

กรณีศึกษาของคานคอนกรีตเสริมเหล็กยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซี ที่มีสลักเกลียวฝังยึดบริเวณปลายและภายในช่วงคาน Study Cases of Steel Plate Epoxy Bonded Reinforced Concrete Beams with End and Intermediate Anchored Bolts

ณัตต์ศักดิ์ ธีระเกตุ¹ วิกร โตวราชพงศ์² ปฏิภาณ จันทรวชิต³ Damang Dy⁴ และ ยศ สมพรเจริญสุข^{5*}

^{1,2,5} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จ.กรุงเทพฯ

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ จ.กรุงเทพฯ

⁴ General Department of Immigration, Ministry of Interior, Phnom Penh, Cambodia

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

บทคัดย่อ

ข้อเสียประการหลักของการเสริมกำลังจากภายนอกในคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการยึดติดแผ่นเหล็กกับผิวหน้ารับแรงดึงของคานคอนกรีตคือการวิบัติแบบหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสภายในระหว่างแผ่นเหล็กและคานคอนกรีตที่นำไปสู่การสูญเสียพฤติกรรมคอมโพสิตอันเนื่องมาจากการเหนียวนำของแรงเฉือนและแรงลอกกระจายขนาดใหญ่ที่อาณาบริเวณเล็กๆ ใกล้กับปลายของแผ่นเหล็ก เพื่อหลีกเลี่ยงหรือป้องกันสถานการณ์ดังกล่าวถึงนี้ ผลลัพธ์ต่างๆ ที่พบในการทดลองเมื่อเพิ่มเติมการติดตั้งสลักเกลียวฝังยึดในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังโดยยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีได้มีการบ่งชี้ว่า การเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทั้งความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกและการอ่อนตัวของคานสามารถบรรลุเป็นผลสำเร็จได้ แต่กระนั้นก็ตาม การวิบัติจากการหลุดล่อนยังคงปรากฏอยู่ซึ่งสามารถสังเกตได้จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการอ่อนตัว ผลลัพธ์เชิงทดลองได้มีการแสดงให้เห็นอีกด้วยว่า การใช้ระบบสมอจับยึดด้วยสลักเกลียวสามารถป้องกันการเกิดขึ้นของการวิบัติจากการหลุดล่อนแบบสมบูรณ์อันเนื่องมาจากการลอกออกที่ปลายก่อนเวลากำหนดของแผ่นเหล็ก อีกทั้งยังเป็นการปรับปรุงสมรรถนะของคานเสริมกำลัง รูปแบบของการวิบัติเปลี่ยนจากรูปแบบเปราะสำหรับคานที่ไม่มีสมอจับยึดไปสู่รูปแบบเหนียวสำหรับคานที่มีสมอจับยึดซึ่งเป็นรูปแบบของการวิบัติที่ดี

คำสำคัญ: สลักเกลียวฝังยึด, พฤติกรรมคอมโพสิต, การเสริมกำลังจากภายนอก, การวิบัติแบบหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสภายใน, การลอกออกที่ปลายก่อนเวลากำหนด

Abstract

A main drawback of external strengthening in reinforced concrete beams by bonding steel plates to the concrete tension surface is the interfacial debonding failure between a steel plate and a concrete beam that leads to the loss of composite action. This is due to the induced large shear and peeling distributed forces at a small region near the ends of the steel plate. To avoid or prevent this mentioned situation, results which found in the experiments with an additional installation of the anchored bolts in the reinforced concrete beams strengthened by epoxy bonded steel plate have been indicated that a significant increase in both the load carrying capacity and

deflection of the beams can be achieved. Nevertheless, the failure by debonding is still occurred which can be observed from the load-deflection relationships. The experimental results have also been shown that the use of bolted anchorage system can prevent the occurrence of full debonding failure due to premature end peeling of the steel plate and also improves the performance of the strengthened beam. The mode of failure is changed from the brittle mode for beams without anchorage to the ductile mode for beams with anchorage, which is a good failure mode.

Keywords: anchored bolt, composite action, external strengthening, interfacial debonding failure, premature end peeling

1. บทนำ

จากคุณสมบัติของวัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริมซึ่งเป็นที่ทราบทั่วไปว่าคอนกรีตมีความสามารถในการรับแรงดึงที่ต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับการรับแรงอัด ส่วนเหล็กเสริมมีความสามารถในการรับแรงดึงและแรงอัดที่ดี [1] เมื่อนำวัสดุทั้งสองมารวมกันทำหน้าที่ด้านทานแรงกระทำภายนอกหรือที่เรียกว่า คอนกรีตเสริมเหล็ก (คสล) ในตำแหน่งที่เหมาะสมทำให้องค์อาคารคสล สามารถต้านทานแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ สิ่งสำคัญที่จำเป็นต้องพิจารณาคือ คอนกรีตเสริมเหล็กควรมีพฤติกรรมทางกลศาสตร์แบบคอมโพสิตหรือที่เรียกว่า พฤติกรรมคอมโพสิต (composite action) [2] เพื่อที่วัสดุจะมีความสามารถเชิงกำลังอย่างเต็มที่ในการต้านทานแรงกระทำโดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สอดคล้องระหว่างวัสดุทั้งสอง

เมื่อโครงสร้าง คสล อยู่ในสภาวะการใช้งานเป็นประจำและเป็นระยะเวลาอันยาวนานอาจเกิดความเสียหายหรือเกิดการเสื่อมสภาพจากสิ่งแวดล้อมรอบข้างได้ การบำรุงดูแลรักษาหรือการเสริมกำลังให้โครงสร้างจึงมีความจำเป็นเพื่อให้มีความสามารถในการใช้งานได้อย่างปลอดภัยในเชิงวิศวกรรม [3] การเสริมกำลังให้กับโครงสร้าง คสล โดยยึดติดแผ่นเหล็กที่ผิวด้านรับแรงดึงมีการประยุกต์ใช้มาตั้งแต่ช่วงต้นปี ค.ศ. 1960 [4] และมีการศึกษาวิจัยต่อเนื่องกันอย่างกว้างขวางดังที่ Eberline, Klaiber และ Dunker [4] ศึกษาการเสริมกำลังคานคานสะพาน คสล ที่ได้ทำการยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีพบว่า สามารถเพิ่มการรับน้ำหนักบรรทุกจรของคานได้และเพิ่มความแกร่งเชิงตัดโดยส่งผลให้รอยแตกกว้างและการอ่อนตัวลดลง

ต่อมา Hamoush และ Ahmad [5] ทำการศึกษาพฤติกรรมการเสริมกำลังในคานคอนกรีตล้นที่มีความเสียหายจากรอยร้าวตัดและศึกษารูปแบบการวิบัติเชิงตัดและการแยกตัวออกที่ผิวสัมผัสของแผ่นเหล็กพาราเมเตอร์ที่ศึกษาคือ ความหนาของแผ่นเหล็ก ความยาวและตำแหน่งของรอยร้าวและระดับของการจัดเตรียมพื้นผิวในการติดตั้งแผ่นเหล็ก หลังจากนั้น Oehlers [6] เสนอวิธีป้องกันการสูญเสียการยึดเกาะเนื่องจากแรงดึง แรงเฉือน และผลรวมของแรงทั้งสองพบว่า การลอก (peeling) ที่เกิดขึ้นแปรผันอย่างมีนัยสำคัญตามปฏิสัมพันธ์ระหว่างการหลุดล่อน (debonding) จากแรงเฉือนและแรงดึง

สำหรับการศึกษาผลการวิบัติจากการหลุดล่อนเชิงวิเคราะห์ทำโดย Zhang, Raouf และ Wood [7] ซึ่งศึกษาผลการทำนายการวิบัติจากการลอกที่ส่งผลให้เกิดการแยกตัวของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของคาน คสล เมื่อเสริมกำลังด้วยการติดแผ่นเหล็กโดยสร้างแบบจำลองเชิงทฤษฎีอย่างง่ายเพื่ออธิบายกลไกรูปแบบการวิบัติล่วงหน้าที่เหมาะสม

Li, Assih และ Delmas [8] ศึกษาความหนาของวัสดุประสานที่ใช้และความหนาของแผ่นเหล็กที่มีผลต่อพฤติกรรมการเสริมกำลังในคานคอนกรีตล้นด้วยการยึดติดแผ่นเหล็กที่ภายนอกคานพบว่า ค่าความเครียดเมื่อเกิดรอยร้าวแรกบริเวณกลางช่วงพาดคานจากการตัดไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามความหนาที่เพิ่มขึ้นของวัสดุประสานและในช่วงพฤติกรรมยืดหยุ่นพบว่า ค่าความเครียดในคอนกรีตและในแผ่นเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้นในอัตราที่เท่ากันและไม่แปรผันตามความหนาที่เพิ่มขึ้นของวัสดุประสาน ถัดมา Vaseghi Amiri และ Hosseinalibegie [9] ศึกษาเชิงทดลองของคาน คสล เสริมกำลังโดยใช้การยึดติดแผ่นเหล็กและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วเพื่อหาความสามารถเชิงตัดพบว่า กำลังประลัยมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ค่าความเหนียวลดลง ส่วนค่าน้ำหนักบรรทุกแรกเริ่มแรกมีค่าเพิ่มขึ้น Zhang, Ueda และ Furuuchi [10] ได้พัฒนาวิธีเชิงวิเคราะห์สำหรับทำนายผลการวิบัติจากการหลุดล่อนที่ทำให้เกิดการแยกตัวของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมในโครงสร้าง คสล เมื่อเสริมกำลังด้วยการยึดติดวัสดุเสริมกำลังประเภทต่างๆ

Ngidi และ Dundu [11] สนใจพฤติกรรมคาน คสล ที่เสริมกำลังด้วยการติดแผ่นเหล็กที่ผิวหน้าของคอนกรีตด้านรับแรงดึงพบว่า ค่าอัตราส่วนความกว้างต่อความหนาของแผ่นเหล็กที่ใช้ส่งผลต่อพฤติกรรมแบบเหนียวของคาน เสริมกำลัง Tarigan, Patra และ Sitorus [12] ศึกษาและเปรียบเทียบค่ากำลังประลัยของการเสริมกำลังคาน คสล ที่ยึดติดด้วยแผ่นเหล็ก แผ่น CFRP และแผ่น GFRP ระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบและจากทฤษฎี

Abtan [13] ศึกษาการหาพื้นที่หน้าตัดมากที่สุดของแผ่นเหล็กที่ทำให้คานมีพฤติกรรมเป็นแบบเหนียวและหาความยาวน้อยที่สุดของแผ่นเหล็กที่ไม่เกิดการสูญเสียปฏิสัมพันธ์ระหว่างคอนกรีตและแผ่นเหล็กโดยคานเสริมกำลังเกิดการวิบัติแบบเหนียวโดยปราศจากการแยกตัวของปลายแผ่นเหล็กออกจากผิวคอนกรีตหรือเกิดการเฉือนขาดของสลักเกลียว ไม่นานมานี้ Wojtczak, Rucka และ Knak [14] ศึกษาผลการหลุดล่อนของวัสดุประสานในคานคอนกรีตล้นเมื่อเสริมกำลังด้วยการยึดติดแผ่นเหล็กพบว่า ด้วยเทคนิคการใช้วิธีการคลื่นนำทาง (guided waves) สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวินิจฉัยแบบไม่ทำลายเพื่อทำการตรวจสอบรอยต่อประสานระหว่างคอนกรีตและแผ่นเหล็กได้

