

การเสริมกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

คาร์บอน: การศึกษาเชิงทดลอง

Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plates: An Experimental Study

วิกร โตวรพงศ์ ปวริศ โปษะนันท์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

เลขที่ 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

Emails: vigcivil@hotmail.com, Pawarid3104@gmail.com

ปฏิภาณ จันทรวิชิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

Email: patiphan.c@mail.rmutk.ac.th

Damang Dy

General Department of Immigration, Ministry of Interior

National road Number 1, S/K Nirouch, Chbar Ampov, Phnom Penh 12355, Cambodia

Email: dydamang@gmail.com

และ ยศ สมพรเจริญสุข

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

เลขที่ 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

Corresponding author: Email: syossyos@mut.ac.th

Manuscript received July 25, 2022

Revised October 29, 2022

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาเชิงทดลองของคานคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งคานได้รับการเสริมกำลังด้วยวิธีการยึดติดจากภายนอกของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) ด้วยวิธีที่ถูกต้องที่สุดคือ เพื่อศึกษาความสามารถด้านกำลังเชิงดัดและพฤติกรรมการตอบสนองการแอ่นตัวของคานที่มีหน้าตัดของคานเสริมเหล็กแตกต่างกันอยู่สองประเภทระหว่างการเสริมเหล็กกับแรงดึงอย่างเดี่ยวและเสริมเหล็กกับแรงดึงร่วมกับเหล็กกับแรงอัด ได้ทำการหล่อคาน

ที่มีมิติต่าง ๆ โดยรวมเหมือนกันจำนวน 14 ตัวอย่างคานด้วยการหล่อในที่โดยใช้คอนกรีตผสมเสร็จเพื่อการทดสอบในโรงประลองซึ่งสามารถแบ่งตัวอย่างคานออกได้เป็นสองกลุ่มตามประเภทของการเสริมเหล็กในแต่ละกลุ่มคาน ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กสี่ตัวแรกกำหนดให้เป็นคานควบคุมโดยรับแรงกระทำเป็นแบบจุดที่ระยะ 1 ใน 3 ของความยาวช่วงพาด และรับแรงกระทำที่ระยะ 1.5 2.0 และ 2.5 เท่าของความลึกคานโดยวัดจากฐานรองรับทั้งสองฐาน คานที่เหลืออีกสามตัวอย่างได้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP และรับแรงกระทำที่ระยะ

1.5, 2.0 และ 2.5 เท่าของความลึกคานโดยวัดจากฐานรองรับในทำนองเดียวกันกับคานควบคุม ผลลัพธ์จากการทดสอบได้มีการจัดเตรียมและให้ไว้ครั้งแรกสำหรับการตอบสนองระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัว การวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้มาได้นำเสนอและวิจารณ์สำหรับน้ำหนักบรรทุกแตกร้า น้ำหนักบรรทุกคราก น้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อน และน้ำหนักบรรทุกประลัย บางผลลัพธ์ได้มีการเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้คำนวณเชิงทฤษฎีที่สามารถหามาได้

คำสำคัญ: พอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ความสามารถด้านกำลังเชิงคด น้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อน การตอบสนองระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัว คานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ABSTRACT

This research paper deals with an experimental study of reinforced concrete beams in which the beams are strengthened in flexure by externally epoxy bonded carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) plates. The objectives are to investigate flexural strength capacity and deflection response behavior of beams with two different types of reinforced beam cross section between single and double reinforcements. A total of 14 beam specimens with the same overall dimensions are cast-in-situ using ready mixed concrete for laboratory tests, which can be divided into two groups depending on steel reinforcement types. In each group of beams, the first four reinforced concrete beam specimens are imposed to be as the control beams that loaded by point loadings at the distance of one-third point of span length, and loaded at the distances of 1.5, 2.0, and 2.5 times of beam depth measured from two supports. The remaining three beam specimens are strengthened by CFRP plates and also loaded at 1.5, 2.0, and 2.5 times of beam depth measured from the supports in the same manner with control beams. The tested results have been prepared and given first for the load-deflection response. Analysis of obtained results are presented and discussed for cracking load, yielding load, debonding load, and ultimate load. Some results are compared with available theoretical calculated results.

Keywords: Carbon Fiber-Reinforced Polymer, Flexural Strength Capacity, Debonding Load, Load-Deflection Response, Reinforced Concrete Beam

1. บทนำ

การเสริมกำลังเชิงโครงสร้างหมายถึง การปรับปรุงโครงสร้างที่มีอยู่เดิมให้มีความมั่นคงแข็งแรงหรือเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกให้กับโครงสร้างซึ่งสิ่งจำเป็นที่ต้องพิจารณาคือ พฤติกรรมและคุณสมบัติของโครงสร้างทั้งก่อนและหลังการเสริมกำลังมีความสอดคล้องตามความต้องการหรือความสามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์หรือไม่ [1], [2]

กรณีการเสริมกำลังด้วยการยึดติดแผ่นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (fiber-reinforced polymer: FRP) ให้กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) ได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบัน ซึ่งสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาภายหลังจากการเสริมกำลังด้วยวิธีการนี้คือ พฤติกรรมคอมโพสิต (composite action) [3] และโอกาสเกิดการวิบัติในหลายรูปแบบ [1] ที่ต่างไปจากโครงสร้าง ค.ส.ล. [4] ดังนั้น จึงมีการศึกษาวิจัยเพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นและเป็นการป้องกันการเกิดรูปแบบการวิบัติที่ไม่พึงประสงค์ ผลการวิจัยในอดีตทำให้วิเคราะห์และออกแบบการเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP ได้ถูกต้องและปลอดภัย [5] อีกทั้งมีการนำเสนอมาตรฐานแนวทางออกแบบจากสถาบันที่ได้รับการยอมรับ [6] ทั้งนี้เป็นผลมาจากการรวบรวมและสังเคราะห์ผลการศึกษาวิจัยในอดีต

Buyukozturk, Gunes และ Karaca [7] ทำการทบทวนและรายงานผลการศึกษาวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการหลุดล่อนของแผ่น FRP เมื่อเสริมกำลังในชิ้นส่วนโครงสร้าง ค.ส.ล. และโครงสร้างเหล็ก ต่อมา Jumaat, Kabir และ Obaydullah [8] ทำการทบทวน อธิบายถึงสาเหตุและรายงานวิธีการซ่อมแซมต่าง ๆ สำหรับคาน ค.ส.ล. ที่เกิดความเสียหาย Xiaoyong และ Zhigang [9] ศึกษาพฤติกรรมคาน ค.ส.ล. ที่เสริมกำลังด้วยการติดแผ่น CFRP โดยเพิ่มจำนวนชั้นของแผ่นเสริมกำลังภายใต้การทดสอบการดัดแบบ 4 จุด พบว่า คานที่เสริมแผ่น CFRP ตั้งแต่ 1 ถึง 4 ชั้น เกิดการวิบัติจากการฉีกขาดของแผ่น CFRP ส่วนคานที่เสริมด้วยแผ่น CFRP 5 และ 6 ชั้น เกิดการวิบัติมาจากการหลุดล่อนของแผ่น CFRP

