



ประสิทธิภาพของคานคอมโพสิตสำเร็จรูปภายใต้แรงดัดในภาวะใช้งานและภาวะสุดขีด

อัฟพาน กาชอ ภัฏจัน ศรีสุวรรณ นิตศักดิ์ หมัดเต็น และ ทนงศักดิ์ อิ่มใจ*

สำนักวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

จักรพล ทิพย์สุวรรณ

กรรมการผู้จัดการ บริษัท เอโอ สตีล จำกัด

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 7567 2399 อีเมล: thanongsak_im@wu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.12.006

รับเมื่อ 18 ตุลาคม 2564 แก้ไขเมื่อ 28 กุมภาพันธ์ 2565 ตอรับเมื่อ 26 เมษายน 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 12 ธันวาคม 2566

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาทำการทดลองและเชิงตัวเลขตรวจสอบประสิทธิภาพของคานคอมโพสิตสำเร็จรูปที่ทำจากเหล็กแผ่นรีดร้อนและคอนกรีต การผสมผสานระหว่างเหล็กและคอนกรีตทำได้โดยรูปแบบการตัดแผ่นเอวที่คานเหล็กที่แตกต่างกัน รูปร่างของการตัด มีสามแบบประกอบด้วย การตัดครึ่งฉลาม (SF-cut) การตัดเดี่ยว (TN-cut) และกันหอย (MCL-cut) เพื่อสร้างคานคอนกรีตสำเร็จรูป จากผลการทดสอบคานเสริมเหล็กคอมโพสิตหน้าตัด MCL-cut มีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก และรับโมเมนต์สูงสุด รองลงมาเป็น SF-cut และ TN-cut จากศึกษาประสิทธิภาพของคานทดสอบเมื่อพิจารณา ค่าการโก่งตัวที่กลางคานต่อน้ำหนักบรรทุกของคานคอมโพสิตทั้งสามแบบแล้ว SB-1(TN-cut) มีค่ามากที่สุด รองลงมา คือ SB-2(SF-cut) และที่น้อยที่สุด คือ SB-3(MCL-cut) ดังนั้น SB-3(MCL-cut) ที่มีค่าการโก่งตัวที่กลางคานน้อยที่สุดจึงเป็นคานคอมโพสิตที่ดีที่สุด การทำนายค่าโมเมนต์ดัดประลัยจากการวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้การจำลองการวิบัติของคอนกรีตแบบ CDP Model (Concrete Damaged Plasticity) สำหรับคานคอมโพสิตให้ผลการทำนายใกล้เคียงกับผลการทดสอบที่น้ำหนักสูงสุด และมีค่าน้อยกว่าผลที่ได้จากการทดสอบหลังจากน้ำหนักสูงสุด 5%

คำสำคัญ: คานคอมโพสิต คานสำเร็จรูป ภาวะใช้งาน ภาวะขีดสุด ไฟไนต์เอลิเมนต์

การอ้างอิงบทความ: อัฟพาน กาชอ, ภัฏจัน ศรีสุวรรณ, นิตศักดิ์ หมัดเต็น, ทนงศักดิ์ อิ่มใจ และ จักรพล ทิพย์สุวรรณ, “ประสิทธิภาพของคานคอมโพสิตสำเร็จรูปภายใต้แรงดัดในภาวะใช้งานและภาวะสุดขีด,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 34, ฉบับที่ 1, หน้า 1-14, เลขที่บทความ 241-145554, ม.ค.-มี.ค. 2567.



Service and Ultimate Performance of Simply-Support Precast Composite Beams

Affan Kasor, Kan Srisuwan, Nitisak Madden and Thanongsak Imjai*

School of Engineering and Technology, Walailak University, Nakhon Si Thammarat, Thailand

Jakkapol Tipsuwan

Managing Director , AO Steel Co., Ltd., Phra Nakhon Si Ayutthaya, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 7567 2399, E-mail: thanongsak_im@wu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.12.006

Received 18 October 2021; Revised 28 February 2022; Accepted 26 April 2022; Published online: 12 December 2023

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This paper aims to carry out an experimental and numerical investigation of the performance of simply supported precast composite beams made of a hot-rolled steel section fixed in concrete. The composite action between steel and concrete was achieved by different web-cutting configurations. Three different web shapes consisting of shark fin-cut, tenon cut and modified clothoidal-cut of web dowel were used to construct the precast concrete beams. Based on the test result, the precast beam with modified clothoidal-cut of web dowel yields the highest characteristics of both stiffness and ultimate capacity as compared with the tenon, and shark-fin cuts, respectively. Predicted loads from non-linear FEA using a concrete damage plasticity model showed a good agreement with the experimental results at peak loads. After the post-peak, the numerical predictions was found to underestimate the load by up to 5%.

Keywords: Composite Beam, Precast Beam, Serviceability, Ultimate State, Finite Element Analysis

Please cite this article as: A. Kasor, K. Srisuwan, N. Madden, T. Imjai, and J. Tipsuwan, "Service and ultimate performance of simply-support precast composite beams," *The Journal of KMUTNB*, vol. 34, no. 1, pp. 1–14, ID. 241-145554, Jan.–Mar. 2024 (in Thai).

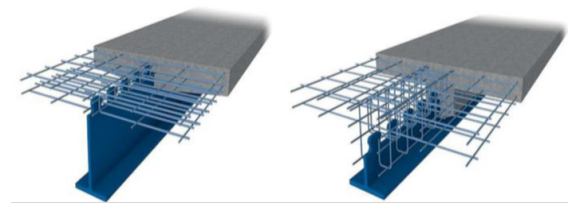
1. บทนำ

ในปัจจุบันคานคอมโพสิตสร้างจากคานเหล็กและคอนกรีต นับเป็นนวัตกรรมการก่อสร้างรูปแบบใหม่ที่เน้นการหล่อสำเร็จจากโรงงาน และนำไปติดตั้งที่สถานที่ก่อสร้างเพื่อช่วยลดเวลาการก่อสร้าง เช่นการก่อสร้าง งานซ่อมแซมสะพานรถไฟ ซึ่งต้องออกแบบลดเวลาในการก่อสร้างที่มากที่สุด เพื่อให้กระทบต่อการจราจร ตัวอย่างเช่น ในประเทศเยอรมัน ใช้คานคอมโพสิต พัฒนาขึ้นในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เรียกว่า Precobeam (Prefabricated Composite Beam) สำหรับติดตั้งสะพานข้ามรถไฟเพียง 3 ชั่วโมง [1] ดังแสดงในรูปที่ 1

ในประเทศไทยคานคอมโพสิตเข้ามามีบทบาทในงานก่อสร้างอาคารมากขึ้น อีกทั้งยังได้รับความนิยม และถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในการก่อสร้างเช่น โรงแรม โรงพยาบาล รวมไปถึงสะพาน เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ความงาม และสิ่งแวดล้อม ให้กับโครงสร้างอาคารนั้นได้ [2] ในส่วนของโครงสร้างที่ได้รับความนิยมและถูกนำมาประยุกต์ใช้โดยเฉพาะในยุโรป คือ คานเดือยคอมโพสิต (Composite Dowels Beam) โดยการตัดเหล็กรูปพรรณต่อเนื่องตามแนวของคาน I-Beam ซึ่งอยู่ในส่วนล่างของคาน และปิดคานตามความกว้างของปีกคานเหล็ก และมีส่วนของเดือยคอมโพสิตที่เชื่อมต่อระหว่างเหล็กและคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งมีการออกแบบเดือยคอมโพสิตนี้เพื่อให้มีความสามารถในการยึดเกาะกับคอนกรีตได้ดี จึงมีรูปร่างเฉพาะที่ฝังอยู่ภายในของคอนกรีตเสริมเหล็ก การใช้คานเดือยคอมโพสิตจะช่วยลดความกว้างของคานได้ ในเชิงเศรษฐกิจแล้วมีการใช้งานภายในแถบยุโรปที่แสดงให้เห็นแล้วว่าสามารถแข่งขันในเชิงพาณิชย์ได้ เทคโนโลยีนี้มีระยะเวลาอันสั้นในการก่อสร้างและกระบวนการผลิตที่คุ้มค่า ดังแสดงในรูปที่ 2 ในส่วนของการวิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างเชิงประกอบระหว่างเหล็กกับคอนกรีตภายใต้น้ำหนักที่กระทำต่อคานได้มีการเปรียบเทียบความแตกต่างของเดือยคอมโพสิตในรูปแบบต่างๆ ไว้ว่าชนิดใดสามารถรับน้ำหนักบรรทุกและในขณะเดียวกันเดือยชนิดใดที่มีการยึดระหว่างเหล็กและคอนกรีตเสริมเหล็กได้ดีกว่ากันสอดคล้องไปด้วย การศึกษา



รูปที่ 1 การขนส่งคานเหล็กเดือยคอมโพสิตระบบสำเร็จรูปในต่างประเทศ [1]



รูปที่ 2 ตัวอย่างรูปแบบคานเดือยคอมโพสิต [2]

โดยวิธีการทดสอบนี้แสดงให้เห็นพฤติกรรมจากโครงสร้างได้เป็นอย่างดีเพราะเป็นผลที่ได้จากการทดสอบโครงสร้างโดยตรง [2], [3]

โครงการนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของคานคอมโพสิตสำเร็จรูปภายใต้แรงดัดในภาวะใช้งานและภาวะสุดขีดร่วมกับการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับคานคอมโพสิตที่สำเร็จรูปภายใต้แรงดัด เพื่อใช้เป็นโครงสร้างรองรับหลายโครงสร้าง การศึกษาในโครงการนี้จะประกอบไปด้วยการออกแบบก่อสร้างตัวอย่างคานคอมโพสิตเหล็กจำนวน 3 ตัวอย่าง ที่มีลักษณะของเดือยเหล็กที่แตกต่างกัน ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักและการเสียรูปในภาวะใช้งาน (Service Limit State) และภาวะสุดขีด (Ultimate Limit State) ซึ่งจะประกอบไปด้วยการตรวจวัดค่าน้ำหนักบรรทุก รอยร้าวจากน้ำหนักบรรทุก ศึกษาพฤติกรรมการโก่งตัวในช่วงกลางคาน (Mid-span Deflection) พฤติกรรมการเลื่อนไถล (End Slip) พฤติกรรม Debonding ระหว่างเหล็กและคอนกรีต ความเครียดเหล็กเสริมและเดือยคอมโพสิต และงาน

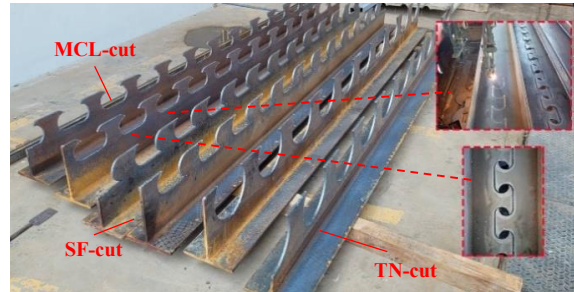
พัฒนาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากภาคสนาม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาประสิทธิภาพของเดือยคอมโพสิตที่อยู่ในรูปแบบคาน Simple Beam และทำการวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้รูปแบบ Concrete Damaged Plastic [4] เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบและดูความสอดคล้องของกราฟแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และแบบทดสอบภาคสนาม

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย การศึกษาประสิทธิภาพของเดือยคอมโพสิต [3], [5] ในรูปแบบคาน Simple Beam มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการออกแบบงานก่อสร้างต่างๆ คณะวิจัยจะทำการศึกษา Performance Study เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัย และในส่วนของ การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Abaqus 6.14 [6] ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์เดือยคอมโพสิตเพื่อนำผลการวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับ การทดสอบภาคสนาม

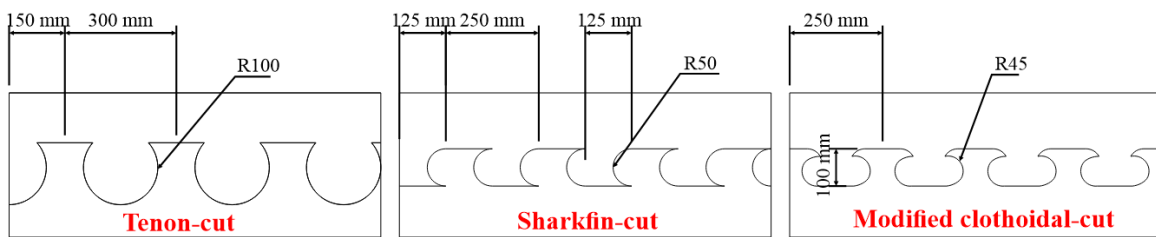
2.1 รายละเอียดคานทดสอบ

ตัวอย่างคานทดสอบในงานวิจัยนี้มีจำนวน 3 ตัวอย่างคานมีขนาด 200×500 มิลลิเมตร แต่ละตัวจะแตกต่างกันที่หน้าตัดเดือยคอมโพสิต โดยคาน SB-1 ประกอบด้วยหน้าตัดเดือยคอมโพสิตหน้าตัด Tenon-cut (TN-cut) คาน SB-2 ประกอบด้วยหน้าตัดเดือยคอมโพสิตหน้าตัด Shark Fin-cut (SF-cut) [5] และคาน SB-3 ประกอบด้วยหน้าตัดเดือยคอม

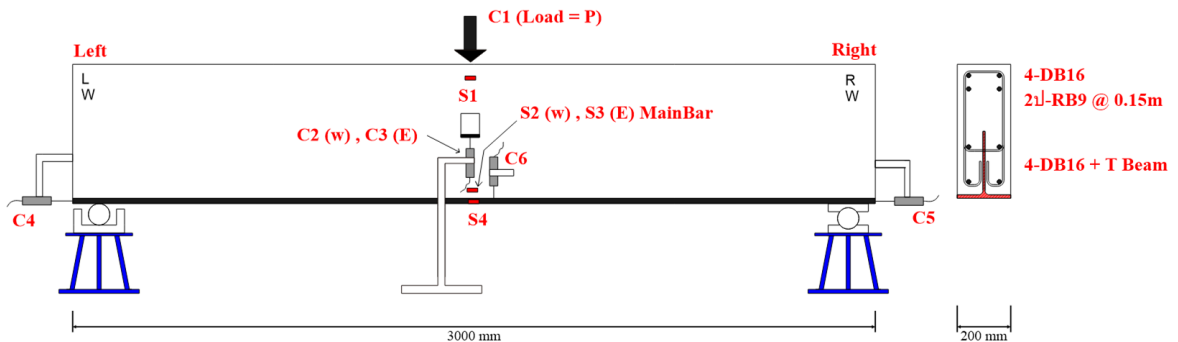


รูปที่ 3 Steel cross-section after cutting.

โพสิตหน้าตัด Modified Clothoidal-cut (MCL-cut) [3], [7] ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยเดือยคอมโพสิตถูกนำมาตัดจากเหล็กประกอบจากแผ่นเหล็กอุตสาหกรรมผลิตเหล็กรีดร้อน H400 x 200 x 8 x 13 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4 เกรด SS400 (หรือ ASTM A36, JIS G3101) [8] โดยการใช้เครื่องตัดเหล็ก Choroidal Neovascularization (CNV) [9] อีกทั้งยังมีเหล็กเสริม Deformed Bar เกรด SD40 และเหล็กปลอก เกรด SR24 และทำการเทคอนกรีตผสมเสร็จมีกำลังอัดระบุ 28 เมกะปาสกาล โดยทำการทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกทุกภายหลังเทคอนกรีต 28 วัน คณะวิจัยทำการบ่มคานคอนกรีตโดยวิธีฉีดพรมน้ำและเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง สถานที่ที่ทดสอบ คานทดสอบนี้มีช่วงยาว 3,000 มิลลิเมตร ระยะพาด 2,800 มิลลิเมตร และมีรูปแบบคานอย่างง่าย (Simple Beam) [10] วางอยู่บนที่ฐานรองลูกกลิ้ง (Roller Support) และฐานรองแบบหมุน (Pinned Support) ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 Different cutting lines for composite dowels.