สำหรับบทความนี้มุ่งเน้นศึกษาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคาน คสล ที่เสริมกำลังโดยการติดแผ่นเหล็กจากภายนอกด้วยอีพ็อกซีและมีการป้องกันการวิบัติจากการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กด้วยการติดตั้งสลักเกลียวฝังยึดแผ่นเหล็กเพิ่มเติมภายในช่วงการเฉือนของคาน

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-3mm-V	คานเสริมกำลัง	240	singly RC	3
CB-1D	คานควบคุม	240	doubly RC	-
SB-1D-3mm	คานเสริมกำลัง	240	doubly RC	3
SB-1D-3mm-V	คานเสริมกำลัง	240	doubly RC	3
CB-2S	คานควบคุม	280	singly RC	-
SB-2S-3mm	คานเสริมกำลัง	280	singly RC	3
SB-2S-3mm-V	คานเสริมกำลัง	280	singly RC	3
CB-2D	คานควบคุม	280	doubly RC	-
SB-2D-3mm	คานเสริมกำลัง	280	doubly RC	3
SB-2D-3mm-V	คานเสริมกำลัง	280	doubly RC	3

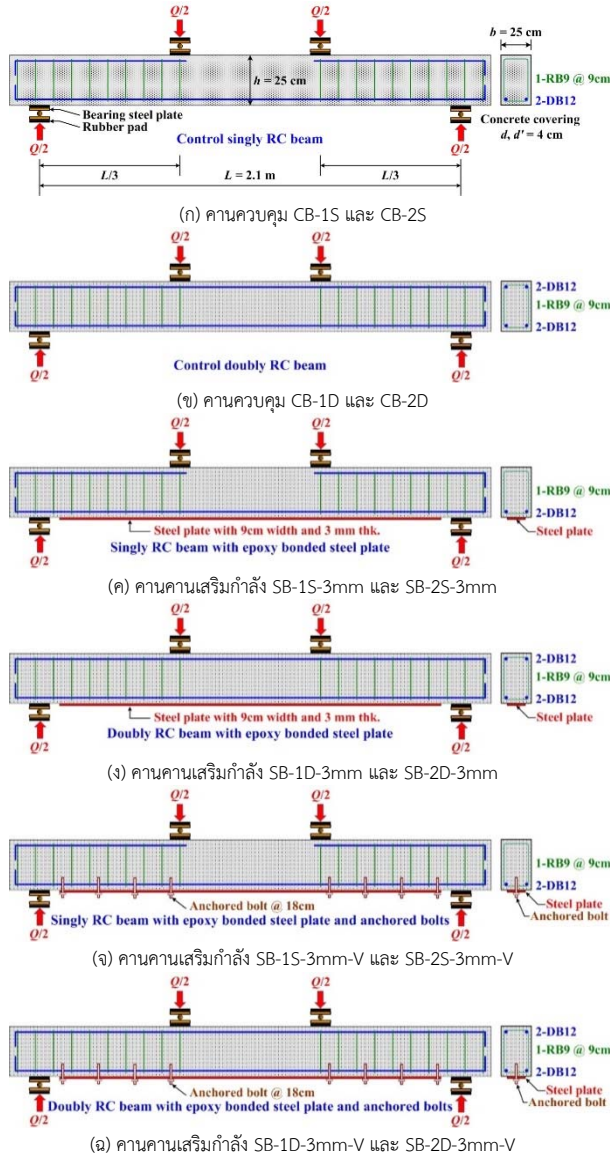
ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้

วัสดุ	ค่าระบุออกแบบ	ค่าจากการทดสอบวัสดุ
กำลังครากเหล็ก DB12	4000 ksc	5484 ksc
กำลังครากเหล็ก RB9	2400 ksc	3952 ksc
กำลังครากแผ่นเหล็กหนา 3 mm	2450 ksc	3015 ksc
กำลังเส้นสลักเกลียว 10 mm dia.	1050 ksc	2766 ksc
กำลังอัตราคอนกรีต 240 ksc	240 ksc	259.58 ksc
กำลังอัตราคอนกรีต 280 ksc	280 ksc	279.39 ksc

2. วิธีดำเนินการศึกษา

แผนการศึกษาวิจัยดำเนินการโดยจัดเตรียมคานทดสอบจำนวน 12 ตัวอย่าง ซึ่งเป็นการหล่อคานในที่ใช้คอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดให้มีค่ากำลังอัดระบุของคอนกรีตรูปทรงกระบอกเท่ากับ 240 ksc และ 280 ksc คานมีขนาดหน้าตัดกว้าง (b) 15 cm ลึก (h) 25 cm ยาว 2.4 m และมีความยาวช่วงพาดระหว่างฐานรองรับ (L) คือ 2.1 m เหล็กเสริมภายในรับโมเมนต์ตัดเป็นเหล็กชั้นคุณภาพ SD40 และเหล็กปลอกรับแรงเฉือนชั้นคุณภาพ SR24 แผ่นเหล็กเสริมกำลังที่ใช้มีความหนา (t) 3 mm กว้าง (b_{sp}) 9 cm ยาว 1.9 m และมีชั้นคุณภาพ Fe24 ส่วนสลักเกลียวจับยึดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 สำหรับรายละเอียดคานทดสอบและคุณสมบัติของวัสดุ ตามลำดับ รูปที่ 1 ได้แสดงรายละเอียดของหน้าตัดคานและการเสริมเหล็กรวมทั้งแสดงรูปแบบการทดสอบคานโดยให้น้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นแบบจุดตามการทดสอบมาตรฐานของการคานแบบ 4 จุด ผ่านการให้แรงกระทำจากแม่แรงไฮดรอลิกขนาด 30 ตัน ลงบนคานส่งถ่ายแรง (transfer beam) และส่งผ่านน้ำหนักบรรทุกลงบนคานทดสอบเป็นแบบ 2 จุด จากรูปสังเกตว่า ไม่มีการเสริมเหล็กปลอกบริเวณกลางช่วงคานเนื่องจากต้องการหาความสามารถเชิงตัดของหน้าตัด

สำหรับการตรวจวัดค่าน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อคานตัวอย่างทดสอบใช้อุปกรณ์มาตรวัดแรง (load cell) และในการตรวจวัดค่าการอ่อนตัวของคานใช้อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่แปรเปลี่ยนแบบเชิงเส้น (LVDTs) โดยได้ทำการตรวจวัดที่กึ่งกลางความลึกของคานใน 3 หน้าตัด คือ หน้าตัดกึ่งกลางความยาวคานและหน้าตัดที่อยู่ภายใต้หน้าหนักบรรทุกกระทำทางซ้ายและทางขวา ซึ่งในแต่ละหน้าตัดคานได้มีการตรวจวัดค่าอยู่ 2 ตำแหน่งคือ ด้านหน้า (หน้า A) และด้านหลัง (หน้า B) ทั้งนี้ค่าที่ได้จากการตรวจวัดต่างๆ ได้มีการบันทึกและจัดเก็บรวบรวมไว้ด้วยชุดรวบรวมข้อมูล (data acquisition)



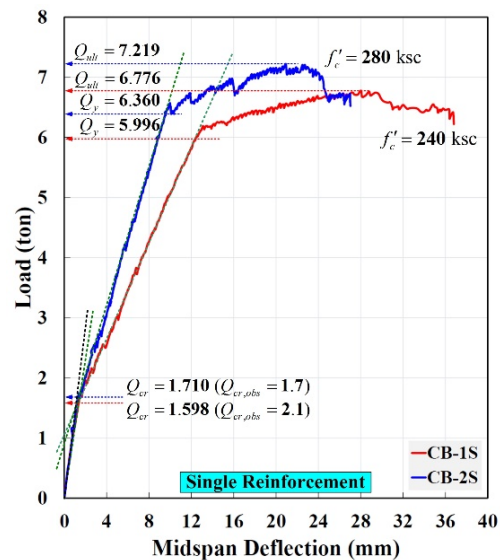
รูปที่ 1 หน้าตัดและน้ำหนักบรรทุกกระทำบนคานควบคุมและคานเสริมกำลัง

3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

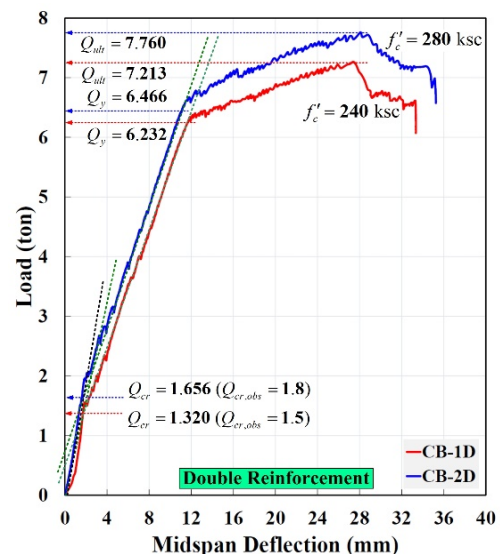
เมื่อทดสอบตัวอย่างคานจนกระทั่งเกิดการวิบัติสามารถนำข้อมูลตรวจวัดที่ได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำ (Q) และการแอ่นตัวที่กึ่งกลางความยาวคาน โดยค่าการแอ่นตัวหามาจากค่าเฉลี่ยของตัวอย่างคานที่ด้าน A และด้าน B รูปที่ 2 และ รูปที่ 3 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุมที่เสริมเหล็กกับแรงดึงอย่างเดี่ยวและเสริมเหล็กกับแรงดึงร่วมกับเหล็กกับแรงอัด ตามลำดับ โดยในรูปที่ 2 และ รูปที่ 3 ได้แสดงผลของคานที่มีกำลังอัดระบุคอนกรีต 240 ksc และ 280 ksc และระบุน้ำหนักบรรทุกแตกต่างกัน น้ำหนักบรรทุกครากและน้ำหนักบรรทุกประลัยเมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวในแบบ 3 เส้นตรง (trilinear model) [1] สำหรับรูปที่ 4 ถึง รูปที่ 7 แสดงถึงผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างคานควบคุมและคานเสริมกำลังเมื่อทำการพิจารณาผลของกำลังอัดระบุคอนกรีตและประเภทของการเสริมเหล็กบนหน้าตัดคาน จากรูปสามารถสังเกตเห็นได้ว่า คานเสริมกำลังโดยใช้แผ่นเหล็กยึดติดด้วยอีพ็อกซีอย่างเดียวมักมีการวิบัติจากการหลุดล่อนบริเวณปลายของแผ่นเหล็ก

แบบทันทีทันใดทำให้คานสูญเสียพฤติกรรมคอมโพสิตและส่งผลให้คานไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกต่อไปได้อีกดังแสดงในรูปที่ 4 ถึงรูปที่ 6 ส่วนรูปที่ 7 เมื่อแผ่นเหล็กเกิดการหลุดล่อนออกจากผิวคอนกรีตแล้วและได้ทำการทดลองโดยให้น้ำหนักกระทำบนคานเพิ่มขึ้นต่อไปอีกพบว่า คานเสริมกำลัง SB-2D-3mm มีพฤติกรรมคล้ายคลึงกับคานควบคุม CB-2D ดังรูป ทั้งนี้ได้มีการระบุค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนของแผ่นเหล็ก (Q) ไว้ในรูปเช่นกัน สำหรับคานเสริมกำลังที่มีการใช้สลักเกลียวจับยึดเพิ่มเติมพบว่า เมื่อเกิดการหลุดล่อนเพียงบางส่วนของแผ่นเหล็กแล้วคานยังคงสามารถพัฒนากำลังในการรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นได้อีกมาก

