

พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังโดยใช้แผ่นเหล็กยึดติด ด้วยอีพ็อกซีและสลักเกลียว

Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy Bonded and Bolted Steel Plates

ธนัตศักดิ์ ธีระเกตุ วิกร โตวรารพงศ์ ปาวริศ โปษะนันทน์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

เลขที่ 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

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

ปฏิกาน จันทวิชิต

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

ดังเป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปในงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่ก่อนหน้านี้ว่า ลำพังการใช้การยึดติดแผ่นเหล็กด้วยวัสดุประสานสำหรับการเสริมกำลังจากภายนอกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีประสิทธิภาพน้อยกว่าการใช้งานร่วมกันระหว่างการยึดติดแผ่นเหล็กและการจับยึดที่ปลายของแผ่นเหล็ก คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังโดยไม่มีการจับยึดที่ปลายแผ่นนั้นบ่อยครั้งสามารถนำไปสู่การวิบัติจากการหลุดล่อนแบบเปราะก่อนที่จะนำหน้าบรรทุกทุกประลัยจะไปถึง ด้วยการจัดเตรียมตัวจับยึด

ปลายแผ่นเชิงกลให้กับคานเสริมกำลังพบว่า รูปแบบการวิบัติกลายมาเป็นการวิบัติแบบเหนียวเชิงตัดและความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานเสริมกำลังเพิ่มขึ้น ความมุ่งหมายของการศึกษา ณ ปัจจุบันนั้นคือ เพื่อทวนสอบความมีประสิทธิภาพและสมรรถนะของคานและเพื่อนำเสนอพฤติกรรมการตอบสนองสำหรับการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดี่ยวยและเสริมเหล็กกับแรงดึงและแรงอัดที่มีสลักเกลียวจับยึดที่ปลายแผ่นและภายในแผ่น ผลลัพธ์เชิงทดลองที่ได้มาจากการนำเสนอสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุก

และการแอ่นตัวและความสามารถด้านกำลังต่างๆ ของคาน กล่าวคือ น้ำหนักบรรทุกแรกเริ่มแรก น้ำหนักบรรทุกคราก น้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนและน้ำหนักบรรทุกประลัย

คำสำคัญ: คานคอนกรีตเสริมเหล็ก สลักเกลียวฝังยึด การเสริมกำลัง การยึดติดแผ่นเหล็กจากภายนอก การวิบัติจากการหลุดล่อน ตัวจับยึดเชิงกล ความสามารถด้านกำลัง

ABSTRACT

As is generally acceptable in most of the previous published researches that only the use of adhesively bonded steel plates for external strengthening of reinforced concrete beams has less efficient than the combinations of bonding steel plate and anchoring of the ends of steel plate. The strengthened reinforced concrete beams with no plate-end anchoring can usually lead to brittle debonding failures before the ultimate load is reached. With providing the mechanical plate-end anchorage to the strengthened beams, it is found that the mode of failure becomes the flexural ductile failure and the load carrying capacity of strengthened beam is increased. The purposes of the present study are thus to reexamine the efficiency and performance of the beams, and to present the response behavior for both strengthening singly and doubly reinforced concrete beams having plate-end and intermediate anchored bolts. The obtained experimental results are dealt with for the load-deflection relationships, and the strength capacities of the beams, namely, initial cracking load, yielding load, debonding load, and ultimate load.

Keywords: Reinforced Concrete Beam, Anchored Bolt, Strengthening, Externally Bonded Steel Plate, Debonding Failure, Mechanical Anchorage, Strength Capacity

1. บทนำ

เมื่อพิจารณาการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) ซึ่งเป็นที่นิยมทั้งในและต่างประเทศเนื่องจากความคงทนและความมีประสิทธิภาพในการต้านทานแรงกระทำจากภายนอก [1] การเสื่อมถอยทางด้านกำลังเนื่องมาจากวัสดุที่ใช้ ความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการเกิดรอยร้าวที่อาจส่งผลให้โครงสร้างมี

ความปลอดภัยในการใช้งานจึงจำเป็นต้องมีการซ่อมแซมหรือเสริมกำลัง กรณีการเสริมกำลังให้โครงสร้าง ค.ส.ล. โดยใช้การยึดติดแผ่นเหล็กหรือวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP) ด้วยวัสดุประสานอีพ็อกซีเพิ่มเติมที่ภายนอกนั้นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาคือ การมีพฤติกรรมคอมโพสิตร่วมระหว่างองค์อาคารวัสดุเดิมและวัสดุใหม่ที่ใช้เสริมกำลังและผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง [2] ซึ่งส่งผลต่อความมีประสิทธิภาพของโครงสร้างเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะการใช้งาน ข้อดีสำหรับการเสริมกำลังด้วยวิธีการนี้คือ มีความสะดวกรวดเร็วและง่ายต่อการติดตั้ง [3] จึงเป็นที่นิยมใช้งานและประยุกต์กับคานสะพาน ค.ส.ล. ในทางปฏิบัติ [4] อีกทั้งได้รับความสนใจจากนักวิจัยและนักวิชาการทำให้มีการศึกษากันอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบัน

Jones, Swamy และ Ang [5] สนใจศึกษาพฤติกรรมด้านกำลังดัดและผลการเสียรูปร่างของคาน ค.ส.ล. ที่ยึดติดแผ่นเหล็กด้วยวัสดุประสานตรงบริเวณผิวหน้าคอนกรีตด้านรับแรงดึงเนื่องจากคานเสริมกำลังมีโอกาสบ่อยครั้งที่เกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด (sudden failure) โดยมีสาเหตุมาจากปัญหาการหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสระหว่างปลายแผ่นเหล็กและผิวคอนกรีต (plate-end debonding) หรือเกิดการแยกตัวออกของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม (concrete cover separation) ดังนั้น Vilnay [6] จึงนำเสนอวิธีการเชิงวิเคราะห์ในการหาปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างคอนกรีตและแผ่นเหล็กที่ยึดติดด้วยวัสดุประสานอีพ็อกซีและได้ทำการพิสูจน์หาสมการของการกระจายแรงเฉือนและแรงลอก (shearing and peeling forces) จากผลการศึกษาพบว่า ความเค้นเฉือนและความเค้นลอกมีค่ามากที่สุดบริเวณปลายของแผ่นเหล็ก เวลาต่อมา Oehlers [7] ได้ทำการศึกษาผลของการลอกอันเนื่องมาจากแรงเฉือนและหาความสัมพันธ์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างการลอกเฉือนและการลอกดัดในคาน ค.ส.ล. ที่ติดแผ่นเหล็กและได้เสนอวิธีการป้องกันการสูญเสียการยึดเกาะเนื่องจากแรงดัด แรงเฉือนและผลรวมของแรงทั้งสอง ถัดมา Gomes และ Appleton [8] นำเสนอวิธีการออกแบบในการเสริมกำลังของคาน ค.ส.ล. และเสา ค.ส.ล. ด้วยการเสริมเหล็กจากภายนอกรวมถึงได้เสนอแนะเกณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบ การวิเคราะห์และวิธีการประเมินกำลังต้านทานของโมเมนต์และแรงเฉือน หลังจากนั้น Sallam, Saba และคณะ [9] ได้แนะนำเทคนิคการป้องกันการวิบัติจากการลอกที่ปลายแผ่นเหล็กในคาน ค.ส.ล. ที่เสริมกำลัง โดยวิธีการที่ใช้มีอยู่ 2 วิธี คือ (1) ทำการแทนที่คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่ปลายแผ่นเหล็กโดยใช้ปูนเกร้าท์ (grout) และ (2) ใช้ระบบสมอยึดบีบอัดที่บริเวณปลายแผ่น