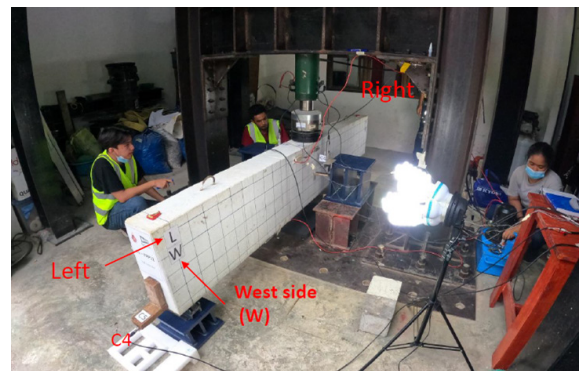
รูปที่ 5 Setting position of instrument for testing.

2.2 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดทางเทคนิค

ในส่วนของการติดตั้งอุปกรณ์ LVDTs จำนวน 5 ตัว โดย 2 ตัว ทำการวัดค่าเฉลี่ยการแอ่นตัวบริเวณกลางคาน มีการตั้งชื่อประกอบไปด้วยดังนี้ (C2,C3), 1 ตัว ทำการวัดระยะ เหล็กหลุดออกจากคอนกรีตบริเวณกลางคาน มีการตั้งชื่อประกอบไปด้วยดังนี้ (C6) และ 2 ตัวสุดท้าย ทำการวัดค่าการไถลตัวระหว่างคอนกรีตกับเหล็ก (End Slip) มีการตั้งชื่อประกอบไปด้วยดังนี้ (C4,C5) ต่อมาได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ Strain gauges จำนวน 4 ตัว โดย 1 ตัวทำการติดตั้งเพื่อหาค่า Strain concrete มีการตั้งชื่อประกอบไปด้วย (S1), 2 ตัวทำการติดตั้งเพื่อหาค่า Strain ของเหล็กเสริมมีการตั้งชื่อประกอบไปด้วยดังนี้ (S2,S3) และ 1 ตัวทำการติดตั้งเพื่อหาค่า Strain Dowel Composite มีการตั้งชื่อประกอบไปด้วย ดังนี้ (S4) ดังแสดงในรูปที่ 5

2.3 การให้น้ำหนักทดสอบบรรทุก

ในส่วนของการให้น้ำหนักจะใช้เครื่องกด UTM Capacity ที่สามารถกดน้ำหนักได้ถึง 100 ตัน เพื่อกดลงกลาง ตัวอย่างคานในการทดสอบ [10] ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยใช้ Load Control 2 กิโลนิวตัน/วินาที ทำการบันทึกและอ่านค่า 5 ค่าต่อวินาที การใส่น้ำหนักเมื่อถึงน้ำหนัก 9 ตัน จะทำการ Unload 1 รอบ เมื่อเหล็กยืดถึง 1,250 ไมโครสเตรน จะทำการ Unload อีก 1 รอบ และใส่น้ำหนักเพิ่มจนถึงจุดวิบัติ ทำการหยุดการทดสอบ ต่อมาทำการวาดรอยร้าวและวัดองศาของรอยร้าวเพื่อไปเสกเก็บภาพรอยร้าว



รูปที่ 6 การทดสอบตัวอย่างคาน

2.4 สมบัติวัสดุ

2.4.1 สมบัติของเหล็กเสริมและเหล็กปลอก

การทดสอบคานคอมโพสิต ประกอบด้วยเหล็กเสริม DB (Deformed Bar) เกรดวัสดุ SD40 เหล็กข้ออ้อยมีกำลังรับแรงดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า 394 เมกะปาสกาล จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ผิวของเหล็กเส้นจะมีลักษณะเป็นปล้องเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวให้เหล็กกับคอนกรีตมากขึ้น และเหล็กปลอก RB (Round Bar) เกรดวัสดุ SR24 เหล็กกลมผิวเรียบมีกำลังรับแรงดึงที่จุดคราก 245 เมกะปาสกาล มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร

2.4.2 สมบัติของเหล็กเตี้ยผลิตจากเหล็กรีดร้อน

เหล็กที่ใช้ก่อสร้างคานทดสอบโดยการตัดและเชื่อมประกอบจากเหล็กแผ่นรีดร้อนชั้นคุณภาพ SS400 (มอก. 1479-254) [11] มีสมบัติทางกล มีค่าดังนี้ คือ Yield Strength

เท่ากับ 245 เมกะปาสกาล Tensile Strength เท่ากับ 400–510 เมกะปาสกาล และ Elongation เท่ากับ 17 % คณะวิจัยได้ทำการทดสอบกำลังครากและแรงดึงของเหล็กเดือยคอมโพสิตที่ใช้ในสร้างคานทดสอบได้ทำการทดสอบวัสดุ ที่ห้องปฏิบัติการ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ มีผลดังนี้ ค่าเฉลี่ยของมอดูลัสยืดหยุ่น เท่ากับ 205 กิโลปาสกาล ค่ากำลังสูงสุดเฉลี่ย เท่ากับ 400 เมกะปาสกาล ค่ากำลังครากเฉลี่ย เท่ากับ 300 เมกะปาสกาล ค่าหน่วยการยึดตัวเฉลี่ยที่จุดคราก เท่ากับ 0.27 % และค่าหน่วยการยึดตัวเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 11.3 %

2.4.3 สมบัติของคอนกรีตสำหรับคานสำเร็จรูป

การทดสอบลูกปูนคอนกรีตผสมเสร็จมีกำลังอัดระบุ 28 เมกะปาสกาล โดยทำการทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกภายหลังเทคอนกรีต 28 วัน สัดส่วนการผสม แสดงดังตารางที่ 1 คณะวิจัยทำการทดสอบแต่ละประเภท 12 จำนวน เพื่อนำไปทดสอบกำลังอัดสูงสุดโดยการใส่แรงกดลงไปในแนวผิวเรียบกระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตจนคอนกรีตวิบัติ และการทดสอบกำลังรับแรงดึงสูงสุดโดยการวางทดสอบในแนวราบและมีแผ่นเหล็กหน้าตัดรองรับแรงที่กระทำลงมาจากคอนกรีตวิบัติ บันทึกผลและนำมาวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 2 เพื่อเปรียบเทียบกำลังระบุของคอนกรีต ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M [7]

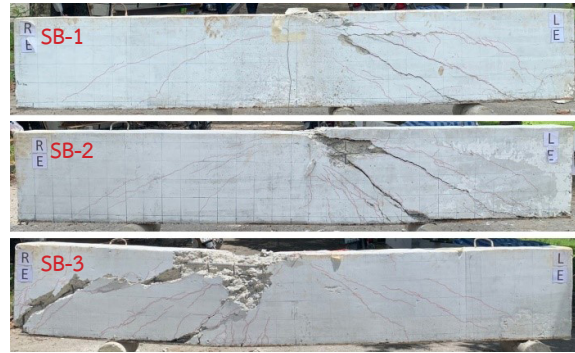
ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมคอนกรีตที่ 1 ลบ.ม.