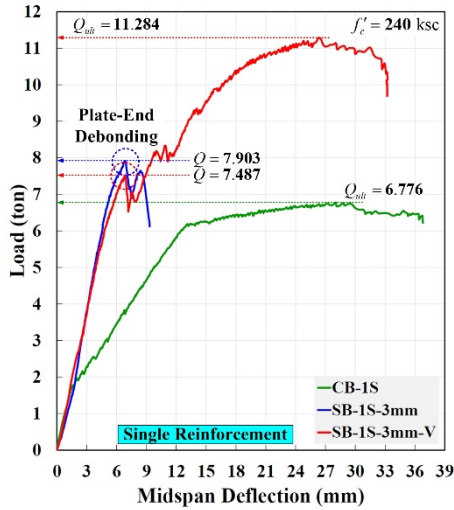
เพื่อเป็นการสะดวกและง่ายต่อการวิเคราะห์ผลสำหรับคานเสริมกำลังที่มีและไม่มีการใช้สลักเกลียวจับยึดเพิ่มเติมนอกเหนือไปจากการยึดติดแผ่นเหล็กด้วยวัสดุประสานอีพ็อกซีจึงได้จัดเตรียมและทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานไว้ดังรูปที่ 8 ถึงรูปที่ 11



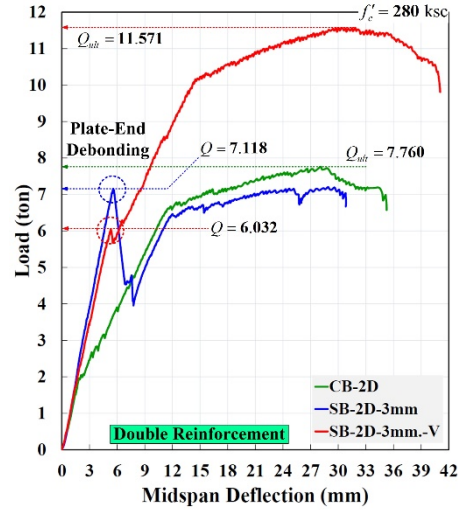
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุม CB-1S และ CB-2S ที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีต 240 ksc และ 280 ksc



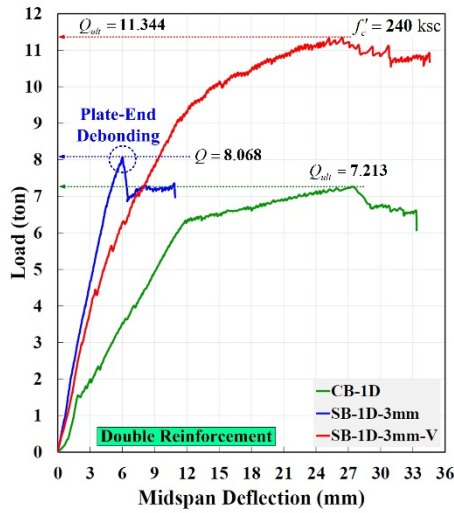
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุม CB-1D และ CB-2D ที่มีกำลังอัดระบุของคอนกรีต 240 ksc และ 280 ksc



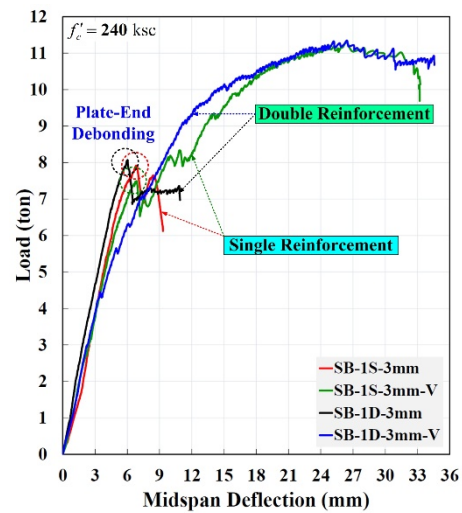
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุม CB-1S และคานเสริมกำลัง SB-1S-3mm และ SB-1S-3mm-V



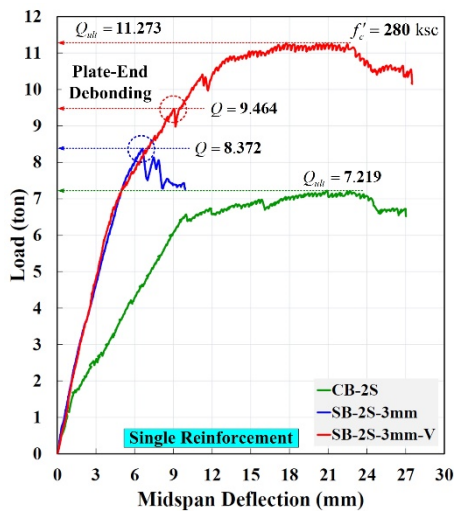
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุม CB-2D และคานเสริมกำลัง SB-2D-3mm และ SB-2D-3mm-V



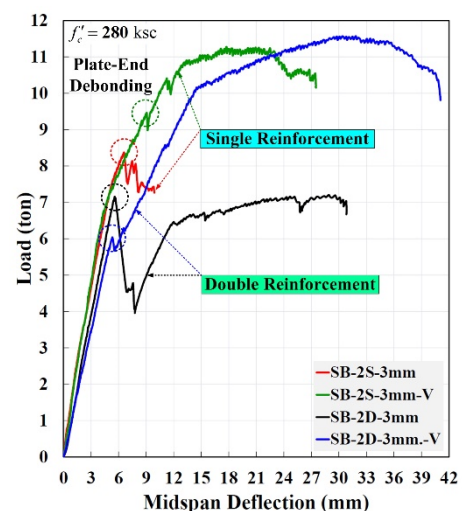
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุม CB-1D และคานเสริมกำลัง SB-1D-3mm และ SB-1D-3mm-V



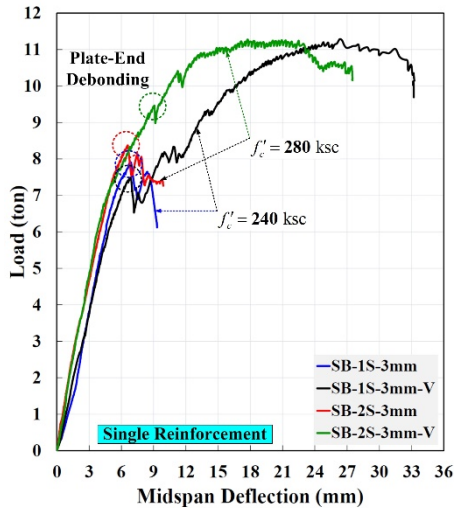
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานเสริมกำลัง SB-1S-3mm, SB-1S-3mm-V, SB-1D-3mm และ SB-1D-3mm-V



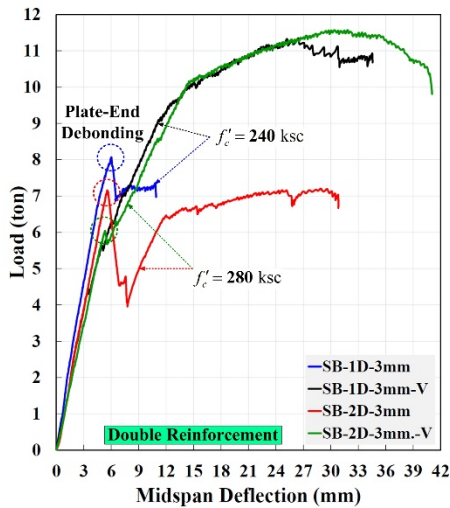
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุม CB-2S และคานเสริมกำลัง SB-2S-3mm และ SB-2S-3mm-V



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานเสริมกำลัง SB-2S-3mm, SB-2S-3mm-V, SB-2D-3mm และ SB-2D-3mm-V



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการอ่อนตัวของคานเสริมกำลัง SB-1S-3mm, SB-1S-3mm-V, SB-2S-3mm และ SB-2S-3mm-V



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการอ่อนตัวของคานเสริมกำลัง SB-1D-3mm, SB-1D-3mm-V, SB-2D-3mm และ SB-2D-3mm-V

จากรูปที่ 8 และ รูปที่ 9 เมื่อพิจารณาคานเสริมกำลังที่ยึดติดแผ่นเหล็กด้วยวิธีพ็อกซีเพียงอย่างเดียวสามารถสังเกตได้ว่า คานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงอย่างเดียวและคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัดให้คาน้ำหนักบรรทุกหลุดล่อนที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามพบว่า ความแตกต่างมีมากขึ้นเมื่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้มีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 9 จึงสรุปได้ว่า ผลของประเภทการเสริมเหล็กบนหน้าตัดคานมีผลกระทบต่อคาน้ำหนักบรรทุกหลุดล่อน ในส่วนของคานเสริมกำลังที่มีการยึดจับแผ่นเหล็กด้วยสลักเกลียวเพิ่มเติมพบว่า เมื่อเกิดการหลุดล่อนเพียงบางส่วนของแผ่นเหล็กออกไปจากผิวคอนกรีตแล้วคานยังคงมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มต่อไปได้อีกโดยที่คานมีพฤติกรรมเป็นแบบเหนียว ดังนั้นการเพิ่มการยึดด้วยสลักเกลียวมีข้อดีคือ เป็นการรักษาหรือคงไว้ซึ่งพฤติกรรมคอมโพสิตของคานเสริมกำลังและยังเป็นการป้องกันการสูญเสียความสามารถทางด้านกำลังอย่างสมบูรณ์ในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานสำหรับรูปที่ 10 และ รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดคอนกรีตที่แตกต่างกันที่ส่งผลกระทบท่อคานที่มีการเสริมเหล็กประเภทเดียวกัน

ตารางที่ 3 น้ำหนักบรรทุกประลัยและโมเมนต์ดัดประลัย

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-3mm-V	11.284	3.949	3.828	3.026
CB-1D	7.213	2.525	2.183	1.637
SB-1D-3mm	8.068	2.824	3.894	3.045
SB-1D-3mm-V	11.344	3.970	3.894	3.045
CB-2S	7.219	2.527	2.202	1.649
SB-2S-3mm	8.372	2.930	3.873	3.084
SB-2S-3mm-V	11.273	3.946	3.873	3.084
CB-2D	7.760	2.716	2.201	1.670
SB-2D-3mm	7.203	2.521	3.920	3.086
SB-2D-3mm-V	11.571	4.050	3.920	3.086

$Q_{ult, test}$ และ $M_{ult, test}$ คือน้ำหนักบรรทุกและโมเมนต์ดัดประลัยจากการทดสอบคาน
 $M_{ult, mat}$ และ $M_{ult, des}$ คือ โมเมนต์ดัดประลัยจากค่าการทดสอบวัสดุและค่าระบูกออกแบบ

ตารางที่ 4 น้ำหนักบรรทุกแตกร้าวและโมเมนต์ดัดแตกร้าว

คาน	$Q_{cr, test}$ (ton)	$M_{cr, test}$ (ton-m)	$M_{cr, mat}$ (ton-m)	$M_{cr, des}$ (ton-m)
CB-1S	2.1	0.735	0.536	0.517
SB-1S-3mm	2.1	0.735	0.641	0.623
SB-1S-3mm-V	2.3	0.805	0.641	0.623
CB-1D	1.5	0.525	0.523	0.533
SB-1D-3mm	2.5	0.875	0.660	0.641
SB-1D-3mm-V	2.6	0.910	0.660	0.641
CB-2S	1.7	0.595	0.556	0.558
SB-2S-3mm	2.4	0.840	0.665	0.672
SB-2S-3mm-V	2.6	0.910	0.665	0.672
CB-2D	1.8	0.630	0.573	0.576
SB-2D-3mm	2.6	0.910	0.685	0.693
SB-2D-3mm-V	2.8	0.980	0.685	0.693

$Q_{cr, test}$ และ $M_{cr, test}$ คือน้ำหนักบรรทุกและโมเมนต์แตกร้าวที่สังเกตจากการทดสอบ
 $M_{cr, mat}$ และ $M_{cr, des}$ คือ โมเมนต์ดัดแตกร้าวจากการทดสอบวัสดุ
 $M_{cr, des}$ คือ โมเมนต์ดัดแตกร้าวจากค่าระบูกออกแบบ

ตารางที่ 5 น้ำหนักบรรทุกต่างๆ จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการอ่อนตัว

คาน	Q_{cr} (ton)	Q_y (ton)	Q_{ult} (ton)	Q_{debond} (ton)
CB-1S	1.598	5.996	6.776	-
SB-1S-3mm	-	-	-	7.903
SB-1S-3mm-V	-	-	11.284	7.487
CB-1D	1.320	6.232	7.213	-
SB-1D-3mm	-	-	-	8.068
SB-1D-3mm-V	-	9.115	11.344	-
CB-2S	1.710	6.360	7.219	-
SB-2S-3mm	-	-	-	8.372
SB-2S-3mm-V	-	-	11.273	9.464
CB-2D	1.656	6.466	7.760	-
SB-2D-3mm	-	6.415	7.203	7.118
SB-2D-3mm-V	-	10.247	11.571	6.032

Q_{cr} คือน้ำหนักบรรทุกแตกร้าว; Q_y คือน้ำหนักบรรทุกคราก
 Q_{ult} คือน้ำหนักบรรทุกประลัย; Q_{debond} คือน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อน



รูปที่ 12 คานควบคุม CB-1S ก่อนให้น้ำหนักบรรทุกกระทำ



รูปที่ 17 คานเสริมกำลัง SB-1S-3mm-V เมื่อหยุดให้น้ำหนักบรรทุกกระทำ



รูปที่ 13 คานควบคุม CB-1S เมื่อหยุดให้น้ำหนักบรรทุกกระทำ



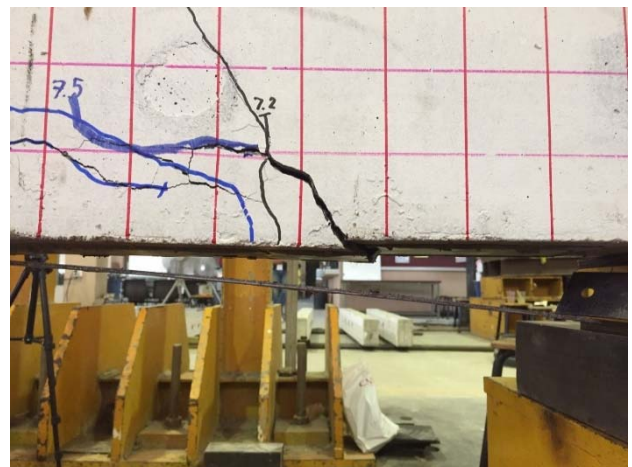
รูปที่ 14 คานเสริมกำลัง SB-1S-3mm ก่อนให้น้ำหนักบรรทุกกระทำ



รูปที่ 15 คานเสริมกำลัง SB-1S-3mm เมื่อหยุดให้น้ำหนักบรรทุกกระทำ



รูปที่ 16 คานเสริมกำลัง SB-1S-3mm-V ก่อนให้น้ำหนักบรรทุกกระทำ



รูปที่ 18 การหลุดล่อนของแผ่นเหล็กในคานเสริมกำลัง SB-1S-3mm

พิจารณาตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ซึ่งเป็นการสรุปค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยและโมเมนต์ดัดประลัยและค่าน้ำหนักบรรทุกแตกร้าวมอเมนต์ดัดแตกร้าวมอเมนต์ดัดของคานตัวอย่างทดสอบ ตามลำดับ ทั้งนี้ ค่าของ $M_{ult, test}$ และ $M_{cr, test}$ สามารถคำนวณได้จากสมดุลของแรง (force equilibrium) และแผนภาพโมเมนต์ดัด (bending moment diagram) ของคานตัวอย่างทดสอบภายใต้สภาวะการรับน้ำหนักบรรทุกนั้นๆ สำหรับค่า $M_{ult, mat}$ และ $M_{ult, des}$ คำนวณมาจากสมดุลของโมเมนต์ดัดบนหน้าตัดคาน คสล ด้วยวิธีกำลัง (strength method) [1] และคาน คสล ที่เสริมกำลังดัดจากภายนอกด้วยการยึดติดแผ่นเหล็กที่ผิวหน้าด้านรับแรงดึงของคอนกรีตโดยมีสมมติฐานว่าเกิดการครากในแผ่นเหล็ก [3] สำหรับค่าของ $M_{cr, mat}$ และ $M_{cr, des}$ สามารถคำนวณได้จากค่าโมดูลัสแตกหัก (modulus of rupture: f_r) ของคอนกรีตบนพื้นฐานของวิธีการแปลงหน้าตัดคาน (transformation of beam sections) [2] สำหรับตารางที่ 5 แสดงค่าน้ำหนักบรรทุกกระทำต่างๆ ที่ได้จากการตรวจวัดเมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการอ่อนตัวของคาน (load-deflection relationships) ทั้งนี้ ค่าโมเมนต์ดัดประลัยและโมเมนต์ดัดแตกร้าวมอเมนต์ดัดจากการคำนวณทางทฤษฎีที่แสดงไว้ในตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ได้จากการใช้ข้อมูลคุณสมบัติของวัสดุในตารางที่ 2

เมื่อพิจารณาตารางที่ 3 พบว่า ค่าโมเมนต์ดัดประลัยจากการทดสอบคานให้ค่าที่สูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณทั้งในกรณีของคานควบคุมและคานเสริมกำลัง ยกเว้นกรณีของคานเสริมกำลังที่ติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีเพียงอย่างเดียวเนื่องจากเกิดการหลุดล่อนของแผ่นเหล็ก ส่วนค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าวมอเมนต์ดัดจากการทดสอบคานให้ค่ามากกว่าประมาณ 1.0 ถึง 1.4 เท่าจากการคำนวณด้วยค่าระบอบแบบดังแสดงในตารางที่ 4



รูปที่ 19 การหลุดล่อนของแผ่นเหล็กในคานเสริมกำลัง SB-1D-3mm

สำหรับรูปที่ 12 ถึงรูปที่ 17 เป็นการแสดงตัวอย่างภาพถ่ายของคานทดสอบทั้งก่อนและหลังการรับน้ำหนักบรรทุกทุกในกรณีของคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว (singly RC) และมีกำลังอัดระบุงของคอนกรีต 240 ksc รูปที่ 18 และรูปที่ 19 แสดงถึงรูปแบบการวิบัติของคานเนื่องจากการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กออกจากผิวหน้าคอนกรีตด้านรับแรงดึงแบบทันทีทันใดของคาน SB-1S-3mm และคาน SB-1D-3mm ซึ่งเป็นการวิบัติแบบเปราะ การวิบัติลักษณะนี้มีการเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับคาน SB-2S-3mm และคาน SB-2D-3mm

4. บทสรุป

จากผลการทดสอบตัวอย่างคานและการอภิปรายผลสามารถสรุปได้ว่าคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่มีการยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีและเพิ่มการจับยึดด้วยสลักเกลียวบริเวณที่ปลายแผ่นเหล็กในช่วงการเขื่อน คานมีพฤติกรรมเป็นแบบเหนียวโดยที่เหล็กเสริมด้านรับแรงดึงและแผ่นเหล็กเกิดการครากทำให้การอ่อนตัวมากของคานทั้ง 2 ประเภท ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการอ่อนตัวของคาน ส่วนคานเสริมกำลังที่ติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีอย่างเดียวมีพฤติกรรมเป็นแบบเปราะเนื่องจากเกิดการหลุดล่อนที่ปลายของแผ่นเหล็กแบบทันทีทันใด ดังนั้นการติดตั้งการจับยึดบริเวณปลายของแผ่นเหล็กสามารถเพิ่มสมรรถนะของคานเสริมกำลังในด้านกำลังการรับน้ำหนักบรรทุกกระทำและการใช้งานได้เนื่องจากคานมีการอ่อนตัวได้มากกว่าก่อนเกิดการวิบัติจากการบดอัดแตกของคอนกรีต นอกจากนี้สามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบของการวิบัติจากแบบเปราะไปสู่การวิบัติแบบเหนียวและที่สำคัญคือ ปัญหาการวิบัติจากการหลุดล่อนบริเวณปลายแผ่นเหล็กเสริมกำลังที่ตรวจพบในการศึกษานี้สามารถเกิดขึ้นในกรณีของการเสริมกำลังจากภายนอกโดยทำการยึดติดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้ด้วยเช่นเดียวกัน

เอกสารอ้างอิง

[1] Nawy, E.G. (2000). *Reinforced Concrete: A Fundamental Approach*. 4th Ed. Prentice Hall Inc., New Jersey.
[2] Oehlers, D.J. and Bradford, M.A. (1999). *Elementary Behaviour of Composite Steel and Concrete Structural Members*. Butterworth-Heinemann, Oxford.
[3] Oehlers, D.J. and Seracino, R. (2004). *Design of FRP and Steel Plated RC Structures: Retrofitting Beams and Slabs for Strength, Stiffness and Ductility*. Elsevier Ltd, Oxford.

[4] Eberline, D.K., Klaiber, F.W. and Dunker, K. (1988). Bridge strengthening with epoxy-bonded steel plates. *Transportation Research Record*, 1180, pp. 7-11.
[5] Hamoush, S.A. and Ahmad, S.H. (1990). Static strength tests of steel plate strengthened concrete beams. *Materials and Structures*, 23, pp. 116-125.
[6] Oehlers, D.J. (1992). Reinforced concrete beams with plates glued to their soffits. *Journal of Structural Engineering*, 118, pp. 2023-2038.
[7] Zhang, S., Raoof, M. and Wood, L.A. (1995). Prediction of peeling failure of reinforced concrete beams with externally bonded steel plates. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 110, pp. 257-268.
[8] Li, A., Assih, T. and Delmas, Y. (2000). Influence of the adhesive thickness and steel plate thickness on the behaviour of strengthened concrete beams. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 14, pp. 1639-1656.
[9] Vaseghi Amiri, J. and Hosseinalibegie, M. (2004). Determination of ultimate flexural capacity of strengthened beams with steel plates and GFRP. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, 1-6 August, 2004, paper no. 3242.
[10] Zhang, D., Ueda, T. and Furuuchi, H. (2012). A design proposal for concrete cover separation in beams strengthened by various externally bonded tension reinforcements. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10, pp. 285-300.
[11] Ngidi, S.D. and Dundu, M. (2015). Repair of reinforced concrete beams with adhesive bonded steel plates. *Proceedings of the 14th International Conference on Structural and Geotechnical Engineering*, Cairo, Egypt, 20-22 December 2015.
[12] Tarigan, J., Patra, F.M. and Sitorus, T. (2018). Flexural strength using steel plate, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) on reinforced concrete beam in building technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 126, article no. 012025.
[13] Abtan, Y.G. (2020). Effective length and area of bolted steel plates attached externally to strengthen reinforced concrete beams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 737, article no. 012012.
[14] Wojtczak, E., Rucka, M. and Knak, M. (2020). Detection and Imaging of Debonding in Adhesive Joints of Concrete Beams Strengthened with Steel Plates Using Guided Waves and Weighted Root Mean Square. *Materials*, 13, article no. 2167.