หลัก

Jumaat และ Alam [10] ศึกษาผลการเสริมกำลังของคาน ค.ส.ล. ที่มีการยึดติดแผ่นเหล็กหรือแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน โดยทำการติดตั้งสมอยึดที่บริเวณปลายและภายในของแผ่นเสริมกำลังเพื่อหลีกเลี่ยงการวิบัติล่วงหน้าก่อนกำหนด (premature failure) พบว่า คานเสริมกำลังให้ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยที่สูงเมื่อทำการเปรียบเทียบกับคานควบคุม Ngidi และ Dundu [11] ทำการศึกษาคาน ค.ส.ล. ที่เสริมกำลังด้วยการติดแผ่นเหล็กพบว่า ประสิทธิภาพของการเสริมกำลังขึ้นอยู่กับขั้นตอนในการจัดเตรียมพื้นผิวของคอนกรีตและแผ่นเหล็กเป็นสำคัญ รวมไปถึงวิธีการที่ใช้ยึดติดระหว่างคานเดิมและแผ่นเหล็ก ต่อมาไม่นาน Lotfy และ Elkamash [12] นำเสนอข้อมูลผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการเสริมกำลังคาน ค.ส.ล. ที่ยึดติดแผ่นเหล็กจากภายนอกโดยให้ความสนใจในรูปแบบการแตกร้าว การเสียรูปและกำลังประลัยพบว่า คานเสริมกำลังมีพฤติกรรมคอมโพสิตจนกระทั่งคานรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยจนเสียหาย หลังจากนั้น Tarigan, Patra และ Sitorus [13] ทำการหาค่ากำลังประลัยของคาน ค.ส.ล. ที่ยึดติดด้วยแผ่นเหล็ก แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) และแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) จากผลการทดสอบและผลการคำนวณทางทฤษฎีสามารถบ่งชี้ได้ว่า คานที่เสริมกำลังด้วยวัสดุทั้ง 3 ประเภทนี้ให้ค่ากำลังประลัยเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับคานอ้างอิงและได้ระบุว่า คานเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP เป็นทางเลือกที่ดีที่สุดในการเสริมกำลัง ในเวลาถัดมา Abtan [14] สนใจหาพื้นที่ของแผ่นเหล็กที่มากที่สุดโดยที่คานยังคงมีพฤติกรรมการวิบัติเป็นแบบเหนียวและทำการหาความยาวของแผ่นเหล็กที่สั้นที่สุดโดยที่คานไม่เกิดการสูญเสียปฏิสัมพันธ์ที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตและแผ่นเหล็กและเมื่อไม่นานมานี้ Tang, Peng และ Zhang [15] ศึกษาผลการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในที่เป็นสนิมที่ส่งผลต่อพฤติกรรมเชิงโครงสร้างของคานที่มีการเสริมกำลังจากภายนอกด้วยการยึดติดแผ่นเหล็กพบว่า รูปแบบของการวิบัติมีทั้งการวิบัติเนื่องจากผลของแรงดึงในแนวทแยง การวิบัติจากการดัดและการวิบัติจากการบดอัดแตกของคอนกรีตบริเวณฐานรองรับและเมื่อทำการพิจารณาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยและค่าความแข็งเกร็ง (rigidity) ของคานพบว่า มีการเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 39.44 และ 127.57 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับคานควบคุมตามลำดับ

สำหรับบทความนี้ให้ความสนใจศึกษาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคาน ค.ส.ล. ที่เสริมกำลังโดยการยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีและมีการใช้สลักเกลียวฝังยึดแผ่นเหล็กเพิ่มเติมภายในบริเวณช่วงการเหือนมากที่สุดและบริเวณโมเมนต์ดัดมากที่สุด

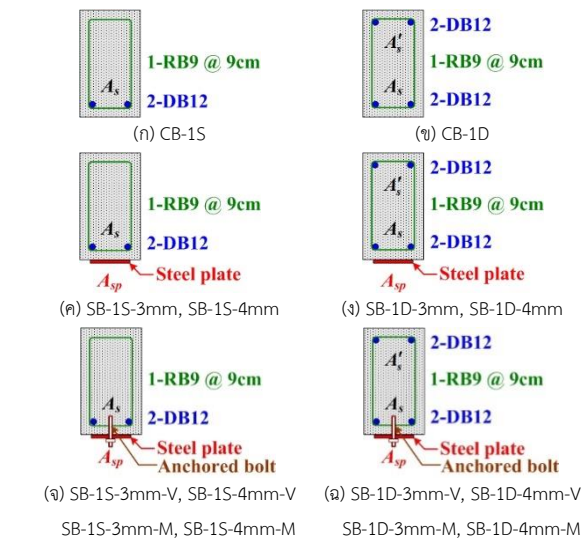
2. วิธีดำเนินการวิจัย

สำหรับแผนดำเนินการศึกษาวิจัยเริ่มต้นจากการจัดเตรียมชิ้นตัวอย่างคานทดสอบจำนวน 14 ตัวอย่าง โดยได้ทำการผูกเหล็กและหล่อคานในที่ (cast-in-situ) ตรงบริเวณหน้าโรงประลองและเลือกใช้คอนกรีตผสมเสร็จ (ready mixed concrete) ซึ่งกำหนดให้ค่ากำลังอัดระบุของคอนกรีตรูปทรงกระบอก (cylinder concrete nominal compressive strength) มีค่าเท่ากับ 240 กก./ซม.²

คานทดสอบทุกตัวอย่างมีขนาดของหน้าตัดคานโดยรวมเท่ากันหมดคือ มีความกว้าง (b) 15 ซม. ลึก (h) 25 ซม. และมีความยาว 2.4 ม. และเมื่อจัดวางคานบนฐานรองรับแบบง่าย (simple supports) แล้วมีความยาวของช่วงพาดระหว่างฐานรองรับทั้งสองข้าง (clear span length: L) เท่ากับ 2.1 ม. โดยสามารถจำแนกคานทดสอบออกได้เป็น 2 กลุ่มหลัก คือ (1) คานควบคุม (control beam) จำนวน 2 ตัวอย่าง ที่เป็นคานเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว (singly RC beam) และคานที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด (doubly RC beam) และ (2) คานเสริมกำลัง (strengthened beams) จำนวน 12 ตัวอย่าง ที่แบ่งเป็นคาน singly RC และ doubly RC อย่างละ 6 ตัวอย่าง

ส่วนรายละเอียดของการเสริมเหล็กเพื่อรับโมเมนต์ดัดที่เป็นเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรงอัดใช้เหล็กข้ออ้อย DB12 ชั้นคุณภาพ SD40 ส่วนเหล็กปลอกรับแรงเหวี่ยงใช้เหล็กผิวเรียบรัดรอบ RB9 ชั้นคุณภาพ SR24 สำหรับแผ่นเหล็กเสริมกำลังมี 2 ความหนา (t) คือ 3 มม. และ 4 มม. กว้าง (b_{sp}) 9 ซม. และยาว 1.9 ม. ชั้นคุณภาพ Fe24 ส่วนสลักเกลียวที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. ระยะฝัง 8 ซม. ดังรูปที่ 1

ในการยึดติดแผ่นเหล็กที่ผิวหน้าของคานคอนกรีตด้านที่รับแรงดึงใช้อีพ็อกซีที่ไซโครอปิก (Sikadur®-30) โดยมีชั้นความหนาของอีพ็อกซีที่ใช้ประมาณ 3 มม. สำหรับรายละเอียดข้อมูลและการเรียกชื่อของตัวอย่างคานทดสอบแสดงในตารางที่ 1 ส่วนตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาทดลองนี้ สำหรับรูปที่ 2 แสดงถึงรายละเอียดตามยาวของคานตัวอย่างทดสอบและรูปแบบ



รูปที่ 1 หน้าที่ัดคานควบคุม (ก) และ (ข) และหน้าที่ัดคานเสริมกำลัง (ค) (ง) (จ) และ (ฉ)

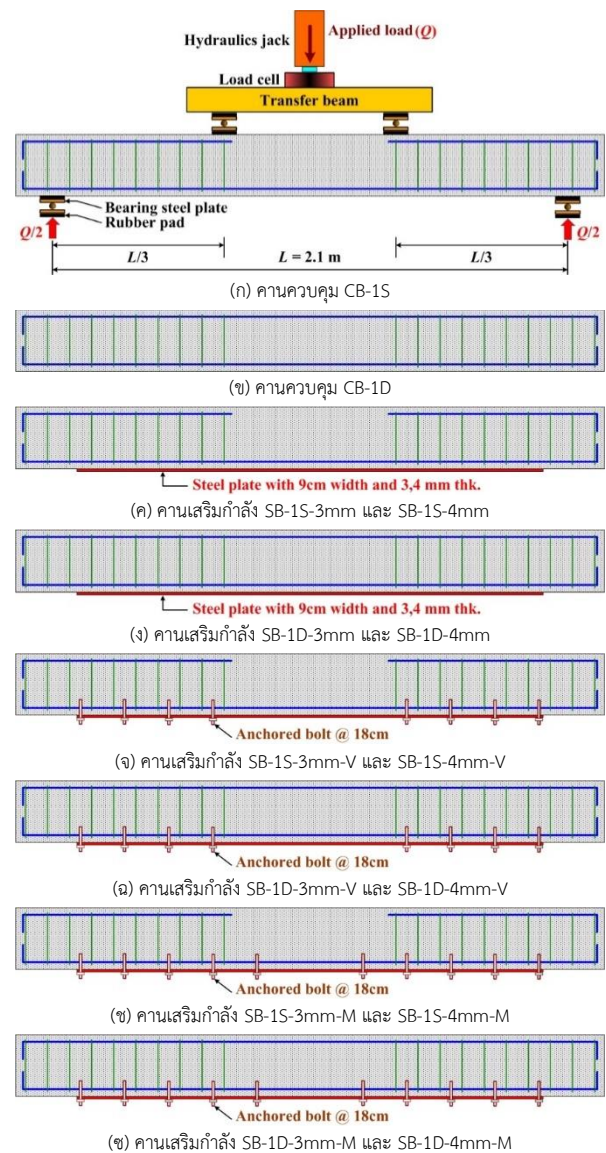
ของการทดสอบโดยเป็นการให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำเป็นแบบจุดตามวิธีการทดสอบมาตรฐานของการดัดแบบ 4 จุด (standard 4-point bending test)

ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างคานทดสอบ

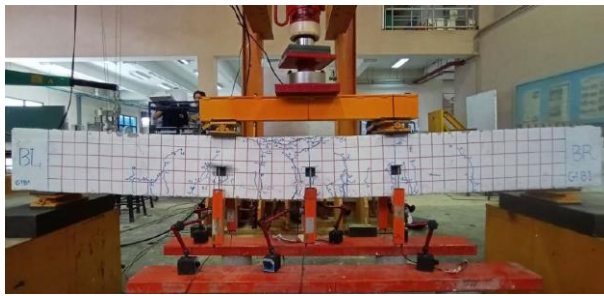
คาน	ประเภทคาน	กำลังอัดคอนกรีต (กก./ซม. ²)	การเสริมเหล็ก	ความหนาแผ่นเหล็ก (มม.)
CB-1S	คานควบคุม	240	singly RC	-
SB-1S-3mm	คานเสริมกำลัง	240	singly RC	3
SB-1S-4mm	คานเสริมกำลัง	240	singly RC	4
SB-1S-3mm-V	คานเสริมกำลัง	240	singly RC	3
SB-1S-4mm-V	คานเสริมกำลัง	240	singly RC	4
SB-1S-3mm-M	คานเสริมกำลัง	240	singly RC	3
SB-1S-4mm-M	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
SB-1D-3mm-V	คานเสริมกำลัง	240	doubly RC	3
SB-1D-4mm-V	คานเสริมกำลัง	240	doubly RC	4
SB-1D-3mm-M	คานเสริมกำลัง	240	doubly RC	3
SB-1D-4mm-M	คานเสริมกำลัง	240	doubly RC	4

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้

วัสดุ	ค่าระบุออกแบบ	ค่าจากการทดสอบวัสดุ
กำลังครากเหล็ก DB12	4000 กก./ซม. ²	5484 กก./ซม. ²
กำลังครากเหล็ก RB9	2400 กก./ซม. ²	3952 กก./ซม. ²
กำลังครากแผ่นเหล็กหนา 3 มม.	2450 กก./ซม. ²	3015 กก./ซม. ²
กำลังครากแผ่นเหล็กหนา 4 มม.	2450 กก./ซม. ²	3273 กก./ซม. ²
กำลังเชื่อมสลักเกลียว 12 มม. dia.	1050 กก./ซม. ²	2766 กก./ซม. ²
กำลังอัดระบุคอนกรีต 240 กก./ซม. ²	240 กก./ซม. ²	259.58 กก./ซม. ²



รูปที่ 2 รายละเอียดคานควบคุมและคานเสริมกำลังภายใต้การทดสอบการดัดแบบ 4 จุด มาตรฐาน



(ก) คานควบคุม CB-1S



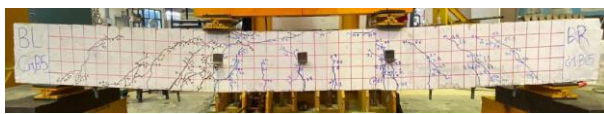
(ข) คานเสริมกำลัง SB-1S-3mm



(ค) คานเสริมกำลัง SB-1S-4mm



(ง) คานเสริมกำลัง SB-1S-3mm-V



(จ) คานเสริมกำลัง SB-1S-4mm-V



(ฉ) คานเสริมกำลัง SB-1S-3mm-M



(ช) คานเสริมกำลัง SB-1S-4mm-M

รูปที่ 3 ตัวอย่างคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่เสริมเหล็กกับแรงดึงอย่างเดียว

วิธีการให้น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำลงบนตัวอย่างคานทดสอบสามารถทำได้ด้วยการใช้กระบอกแม่แรงไฮดรอลิกส์ (hydraulics jack) ที่มีขนาด 30 ตัน ทำการกดลงบนคานส่งถ่ายแรง (transfer beam) และส่งผ่านน้ำหนักบรรทุกลงบนคานทดสอบเป็นแบบ 2 จุด (2-point loading) โดยมีตำแหน่งที่กดบนคานเท่ากับ 70 ซม. ที่วัดระยะห่างออกจากฐานรองรับทั้ง 2 ข้าง ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก)

การตรวจวัดขนาดของน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำและการตรวจวัด

ค่าการแอ่นตัวของคานทดสอบใช้อุปกรณ์มาตรวัดแรง (load cell) และอุปกรณ์ตรวจวัดค่าการเคลื่อนที่แปรเปลี่ยนแบบเชิงเส้น (linear variable differential transformer: LVDT) ตามลำดับ โดยค่าที่ทำการตรวจวัดได้ถูกบันทึกและจัดเก็บผ่านชุดรวบรวมข้อมูล (data acquisition)

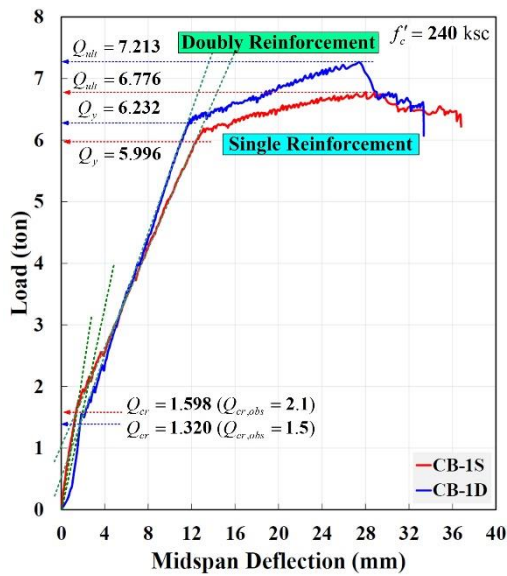
สำหรับการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวของคานได้มีการตรวจวัดที่กึ่งกลางความลึกของคานใน 3 หน้าตัดคือ บริเวณหน้าตัดของกึ่งกลางความยาวช่วงพาดคาน (midspan length) และหน้าตัดที่อยู่ภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำทางด้านซ้ายและทางด้านขวา ซึ่งในแต่ละหน้าตัดได้ทำการตรวจวัดอยู่ 2 ตำแหน่งคือ ด้านหน้า (หน้า A) และด้านหลัง (หน้า B)

3. ผลการทดสอบ

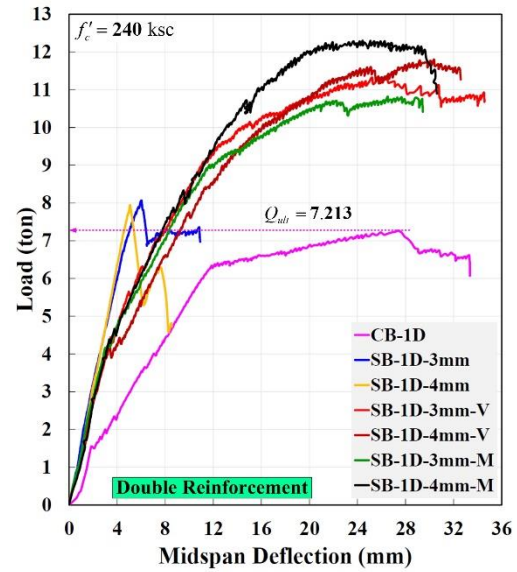
เมื่อทำการทดสอบคานตัวอย่างจนกระทั่งคานเกิดการวิบัติและไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำเพิ่มขึ้นต่อไปได้อีก จึงนำค่าการตรวจวัดที่ได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำและค่าการแอ่นตัว (load-deflection relationships) ของคาน ในที่นี้ ค่าการแอ่นตัวในความสัมพันธ์เป็นค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของคานที่หน้า A และหน้า B ของหน้าตัดคานบริเวณกึ่งกลางช่วงพาด รูปที่ 3 แสดงภาพถ่ายของตัวอย่างคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่มีการเสริมเหล็กกับแรงดึงอย่างเดียว (single reinforcement) ภายหลังเสร็จสิ้นการทดสอบ

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำและค่าการแอ่นตัวของคานควบคุมที่เสริมเหล็กกับแรงดึงอย่างเดียว (CB-1S) และเสริมเหล็กกับแรงดึงร่วมกับเหล็กกับแรงอัด (CB-1D) แสดงในรูปที่ 4 โดยมีการระบุค่าน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำเริ่มแรก (Q_{cr}) ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ (Q_y) และค่าน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำปลาย (Q_{ult}) ที่ได้จากจากการพิจารณาแบบจำลองความสัมพันธ์อย่างง่ายในแบบ 3 เส้นตรง (simplified tri-linear relation model) [1] และนอกจากนี้ยังได้มีการระบุค่าน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำเริ่มแรกที่ได้จากการสังเกตรอยร้าวแรกที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการทดสอบคานตัวอย่าง ($Q_{cr, obs}$) กำกับไว้ในรูปที่ 4

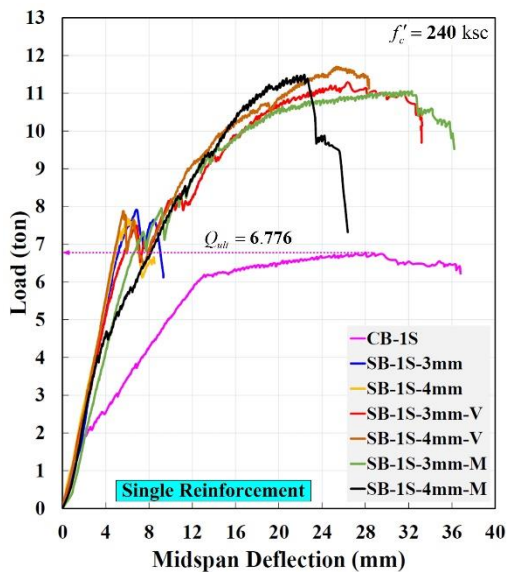
ส่วนรูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุมและคานเสริมกำลังเฉพาะคานตัวอย่างที่มีการเสริมเหล็กกับแรงดึงอย่างเดียว สำหรับในรูปที่ 6 เป็นกรณีของคานที่มีการเสริมเหล็กกับแรงดึงร่วมกับเหล็กกับแรงอัด



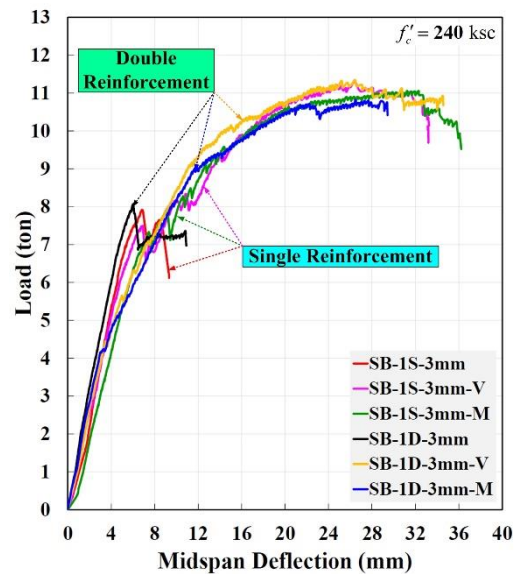
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุมที่เสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวและเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด



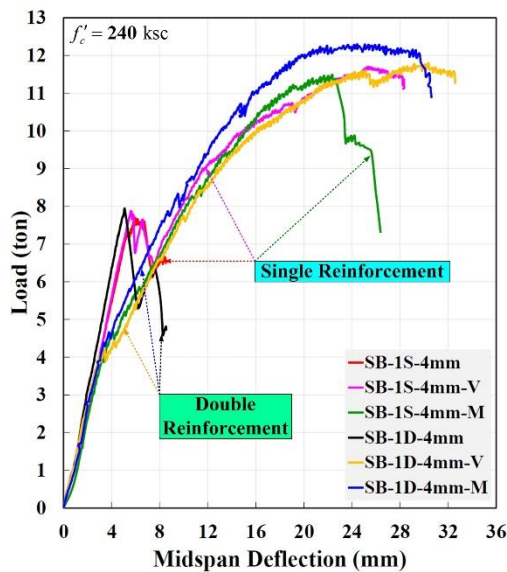
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่เสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่เสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานยึดติดแผ่นเหล็กหนา 3 mm ที่เสริมเหล็กรับแรงดึงและเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานายึดติดแผ่นเหล็กหนา 4 mm ที่เสริมเหล็กรับแรงดึงและเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด

ค่าความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ดัดประลัยและโมเมนต์ดัดแตกร้าเริ่มแรกของคานตัวอย่างทดสอบได้มีการสรุปไว้ในตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ตามลำดับ โดยตารางที่ 3 ได้แสดงค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย ($Q_{ult, test}$) และโมเมนต์ดัดประลัย ($M_{ult, test}$) ที่ได้จากการทดสอบคาน ค่าโมเมนต์ดัดประลัย ($M_{ult, mat}$) จากการคำนวณโดยใช้ค่าผลการทดสอบกำลังวัสดุและค่าโมเมนต์ดัดประลัย ($M_{ult, des}$) จากการใช้ค่ากำลังระบุ ทั้งนี้ ค่ากำลังวัสดุจากผลการทดสอบและค่ากำลังระบุออกแบบได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 ก่อนหน้านี้ สำหรับตารางที่ 4 ได้ทำการสรุปค่าน้ำหนักบรรทุกแตกร้า ($Q_{cr, obs}$) และโมเมนต์ดัดแตกร้า ($M_{cr, obs}$) ที่ได้จากการสังเกตรอยร้าวเริ่มแรก (first crack observation) ในระหว่างทำการทดสอบคาน และค่าของโมเมนต์ดัดแตกร้าที่คำนวณมาจากค่ากำลังวัสดุ ($M_{cr, mat}$) และจากค่ากำลังระบุออกแบบ ($M_{cr, des}$)

วิธีการคำนวณค่าในตารางที่ 3 และตารางที่ 4 อธิบายได้ดังนี้ ค่าของโมเมนต์ดัดประลัย $M_{ult, test}$ และค่าโมเมนต์ดัดแตกร้า $M_{cr, obs}$ หาได้จากสมมูลของแรงและแผนภาพโมเมนต์ดัด ส่วนค่าโมเมนต์ดัดประลัย $M_{ult, mat}$ และ $M_{ult, des}$ คำนวณจากสมมูลของแรงบนหน้าตัดคานที่ได้จากผลทดสอบกำลังวัสดุและกำลังระบุออกแบบจากตารางที่ 2 ตามลำดับ จากนั้นให้หาค่าโมเมนต์ดัดของหน้าตัดรอบแกนใด

ตารางที่ 3 น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยและโมเมนต์ดัดประลัย

คาน	$Q_{ult, test}$ (ตัน)	$M_{ult, test}$ (ตัน-ม.)	$M_{ult, mat}$ (ตัน-ม.)	$M_{ult, des}$ (ตัน-ม.)
CB-1S	6.776	2.372	2.185	1.630
SB-1S-3mm	7.903	2.766	3.828	3.026
SB-1S-4mm	7.688	2.691	4.503	3.465
SB-1S-3mm-V	11.284	3.949	3.828	3.026
SB-1S-4mm-V	11.700	4.095	4.503	3.465
SB-1S-3mm-M	11.053	3.869	3.828	3.026
SB-1S-4mm-M	11.490	4.022	4.503	3.465
CB-1D	7.213	2.525	2.183	1.637
SB-1D-3mm	8.068	2.824	3.894	3.045
SB-1D-4mm	7.936	2.778	4.640	3.510
SB-1D-3mm-V	11.344	3.970	3.894	3.045
SB-1D-4mm-V	11.800	4.130	4.640	3.510
SB-1D-3mm-M	10.818	3.786	3.894	3.045
SB-1D-4mm-M	12.300	4.305	4.640	3.510

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

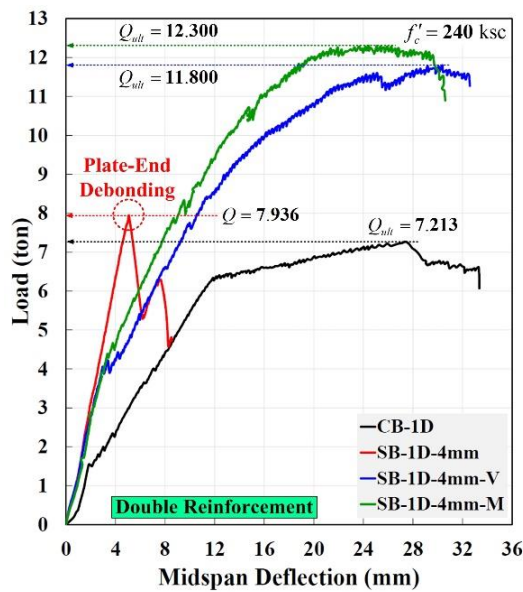
$M_{ult, mat}$ และ $M_{ult, des}$ คือ โมเมนต์ดัดประลัยจากการทดสอบวัสดุและจากการระบุออกแบบ

แกนหนึ่ง ทั้งนี้ ค่าโมเมนต์ดัดประลัยของคานควบคุมและคานเสริมกำลังคำนวณได้จากวิธีกำลัง [1] โดยมีสมมติฐานที่ว่าแผ่นเหล็กเกิดการร้าว [3] สำหรับค่าโมเมนต์ดัดแตกร้า $M_{cr, mat}$ และ $M_{cr, des}$ ของคานควบคุมและคานเสริมกำลังสามารถคำนวณได้มาจากค่าโมดูลัสแตกหัก (modulus of rupture: f_r) ของคอนกรีตโดยใช้วิธีการแปลงพื้นที่หน้าตัดคาน (beam cross sectional area) และค่าโมเมนต์เฉื่อยของหน้าตัด (moment of inertia) [1] – [3]

รูปที่ 9 และรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวของคานควบคุมและคานเสริมกำลังด้วยการยึดติดแผ่นเหล็กที่มีความหนา 3 มม. สำหรับในกรณีของคานที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงเพียงอย่างเดียวและกรณีของคานที่เสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด ตามลำดับ

ในส่วนของรูปที่ 11 และรูปที่ 12 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวของคานในลักษณะทำนองเดียวกันกับรูปที่ 9 และรูปที่ 10 หากแต่แผ่นเหล็กที่ใช้ในการเสริมกำลังมีความหนา 4 มม.

สำหรับค่าน้ำหนักบรรทุกกระทำต่างๆ บนคานตัวอย่างทดสอบที่ได้จากการพิจารณาความสัมพันธ์ในรูปที่ 4 และรูปที่ 9 ถึงรูปที่ 12 ได้ทำการรวบรวมและสรุปไว้ในตารางที่ 5



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุมและคานเสริมกำลังยึดติดแผ่นเหล็กหนา 4 มม. ที่เสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด

ตารางที่ 5 น้ำหนักบรรทุกต่าง ๆ จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัว

คาน	Q_{cr} (ตัน)	Q_y (ตัน)	Q_{ult} (ตัน)	Q_{debond} (ตัน)
CB-1S	1.598	5.996	6.776	-
SB-1S-3mm	-	-	-	7.903
SB-1S-4mm	-	-	-	7.688
SB-1S-3mm-V	-	-	11.284	7.487
SB-1S-4mm-V	-	9.014	11.700	7.863
SB-1S-3mm-M	-	-	11.053	7.329
SB-1S-4mm-M	4.026	8.473	11.490	-
CB-1D	1.320	6.232	7.213	-
SB-1D-3mm	-	-	-	8.068
SB-1D-4mm	-	-	-	7.936
SB-1D-3mm-V	-	9.115	11.344	-
SB-1D-4mm-V	3.869	8.504	11.800	-
SB-1D-3mm-M	4.212	9.037	10.818	-
SB-1D-4mm-M	4.136	8.368	12.300	-
Q_{cr} คือ น้ำหนักบรรทุกแตกร้าว; Q_y คือ น้ำหนักบรรทุกคราก				
Q_{ult} คือ น้ำหนักบรรทุกประลัย; Q_{debond} คือ น้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อน				

4. อภิปรายผล

จากรูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวของคานควบคุม CB-1S (singly RC beam) และ CB-1D (doubly RC beam) พบว่า น้ำหนักบรรทุกแตกร้าว (Q_{cr}) น้ำหนักบรรทุกคราก (Q_y) และน้ำหนักบรรทุกประลัย (Q_{ult}) สามารถทำการหาค่ามาได้อย่างชัดเจนจากแบบจำลองความสัมพันธ์อย่างง่ายแบบ 3 เส้นตรง [1] โดยค่า Q_{cr} ของคาน CB-1S ให้ค่าที่สูงกว่าคาน CB-1D ที่ได้จากความสัมพันธ์และจากการสังเกตรอยร้าวเริ่มแรกระหว่างการทดสอบ ส่วนค่าของ Q_y และ Q_{ult} ของคาน CB-1S มีค่าต่ำกว่าคาน CB-1D ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของคานควบคุมทั้ง 2 กรณี พบว่า คานมีพฤติกรรมเป็นแบบเหนียว (ductile behavior) โดยเหล็กเสริมรับแรงดึงเกิดการคราก

เมื่อทำการพิจารณารูปที่ 5 และรูปที่ 6 สังเกตได้ว่า คานเสริมกำลังด้วยการยึดติดแผ่นเหล็กที่มีความหนา 3 มม. และ 4 มม. โดยไม่มีการใช้สลักเกลียวฝังยึดเพิ่มเติมจากการยึดติดแผ่นเหล็กด้วยพียอกซีตามลำพังพบว่า คานที่เสริมกำลังในรูปแบบลักษณะนี้มีพฤติกรรมเป็นแบบเปราะ (brittle behavior) โดยที่คานเกิดการวิบัติขึ้นแบบทันทีทันใด (sudden failure) ที่มีสาเหตุเนื่องมาจากการหลุดล่อนออกของแผ่นเหล็กที่ปลายด้านใดด้านหนึ่งจากผิวสัมผัสคอนกรีต ส่วนกรณีต่างๆ ของคานที่มีการใช้สลักเกลียวฝังยึดเพิ่มเติมสามารถสังเกตได้ว่า เกิดการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กออกบางส่วน (partial plate-end debonding) แบบไม่สมบูรณ์และคานยังคงมีความสามารถในการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นต่อไปได้อีกมากโดยที่คานมีพฤติกรรมเป็นแบบเหนียวดังแสดงในรูปที่ 7 และรูปที่ 8 สำหรับรูปที่ 9 ถึงรูปที่ 12 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวของคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่แยกตามประเภทของการเสริมเหล็กภายในที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงอย่างเดียว (single reinforcement) หรือมีเหล็กเสริมรับแรงดึงร่วมกับเหล็กเสริมรับแรงอัด (double reinforcement) รวมไปถึงคานเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่มีความหนา 3 มม. และ 4 มม. โดยเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 9 และรูปที่ 11 พบว่า คานเสริมกำลังที่มีเหล็กเสริมภายในรับแรงดึงอย่างเดียวและมีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่มีความหนา 3 มม. และ 4 มม. ที่มีการเพิ่มการฝังยึดด้วยสลักเกลียวในบริเวณช่วงการเอนสำหรับกรณีของคาน SB-1S-3mm-V และ SB-1S-4mm-V สามารถสังเกตเห็นค่าของน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อน (plate-end debonding load) ได้อย่างชัดเจนเมื่อ

เปรียบเทียบกับคานที่มีการเพิ่มการฝังยึดด้วยสลักเกลียวในบริเวณช่วงการเอนมากที่สุดและเลยเข้าไปสู่บริเวณที่มีโมเมนต์ดัดมากที่สุดของคาน SB-1S-3mm-M และ SB-1S-4mm-M ซึ่งในกรณีของคาน SB-1S-3mm-V และ SB-1S-4mm-V ยังคงสามารถพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นต่อไปได้อีกหากแต่ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยกรณีของคาน SB-1S-3mm-M และ SB-1S-4mm-M นั้นมีค่าต่ำกว่ากรณีของคาน SB-1S-3mm-V และ SB-1S-4mm-V ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเหล็กเสริมกำลังในบริเวณที่มีค่าของโมเมนต์ดัดมากที่สุดจากการพิจารณาแผนภาพโมเมนต์ดัด (bending moment diagram: BMD) สำหรับกรณีของคาน SB-1D-3mm-V และ SB-1D-4mm-V ในรูปที่ 10 และรูปที่ 12 ที่มีเหล็กเสริมรับแรงดัดร่วมกับเหล็กเสริมรับแรงอัดพบว่า ไม่สามารถสังเกตค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนได้ชัดเจน หากแต่ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยกรณีของคาน SB-1D-4mm-M ให้ค่าที่สูงกว่ากรณีของคาน SB-1D-4mm-V ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบคานตัวอย่างที่ไม่เป็นไปตามข้อสันนิษฐานทางทฤษฎี จึงควรมีการตรวจสอบในประเด็นนี้เพิ่มเติมเพื่อความชัดเจนยิ่งขึ้น

จากตารางที่ 3 และพิจารณาค่าโมเมนต์ดัดประลัยจากผลการทดสอบคาน ($M_{ult, test}$) พบว่า ค่าโมเมนต์ดัดประลัยของคานเสริมกำลังในทุกกรณีให้ค่าที่สูงกว่าคานควบคุมโดยมีค่าแปรเปลี่ยนประมาณ 1.1-1.7 เท่า เมื่อทำการเปรียบเทียบกับคานควบคุม ทั้งนี้ค่าโมเมนต์ดัดประลัยจากผลการทดสอบคานควบคุมให้ค่าที่สูงกว่าค่าโมเมนต์ดัดประลัยของคานควบคุมที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี (และ $M_{ult, des}$) ส่วนค่าโมเมนต์ดัดประลัยของคานเสริมกำลังจากการทดสอบคาน ($M_{ult, test}$) โดยส่วนใหญ่แล้วให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีที่ได้จากผลการทดสอบกำลังวัสดุ ($M_{ult, mat}$) เนื่องจากการสูญเสียพฤติกรรมคอมโพสิตอันเนื่องมาจากการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กบางส่วนเกิดขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ดัดประลัยระหว่างค่า $M_{ult, mat}$ และค่า $M_{ult, des}$ พบว่าให้ค่าที่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยค่า $M_{ult, mat}$ ให้ค่าที่มากกว่าค่า $M_{ult, des}$ ซึ่งบ่งชี้ได้ว่า ค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่คำนวณมาจากการออกแบบโดยใช้ค่ากำลังระบุของวัสดุ (nominal strengths) ให้ค่าที่ปลอดภัย (conservative zone) มากกว่าตามแนวทางการออกแบบโดยวิธีกำลัง [1,3]

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4 สำหรับค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าเริ่มแรกจากผลการสังเกตรอยแตกร้าเริ่มแรกในระหว่างทำการทดสอบคาน

สำหรับกรณีของคานที่มีการเสริมกำลัง ($M_{cr, obs}$) พบว่า ให้ค่าที่สูงกว่าคานควบคุมในทุกกรณีประมาณ 1.0-1.9 เท่า เมื่อทำการเปรียบเทียบกับคานควบคุมและมีค่าที่สูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ($M_{cr, mat}$ และ $M_{cr, des}$) ส่วนค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าจากผลการคำนวณจากกำลังทดสอบวัสดุ $M_{cr, mat}$ ให้ค่าที่สูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณจากกำลังระบุ $M_{cr, des}$ ในทุกกรณีและมีค่าที่ใกล้เคียงกันเป็นส่วนใหญ่

สำหรับตารางที่ 5 เป็นการระบุค่าน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำต่างๆ ที่ได้จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำและค่าการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบ โดยค่าของน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ (Q_{cr}) ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกคราก (Q_y) และค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Q_{ult}) ของคานควบคุมนั้นสามารถหาค่ามาได้ด้วยจากการพิจารณาแบบจำลองความสัมพันธ์แบบ 3 เส้นตรง [1] ได้อย่างชัดเจน ในส่วนของค่าน้ำหนักบรรทุกทุกคราก (Q_y) และค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Q_{ult}) ของคานเสริมกำลังซึ่งบางค่าไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนในทำนองเดียวกับค่าน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำ (Q_{cr}) และค่าน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำจากการหลุดล่อนของแผ่นเหล็ก (Q_{debond}) ที่บางค่าสามารถสังเกตและหาค่ามาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำและค่าการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบ นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตเพิ่มเติมได้ว่า ค่า $Q_{ult, test}$ ของคานเสริมกำลังด้วยการยึดติดแผ่นเหล็กโดยไม่มีการใช้สลักเกลียวฝังยึดเพิ่มเติมดังที่ได้ระบุไว้ในตารางที่ 3 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบและการตรวจวัดนั้นมีค่าเท่ากับค่า Q_{debond} ที่ได้จากการพิจารณาพฤติกรรมความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำและค่าการแอ่นตัวของคานเสริมกำลังดังแสดงในตารางที่ 5 อย่างไรก็ตามความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยสูงสุดของคานเสริมกำลังที่มีการยึดติดด้วยแผ่นเหล็กจากภายนอกจำเป็นต้องพิจารณาผลของการวิบัติล่วงหน้าก่อนเวลากำหนดจากการหลุดล่อนบริเวณที่ปลายของแผ่นเหล็กเสริมกำลังหรือเกิดมีการแยกตัวออกของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมดังแสดงในผลการทดสอบของภาพถ่ายในรูปที่ 3 ซึ่งไม่สามารถคาดคะเนผลการวิบัติล่วงหน้าได้เนื่องจากองค์อาคารเป็นวัสดุคอมโพสิต [2]

5. สรุป

ผลลัพธ์จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า คานควบคุมมีการวิบัติจากการบดอัดแตกของคอนกรีตที่หลังคานตรงบริเวณกึ่งกลางความ