Proportion						
Cement	Coarse aggregate	Fine aggregate	Water+Plasticizer	w/c ratio	Slump (mm)	
303	1028	916	129	0.42	160	

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน

Values	$f_{c,cyl}$ (MPa)	$f_{c,cu}$ (MPa)	f_t (MPa)	f_b (MPa)
Mean	28.5	32.0	2.6	6.2
Std. Dev.	5.2	2.5	0.3	0.6
Max.	31.8	35.5	3.1	7.2
Min.	22.8	30.6	1.7	5.1

Note: $f_{c,cyl}$ is cylinder compressive strength, $f_{c,cu}$ is cube compressive strength



รูปที่ 7 ภาพการวิบัติของตัวอย่างคานทดสอบ

3. ผลการทดสอบ

3.1 รูปแบบการวิบัติและค่าน้ำหนักสูงสุด

จากผลการวิเคราะห์การทดสอบคานคอมโพสิต SB-1, SB-2 และ SB-3 แสดงดังตารางที่ 3 น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำสูงสุด (P_{max}) พบว่า คาน SB-3 มากกว่าเท่ากับร้อยละ 7.2 และ 2.3 ตามลำดับ น้ำหนักที่กระทำจนคานเกิดการวิบัติ (P_f) พบว่า คาน SB-1 มากกว่าเท่ากับร้อยละ 12.9 และ 29.5 ตามลำดับ โมเมนต์สูงสุดพบว่า คาน SB-3 มีค่ามากกว่าเท่ากับร้อยละ 7.2 และ 2.3 ตามลำดับ ค่าการโก่งตัวสูงสุดพบว่า คาน SB-2 มากกว่าเท่ากับร้อยละ 48.3 และ 8.7 ตามลำดับ ค่าโมเมนต์ที่จุด Yielding พบว่า คาน SB-1 มากกว่าเท่ากับร้อยละ 6.1 และ 2.8 ตามลำดับ ค่าการโก่งตัวที่จุด Yielding พบว่า คาน SB-1 มากกว่าเท่ากับ 19.4 และ 4.5 ตามลำดับ ค่า K_c พบว่า คาน SB-2 มากกว่าเท่ากับ 16.1 และ 1.2 ตามลำดับ ค่า E พบว่า คาน SB-3 มากกว่าร้อยละเท่ากับ 193.8 และ 56.6 ตามลำดับ

คณะวิจัยทำการวาดรอยร้าวและวัดองศาของรอยร้าว มีการวิบัติแบบ Diagonal Shear Failure เกิดขึ้นที่ฝั่ง Roller Support ทแยงขึ้นไปเข้าสู่กึ่งกลางคาน ทำมุมประมาณ 45 องศา เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือนและแรงดัดที่เกิดขึ้นรวมกันนั้น มีค่าสูงกว่าค่าน้ำหนักแรงดึงที่คอนกรีตสามารถรับได้ และเกิดเมื่อโครงสร้างต้องรับแรงดัดเป็นหลัก โดยที่รอยร้าวชนิดนี้ จะเกิดขึ้นในแนวทแยง ซึ่งการวิบัติชนิดนี้จะเกิดขึ้นภายหลังที่โครงสร้างเกิดรอยร้าว เนื่องจากหน้าตัดคานไม่สามารถรับแรงดึงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดัดได้ ดังแสดงในรูปที่ 7

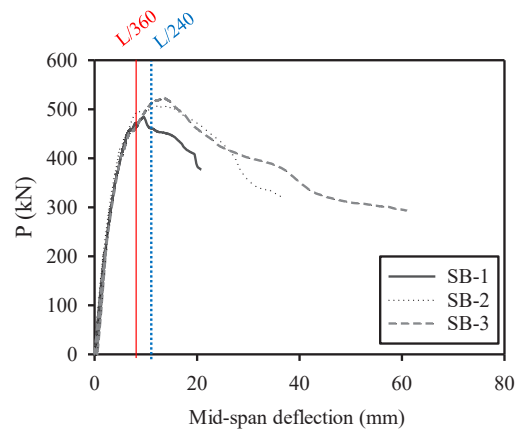
ตารางที่ 3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของคานทดสอบ

Beam	Dowel Cutting	P_{max} (kN)	P_f (kN)	M_{max} (kN-mm)	Δ_{max} (kN)	M_y (kN-mm)	Δ_y (mm)	Failure Mode	μ_u	μ_f	K_e (kN/m)	E (kN.mm)
SB-1		484.4	375.4	339.0	9.7	320.7	6.9	SF	1.40	3.02	112.4	8000
SB-2		507.5	332.7	355.3	14.3	302.1	5.8	SF	2.49	6.09	129.0	15000
SB-3		519.1	289.8	363.3	13.2	312.0	6.6	SF	2.00	9.23	130.5	23500

Note : P_f is load failure, *SF* is shear failure, μ_u is ductility at ultimate, μ_f is ductility at failure, K_e is the stiffness of load-deflection curve before yielding, E is the energy absorption

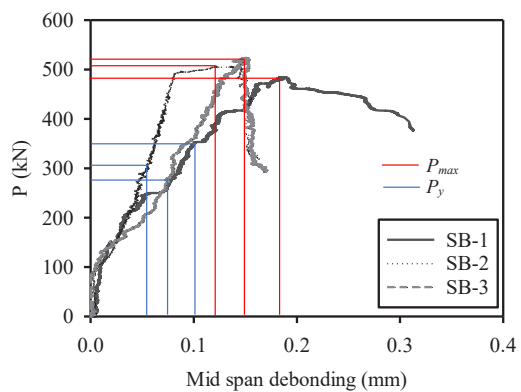
3.2 การวิเคราะห์การแอ่นตัวกึ่งกลางคาน

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อคานในช่วงกลางคานกับระยะโก่งตัวช่วงกลางคาน เมื่อระยะการโก่งตัว ($L/240$) และ ($L/360$) ตามลำดับ พบว่าการเปรียบเทียบผลของเดือยคอมโพสิตทั้ง 3 แบบ มีผลคือคาน SB-3 สามารถรับน้ำหนักบรรทุกต่อการแอ่นตัวกลางคานได้ดีกว่า SB-1 และ SB-2 เท่ากับร้อยละ 6.12 และ 4 ตามลำดับ สรุปผลได้ว่าเดือยคอมโพสิตชนิด MCL-cut ดีที่สุด เพราะหน้าตัดคอมโพสิต MCL-cut สามารถยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตได้มากกว่าคอมโพสิตอื่นๆ จึงทำให้เวลาคานเกิดการแอ่นตัวจะดึงเหล็กคอมโพสิตแอ่นตัวไปด้วย รองลงมา SF-cut เพราะหน้าตัด SF-cut มีรีซีมีความโค้งทำให้ไม่สามารถยึดเหนี่ยวได้ดีเท่า MCL-cut และสุดท้าย TN-cut หน้าตัดมีพื้นที่ในการยึดเหนี่ยวคอนกรีตน้อยกว่าทุกหน้าตัด ดังแสดงในรูปที่ 8


รูปที่ 8 ผลการทดสอบน้ำหนักและการแอ่นตัวกึ่งกลางคาน

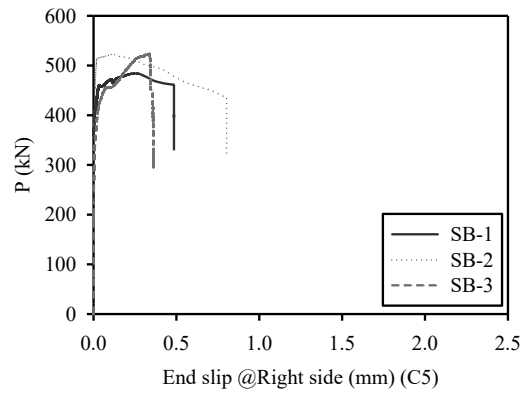
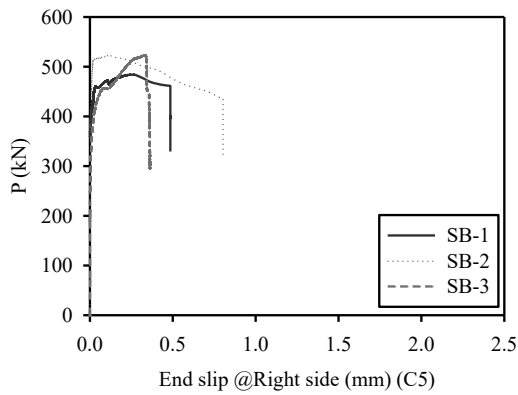
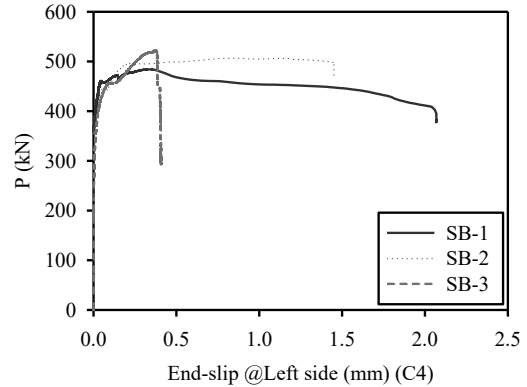
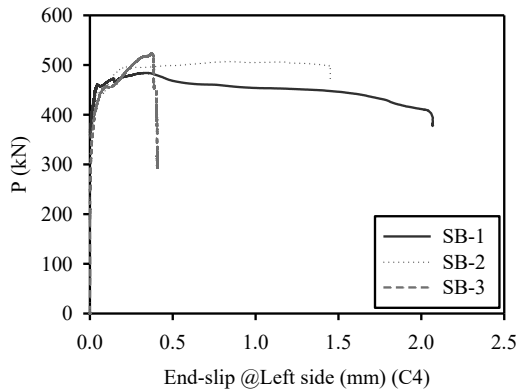
3.3 พฤติกรรม Debonding ระหว่างเหล็กและคอนกรีต