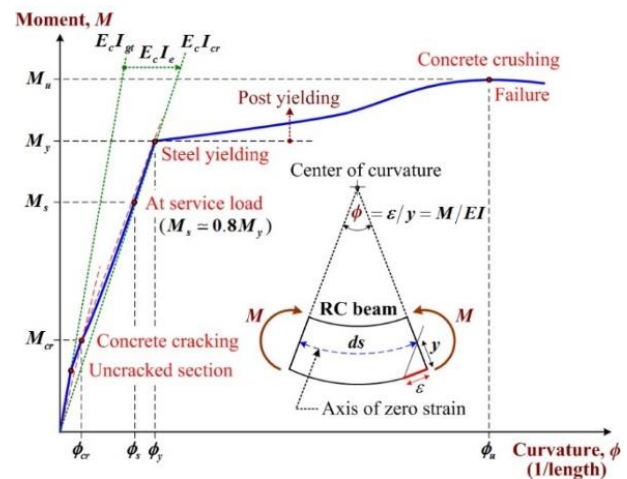
Kim และคณะ [10] ประเมินหาความสามารถในการรับโมเมนต์บนพื้นฐานของความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสของคานเสริมกำลังด้วยแผ่น FRP พบว่า ความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสมีผลต่อค่าโมเมนต์สูงสุดของคานเสริมกำลัง โดยการใช้แผ่น FRP ที่มีการลดความยาวของแผ่นในแต่ละชั้นสามารถปรับปรุงกำลังของคานได้ Al-Rifaie, Ismaeel และ Riyadh [11] ศึกษาวิธีการฟื้นฟูคาน ค.ส.ล. ที่เกิดความเสียหายด้วย

วิธีการใช้วัสดุ เฟอร์โรซีเมนต์ แผ่นเหล็ก แผ่น CFRP นาโนซีเมนต์ และการอัดฉีดนาโนซีเมนต์มอร์ตาร์พบว่า การยึดติดวัสดุเฟอร์โรซีเมนต์หรือแผ่นเหล็กโดยใช้สลักเกลียว (bolts) สามารถฟื้นฟูความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้ โดยอัตราส่วนของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยภายหลังการฟื้นฟูต่อน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยเดิมมีอยู่เดิมมีค่าร้อยละ 105 และ 100.8 ตามลำดับ การยึดติดวัสดุเฟอร์โรซีเมนต์หรือแผ่นเหล็กกับคานเดิมโดยใช้อีพ็อกซี่มีประสิทธิผลน้อยกว่ากรณีการใช้แผ่น CFRP โดยมีค่าอัตราส่วนของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยภายหลังการฟื้นฟูต่อน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยเดิมเป็นร้อยละ 87.4 และ 100 กรณีใช้เฟอร์โรซีเมนต์ แผ่นเหล็ก และแผ่น CFRP ตามลำดับ เมื่อใช้อีพ็อกซี่ร่วมกับสลักเกลียวฝังยึดสามารถฟื้นฟูได้เกือบร้อยละ 100 สำหรับการใช้นาโนเฟอร์โรซีเมนต์หุ้มสามารถฟื้นฟูได้ร้อยละ 99 ส่วนการอัดฉีดนาโนซีเมนต์มอร์ตาร์ฟื้นฟูได้ร้อยละ 80

Wan, Jiang และ Wu [12] ศึกษาผลการยึดติดแผ่น FRP ที่เกิดความบกพร่องในคานเสริมกำลังโดยมีพารามิเตอร์ คือ รอยร้าวที่มีอยู่เดิมในคอนกรีตที่มีระยะห่างและความกว้างที่แตกต่างกันและตำแหน่งการเยื้องศูนย์ของแผ่น FRP พบว่า มากกว่าร้อยละ 10 ของคอนกรีตที่เกิดการหลุดออกยังคงมีกำลังที่เสถียรและคานมีความเหนียว ส่วนการเยื้องศูนย์ทางด้านข้างตามแนวยาวของแผ่น FRP พบว่า ไม่มีผลต่อพฤติกรรมการยึดเกาะ สำหรับกรณีการแตกร้าวของคอนกรีตที่มีความกว้างของรอยร้าวมากพบว่า เป็นสาเหตุทำให้เกิดการเสื่อมลดของความสัมพันธ์ระหว่างการยึดเกาะและการเลื่อนไถล ในส่วนของคานที่มีรอยร้าวแคบพบว่า ยังคงรักษาพฤติกรรมการยึดเกาะไว้ได้ในระดับหนึ่ง

Hawileh และคณะ [13] ศึกษาการเสริมกำลังคาน ค.ส.ล. ด้วยการติดแผ่น FRP ที่ผิวด้านข้างคานโดยการทดสอบและการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS พบว่า การเสริมกำลังด้วยการติดแผ่น FRP ที่ผิวด้านข้างคานสามารถปรับปรุงความสามารถต้านทานเชิงดัดได้ ไม่นานมานี้ Zhang และคณะ [14] ได้ทำการออกแบบแผ่น CFRP เพื่อใช้ในการเสริมกำลังคานที่มีรอยบาก (notches) บริเวณปลายแผ่นและมีตัวจับยึด CFRP แบบแผ่นรูปตัวยูเพื่อศึกษาผลของตัวจับยึดที่มีต่อการแยกตัวของคอนกรีตหุ้มเหล็กพบว่า ความสูงมีความสำคัญมากกว่าความกว้างของตัวจับยึดในการปรับปรุงกลไกและกำลังต้านทานของการแยกตัวของคอนกรีตหุ้มเหล็ก Zhou, Wu และ Yin [15] เสนอสนวนความเค้นเชิง

นวัตกรรมบนพื้นฐานแนวทางเชิงวิเคราะห์ เพื่อใช้ประเมินการวิบัติจากการแยกตัวของคอนกรีตหุ้มเหล็กร่วมกับใช้แนวทางเชิงวิเคราะห์ของหน้าตัดขยาย (extended sectional analytical approach) สำหรับพฤติกรรมของคาน ค.ส.ล. ที่มีปริมาณเหล็กเสริมน้อยตามการออกแบบด้วยวิธีกำลัง [4] สามารถแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ดังรูปที่ 1

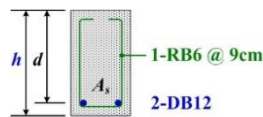


รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งเว้าของคานคอนกรีตเสริมเหล็กน้อย

วัตถุประสงค์ในการนำเสนอบทความนี้คือ สนใจความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ที่มีการป้องกันการวิบัติบริเวณปลายแผ่นจากการหลุดล่อนหรือการแยกตัวของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมด้วยการโอบรัดรอบปลายแผ่น CFRP ดังในรูปที่ 2(ค) และรูปที่ 2(ง)

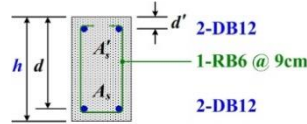
2. วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

ตัวอย่างของคานทดสอบที่ใช้ในการศึกษามีจำนวนทั้งสิ้น 14 ตัวอย่าง โดยสามารถแบ่งออกได้เป็นคานควบคุม (control beams) จำนวน 2 ตัวอย่างคือ CB-1S-L/3 และ CB-1D-L/3 ที่อยู่ภายใต้การทดสอบการดัดมาตรฐานแบบ 4 จุด (standard four-point bending test) และเป็นคานควบคุมอีก 6 ตัวอย่างที่สอดคล้องกับคานเสริมกำลัง (strengthened beams) โดยได้ทำการยึดติดด้วยแผ่น CFRP ที่ผิวหน้าด้านรับแรงดึงของคอนกรีตจำนวน 6 ตัวอย่าง ดังรายละเอียดระบุไว้ในตารางที่ 1



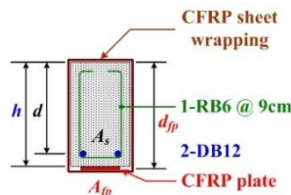
Singly RC beam

(ก) คานควบคุมที่เสริมเหล็กรับแรงดึง



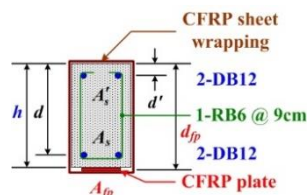
Doubly RC beam

(ข) คานควบคุมที่เสริมเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัด



Strengthened singly RC beam by bonded CFRP plate with end wrapping

(ค) คานเสริมกำลังที่เสริมเหล็กรับแรงดึง



Strengthened doubly RC beam by bonded CFRP plate with end wrapping

(ง) คานเสริมกำลังที่เสริมเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัด

รูปที่ 2 คานควบคุมและคานเสริมกำลัง

สำหรับคาน ค.ส.ล. ทุกตัวอย่างทดสอบได้ทำการกำหนดให้มีมิติภายนอกโดยรวมต่าง ๆ ดังต่อไปนี้คือ คานมีหน้าตัดกว้าง (b) 15 ซม. ลึก (h) 25 ซม. ยาว 2.4 ม. และมีความยาวช่วงพาดระหว่างฐานรองรับ 2.1 ม. ซึ่งได้ทำการหล่อคานในที่ (cast-in-situ) และเลือกใช้คอนกรีตผสมเสร็จ (ready mixed concrete) ที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีตรูปทรงกระบอก (cylinder concrete compressive strength) คือ 240 กก./ซม.²

ส่วนรายละเอียดของการเสริมเหล็กรับแรงดึง (tensile steel) และเหล็กรับแรงอัด (compressive steel) บนหน้าตัดคานใช้เหล็กข้ออ้อย (deformed bar) DB12 ชั้นคุณภาพ SD40 และใช้เหล็กผิวเรียบ (round bar) เป็นเหล็กปลอก (stirrup) รับแรงเฉือนรูปตัวยู (U-shape) RB6 ชั้นคุณภาพ SR24 ดังแสดงในรูปที่ 2(ก) และรูปที่ 2(ข)

ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างคานทดสอบ

คาน	ประเภทคาน	การเสริมเหล็ก	ระยะนำหน้ากับรทุกกระทำจากฐานรองรับ (ซม.)
CB-1S-L/3	คานควบคุม	singly RC	$L/3 = 70$
CB-1S-1.5h	คานควบคุม	singly RC	$a = 1.5h = 37.5$
FB-1S-1.5h	คานเสริมกำลัง	singly RC	$a = 1.5h = 37.5$
CB-1S-2.0h	คานควบคุม	singly RC	$a = 2.0h = 50$
FB-1S-2.0h	คานเสริมกำลัง	singly RC	$a = 2.0h = 50$
CB-1S-2.5h	คานควบคุม	singly RC	$a = 2.5h = 62.5$
FB-1S-2.5h	คานเสริมกำลัง	singly RC	$a = 2.5h = 62.5$
CB-1D-L/3	คานควบคุม	doubly RC	$L/3 = 70$
CB-1D-1.5h	คานควบคุม	doubly RC	$a = 1.5h = 37.5$
FB-1D-1.5h	คานเสริมกำลัง	doubly RC	$a = 1.5h = 37.5$
CB-1D-2.0h	คานควบคุม	doubly RC	$a = 2.0h = 50$
FB-1D-2.0h	คานเสริมกำลัง	doubly RC	$a = 2.0h = 50$
CB-1D-2.5h	คานควบคุม	doubly RC	$a = 2.5h = 62.5$
FB-1D-2.5h	คานเสริมกำลัง	doubly RC	$a = 2.5h = 62.5$

singly RC คือ หน้าตัดคานเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว
doubly RC คือ หน้าตัดคานเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้

วัสดุ	ค่าระบุออกแบบ	ค่าจากการทดสอบวัสดุ
กำลังครากเหล็ก DB12	4000 กก./ซม. ²	5484 กก./ซม. ²
กำลังครากเหล็ก RB6	2400 กก./ซม. ²	4129 กก./ซม. ²
มอดูลัสเหล็กเสริม	2.04×10^6 กก./ซม. ²	-
คอนกรีตกำลังอัด 240 กก./ซม. ²	240 กก./ซม. ²	259.58 กก./ซม. ²
มอดูลัสคอนกรีต	235632 กก./ซม. ²	245056 กก./ซม. ²
กำลังดึงประลัยแผ่น CFRP	29000 กก./ซม. ²	-
มอดูลัสแผ่น CFRP	1.65×10^6 กก./ซม. ²	-

การเสริมกำลังให้กับคาน ค.ส.ล. ได้ทำการเลือกใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (carbon fiber-reinforced polymer: CFRP) เป็นแบบแผ่นแข็ง (CFRP plate) ที่มีหน้ากว้างของแผ่น CFRP ขนาด 5 ซม. ยาว 1.9 ม. และมีความหนา 2.4 มม. โดยทำการยึดติดแผ่น CFRP เข้ากับผิวหน้าของคอนกรีตด้วยวัสดุประสานอีพ็อกซีไซโพรอปิก (Sikadur®-30) ที่มีชั้นความหนาของอีพ็อกซีที่ใช้ประมาณ 3 มม.

ในส่วนของการป้องกันการวิบัติล่วงหน้าก่อนกำหนด (premature failure) ที่บริเวณปลายแผ่นเสริมกำลังอันเนื่องมาจากการหลุดลอก (plate-end debonding) หรือเกิดการแยกตัวของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่ปลายแผ่น (end concrete cover

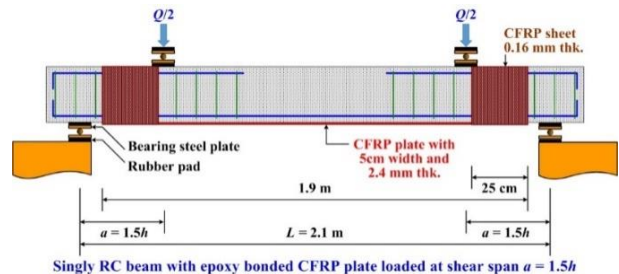
separation) ใช้วิธีการรัดรอบปลายแผ่น CFRP ด้วยแผ่น CFRP แบบแผ่นอ่อน (CFRP sheet) ที่มีขนาดหน้ากว้าง 25 ซม. หนา 0.16 มม. โดยมีความยาวรัดรอบเมื่อรวมระยะทับคือ 95 ซม. และยึดติดโดยใช้อีพ็อกซี่ Sikadur®-330 ทั้งนี้ ก่อนที่จะทำการรัดรอบได้ทำการลบปรับแต่งมุมของหน้าตัดคานที่เป็นมุมฉากออกให้มนเพื่อลดความเข้มข้นของความเค้น (stress concentration)

สำหรับตารางที่ 2 แสดงค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา โดยได้ระบุค่ากำลังที่ใช้สำหรับการออกแบบ (nominal strength) และค่าที่ได้จากผลของการทดสอบกำลังวัสดุ (proof strength) ที่แท้จริงของเหล็กเสริม คอนกรีตและแผ่น CFRP ที่จำเป็นและหาค่ามาได้ ทั้งนี้ ไม่ได้ทำการทดสอบหาค่ากำลังดึงประลัยของแผ่น CFRP และค่ามอดูลัสของเหล็กเสริมและของแผ่น CFRP ดังนั้นแล้ว ในการคำนวณหาความสามารถในการต้านทานกำลังของหน้าตัดคานเสริมกำลังที่ได้จากผลการทดสอบกำลังวัสดุจะใช้ค่าระบุของแผ่น CFRP แทนในการคำนวณค่า

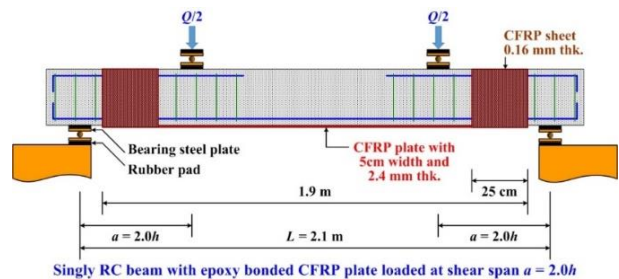
ในส่วนของรูปที่ 3 และรูปที่ 4 เป็นการแสดงการให้รายละเอียดในการออกแบบการทดสอบสำหรับการเสริมกำลังของคานตัวอย่างทดสอบด้วยแผ่น CFRP ที่ได้รับการเสริมเหล็กกับแรงดึงเพียงอย่างเดียว (single reinforcement: singly strengthened RC beam) และคานที่มีการเสริมเหล็กกับแรงดึงร่วมกับเหล็กกับแรงอัด (double reinforcement: doubly strengthened RC beam) บนหน้าตัดคานเสริมกำลัง ตามลำดับ สังเกตได้ว่า น้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนคานมีการแปรเปลี่ยนตามระยะช่วงการเฉือน (a) คือ $1.5h$ $2.0h$ และ $2.5h$ โดยน้ำหนักบรรทุกที่กระทำลงบนคานตัวอย่างทดสอบมีความเป็นสมมาตร (symmetrical loading) เมื่อทำการอ้างอิงกับแนวกึ่งกลางความยาวช่วงพาดของคาน (midspan length)

