

การศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกและการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยการยึดติดแผ่นเหล็กประกบภายนอก

The Study of The Behavior and Failure Modes of Reinforced Concrete Beams Strengthened Enhanced by External Steel Plates

สถาพร ลือรุ่งรัตน์วุฒิ^{1*}

¹ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี จ.ปทุมธานี

*Corresponding author; E-mail address: sathaporn.eg.ptu@gmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลัง ด้วยการใส่แผ่นเหล็กประกบยึดติดกับคานด้วยการใช้อีพ็อกซี ร่วมกับการใช้สลักเกลียวภายใต้การทดสอบ จะทำการทดสอบการดัดแบบ 4 จุด คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการศึกษาเป็นคานคอนกรีตที่มีการเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กเสริมรับแรงอัดที่มีความกว้าง 15 เซนติเมตร ความลึก 20 เซนติเมตร และ ความยาว 240 เซนติเมตร จำนวน 5 ตัวอย่าง ประกอบด้วย คานควบคุม 1 ตัวอย่าง คานที่เสริมกำลัง 4 ตัวอย่าง ซึ่งมีรูปแบบในการเสริมกำลัง 2 รูปแบบ คือ การใช้แผ่นเหล็กประกบยึดติดกับผิวที่รับแรงดึง (ใต้ท้องคาน) และ การใช้แผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคานร่วมกับการโอบรัดด้วยแถบแผ่นเหล็กเป็นรูปตัวยู ในการทดสอบจะทำการทดสอบการดัดแบบ 4 จุด ซึ่งผลการศึกษาแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการแอ่นตัว รูปแบบการวิบัติ และพฤติกรรมการแตกร้าวของคานตัวอย่างทดสอบ

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า คานควบคุมจะวิบัติด้วยการดัดเนื่องจากแรงดึง คานที่เสริมกำลังด้วยการใช้แผ่นเหล็กประกบยึดติดกับผิวที่รับแรงดึงจะสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าคานควบคุมถึงร้อยละ 40-50 และมีลักษณะการวิบัติด้วยแรงเฉือน ขณะที่คานที่เสริมกำลังด้วยการใช้แผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคานร่วมกับการโอบรัดด้วยแถบแผ่นเหล็กเป็นรูปตัวยู จะสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าคานควบคุมถึงร้อยละ 70-80 และคานจะวิบัติเมื่อมีการหลุดร่อนของแผ่นเหล็กบางส่วนแบบไม่สมบูรณ์ ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นคอมโพสิตของคาน

คำสำคัญ: การเสริมกำลังคาน, คานคอนกรีตเสริมเหล็ก, แผ่นเหล็ก, สลักเกลียวแบบขยายตัว, การยึดติดแผ่นเหล็กด้วยอีพ็อกซีและสลักเกลียว

Abstract

This study investigates the behavior of reinforced concrete beams subjected to strengthening techniques. Steel plates were affixed to the beams using epoxy bonding supplemented with bolts for attachment, and the beams were tested under a four-

point bending configuration. The reinforced concrete beams used in this investigation had dimensions of 15 cm in width, 20 cm in depth, and a length of 240 cm, incorporating both tensile and compressive reinforcement. The study comprised five samples: one control beam and four strengthened beams. Strengthening actions were implemented in two configurations: with steel plates attached to the tension surface and with a combination of a steel plate at the bottom of the beam and a U-shaped steel plate band.

The results encompassed the load-deflection relationship, failure modes, and cracking behavior of the tested beams. The findings suggest that the control beam is susceptible to failure primarily due to tension-induced bending. Strengthened beams, reinforced by steel plates on the tension surface, exhibited increased loading capacities of 40% to 50%, compared to the control beam, along with characteristics of shear failure. In contrast, beams reinforced with a steel plate at the bottom and a U-shaped steel plate band displayed even greater enhancements in loading capacity, with improvements of 70% to 80%, respectively, over the control beam. However, it should be noted that incomplete detachment of steel plates may lead to failure and compromise composite integrity.

Keywords: Strengthening Beam, Reinforced Concrete Beam, Steel Plate, Expansion Bolts, Steel Plate Bonding With Epoxy and Expansion Bolts.

1. บทนำ

คอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมและมีการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในการก่อสร้างโครงสร้างอาคารทั่วไปและโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ กลไกสำคัญที่ทำให้ห้องค้ำของโครงสร้างคอนกรีตเสริม

เหล็กมีกำลังต้านทานต่อแรงกระทำภายนอก คือ การผนวกคุณสมบัติที่ดีของวัสดุ 2 ชนิด คือ คอนกรีตและเหล็กเสริม ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า คอนกรีตมีคุณสมบัติในการรับแรงอัดได้ดีมาก แต่ในทางตรงกันข้ามกลับรับแรงดึงได้ไม่มากนัก อีกทั้งยังมีความเปราะ และเมื่อคอนกรีตเกิดแรงดึงจนกระทั่งแรงดึงที่เกิดขึ้นนั้นมีค่ามากกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่ยอมให้ คอนกรีตจะเกิดการวิบัติแบบทันที ในขณะที่เหล็กเสริมมีความสามารถในการรับแรงดึงสูง เมื่อถูกนำมาใช้งานร่วมกันจะเกิดการการถ่ายเทแรงภายในระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงของวัสดุโดยรวมให้มากขึ้น และดียิ่งขึ้น เมื่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่ในสภาวะการใช้งานเป็นประจำและเป็นระยะเวลานานอาจเกิดความเสียหาย และ เกิดการเสื่อมสภาพ หรือ ถ้ามีสภาพการใช้งานที่ไม่ถูกต้องและเหมาะสม ซึ่งความเสียหายอาจเกิดขึ้นเมื่อเริ่มใช้งานหรือ บางครั้งอาจเกิดขึ้นหลังจากใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นไปแล้ว ช่วงเวลาหนึ่ง อาทิเช่น การแตกร้าว การสึกกร่อน และการแอ่นตัว หรือ การทรุดตัว ด้วยเหตุการณ์ต่างๆ นี่เป็นเหตุให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีการเสื่อมกำลังลงไป การเสื่อมถอยทางด้านกำลังเนื่องมาจากวัสดุที่ใช้ ความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการเกิดรอยร้าวนั้นอาจส่งผลให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความไม่ปลอดภัยในการใช้งานจึงจำเป็นต้องมีการซ่อมแซมหรือเสริมกำลัง โดยที่องค์อาคารที่จะพบเจอความเสียหายและรอยร้าวมากที่สุดนั้น คือ คานคอนกรีตเสริมเหล็ก

คานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นองค์อาคารที่สำคัญอย่างหนึ่งในโครงสร้างอาคาร โดยทั่วไปแล้วคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะได้รับการออกแบบให้รองรับน้ำหนักบรรทุกทุกที่กำหนด อย่างไรก็ตาม ในบางกรณี เช่น การเปลี่ยนแปลงการใช้งานอาคาร การเสื่อมสภาพของวัสดุ หรือข้อผิดพลาดในการออกแบบ อาจทำให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กต้องรับน้ำหนักเกินกว่าที่ออกแบบไว้ ส่งผลให้เกิดความเสียหายหรือการวิบัติของโครงสร้าง ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้ต้องมีการเสริมกำลังกับโครงสร้าง ซึ่งการเสริมกำลังมีหลายวิธี เช่น การขยายขนาดหน้าตัด การประกบด้วยวัสดุต่างชนิดกัน การเสริมเหล็กรับแรงดึงที่หลัง การลดแรงดัน การเติมวัสดุภายใน การเติมวัสดุภายนอก เป็นต้น [1] และ เมื่อทำการเสริมกำลังแล้วสามารถทำการทดสอบกำลังของโครงสร้างที่เสริมกำลังได้ ซึ่งสามารถทำการทดสอบได้ถึงเพียงน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน แต่ไม่สามารถทดสอบได้ถึงน้ำหนักบรรทุกประลัยได้เพราะอาคารยังต้องใช้งานอยู่

ปัจจุบันในการเสริมกำลังให้กับโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก นิยมใช้การยึดติดแผ่นเหล็ก หรือ วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP) ด้วยวัสดุประสานอีพ็อกซี (Epoxy) เพิ่มเติมที่ภายนอกนั้น ซึ่งสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา คือ การมีพฤติกรรมคอมโพสิตระหว่างองค์อาคารวัสดุเดิมและวัสดุใหม่ที่ใช้เสริมกำลัง และ ผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งส่งผลต่อความมีประสิทธิภาพของโครงสร้างเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะการใช้งาน [2-3] รูปแบบการเสริมกำลังด้วยการใช้แผ่นเหล็กประกบยึดติดกับผิวที่รับแรงดึงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงดัดของคานนั้นเป็นอีกหนึ่งวิธีที่นิยมใช้ในการซ่อม หรือ เสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอยู่เดิมเนื่องจากวิธีการซ่อมทำได้ไม่ยุ่งยากมากนัก ไม่ทำให้ความลึกของคาน

เพิ่มขึ้นมารวมไปถึงค่าก่อสร้างไม่แพงมากนัก เนื่องจากความสะดวกรวดเร็วในการก่อสร้างทำให้การใช้แผ่นเหล็กประกบยึดติดกับผิวที่รับแรงดึงของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงดัดของคานในกรณีที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กไม่สามารถรับแรงดัดได้ตามที่ต้องการจึงเป็นที่นิยม

การเสริมกำลังให้กับโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการใช้แผ่นเหล็กประกบยึดติดกับคานนั้น ได้รับความสนใจจากนักวิจัยและนักวิชาการ ทำให้มีการศึกษากันอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบันโดยเฉพาะในต่างประเทศ ซึ่งอย่างไรก็ตาม งานวิจัยก่อนหน้านี้ระบุว่า การเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กอาจเกิดปัญหาที่ จุดยึดเหนี่ยวของแผ่นเหล็ก โดยเฉพาะการแยกตัวออกจากคอนกรีตหากไม่มีระบบยึดเหนี่ยวที่เหมาะสม Jones, Swamy และ Ang [4] ได้แสดงให้เห็นถึงปัญหานี้ โดยได้ทำการทดสอบและศึกษาพฤติกรรมเชิงดัดทางด้านกำลังและการเสียรูปของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีปริมาณการเสริมเหล็กน้อย (under RC beam) และเสริมเหล็กมาก (over RC beam) เมื่อเสริมกำลังโดยยึดติดแผ่นเหล็กจากภายนอกด้วยกาว (วัสดุประสาน) ที่ผิวคอนกรีต ซึ่งในการศึกษาพบว่า การเสริมกำลังด้วยการติดแผ่นเหล็กที่ผิวนอกของคานทำให้ค่ากำลังประลัยในการรับน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกกรณีของคานที่ทดสอบ อีกทั้งรอยร้าวแรกที่สามารถสังเกตเห็นได้ (the first visible crack) ปรากฏช้าลงเมื่อทำการเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก และยังพบว่า คานเสริมกำลังมีโอกาสบ้อยครั้งที่เกิดการวิบัติแบบทันทีทันใด (sudden failure) โดยมีสาเหตุมาจากปัญหาการหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสระหว่างปลายแผ่นเหล็กและผิวคอนกรีต (plate-end debonding) หรือเกิดมีการแยกตัวออกของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม (concrete cover separation) ต่อมา Oehlers [5] ได้ทำการศึกษาผลของการลอก (peeling) เนื่องจากแรงเฉือนและปฏิกิริสัมพันธ์ระหว่างการลอกเฉือน (shear peeling) และการลอกดัด (flexural peeling) ในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังโดยติดแผ่นเหล็กที่ผิวด้านรับแรงดึง ผลการศึกษาพบว่า การหลุดล่อน (debonding) ที่ปลายแผ่นเหล็กเนื่องจากแรงเฉือนไม่ได้มีอิทธิพลมาจากการมีอยู่ของเหล็กปลอกแต่ขึ้นอยู่กับ การเกิดขึ้นของรอยร้าวเฉือนในแนวทแยง (diagonal shear crack formation) ที่ได้จากกำลังเฉือนในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีเหล็กปลอก (RC beam without stirrups) ขณะที่ Li, Assih และ Delmas [6] ศึกษาความหนาของวัสดุประสานที่ใช้ และ ความหนาของแผ่นเหล็กที่มีผลต่อพฤติกรรมเสริมกำลังในคานคอนกรีตล้วนด้วยการยึดติดแผ่นเหล็กที่ภายนอกคาน พบว่า ค่าความเครียดเมื่อเกิดรอยร้าวแรกบริเวณกลางช่วงคานจากการดัด ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามความหนาที่เพิ่มขึ้นของวัสดุประสาน และ ในช่วงพฤติกรรมยืดหยุ่น พบว่า ค่าความเครียดในคอนกรีตและในแผ่นเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้นในอัตราที่เท่ากัน แต่ ไม่แปรผันตามความหนาที่เพิ่มขึ้นของวัสดุประสาน ซึ่งจากผลการศึกษาของ Li, Assih และ Delmas [6] แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความหนาของวัสดุประสานที่ใช้ในการยึดเหนี่ยวกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กก็ได้ช่วยในการหลุดล่อนแต่อย่างไร จนกระทั่ง Sallam, Saba และคณะ [7] ได้แนะนำเทคนิคการป้องกันการวิบัติจากการลอกที่ปลายแผ่นเหล็กในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลัง โดยวิธีการที่ใช้มีอยู่ 2 วิธี

คือ ทำการแทนที่คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่ปลายแผ่นเหล็กโดยใช้ปูนกร้าท์ (grout) และ ใช้ระบบรอยยึดบีบอัดที่บริเวณปลายแผ่นเหล็ก Chang, Yan และ Tang [8] ได้ทำการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของรอยร้าวรูปแบบผสม (mixed-mode crack) ที่เกิดจากการวิบัติของคานคอนกรีตล้นที่ทำการเสริมกำลังโดยยึดติดแผ่นเหล็กจากภายนอก พบว่า มีการเกิดรอยร้าวในคอนกรีต และรอยร้าวจากการสูญเสียการยึดเกาะระหว่างคอนกรีตและแผ่นเหล็ก จากผลการศึกษาดังกล่าว แสดงให้เห็นว่า การเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่ติดตั้งภายนอกคานสามารถเพิ่มกำลังรับน้ำหนักของคานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ต้องคำนึงถึงปัญหาการลอกตัวที่ปลายแผ่นเหล็ก และการเสริมระบบยึดเหนี่ยวเพิ่มเติมเพื่อป้องกันการหลุดล่อน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบและเสริมกำลังโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ดังนั้นในบทความนี้ จะทำการศึกษาพฤติกรรมในการรับน้ำหนักบรรทุก และ ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กยึดติดกับผิวของคานด้วยการใช้ Epoxy และ สลักเกลียว โดยทำการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กในห้องปฏิบัติการ โดยผลของการศึกษาสามารถนำมาเป็นข้อพิจารณาในการเสริมกำลังให้กับคานในกรณีที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กไม่สามารถรับแรงดัดได้ตามที่ต้องการ เพื่อรับแรงกระทำภายนอกต่อไป

2. วิธีดำเนินการศึกษา

2.1 วัสดุและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

คอนกรีตที่ใช้ในการจัดทำตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก จะใช้เป็นคอนกรีตผสมเสร็จ (ready mixed concrete) ที่มีค่ากำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอก (cylinder concrete nominal compressive strength) มีค่าเท่ากับ 210 ksc. ทั้งนี้ผลการทดสอบของก้อนคอนกรีตตัวอย่างที่นำมาใช้ทำคาน มีค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 242.4 ksc.

เหล็กเสริมที่ใช้เสริมในคานคอนกรีตเป็นเหล็กข้ออ้อยขนาด DB12 ที่มีชั้นคุณภาพ SD40 ซึ่งมีกำลังในการรับแรงดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า 4,000 ksc. ใช้เป็นเหล็กเสริมรับแรงดึงและรับแรงอัด และ เหล็กเส้นกลมขนาด RB6 ที่มีชั้นคุณภาพ SR24 ซึ่งมีกำลังรับแรงดึงที่จุดคราก ไม่น้อยกว่า 2,400 ksc. ใช้เป็นเหล็กปลอก ทั้งนี้ผลการทดสอบกำลังครากของเหล็กข้ออ้อย DB12 มีค่าเท่ากับ 4,852 ksc. และ กำลังครากของเหล็กเส้นกลม RB6 มีค่าเท่ากับ 2,456 ksc.

แผ่นเหล็ก (steel plate) ที่ใช้ในการเสริมกำลังมีความหนาเท่ากับ 3 มิลลิเมตร และ 4 มิลลิเมตร ที่มีชั้นคุณภาพ Fe24 ซึ่งมีกำลังในการรับแรงดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า 2,400 ksc. ทั้งนี้ผลการทดสอบของแผ่นเหล็กที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ มีค่ากำลังรับแรงดึงที่จุดครากเท่ากับ 3,125.3 ksc. และ 3,646.7 ksc. ตามลำดับ

สลักเกลียว (Bolt) แบบ สลักเกลียวขยายตัว (Expansion Bolt) รุ่น PSP ที่มีขนาด M10 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร) ซึ่งมีความยาว 65 มิลลิเมตร และมีระยะฝัง 50 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงดึง 4 kN. และมีค่ากำลังรับแรงเฉือน 3.3 kN. ทั้งนี้ในการยึดติดแผ่นเหล็กที่ผิวหน้า

ของคานคอนกรีตด้านที่รับแรงดึงจะใช้อีพ็อกซี (Epoxy) ยี่ห้อ Sika โดยมีชั้นความหนาของอีพ็อกซีที่ใช้ประมาณ 3 มม.

ทั้งนี้คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

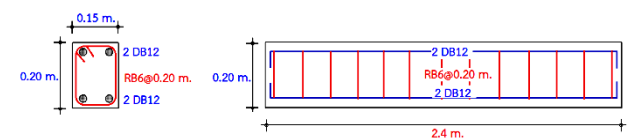
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้

วัสดุ	ค่าระบุออกแบบ	ค่าจากการทดสอบวัสดุ
กำลังอัดของคอนกรีต 210 ksc.	210 ksc.	242.4 ksc.
กำลังครากของเหล็ก DB12	4,000 ksc.	4,852 ksc.
กำลังครากของเหล็ก RB6	2,400 ksc.	2,456 ksc.
กำลังครากของแผ่นเหล็กหนา 3 มม.	2,400 ksc.	3,125.3 ksc.
กำลังครากของแผ่นเหล็กหนา 4 มม.	2,400 ksc.	3,646.7 ksc.

2.2 ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการศึกษา

ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการศึกษา เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ลึก 20 เซนติเมตร และยาว 240 เซนติเมตร จำนวน 5 ตัวอย่าง ซึ่งแบ่งเป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เสริมกำลัง (คานควบคุม) จำนวน 1 ตัวอย่าง , คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก (Strengthening RC. beam with steel plate) 4 ตัวอย่าง ซึ่งมีรูปแบบในการเสริมกำลัง 2 รูปแบบ คือ การใช้แผ่นเหล็กประกบยึดติดกับผิวที่รับแรงดึง (ใต้ท้องคาน) จำนวน 2 ตัวอย่าง และ การใช้แผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคานร่วมกับมีการโอบรัดด้วยแถบแผ่นเหล็กเป็นรูปตัวยู (U-wrap) จำนวน 2 ตัวอย่าง โดยคานตัวอย่างทั้งหมดมีรายละเอียด และ สัญลักษณ์เป็น ดังนี้

คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เสริมกำลัง (คานควบคุม) เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ลึก 20 เซนติเมตร และยาว 240 เซนติเมตร โดยเสริมเหล็กรับแรงดึงร่วมกับเหล็กเสริมรับแรงอัด (doubly RC beam) เป็นเหล็ก 2-DB12 และ เหล็กปลอกเป็น RB6 มีระยะเรียง 20 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 ทั้งนี้ คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เสริมกำลัง จะใช้ชื่อ BC1 เป็นชื่อเรียกคาน

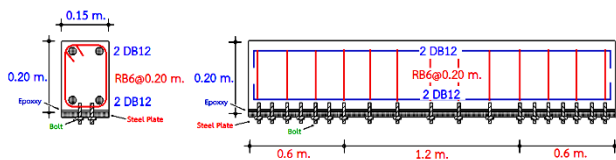


รูปที่ 1 คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เสริมกำลัง (คานควบคุม)

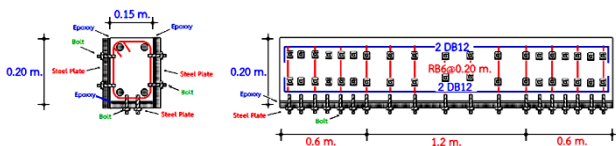
คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก โดยการ ใช้แผ่นเหล็กประกบยึดติดกับผิวที่รับแรงดึง (ใต้ท้องคาน) ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งแผ่นเหล็ก (steel plate) ที่ใช้มีความหนา 3 มิลลิเมตร และ 4 มิลลิเมตร ทำการยึดติดกับสลักเกลียวแบบขยายตัว (Expansion Bolt) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. (M10) โดยมีระยะฝังประมาณ 5 ซม. กับอีพ็อกซี (Epoxy) ยี่ห้อ Sika มีชั้นความหนาของอีพ็อกซีที่ใช้ประมาณ 3 มิลลิเมตร. ทั้งนี้ ระยะห่างของสลักเกลียวแบ่งเป็นช่วงระยะ 60 เซนติเมตร

วัดจากปลายคานทั้งสอง ใช้ระยะห่างของสลักเกลียวประมาณ 10 เซนติเมตร ขณะที่ช่วงระยะ 120 เซนติเมตร (ช่วงกลางของคาน) ใช้ระยะห่างของสลักเกลียวประมาณ 20 เซนติเมตร คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร และ 4 มิลลิเมตร จะใช้ชื่อ BST1A และ BST1B เป็นชื่อเรียกคานตามลำดับ ซึ่งรูปแบบของการเสริมกำลังนี้เหมาะแก่การเพิ่มความสามารถในการต้านทานต่อแรงดัด

สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก โดยการใช้แผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคาน และ มีการโอบรัดด้วยแถบแผ่นเหล็กรูปตัวยู (U-wrap) ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งแผ่นเหล็ก (steel plate) ที่ใช้มีความหนา 3 มิลลิเมตร และ 4 มิลลิเมตร ทำการยึดติดกับสลักเกลียวบริเวณใต้ท้องคานกับบริเวณเอวคานทั้ง 2 ด้าน โดยมีระยะห่างของสลักเกลียวเป็นเช่นเดียวกันกับคาน BST1A และ BST1B ทั้งนี้ คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร และ 4 มิลลิเมตร จะใช้ชื่อ BST2A และ BST2B เป็นชื่อเรียกคานตามลำดับ ซึ่งรูปแบบของการเสริมกำลังนี้เหมาะแก่การเพิ่มความสามารถในการต้านทานต่อแรงดัด และ แรงเฉือน



รูปที่ 2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังที่มีแผ่นเหล็กประกบยึดติดกับผิวที่รับแรงดัด (ใต้ท้องคาน)



รูปที่ 3 คานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังที่มีแผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคาน และ มีการโอบรัดด้วยแถบแผ่นเหล็กรูปตัวยู (U-wrap)

รายละเอียดต่างๆ ของคานตัวอย่างที่กล่าวมานั้นได้แสดงไว้ในตารางที่

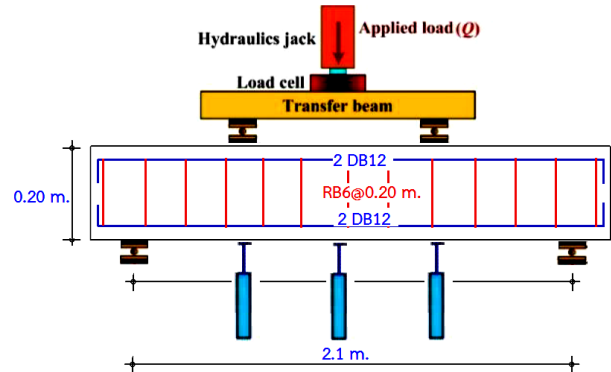
2

ตารางที่ 2 รายละเอียดของตัวอย่างคานทดสอบ

คาน	ประเภทคาน	ความหนาแผ่นเหล็ก
BC1	คานควบคุม (ไม่ได้เสริมกำลัง)	-
BST1A	คานเสริมกำลังที่มีแผ่นเหล็กยึดติดกับผิวที่ใต้ท้องคาน	3 mm.
BST1B	คานเสริมกำลังที่มีแผ่นเหล็กยึดติดกับผิวที่ใต้ท้องคาน	4 mm.
BST2A	คานเสริมกำลังที่มีแผ่นเหล็กยึดติดกับผิวที่ใต้ท้องคาน และ ที่เอวคาน (ตัว U)	3 mm.
BST2B	คานเสริมกำลังที่มีแผ่นเหล็กยึดติดกับผิวที่ใต้ท้องคาน และ ที่เอวคาน (ตัว U)	4 mm.

2.3 การทดสอบตัวอย่าง

ในการศึกษานี้จะทำการทดสอบโดยใช้น้ำหนักกระทำแบบ 4 จุด (four - point loading) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 รูปแบบการให้น้ำหนักบรรทุกกระทำบนคานตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 5 การทดสอบคานเสริมกำลัง

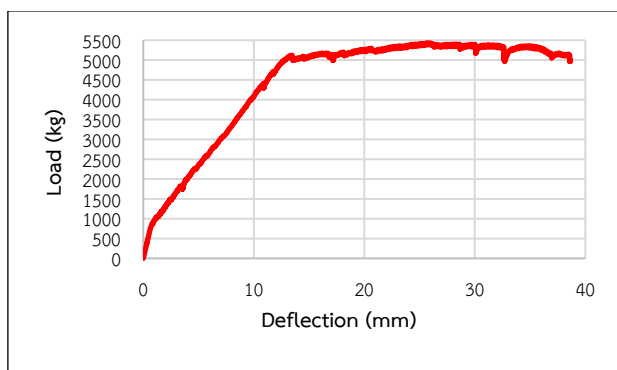
ในการทดสอบจะจัดวางคานบนฐานรองรับแบบง่าย (simple supports) แล้วมีความยาวของช่วงพาดระหว่างฐานรองรับทั้งสองข้าง (clear span length: L) เท่ากับ 2.1 เมตร วิธีการให้น้ำหนักบรรทุกกระทำลงบนตัวอย่างคานทดสอบ สามารถทำได้โดยใช้กระบอกแม่แรงไฮดรอลิกส์ (hydraulics jack) ที่มีขนาด 50 ตัน ทำการกดลงบนคานถ่ายแรง (transfer beam) และ ส่งผ่านน้ำหนักบรรทุกลงบนคานทดสอบเป็นแบบ 2 จุด (2-point loading) โดยมีตำแหน่งที่กดบนคานเท่ากับ 74 เซนติเมตร ที่วัดระยะห่างออกจากฐานรองรับทั้ง 2 ข้างของคานถ่ายแรง สำหรับการตรวจวัดขนาดของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำจะใช้อุปกรณ์มาตรวัดแรง (load cell) ในการทดสอบจะให้น้ำหนักกระทำกับคานอย่างค่อยเป็นค่อยไป จนกระทั่งคานคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการวิบัติ ในการทดสอบจะอ่านค่าแรงกด (P) และ ค่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกดนั้น พร้อมกับ การสังเกตรอยร้าว และ ทำการบันทึกรอยร้าว สำหรับการทดสอบคานเสริมกำลัง จะทำการให้น้ำหนักบรรทุกประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการทดสอบคานควบคุม จากนั้นนำคานออกจาก

เครื่องทดสอบ แล้วทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็ก จากนั้นนำคานกลับเข้าสู่เครื่องทดสอบเพื่อทำการให้น้ำหนักจนกระทั่งคานเกิดการวิบัติ ทั้งนี้ การทดสอบจะติดตั้ง Dial Gauge ที่กึ่งกลางคาน และ ที่ฐานรองรับของคานถ่ายแรง รวมทั้งสิ้น 3 ตำแหน่ง เพื่อวัดการโก่งตัวของคานทดสอบ

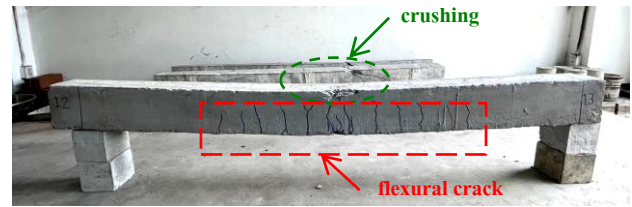
3. ผลการศึกษา

ผลของการศึกษาอธิบายพฤติกรรมในการรับน้ำหนักบรรทุก และ ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการทดสอบ และ นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ กับการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ทดสอบ

ผลของการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เสริมกำลัง (คาน BC1) เป็นดังแสดงไว้ในรูปที่ 6 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ตัวอย่างคานที่ทำการทดสอบสามารถรับแรงกระทำได้สูงสุด 5,432 กิโลกรัม ที่การแอ่นตัว 26 มิลลิเมตร เมื่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้รับแรงกระทำสูงสุดแล้ว คานคอนกรีตเสริมเหล็กยังไม่เกิดการวิบัติ และ ยังสามารถรับแรงกระทำได้อยู่ แต่ความสามารถของกำลังในการรับน้ำหนักของคานจะลดลงและวิบัติในที่สุด ตัวอย่างคานที่ทำการทดสอบจะเกิดรูปแบบของรอยแตกกว้างเนื่องจากการดัด (flexural crack) ขึ้นในคาน โดยรอยแตกกว้างเกิดขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางคานจากทั้งคานในลักษณะตั้งฉากกับแนวระนาบตามยาวคาน ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงตามแนวยาวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำหนักกระทำ รอยแตกกว้างจะเกิดมากขึ้นและพุ่งขึ้นเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้น จนเมื่อถึงกำลังรับแรงดัดประลัย คานที่ทดสอบจะเกิดการวิบัติในลักษณะการวิบัติด้วยการดัดเนื่องจากแรงดึง (Flexural Tension Failure) โดยที่เหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดครากก่อนเกิดการวิบัติในช่วงคอนกรีตรับแรงอัด และ การวิบัตินี้จะค่อยๆ เกิดขึ้น ซึ่งมีลักษณะการวิบัติแบบเหนียว (Ductile) ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เสริมกำลังเป็นไปตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 7



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ กับการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เสริมกำลัง (คาน BC1)

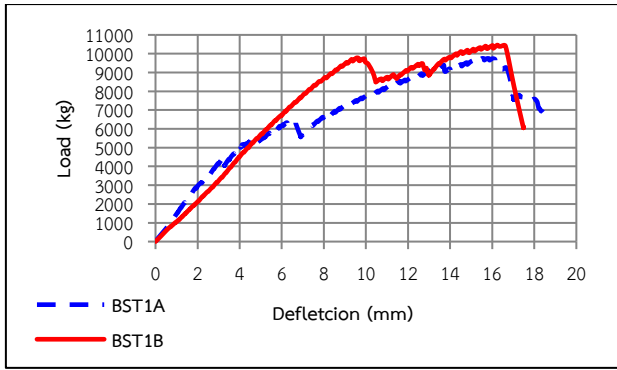


รูปที่ 7 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เสริมกำลัง (คาน BC1)

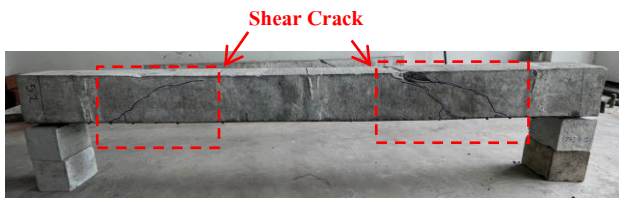
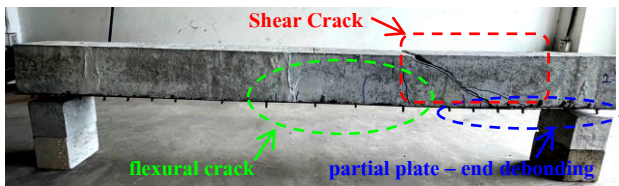
ในการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่จะทำการเสริมกำลังนั้น จะนำคานคอนกรีตเสริมเหล็กมาทำการให้น้ำหนักบรรทุก (pre-load) ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่ได้จากการทดสอบคานควบคุม BC1 เพื่อให้คานเกิดการแอ่นตัวในระดับหนึ่ง นั่นคือ ให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กรับน้ำหนัก 2,760 กิโลกรัม โดยที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการแอ่นตัว 6.6 มิลลิเมตร และ ที่สถานะนี้คานคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนการเสริมกำลังเริ่มเกิดการคราก

ผลของการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคาน (คาน BST1A และ คาน BST1B) แสดงไว้ในรูปที่ 8 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการเสริมกำลังนั้นจะสามารถรับแรงกระทำจนกระทั่งคานเกิดการคราก โดยมีรอยร้าวเกิดขึ้นเพียงชนิดเดียวที่บริเวณกึ่งกลางคาน เป็นเหตุให้คานสูญเสียกำลังในการรับน้ำหนัก แต่เนื่องจากผลของการเสริมกำลัง และการที่คานยังคงมีคุณสมบัติความเป็น composite อยู่ นั่นทำให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังสามารถรับน้ำหนักต่อไปได้ โดยที่คานยังไม่เกิดการวิบัติ แต่เมื่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังรับน้ำหนักบรรทุกกระทำสูงสุดแล้วคานจะเกิดการสูญเสียกำลังในการรับน้ำหนัก และเกิดวิบัติทันที โดยที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กหนา 3 มิลลิเมตร สามารถรับแรงกระทำได้สูงสุด 9,744 กิโลกรัม ที่การแอ่นตัว 16 มิลลิเมตร ขณะที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กหนา 4 มิลลิเมตร สามารถรับแรงกระทำได้สูงสุด 10,458 kg. ที่การแอ่นตัว 16.3 mm. ผลของการเพิ่มความหนาของแผ่นเหล็ก 1 มิลลิเมตร ส่งผลให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลังมีความสามารถในการรับแรงกระทำได้สูงสุดเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.83

ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลัง BST1A และ BST1B ที่ทำการทดสอบจะมีลักษณะความเสียหายและลักษณะการวิบัติคล้ายคลึงกัน ซึ่งจะเกิดรูปแบบของรอยแตกกว้างเนื่องจากการดัด (flexural crack) ขึ้นในคานก่อนเพียงเล็กน้อยที่บริเวณกึ่งกลางคาน และ เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกกระทำต่อนั้น คานจะเกิดการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กบางส่วนแบบไม่สมบูรณ์ (partial plate – end debonding) แต่คานยังไม่เกิดการวิบัติ คานสามารถรับแรงกระทำต่อไปได้อีก โดยที่คานมีพฤติกรรมเป็นแบบเหนียว (Ductile) คานจะวิบัติลักษณะแบบแรงเฉือน (Shear Crack) ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคานเป็นไปตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 9



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำกับการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคาน (คาน BST1A และ คาน BST1B)

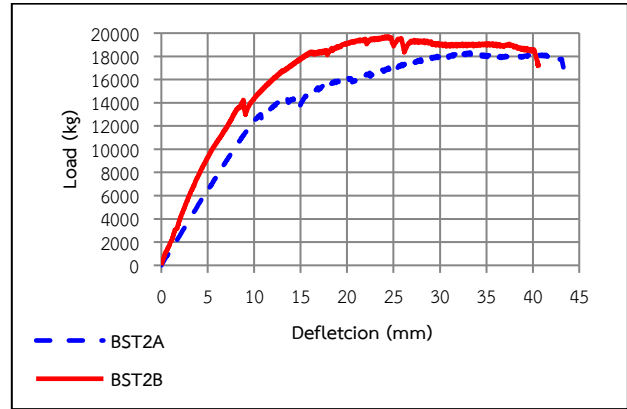


รูปที่ 9 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคานของคาน BST1A (บน) และ คาน BST1B (ล่าง)

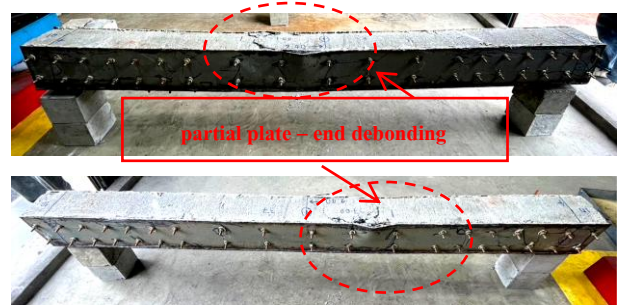
สำหรับผลของการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคาน และ มีการโอบรัดด้วยแถบแผ่นเหล็กรูปตัวยู (คาน BST2A และ คาน BST2B) แสดงไว้ในรูปที่ 10 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลังนั้นเมื่อรับแรงกระทำจนกระทั่งคานรับแรงกระทำสูงสุด คานจะสูญเสียกำลังในการรับแรงและวิบัติในที่สุด โดยที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กหนา 3 มิลลิเมตร สามารถรับแรงกระทำได้สูงสุด 18,329 กิโลกรัม ที่การแอ่นตัว 33 มิลลิเมตร ขณะที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กหนา 4 มิลลิเมตร สามารถรับแรงกระทำได้สูงสุด 19,722 kg. ที่การแอ่นตัว 24.5 mm. ผลของการเพิ่มความหนาของแผ่นเหล็ก 1 มิลลิเมตร ส่งผลให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลังมีความสามารถในการรับแรงกระทำได้สูงสุดเพิ่มขึ้นร้อยละ 7.06

ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลัง BST2A และ BST2B ที่ทำการทดสอบจะมีลักษณะความเสียหายและลักษณะการวิบัติคล้ายคลึงกัน ซึ่งคานจะวิบัติเมื่อเกิดการหลุดลอกของแผ่นเหล็กบางส่วน

แบบไม่สมบูรณ์ (partial plate – end debonding) ซึ่งเป็นเหตุให้ความเป็นคอมโพสิตของคานนั้นหายไป ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กโดยการใส่แผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคาน และ มีการโอบรัดด้วยแถบแผ่นเหล็กรูปตัวยู (U-wrap) เป็นไปตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 11



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำกับการแอ่นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคาน และ มีการโอบรัดด้วยแถบแผ่นเหล็กรูปตัวยู (คาน BST2A และ คาน BST2B)



รูปที่ 11 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคาน และ มีการโอบรัดด้วยแถบแผ่นเหล็กรูปตัวยู (U-wrap) ของคาน BST2A (บน) และ คาน BST2B (ล่าง)

ค่าความสามารถในการต้านทานโมเมนต์ดัดประลัยของคานตัวอย่างที่ทำการศึกษาค้นคว้าได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 ซึ่งแสดงค่าโมเมนต์ดัดประลัยของคานตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบ ($M_{U/test}$) ซึ่งหาได้จากสมมูลของแรงและแผนภาพโมเมนต์ดัด (bending moment diagram) และ ค่าโมเมนต์ดัดประลัยของคานตัวอย่างที่ได้จากทางทฤษฎีโดยใช้ค่าผลการทดสอบกำลังของวัสดุตามตารางที่ 1 ($M_{U/mat}$) และจากการใช้ค่ากำลังของวัสดุที่ระบุ ($M_{U/des}$) ซึ่งคำนวณได้จากการวิเคราะห์หน้าตัดด้วยสมการสมมูลของแรงบนหน้าตัดคาน และหาค่าโมเมนต์ดัดของหน้าตัดรอบแกนใดแกนหนึ่ง ทั้งนี้ค่าโมเมนต์ดัดประลัยที่ได้จากทางทฤษฎีคำนวณได้จากวิธีกำลัง โดยมีสมมติฐานว่า แผ่นเหล็กเกิดการคราก สำหรับค่าความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนประลัยของคานตัวอย่างที่ทำการศึกษาค้นคว้าได้แสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 โมเมนต์ดัดประลัยของตัวอย่างคานทดสอบ

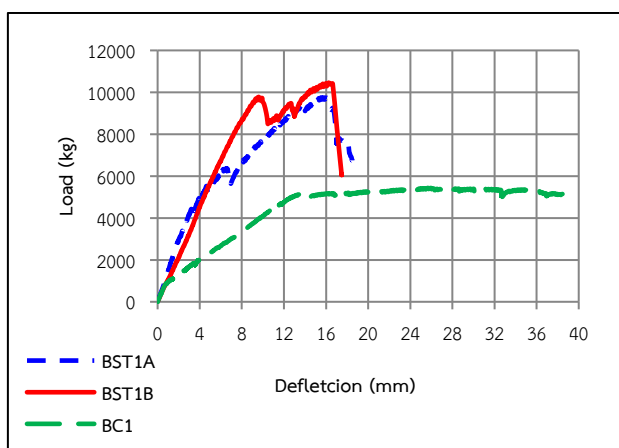
คาน	$M_{U/test}$ (kg-m.)	$M_{U/mat}$ (kg-m.)	$M_{U/des}$ (kg-m.)
BC1	1,901	1,434	1,189
BST1A	3,410	2,297	1,872
BST1B	3,660	2,687	2,068
BST2A	6,415	4,850	4,002
BST2B	6,902	5,130	4,426

ตารางที่ 4 แรงเฉือนประลัยของตัวอย่างคานทดสอบ

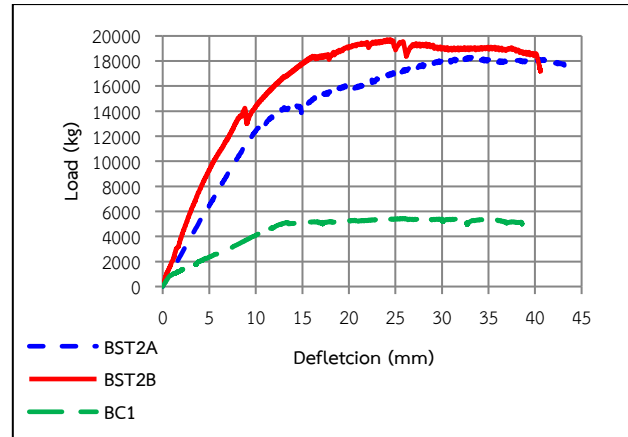
คาน	$V_{U/test}$ (kg.)	$V_{U/mat}$ (kg.)	$V_{U/des}$ (kg.)
BC1	2,716	2,676	2,536
BST1A	4,872	3,286	2,943
BST1B	5,229	3,378	3,196
BST2A	9,164	17,676	14,056
BST2B	9,861	26,010	17,896

4. เปรียบเทียบผลการศึกษา

การเปรียบเทียบผลการศึกษาของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นคานควบคุม (คานที่ไม่ได้เสริมกำลัง) กับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคาน และกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคาน และ มีการโอบรัดด้วยแถบแผ่นเหล็กรูปตัวยู แสดงไว้ในรูปที่ 12 และ รูปที่ 13 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่า คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยการใช้แผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคานจะสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าคานควบคุมถึงร้อยละ 40-50 ขณะที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการเสริมกำลังด้วยการใช้แผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคานและ มีการโอบรัดด้วยแถบแผ่นเหล็กรูปตัวยู จะสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าคานควบคุมถึงร้อยละ 70-80



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับการแอ่นตัวของคานควบคุม และ คานคอนกรีตที่ได้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคาน



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับการแอ่นตัวของคานควบคุม และ คานคอนกรีตที่ได้ทำการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคาน และ มีการโอบรัดด้วยแถบแผ่นเหล็กรูปตัวยู

จากตารางที่ 3 และ 4 พบว่า ค่าโมเมนต์ดัดประลัยและแรงเฉือนประลัยของคานเสริมกำลังในทุกรูปแบบจะให้ค่าที่สูงกว่าคานควบคุม ทั้งนี้ ค่าโมเมนต์ดัดประลัยและแรงเฉือนประลัยจากผลการทดสอบของคานควบคุมให้ค่าสูงกว่าค่าโมเมนต์ดัดประลัยและแรงเฉือนประลัยของคานควบคุมที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี เช่นเดียวกันกับกรณีของคานที่มีการเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคาน ขณะที่คานเสริมกำลังด้วยแผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคาน และ มีการโอบรัดด้วยแถบแผ่นเหล็กรูปตัวยูจะให้ค่าโมเมนต์ดัดประลัยจากการทดสอบสูงกว่าค่าทางทฤษฎี แต่ ค่าแรงเฉือนประลัยจากการทดสอบจะต่ำกว่าค่าทางทฤษฎี อาจเป็นเพราะมาจากคานเสริมกำลังเกิดการวิบัติเนื่องจากการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กบางส่วนที่บริเวณเอวคาน ซึ่งทำให้คานเกิดการสูญเสียการรับน้ำหนักไป

5. สรุปผลการศึกษา

จากการทดสอบตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการศึกษาพบว่า คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นคานควบคุมที่ไม่ได้เสริมกำลัง สามารถรับแรงกระทำได้สูงสุด ซึ่งเมื่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงกระทำสูงสุดแล้วคานคอนกรีตเสริมเหล็กยังไม่เกิดการวิบัติ และยังสามารถรับแรงกระทำได้อยู่ แต่ความสามารถของกำลังในการรับน้ำหนักของคานจะลดลง พฤติกรรมของคานควบคุมที่ทดสอบจะเกิดการวิบัติในลักษณะการวิบัติด้วยการดึงเนื่องจากแรงดึง (Flexural Tension Failure) โดยที่เหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดครากก่อนเกิดการวิบัติในช่วงคานรับแรงอัด และ การวิบัตินี้จะค่อยๆ เกิดขึ้น ซึ่งมีลักษณะการวิบัติแบบเหนียว (Ductile) โดยรอยแตกจะเกิดขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางคานจากท้องคานในลักษณะตั้งฉากกับแนวระนาบตามยาวคาน ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงตามแนวยาวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำหนักกระทำ รอยแตกจะเกิดมากขึ้นและพุ่งขึ้นเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้น จนเมื่อถึงกำลังรับแรงดัดประลัย สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการเสริมกำลังด้วยการใช้แผ่นเหล็กประกบยึดติดใต้ท้องคานจะ

สามารถรับแรงกระทำจนกระทั่งเกิดการคราก โดยมีรอยร้าวเนื่องจากการดัด (flexural crack) ขึ้นในคานก่อนเพียงเล็กน้อยที่บริเวณกึ่งกลางคาน และ เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำต่อนั้น คานจะเกิดการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กบางส่วนแบบไม่สมบูรณ์ (partial plate – end debonding) แต่คานยังไม่เกิดการวิบัติ และเนื่องจากการจับยึดด้วยสลักเกลียวนั้น ซึ่งเป็นการรักษาและคงไว้ซึ่งพฤติกรรมแบบคอมโพสิต จึงส่งผลให้คานมีการป้องกันการสูญเสียกำลัง ซึ่งทำให้คานมีความสามารถในการรับแรงกระทำต่อไปได้ เมื่อคานรับน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำสูงสุดแล้วคานจะเกิดการวิบัติทันที โดยที่คานมีพฤติกรรมเป็นแบบเหนียว (Ductile) และคานจะวิบัติลักษณะแบบแรงเฉือน (Shear Crack) โดยที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยการใช้แผ่นเหล็กประกบยึดติดได้ทั้งคานจะสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าคานควบคุมถึงร้อยละ 40-50 ขณะที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการเสริมกำลังด้วยการใช้แผ่นเหล็กประกบยึดติดได้ทั้งคานและ มีการโอบรัดด้วยแถบแผ่นเหล็กรูปตัวยู จะสามารถรับแรงกระทำได้สูงสุด โดยเมื่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงกระทำสูงสุดแล้ว คานจะวิบัติเนื่องจากเกิดการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กบางส่วนแบบไม่สมบูรณ์ (partial plate – end debonding) โดยที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยการใช้แผ่นเหล็กประกบยึดติดได้ทั้งคานร่วมกับการโอบรัดด้วยแถบแผ่นเหล็กเป็นรูปตัวยู จะสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่าคานควบคุมถึงร้อยละ 70-80

กำลัง และ ความสามารถในการรับน้ำหนักของคานที่เสริมกำลังจะขึ้นอยู่กับวิธีการยึดติดแผ่นเหล็กประกบภายนอก อย่างไรก็ตามความสามารถในการรับน้ำหนักสูงสุดของคานที่เสริมกำลังด้วยการยึดติดแผ่นเหล็กประกบภายนอก จำเป็นต้องพิจารณาผลของการวิบัติล่วงหน้าก่อนเวลากำหนดจากการหลุดล่อนของแผ่นเหล็กบางส่วนแบบไม่สมบูรณ์ (partial plate – end debonding) ซึ่งไม่สามารถคาดคะเนผลการวิบัติล่วงหน้าได้เนื่องจากคานมีลักษณะเป็นคอมโพสิต ดังนั้นในการพิจารณาการออกแบบเสริมกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของคานโดยใช้รูปแบบการยึดติดแผ่นเหล็กประกบภายนอกนั้น ต้องให้ความสำคัญกับวิธีการยึดทั้งขั้นตอนของการออกแบบ และ ขั้นตอนในการก่อสร้าง

สำหรับบทความนี้ ผู้วิจัยขอเสนอแนะแนวทางเป็นพอสังเขป ดังนี้ แผ่นเหล็กที่ใช้ควรมีความหนาอย่างน้อย 3 มิลลิเมตร และต้องมีการเตรียมผิวของแผ่นเหล็กให้สะอาดปราศจากคราบต่างๆ สำหรับตัวยึดประสาน (Adhesive) ซึ่งเป็นส่วนที่ช่วยให้แผ่นเหล็กสามารถยึดเกาะกับโครงสร้างและ ช่วยในการถ่ายน้ำหนักมาที่แผ่นเหล็ก วัสดุประสานที่ใช้โดยทั่วไป คือ อีพ็อกซี โดยอีพ็อกซีต้องสามารถรับกำลังได้เต็มที่หลังจากการติดตั้งแล้ว 7 วัน และมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมของโครงสร้าง ไม่มีการหดตัวหลังจากการติดตั้ง สามารถให้กำลังในการยึดเกาะและถ่ายแรงรับน้ำหนักได้ ขณะที่สลักเกลียวจะใช้ร่วมกับอีพ็อกซีในการถ่ายแรงระหว่างโครงสร้างเดิมกับแผ่นเหล็ก อาจจะใช้เป็นสลักเกลียวเชิงกล (Mechanical Bolt) หรือ สลักเกลียวเคมี (Chemical Bolt) ทั้งนี้สลักเกลียวควรวางในแนวเดียวกันตามขวางอย่างน้อยสองตัว โดยเว้นระยะห่างให้เพียงพอเพื่อให้สามารถรับแรงเฉือนและแรงดึงที่เกิดระหว่างแผ่นเหล็ก กับ คาน

คอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับระยะฝั่งในคอนกรีตขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสลักเกลียว สุดท้ายในการเตรียมพื้นผิวคอนกรีตต้องมีการเตรียมพื้นผิวอย่างดีโดยการขัดสีให้ผิวสะอาดเรียบ บางครั้งอาจจะต้องมีการกะเทาะเอาผิวส่วนนอกออกเพื่อให้ถึงเนื้อคอนกรีตที่รับแรงโดยตรง ถ้าหากมีรอยแตกหรือรูโหว่ต้องทำการอัด (Grout) ด้วยอีพ็อกซีซีเมนต์ก่อน จากนั้นจึงดำเนินการเจาะรูเพื่อติดตั้งสลักเกลียว โดยให้ความลึกอยู่ที่ระดับอย่างน้อยเท่ากับตำแหน่งของเหล็กเสริมรับแรงด้านล่างในกรณีที่ยึดได้ทั้งคานสำหรับการติดตั้งด้านข้างคานจะเจาะจนถึงตำแหน่งของเหล็กปลอก [1]

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัย ขอขอบพระคุณนักศึกษาและบุคลากรในสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานีที่สละเวลาเวลาอันมีค่า ช่วยผู้วิจัยจัดทำตัวอย่างและทำการทดสอบ สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ รศ.สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์ ที่เป็นแรงบันดาลใจและชี้แนะแนวทางให้กับผู้วิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] พุทธิพงษ์ ทะสิทธิ์วัฒนา, "การเสริมกำลังของคานคอนกรีตโดยการติดตั้งแผ่นเหล็ก," วารสารคอนกรีต, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2551.
- [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] 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.
- [5] Oehlers D.J. Reinforced concrete beams with plates glued to their soffits. *J Struct Eng.* 1992;118: 2023-2038.
- [6] 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.
- [7] H.E.M. Sallam, A.M. Saba, H.H. Shahin, and H. Abdel-Raouf, "Prevention of peeling failure in plated beams," *J. Advanced Concrete Technology.*, vol. 2, pp. 419-429, 2004.
- [8] Chang X, Yan A, Tang C. Numerical simulation of mixed-mode crack induced failure of steel plate strengthened concrete beam. *Adv Mat Res.* 2011; 152-3:171-4