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อคานในช่วงกลางคานกับระยะโก่งตัวของเหล็กเดือย พบว่า ผลการทดสอบภาคสนามมีค่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ สังเกตความแตกต่างที่จุด P_y และ P_{max} จะต่างกัน เนื่องจากอิทธิพลของรอยร้าว จากกราฟค่าโก่งตัวที่ระยะ 0.15 มิลลิเมตร คาน SB-3 จะเกิดค่าน้ำหนักบรรทุกมากกว่า SB-1 และ SB-2 เป็นร้อยละ 26.8 และ 4.0 ตามลำดับ แสดงถึงความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของคานตัวอย่าง SB-1 มีประสิทธิภาพมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 9


รูปที่ 9 ผลการทดสอบน้ำหนักและพฤติกรรม Debonding

3.4 พฤติกรรม End Slip

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่กระทำและระยะการเลื่อนไถล (End Slip) จะเห็นได้ว่าฝั่ง Roller Support (C4) คาน SB-1, SB-2, SB-3 จะมีค่าการเลื่อนไถลมากกว่า



รูปที่ 10 ผลการทดสอบน้ำหนักและพฤติกรรม Endslip

รูปที่ 11 ผลการทดสอบน้ำหนักและความเครียดของเหล็ก

ฝั่ง Pin Support (C5) เพราะฝั่ง C4 ไม่มีแรงปฏิกิริยาในแนวราบ ทำให้เกิดค่าที่มากกว่า จากกราฟ C4 คาน SB-2, SB-3 เมื่อรับน้ำหนักบรรทุกได้สูงสุดแล้ว จะเกิด slip ทันที แต่คาน SB-1 จะไม่เกิด slip ทันทีหากรับน้ำหนักบรรทุกได้มากที่สุดแล้ว แต่ยังสามารถรับน้ำหนักต่อไปได้อีกแล้วจึงจะเกิด slip ใน ส่วนของกราฟ C5 จะมีแรงปฏิกิริยาในแนวราบ จึงทำให้ค่าการเลื่อนไถล มีน้อยกว่าฝั่ง C4 สรุปผลได้ว่า คาน SB-3 มีการเลื่อนไถลน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 10

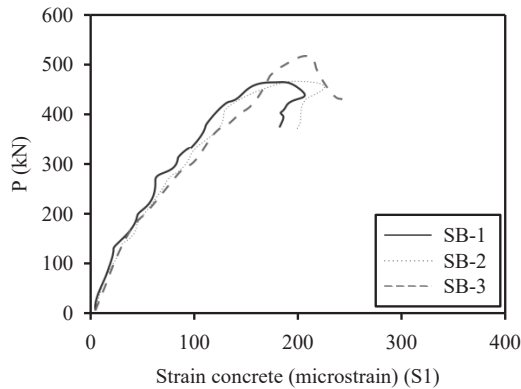
3.5 พฤติกรรมการตรวจวัดความเครียดของเหล็กเสริมและเหล็กเดือยคอมโพสิต

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าความเครียดบริเวณเนื้อผิวของเหล็กเสริม พบว่าปริมาณการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อเทียบกับขนาดเดิมที่เดือยของแต่ละคานมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่คาน SB-3 มีค่าความเครียด

มากที่สุด ซึ่งมากกว่า SB-1 และ SB-2 อยู่ร้อยละ 3.92 และ 1.96 ตามลำดับ และในส่วนของค่าความเครียดที่ผิวของเหล็กเสริมพบว่า คาน SB-2 มีค่ามากที่สุด ซึ่งมากกว่า SB-1 และ SB-3 อยู่ร้อยละ 0.84 และ 4.35 ตามลำดับ นั่นคือบริเวณผิวล่างของเหล็กเดือยของคาน SB-3 และอีกสองจุดคือที่เนื้อผิวของ คาน SB-2 มีค่าการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีแรงภายนอกกระทำมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 11

3.6 ผลการตรวจวัดความเครียดของคอนกรีต

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าความเครียดบริเวณเนื้อผิวของคอนกรีตพบว่า คาน SB-3 มีค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในช่วงกลางคานมากที่สุดและสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่าคานตัวอื่น รองลงมา คาน SB-2 และสุดท้าย คือ คาน SB-1 ที่มีค่าน้อยที่สุด โดยที่ คาน SB-3 มีค่าความเครียดต่อน้ำหนักบรรทุกมากกว่า SB-1



รูปที่ 12 ผลการทดสอบน้ำหนักและความเครียดคอนกรีต

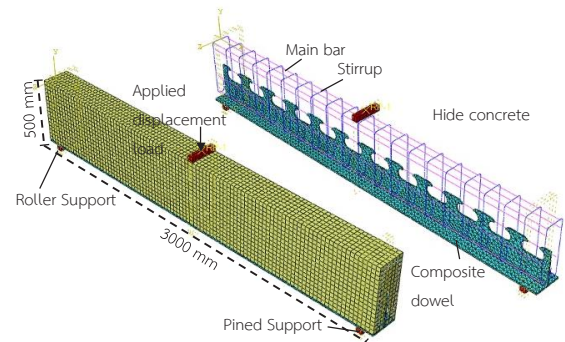
และ SB-2 อยู่ร้อยละ 24.26 และ 8.69 ตามลำดับ สรุปผลได้ว่า MCL-cut มีประสิทธิภาพในการรับความเครียดต่อน้ำหนักบรรทุกได้มากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 12

3.7 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

3.7.1 มิติแบบจำลอง และการแบ่งชิ้นส่วนย่อย

การวิเคราะห์การแอ่นตัวของคานทดสอบโดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการแอ่นตัวของคานคอมโพสิตแบบขนาดจริง เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบภาคสนาม โดยแบบจำลองรูปแบบชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับคานโครงสร้างคอนกรีต โดยเหล็กคอมโพสิตขึ้นรูปโมเดลเป็น 3 มิติ ใช้เอลิเมนต์ ชนิด 8-node Linear Brick (C3D8R) และสำหรับโครงสร้างคอนกรีตขึ้นรูปโมเดลเป็น 3 มิติ ใช้เอลิเมนต์ ชนิด 8-node Linear Brick (C3D8R) และเหล็กเสริมกับเหล็กปลอก รูปโมเดลเป็น 1 มิติ ใช้เอลิเมนต์ ชนิด Truss (B31) ใน Library ของโปรแกรม Abaqus ซึ่งเป็นการสร้างรูปแบบเอลิเมนต์ภายในขอบเขตตามที่ผู้ใช้กำหนด (User Define) ในส่วนการจำลองรูปแบบการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเดือยคอมโพสิต เป็นวิเคราะห์แบบ Full-scale ดังแสดงในรูปที่ 13

การจำลองสภาพการยึดเหนี่ยวชิ้นส่วนต่างๆ ระหว่างคอนกรีต จะกำหนดคอนกรีตเป็น Master ฐานรองรับแบบหมุนได้ (Pinned Support) และแบบล้อ (Roller Support)



รูปที่ 13 แบบจำลอง 3 มิติ ไฟไนต์เอลิเมนต์

กำหนดเป็น Slave การยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและ Support จะใช้เป็น Surface to Surface เหล็กเสริมกับเหล็กปลอก กำหนดเป็น Slave การยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมกับเหล็กปลอก จะใช้เป็น Embedded ในส่วนเหล็กเดือย กำหนดเป็น Slave การยึดเหนี่ยวจะใช้เป็น Tie

3.7.2 สมบัติเหล็กเสริมคอนกรีตและเหล็กเดือย

การกำหนดสมบัติของวัสดุ เหล็กเสริม เหล็กปลอก และเหล็กเดือยคอมโพสิต ซึ่งนำค่าที่ได้จากการทดสอบภาคสนามในห้องปฏิบัติการ ใช้สมบัติของวัสดุในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ดังนี้ โดยเหล็กเสริม (Steel Bar) มีค่า Young's Modulus เท่ากับ 210 กิโลปาสกาล และมีค่า Poisson's Ratio เท่ากับ 0.30, เหล็กปลอก (Steel Stirrup) มีค่า Young's Modulus เท่ากับ 210 กิโลปาสกาล และมีค่า Poisson's Ratio เท่ากับ 0.30, เหล็กเดือยคอมโพสิต (Steel Dowel) มีค่า Young's Modulus 205 กิโลปาสกาล และมีค่า Poisson's Ratio เท่ากับ 0.30 นำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Non-linear เพื่อต้องการผลลัพธ์ใกล้เคียงกับภาคสนามมากที่สุด

3.7.3 การจำลองรูปแบบการให้น้ำหนัก

การให้น้ำหนักบรรทุกบนคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ช่วงพาด 3 เมตร ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ จะใส่ระยะ Displacement แทนน้ำหนักลงที่ระยะกึ่งกลางคาน ซึ่งระยะ Displacement ได้จากการทดสอบภาคสนาม การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Three Point Bending โดยแบบคาน

คอนกรีตเสริมเหล็กจะวางอยู่ในรูปแบบ Simple Beam วางห่างจากปลายคานทั้งสองข้างประมาณ 100 มิลลิเมตร นำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ที่ไฟไนต์เอลิเมนต์มาพล็อตกราฟ เพื่อทำการเปรียบเทียบ

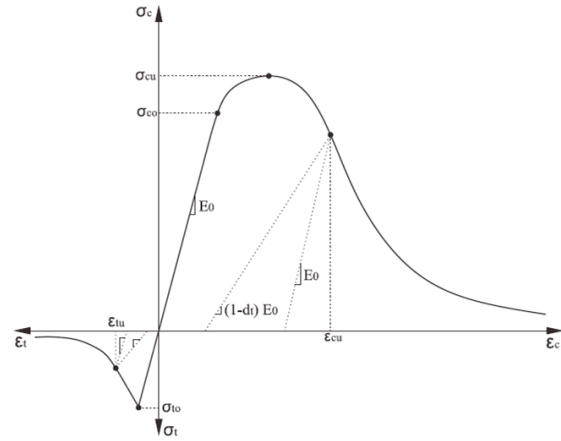
3.7.4 แบบจำลองคอนกรีต

ในงานวิจัยนี้ใช้รูปแบบ Concrete Damaged Plasticity [4] เนื่องจากแบบจำลองชนิดนี้สามารถจำลองพฤติกรรมที่ละเอียดที่สุดคล้ายพฤติกรรมจริง แบบจำลองคอนกรีตได้กำหนดสมบัติเป็นคอนกรีตล้วน (Plain Concrete) ดังแสดงในตารางที่ 4 ที่สามารถแสดงพฤติกรรมตอบสนอง ได้ทั้งในช่วงเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น แบบจำลองความเสียหายเชิงพลาสติกของคอนกรีต (Concrete Damage Plasticity; CDP) จึงถูกนำมาใช้กำหนดพฤติกรรมของแบบจำลองคอนกรีตภายใต้การกระทำของแรงอัดและแรงดึง พฤติกรรมในช่วงยืดหยุ่นกำหนดให้มีความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียด เป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke’s Law) ซึ่งความสัมพันธ์จะมีลักษณะเชิงเส้นที่มีค่าความเค้นยืดหยุ่นสูงสุดในช่วงนี้เป็นไป ตามคำแนะนำของ ACI318-11 [13] หรือ $0.45 \cdot f_c'$ ส่วนในช่วง ไม่ยืดหยุ่นเลือกใช้แบบจำลองของ Carreira และ Chu [14] กำหนดความสัมพันธ์ในช่วงที่ไม่เชิงเส้นทั้งก่อน และหลังจุดที่ความเค้นมีค่าสูงสุด ซึ่งตามวิธีของความเสียหายเชิงพลาสติกที่เลือกใช้จะสามารถแสดงผลในส่วนของความเสียหายหรือการแตกร้าวที่เกิดขึ้นในเอลิเมนต์คอนกรีตได้ในรูป ของการเสื่อมสภาพความแกร่ง (Stiffness Degradation) ซึ่ง เกิดขึ้นได้ทั้งผลจากการกระทำของแรงอัดและแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ 14

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ใน CDP model [4]

E	ν	Ψ	ε	σ	K_c	μ
25,434	0.25	35	0.1	1.16	0.6667	0

จากตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์สำหรับ CDP ในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Abaqus ประกอบไปด้วยตัวแปรดังนี้ E คือ Young’s Modulus ν คือ Poisson’s Ratio Ψ คือ Dilation Angle ε คือ Eccentricity σ คือ



รูปที่ 14 รูปแสดงพฤติกรรมของแบบจำลองคอนกรีตภายใต้การกระทำของแรงอัดและแรงดึง [12]

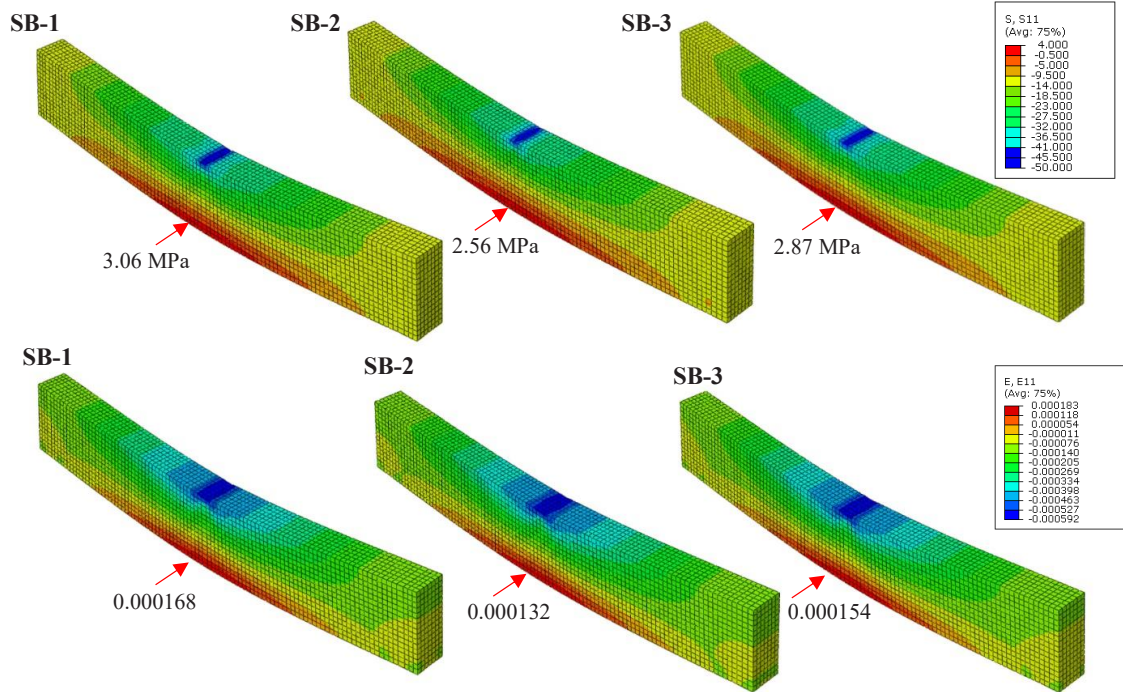
Ratio of the strength in the biaxial state to the strength in the uniaxial state K_c คือ Plastic Yield surface Parameters μ คือ Viscosity ทั้งหมดนี้นำมาใช้เพื่อกำหนดพฤติกรรมของแบบจำลองคอนกรีตภายใต้การกระทำของแรงอัดและแรงดึง

3.7.5 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

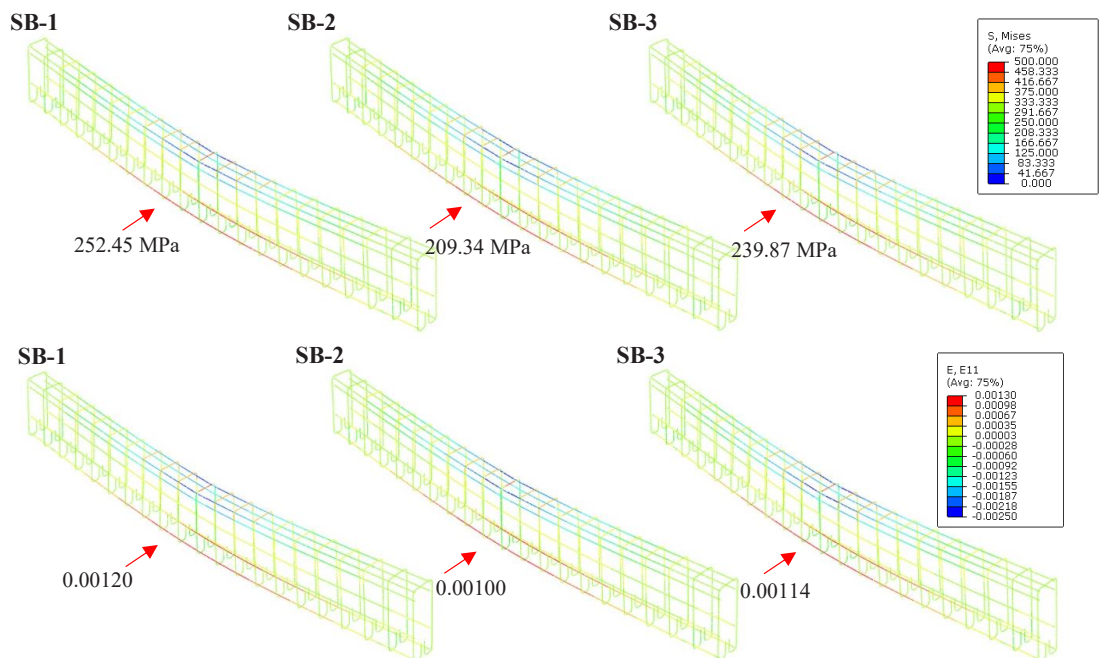
ผลการวิเคราะห์ความเค้นและความเครียดจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์ตัวอย่าง SB-1, SB-2 และ SB-3 ของคอนกรีต พบว่า ค่าความเค้น ในแนวราบ มีค่าเท่ากับ 3.06, 2.56 และ 2.87 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ค่าความเครียดในแนวราบ มีค่าเท่ากับ 168, 132 และ 154 ไมโครสเตรน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 15

สำหรับตัวอย่าง SB-1, SB-2 และ SB-3 ของเหล็กเสริมคอนกรีตและเหล็กปลอก ดังรูปที่ 16 พบว่า ค่าความเค้น ในแนวราบ มีค่าเท่ากับ 252.45, 209.34 และ 239.87 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ค่าความเครียดในแนวราบ มีค่าเท่ากับ 1,200, 1,000 และ 1,140 ไมโครสเตรน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 16

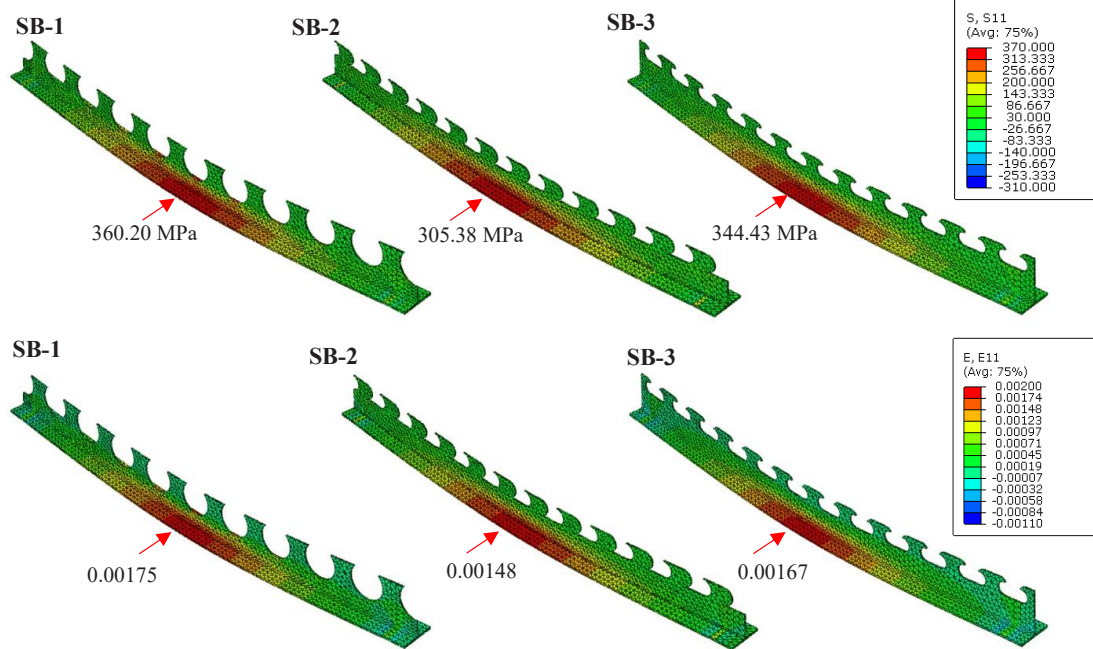
สำหรับตัวอย่าง SB-1, SB-2 และ SB-3 ของเหล็กเดี่ยวยคอมโพสิตพบว่า ค่าความเค้น ในแนวราบ มีค่าเท่ากับ 360.20, 305.28 และ 344.43 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ค่าความเครียดในแนวราบ มีค่าเท่ากับ 1750, 1480 และ 1670 ไมโครสเตรน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 17



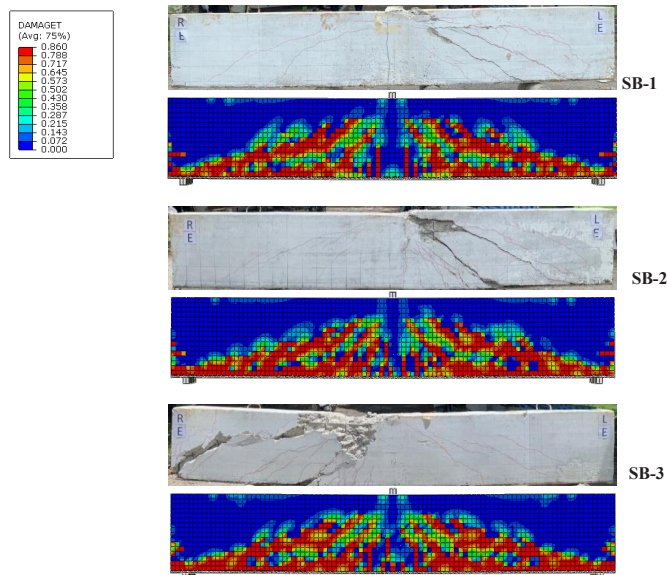
รูปที่ 15 Horizontal stress (S11) and strain (E11) on concrete beams



รูปที่ 16 Horizontal stress (S11) and strain (E11) on steel reinforcement



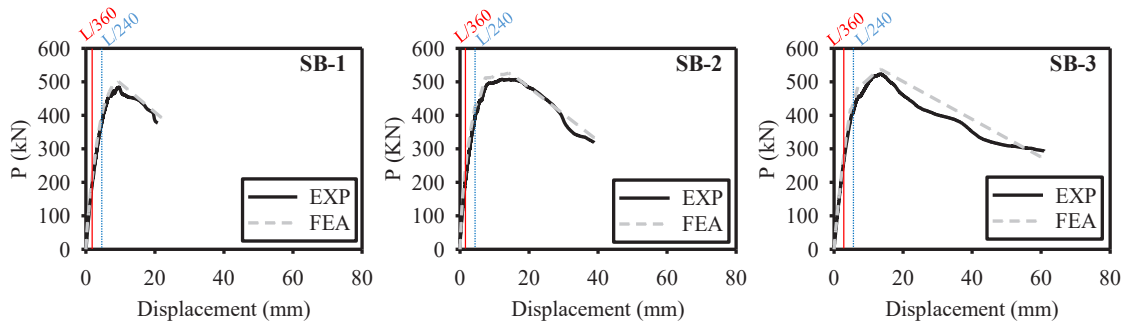
รูปที่ 17 Horizontal stress (S11) and strain (E11) on steel dowel



รูปที่ 18 Numerical simulations of crack patterns and damage in tension (DAMGET)

รูปแบบพฤติกรรมและขนาดของรอยร้าวจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์เป็นในทิศทางเดียวกันกับตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบจริงภาคสนาม ตัวอย่าง

SB-1, SB-2 และ SB-3 ขนาดความกว้างของรอยร้าวเปรียบเทียบกับ การทดสอบภาคสนาม ดังแสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 19 ผลการเปรียบเทียบการแอนตัวของคานทดสอบกับไฟไนต์เอลิเมนต์ในช่วงภาวะใช้งานและภาวะขีดสุด

จากรูปที่ 19 ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่าง น้ำหนักบรรทุกและค่าการแอนตัวกลางคานของการทดสอบ ภาคสนามและการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้ง 3 คาน คือ SB1, SB2 และ SB3 เมื่อพิจารณาแบบจำลองการวิบัติ คอนกรีตแบบ CDP พบว่า ค่าระยะการแอนตัวของแบบ จำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีผลใกล้เคียงไปในทิศทางเดียวกับการทดสอบภาคสนาม ทั้ง 3 คานมีการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ สูงกว่าการทดสอบภาคสนามอยู่ร้อยละ 3.4, 3.6 และ 3.2 ตามลำดับ สำหรับการทดสอบสภาวะใช้งานพบว่า เมื่อระยะ การแอนตัว (L/240) ของตัวอย่างคานทั้ง 3 ตรงกับค่าน้ำหนัก ได้จากทดสอบภาคสนามเท่ากับ 516, 506, 493 กิโลนิวตัน ตามลำดับ ค่าน้ำหนักที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เท่ากับ 522, 522, 505 กิโลนิวตัน และเมื่อระยะการแอนตัว (L/360) ของตัวอย่างคานทั้ง 3 ตรงกับค่าน้ำหนักได้จากทดสอบภาค สนามเท่ากับ 468, 491, 458 กิโลนิวตัน ตามลำดับ ค่าน้ำหนัก ที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เท่ากับ 489, 512, 491 กิโลนิวตัน เนื่องจากการทดสอบในภาคสนามอาจมี ความคลาดเคลื่อนของสมบัติของคอนกรีต ดังนั้นผลที่ได้จึง มีค่าน้อยกว่าผลทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย

Beam	EXP			FEA		
	P_u	$P_{@0.6F_y}$	$P_{@F_y}$	P_u	$P_{@0.6F_y}$	$P_{@F_y}$
SB-1	484	112	255	484	115	261
SB-2	507	123	267	507	131	287
SB-3	519	140	280	519	152	294

4. อภิปรายผลและสรุป

โครงการวิจัยนี้ศึกษาและวิเคราะห์แบบจำลอง ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับคานคอมโพสิตที่สำเร็จรูปภายใต้ แรงดัด 1) คานเสริมเหล็กคอมโพสิต หน้าตัด MCL-cut มีความสามารถในการน้ำหนักบรรทุกและรับโมเมนต์สูงสุด รองลงมาเป็น SF-cut และ TN-cut 2) จากศึกษาประสิทธิภาพ ของคานทดสอบเมื่อพิจารณาค่าการโก่งตัวที่กลางคานต่อ น้ำหนักบรรทุกของคานคอมโพสิตทั้งสามแบบแล้ว SB-1 มีค่า มากที่สุด รองลงมา คือ SB-2 และที่น้อยที่สุด คือ SB-3 ดังนั้น SB-3 ที่มีค่าการโก่งตัวที่กลางคานน้อยที่สุดจึงเป็นคานคอมโพสิต ที่ดีที่สุดนั่นเอง 3) การทำนายค่าการแอนตัวจากการวิเคราะห์ แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับคานคอมโพสิตทั้ง 3 รูปแบบ ประกอบไปด้วย MCL-cut , SF-cut และ TN-cut ให้ค่ามากกว่าการทดสอบภาคสนามอยู่ ร้อยละ 3.47 , 3.67 และ 3.27 ตามลำดับ และ 4) การทำนายค่าโมเมนต์ดัดจากการ วิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้จำลองการ วิบัติของคอนกรีตแบบ CDP Model สำหรับคานคอมโพสิต ให้ผลการทำนายใกล้เคียงกับผลการทดสอบภาคสนาม

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการ ประกวด Structural Steel Improvement for Young Engineers (SSI 4YE 2021) บริษัทสหวิริยาสตีล อินดัสตรี จำกัด (มหาชน) คณะวิจัยขอขอบคุณบริษัท เอโอ สตีล จำกัด ที่อนุเคราะห์ให้ตัวอย่างคานเหล็กคอมโพสิต และขอขอบคุณ



Dr. Reyes Garcia จาก University of Warwick, UK สำหรับการอนุเคราะห์ผลจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Zanon, J. Berthelley, G. Seidl and W. Lorenc. (2014, June). *An innovative solution for small span bridges – precobeam*, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Jacques-Berthelley/publication/324038919_An_innovative_solution_for_small_span_bridges_-_Precobeam/links/5aba4860a6fdcc0e3d9eac50/An-innovative-solution-for-small-span-bridges-Precobeam.pdf
- [2] T. Imjai, P. Bangriang, T. Tohsah, and M. Setkit, “Service and ultimate behaviour of slim floor composite beams Built-up form hot rolled coil steel,” *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 32, no. 2, pp. 115–128, 2021 (in Thai).
- [3] P. Harnatkiewicz, A. Kopczyński, M. Kozuch, W. Lorenc and S. Rowiński, “Research on fatigue cracks in composite dowel shear connection,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 18, no. 5, pp. 1279–1294, 2011.
- [4] H. Sinaei, M. Shariati, H. Abna, M. Aghaei, and A. Shariati, “Evaluation of reinforced concrete beam behaviour using finite element analysis by ABAQUS,” *Scientific Research and Essays*, vol. 7, no. 21, pp. 2002–2009, 2012.
- [5] W. Lorenc, “Concrete failure of composite dowels under cyclic loading during full-scale tests of beams for the “Wiarna Rzeka” bridge,” *Engineering Structures*, vol. 209, 2020.
- [6] ABAQUS. (2016). *FEA software and User’s Manual version 6.14*. Hibbitt, karlsson Sorensen Inc., Rhode Island, USA. [Online]. Available: <http://www.abaqus.com>
- [7] *Standard Test Method For Compressive Strength Of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-In. Or [50-Mm] Cube Specimens)*, ASTM International, 2013.
- [8] *Rolled steels for general structure*, JIS G3101, 2015.
- [9] W. Lorenc, E. Kubica, and M. Kozuch, “Testing procedures in evaluation of resistance of innovative shear connection with coposite dowel,” *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 51–63, 2010.
- [10] B. Sainey, L. Yeou-Fong, H. Tseng-Hsing, and W. Chai-Hao, “Three-point bending test and Finite Element Analysis on FRP Bridge Deck,” Tokyo Institute Steel of Technology, Tokyo, Japan, 2012.
- [11] Sahaviriya Steel Industries PLC. (2013). S400 steel is a structural hot Rolled steel. SSI. Bangkok., Thailand. [Online]. (in Thai). Available: <https://ssi-steel.com/index>
- [12] *Building code requirements for reinforced concrete and commentary*, ACI Committee 318 – 11, 2011.
- [13] D. Carreira and K. Chu, “Steel strain relationship for plaine concrete intension,” *ACI Journal*, no. 82–72, pp. 797–804, 1985.