ยาวช่วงพาดและคานมีพฤติกรรมเป็นแบบเหนียวเนื่องจากเหล็กเสริมรับแรงดึงเกิดการครากโดยสังเกตได้จากคานมีค่าการแอ่นตัวมากตามความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวสำหรับคานที่เสริมกำลังโดยการยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีเพียงอย่างเดียวมีการวิบัติเกิดขึ้นแบบทันทีทันใดเนื่องจากมีการหลุดล่อนบริเวณปลายแผ่นเหล็กออกจากผิวสัมผัสคอนกรีตอย่างสมบูรณ์โดยคานมีค่าการแอ่นตัวที่น้อยและมีพฤติกรรมเป็นแบบเปราะซึ่งเป็นพฤติกรรมที่ไม่พึงประสงค์ถึงแม้ว่าคานมีค่าการรับน้ำหนักบรรทุกที่สูงกว่าคานควบคุมก็ตามแต่ไม่มากนักอย่างมีนัยสำคัญ ในส่วนของคานเสริมกำลังโดยการยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีและมีสลักเกลียวฝังยึดเพิ่มเติมมีค่าการแอ่นตัวมากและคานมีพฤติกรรมเป็นแบบเหนียวแม้ว่ามีการหลุดล่อนเพียงบางส่วนของแผ่นเหล็กออกจากผิวสัมผัสคอนกรีตปรากฏให้เห็นแต่คานเสริมกำลังยังคงมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นได้อีกมากประมาณ 1.5 - 1.7 เท่า เมื่อทำการเปรียบเทียบกับคานควบคุมซึ่งบ่งชี้ได้ว่าคานเสริมกำลังมีพฤติกรรมคอมโพสิตในการร่วมกันต้านทานแรงกระทำจากภายนอก เมื่อทำการพิจารณาการติดตั้งสลักเกลียวฝังยึดเฉพาะในบริเวณที่มีค่าแรงเฉือนมากที่สุดของคานเสริมกำลังพบว่าคานเสริมกำลังในลักษณะนี้โดยใหญ่มีค่าการรับน้ำหนักบรรทุกประลัยที่มากกว่ากรณีของคานเสริมกำลังที่มีการติดตั้งสลักเกลียวฝังยึดในบริเวณที่มีค่าแรงเฉือนมากที่สุดและเลยเข้าไปในบริเวณที่มีค่าโมเมนต์ดัดมากที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากคานเสริมกำลังในกรณีแบบหลังนั้นมีการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดของแผ่นเหล็กจากรูเจาะในบริเวณหน้าตัดคานที่ต้องรับค่าโมเมนต์ดัดมากที่สุด อย่างไรก็ตาม จากผลการศึกษาสามารถกล่าวได้ว่า การติดตั้งสลักเกลียวฝังยึดเพิ่มเติมไม่ได้เป็นการป้องกันการวิบัติจากการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กหากแต่เป็นการชะลอการวิบัติไม่ให้เกิดขึ้นแบบทันทีทันใดซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงรูปแบบพฤติกรรมการวิบัติของคานเสริมกำลังจากแบบเปราะไปเป็นแบบเหนียวโดยเป็นพฤติกรรมที่พึงประสงค์ให้เกิดขึ้นขณะมีการใช้งานในทางปฏิบัติ

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.C. McCormac, Design of Reinforced Concrete, 5th ed., John Wiley & Sons Inc., New York, 2001.
- [2] D.J. Oehlers and M.A. Bradford, Elementary Behaviour of Composite Steel and Concrete Structural Members, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999.
- [3] K. Zilch, R. Niedermeier, and W. Finckh, Strengthening of Concrete Structures with Adhesively Bonded Reinforcement: Design and Dimensioning of CFRP Laminates and Steel Plates, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2014.
- [4] I.L.K. Reid, Concrete Bridge Strengthening and Repair, Thomas Telford Ltd., London, 2009.
- [5] R. Jones, R.N. Swamy, and T.H. Ang, "Under- and over-reinforced concrete beams with glued steel plates," *Int. J. Cem. Compos. Lightweight Concr.*, vol. 4, pp. 19-32, 1982.
- [6] O. Vilnay, "The analysis of reinforced concrete beams strengthened by epoxy bonded steel plates," *Int. J. Cem. Compos. Lightweight Concr.*, vol. 10, pp. 73-78, 1988.
- [7] D.J. Oehlers, "Reinforced concrete beams with plates glued to their soffits," *J. Struct. Eng.*, vol. 118, pp. 2023-2038, 1992.
- [8] A. Gomes and J. Appleton, "Strengthening design of concrete beams by addition of steel plates," in *Proc. Int. Conf. on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science*, August 2-5, 1999, Macau, pp. 657-666, 1999.
- [9] H.E.M. Sallam, A.M. Saba, H.H. Shahin, and H. Abdel-Raouf, "Prevention of peeling failure in plated beams," *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 2, pp. 419-429, 2004.
- [10] M.Z. Jumaat and M.A. Alam, "Plate bonded strengthened R.C. beams with end and intermediate anchors," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 4, pp. 185-193, 2007.
- [11] S.D. Ngidi and M. Dundu, "Repair of reinforced concrete beams with adhesive bonded steel plates," in *Proc. the 14th Int. Conf. on Structural and Geotechnical Engineering*, December 20-22, 2015, Cairo, Egypt, 2015.
- [12] E.M. Lotfy and W. Elkamash, "Numerical study of R.C. beams strengthening by external steel plate," *Am. J. Eng. Res.*, vol. 6, pp. 48-56, 2017.
- [13] J. Tarigan, F.M. Patra, and T. Sitorus, "Flexural strength using steel plate, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) on reinforced concrete beam in building technology," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 126, article no. 012025, 2018.
- [14] Y.G. Abtan, "Effective length and area of bolted steel plates attached externally to strengthen reinforced concrete beams," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 737, article no. 012012, 2020.
- [15] H. Tang, J. Peng, and J. Zhang, "Influence of further corrosion on structural behavior of corroded reinforced-concrete beam strengthened with steel plate using different strengthening schemes," *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 34, article no. 04019117, 2020.



ธนัตถ์ วีระเกตุ สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครและกำลังศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา (สาขาวิชาเอก วิศวกรรมโครงสร้าง) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร มีความสนใจศึกษา

งานวิจัยเรื่องการเสริมกำลังให้กับองค์อาคารโครงสร้าง



วิกร ไตรวาทพงศ์ สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานครและกำลังศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา (สาขาวิชาเอก วิศวกรรมโครงสร้าง) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร โดยมีความสนใจ

ศึกษางานวิจัยในเรื่อง การเสริมกำลังให้กับองค์อาคาร

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดความเสียหายจากการสั่นสะเทือนของ

แผ่นดินไหวด้วยการใช้วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย



ปวริศ โปษะนันท์ สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธาจากมหาวิทยาลัยขอนแก่นและกำลังศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา (สาขาวิชาเอก วิศวกรรมโครงสร้าง) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร มีความสนใจศึกษา

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



ปฎิภาณ จันทวิชิต สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาครุศาสตรบัณฑิตสาขามหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีและสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา (สาขาวิชาเอก วิศวกรรมโครงสร้าง) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร มีความสนใจศึกษางานวิจัยในเรื่อง ทฤษฎีคณิตศาสตร์

เชิงวิศวกรรมประยุกต์เกี่ยวกับการแก้ปัญหาค่าเอกฐานของหน่วยแรงในโครงสร้างแผ่นบางและการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก



Damang Dy สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธาจากสถาบัน Sirindhorn International Institute of Technology (SIIT), Thammasat University และระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา (สาขาวิชาเอก วิศวกรรมโครงสร้าง) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สนใจศึกษางานวิจัยใน

เรื่อง ทฤษฎีคณิตศาสตร์เชิงวิศวกรรมประยุกต์และปัญหาของการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก



ยศ สมพรเจริญสุข สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตและปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา (สาขาวิชาเอก วิศวกรรมโครงสร้างและสาขาวิชาการ คณิตศาสตร์ประยุกต์) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี มีความสนใจศึกษางานวิจัยในเรื่อง ความฉลาด

เชิงการคำนวณ เครือข่ายประสาทเทียม การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีในปัญหา กลศาสตร์ของแข็งที่มีความต่อเนื่อง กลศาสตร์การแตกหักและกลศาสตร์การสัมผัส การสร้างและประยุกต์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในปัญหาเชิงกายภาพ และการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก