหนักบรรทุกเหล่านี้มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อกำลังอัดระบุของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างภาพที่ 18 และภาพที่ 19 ในแต่ละตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกเดียวกันที่กระทำลงบนคาน



ภาพที่ 22 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคานเสริมกำลัง FB-1S-1.5h และ FB-2S-1.5h



ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคาน เสริมกำลัง FB-1S-2.0h และ FB-2S-2.0h



ภาพที่ 24 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคาน เสริมกำลัง FB-1S-2.5h และ FB-2S-2.5h

สำหรับการพิจารณาค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนของแผ่น CFRP (Q) ที่แสดงไว้ในแต่ละภาพของภาพที่ 20 และภาพที่ 21 นั้นพบว่า มีค่าลดลงเมื่อตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำมีการขยับออกไปจากฐานรองรับและมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อคอนกรีตที่ใช้มีค่ากำลังอัดระบุเพิ่มมากขึ้นคือจาก 240 ksc เป็น 280 ksc เฉพาะในการศึกษานี้และเมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบเฉพาะคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP เท่านั้น และกำหนดให้มีตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนคานมีระยะที่เท่ากันดังได้แสดงไว้ในภาพที่ 22 ถึงภาพที่ 24 พบว่า ค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนของคานที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีต 240 ksc มีค่าสูงกว่ากำลังอัดระบุของคอนกรีต 280 ksc ยกเว้นในกรณีที่ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนคานมีค่าเท่ากับ 2.5 เท่าของความลึกคาน ($a = 2.5h$) โดยทำการวัดห่างจากฐานรองรับทั้งสองข้างนั้นมีค่าใกล้เคียงกันมาก

ในการเปรียบเทียบค่าปริมาณเชิงตัวเลขของแต่ละสภาวะความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานควบคุมและคานเสริมกำลังได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 ถึงตารางที่ 5 โดยตารางที่ 3 แสดงถึงค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยและค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่ได้จากการทดสอบคานตัวอย่าง ค่าโมเมนต์ดัดประลัยจากการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้ค่ากำลังของวัสดุที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณด้วยค่ากำลังระบุออกแบบดังที่ได้ให้ไว้ในตารางที่ 2 ส่วนตารางที่ 4 แสดงค่าของน้ำหนักบรรทุกแตกร้าวและโมเมนต์ดัดแตกร้าวที่ได้จากการสังเกตรอยร้าวด้วยสายตา ระหว่างดำเนินการทดสอบและมีการจดบันทึกค่าน้ำหนักบรรทุกแตกร้าวไว้ในขณะนั้นและค่าที่ได้มาจากการคำนวณของกำลังระบุและค่าจากการทดสอบวัสดุที่สามารถหามาได้ สำหรับตารางที่ 5 เป็นการสรุปผลของค่าน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ที่หาได้มาจากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวของคานทดสอบทั้ง 14 ตัวอย่างคานทั้งที่หามาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวของคาน

ตารางที่ 3 น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยและโมเมนต์ดัดประลัย

คาน	$Q_{ult, test}$ (ton)	$M_{ult, test}$ (ton-m)	$M_{ult, mat}$ (ton-m)	$M_{ult, des}$ (ton-m)
CB-1S-L/3	7.961	2.786	2.223	1.657
CB-1S-1.5h	15.502	2.907	2.223	1.657
FB-1S-1.5h	21.061	3.949	-	6.927
CB-1S-2.0h	11.942	2.986	2.223	1.657
FB-1S-2.0h	15.488	3.872	-	6.927
CB-1S-2.5h	8.561	2.675	2.223	1.657
FB-1S-2.5h	12.297	3.843	-	6.927
CB-2S-L/3	7.806	2.732	2.239	1.676
CB-2S-1.5h	15.140	2.839	2.239	1.676
FB-2S-1.5h	18.350	3.441	-	7.431
CB-2S-2.0h	11.527	2.882	2.239	1.676
FB-2S-2.0h	14.160	3.540	-	7.431
CB-2S-2.5h	8.773	2.742	2.239	1.676
FB-2S-2.5h	12.369	3.865	-	7.431

$Q_{ult, test}$ และ $M_{ult, test}$ คือ น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยและโมเมนต์ดัดประลัยที่คำนวณจากการทดสอบคาน

$M_{ult, mat}$ และ $M_{ult, des}$ คือ โมเมนต์ดัดประลัยที่คำนวณจากค่าการทดสอบวัสดุและจากค่าระบุนอกแบบ

ตารางที่ 4 น้ำหนักบรรทุกแตกร้าวและโมเมนต์ดัดแตกร้าว

คาน	$Q_{cr, obs}$ (ton)	$M_{cr, obs}$ (ton-m)	$M_{cr, mat}$ (ton-m)	$M_{cr, des}$ (ton-m)
CB-1S-L/3	1.5	1.050	0.536	0.517
CB-1S-1.5h	2.5	0.938	0.536	0.517
FB-1S-1.5h	4.5	1.688	-	0.557
CB-1S-2.0h	2.0	1.000	0.536	0.517
FB-1S-2.0h	4.0	2.000	-	0.557
CB-1S-2.5h	1.5	0.938	0.536	0.517
FB-1S-2.5h	2.5	1.563	-	0.557
CB-2S-L/3	1.5	0.700	0.556	0.558
CB-2S-1.5h	2.0	0.750	0.556	0.558
FB-2S-1.5h	4.0	1.500	-	0.601
CB-2S-2.0h	2.0	1.000	0.556	0.558
FB-2S-2.0h	3.5	1.750	-	0.601
CB-2S-2.5h	1.0	0.625	0.556	0.558
FB-2S-2.5h	2.5	1.563	-	0.601

$Q_{cr, obs}$ และ $M_{cr, obs}$ คือ น้ำหนักบรรทุกแตกร้าวและโมเมนต์ดัดแตกร้าวที่สังเกตจากการทดสอบคาน

$M_{cr, mat}$ และ $M_{cr, des}$ คือ โมเมนต์ดัดแตกร้าวที่คำนวณจากค่าการทดสอบวัสดุและค่ากำลังระบุนอกแบบ

ตารางที่ 5 น้ำหนักบรรทุกต่างๆ จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัว

คาน	Q_{cr} (ton)	Q_y (ton-m)	Q_{ult} (ton-m)	Q_{debond} (ton-m)
CB-1S-L/3	1.411	6.726	7.961	-
CB-1S-1.5h	2.512	14.573	15.502	-
FB-1S-1.5h	3.667	-	-	21.044
CB-1S-2.0h	1.573	10.265	11.942	-
FB-1S-2.0h	3.061	-	-	15.045
CB-1S-2.5h	1.517	7.748	8.561	-
FB-1S-2.5h	2.711	-	-	12.297
CB-2S-L/3	1.034	6.578	7.806	-
CB-2S-1.5h	2.473	13.238	15.140	-
FB-2S-1.5h	4.032	-	-	18.066
CB-2S-2.0h	1.657	9.590	11.527	-
FB-2S-2.0h	2.786	-	-	12.864
CB-2S-2.5h	1.312	8.097	8.773	-
FB-2S-2.5h	2.516	-	-	12.369

Q_{cr} คือ น้ำหนักบรรทุกทุกแตกร้าว: Q_y คือ น้ำหนักบรรทุกคราก: Q_{ult} คือ น้ำหนักบรรทุกประลัยและ Q_{debond} คือ น้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนของแผ่น CFRP

พิจารณาตารางที่ 3 เห็นได้ว่าไม่ได้ทำการระบุค่าของโมเมนต์ดัดประลัยที่คำนวณจากผลทดสอบวัสดุเนื่องจากไม่มีผลการทดสอบของแผ่น CFRP ดังแสดงในตารางที่ 2 ส่วนค่าโมเมนต์ดัดประลัยจากค่าระบุออกแบบของคานเสริมกำลังมีค่าคงที่เท่ากันในแต่ละค่ากำลังอัดระบุของคอนกรีตที่ใช้และไม่ขึ้นกับตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกกระทำเนื่องจากเป็นค่ากำลังความสามารถของหน้าตัดคานที่ได้จากวัสดุ และนอกจากนี้ยังสังเกตได้อีกว่ามีค่าสูงกว่าโมเมนต์ดัดประลัยที่ได้จากการทดสอบคานซึ่งเป็นการบ่งบอกว่าคานเสริมกำลังมีการสูญเสียพฤติกรรมคอมโพสิตก่อนที่คานจะมีความสามารถเต็มประสิทธิภาพในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกจากภายนอก

สำหรับตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าวที่ได้จากการคำนวณพบว่า มีค่าคงที่ในแต่ละคานควบคุมและคานเสริมกำลังโดยไม่ขึ้นกับตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำและมีค่าน้อยกว่าค่าที่สังเกตได้จากการทดสอบคานในทุกกรณี

ตารางที่ 5 แสดงถึงค่าน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ที่ได้จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวของคานทดสอบพบว่าไม่สามารถหาค่าน้ำหนักบรรทุกครากได้อย่างชัดเจนจากความสัมพันธ์และค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยเนื่องจากการบดแตกของคอนกรีตในกรณีของคานเสริมกำลังแต่สามารถหาค่าน้ำหนักบรรทุกแตกร้าวและค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนด้วยการพิจารณาพฤติกรรมจากความสัมพันธ์ในภาพที่ 22 ถึงภาพที่ 24 ในส่วนของคานควบคุมทุกตัวอย่างนั้นสามารถหาค่าน้ำหนักบรรทุกแตกร้าว น้ำหนักบรรทุกครากและน้ำหนักบรรทุกประลัยได้ในลักษณะทำนองเดียวกันกับความสัมพันธ์แบบ 3 เส้นตรงในภาพที่ 2

5. สรุปผล

จากผลการศึกษาเชิงทดลองสามารถสรุปได้ว่า คานควบคุมทุกตัวอย่างมีพฤติกรรมแบบเหนียวเนื่องจากเกิดการครากของเหล็กเสริมรับแรงดึงโดย

พบว่า ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกแตกร้าวน ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกครากและค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนช่วงเฉือนมีค่าลดลงและมีแนวโน้มลดลงเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาคานเสริมกำลังพบว่า ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกจากการหลุดล่อนของแผ่น CFRP มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนช่วงเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นและมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น แม้ว่าค่าน้ำหนักบรรทุกทุกจากการหลุดล่อนของคานเสริมกำลังมีค่าสูงกว่าค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของคานควบคุมก็ตามแต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบพบว่า มีค่าต่ำกว่าค่าโมเมนต์ดัดที่ได้จากการคำนวณออกแบบโดยใช้ค่ากำลังระบุซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการใช้ความสามารถของหน้าตัดคานเสริมกำลังไม่เต็มประสิทธิภาพของกำลังของวัสดุ

6. อ้างอิง

- [1] Park R, Paulay T. Reinforced Concrete Structures. New York: John Wiley & Sons Inc.; 1975.
- [2] Nilson AH, Winter G. Design of Concrete Structures. 11th ed. Singapore: McGraw-Hill Inc.; 1991.
- [3] Nawy EG. Reinforced Concrete: A fundamental Approach. 4th ed. New Jersey: Prentice Hall Inc.; 2000.
- [4] Hollaway LC, Leeming MB. Strengthening of Reinforced Concrete Structures: Using Externally-Bonded FRP Composites in Structural and Civil Engineering. Cambridge: Woodhead Publishing; 2001.
- [5] GangaRao HVS, Taly N, Vijay PV. Reinforced Concrete Design with FRP Composites. Boca Raton: Taylor & Francis Group LLC.; 2007.
- [6] Balaguru P, Nanni A, Giancaspro J. FRP Composites for Reinforced and Prestressed Concrete Structures: A Guide to Fundamentals and Design for Repair and Retrofit. New York: Taylor & Francis Group LLC.; 2009.
- [7] Rasheed HA. Strengthening Design of Reinforced Concrete with FRP. Boca Raton: Taylor & Francis Group LLC.; 2015.
- [8] Wu H-C, Eamon CD. Strengthening of Concrete Structures Using Fiber Reinforced Polymers (FRP): Design, Construction and Practical Applications. Cambridge: Woodhead Publishing; 2017.
- [9] ACI 440.2R-17. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. Michigan: American Concrete Institute (ACI) Committee 440; 2017.
- [10] Chajes MJ, Thomson TA, Januszka TF, Finch WW. Flexural strengthening of concrete beams using externally bonded composite materials. Constr Build Mater. 1994; 8: 191-201.
- [11] Varastehpour H, Hamelin P. Strengthening of concrete beams using fiber-reinforced plastics. Mater Struct. 1997; 30: 160-6.
- [12] Ramana VPV, Kant T, Morton SE, Dutta PK, Mukherjee A, Desai YM. Behavior of CFRPC strengthened reinforced concrete beams with varying degrees of strengthening. Compos B Eng. 2000; 31: 461-70.
- [13] Azevedo DMM, Juvandes LFP, Henriques AAR. Flexural strengthening with FRP systems experimental results vs. expected results based on actual design guidelines. Composites in Construction 2005-

- Third International Conference, 2005 July 11-13, Lyon, France, 2005.
- [14] Rosenboom O, Rizkalla SH. Experimental study of intermediate crack debonding in fiber-reinforced polymer strengthened beams. *ACI Struct J*. 2008; 105: 41-50.
- [15] Perera R, Bueso-Inchausti D. A unified approach for the static and dynamic analyses of intermediate debonding in FRP-strengthened reinforced concrete beams. *Compos Struct*. 2010; 92: 2728-37.
- [16] Hamed E, Bradford MA. Flexural time-dependent cracking and post-cracking behaviour of FRP strengthened concrete beams. *Int J Solids Struct*. 2012; 49: 1595-607.
- [17] Bykov AA, Kalugin AV. New model for evaluation of FRP debonding strain for Russian design code. *Adv Mater Sci Eng*. 2013; 2013: 130162.
- [18] Ding J, Wang F, Huang X, Chen S. The effect of CFRP length on the failure mode of strengthened concrete beams. *Polymers*. 2014; 6: 1705-26.
- [19] Bennegadi ML, Hadjazi K, Sereir Z, Amziane S, El Mahi B. General cohesive zone model for prediction of interfacial stresses induced by intermediate flexural crack of FRP-plated RC beams. *Eng Struct*. 2016; 126: 147-57.
- [20] Mostafa AAB, Razaqpur AG. Finite element model for predicting post delamination behaviour in FRP-retrofitted beams in flexure. *Constr Build Mater*. 2017; 131: 195-204.
- [21] Nguyen-Minh L, Phan-Vu P, Tran-Thranh D, Truong QPT, Pham TM, Ngo-Huu C, Rovnak M. Flexural-strengthening efficiency of cfrp sheets for unbonded post-tensioned concrete T-beams. *Eng Struct*. 2018; 166: 1-15.
- [22] Chen C, Wang X, Sui L, Xing F, Chen X, Zhou Y. Influence of FRP thickness and confining effect on flexural performance of HB-strengthened RC beams. *Compos B Eng*. 2019; 161: 55-67.
- [23] Zhou C, Guo Y, Wang Y, He X, Xiong Z. Flexural behavior of narrow RC beams strengthened with hybrid anchored CFRP sheets. *J Adv Concr Technol*. 2020; 18: 54-66.
- [24] Al-Negheimish AI, El-Sayed AK, Al-Saawani MA, Alhozaimy AM. Effect of stirrups on plate end debonding in reinforced concrete beams strengthened with fiber reinforced polymers. *Polymers*. 2021; 13: polym 13193322.
- [25] Zhou B, Wu R-Y, Yin S. Stress field approach for prediction of end concrete cover separation in RC beams strengthened with FRP reinforcement. *Polymers*. 2022; 14: polym14050988.