สำหรับกรณีของคานควบคุมที่มีความสอดคล้องกับกรณีของคานเสริมกำลังให้ทำการทดสอบคานภายใต้ผลของการให้น้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นแบบจุดเช่นเดียวกันโดยการให้น้ำหนักบรรทุกกระทำผ่านกระบอกแม่แรงไฮดรอลิกส์ (hydraulics jack) ที่มีความสามารถในการให้แรงกระทำ (load capacity) ขนาด 30 ตัน ที่ตกลงบนคานส่งถ่ายแรง (transfer beam) และส่งผ่านลงบนคานทดสอบแบบ 2 จุด สำหรับนิยามอัตราส่วนช่วงเฉือน [1] กำหนดให้มีค่าเท่ากับ a/h โดยค่า a คือ ระยะช่วงเฉือนที่วัดจากฐานรองรับไปถึงตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำแบบจุด ส่วน h คือ ความลึกคาน ใน

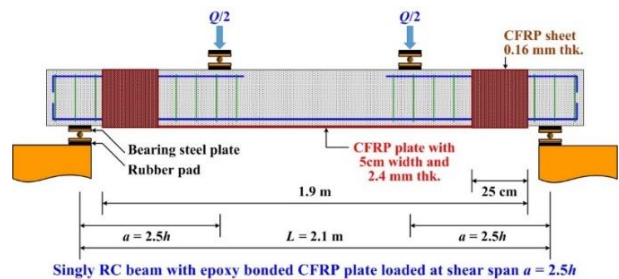
การศึกษานี้กำหนดให้มีค่าอัตราส่วนช่วงเฉือน (a/h) เท่ากับ 1.5 2.0 และ 2.5 ส่วนค่า Q คือ ค่าน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อคานที่ได้จากแม่แรงไฮดรอลิกส์ดังแสดงในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ข้างต้น



(ก) คานเสริมกำลัง FB-1S-1.5h



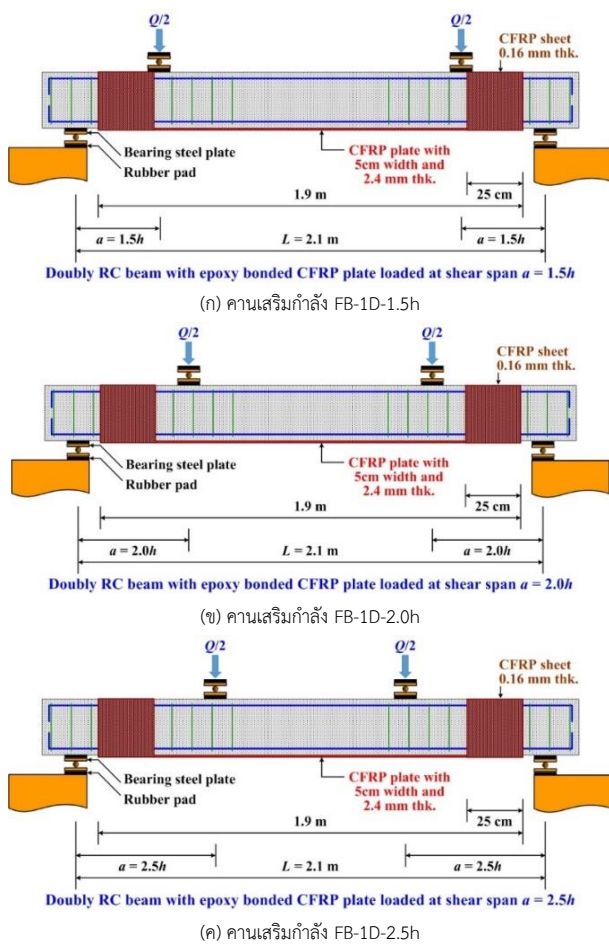
(ข) คานเสริมกำลัง FB-1S-2.0h



(ค) คานเสริมกำลัง FB-1S-2.5h

รูปที่ 3 คานเสริมกำลังที่เสริมเหล็กกับแรงดึงอย่างเดียว

รูปที่ 5 และรูปที่ 6 เป็นการแสดงภาพถ่ายจริงของตัวอย่างคานเสริมกำลัง FB-1S-2.0h และคาน FB-1D-2.0h ที่มีค่ากำลังอัดระบุของคอนกรีต 240 กก./ซม.² และมีการเสริมเหล็กกับแรงดึงเพียงอย่างเดียวและเสริมเหล็กกับแรงดึงร่วมกับเหล็กกับแรงอัดภายใต้แรงกระทำเป็นแบบจุดที่ระยะ $2.0h$ โดยทำการวัดระยะห่างจากฐานรองรับทั้ง 2 ข้าง ทั้งก่อนและหลังการให้แรงกระทำ ตามลำดับ เมื่อทำการพิจารณารูปที่ 5 (ข) และรูปที่ 6 (ข) กรณีภายหลังการสิ้นสุดการให้แรงกระทำสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่าลักษณะ



รูปที่ 4 คานเสริมกำลังที่เสริมเหล็กกับแรงดึงร่วมกับเหล็กกับแรงอัด

ของรูปแบบของรอยแตกกร้าว (crack pattern) ที่เกิดขึ้นมีรูปแบบการกระจายตัวของรอยแตกกร้าวที่มีความสม่ำเสมอและมีการกระจายตัวของรอยร้าวตลอดความยาวของคาน โดยที่รอยร้าวเริ่มต้นเกิดขึ้นที่ใต้ท้องคานด้านที่รับแรงดึงตรงบริเวณกลางช่วงพาดคานและมีการแพร่ขยาย (crack propagation) ของความลึกของรอยร้าวพุ่งขึ้นไปสู่หลังคานด้านที่รับแรงอัดของคอนกรีตที่มีความลึกของรอยร้าวที่สูงเลยครึ่งความลึกของคาน ($h/2$) ทั้งนี้ เป็นการแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับน้ำหนักของหน้าตัดคานเสริมกำลังที่ใช้ความสามารถของกำลังดึงของวัสดุที่ได้จากเหล็กเสริมภายในและการเสริมกำลังติดด้วยแผ่น CFRP ก่อนที่คอนกรีตเกิดการวิบัติในลักษณะบดอัดแตก (concrete crushing) ที่หลังคานตรงบริเวณกึ่งกลางช่วงพาดซึ่งเป็นรูปแบบของการวิบัติเป็นแบบเปราะ (brittle failure) นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเห็นได้อีกว่า รอยร้าวที่อยู่



(ก) ก่อนให้น้ำหนักบรรทุกกระทำ



(ข) หยุดให้น้ำหนักบรรทุกกระทำ

รูปที่ 5 คานเสริมกำลัง FB-1S-2.0h

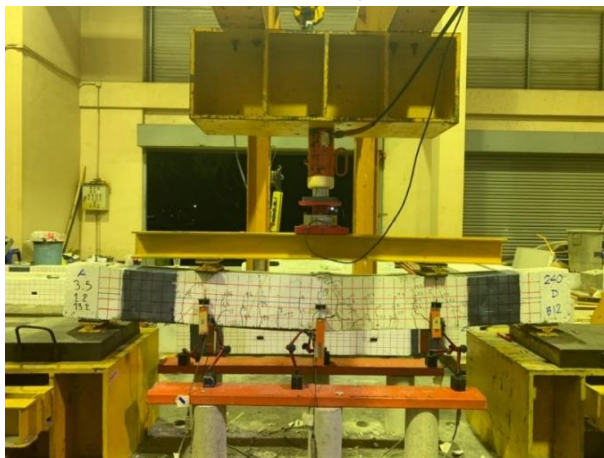
ระหว่างตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกกระทำนั้นส่วนใหญ่เป็นรอยร้าวที่ปรากฏในแนวตั้งซึ่งเป็นรอยร้าวอันเนื่องมาจากผลของการดัดล้วน (pure bending) สอดคล้องตามแผนภาพโมเมนต์ดัด (bending moment diagram: BMD)

3. ผลการทดสอบ

ภายหลังสิ้นสุดการทดสอบตัวอย่างคานทั้ง 14 ตัวอย่าง จนคานเกิดการวิบัติสามารถได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกที่กระทำผ่านทางแม่แรงไฮดรอลิกส์จากการเก็บข้อมูลของมาตรวัดแรง (load cell) และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงพาดคานจากการตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่แปรเปลี่ยนแบบเชิงเส้น



(ก) ก่อนให้น้ำหนักบรรทุกกระทำ



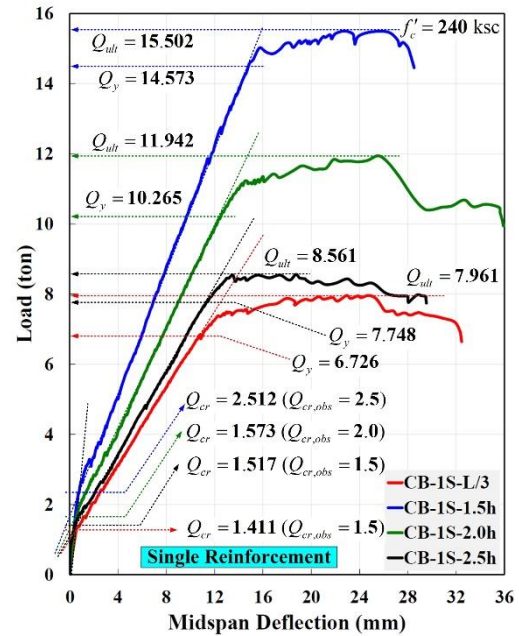
(ข) หยดให้น้ำหนักบรรทุกกระทำ

รูปที่ 6 คานเสริมกำลัง FB-1D-2.0h

(linear variable differential transformer: LVDT) โดยที่ค่า น้ำหนักบรรทุกกระทำและค่าการแอ่นตัวของคานที่ตรวจวัดได้ทำการจัดเก็บ รวบรวมไว้ด้วยชุดอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล (data acquisition) ทั้งนี้ ค่าการแอ่นตัวได้มาจากการหาค่าผลเฉลี่ยของการแอ่นตัวของคาน ทดสอบที่ด้าน A และด้าน B ที่ตรวจวัดตรงบริเวณกึ่งกลางความลึก ของคานดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6

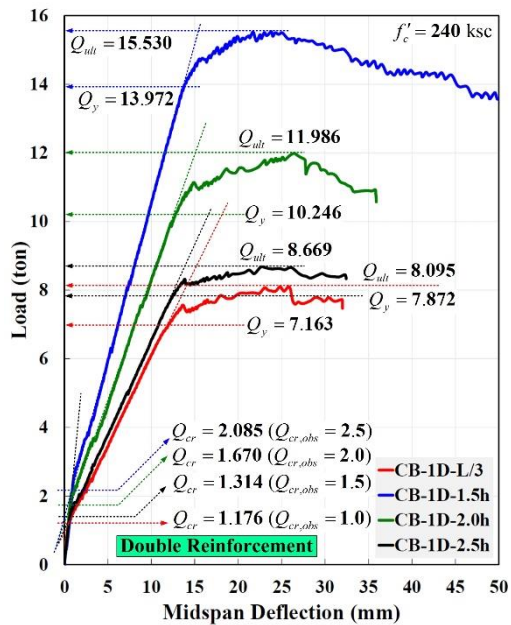
รูปที่ 7 และรูปที่ 8 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกกระทำและค่าการแอ่นตัวของคานควบคุมต่าง ๆ ที่ทำการ เสริมเหล็กกับแรงดึงอย่างเดียว (singly RC beams) และกรณีของ คานควบคุมที่เสริมเหล็กกับแรงดึงและเหล็กกับแรงอัด (doubly RC beams) ที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีตรูปทรงกระบอก 240 กก./ ซม.² ตามลำดับ โดยในรูปทั้งสองได้ระบุค่าน้ำหนักบรรทุกทุกแตร้าว

เริ่มแรก (first cracking load: Q_{cr}) น้ำหนักบรรทุกทุกคราก (yielding load: Q_y) และน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (ultimate load: Q_{ult}) ที่ได้ จากการพิจารณาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งงอในแบบ 3 เส้นตรง (tri-linear model) [4] ดังรูปที่ 1

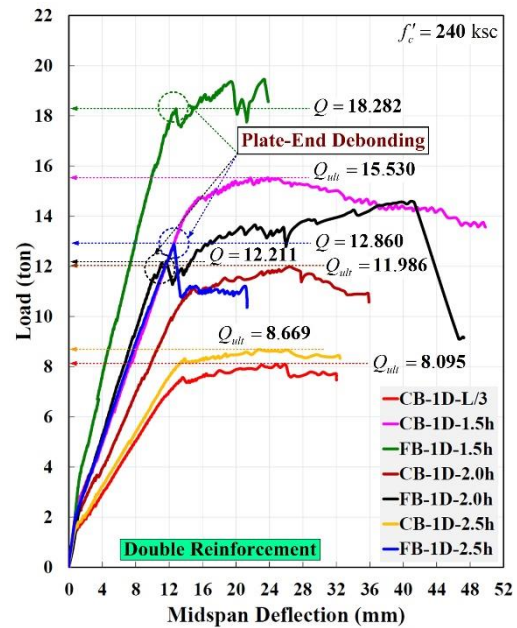


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของ คานควบคุมที่เสริมเหล็กกับแรงดึงอย่างเดียว

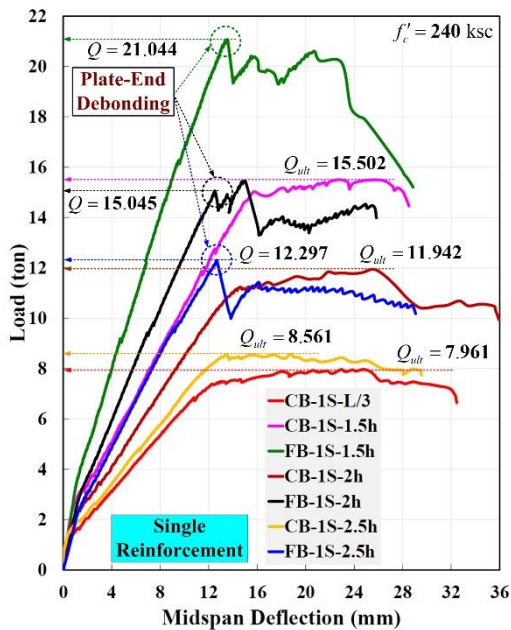
รูปที่ 9 และรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกกระทำและค่าการแอ่นตัวของคานควบคุมและคานเสริม กำลังที่มีตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกในตำแหน่งเดียวกัน โดยรูปที่ 9 เป็นกรณีของคานเสริมเหล็กกับแรงดึงอย่างเดียวและรูปที่ 10 เป็น กรณีของคานเสริมเหล็กกับแรงดึงและเหล็กกับแรงอัด ทั้งนี้ ได้ระบุ ค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อน (debonding load: Q) บางส่วนของแผ่น CFRP ที่สังเกตได้ชัดเจนจากความสัมพันธ์สำหรับ คานเสริมกำลังถึงแม้ว่าคานเสริมกำลังได้มีการป้องกันการหลุดล่อนที่ ปลายแผ่นด้วยการโอบรัดรอบสมบูรณ์ (full wrapping) และได้ระบุ ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Q_{ult}) ของคานควบคุม



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการอ่อนตัวของคานควบคุมที่เสริมเหล็กกับแรงดึงและเหล็กกับแรงอัด



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการอ่อนตัวของคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่เสริมเหล็กกับแรงดึงและเหล็กกับแรงอัด



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการอ่อนตัวของคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่เสริมเหล็กกับแรงดึงอย่างเดียว

ตารางที่ 3 น้ำหนักบรรทุกประลัยและโมเมนต์ดัดประลัยของตัวอย่างคานทดสอบ

คาน	$Q_{ult, test}$ (ตัน)	$M_{ult, test}$ (ตัน-ม.)	$M_{ult, mat}$ (ตัน-ม.)	$M_{ult, des}$ (ตัน-ม.)
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	7.368	6.927
CB-1S-2.0h	11.942	2.986	2.223	1.657
FB-1S-2.0h	15.488	3.872	7.368	6.927
CB-1S-2.5h	8.561	2.675	2.223	1.657
FB-1S-2.5h	12.297	3.843	7.368	6.927
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
$Q_{ult, test}$ และ $M_{ult, test}$ คือ น้ำหนักบรรทุกและโมเมนต์ดัดประลัยจากการทดสอบคาน				
$M_{ult, mat}$ และ $M_{ult, des}$ คือ โมเมนต์ดัดประลัยจากค่าการทดสอบวัสดุและจากค่าระบุออกแบบ				

ตารางที่ 4 น้ำหนักบรรทุกแตกร้าวและโมเมนต์ดัดแตกร้าวของตัวอย่างคานทดสอบ

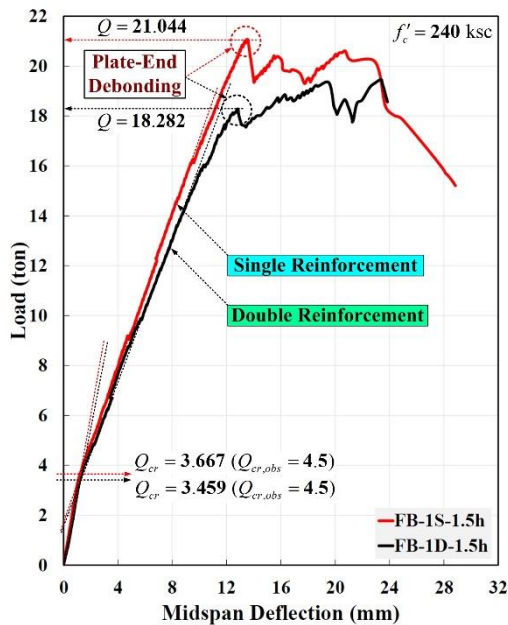
คาน	$Q_{cr, test}$ (ตัน)	$M_{cr, test}$ (ตัน-ม.)	$M_{cr, mat}$ (ตัน-ม.)	$M_{cr, des}$ (ตัน-ม.)
CB-1S-L/3	1.5	0.525	0.536	0.517
CB-1S-1.5h	2.5	0.469	0.536	0.517
FB-1S-1.5h	4.5	0.844	0.575	0.557
CB-1S-2.0h	2.0	0.500	0.536	0.517
FB-1S-2.0h	4.0	1.000	0.575	0.557
CB-1S-2.5h	1.5	0.469	0.536	0.517
FB-1S-2.5h	2.5	0.781	0.575	0.557
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
$Q_{cr, test}$ และ $M_{cr, test}$ คือ น้ำหนักบรรทุกและโมเมนต์แตกร้าวสังเกตจากคานทดสอบ				
$M_{cr, mat}$ คือ โมเมนต์ดัดแตกร้าวจากค่าการทดสอบวัสดุ				
$M_{cr, des}$ คือ โมเมนต์ดัดแตกร้าวจากค่าการออกแบบ				

ค่าของโมเมนต์ดัดประลัยและโมเมนต์ดัดแตกร้าวได้สรุปไว้ในตารางโดยที่ ตารางที่ 3 สรุปค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย ($Q_{ult, test}$) และโมเมนต์ดัดประลัย ($M_{ult, test}$) ที่คำนวณได้จากการทดสอบคานตัวอย่าง ค่าโมเมนต์ดัดประลัย ($M_{ult, mat}$) จากการคำนวณโดยใช้ค่ากำลังที่ได้จากการทดสอบวัสดุและค่าโมเมนต์ดัดประลัย ($M_{ult, des}$) จากการคำนวณโดยใช้ค่ากำลังระบุ ทั้งนี้ ค่ากำลังวัสดุจากการทดสอบและค่ากำลังระบุออกแบบได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 สำหรับ ตารางที่ 4 ได้ทำการสรุปค่าน้ำหนักบรรทุกแตกร้าว ($Q_{cr, test}$) และโมเมนต์ดัดแตกร้าว ($M_{cr, test}$) ที่ได้จากการสังเกตรอยร้าวเริ่มแรก (first crack observation) ระหว่างที่ทำการทดสอบคานตัวอย่าง และค่าของโมเมนต์ดัดแตกร้าวที่คำนวณมาจากค่าผลการทดสอบกำลังวัสดุ ($M_{cr, mat}$) และคำนวณมาจากค่ากำลังระบุออกแบบ ($M_{cr, des}$)

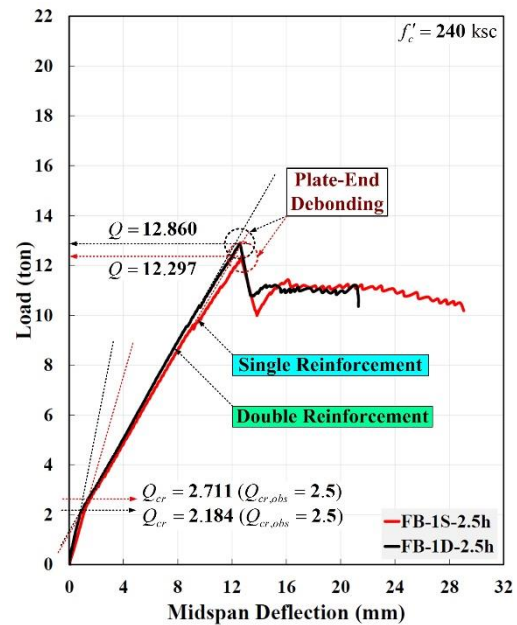
ตารางที่ 5 น้ำหนักบรรทุกต่างๆ จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัว

คาน	Q_{cr} (ตัน)	Q_y (ตัน)	Q_{ult} (ตัน)	Q_{debond} (ตัน)
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-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
Q_{cr} คือ น้ำหนักบรรทุกแตกร้าว: Q_y คือ น้ำหนักบรรทุกคราก				
Q_{ult} คือ น้ำหนักบรรทุกประลัย: Q_{debond} คือ น้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อน				

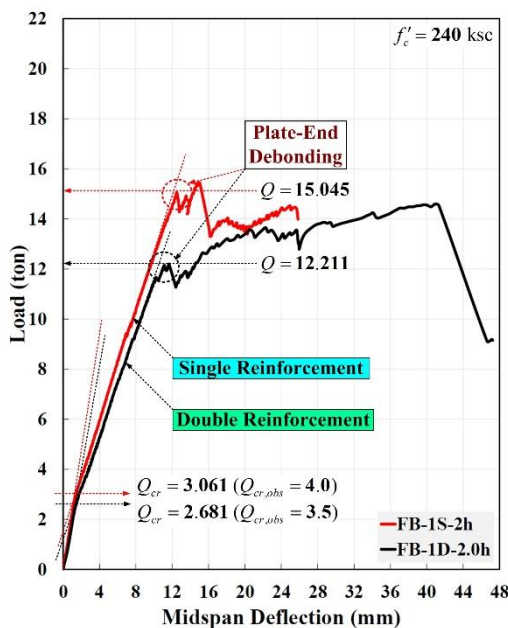
รายละเอียดของค่าต่าง ๆ ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 และตารางที่ 4 สามารถอธิบายหลักวิธีการคำนวณได้ดังต่อไปนี้ ค่าของโมเมนต์ดัดประลัย $M_{ult, test}$ และค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าว $M_{cr, test}$ ที่ได้จากการทดสอบคานตัวอย่างคำนวณหาได้จากสมดุลของแรง (force equilibrium) และแผนภาพของโมเมนต์ดัด สำหรับค่าของโมเมนต์ดัดประลัย $M_{ult, mat}$ และ $M_{ult, des}$ สามารถคำนวณมาจากสมดุลของแรงที่กระทำบนหน้าตัดคานจากกำลังทดสอบวัสดุและกำลังระบุออกแบบ ตามลำดับ และหลังจากนั้นทำการหาค่าโมเมนต์ดัดของหน้าตัดรอบแกนใดแกนหนึ่ง โดยที่โมเมนต์ดัดประลัยของคาน ค.ส.ล. ควบคุมหาได้จากวิธีกำลัง (strength method) [4] ส่วนคาน ค.ส.ล. ที่เสริมกำลังดัดจากภายนอกด้วยการยึดติดแผ่น CFRP ที่ผิวหน้าของคอนกรีตด้านรับแรงดึงใช้วิธีการคำนวณตามแนวทางของ ACI [6] ในส่วนของค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าว $M_{cr, mat}$ และ $M_{cr, des}$ ของทั้งคาน ค.ส.ล. ควบคุมและคานเสริมกำลังนั้นสามารถคำนวณได้จากการพิจารณาค่าโมดูลัสแตกหัก (modulus of rupture: f_r) ของคอนกรีตที่อยู่บนหลักการพื้นฐานด้วยวิธีการแปลงพื้นที่หน้าตัดคาน (beam cross sectional area) และค่าโมเมนต์เฉื่อยของหน้าตัด (moment of inertia) [1] – [4]



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานเสริมกำลัง FB-1S-1.5h และ FB-1D-1.5h



รูปที่ 13 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานเสริมกำลัง FB-1S-2.5h และ FB-1D-2.5h



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานเสริมกำลัง FB-1S-2.0h และ FB-1D-2.0h

สำหรับคาน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ที่ได้จากการพิจารณาความสัมพันธ์ในรูปที่ 7 ถึงรูปที่ 10 ได้ทำการสรุปไว้ในตารางที่ 5 ส่วนรูปที่ 11 ถึงรูปที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างคาน้ำหนักบรรทุกกระทำและค่าการแอ่นตัวระหว่างคานเสริมกำลังที่เสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวและคานเสริมกำลังที่เสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัดที่มีน้ำหนักบรรทุกกระทำที่ระยะ 1.5h 2.0h และ 2.5h โดยวัดห่างจากฐานรองรับทั้ง 2 ข้าง ตามลำดับ

4. อภิปรายผลการศึกษา

เมื่อทำการพิจารณารูปที่ 7 และรูปที่ 8 สำหรับกรณีของคานควบคุมต่าง ๆ พบว่า คาน้ำหนักบรรทุกแตกร้า (Q_{cr}) คาน้ำหนักบรรทุกคราก (Q_y) และคาน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Q_{ult}) มีค่าลดลงเมื่อตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกกระทำมีการขยับห่างออกไปจากฐานรองรับ และมีค่าที่ใกล้เคียงกันระหว่างคานควบคุมที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงอย่างเดียวและคานควบคุมที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงร่วมกับเหล็กเสริมรับแรงอัด สำหรับการศึกษาคาน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนของแผ่น CFRP (debonding load: Q) ดังแสดงในรูปที่ 9 และรูปที่ 10 สังเกตได้ว่า คาน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนมีแนวโน้มที่ลดลงจากคานเสริมกำลังที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงอย่าง

เดียวไปสู่คานเสริมกำลังที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงร่วมกับเหล็กเสริมรับแรงอัด ยกเว้นกรณีของคานเสริมกำลังที่มีระยะช่วงเฉือน 2.5 เท่าของความลึกคาน ($\alpha=2.5h$) ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 11 และรูปที่ 13

จากตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาค่าโมเมนต์ดัดประลัยจากผลการทดสอบคาน ($M_{ult, test}$) พบว่า ค่าโมเมนต์ดัดประลัยของคานเสริมกำลังให้ค่าที่สูงกว่าคานควบคุมในทุกกรณีโดยมีค่าสูงกว่าประมาณ 1.2-1.5 เท่า เมื่อทำการเปรียบเทียบกับคานควบคุม โดยที่ค่าโมเมนต์ดัดประลัยจากผลการทดสอบคาน ค.ส.ล. ควบคุมให้ค่าที่สูงกว่าค่าโมเมนต์ดัดประลัยของคาน ค.ส.ล. ควบคุมที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ($M_{ult, mat}$ และ $M_{ult, des}$) ส่วนค่าโมเมนต์ดัดประลัยของคานเสริมกำลังจากการทดสอบคานให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีเนื่องจากการสูญเสียพฤติกรรมคอมโพสิตอันเนื่องมาจากการหลุดล่อนของแผ่น CFRP บางส่วนเกิดขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดประลัยระหว่างค่า $M_{ult, mat}$ และค่า $M_{ult, des}$ พบว่าให้ค่าที่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันโดยค่า $M_{ult, mat}$ ให้ค่าที่มากกว่าค่า $M_{ult, des}$

จากตารางที่ 4 เมื่อทำการพิจารณาค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าจากผลการทดสอบคานที่ทำการเสริมกำลัง ($M_{cr, test}$) พบว่า ให้ค่าที่สูงกว่าคานควบคุมในทุกกรณีประมาณ 1.7-2.0 เท่า เมื่อทำการเปรียบเทียบกับคานควบคุมและสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ($M_{cr, mat}$ และ $M_{cr, des}$) ส่วนค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าจากผลการทดสอบคาน ค.ส.ล. ควบคุมให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีในทุกกรณีและมีค่าใกล้เคียงกันเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้ค่าของ $M_{ult, mat}$ และ $M_{cr, mat}$ ที่ให้ไว้ในตารางที่ 3 และตารางที่ 4 สำหรับคานเสริมกำลังใช้ค่าระบุออกแบบของแผ่น CFRP ตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 2 ในการคำนวณเนื่องมาจากไม่มีผลของการทดสอบวัสดุแผ่น CFRP

สำหรับตารางที่ 5 เป็นการระบุค่าน้ำหนักบรรทุกกระทำต่างๆ ที่ได้จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกกระทำและค่าการแอ่นตัวของคานทดสอบ โดยค่าของน้ำหนักบรรทุกแตกร้า (Q_{cr}) ค่าน้ำหนักบรรทุกคราก (Q_y) และค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย (Q_{ult}) ของคาน ค.ส.ล. ควบคุมหาค่ามาได้จากจากการพิจารณาแบบจำลองความสัมพันธ์แบบ 3 เส้นตรง [4] ส่วนค่าน้ำหนักบรรทุกคราก (Q_y) และค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย (Q_{ult}) ของคานเสริมกำลังไม่สามารถระบุค่าได้อย่างชัดเจนจากการพิจารณาพฤติกรรมของ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกกระทำและค่าการแอ่นตัวของคานตามแบบจำลอง 3 เส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 1 โดยค่าของ Q_{ult} ที่ได้ระบุไว้ในตารางที่ 3 เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบและการตรวจวัด ส่วนค่าน้ำหนักบรรทุกแตกร้า (Q_{cr}) และค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนของแผ่น CFRP (Q_{debond}) สามารถสังเกตและหาค่ามาได้จากแสดงในรูปที่ 11 ถึงรูปที่ 13

5. สรุป

จากผลการศึกษาในงานวิจัยที่นำเสนอในบทความสามารถทำการสรุปผลได้ตามกลุ่มประเภทของคานตัวอย่างทดสอบดังต่อไปนี้ คือ สำหรับกรณีของคานควบคุมทุกตัวอย่างแสดงพฤติกรรมเป็นแบบเหนียว (ductile behavior) เนื่องจากเกิดการคราก (yielding) ของเหล็กเสริมที่รับแรงดึงและคานเกิดการวิบัติแบบบดอัดแตกของคอนกรีตที่หลังคานตรงบริเวณช่วงกึ่งกลางความยาวช่วงพาดคาน โดยที่ค่าน้ำหนักบรรทุกแตกร้า ค่าน้ำหนักบรรทุกครากและค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยมีค่าลดลงเมื่อตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกกระทำมีการขยับห่างออกไปจากฐานรองรับ ส่วนผลของการเสริมเหล็กในคานควบคุมนี้ที่เป็นการเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวและเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเสริมเหล็กรับแรงอัดไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าน้ำหนักบรรทุกต่างๆ ตามที่ได้กล่าวไว้ ในส่วนกรณีของคานเสริมกำลังพบว่า ค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนของแผ่น CFRP มีแนวโน้มที่ลดลงจากคานเสริมกำลังที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงอย่างเดียวไปสู่คานเสริมกำลังที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงร่วมกับเหล็กเสริมรับแรงอัดเป็นส่วนใหญ่ โดยค่าโมเมนต์ดัดประลัยของคานเสริมกำลังให้ค่าที่สูงกว่าคานควบคุมในทุกกรณีโดยมีค่าสูงกว่าประมาณ 1.2-1.5 เท่า และค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าจากผลการทดสอบคานที่ทำการเสริมกำลัง ($M_{cr, test}$) พบว่า ให้ค่าที่สูงกว่าคานควบคุมในทุกกรณีประมาณ 1.7 - 2.0 เท่า ทั้งนี้ ค่าโมเมนต์ดัดประลัยของคานเสริมกำลังจากการทดสอบคานให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีเนื่องจากเกิดการสูญเสียพฤติกรรมคอมโพสิตอันเนื่องมาจากการหลุดล่อนของแผ่น CFRP บางส่วนเกิดขึ้น แม้ว่าได้ทำการป้องกันการหลุดล่อนที่ปลายแผ่น CFRP ล่วงหน้าไว้ ดังนั้นจึงควรให้ความสำคัญกับปัญหาการวิบัติในการเสริมกำลังของคานในลักษณะนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] L.C. Hollaway and M.B. Leeming, *Strengthening of Reinforced Concrete Structures: Using Externally-Bonded FRP Composites in Structural and Civil Engineering*, Woodhead Publishing, Cambridge, 2001.
- [2] D.J. Oehlers and R. Seracino, *Design of FRP and Steel Plated RC Structures: Retrofitting Beams and Slabs for Strength, Stiffness and Ductility*, Elsevier Ltd., Oxford, 2004.
- [3] D.J. Oehlers and M.A. Bradford, *Composite Steel and Concrete Structural Members: Fundamental Behaviour*, Elsevier Science Ltd., Oxford, 1995.
- [4] A.H. Nilson and G. Winter, *Design of Concrete Structures*, 11th ed., McGraw-Hill Inc., Singapore, 1991.
- [5] R. Kotynia, *FRP Composites for Flexural Strengthening of Concrete Structures: Theory, Testing, Design*, Lodz University of Technology Press, Lodz, 2019.
- [6] ACI 440.2R-17, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, American Concrete Institute (ACI) Committee 440, Michigan, 2017.
- [7] O. Buyukozturk, O. Gunes, and E. Karaca, "Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 18, pp. 9-19, 2004.
- [8] M.Z. Jumaat, M.H. Kabir, and M. Obaydullah, "A review of the repair of reinforced concrete beams," *J. Appl. Sci. Res.*, vol. 2, pp. 317-326, 2006.
- [9] L. Xiaoyong, Z. Zhigang, "Mechanical behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with carbon fiber sheets," *Adv. Mat. Res.*, vols. 179-180, pp. 955-9, 2011.
- [10] N. Kim, Y.S. Shin, E. Choi, and H.S. Kim, "Relationships between interfacial shear stresses and moment capacities of RC beams strengthened with various types of FRP sheets," *Constr. Build. Mater.*, vol. 93, pp. 1170-1179, 2015.
- [11] W.N. Al-Rifaie, N.N. Ismaeel, and H. Riyad, "Rehabilitation of damaged reinforced concrete beams," *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, vol. 14, pp. 58-70, 2017.
- [12] B. Wan, C. Jiang, and Y.-F. Wu, "Effect of defects in externally bonded FRP reinforced concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 172, pp. 63-76, 2018.
- [13] R.A. Hawileh, H.A. Musto, J.A. Abdalla, and M.Z. Naser, "Finite element modeling of reinforced concrete beams externally strengthened in flexure with side-bonded FRP laminates," *Compos. B Eng.*, vol. 173, article no. 106952, 2019.
- [14] D. Zhang, H. Shi, T. Ueda, and W. Jin, "Effect of U-shaped anchorages on concrete cover separation in carbon fiber-reinforced polymer-strengthened beams with notches at the sheet end," *Struct. Concr.*, vol. 22, pp. 50-68, 2020.
- [15] B. Zhou, R.-Y. Wu, and S. Yin, "Stress field approach for prediction of end concrete cover separation in RC beams strengthened with FRP reinforcement," *Polymers*, vol. 14, article no. polym14050988, 2022.



คอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดความเสียหายจากการสั่นสะเทือนแผ่นดินไหวด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

วิกร โตวราพงศ์ สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครและกำลังศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา (สาขาวิชาเอก วิศวกรรมโครงสร้าง) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร สนใจศึกษางานวิจัยในเรื่อง การเสริมกำลังให้กับองค์อาคารโครงสร้าง



เทคนิคของวิธีการปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence: AI) การคำนวณแก้ปัญหาความน่าเชื่อถือของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ยาก (reliability of rare events) การสร้างแบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม (artificial neural network model: ANN) และการเสริมกำลังให้กับองค์อาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดความเสียหาย

ปาริต โพชยะนันท์ สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธาจากมหาวิทยาลัยขอนแก่นและกำลังศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา (สาขาวิชาเอก วิศวกรรมโครงสร้าง) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร มีความสนใจศึกษางานวิจัยในเรื่อง การประยุกต์การคำนวณโดยใช้



โครงสร้างแผ่นบางและการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ปฎิภาณ จันทวิชิต สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาครุศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีและในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา (สาขาวิชาเอก วิศวกรรมโครงสร้าง) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร สนใจศึกษางานวิจัยในเรื่อง การแก้ปัญหาค่าเอกฐานของหน่วยแรงใน



Damang Dy สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา จากสถาบัน Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University และในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา (สาขาวิชาเอก วิศวกรรมโครงสร้าง) จาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สนใจศึกษางานวิจัยในเรื่อง ทฤษฎีคณิตศาสตร์เชิงวิศวกรรมประยุกต์และปัญหาของการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก



ยศ สมพรเจริญสุข สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตและปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา (สาขาวิชาเอก วิศวกรรมโครงสร้างและสาขาวิชาการอง คณิตศาสตร์ประยุกต์) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

ธนบุรี มีความสนใจศึกษางานวิจัยในเรื่อง ความฉลาดเชิงการคำนวณ การประยุกต์แบบจำลองเครือข่ายประสาทเทียม การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีในปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็งที่มีความต่อเนื่อง กลศาสตร์การแตกหักและกลศาสตร์การสัมผัส การสร้างและประยุกต์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในปัญหาเชิงกายภาพ และการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจากภายนอก