

การทดสอบการดัดแบบ 4 จุดของการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีการยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีเรซิน

Four-Point Bending Test of Reinforced Concrete Beams Strengthening with Epoxy Resin Bonded Steel Plates

ธันตศักดิ์ ธีระเกตุ¹, วิกร โตวราพงศ์¹, ดามอง ดี², ปฏิภาณ จันทรวชิต^{3*},
ยุทธศักดิ์ อนันตเดชศักดิ์¹, สัจจา บุญยฉัตร⁴, ยศ สมพรเจริญสุข^{1#}
Thanutsak Theeraket¹, Vigone Tovarapong¹, Damang Dy², Patiphan Chantarawichit^{3*},
Yuthasak Ananthadejsak¹, 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: syosyos@mut.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ตั้งเป้าหมายสู่การศึกษาเชิงทดลองของพฤติกรรมเชิงโครงสร้างด้านความสามารถทางกำลังและการเสียรูปของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีปริมาณเหล็กเสริมน้อยที่เสริมกำลังดัดโดยการยึดติดแผ่นเหล็กจากภายนอกด้วยอีพ็อกซีบริเวณผิวหน้าด้านรับแรงดึงของคานภายใต้การทดสอบการดัดแบบ 4 จุด ในแผนดำเนินการทดลองได้ทำการออกแบบตัวอย่างคานที่มีฐานรองรับอย่างง่ายจำนวนทั้งสิ้น 12 ตัวอย่าง ที่ประกอบไปด้วยคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป 4 ตัวอย่างโดยกำหนดให้เป็นคานควบคุมและตัวอย่างที่เหลือเป็นคานเสริมกำลังจากภายนอกด้วยการยึดติดแผ่นเหล็กจำนวน 8 ตัวอย่าง โดยคานตัวอย่างทั้งหมดได้ทำการทดสอบในโรงประลองภายใต้การให้แรงกระทำที่เพิ่มขึ้นทางเดียวแบบสมมาตร พารามิเตอร์ที่สนใจศึกษาเกี่ยวข้องกับกำลังอัดของคอนกรีต ความหนาของแผ่นเหล็กและประเภทของการเสริมเหล็กบนหน้าตัดคานซึ่งอาจเป็นการเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวหรือเป็นการเสริมเหล็กรับแรงดึงและเสริมเหล็กรับแรงอัดโดยได้ทำการพิจารณาและศึกษาควบคู่กันไป ผลลัพธ์ที่ได้มาแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัว คำนวณการบรรทุกทุกแตร้าวเริ่มแรก คำนวณการบรรทุกครากและคำนวณการบรรทุกทุกประลัย รูปแบบการวิบัติและพฤติกรรมการแตกร้าของคานตัวอย่างทดสอบได้มีการนำเสนอและวิจารณ์ในรายละเอียด ผลการทดสอบบ่งชี้ได้ว่าการวิบัติแบบล่วงหน้า

ก่อนกำหนดอันเนื่องมาจากการลอกออกที่ปลายแผ่นเหล็กเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่ลดความมีประสิทธิภาพและสมรรถนะของการเสริมกำลังดัดของคาน

คำสำคัญ : การยึดติดแผ่นเหล็กจากภายนอกด้วยอีพ็อกซี่ การเสริมกำลังดัด การลอกออกที่ปลายแผ่น การวิบัติแบบล่วงหน้าก่อนกำหนด คานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ABSTRACT

This research work is aimed to experimentally study the structural behavior on strength capacity and deformation of under-reinforced concrete beams strengthened in flexure with externally epoxy bonded steel plates to the tension face of the beams under four-point bending test. In the experimental program, a total of twelve simply supported beam specimens that consist of four ordinary reinforced concrete beams as control beams and the remaining eight reinforced concrete beams externally reinforced with bonded steel plates, have been designed and all tested in laboratory under monotonically increasing symmetrical loads. The interested parameters involving the concrete compressive strength, the steel plate thickness, and the type of reinforcing steel bars on the beam sections which may be singly or doubly reinforcements are simultaneously considered and investigated. The obtained results are dealt with for the load-deflection relationships, initial cracking load, yielding load, and ultimate load. The failure mode and cracking behavior of tested beams are presented and discussed in details. The tests indicate that the premature failure due to plate-end peeling is one of the major factors to decrease the efficiency and performance of flexural strengthening reinforced concrete beams.

Keyword: Externally Epoxy Bonded Steel Plate: Flexural Strengthening: Plate-End Peeling: Premature Failure: Reinforced Concrete Beam

1. บทนำ

คอนกรีตเสริมเหล็ก (คสล) เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมและมีการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างโครงสร้างอาคารทั่วไปและโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ อาทิเช่น โครงสร้างสะพาน ถนน และอาคารสาธารณูปโภคทั้งในประเทศและต่างประเทศ เนื่องจากมีความสะดวกในการก่อสร้าง การใช้งาน ความคงทนและมีประสิทธิภาพสูง [1-3] กลไกสำคัญที่ทำให้ห้องค้ออาคารของโครงสร้าง คสล มีกำลังต้านทานต่อภาระจากภายนอกคือ คอนกรีตทำหน้าที่ในการรับแรงอัดส่วนของเหล็กเสริมจะทำหน้าที่ในการรับแรงดึง ดังนั้นเมื่อนำข้อดีของวัสดุทั้งสองมารวมกันทำหน้าที่ในการรับแรงกระทำจากภายนอกในบริเวณหรือตำแหน่งที่เหมาะสมจะทำให้ได้โครงสร้าง

ที่มีความปลอดภัยและประหยัด โดยที่อายุการใช้งานของโครงสร้าง คสล ที่ได้รับการออกแบบมาอย่างถูกต้องและเป็นไปตามหลักการทางด้านวิศวกรรม รวมทั้งหากได้มีการบำรุงดูแลรักษาอย่างสม่ำเสมอและมีการใช้งานที่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ พบว่าโครงสร้าง คสล สามารถมีช่วงอายุการใช้งานได้ยาวนานมากกว่า 50 ถึง 100 ปี สำหรับในช่วงอายุการใช้งานของโครงสร้างนั้นอาจมีความจำเป็นในการบำรุงดูแลและซ่อมแซมชิ้นส่วนต่างๆ ของโครงสร้างที่อาจเกิดขึ้นมาจากหลายสาเหตุที่ตามมาภายหลังจึงทำให้มีความต้องการในการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างที่มีอยู่เดิมหากพบว่า เสถียรภาพหรือความเหมาะสมในการใช้งานไม่เป็นไปตามสภาพและเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้ [4-6]

การเสริมกำลังให้กับโครงสร้าง คสล เป็นหนึ่งในวิธีการทางเลือกที่เหมาะสมและประหยัดในเชิงเศรษฐศาสตร์ อีกทั้งมีความรวดเร็วในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการปรับปรุงหรือซ่อมแซมโครงสร้างให้กลับมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในกรณีของการเสริมกำลังโดยใช้แผ่นเหล็กยึดติดจากภายนอก พบว่าได้เริ่มมีการใช้งานมาตั้งแต่ต้นปี ค.ศ. 1960 ในประเทศอัฟริกาใต้และประเทศฝรั่งเศส [7,8] ด้วยการติดแผ่นเหล็กที่ผิวด้านรับแรงดึงของคาน คสล โดยใช้อีพ็อกซี่เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงดัด และในเวลาต่อมา ได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเสริมกำลังให้กับคาน คสล อย่างต่อเนื่องดังต่อไปนี้

Jones, Swamy และ Ang [7] ทำการทดสอบและศึกษาพฤติกรรมเชิงดัดทางด้านกำลังและการเสียรูปของคาน คสล ที่มีปริมาณการเสริมเหล็กน้อย (under RC beam) และเสริมเหล็กมาก (over RC beam) เมื่อเสริมกำลังโดยยึดติดแผ่นเหล็กจากภายนอกด้วยกาว (วัสดุประสาน) ที่ผิวคอนกรีต จากการศึกษาพบว่า การเสริมกำลังด้วยการติดแผ่นเหล็กที่ผิวนอกคานทำให้ค่ากำลังประลัยมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกกรณีของคานทดสอบ อีกทั้งรอยร้าวแรกที่สามารถสังเกตเห็นได้ (the first visible crack) ปรากฏช้าลงเมื่อทำการเปรียบเทียบกับคาน คสล ในเวลาต่อมา Eberline, Klaiber และ Dunker [8] ทำการทบทวนงานวิจัยและการประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการเสริมกำลังคาน คสล พบว่าคานสะพาน คสล ที่ได้ติดแผ่นเหล็กด้วยวัสดุประสานอีพ็อกซี่ (epoxy) สามารถเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจรได้ นอกจากนี้ได้ให้ข้อเสนอแนะว่า ควรออกแบบให้คานเสริมกำลังเกิดการวิบัติแบบเหนียว (ductile failure) และแนะนำให้อัตราส่วนความกว้างต่อความหนา (b/t ratio) ของแผ่นเหล็กที่ใช้มีค่าไม่น้อยกว่า 50

Oehlers [9] ได้ทำการศึกษาผลของการลอก (peeling) เนื่องจากแรงเฉือนและปฏิสัมพันธ์ระหว่างการลอกเฉือน (shear peeling) และการลอกดัด (flexural peeling) ในคาน คสล ที่เสริมกำลังโดยติด

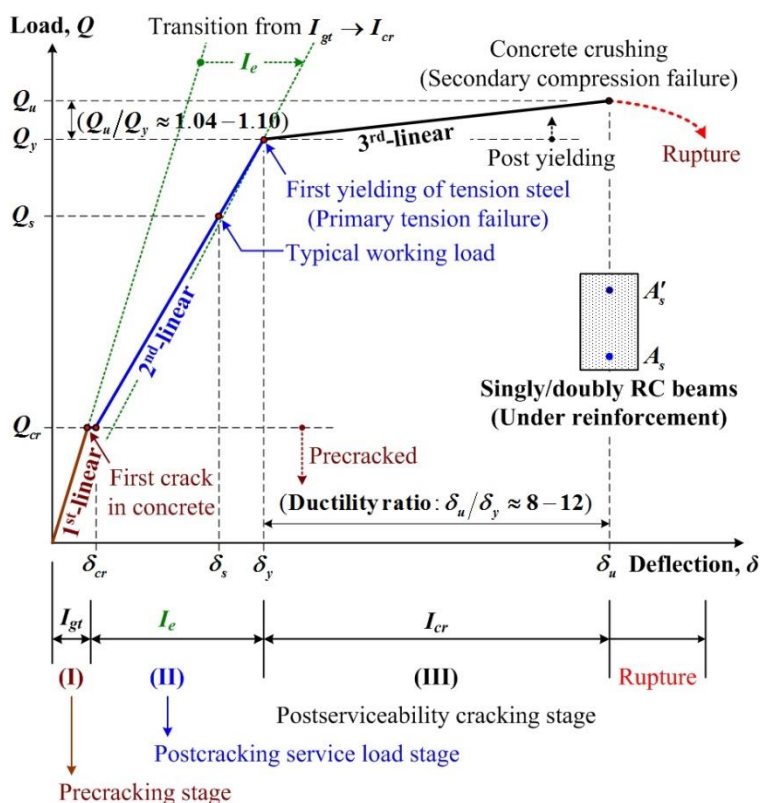
แผ่นเหล็กที่ผิวด้านรับแรงดึง ผลการศึกษาพบว่า การหลุดล่อน (debonding) ที่ปลายแผ่นเหล็กเนื่องจากแรงเฉือนไม่ได้มีอิทธิพลมาจากการมีอยู่ของเหล็กปลอกแต่ขึ้นอยู่กับการเกิดขึ้นของรอยร้าวเฉือนในแนวทแยง (diagonal shear crack formation) ที่ได้จากการกำลังเฉือนในคาน คสล ที่ไม่มีเหล็กปลอก (RC beam without stirrups) ลำดับถัดมา Ziraba และ Baluch [10] ได้ทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้น (nonlinear finite element model) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองต่อการดัดรวมกับการเฉือน (flexure-shear responses) ของคาน คสล ที่เสริมกำลังจากภายนอกโดยการยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซี่ พบว่า การเสริมกำลังคาน คสล ที่มีเหล็กเสริมปริมาณน้อยมีการวิบัติในลักษณะทำนองเดียวกันกับคาน คสล ที่ไม่เสริมกำลัง

Li, Assih และ Delmas [11] มุ่งสนใจศึกษาอิทธิพลของความหนาของวัสดุประสาน (adhesive thickness) และความหนาของแผ่นเหล็กที่ใช้ที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมการเสริมกำลังคานคอนกรีตล้วน (strengthened plain concrete beams) ด้วยการยึดติดแผ่นเหล็กจากภายนอก จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า กำลังดัดประลัยไม่มีการเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความหนาของวัสดุประสาน Teng และ Yao [12] นำเสนอแบบจำลองเชิงทำนายอย่างง่าย (simple predictive model) เพื่อใช้วิเคราะห์การวิบัติหลุดล่อนบริเวณปลายแผ่นของคาน คสล ที่มีการติดแผ่นเหล็กหรือแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP plate) Jumaat และ Alam [13] ศึกษาเชิงทดลองและเชิงวิเคราะห์ โดยใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ของคาน คสล เสริมกำลังดัดด้วยการติดแผ่นเหล็กและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) จากภายนอกโดยออกแบบให้คานทั้ง 2 ประเภทมีกำลังที่เท่ากัน จากผลการศึกษาพบว่า คานเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ให้ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกวิบัติ (failure load) สูงกว่าเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับคานเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก Chang, Yan และ Tang [14] ได้สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของรอยร้าวรูปแบบผสม

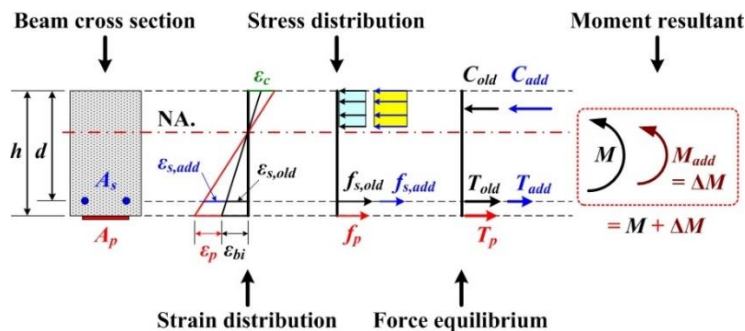
(mixed-mode crack) ที่เกิดจากการวิบัติของคานคอนกรีตล้วนที่ทำการเสริมกำลังโดยยึดติดแผ่นเหล็กจากภายนอกพบว่า มีการเกิดรอยร้าวในคอนกรีตและรอยร้าวจากการสูญเสียการยึดเกาะระหว่างคอนกรีตและแผ่นเหล็ก

Ozbek, Bocek และ Aykac [15] ศึกษากำลังประลัยและความเหนียวของคาน คสล ที่ทำการเสริมกำลังดัดด้วยการยึดติดแผ่นเหล็กและมีการจับยึดที่ปลายแผ่นด้วยการติดแผ่นเหล็กประกบด้านข้างยึดด้วยสลักเกลียวพบว่า ความเหนียว (ductility) ของคานมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคานไม่เสริมกำลังแต่ค่าโมดูลัสของความแกร่ง (modulus of toughness) มีค่าเพิ่มขึ้น Yannian, Jun และ Liu [16] ทดสอบคานคสล ที่มีหน้าตัดรูปตัวที (RC T-beam) และทำการเสริมกำลังดัดด้วยการติดแผ่นเหล็กใต้ท้องคานและมีการโอบรัดด้วยแถบแผ่นเหล็กรูปตัวยู (U-wrap) ที่

ปลายและภายในของแผ่นเหล็กเสริมกำลัง ผลของการศึกษาพบว่า อิทธิพลของการติดแผ่นเหล็กรูปตัวยูสามารถป้องกันการวิบัติจากการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กได้ และทำให้การวิบัติของคานอยู่ในรูปแบบของการดัด (flexural failure) เมื่อไม่นานมานี้ Abtan [17] ได้ศึกษาผลของความยาวและพื้นที่ประสิทธิผล (effective length and area) ของแผ่นเหล็กที่ใช้เสริมกำลังดัดจากภายนอกด้วยการยึดติดกับผิวคานคอนกรีตรับแรงดึงโดยการใช้จุดต่อสลักเกลียวรับแรงเฉือน (bolted shear connectors) พบว่า การใช้จุดต่อรับแรงเฉือนสามารถพัฒนาพฤติกรรมคอมโพสิตของคานเสริมกำลังจนกระทั่งคานเกิดการวิบัติได้ และ Wojtczak, Rucka และ Knak [18] สนใจศึกษาการหลุดล่อนในวัสดุประสานของคานคอนกรีตล้วน (plain concrete beam) ที่เสริมกำลังด้วยการติดแผ่นเหล็กภายนอก



ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



ภาพที่ 2 หลักการคำนวณความต้านทานโมเมนต์ดัดบนหน้าตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง

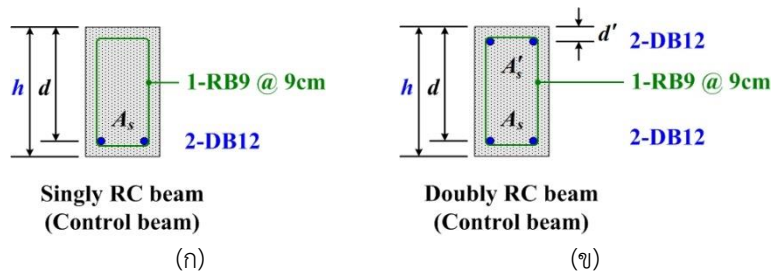
ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างคานทดสอบ

คาน	ประเภทคาน	กำลังอัดคอนกรีต (ksc)	การเสริมเหล็ก	ความหนาแผ่นเหล็ก (mm)
CB-1S	คานควบคุม	240	singly RC	-
SB-1S-3mm	คานเสริมกำลัง	240	singly RC	3
SB-1S-4mm	คานเสริมกำลัง	240	singly RC	4
CB-1D	คานควบคุม	240	doubly RC	-
SB-1D-3mm	คานเสริมกำลัง	240	doubly RC	3
SB-1D-4mm	คานเสริมกำลัง	240	doubly RC	4
CB-2S	คานควบคุม	280	singly RC	-
SB-2S-3mm	คานเสริมกำลัง	280	singly RC	3
SB-2S-4mm	คานเสริมกำลัง	280	singly RC	4
CB-2D	คานควบคุม	280	doubly RC	-
SB-2D-3mm	คานเสริมกำลัง	280	doubly RC	3
SB-2D-4mm	คานเสริมกำลัง	280	doubly RC	4

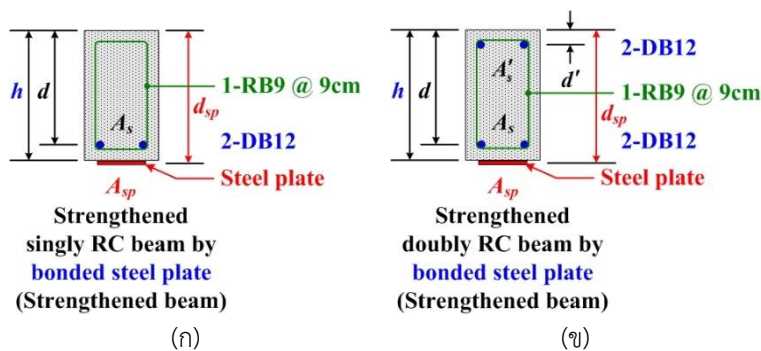
พฤติกรรมของคาน คสล ที่มีปริมาณของการเสริมเหล็กน้อย (under reinforcement) อยู่ภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำจากภายนอกสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ (Q) และการแอ่นตัว (δ) แบบ 3 เส้นตรง (tri-linear relationships) [2] ดังภาพที่ 1 ซึ่งแบ่งช่วงพฤติกรรมออกได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักดังนี้คือ (1) ขั้นตอนก่อนเกิดการแตกร้าว (2) ขั้นตอนหลังการแตกร้าวภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกใช้งานและ (3) ขั้นตอนภายหลังความสามารถในการใช้งานได้ สำหรับกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคาน คสล ที่เสริมกำลังด้วยการยึดติดแผ่นเหล็กสามารถคำนวณหาได้จาก

หลักการสมดุลของแรงกระทำบนหน้าตัดคานแล้วนำแรงที่กระทำมาหาค่าโมเมนต์ดัดรอบแกนใดแกนหนึ่ง ดังภาพที่ 2 โดยที่ M คือ ค่าโมเมนต์ดัดเดิมของคาน คสล และ ΔM คือ ค่าโมเมนต์ดัดที่เพิ่มขึ้นจากการเสริมกำลังของแผ่นเหล็ก

สำหรับการศึกษาวิจัยที่นำเสนอในบทความนี้สนใจศึกษาพฤติกรรมด้านความสามารถทางกำลังและการตอบสนองของคาน คสล ที่เสริมกำลังโดยการยึดติดแผ่นเหล็กด้วยวัสดุประสานอีพ็อกซีและรูปแบบของการวิบัติภายใต้การทดสอบการดัดแบบ 4 จุด และทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างคาน คสล ควบคุมและคานเสริมกำลัง



ภาพที่ 3 คานควบคุม (ก) คานเสริมเหล็กรับแรงดึงและ (ข) คานเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด



ภาพที่ 4 คานเสริมกำลัง (ก) คานเสริมเหล็กรับแรงดึงและ (ข) คานเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้

วัสดุ	ค่าระบุออกแบบ	ค่าจากการทดสอบวัสดุ
กำลังครากเหล็ก DB12	4000 ksc	5484 ksc
กำลังครากเหล็ก RB9	2400 ksc	3952 ksc
กำลังครากแผ่นเหล็กหนา 3 mm	2450 ksc	3015 ksc
กำลังครากแผ่นเหล็กหนา 4 mm	2450 ksc	3273 ksc
คอนกรีตกำลังอัด 240 ksc	240 ksc	259.58 ksc
คอนกรีตกำลังอัด 280 ksc	280 ksc	279.39 ksc

2. วิธีดำเนินการวิจัย

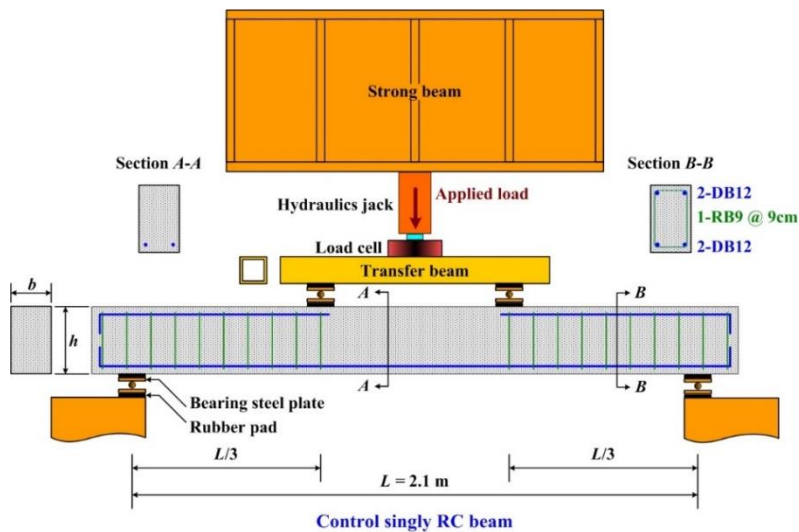
ตัวอย่างคานที่ใช้มีจำนวน 12 ตัวอย่าง โดยแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลักตามค่ากำลังอัดระบุของคอนกรีตรูปทรงกระบอก (compressive strengths) คือ 240 ksc และ 280 ksc ซึ่งในแต่ละกลุ่มมีประเภทการเสริมเหล็กที่แตกต่างกันคือ (1) เสริมเหล็กรับแรงดึง (singly RC beams) และ (2) เสริมเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัด (doubly RC beams) โดยคานทุกตัวมีหน้าตัดกว้าง (b) 15 cm ลึก (h) 25 cm

และยาว 2.4 m และมีความยาวช่วงพาดที่อยู่ระหว่างฐานรองรับ (L) คือ 2.1 m ส่วนเหล็กเสริมภายในคือ DB12 ชั้นคุณภาพ SD40 เหล็กปลอก RB9 ชั้นคุณภาพ SR24 สำหรับแผ่นเหล็กที่ซีมี 2 ความหนา (t) คือ 3 mm และ 4 mm มีความกว้าง (b_{sp}) 9 cm และชั้นคุณภาพ Fe24

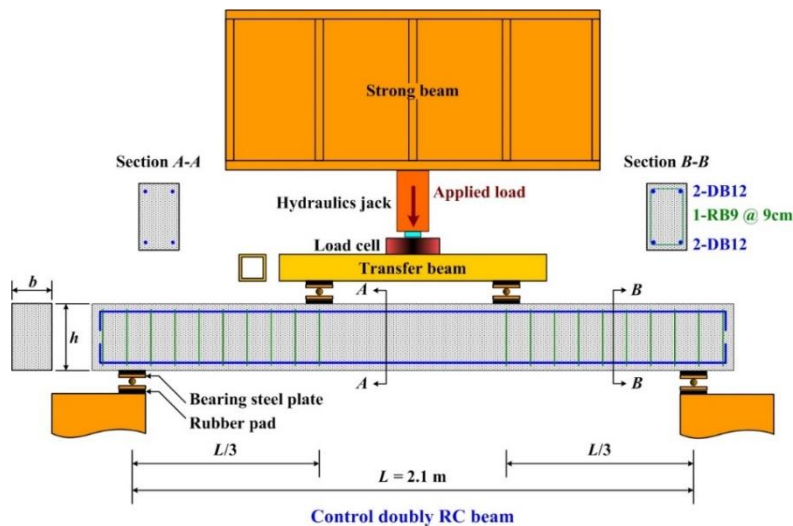
รายละเอียดของการเรียกชื่อสำหรับตัวอย่างคานทดสอบได้แสดงไว้ในตารางที่ 1 และรูปของหน้าตัดคานดังภาพที่ 3 และภาพที่ 4 สำหรับคานควบคุมและคานเสริมกำลัง ตามลำดับ ส่วนตารางที่ 2 แสดง

คุณสมบัติของวัสดุที่กำหนดค่าระบุในการคำนวณ ออกแบบและค่าที่ได้จากการทดสอบวัสดุ รูปแบบของการทดสอบตัวอย่างคานเป็นการให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำเป็นแบบจุดของการทดสอบการดัดแบบ 4 จุด โดยการใช้แม่แรงไฮดรอลิกสขนาด 30 ตัน กระทำลงบนคานถ่ายแรง (transfer beam) และส่งผ่านน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำลงบนคานทดสอบเป็น

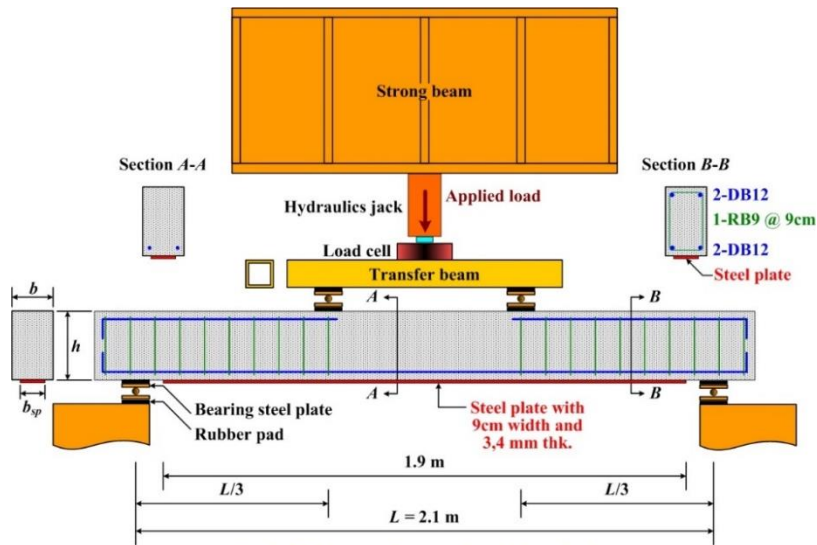
แบบ 2 จุด ดังภาพที่ 5 ถึง ภาพที่ 8 ส่วนภาพที่ 9 แสดงตำแหน่งของการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวของคานด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่แปรเปลี่ยนแบบเชิงเส้น (LVDTs) ใน 3 หน้าตัด โดยแต่ละหน้าตัดคานมีการตรวจวัดอยู่ 2 ตำแหน่งคือ ด้านหน้า (หน้า A) และด้านหลัง (หน้า B)



ภาพที่ 5 รูปแบบการให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำบนคานควบคุมเสริมเหล็กกับแรงดึง

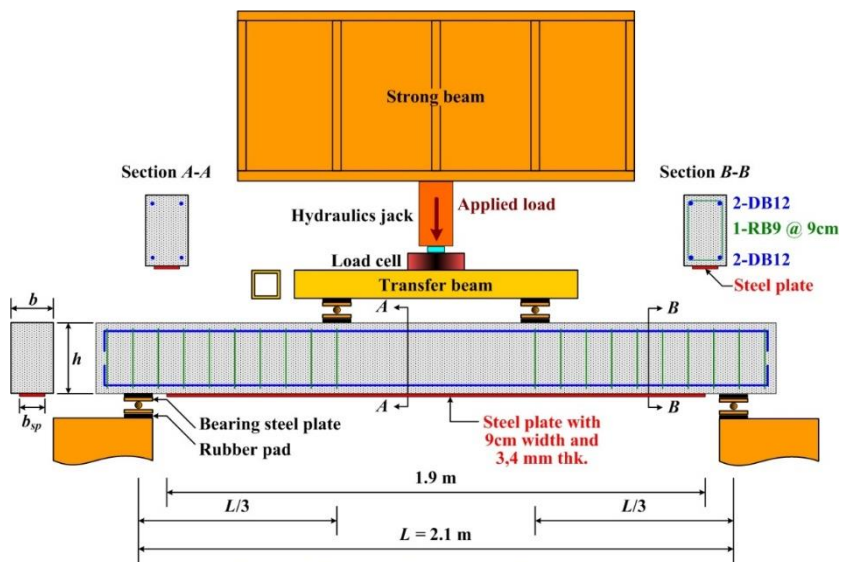


ภาพที่ 6 รูปแบบการให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำบนคานควบคุมเสริมเหล็กกับแรงดึงและแรงอัด



Singly RC beam with epoxy bonded steel plate

ภาพที่ 7 รูปแบบการให้น้ำหนักบรรทุกกระทำบนคานเสริมกำลังที่เสริมเหล็กรับแรงดึง

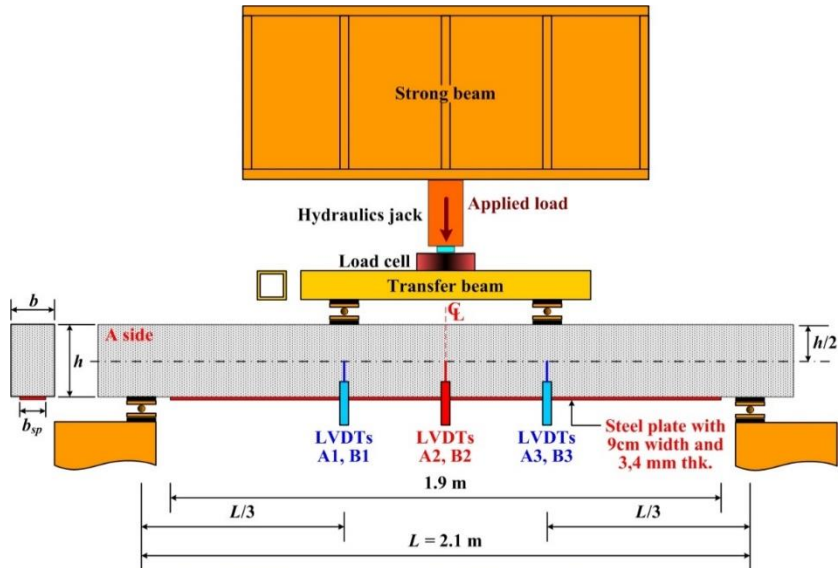


Doubly RC beam with epoxy bonded steel plate

ภาพที่ 8 รูปแบบการให้น้ำหนักบรรทุกกระทำบนคานเสริมกำลังที่เสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด

ภาพที่ 10 และภาพที่ 11 นั้นเป็นการแสดงตัวอย่างภาพถ่ายกรณีของคานควบคุม CB-1S ทั้งก่อนให้และหยุดให้น้ำหนักบรรทุกกระทำบนคาน ตัวอย่างทดสอบ ตามลำดับ ซึ่งเป็นคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงเพียงอย่างเดียวเท่านั้นและมีกำลังอัดระบุของคอนกรีตที่ใช้ 240 ksc ส่วนภาพที่ 12

และภาพที่ 13 เป็นตัวอย่างภาพถ่ายของคานเสริมกำลัง SB-1S-4mm ทั้งก่อนให้และหยุดให้น้ำหนักบรรทุกกระทำ ตามลำดับ ที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงเพียงอย่างเดียวและมีกำลังอัดระบุของคอนกรีต 240 ksc โดยคานมีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กความหนา 4 mm



Position of LVDTs measurement for RC beams with bonded steel plate

ภาพที่ 9 ตำแหน่งการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวของคานด้านหน้า (หน้า A) ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัด LVDTs



ภาพที่ 10 คาน CB-1S ก่อนให้น้ำหนักบรรทุกกระทำ



ภาพที่ 11 คาน CB-1S เมื่อหยุดให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ



ภาพที่ 12 คาน SB-1S-4mm ก่อนให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ



ภาพที่ 13 คาน SB-1S-4mm เมื่อหยุดให้น้ำหนักบรรทุกกระทำ

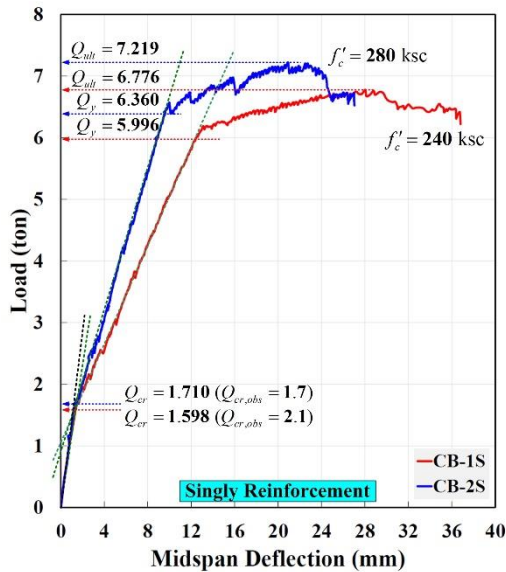
3. ผลการทดสอบ

จากการทดสอบตัวอย่างคานทั้ง 12 ตัวอย่าง จนกระทั่งคานเกิดการวิบัติสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกกระทำจากแม่แรงไฮดรอลิกส์ (Q) และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงพาด (δ) ของคานทดสอบที่ได้มาจากชุดอุปกรณ์รวบรวมข้อมูล (data acquisition) ของมาตรวัดแรง (load cell) และอุปกรณ์ตรวจวัดค่าการเคลื่อนที่ LVDTs

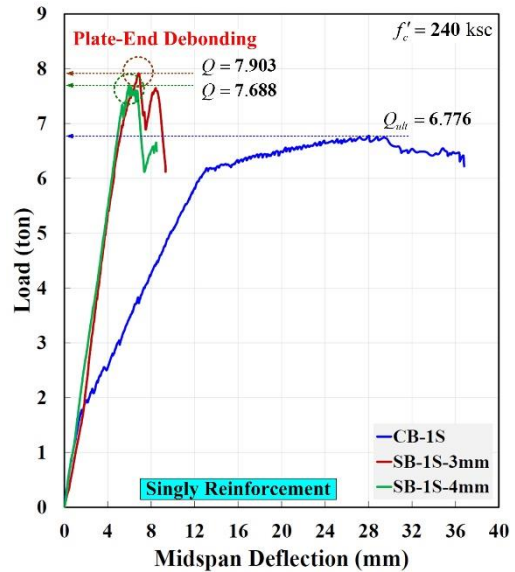
โดยค่าของการแอ่นตัวที่ได้เป็นการหามาจากค่าเฉลี่ยของการแอ่นตัวของตัวอย่างคานทดสอบที่ด้าน A และด้าน B ของคาน ดังแสดงในภาพที่ 14 และภาพที่ 15 สำหรับกรณีของคานควบคุมที่มีการเสริมเหล็กกับแรงดึงอย่างเดียวและของคานควบคุมที่มีการเสริมเหล็กกับแรงดึงร่วมกับเหล็กกับแรงอัดตามลำดับ โดยในแต่ละภาพนั้นมีผลของคานที่มีค่ากำลังอัดระบุของคอนกรีตที่ใช้คือ 240 ksc และ 280 ksc และได้มีการแสดงค่าของน้ำหนักบรรทุกทุกตัวคร่าวเริ่มแรก ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกครากและค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยที่ได้จากการพิจารณาผลของการ

ทดสอบตัวอย่างของคานจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกกระทำและค่าการแอ่นตัวในแบบ 3 เส้นตรง ดังที่แสดงไว้ในภาพที่ 1 ก่อนหน้านี้

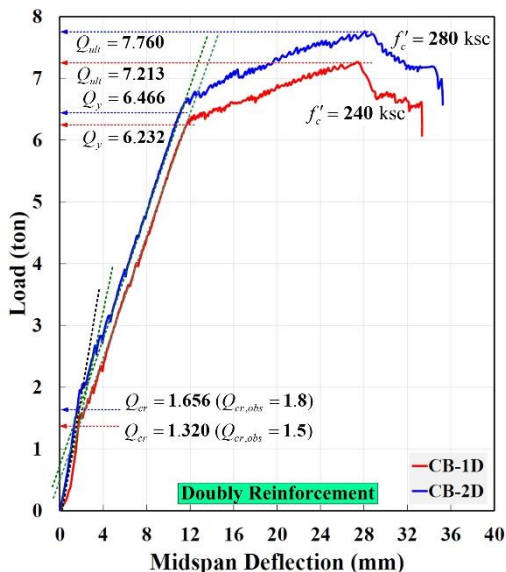
สำหรับภาพที่ 16 ถึงภาพที่ 19 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกกระทำและค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางช่วงพาดของตัวอย่างคานทดสอบต่างๆ ที่ได้จากคานควบคุมและคานเสริมกำลัง สังเกตได้ว่าค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนระหว่างแผ่นเหล็กและผิวของคอนกรีตที่ชั้นของวัสดุประสานในคานเสริมกำลังที่ยึดติดด้วยแผ่นเหล็กจากภายนอกซึ่งสามารถทำการพิจารณาหาได้ โดยที่เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกกระทำสูงสุดค่าหนึ่งและแผ่นเหล็กเกิดการหลุดล่อนทำให้ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากคานสูญเสียพฤติกรรมคอมโพสิตที่เกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด ภาพที่ 19 แสดงพฤติกรรมภายหลังการเกิดการหลุดล่อนของแผ่นเหล็ก เมื่อทำการให้น้ำหนักบรรทุกต่อไปอีก พบว่าคานเสริมกำลังที่ติดแผ่นเหล็กหนา 3 mm และ 4 mm มีพฤติกรรมคล้ายกับคาน คสล ที่ไม่เสริมกำลัง



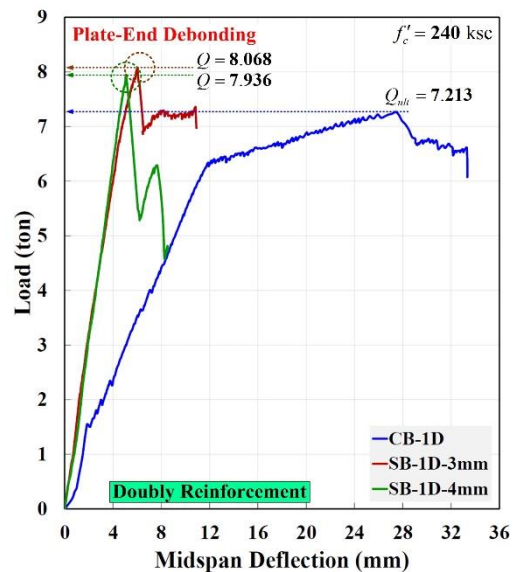
ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานควบคุม CB-1S และ CB-2S



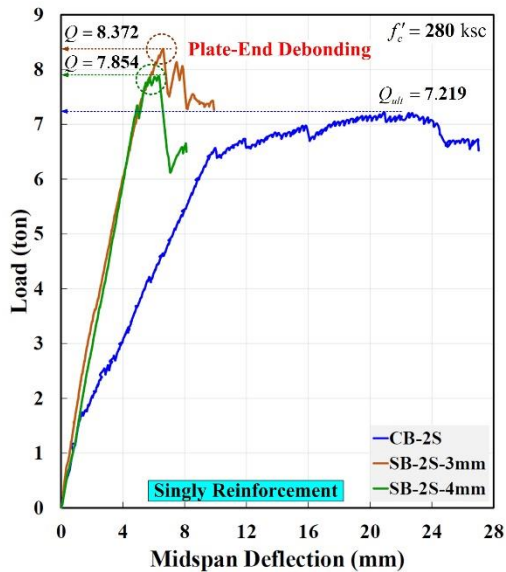
ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานควบคุม CB-1S และคานเสริมกำลัง SB-1S-3mm และ SB-1S-4mm



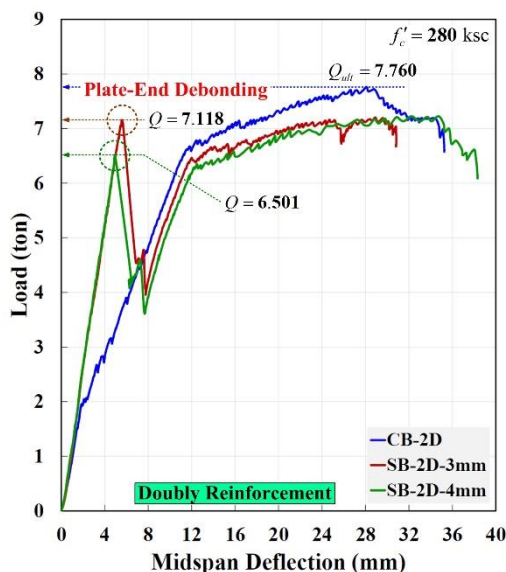
ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานควบคุม CB-1D และ CB-2D



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานควบคุม CB-1D และคานเสริมกำลัง SB-1D-3mm และ SB-1D-4mm



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานควบคุม CB-2S และคานเสริมกำลัง SB-2S-3mm และ SB-2S-4mm



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานควบคุม CB-2D และคานเสริมกำลัง SB-2D-3mm และ SB-2D-4mm

นอกจากนี้ยังสามารถทำการสังเกตเพิ่มเติมได้อีกว่า ค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานเสริมกำลังภายหลังจากเกิดการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กดังในภาพที่ 19 มีค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดไม่มากไปกว่าค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยสูงสุดของคานคอนกรีตควบคุม (CB-2D) ที่ไม่ได้เสริมกำลัง โดยที่คานเสริมกำลังยังปรากฏให้เห็นพฤติกรรมของคานเป็นแบบเหนียวจนกระทั่งคานเกิดการวิบัติจากการบดอัดแตกของคอนกรีตบริเวณหลังคานที่กึ่งกลางความยาวช่วงพาด

อย่างไรก็ดี เนื่องจากไม่ได้ทำการทดสอบโดยการให้น้ำหนักบรรทุกต่อไปอีกภายหลังจากที่คานเสริมกำลังมีการวิบัติจากการหลุดล่อนเกิดขึ้นดังในกรณีของคานเสริมกำลังตัวอย่างอื่นๆ ในภาพที่ 16 ถึงภาพที่ 18 ดังนั้น จึงไม่อาจทำการสรุปพฤติกรรมได้อย่างชัดเจนว่า ค่าน้ำหนักบรรทุกของคานเสริมกำลังเมื่อเกิดการวิบัติจากการบดอัดแตกของคอนกรีตที่หลังคานจะมีค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดไม่มากไปกว่าค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยสูงสุดของคานควบคุม แต่สามารถกล่าวได้ว่า คานเสริมกำลังจะมีแนวโน้มของการปรากฏพฤติกรรมเป็นแบบเหนียวให้เห็นหากยังคงให้น้ำหนักบรรทุกกระทำต่อไปอีกจนคานเสริมกำลังเกิดการวิบัติแบบบดอัดแตกของคอนกรีต ซึ่งค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้และประเภทของการเสริมเหล็ก (singly RC และ doubly RC) ในคานมีผลต่อพฤติกรรมภายหลังจากการหลุดล่อนของแผ่นเหล็ก

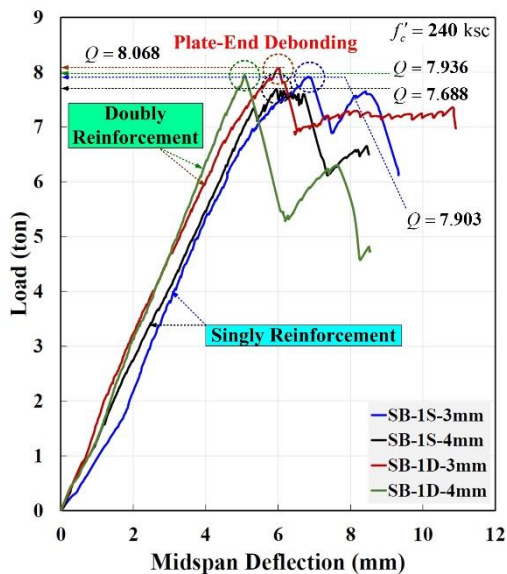
สำหรับภาพที่ 20 และภาพที่ 21 เป็นการแสดงภาพถ่ายตัวอย่างของการหลุดล่อนที่ปลายของแผ่นเหล็กในคานเสริมกำลัง SB-13-3mm และ SB-15-4mm ซึ่งคานเสริมกำลังในทุกตัวอย่างพบว่า มีการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กที่ปลายเพียงด้านใดด้านหนึ่งเท่านั้น โดยการหลุดล่อนเริ่มต้นเกิดขึ้นที่บริเวณปลายของแผ่นเหล็กตรงผิวสัมผัสระหว่างแผ่นเหล็กและผิวคอนกรีตและมีการแผ่ขยายในทิศทางพุ่งเข้าสู่กึ่งกลางความยาวคาน



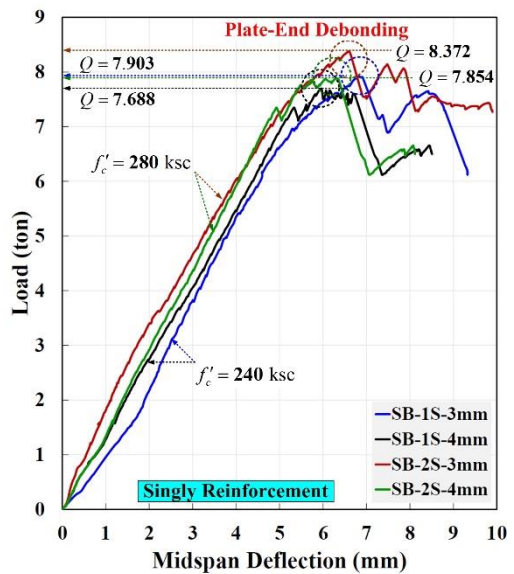
ภาพที่ 20 การหลุดล่อนที่ปลายแผ่นเหล็กของคานเสริมกำลัง SB-1S-3mm



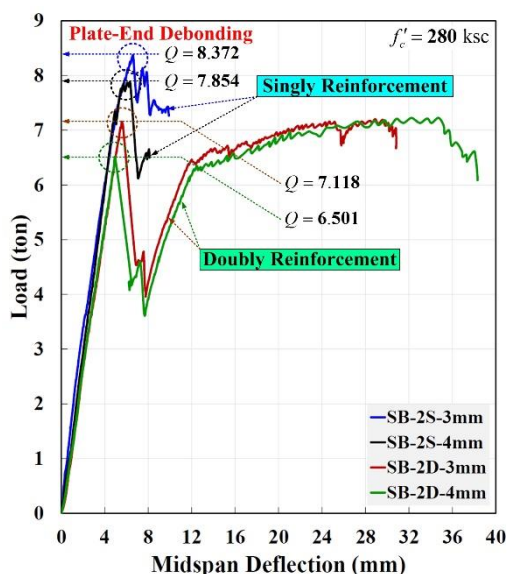
ภาพที่ 21 การหลุดล่อนที่ปลายแผ่นเหล็กของคานเสริมกำลัง SB-1S-4mm



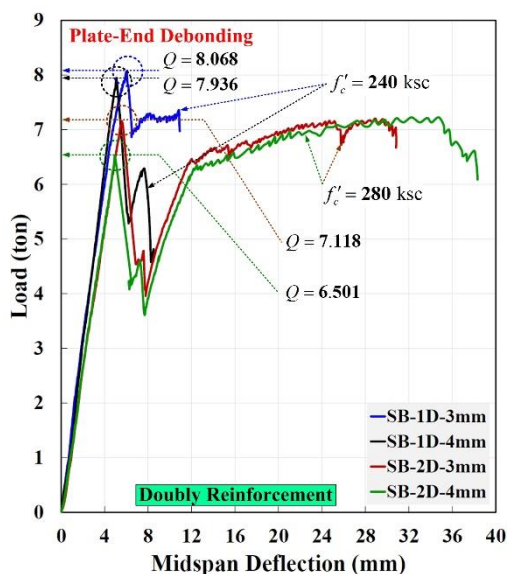
ภาพที่ 22 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำได้และการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคานเสริมกำลัง SB-1S-3mm, SB-1S-4mm, SB-1D-3mm และ SB-1D-4mm



ภาพที่ 24 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำได้และการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคานเสริมกำลัง SB-1S-3mm, SB-1S-4mm, SB-2D-3mm และ SB-2D-4mm



ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำได้และการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคานเสริมกำลัง SB-2S-3mm, SB-2S-4mm, SB-2D-3mm และ SB-2D-4mm



ภาพที่ 25 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำได้และการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคานเสริมกำลัง SB-1D-3mm, SB-1D-4mm, SB-2D-3mm และ SB-2D-4mm

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	6.776	2.372	2.185	1.630
SB-1S-3mm	7.917	2.771	3.828	3.026
SB-1S-4mm	7.688	2.691	4.503	3.465
CB-1D	7.213	2.525	1.922	1.402
SB-1D-3mm	8.068	2.824	3.409	2.994
SB-1D-4mm	7.936	2.778	4.681	3.497
CB-2S	7.219	2.527	2.202	1.649
SB-2S-3mm	8.372	2.930	3.873	3.084
SB-2S-4mm	7.883	2.759	4.566	3.539
CB-2D	7.760	2.716	1.921	1.401
SB-2D-3mm	7.203	2.521	3.409	2.994
SB-2D-4mm	7.225	2.529	4.681	3.497

$Q_{ult, test}$ คือ น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจากการทดสอบคาน

$M_{ult, test}$ คือ โมเมนต์ดัดประลัยจากการทดสอบคาน

$M_{ult, mat}$ คือ โมเมนต์ดัดประลัยจากค่าการทดสอบวัสดุ

$M_{ult, des}$ คือ โมเมนต์ดัดประลัยจากค่าระบุออกแบบ

4. อภิปรายผลการทดสอบ

การพิจารณาคานควบคุมในภาพที่ 14 และภาพที่ 15 พบว่า เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นทำให้คานน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับภาพที่ 16 ถึงภาพที่ 19 สามารถสังเกตได้ว่า คานน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเมื่อเกิดการหลุดล่อนของคานเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่มีความหนา 3 mm และ 4 mm มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่คานน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กความหนา 3 mm มีค่าสูงกว่าคานเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่มีความหนา 4 mm ในทุกกรณีของคานเสริมกำลังที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวและคานที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด แม้ว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มีค่าที่แตกต่างกัน

เพื่อเป็นการสะดวกในการวิเคราะห์ผลลัพท์จากการทดสอบและง่ายต่อการอภิปรายผลในภาพเฉพาะเจาะจงจึงได้ทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวของ

คานเสริมกำลังเพื่อใช้ในการพิจารณาคานน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนดังแสดงไว้ในภาพที่ 22 ถึงภาพที่ 25

โดยภาพที่ 22 เป็นการเปรียบเทียบในกรณีของคานเสริมกำลังมีการเสริมเหล็กกระหว่างเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวและเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัดที่มีความหนาของแผ่นเหล็กที่ใช้แตกต่างกันด้วยเมื่อคอนกรีตที่ใช้มีกำลังอัดระบุ 240 ksc ส่วนภาพที่ 23 เป็นของคอนกรีตที่มีกำลังอัดระบุ 280 ksc

สำหรับภาพที่ 24 และภาพที่ 25 เป็นการเปรียบเทียบคานน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนของคานเสริมกำลังที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีตที่ใช้และความหนาของแผ่นเหล็กที่ต่างกัน โดยภาพที่ 24 เป็นกรณีของคานเสริมกำลังที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว ส่วนภาพที่ 25 เป็นกรณีของคานเสริมกำลังที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด

ตารางที่ 4 น้ำหนักบรรทุกแตกร้าและโมเมนต์ดัดแตกร้า

คาน	$Q_{cr, test}$ (ton)	$M_{cr, test}$ (ton-m)	$M_{cr, mat}$ (ton-m)	$M_{cr, des}$ (ton-m)
CB-1S	2.1	1.470	0.536	0.517
SB-1S-3mm	2.1	1.470	0.641	0.623
SB-1S-4mm	3.1	2.170	0.676	0.657
CB-1D	1.5	1.050	0.523	0.533
SB-1D-3mm	2.5	1.750	0.660	0.641
SB-1D-4mm	2.4	1.680	0.695	0.677
CB-2S	1.7	1.190	0.556	0.558
SB-2S-3mm	2.4	1.680	0.665	0.672
SB-2S-4mm	2.4	1.680	0.701	0.710
CB-2D	1.8	1.260	0.573	0.576
SB-2D-3mm	2.6	1.820	0.685	0.693
SB-2D-4mm	2.7	1.890	0.721	0.731

$Q_{cr, test}$ คือ น้ำหนักบรรทุกแตกร้าสังเกตจากการทดสอบคาน

$M_{cr, test}$ คือ โมเมนต์ดัดแตกร้าสังเกตจากการทดสอบคาน

$M_{cr, mat}$ คือ โมเมนต์ดัดแตกร้าจากค่าการทดสอบวัสดุ

$M_{cr, des}$ คือ โมเมนต์ดัดแตกร้าจากค่าระบุออกแบบ

เมื่อพิจารณาภาพที่ 22 พบว่า ค่าของน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนให้ค่าใกล้เคียงกันสำหรับคอนกรีตที่มีกำลังอัดระบุ 240 ksc ดังนั้น ความแตกต่างของประเภทการเสริมเหล็กบนหน้าตัดคานไม่มีผลกระทบต่อน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อน แต่เมื่อกำลังอัดระบุของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 280 ksc ดังแสดงในภาพที่ 23 พบว่า สามารถเห็นความแตกต่างของน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยที่คานเสริมกำลังที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงอย่างเดียวให้ค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนที่สูงกว่าคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงและรับแรงอัด [10]

ผลกระทบของประเภทการเสริมเหล็กที่แตกต่างกันบนหน้าตัดของคานที่มีค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนได้แสดงไว้ในภาพที่ 24 และภาพที่ 25 สังเกตได้ว่า หน้าตัดคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงอย่างเดียวให้ค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนใกล้เคียงกันโดยไม่ขึ้นกับค่ากำลังอัดระบุของ

คอนกรีตดังในภาพที่ 24 แต่ให้ค่าที่แตกต่างกันมากขึ้นเมื่อหน้าตัดมีการเสริมเหล็กรับแรงดึงและเหล็กรับแรงอัดร่วมกันดังภาพที่ 25

สำหรับผลของความหนาของแผ่นเหล็กที่ใช้ในการเสริมกำลังที่มีผลกระทบต่อค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนพบว่า การใช้แผ่นเหล็กที่หนาจะทำให้ได้ค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนที่ต่ำกว่าการใช้แผ่นเหล็กที่บางในทุกกรณีโดยไม่ขึ้นกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตและประเภทของการเสริมเหล็กบนหน้าตัดคานดังในภาพที่ 22 ถึงภาพที่ 25 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า [8]

ตารางที่ 3 แสดงค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยที่ได้จากผลการทดสอบตัวอย่างคานและค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่ได้จากการทดสอบคาน จากการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้ค่ากำลังของวัสดุที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณโดยใช้ค่ากำลังระบุออกแบบตามตารางที่ 2 สำหรับตารางที่ 4 แสดงค่าของน้ำหนักบรรทุกแตกร้าและโมเมนต์ดัดแตกร้า

ตารางที่ 5 น้ำหนักบรรทุกต่างๆ จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอนตัว

คาน	Q_{cr} (ton)	Q_y (ton-m)	Q_{ult} (ton-m)	Q_{debond} (ton-m)
CB-1S	1.598	5.996	6.776	-
SB-1S-3mm	-	-	-	7.903
SB-1S-4mm	-	-	-	7.688
CB-1D	1.320	6.232	7.213	-
SB-1D-3mm	-	-	-	8.068
SB-1D-4mm	-	-	-	7.936
CB-2S	1.710	6.360	7.219	-
SB-2S-3mm	-	-	-	8.372
SB-2S-4mm	-	-	-	7.854
CB-2D	1.656	6.466	7.760	-
SB-2D-3mm	-	6.415	7.203	7.118
SB-2D-4mm	-	6.325	7.225	6.501

Q_{cr} คือ น้ำหนักบรรทุกแตกร้าว

Q_y คือ น้ำหนักบรรทุกคราก

Q_{ult} คือ น้ำหนักบรรทุกประลัย

Q_{debond} คือ น้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อน

จากตารางที่ 3 พบว่า ค่าโมเมนต์ดัดประลัยจากการทดสอบคานและค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่คำนวณจากค่าการทดสอบวัสดุให้ค่าสอดคล้องกันเป็นส่วนใหญ่ และเมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่คำนวณจากค่าการทดสอบวัสดุและค่าโมเมนต์ดัดประลัยจากค่าระบุออกแบบพบว่า ค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่คำนวณจากค่าการทดสอบวัสดุให้ค่าที่สูงกว่าในทุกกรณีของคาน

สำหรับค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าวที่แสดงไว้ในตารางที่ 4 พบว่า ค่าที่ได้จากการทดสอบคานให้ค่าสูงกว่าประมาณ 2-3 เท่า ของค่าที่ได้จากค่าการทดสอบวัสดุและจากค่าระบุออกแบบ โดยที่ค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าวจากค่าการทดสอบวัสดุและจากค่าระบุออกแบบให้ค่าใกล้เคียงกันมาก

ตารางที่ 5 แสดงค่าน้ำหนักบรรทุกแตกร้าว น้ำหนักบรรทุกครากและน้ำหนักบรรทุกประลัยของคานควบคุมและคาน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กสำหรับคานเสริมกำลัง สังเกตว่า ค่า

น้ำหนักบรรทุกครากและน้ำหนักบรรทุกประลัยในคาน SB-2D-3mm และ SB-2D-4mm มาจากการให้น้ำหนักบรรทุกกระทำเพิ่มเติมหลังจากคานเกิดการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กเพื่อศึกษาพฤติกรรมของคานเสริมกำลังภายหลังจากการวิบัติแบบหลุดล่อนโดยค่าต่างๆ ที่ได้แสดงไว้ในตารางนั้นได้มาจากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอนตัวของตัวอย่างคานทดสอบ

5. สรุป

จากการทดสอบตัวอย่างคานที่ใช้ในการศึกษาพบว่า คานควบคุมซึ่งเป็นคานคอนกรีตที่มีเหล็กเสริมปริมาณน้อยเกิดการวิบัติจากการบดอัดแตกของคอนกรีตและมีพฤติกรรมการวิบัติเป็นแบบเหนียวเนื่องจากเหล็กเสริมรับแรงดึงเกิดการคราก ส่วนคานที่มีการเสริมกำลังจากภายนอกโดยการยึดติดแผ่นเหล็กที่ผิวด้านรับแรงดึงของคอนกรีตด้วยวัสดุประสานอีพ็อกซี พบว่า เกิดการวิบัติจากการหลุด

ล่อนบริเวณปลายของแผ่นเหล็กในทุกตัวอย่างคานซึ่งเป็นการวิบัติแบบทันทีทันใดและคานมีพฤติกรรมเป็นแบบเปราะเพราะเหล็กเสริมรับแรงดึงไม่เกิดการครากโดยสังเกตได้จากค่าการแอ่นตัวของคานที่มีค่าน้อยเมื่อเกิดการหลุดล่อนของแผ่นเหล็ก ประเภของการเสริมเหล็กบนหน้าตัดคานไม่มีผลกระทบต่อคาน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนเมื่อใช้คอนกรีตที่มีกำลังอัดน้อย แต่เมื่อกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นพบว่า คานเสริมกำลังที่เสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวให้คาน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนที่สูงกว่าคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงร่วมกับเหล็กเสริมรับแรงอัด สำหรับผลของความหนาแผ่นเหล็กที่มีต่อคาน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนพบว่า การใช้แผ่นเหล็กที่บางให้คาน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนที่สูงกว่าการใช้แผ่นเหล็กที่หนาโดยไม่ขึ้นกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตและประเภของการเสริมเหล็กบนหน้าตัดคาน ดังนั้นการเสริมกำลังให้กับคานด้วยวิธีการนี้ควรพิจารณาผลของการวิบัติจากการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กเป็นประการสำคัญซึ่งทำให้ความสามารถในการต้านทานน้ำหนักบรรทุกภายนอกมีไม่เต็มประสิทธิภาพแม้ว่าคาน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานเสริมกำลังโดยส่วนใหญ่ให้ค่าที่สูงกว่าคานควบคุมแต่ไม่มากนักและมีการวิบัติแบบทันทีทันใดซึ่งเป็นการวิบัติที่ไม่พึงประสงค์ในมุมมองของความสามารถในการใช้งานได้ ในปัจจุบันนี้ การเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นและมีความสามารถในการเพิ่มการรับน้ำหนักบรรทุกให้กับคานที่สูง อย่างไรก็ตาม ปัญหาของการหลุดล่อนยังคงเป็นปัญหาหลักที่ต้องมีการพิจารณา [19,20]

6. อ้างอิง

- [1] Nilson AH, Winter G. Design of Concrete Structures. 11th ed. Singapore: McGraw-Hill Inc.; 1991.
- [2] Nawy EG. Reinforced Concrete: A fundamental Approach. 4th ed. New Jersey: Prentice Hall Inc.; 2000.
- [3] Reid ILK. Concrete Bridge Strengthening and Repair. London: Thomas Telford Ltd.; 2009.
- [4] Oehlers DJ, Bradford MA. Composite Steel and Concrete Structural Members: Fundamental Behaviour. Oxford: Elsevier Science Ltd.; 1995.
- [5] Holloway LC, Leeming MB. Strengthening of Reinforced Concrete Structures: Using Externally-Bonded FRP Composites in Structural and Civil Engineering. Cambridge: Woodhead Publishing; 2001.
- [6] Oehlers DJ, Seracino R. Design of FRP and Steel Plated RC Structures: Retrofitting Beams and Slabs for Strength, Stiffness and Ductility. Oxford: Elsevier Ltd.; 2004.
- [7] Jones R, Swamy RN, Ang TH. Under- and over-reinforced concrete beams with glued steel plates. Int J Cem Compos Lightweight Concr. 1982; 4: 19-32.
- [8] Eberline DK, Klaiber FW, Dunker K. Bridge strengthening with epoxy-bonded steel plates. Transp Res Rec. 1988; 1180: 7-11.
- [9] Oehlers DJ. Reinforced concrete beams with plates glued to their soffits. J Struct Eng. 1992; 118: 2023-38.
- [10] Ziraba YN, Baluch MH. Computational model for reinforced concrete beams strengthened by epoxy bonded steel plates. Finite Elem Anal Des. 1995; 20: 253-71.
- [11] Li A, Assih T, Delmas Y. Influence of the adhesive thickness and steel plate thickness on the behaviour of strengthened concrete beams. J Adhes Sci Technol. 2000; 14: 1639-56.

- [12] Teng JG, Yao J. Plate end debonding failures of FRP-or steel-plated RC beams: A new strength model. Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures, 2005 December 7-9, Hong Kong, 283-90, 2005.
- [13] Jumaat MZ, Alam MA. Experimental and analytical investigations on the structural behaviour of steel plate and CFRP laminate flexurally strengthened reinforced concrete beams. J Appl Sci. 2008; 8: 4383-9.
- [14] Chang X, Yan A, Tang C. Numerical simulation of mixed-mode crack induced failure of steel plate strengthened concrete beam. **Adv Mat Res.** 2011; 152-3: 171-4.
- [15] Ozbek E, Bocek M, Aykac S. Strengthening of RC beams with solid steel plates. Athens J Technol Eng. 2016; 3: 291-8.
- [16] Yannian Z, Jun X, Liu W. Experimental study on RC T-section beams strengthened with bottom steel plates. Jordan J Civ Eng. 2018; 12: 502-15.
- [17] Abtan YG. Effective length and area of bolted steel plates attached externally to strengthen reinforced concrete beams. IOP Conf Ser Mater Sci Eng. 2020; 737: 012012.
- [18] Wojtczak E, Rucka M, Knak M. Detection and Imaging of Debonding in Adhesive Joints of Concrete Beams Strengthened with Steel Plates Using Guided Waves and Weighted Root Mean Square. Materials. 2020; 13: 2167.
- [19] Thamrin R, Zaidir Z, Desharma S. Debonding failure analysis of reinforced concrete beams strengthened with CFRP plates. Polymers. 2021; 13: polym 13162738.
- [20] 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