

การดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังจากภายนอกโดยยึดติด
แผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีที่มีสลักเกลียวฝังยึด

Flexure of Reinforced Concrete Beams Externally Strengthened by Epoxy Bonded Steel Plates with Anchored Bolts

ยศ สมพรเจริญสุข

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

เลขที่ 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มราย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

Emails: syossyos@mut.ac.th

Manuscript Received January 18, 2023

Revised June 12, 2023

Accepted June 12, 2023

บทคัดย่อ

การขยายผลของการศึกษาก่อนหน้าเกี่ยวกับการเสริมกำลังดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการยึดติดจากภายนอกของแผ่นเหล็กด้วยวัสดุประสานอีพ็อกซีเรซินที่ผิวหน้ารับแรงดึงของคอนกรีตและมีการจัดเตรียมตัวยึดจับเชิงกลเพิ่มเติมที่ปลายและภายในของแผ่นเหล็กได้จัดทำและนำเสนอในบทความนี้ ตัวอย่างคานจำนวนทั้งสิ้น 14 ตัวอย่าง ที่มีมิติภาพรวมที่เหมือนกันได้ทำการหล่อในที่โดยใช้คอนกรีตผสมเสร็จสำหรับการทดสอบในโรงประลอง ปริมาณของการเสริมเหล็กภายในและแผ่นเหล็กที่ใช้เหมือนกันเมื่อทำการเปรียบเทียบอ้างอิงกับงานก่อนหน้า ความแตกต่างคือค่ากำลังอัดของคอนกรีตเท่านั้น ตัวอย่างคานทุกตัวได้มีการทดสอบจนกระทั่งคานวิบัติภายใต้การดัดแบบสี่จุด ดังนั้นวัตถุประสงค์ของบทความคือ เพื่อศึกษาผลกระทบของกำลังคอนกรีตที่มีผลกระทบต่อความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกและพฤติกรรมการแอ่นตัวของคานเสริมกำลังรวมไปถึงรูปแบบการวิบัติ พารามิเตอร์ที่สนใจเกี่ยวข้องกับความหนาของแผ่นเหล็กประเภทของการเสริมเหล็กภายในบนหน้าตัดคานและการจัดวางตำแหน่งของตัวยึดจับเชิงกล น้ำหนักบรรทุกแตกร้าวแรก น้ำหนักบรรทุกคราก น้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนและอีกทั้งน้ำหนัก

บรรทุกประลัยได้ทำการหามาจากผลการทดลองและผลทางทฤษฎี

คำสำคัญ: การยึดติดจากภายนอก ความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกตัวยึดจับเชิงกล น้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อน คานคอนกรีตเสริมเหล็ก คานเสริมกำลัง

ABSTRACT

An extension of the previous work on strengthening in flexure of reinforced concrete beams by external bonding of steel plates with epoxy-resin adhesive to the concrete tension face and providing additional mechanical anchorages at the ends and intermediate of steel plate is conducted and presented in the paper. A total of 14 beams having the same overall dimensions are cast-in-place using ready mixed concrete for the experiments. The internal steel reinforcement and steel plate quantities used are the same to that of the previous. The difference is only the concrete compressive strength. All of the beams have been tested until the beams failed under the four-point bending test. The objectives are thus to study the effects of concrete strength on load carrying capacity and deflection behavior of strengthened beams including

the mode of failures. The parameters of interesting are involved with the steel plate thickness, type of internal reinforcing steel bars on beam sections, and position arrangement of mechanical anchorages. The cracking load, yielding load, debonding load, and ultimate load are determined experimentally and theoretically.

Keywords: External Bonding, Load Carrying Capacity, Mechanical Anchorage, Debonding Load, Reinforced Concrete Beams, Strengthened Beam

1. บทนำ

คอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) เป็นวัสดุคอมโพสิตประเภทหนึ่งที่มีองค์ประกอบหลักคือ คอนกรีตและเหล็กเสริม โดยนำข้อดีเชิงกำลังของคอนกรีตที่ต้านทานแรงอัดได้ดี ส่วนเหล็กเสริมรับแรงดึงได้ดีมาใช้งานร่วมกัน [1] และเมื่ออยู่ภายใต้แรงกระทำจากภายนอกพบว่า ชิ้นส่วนต่าง ๆ ของโครงสร้าง ค.ส.ล. ที่ได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสมมีพฤติกรรมคอมโพสิตเกิดขึ้น [2] เมื่อโครงสร้าง ค.ส.ล. มีการใช้งานมาระยะเวลาหนึ่งพบว่า ความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกมีค่าลดลงซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากขั้นตอนในการออกแบบหรือการก่อสร้างที่อาจเกิดจุดบกพร่องขึ้นได้ อีกทั้งอาจมีการเปลี่ยนแปลงมาตรฐานหรือมีการปรับปรุงข้อกำหนดในการออกแบบ ดังนั้น การเสริมกำลังให้กับโครงสร้างจึงมีความจำเป็นเพื่อให้เกิดความมั่นคงและความปลอดภัยตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้าง หรืออาจเป็นการเพิ่มความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก [3]

สำหรับผลการศึกษาวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการเสริมกำลังโดยใช้วิธีการยึดติดจากภายนอกด้วยแผ่นเหล็กได้ทำการทบทวนและสรุปผลโดยสังเขปดังได้รายงานไว้ ณ ที่นี้ Eberline, Klaiber และ Dunker [4] ทบทวนงานวิจัยและการประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคการเสริมกำลังคาน สะพาน ค.ส.ล. ที่มีการติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีพบว่า สามารถเพิ่มขีดความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกจริงได้ Zhang, Raoof และ Wood [5] ทำนายการวิบัติจากการลอกออกของเนื้อคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมในคาน ค.ส.ล. ที่เสริมกำลังโดยการติดแผ่นเหล็กจากภายนอกด้วยแบบจำลองเชิงทฤษฎีอย่างง่ายเพื่อใช้อธิบายกลไกของรูปแบบการวิบัติล่วงหน้าก่อนเวลากำหนดที่เหมาะสม Adhikary และ Mutsuyoshi [6] พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไร้เชิงเส้นและใช้

แบบจำลองวัสดุมาวิเคราะห์พฤติกรรมการเสริมกำลังคาน ค.ส.ล. ที่ยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีโดยพิจารณาผลของการมีไถลระหว่างคอนกรีตและแผ่นเหล็ก รวมถึงพิจารณาผลของการมีสมอจับยึดที่ปลายแผ่นเหล็กพบว่า บนสมมติฐานของการยึดเกาะที่สมบูรณ์ระหว่างคอนกรีตและแผ่นเหล็กนำไปสู่ความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ อีกทั้งยังพบว่า รูปแบบการวิบัติเปลี่ยนจากการครากในแผ่นเหล็กไปสู่การหลุดล่อนที่ปลายแผ่นเหล็กเมื่อปลายแผ่นเหล็กอยู่ห่างจากฐานรองรับ

Jumaat และ Alam [7] ศึกษาการเสริมกำลังของคาน ค.ส.ล. ที่มีการยึดติดแผ่นเหล็กหรือแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) โดยติดตั้งสมอจับยึดที่ปลายและภายในแผ่นเสริมกำลังเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการวิบัติล่วงหน้าก่อนเวลา ผลการศึกษาสรุปได้ว่า น้ำหนักบรรทุกวิบัติมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับคานควบคุมโดยคานมีพฤติกรรมเป็นแบบเหนียวและเกิดการบดอัดแตกของคอนกรีต ต่อมา Jumaat และ Alam [8] ศึกษาเชิงทดลองและเชิงวิเคราะห์ของคาน ค.ส.ล. ที่เสริมกำลังด้วยการยึดติดแผ่นเหล็กและแผ่น CFRP โดยทำการออกแบบให้คานทั้ง 2 ประเภทมีกำลังที่เท่ากันพบว่า คานเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กให้คาน้ำหนักบรรทุกแตกเร็วกว่าที่มากกว่า แต่การแอ่นตัว ความเครียดในเหล็กเสริมและคอนกรีตและความกว้างของรอยร้าวให้คาน้อยกว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับคานเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP ในกรณีของคานเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP พบว่า เกิดการวิบัติจากการแยกตัวออกของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม ขณะที่คานเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติโดยเริ่มต้นจากการหลุดล่อนระหว่างผิวสัมผัสภายในของปลายแผ่นเหล็กและตามมาด้วยการแยกตัวออกของคอนกรีตหุ้มเหล็ก

Bashandy [9] ประเมินประสิทธิภาพการเสริมกำลังคาน ค.ส.ล. โดยเลือกใช้วัสดุและวิธีการที่แตกต่างกันเช่น (1) เสริมชั้นคอนกรีต (2) เสริมชั้นวัสดุเสริมกำลังด้วยตาข่ายเหล็กหรือพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (reinforcing steel or FRP mesh) และ (3) เสริมกำลังโดยติดแผ่นเหล็กด้วยวัสดุประสาน ผลการศึกษาสรุปได้ว่า การเสริมกำลังทั้ง 3 วิธี สามารถปรับปรุงและเพิ่มสมรรถนะของคานได้ โดยการติดแผ่นเหล็กจากภายนอกสามารถเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้สูงสุดในเวลาเดียวกันนั้น Al-Hassani, Al-Ta'an และ Mohammed [10] ศึกษาการเสริมกำลังและการเสียรูปของคาน ค.ส.ล. ที่มีความเสียหายและเสริมกำลังด้วยการติดแผ่นเหล็ก ส่วนการยึดติดแผ่นเหล็กกับคานทำ

โดยการเชื่อมแผ่นเหล็กเข้ากับเหล็กปลอกพบว่า คานเสริมกำลังมีพฤติกรรมคอมโพสิตเป็นอย่างดีและรอยร้าวเดิมที่มีอยู่ก่อนไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ

Czaderski และ Meier [11] สำรวจและศึกษาพฤติกรรมในระยะยาวของคานเสริมกำลังด้วยการติดแผ่นเหล็กหรือแผ่น FRP จากภายนอกพบว่า คานเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กภายใต้น้ำหนักบรรทุกคงค้างเป็นระยะเวลานาน 47 ปี ในห้องปฏิบัติการไม่พบการวิบัติเสียหายและการเพิ่มขึ้นของการแอ่นตัวมีสาเหตุหลักมาจากการคืบในคอนกรีตโดยอีพ็อกซีที่ใช้ยึดเกาะแผ่นเหล็กและคอนกรีตยังอยู่ในสภาพที่ดี ส่วนคานสะพาน ค.ส.ล. ที่เสริมกำลังด้วยการติดแผ่น FRP และใช้งานมาเป็นระยะเวลา 20 ปี พบว่า คานยังคงอยู่ในสภาพใช้งานที่ดี

Yannian, Jun และ Liu [12] ทำการทดสอบคาน ค.ส.ล. ที่มีหน้าตัดรูปตัวทีและเสริมกำลังด้วยการติดแผ่นเหล็กใต้ท้องคานและมีการโอบรัดด้วยแถบแผ่นเหล็กรูปตัวยูที่ปลายและภายในของแผ่นเหล็กพบว่า อิทธิพลของการติดแผ่นเหล็กรูปตัวยูสามารถป้องกันการวิบัติจากการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กได้และทำให้การวิบัติของคานอยู่ในรูปแบบของการตัด ต่อมาไม่นาน Abtan [13] ศึกษาความยาวและพื้นที่ประสิทธิผลของแผ่นเหล็กเสริมกำลังตัดจากภายนอกด้วยการยึดติดกับผิวคานคอนกรีตโดยใช้จุดต่อสลักเกลียวรับแรงเฉือน โดยสนใจหาพื้นที่ของแผ่นเหล็กที่มากที่สุดเพื่อให้แน่ใจว่าคานมีการวิบัติแบบเหนียวและความยาวแผ่นเหล็กที่ใช้น้อยที่สุดเพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียปฏิสัมพันธ์ระหว่างคอนกรีตและแผ่นเหล็ก และเมื่อไม่นานมานี้ Theeraket และคณะ [14] ให้ความสนใจศึกษาการรับน้ำหนักบรรทุกของคาน ค.ส.ล. ที่เสริมกำลังโดยการยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีและมีการใช้สลักเกลียวฝังยึดแผ่นเหล็กเพิ่มเติมภายในบริเวณช่วงการเฉือนและบริเวณโมเมนต์ดัดมากที่สุดพบว่า คานเสริมกำลังมีพฤติกรรมเป็นแบบเหนียวในลักษณะเดียวกับคาน ค.ส.ล. ที่มีปริมาณเหล็กเสริมน้อย [1]

ในการศึกษานี้เป็นการขยายผลการศึกษาจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [14] โดยศึกษาผลกระทบของกำลังอัดคอนกรีตที่มีต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานและพิจารณาพฤติกรรมของคานและผลของการจับยึดของสลักเกลียวรวมถึงรูปแบบการวิบัติ

2. วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

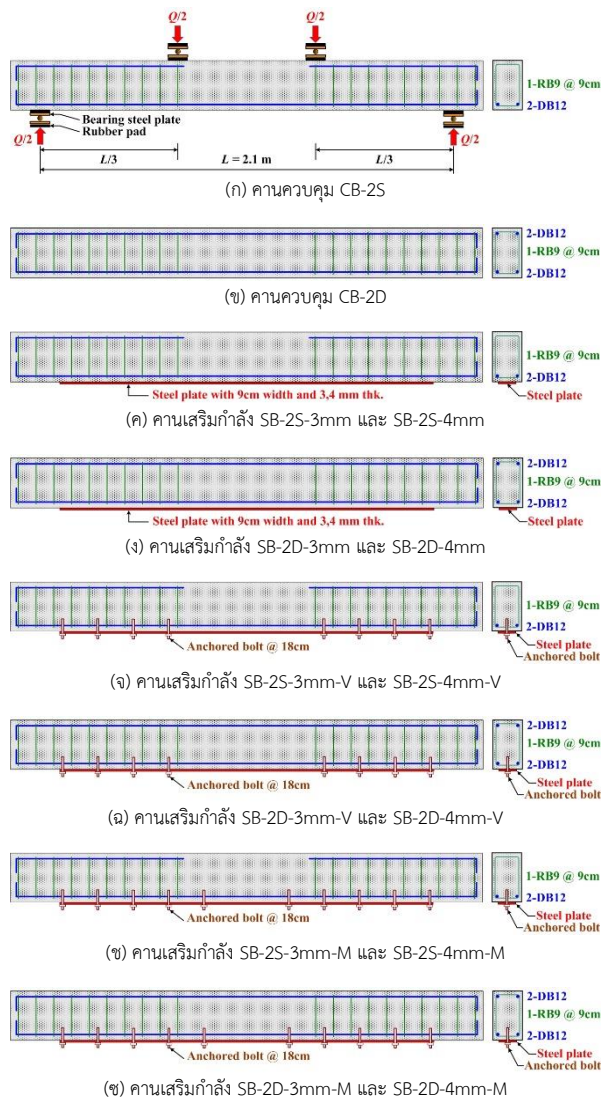
จำนวนของตัวอย่างคานทดสอบมีจำนวน 14 ตัวอย่าง โดย

สามารถจำแนกออกได้เป็น (1) คานควบคุม (control beams) จำนวน 2 ตัวอย่างคือ คาน CB-2S ดังรูปที่ 1 (ก) และ CB-2D ดังรูปที่ 1 (ข) ซึ่งเป็นคาน ค.ส.ล. เสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว (single reinforcement) และเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด (double reinforcement) ตามลำดับ และ (2) คาน ค.ส.ล. ที่ได้รับการเสริมกำลัง (strengthened beams) ด้วยแผ่นเหล็กบริเวณผิวคอนกรีตด้านที่รับแรงดึงจำนวน 12 ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 1 (ค) ถึงรูปที่ 1 (ซ) ทั้งนี้ สำหรับทุกตัวอย่างคานทดสอบได้ทำการผูกโครงเหล็ก (steel cage) และทำการหล่อคานในที่ (cast-in-place) โดยใช้คอนกรีตผสมเสร็จที่กำหนดค่ากำลังอัดระบุของคอนกรีตรูปทรงกระบอก (cylinder concrete nominal compressive strength) มีค่าเท่ากับ 280 กก./ซม.² และได้ทำการเก็บตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกจำนวน 5 ตัวอย่าง

หน้าตัดโดยรวมของคานตัวอย่างทดสอบทั้งหมดมีมิติความกว้าง (b) เป็น 15 ซม. และมีความลึก (h) 25 ซม. และคานมีความยาวรวม 2.4 ม. ทั้งนี้คานมีความยาวของช่วงพาด (L) เมื่อได้วางอยู่บนฐานรองรับแบบง่าย (simple supports) ระหว่างฐานรองรับทั้งสองข้างเป็นระยะ 2.1 ม.

ในส่วนของการรายละเอียดเหล็กเสริม (steel reinforcement) ในคานตัวอย่างทดสอบที่เป็นคานควบคุมและคานเสริมกำลังทุกตัวอย่งนั้นประกอบด้วย (1) เหล็กเสริมสำหรับรับแรงดึง (tensile steel) และเหล็กเสริมรับแรงอัด (compressive steel) ใช้เป็นเหล็กข้ออ้อย (deformed bar) ขนาด DB12 ชั้นคุณภาพ SD40 และ (2) เหล็กปลอก (stirrup) ที่ใช้เพื่อรับแรงเฉือนเป็นเหล็กเส้นกลมผิวเรียบ (round bar) โดยเป็นการรัดรอบขนาด RB9 ชั้นคุณภาพ SD24

สำหรับกรณีของคาน ค.ส.ล. ที่มีการเสริมกำลังด้วยการยึดติดแผ่นเหล็ก (steel plate) ซึ่งมี 2 ความหนา (t) ที่ใช้คือมีขนาด 3 มม. และ 4 มม. โดยแผ่นเหล็กมีความกว้าง (b_{sp}) 9 ซม. และมีความยาว 1.9 ม. ชั้นคุณภาพ Fe24 และทำการยึดติดแผ่นเหล็กที่ผิวหน้าของคานคอนกรีตด้านรับแรงดึงด้วยวัสดุประสานอีพ็อกซีที่ไซทรอปิค (Sikadur®-30) ซึ่งมีชั้นความหนาของอีพ็อกซี (adhesive epoxy layer) ที่ใช้ประมาณ 3 มม. ดังแสดงในรูปที่ 1 (ค) และรูปที่ 1 (ง) ส่วนในกรณีของรูปที่ 1 (จ) ถึงรูปที่ 1 (ซ) มีการใช้สลักเกลียวฝังยึดแผ่นเหล็กเพิ่มเติม โดยสลักเกลียวที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. และมีระยะฝังยึดในคอนกรีต 8 ซม.



รูปที่ 1 รายละเอียดคานควบคุมและคานเสริมกำลังภายใต้การทดสอบการดัดแบบ 4 จุด มาตรฐาน

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดของข้อมูลและการเรียกชื่อคานตัวอย่างทดสอบ ส่วนตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้โดยให้ค่ากำลังระบุ (nominal strength) ออกแบบและค่ากำลังจากผลทดสอบ (proof strength) ขึ้นตัวอย่างวัสดุ วิธีทดสอบใช้การทดสอบตามมาตรฐานการดัดแบบ 4 จุด โดยให้น้ำหนักบรรทุกกระทำเป็นแบบจุดผ่านกระบอกแม่แรงไฮดรอลิกส์ที่มีขนาด 30 ตัน กระทำตรงกึ่งกลางความยาวของคานส่งถ่ายแรงและส่งถ่ายน้ำหนักไปยังคานตัวอย่างทดสอบดังรูปที่ 1 (ก) ซึ่งมีระยะของน้ำหนัก

บรรทุกกระทำต่อคานเมื่อวัดห่างจากฐานรองรับเท่ากับ 70 ซม. ทั้งสองข้าง ผลการตรวจวัดค่าขนาดของน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ อุปกรณ์มาตรวัดแรง (load cell) โดยได้จัดวางตำแหน่งให้อยู่ระหว่างคานส่งถ่ายแรงและกระบอกแม่แรงไฮดรอลิกส์

ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างคานทดสอบ

คาน	ประเภทคาน	กำลังอัดระบุคอนกรีต (กก./ซม. ²)	การเสริมเหล็ก	ความหนาของแผ่นเหล็ก (มม.)
CB-2S	คานควบคุม	280	singly RC	-
SB-2S-3mm	คานเสริมกำลัง	280	singly RC	3
SB-2S-4mm	คานเสริมกำลัง	280	singly RC	4
SB-2S-3mm-V	คานเสริมกำลัง	280	singly RC	3
SB-2S-4mm-V	คานเสริมกำลัง	280	singly RC	4
SB-2S-3mm-M	คานเสริมกำลัง	280	singly RC	3
SB-2S-4mm-M	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
SB-2D-3mm-V	คานเสริมกำลัง	280	doubly RC	3
SB-2D-4mm-V	คานเสริมกำลัง	280	doubly RC	4
SB-2D-3mm-M	คานเสริมกำลัง	280	doubly RC	3
SB-2D-4mm-M	คานเสริมกำลัง	280	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	280 กก./ซม. ²	279.39 กก./ซม. ²

สำหรับการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบใช้อุปกรณ์ตรวจวัดค่าการเคลื่อนที่แปรเปลี่ยนแบบเชิงเส้น (linear variable differential transformer: LVDT) จำนวน 6 ตัว โดยได้มีการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวที่บริเวณกึ่งกลางความลึกของคานใน 3 หน้าตัดคือ หน้าตัดที่กึ่งกลางความยาวช่วงพาดคาน (midspan length) และหน้าตัดภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำทางด้านซ้ายและด้านขวา ทั้งนี้ ในแต่ละหน้าตัดได้มีการตรวจวัดค่า 2 ตำแหน่ง คือ

ด้านหน้า (หน้า A) และด้านหลัง (หน้า B) ค่าที่ได้จากการตรวจวัดต่าง ๆ มีการรวบรวม บันทึกและจัดเก็บไว้ด้วยชุดรวบรวมข้อมูล (data acquisition)

3. ผลการทดสอบ การวิเคราะห์และการอภิปรายผล

รูปที่ 2 และรูปที่ 3 แสดงภาพถ่ายของคานทดสอบภายหลังจากคานเกิดการวิบัติและไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกกระทำเพิ่มขึ้นได้อีกสำหรับกรณีของชุดคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวและกรณีของชุดคานที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด ตามลำดับ ผลการตรวจวัดค่าขนาดน้ำหนักบรรทุกกระทำและค่าการแอ่นตัวที่ได้ระหว่างทำการทดสอบคานตัวอย่างทั้งหมดสามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกกระทำและค่าการแอ่นตัว โดยค่าการแอ่นตัวในความสัมพันธ์เป็นค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยของการตรวจวัดคานที่หน้า A และหน้า B ของหน้าตัดคานบริเวณกึ่งกลางความยาวช่วงพาด รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ของคาน ค.ส.ล. ควบคุมที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวและคานที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด โดยในรูปได้ระบุค่าน้ำหนักบรรทุกทุกแตกร้าวกแรก (first cracking load: Q_{cr}) ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกคราก (yielding load: Q_y) และค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย (ultimate load: Q_{ult}) ที่ได้จากการพิจารณาแบบจำลองความสัมพันธ์อย่างง่ายในแบบ 3 เส้นตรง (tri-linear model) [1] และค่าน้ำหนักบรรทุกทุกแตกร้าวกแรก $Q_{cr, obs}$ จากการสังเกตรอยร้าวกแรกที่ปรากฏให้เห็นในระหว่างทำการทดสอบ ส่วนรูปที่ 5 และรูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ของคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวและคานที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด ตามลำดับ



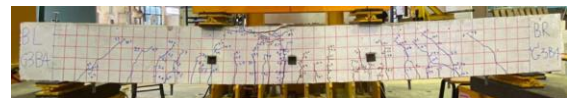
(ก) คานควบคุม CB-2S



(ข) คานเสริมกำลัง SB-2S-3mm



(ค) คานเสริมกำลัง SB-2S-4mm



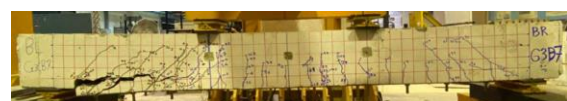
(ง) คานเสริมกำลัง SB-2S-3mm-V



(จ) คานเสริมกำลัง SB-2S-4mm-V



(ฉ) คานเสริมกำลัง SB-2S-3mm-M



(ช) คานเสริมกำลัง SB-2S-4mm-M

รูปที่ 2 ตัวอย่างคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงอย่างเดียว



(ก) คานควบคุม CB-2D



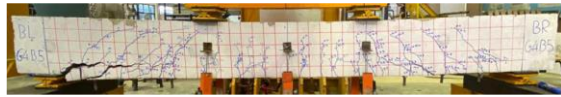
(ข) คานเสริมกำลัง SB-2D-3mm



(ค) คานเสริมกำลัง SB-2D-4mm



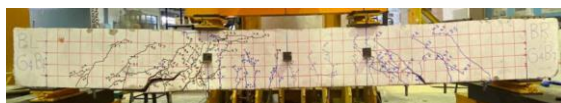
(ง) คานเสริมกำลัง SB-2D-3mm-V



(จ) คานเสริมกำลัง SB-2D-4mm-V



(ฉ) คานเสริมกำลัง SB-2D-3mm-M

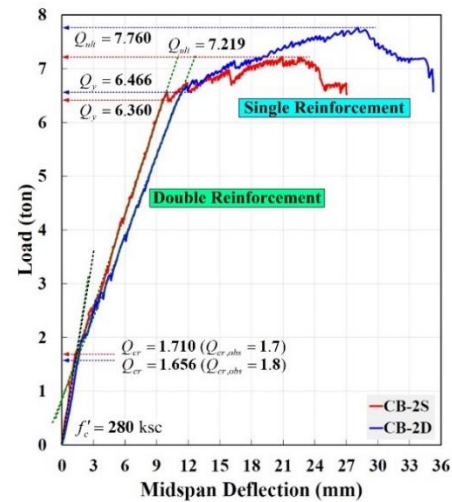


(ช) คานเสริมกำลัง SB-2D-4mm-M

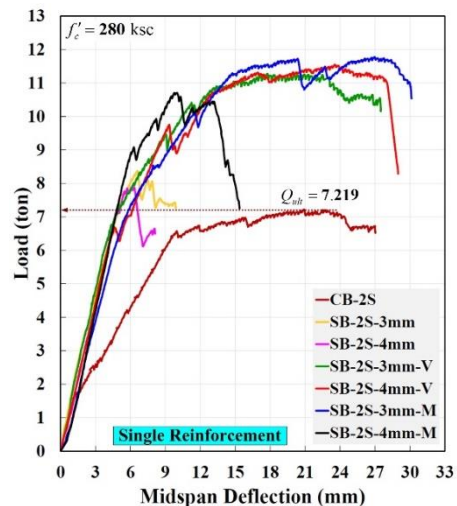
รูปที่ 3 ตัวอย่างคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงและรับแรงอัด

สำหรับรูปที่ 7 และรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์เฉพาะคานเสริมกำลังที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวและเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัดได้ทำการเสริมกำลังให้กับคานด้วยการยึดติดแผ่นเหล็กที่มีความหนา 3 มม. และ 4 มม. ตามลำดับ ตารางที่ 3 และตารางที่ 4 สรุปค่าความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ดัดประลัยและค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าเริ่มแรก (ultimate bending moment and first cracking moment resistance capacities) ของทุกตัวอย่างคาน ตามลำดับ โดยหาค่ามาได้จากการทดสอบคานและหาได้จากผลการคำนวณทางทฤษฎีเมื่อใช้ค่าผลการทดสอบกำลังของวัสดุและใช้ค่ากำลังระบุออกแบบจากตารางที่ 2 โดยตารางที่ 3 ได้มีการระบุค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยและโมเมนต์ดัดประลัยจากการทดสอบคาน ($Q_{ult, test}$, $M_{ult, test}$) ค่าโมเมนต์ดัดประลัยจากการคำนวณโดยใช้ค่าผลการทดสอบกำลังวัสดุ ($M_{ult, mat}$) และ

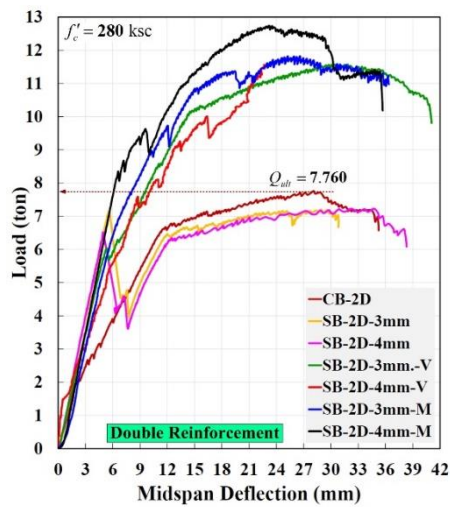
ค่าโมเมนต์ดัดประลัยจากการใช้ค่ากำลังระบุออกแบบ ($M_{ult, des}$) ส่วนตารางที่ 4 สรุปค่าน้ำหนักบรรทุกทุกแตกร้าเริ่มแรกและค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าจากการสังเกต ($Q_{cr, obs}$, $M_{cr, obs}$) จากการคำนวณด้วยค่าทดสอบกำลังวัสดุ ($M_{cr, mat}$) และจากค่ากำลังระบุออกแบบ ($M_{cr, des}$)



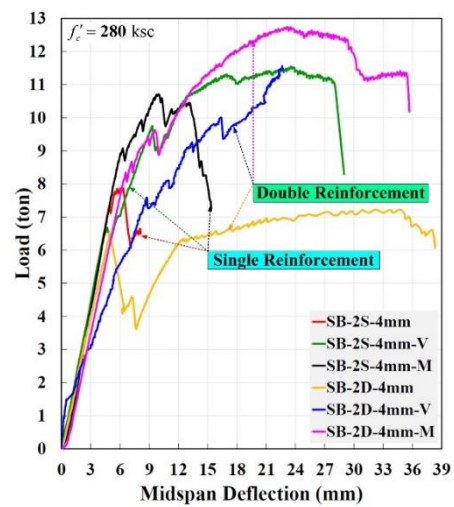
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุมที่เสริมเหล็กกับแรงดึงอย่างเดียวและเสริมเหล็กกับแรงดึงร่วมกับเหล็กกับแรงอัด



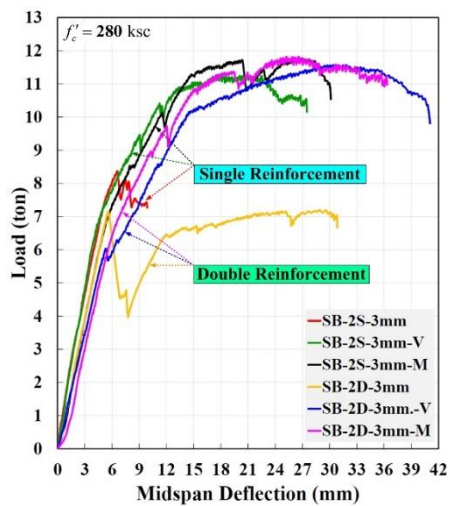
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่เสริมเหล็กกับแรงดึงอย่างเดียว



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่เสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานยึดติดแผ่นเหล็กหนา 4 มม. ที่เสริมเหล็กรับแรงดึงและเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานยึดติดแผ่นเหล็กหนา 3 มม. ที่เสริมเหล็กรับแรงดึงและเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด

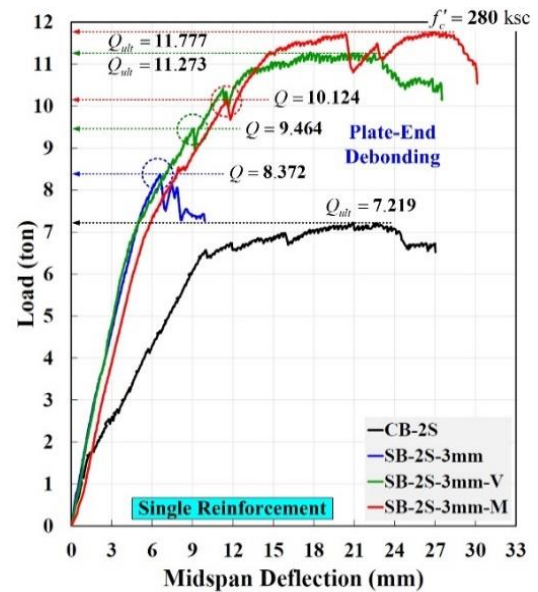
รายละเอียดการคำนวณค่าโมเมนต์ดัดต่าง ๆ ในตารางที่ 3 และ ตารางที่ 4 อธิบายได้ดังนี้ ค่า $M_{ult, test}$ และค่า $M_{cr, obs}$ หาได้จาก สมดุลของแรงและแผนภาพโมเมนต์ดัดของคานทดสอบ ส่วนค่า $M_{ult, mat}$ และ $M_{ult, des}$ คำนวณหาค่ามาได้จากสมดุลของแรงบน หน้าตัดคานโดยใช้ค่าผลทดสอบกำลังวัสดุและค่ากำลังระบุออกแบบ ตามตารางที่ 2 ตามลำดับ หลังจากนั้นให้หาค่าโมเมนต์ดัดของหน้า ตัดรอบแกนใดแกนหนึ่ง โดยค่าโมเมนต์ดัดประลัยของคานควบคุม และคานเสริมกำลังคำนวณตามวิธีกำลัง [1] และมีสมมติฐานของ แผ่นเหล็กเกิดการคราก [2], [3] ส่วนกรณีค่าโมเมนต์ดัดแตกร้า $M_{cr, mat}$ และ $M_{cr, des}$ ของทั้งคานควบคุมและคานเสริมกำลัง สามารถคำนวณมาจากค่าโมดูลัสแตกหัก (modulus of rupture: f_r) ของคอนกรีตโดยใช้วิธีการแปลงพื้นที่ที่หน้าตัดคานและหาค่า โมเมนต์เฉื่อยของหน้าตัด (moment of inertia) [1] – [3]

ตารางที่ 3 น้ำหนักบรรทุกทุกประลัยและโมเมนต์ดัดประลัย

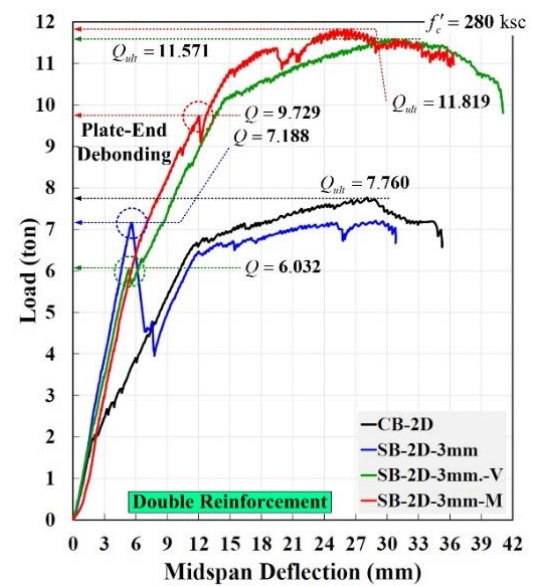
คาน	$Q_{ult, test}$ (ตัน)	$M_{ult, test}$ (ตัน-ม.)	$M_{ult, mat}$ (ตัน-ม.)	$M_{ult, des}$ (ตัน-ม.)
CB-2S	7.219	2.527	2.202	1.649
SB-2S-3mm	8.372	2.930	3.873	3.084
SB-2S-4mm	7.883	2.759	4.566	3.539
SB-2S-3mm-V	11.273	3.946	3.873	3.084
SB-2S-4mm-V	11.529	4.035	4.566	3.539
SB-2S-3mm-M	11.777	4.122	3.873	3.084
SB-2S-4mm-M	10.703	3.746	4.566	3.539
CB-2D	7.760	2.716	2.201	1.670
SB-2D-3mm	7.203	2.521	3.920	3.086
SB-2D-4mm	7.225	2.529	4.671	3.556
SB-2D-3mm-V	11.571	4.050	3.920	3.086
SB-2D-4mm-V	11.562	4.047	4.671	3.556
SB-2D-3mm-M	11.819	4.137	3.920	3.086
SB-2D-4mm-M	12.739	4.459	4.671	3.556
$Q_{ult, test}$ และ $M_{ult, test}$ คือ น้ำหนักบรรทุกทุกและโมเมนต์ดัดประลัยจากการทดสอบคาน				
$M_{ult, mat}$ และ $M_{ult, des}$ คือ โมเมนต์ดัดประลัยจากค่าการทดสอบวัสดุและจากค่าระบุออกแบบ				

ตารางที่ 4 น้ำหนักบรรทุกทุกแตกร้าวและโมเมนต์ดัดแตกร้าว

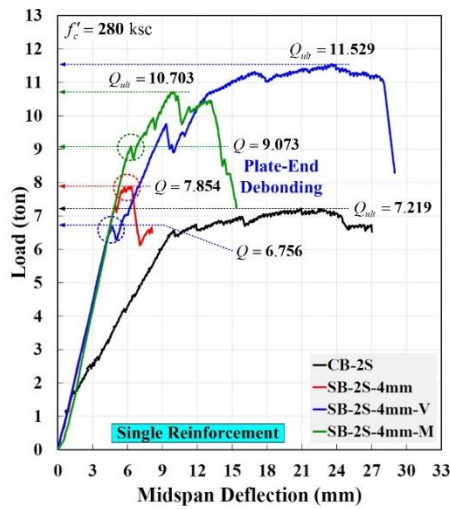
คาน	$Q_{cr, obs}$ (ตัน)	$M_{cr, obs}$ (ตัน-ม.)	$M_{cr, mat}$ (ตัน-ม.)	$M_{cr, des}$ (ตัน-ม.)
CB-2S	1.7	0.595	0.556	0.558
SB-2S-3mm	2.4	0.840	0.665	0.672
SB-2S-4mm	2.4	0.840	0.701	0.710
SB-2S-3mm-V	2.6	0.910	0.665	0.672
SB-2S-4mm-V	2.0	0.700	0.701	0.710
SB-2S-3mm-M	2.4	0.840	0.665	0.672
SB-2S-4mm-M	2.9	1.015	0.701	0.710
CB-2D	1.8	0.630	0.573	0.576
SB-2D-3mm	2.6	0.910	0.685	0.693
SB-2D-4mm	2.7	0.945	0.721	0.731
SB-2D-3mm-V	2.8	0.980	0.685	0.693
SB-2D-4mm-V	2.8	0.980	0.721	0.731
SB-2D-3mm-M	2.8	0.980	0.685	0.693
SB-2D-4mm-M	3.3	1.155	0.721	0.731
$Q_{cr, obs}$ และ $M_{cr, obs}$ คือ น้ำหนักบรรทุกทุกและโมเมนต์ดัดแตกร้าวสังเกตจากคานทดสอบ				
$M_{cr, mat}$ และ คือ โมเมนต์ดัดแตกร้าวจากค่าการทดสอบวัสดุ				
$M_{cr, des}$ คือ โมเมนต์ดัดแตกร้าวจากค่าระบุออกแบบ				



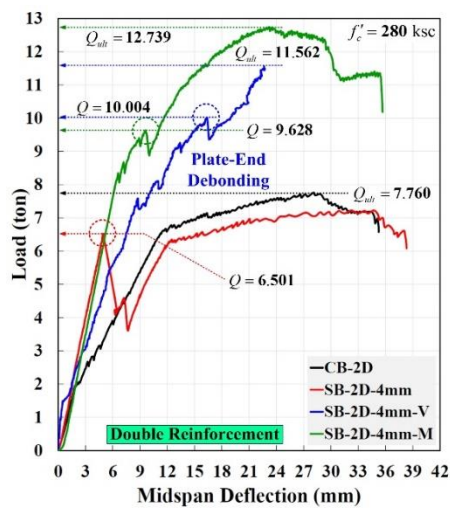
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุมและคานเสริมกำลังยึดติดแผ่นเหล็กหนา 3 มม. ที่เสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุมและคานเสริมกำลังยึดติดแผ่นเหล็กหนา 3 มม. ที่เสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการแอ่นตัวของคานควบคุมและคานเสริมกำลังยึดติดแผ่นเหล็กหนา 4 มม. ที่เสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว



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-2S	1.710	6.360	7.219	-
SB-2S-3mm	-	-	-	8.372
SB-2S-4mm	-	-	-	7.854
SB-2S-3mm-V	-	-	11.273	9.464
SB-2S-4mm-V	-	-	11.529	6.756
SB-2S-3mm-M	-	-	11.777	10.124
SB-2S-4mm-M	-	-	10.703	9.073
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
SB-2D-3mm-V	-	10.247	11.571	6.032
SB-2D-4mm-V	-	-	11.562	10.004
SB-2D-3mm-M	-	-	11.819	9.729
SB-2D-4mm-M	-	-	12.739	9.628

Q_{cr} คือ น้ำหนักบรรทุกแตกกร้าว: Q_y คือ น้ำหนักบรรทุกคราก
 Q_{ult} คือ น้ำหนักบรรทุกประลัย: Q_{debond} คือ น้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อน

เพื่อความสะดวกและเป็นการง่ายในการวิเคราะห์ผลจึงได้ทำการแยกการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ตามประเภทของการเสริมเหล็กภายในคานและความหนาแผ่นเหล็กที่ใช้ในการเสริมกำลัง โดยรูปที่ 9 และรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ของคานควบคุมและคานเสริมกำลังด้วยการยึดติดแผ่นเหล็กที่มีความหนา 3 มม. ในกรณีของคานที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงเพียงอย่างเดียวและกรณีคานที่เสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 11 และรูปที่ 12 ให้ความสัมพันธ์ของคานในลักษณะทำนองเดียวกันกับรูปที่ 9 และรูปที่ 10 หากแต่แผ่นเหล็กที่ใช้มีความหนา 4 มม. สำหรับค่าน้ำหนักบรรทุกกระทำต่าง ๆ บนคานตัวอย่างทดสอบที่ได้จากการพิจารณาความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4 และรูปที่ 9 ถึงรูปที่ 12 ได้ทำการรวบรวมและสรุปไว้ในตารางที่ 5

จากรูปที่ 4 ในกรณีของคานควบคุมและจากการพิจารณาแบบจำลองความสัมพันธ์อย่างง่ายแบบ 3 เส้นตรงพบว่า สามารถหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกตัว (Q_{cr}) ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกคราก (Q_y) และค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย (Q_{ult}) มาได้อย่างชัดเจนจากแบบจำลองสังเกตได้ว่า ค่า Q_{cr} และ Q_y ของคาน CB-2S และคาน CB-2D ที่ได้จากความสัมพันธ์และการสังเกตรอยร้าวเริ่มแรกในระหว่างทำการทดสอบให้ค่าที่ใกล้เคียงกันโดยมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นการบ่งชี้ว่า ผลของประเภทการเสริมเหล็กภายในคานไม่มีผลกระทบต่อค่า Q_{cr} และ Q_y ในคานควบคุมนี้ ส่วนค่า Q_{ult} ของคาน CB-2D ให้ค่าที่สูงกว่าคาน CB-2S ประมาณร้อยละ 7.5 และเมื่อทำการพิจารณาพฤติกรรมของคานควบคุมสามารถกล่าวได้ว่า คานควบคุมทั้ง 2 นี้มีพฤติกรรมเป็นแบบเหนียว (ductile behavior) โดยที่เหล็กเสริมรับแรงดึงเกิดการคราก (yielding) และคานมีการแอ่นตัวมาก [1]

จากรูปที่ 5 เริ่มต้นพิจารณาคาน SB-2S-3mm และ SB-2S-4mm ที่เป็นคานเสริมกำลังโดยการยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีอย่างเดียวยพบว่า คานเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด ทั้งนี้เป็นผลมาจากการหลุดล่อนบริเวณปลายของแผ่นเหล็กที่ด้านใดด้านหนึ่ง (plate-end debonding) หรืออาจเกิดการแยกตัวของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมบริเวณปลายแผ่นเหล็ก (concrete cover separation) [3] ดังรูปที่ 2 (ค) หรือเป็นการผสมผสานกันโดยเริ่มต้นจากการหลุดล่อนบริเวณปลายของแผ่นเหล็กขึ้นมาก่อนและเกิดการแยกตัวของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมตามมาในภายหลัง [8] ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) การวิบัติที่ได้กล่าวมาเหล่านี้มีสาเหตุเนื่องมาจากการเกิดความเค้นเฉือนและความเค้นลอก (shearing stress and peeling stress) ที่มีค่าสูงมากตรงบริเวณใกล้ๆ กับปลายแผ่นเสริมกำลัง [5,6] ซึ่งเป็นการวิบัติล่วงหน้าก่อนเวลากำหนด (premature failure) และเรียกรูปแบบการวิบัติในลักษณะนี้ว่า เป็นการวิบัติเนื่องจากการหลุดล่อน (debonding failure) [3] ส่งผลทำให้คานเกิดการสูญเสียพฤติกรรมคอมโพสิต (composite action) [2] และคานไม่สามารถพัฒนาความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกต่อไปได้อีกตามขีดความสามารถที่แท้จริงในการต้านทานกำลังของวัสดุบนหน้าตัดคาน คานจึงมีพฤติกรรมเป็นแบบเปราะ (brittle failure) และมีการแอ่นตัวน้อย ส่วนในกรณีของคานเสริมกำลังที่เหลืออีก 4 ตัวอย่างที่มีการยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีร่วมกับการใช้สลักเกลียวฝังยึด (anchored bolts) เพิ่มเติมพบว่า

คานมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับคานควบคุม CB-2S และคานที่เสริมกำลัง SB-2S-3mm และ SB-2S-4mm อย่างเห็นได้ชัดเจน [6], [7] ยกเว้นเมื่อทำการพิจารณาเฉพาะกรณีของคาน SB-2S-4mm-M ดังแสดงในรูปซึ่งสังเกตเห็นได้ว่า คานมีค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดและมีค่าการแอ่นตัวที่ต่ำกว่าคานอีก 3 ตัวอย่าง เนื่องจากเกิดการแยกตัวของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมบริเวณปลายแผ่นเหล็กดังรูปที่ 2 (ข) จึงอาจกล่าวได้ว่า คาน SB-2S-4mm-M มีพฤติกรรมแบบเปราะ ส่วนคานเสริมกำลังที่เหลือ 3 ตัวอย่างนั้นมีพฤติกรรมแบบเหนียวและมีการแอ่นตัวมาก

สำหรับในรูปที่ 6 สามารถอธิบายพฤติกรรมของคานในลักษณะทำนองเดียวกับคานในรูปที่ 5 หากแต่เป็นคานเสริมเหล็กภายในที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงร่วมกับเหล็กเสริมรับแรงอัดซึ่งสังเกตได้ว่า คาน SB-2D-3mm และ SB-2D-4mm ซึ่งเป็นคานเสริมกำลังโดยใช้การยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีอย่างเดียวยตามลำพัง คานเกิดการวิบัติเนื่องจากการหลุดล่อนเช่นเดียวกับคาน SB-2S-3mm และ SB-2S-4mm ดังแสดงในรูปที่ 5 แต่ได้ทำการให้น้ำหนักกับคานเพิ่มขึ้นต่อไปอีกเพื่อต้องการศึกษาพฤติกรรมหลังการวิบัติพบว่า คานมีความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวคล้ายคลึงกับคานควบคุม CB-2D และเกิดการวิบัติในท้ายที่สุดจากการบดอัดแตกของคอนกรีต (concrete crushing failure) ที่บริเวณหลังคานในช่วงของการเกิดโมเมนต์ดัดมากที่สุดใกล้กึ่งกลางความยาวช่วงพาดและมีค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยที่ต่ำกว่าคานควบคุมเล็กน้อย ทั้งนี้คาน SB-2D-3mm เกิดการวิบัติจากการหลุดล่อนบริเวณปลายของแผ่นเหล็กที่ด้านใดด้านหนึ่งดังรูปที่ 3 (ข) ส่วนคาน SB-2D-4mm เกิดการวิบัติจากการแยกตัวของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมดังรูปที่ 3 (ค)

สำหรับคาน SB-2D-4mm-V และคาน SB-2D-4mm-M เกิดการวิบัติจากการแยกตัวของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมบริเวณปลายแผ่นเหล็กดังในรูปที่ 3 (จ) และมีการวิบัติจากการหลุดล่อนบริเวณปลายของแผ่นเหล็กขึ้นมาก่อนและเกิดการแยกตัวของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมตามมาในภายหลังดังแสดงในรูปที่ 3 (ข) ตามลำดับ ส่วนคานที่เหลือคือ คาน SB-2D-3mm-V และคาน SB-2D-3mm-M พบว่า คานทั้ง 2 ตัวอย่างมีการวิบัติจากการบดอัดแตกของคอนกรีตที่หลังคานตรงบริเวณกึ่งกลางความยาวช่วงพาดดังรูปที่ 3 (ง) และรูปที่ 3 (ฉ) ตามลำดับ

เมื่อทำการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกระทำและการแอ่นตัวในรูปที่ 9 ถึงรูปที่ 12 สามารถสังเกตเห็นค่าน้ำหนักบรรทุกจากการหลุดล่อนได้อย่างชัดเจนในคานเสริมกำลังตามที่ได้ระบุไว้ในรูป โดยที่รูปที่ 9 และรูปที่ 11 เป็นกรณีของคานควบคุมและคานเสริมกำลังที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียวก่อนและในทำนองเดียวกัน รูปที่ 10 และรูปที่ 12 เป็นของกรณีของคานที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กรับแรงอัด

จากผลของการวิเคราะห์และการคำนวณหาค่าของโมเมนต์ดัดประลัย (M_{ult}) และค่าโมเมนต์ดัดแตกร้าเริ่มแรก (M_{cr}) ต่าง ๆ ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 และตารางที่ 4 ตามลำดับ พบว่า ค่า $M_{ult, test}$ ที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 ที่ได้จากผลของการทดสอบคานตัวอย่างให้ค่าที่สูงมากกว่าคานควบคุมโดยมีค่าแปรเปลี่ยนอยู่ระหว่าง 1.10-1.64 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับคานควบคุมในคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงอย่างเดียวก่อนและคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงร่วมกับเหล็กเสริมรับแรงอัด ยกเว้นในกรณีของคาน SB-2D-3mm และ SB-2D-4mm ที่ให้ค่าที่ต่ำกว่า และโดยส่วนใหญ่แล้วพบว่า ค่า $M_{ult, mat}$ ให้ค่าที่สูงกว่าค่า $M_{ult, test}$ เนื่องจากคานตัวอย่างทดสอบเกิดการสูญเสียพฤติกรรมคอมโพสิตตั้งแต่ก่อนการบ่มคอนกรีตและมีค่าสูงกว่าค่าของ $M_{ult, des}$ ในทุกกรณี ซึ่งเป็นการบ่งบอกให้เห็นว่าค่าของ $M_{ult, des}$ ที่คำนวณโดยใช้ค่ากำลังระบุในการออกแบบจากวัสดุให้ค่าที่ปลอดภัยด้วยวิธีกำลัง [1], [3]

สำหรับในตารางที่ 4 พบว่า ค่าของ $M_{cr, obs}$ ที่ได้มาจากการสังเกตรอยแตกร้าเริ่มแรกในระหว่างทำการทดสอบคานตัวอย่างให้ค่าที่สูงกว่าคานควบคุมโดยที่มีการแปรเปลี่ยนระหว่างค่า 1.18 และค่า 1.83 เท่า เมื่อทำการเปรียบเทียบและอ้างอิงกับคานควบคุมในทุกๆ กรณีและมีค่าที่สูงกว่า $M_{cr, mat}$ และ $M_{cr, des}$ ในทุกๆ กรณีของคานตัวอย่างทดสอบ ทั้งนี้เห็นได้ว่าค่า $M_{cr, mat}$ และค่า $M_{cr, des}$ ให้ค่าที่ใกล้เคียงและสอดคล้องกัน

เมื่อพิจารณาในตารางที่ 5 สำหรับค่าของน้ำหนักบรรทุกแตกร้า (Q_{cr}) ค่าน้ำหนักบรรทุกทุกคราก (Q_y) และค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย (Q_{ult}) ของคานควบคุมซึ่งสามารถหาค่ามาได้โดยทันทีจากการพิจารณาใช้แบบจำลองความสัมพันธ์แบบ 3 เส้นตรง [1] ส่วนค่าของน้ำหนักบรรทุกทุกคราก (Q_y) และค่าน้ำหนักบรรทุกประลัย (Q_{ult}) ของคานเสริมกำลังนั้น ซึ่งบางค่าไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนในทำนองเดียวกับค่าน้ำหนักบรรทุกแตกร้า (Q_{cr}) และค่าน้ำหนัก

บรรทุกจากการหลุดล่อนของแผ่นเหล็ก (Q_{debond}) โดยที่บางค่าสามารถสังเกตและหาค่าได้จากความสัมพันธ์

ทั้งนี้จากผลการศึกษาวิจัยพบว่า ความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ดัดประลัยของคานเสริมกำลังมีการแปรผันไปตามรูปแบบของการวิบัติที่เกิดขึ้นหากคานเสริมกำลังมีรูปแบบพฤติกรรมเป็นแบบเหนียวซึ่งให้ค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่สูงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับคานควบคุม หากแต่เมื่อคานเสริมกำลังมีรูปแบบของพฤติกรรมเป็นแบบเปราะทำให้ค่าของโมเมนต์ดัดประลัยในคานเสริมกำลังมีค่าที่สูงกว่าไม่มากนักเมื่อทำการอ้างอิงกับกรณีของคานควบคุม ดังนั้นแล้วจึงควรมีการให้ความสำคัญในประเด็นนี้สำหรับกรณีของการเสริมกำลังดัดในคาน ค.ส.ล. โดยใช้วิธีการยึดติดแผ่นเหล็กเสริมกำลังจากภายนอก จากการสำรวจผลงานวิจัยเมื่อไม่นานมานี้ [15] พบว่า ได้ให้ความสนใจศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณเหล็กปลอกที่มีอยู่เดิมในคาน ค.ส.ล. ก่อนที่จะมีการเสริมกำลังให้กับคานที่มีอยู่เดิมซึ่งมีผลในการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการเฉือนจากน้ำหนักบรรทุกกระทำจากภายนอกและส่งผลทำให้เกิดความเค้นเฉือนมากที่สุดบริเวณปลายแผ่นเสริมกำลัง

4. สรุป

จากผลลัพธ์ที่ได้ในการศึกษาเชิงทดลองและจากผลการคำนวณทางทฤษฎีที่ได้มีการนำเสนอในบทความนี้สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า คานเสริมกำลังที่มีการใช้วิธีการยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีเพียงอย่างเดียวมีโอกาสในการเกิดการวิบัติที่เกิดขึ้นแบบทันทีทันใดและมีพฤติกรรมเป็นแบบเปราะเนื่องจากเกิดการหลุดล่อนที่บริเวณปลายของแผ่นเหล็กออกจากผิวสัมผัสคอนกรีตอย่างสมบูรณ์โดยคานมีการแอ่นตัวที่น้อยและมีพฤติกรรมเป็นแบบเปราะหรือคานเสริมกำลังมีโอกาสเกิดการวิบัติจากการแยกตัวของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมหรือมีโอกาสเกิดการวิบัติแบบผสมระหว่างการวิบัติเนื่องจากเกิดการหลุดล่อนที่บริเวณปลายของแผ่นเหล็กและเกิดการแยกตัวของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมตามมาภายหลัง ในส่วนของคานเสริมกำลังโดยการยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีและมีสลักเกลียวฝังยึดเพิ่มเติมโดยส่วนใหญ่มีค่าการแอ่นตัวมากและคานมีพฤติกรรมเป็นแบบเหนียวแม้จะมีการหลุดล่อนเพียงบางส่วนของแผ่นเหล็กออกจากผิวสัมผัสคอนกรีตแต่คานเสริมกำลังยังคงมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกเพิ่มขึ้นได้อีกซึ่งบ่งชี้ได้ว่า คานเสริมกำลังมีพฤติกรรมคอมโพสิตในการร่วมกันต้านทานแรงกระทำจากภายนอก

ถึงกระนั้นก็ตาม จากผลดำเนินการศึกษานี้ อาจสามารถกล่าวได้ว่าการติดตั้งสลักเกลียวฝังยึดเพิ่มเติมไม่ได้เป็นการรับรองว่ามีความสามารถในการป้องกันการวิบัติจากการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กโดยสมบูรณ์ หากแต่เป็นการชะลอการวิบัติไม่ให้เกิดขึ้นในแบบทันทีทันใด ซึ่งสามารถทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของพฤติกรรมการวิบัติในคนเสริมกำลังจากแบบเปราะไปเป็นการวิบัติแบบเหนียว โดยเป็นพฤติกรรมที่พึงประสงค์ให้เกิดขึ้นในขณะที่มีการใช้งานในทางปฏิบัติ เพื่อเป็นการส่งสัญญาณเตือนระหว่างการใช้งานองค์อาคาร อย่างไรก็ตาม ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเชิงลึกสำหรับค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของการเสริมกำลังจากภายนอกได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] J.C. McCormac, *Design of Reinforced Concrete*. 5th ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons Inc., 2001.
- [2] D.J. Oehlers and M.A. Bradford, *Elementary Behaviour of Composite Steel and Concrete Structural Members*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 1999.
- [3] L.C. Hollaway and M.B. Leeming, *Strengthening of Reinforced Concrete Structures: Using Externally-Bonded FRP Composites in Structural and Civil Engineering*. Cambridge, MA, USA: Woodhead Publishing, 2001.
- [4] D.K. Eberline, F.W. Klaiber, and K. Dunker, "Bridge strengthening with epoxy-bonded steel plates," *Transp. Res. Rec.*, vol. 1180, pp. 7-11, 1988.
- [5] S. Zhang, M. Raoof, and L.A. Wood, "Prediction of peeling failure of reinforced concrete beams with externally bonded steel plates," *Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build.*, vol. 110, no. 3, pp. 257-268, Aug. 1995.
- [6] B.B. Adhikary and H. Mutsuyoshi, "Numerical simulation of steel-plate strengthened concrete beam by a non-linear finite element method model," *Constr. Build. Mater.*, vol. 16, no. 5, pp. 291-301, Jul. 2002.
- [7] M.Z. Jumaat and M.A. Alam, "Plate bonded strengthened R.C. beams with end and intermediate anchors," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 185-193, 2007.
- [8] M.Z. Jumaat and M.A. Alam, "Experimental and analytical investigations on the structural behaviour of steel plate and CFRP laminate flexurally strengthened reinforced concrete beams," *J. Appl. Sci.*, vol. 8, no. 23, pp. 4383-4389, Nov. 2008.
- [9] A. Bashandy, "Flexural strengthening of reinforced concrete beams using valid strengthening techniques," *Arch. Civ. Eng.*, vol. 59, no. 3, pp. 275-293, Sep. 2013.
- [10] H.M. Al-Hassani, S.A. Al-Ta'an, and A.A. Mohammed, "Behavior of damaged reinforced concrete beams strengthened with externally bonded steel plate," *Tikrit J. Eng. Sci.*, vol. 20, no. 2, pp. 48-59, Mar. 2013.
- [11] C. Czaderski and U. Meier, "EBR strengthening technique for concrete long-term behaviour and historical survey," *Polymers*, vol. 10, no. 1, Jan. 2018, Art. no. polym10010077.
- [12] Z. Yannian, X. Jun, and W. Liu, "Experimental study on RC T-section beams strengthened with bottom steel plates," *Jordan J. Civ. Eng.*, vol. 12, no. 3, pp. 502-515, Jan. 2018.
- [13] 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, no. 1, Mar. 2020, Art. no. 012012.
- [14] T. Theeraket, V. Tovarapong, P. Posayanant, P. Chantarawichit, D. Dy, and Y. Sompornjaroensuk, "Behavior of reinforced concrete beams strengthened by epoxy bonded and bolted steel plates," *Engineering Transactions*, vol. 25, no. 2 (53), pp. 110-121, July-Dec. 2022 (in Thai).
- [15] A.I. Al-Negheimish, A.K. El-Sayed, M.A. Al-Saawani, and A.M. Alhozaimey, "Effect of stirrups on plate end debonding in reinforced concrete beams strengthened with fiber reinforced polymers," *Polymers*, vol. 13, no. 19, Sep. 2021, Art. no. polym13193322.



ยศ สมพรเจริญสุข สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตและปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิตสาขาวิศวกรรมโยธา (สาขาวิชาเอก วิศวกรรมโครงสร้างและสาขาวิชารอง คณิตศาสตร์ประยุกต์) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี มีความสนใจศึกษาวิจัยในเรื่อง

ความฉลาดเชิงการคำนวณ เครือข่ายประสาทเทียม การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีในปัญหาทฤษฎีของแข็งที่มีความต่อเนื่อง กลศาสตร์การแตกหักและกลศาสตร์การสัมผัส การสร้างและประยุกต์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในปัญหาเชิงกายภาพและการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก