



การศึกษาพฤติกรรมคานเหล็กประกอบจากแผ่นเหล็กม้วน สำหรับพื้นชนิดบาง ในภาวะใช้งานและภาวะสุดขีด
SERVICE AND ULTIMATE BEHAVIOUR OF SLIM FLOOR COMPOSITE BEAMS BUILT-UP
FROM HOT ROLLED COIL STEEL

พฤษภา บางเหริ่ง¹, ตูแวกุมารินี โต๊ะโซ๊ะ¹, ทนงศักดิ์ อิมใจ^{2*} และ มนเทียร เสรีจิก³

¹นักศึกษา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

³อาจารย์, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

*Corresponding author, E-mail: thanongsak.im@wu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ศึกษาพฤติกรรมคานเหล็กคอมโพสิตแบบมีช่องเปิด ประกอบจากแผ่นเหล็กม้วน มีช่วงพาด 6 ม. เพื่อใช้เป็นโครงสร้างรองรับระบบพื้นแบบบาง (Slim floor) การศึกษาวิจัยในโครงการนี้จะประกอบไปด้วยการทดสอบตัวอย่างคานเหล็กประกอบจากแผ่นเหล็กม้วน จำนวน 4 ตัวอย่าง คือ คานเหล็กประกอบที่ไม่มีเหล็กเดือย (Dowel Reinforcement) และ คานเหล็กประกอบที่มีเหล็กเดือย (Dowel Reinforcement) เชื่อมที่ช่องเปิด และศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักและการแอ่นตัวในภาวะใช้งาน (Service limit state) และภาวะสุดขีด (Ultimate limit state) ประกอบด้วยคำนวณน้ำหนักบรรทุก รูปแบบการวิบัติ และดัชนีประสิทธิภาพสำหรับน้ำหนักบรรทุกแบบระยะสั้น และศึกษาพฤติกรรมที่ภาวะสุดขีด สำหรับน้ำหนักบรรทุกคงค้างไว้เป็นระยะเวลา 3 เดือน และงานพัฒนาแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากภาคสนาม จากผลการศึกษาพบว่าผลของการใส่เหล็กเดือย (Dowel reinforcement) ไม่มีผลในการเพิ่มความเหนียวของคานทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ แต่มีผลเพิ่มประสิทธิภาพการรับน้ำหนัก และความสามารถด้านทานการแอ่นตัวที่ภาวะใช้งาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: แผ่นเหล็กม้วนชนิดบาง; คานเหล็กประกอบ; พื้นชนิดบาง; ภาวะใช้งาน; ภาวะสุดขีด

ABSTRACT

This paper deals with the behavior of composite steel beams with openings with the addition of dowel reinforcement. The specimens were built from A36-graded steel plates with a span of 6 m to support a slim floor. The experimental program consisted of four slim beam specimens with and without dowel reinforcement welded at the opening. This paper also studied the load and deflection behavior in the service limit state and the ultimate limit state. The effect of creep on structural behavior was investigated during the long-term loading. A FE model was also studied to compare the load-deflection response of beams from short-term loading. The result found that dowel reinforcement had little impact on energy absorption but significantly increased flexural capacity and stiffness of the composite beams with dowel reinforcement.

KEYWORDS: Hot rolled coil steel; Built-up steel beam; Service limit state; Ultimate Limit State

Pruesapa Bangriang¹, Tuwaekumarini Tohsah¹, Thanongsak Imjai^{2*} and Monthian Setkit³

¹ Student, School of Engineering and Technology Walailak University

² Assistant Professor, School of Engineering and Technology Walailak University

³ Lecturer, School of Engineering and Technology Walailak University

1. บทนำ

คานคอมโพสิตของเหล็กและคอนกรีต ถูกนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลกสำหรับการก่อสร้างอาคาร ในบรรดาคานคอมโพสิต คานคอมโพสิตพื้นบาง (slim floor beam) และได้รับความนิยมและนำมาใช้ในโครงสร้างเหล็กโดยเฉพาะในยุโรป [1] โดยเหล็กรูปพรรณจะฝังอยู่ภายในความหนาของแผ่นพื้น และปีกคานเหล็กด้านล่างจะกว้างกว่าปีกคานเหล็กด้านบน การใช้พื้นคอมโพสิตแบบบางจะช่วยลดความหนาของพื้นได้ และยังสามารถก่อสร้างได้เร็ว การใช้งานในยุโรปได้แสดงให้เห็นแล้วว่า การใช้คานคอมโพสิตพื้นบางนั้นสามารถแข่งขันได้ในเชิงพาณิชย์สำหรับช่วงในระยะระหว่าง 5-9 เมตร รูปแบบการก่อสร้างนี้ก็นิยมนำมาใช้ในประเทศแถบสแกนดิเนเวีย ร่วมกับแผ่นพื้นสำเร็จรูปแบบกลวง (Hollow Core) ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา มีการพัฒนาแนวทางการพัฒนารูปแบบของคานเหล็กที่เป็นกรรมสิทธิ์เฉพาะ และมีวางจำหน่ายในท้องตลาดเพื่อรองรับรูปแบบพื้นนี้ โดยได้ดำเนินการในช่วงทศวรรษที่ 1990 [2-11] และได้รับความนิยมการใช้รูปแบบการก่อสร้างนี้ในวงกว้าง ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับระบบพื้นบางเพิ่มมากขึ้น โดยมุ่งเน้นเฉพาะที่การพัฒนาการเชื่อมต่อแบบเฉือน เพื่อการก่อสร้างที่มีประสิทธิภาพ เช่น การเปลี่ยนรูปแบบหน้าตัดคาน รูปแบบของช่องเปิด หรือการใส่เหล็กเดือยเพื่อการเสริมแรง เป็นต้น [1, 13-17] งานวิจัยส่วนใหญ่ จะเน้นศึกษาไปที่การใช้งานที่ภาวะสุดขีด ถึงอย่างไรก็ตามการนำระบบคานคอมโพสิตแบบนี้ไปใช้อย่างกว้างขวางไม่ได้มีเฉพาะในยุโรป [12] ประเทศอื่นๆ ได้มีการนำระบบนี้ไปใช้เช่นกัน ประเทศไทยเองก็มีการนำระบบคานคอมโพสิตพื้นบางมาใช้งานเช่นกัน แต่ยังคงขาดผลการทดสอบและวิจัยเรื่องพฤติกรรมภาวะใช้งานและภาวะสุดขีดที่พิจารณาผลของการคืบ (creep)

โครงการนี้มีเป้าหมายเพื่อศึกษาวิจัยพฤติกรรมคานเหล็กประกอบจากแผ่นเหล็ก (Built-up beam) และถูกหุ้มด้วยคอนกรีต ทำให้มีพฤติกรรมแบบคอมโพสิต เพื่อใช้เป็นโครงสร้างรองรับระบบพื้นแบบบาง (Slim floor) การศึกษาในโครงการนี้จะประกอบไปด้วยการออกแบบก่อสร้างตัวอย่างคานเหล็กประกอบจากแผ่นเหล็ก จำนวน 4 ตัวอย่าง ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับน้ำหนักและการเสีรูปในภาวะใช้งาน (Service Limit State) และภาวะสุดขีด (Ultimate Limit State) ของคานคอมโพสิตที่มีและไม่มีเหล็กเดือย (Dowel Reinforcement) ซึ่งจะประกอบไปด้วยการตรวจวัดค่าน้ำหนักบรรทุก การแอ่นตัว และรอยร้าวจากพื้นคอนกรีต สำหรับน้ำหนักบรรทุกแบบระยะสั้นและศึกษาพฤติกรรมความคืบ (Creep) สำหรับน้ำหนักบรรทุกคงค้างไว้เป็นระยะเวลา 3 เดือน และงานพัฒนาแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของคานคอมโพสิตจากภาคสนาม

2. วัตถุประสงค์

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษากฎการรับน้ำหนัก และการเสีรูปในภาวะใช้งาน (Service Limit State, SLS) และภาวะสุดขีด (Ultimate Limit State, ULS) สำหรับการรับน้ำหนักบรรทุกระยะสั้น (Short-term Loading) รวมไปถึงศึกษาพฤติกรรมการเสีรูป สำหรับน้ำหนักบรรทุกคงค้างไว้เป็นระยะเวลา 3 เดือน (Long-term Loading) และงานพัฒนาแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับคานประกอบแบบคอมโพสิตเพื่อเปรียบเทียบการแอ่นตัวภายใต้ น้ำหนักบรรทุกระยะสั้นจากภาคสนาม

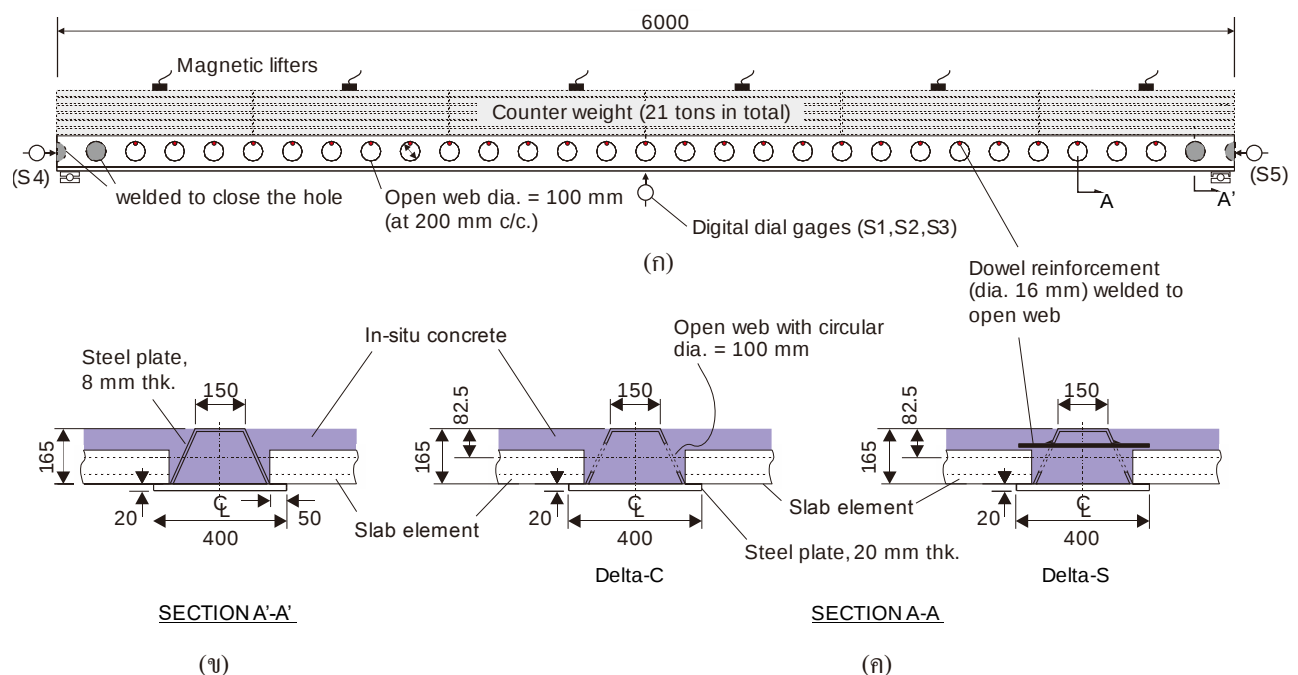
3. วิธีการศึกษาวิจัย

ในการวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 2 ระยะ ในระยะที่ 1 เป็นการให้น้ำหนักทดสอบแบบระยะสั้น เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเสีรูป และระยะที่ 2 เป็นการให้น้ำหนักทดสอบแบบระยะยาว ระยะเวลา 3 เดือน สำหรับรายละเอียดคานทดสอบ อุปกรณ์การตรวจวัดทางเทคนิค และขั้นตอนการให้น้ำหนักบรรทุก แสดงดังต่อไปนี้

3.1 รายละเอียดคานทดสอบ

ตัวอย่างคานทดสอบในงานวิจัยนี้มีจำนวน 4 ตัวอย่าง คือ คาน Delta-C จำนวน 2 ตัว (Delta-C-s หมายถึง คาน Delta-C ที่มีการให้น้ำหนักในระยะสั้น (Short-term) และ Delta-C -l หมายถึง คาน Delta-C ที่มีการให้น้ำหนักในระยะยาว (Long-term)) และคาน

Delta-S จำนวน 2 คาน (Delta-S-s หมายถึง คาน Delta-S ที่มีการให้น้ำหนักในระยะสั้น (Short-term) และ Delta-S-l หมายถึง คาน Delta-S ที่มีการให้น้ำหนักในระยะยาว (Long-term)) โดยคาน Delta-C แสดงถึงคานควบคุม และคาน Delta-S เป็นตัวอย่างที่มีเหล็กเดือย (Dowel Reinforcement) คานประกอบทั้ง 4 ตัวอย่างถูกสร้างจากเหล็กแผ่นรีดร้อนชั้นคุณภาพ SS400 มี และทำการเทคอนกรีตมีกำลังระบุ 38 MPa ในคานประกอบเพื่อให้มีพฤติกรรมแบบคอมโพสิต โดยจะทำการทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกทุกภายหลังเทคอนกรีต 7 วัน คณะวิจัยทำการบ่มคานคอมโพสิตโดยวิธีฉีดพรมน้ำและเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง ณ สถานที่ทดสอบ คานทดสอบนี้มีช่วงยาว 6000 มิลลิเมตร มีระยะพาด 5900 มิลลิเมตร และมีรูปแบบเป็นคานอย่างง่าย วางอยู่บนที่รองรับแบบลูกกลิ้ง (roller) และที่รองรับแบบหมุด (Pinned Support) ดังรูป 1 และ 2 มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดการแอ่นตัวแบบดิจิตัล (Digital Dial Gauge) จำนวน 3 ตัว (S1, S2, S3) เพื่อหาค่าเฉลี่ยการแอ่นตัวบริเวณกลางคาน และติดตั้งเพิ่มอีก 2 ตัวที่บริเวณปลายคานทั้ง 2 ข้าง (S4, S5) เพื่อวัดค่าการเลื่อนตัว (Slip) ระหว่างคอนกรีตกับคานเหล็ก ดังรูป 3 ในส่วนของการให้น้ำหนักจะใช้ด้วยยกแบบแม่เหล็ก (Magnetic Lifter) ที่สามารถยกน้ำหนักได้ 1 ตัน โดยใช้รถเครนยกแผ่นเหล็กที่เตรียมไว้เพื่อเป็นน้ำหนักกระทำบนคาน โดยยกแผ่นเหล็กวางบนคานทดสอบ 5 แผ่นต่อชั้น และวางแผ่นเหล็กทั้งหมด 12 ชั้น รวมแผ่นเหล็กที่ใช้ทั้งหมด 60 แผ่น คิดเป็นน้ำหนักประมาณ 21 ตัน (รูปที่ 1-ก) และในส่วน of SECTION A'-A' จะทำการเชื่อมปิดที่บริเวณช่องเปิดเพื่อลดหน่วยแรงเฉือนบริเวณใกล้ฐานที่รองรับ (รูปที่ 1-ข) และ SECTION A-A จะเป็นหน้าตัดของคานควบคุม Delta-C ที่มีช่องเปิดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางของช่องเปิดเท่ากับ 200 มิลลิเมตร ส่วนคาน Delta-S มีลักษณะเหมือนกับคาน Delta-C แต่มีการเชื่อมเหล็ก DB-16 (SD40) เพื่อเป็นเหล็กเดือย (Dowel Reinforcement) เข้าไปที่บริเวณด้านบนของช่องเปิดคาน (รูปที่ 1-ค) เพื่อศึกษาผลของการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและคานเหล็ก ต่อการแอ่นตัวของคานคอมโพสิตภายหลังเทคอนกรีต ภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกในภาวะใช้งาน และภาวะสุกซิด ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 (ก) รูปแบบของคานทดสอบ (ข และ ค) รายละเอียดหน้าตัดของคานทดสอบ (หน่วย มิลลิเมตร)



(ก) คาน Delta-C



(ข) คาน Delta-S



(ค) ภาพคานทดสอบหลังเทคอนกรีต

รูปที่ 2 (ก,ข) ภาพตัวอย่างคานทดสอบก่อนเทคอนกรีต (ค) คานทดสอบคอมโพสิตภายหลังเทคอนกรีต

3.2 การตรวจวัดการแอ่นตัว

อุปกรณ์วัดการแอ่นตัวแบบดิจิทัล (Digital Dial Gauge) ของบริษัท iGAGING รุ่น IGA-35-128 [18] (อ่านค่าความละเอียดได้ 0.001 มิลลิเมตร) ถูกติดตั้งที่บริเวณจุดกลางคาน จำนวน 3 ตัว (S1, S2, S3) (รูปที่ 3-ก) เพื่อหาค่าเฉลี่ยการแอ่นตัวของคาน และอีก 2 ตัว ติดตั้งที่ปลายคานทั้ง 2 ข้าง (S4, S5) สำหรับวัดค่าการไถลตัวระหว่างเหล็กและคอนกรีต (End Slip) ดังแสดงในรูปที่ 3-ข และทำการใส่น้ำหนักบรรทุกจากแผ่นเหล็กขนาด 1220 x 2440 มิลลิเมตร หนา 15 มิลลิเมตร (มีน้ำหนักเฉลี่ย 350 กิโลกรัมต่อแผ่น) ใน การทดสอบนี้ ใช้แผ่นเหล็กทั้งหมด 60 แผ่น เท่ากับน้ำหนักบรรทุกรวม 21000 กิโลกรัม หรือคิดเป็นน้ำหนักแผ่กระจาย $w = 3560$ กิโลกรัมต่อเมตร



(ก) ติดตั้ง Digital Dial Gauge ที่บริเวณจุดกลางคาน



(ข) การใส่น้ำหนักบรรทุก

รูปที่ 3 การติดตั้งเครื่องมือวัด Digital dial gauge (ก) และการใส่น้ำหนักบรรทุก (ข)

3.3 การให้น้ำหนักทดสอบบรรทุก

รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างขั้นตอนการให้น้ำหนักบรรทุกบนคานทดสอบแบบระยะสั้น (Short-term Loading) บนคานทดสอบ ภายหลังจากติดตั้งอุปกรณ์วัดการแอ่นตัวแบบดิจิทัล (Digital Dial Gauge) ที่บริเวณจุดกลางคานแล้วเสร็จ (รูปที่ 4-ก) โดยใช้รถ เครนที่ติดตั้งชุดยกแบบแม่เหล็กเพื่อยกแผ่นเหล็ก (รูปที่ 4-ข) และวางให้เต็มพื้นที่บน โครงสร้างชั่วคราวสำหรับไว้วางน้ำหนักหน้า คัดคานทดสอบ ซึ่งสามารถวางแผ่นเหล็กได้ 5 แผ่นต่อชั้น วางรวมทั้งสิ้นจำนวน 12 ชั้น (รูปที่ 4-ค) รวมแผ่นเหล็กที่ต้องใช้จำนวน 60 แผ่น คิดเป็นน้ำหนักทั้งหมด 21000 กิโลกรัม ($w = 3560$ กิโลกรัมต่อเมตร) แล้วอ่านค่าการแอ่นตัวในทุกชั้นของการให้น้ำหนัก

โดยเป็นค่าการแอ่นตัวของคานกับน้ำหนักที่ให้เมื่อใต้น้ำหนักครบ 21 ตัน ทำการบันทึกค่าการแอ่นตัวสูงสุด (Maximum deflection, d_{max}) เมื่อให้น้ำหนักเสร็จทั้ง 12 ชั้นแล้ว วางน้ำหนักค้างไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง ทำการเอาแผ่นเหล็กออกและเมื่อเอาแผ่นเหล็กออก 1 ชั้น ก็อ่านค่าการแอ่นตัวกลับ 1 ครั้ง ทำซ้ำแบบนี้จนเอาแผ่นเหล็กออกทั้งหมด ถือว่าเสร็จการทดสอบให้น้ำหนัก ทำการทดสอบการให้น้ำหนักแบบนี้ทั้งคาน Delta-C-s และ คาน Delta-S-s



(ก) ติดตั้ง Digital dial gauge และอ่านค่าเริ่มต้น



(ข) การให้น้ำหนักบรรทุกจากรถเครนขนาด 5 ตัน



(ค) เคลื่อนย้ายแผ่นเหล็กโดยใช้ Magnetic lifters



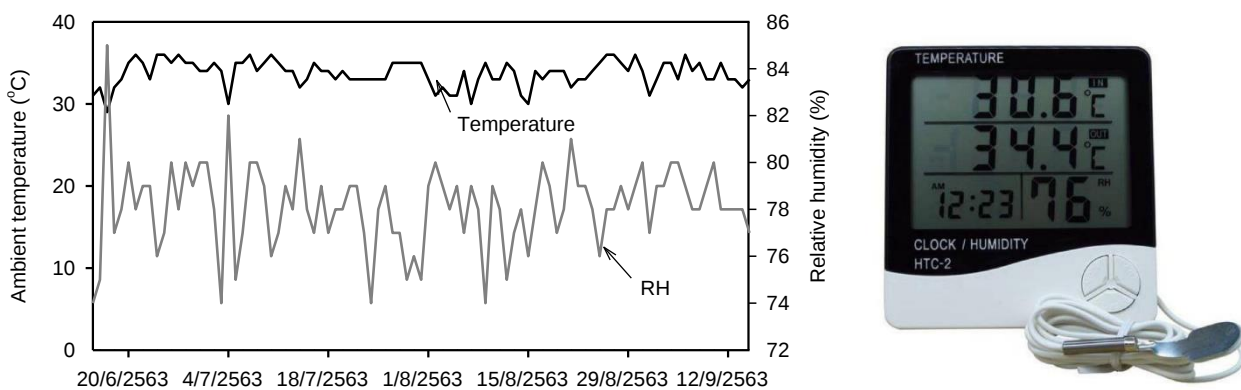
(ง) แผ่นเหล็กจำนวน 12 ชั้น

รูปที่ 4 ขั้นตอนการให้น้ำหนักบรรทุกบนคานทดสอบทั้งแบบระยะสั้นและระยะยาว

ในส่วนของการให้น้ำหนักคงค้างแบบระยะยาว (Long-term Loading) เป็นระยะเวลา 3 เดือน จะทำการให้น้ำหนักในรูปแบบเดียวกับการให้น้ำหนักแบบระยะสั้น แต่การให้น้ำหนักบรรทุกบนคานทดสอบแบบระยะยาวนั้น เมื่อให้น้ำหนักจากแผ่นเหล็กแล้วเสร็จทั้ง 12 ชั้นแล้ว กำหนดวางน้ำหนักคงค้างไว้เป็นเวลา 3 เดือน (เริ่มทดสอบวันที่ 15 มิถุนายน 2563 – วันที่ 15 กันยายน 2563) ทำการอ่านค่าการแอ่นตัว วันละ 2 ครั้ง ที่เวลา 12.00 น. และ 24.00 น. จนครบเวลา 3 เดือน ซึ่งจะสามารถอ่านค่าการแอ่นตัวสูงสุด (d_{max}) แล้วทำการยกแผ่นเหล็กที่วางคงค้างไว้ออก และทำการอ่านค่าการแอ่นตัวในลักษณะเดียวกันกับการให้น้ำหนักระยะสั้น จนเอาแผ่นเหล็กออกหมด อ่านค่าการแอ่นตัวคงค้าง (Residual Deflection, d_r) ถือว่าเสร็จสิ้นการทดสอบการให้น้ำหนักแบบระยะยาว ทำการทดสอบการให้น้ำหนักแบบนี้ทั้งคาน Delta-C-1 และ คาน Delta-S-1

3.4 การตรวจวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

ในการให้น้ำหนักจากภาคสนาม คณะวิจัยได้ทำการตรวจวัดอุณหภูมิ (Ambient Temperature) และทำการตรวจวัดความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity, RH) ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนของปริมาณไอน้ำที่มีอยู่จริงในอากาศต่อปริมาณไอน้ำที่จะทำให้อากาศอิ่มตัว ณ อุณหภูมิเดียวกัน แสดงในรูปของร้อยละ (%) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลจากผลของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ต่อการโก่งตัวของคานเหล็กในการทดสอบในระยะยาว เช่น ความคืบ และในการศึกษาวิจัยนี้จะใช้อุปกรณ์ไฮโกรมิเตอร์แบบดิจิตอลรุ่น HTC-2 ซึ่งสามารถบันทึกค่าอุณหภูมิ (ช่วงการวัด -50 ถึง 70 องศาเซลเซียส) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ (ช่วงการวัดร้อยละ 10 ถึง 99) จากรูปที่ 5 เป็นกราฟที่แสดงผลการตรวจวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ เริ่มตรวจวัดวันที่ 15 มิถุนายน 2563 ถึง วันที่ 15 กันยายน 2563 จะเห็นว่าเส้นกราฟความชื้นสัมพัทธ์มีค่าสูงขณะทำการวางน้ำหนักบรรทุก และอุณหภูมิลดลงเล็กน้อยเนื่องจากมีฝนตกขณะวางน้ำหนักบรรทุก และจากการตรวจวัดค่าอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 34.5 องศาเซลเซียส และค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 78.9



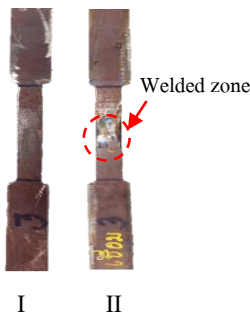
รูปที่ 5 ผลการตรวจวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์จากการบันทึกโดยไฮโกรมิเตอร์ รุ่น HTC-2

3.5 การทดสอบคุณสมบัติวัสดุ

3.5.1 แผ่นเหล็กที่ใช้ก่อสร้างคานทดสอบ

แผ่นเหล็กที่ใช้ก่อสร้างคานทดสอบโดยการตัดและเชื่อมประกอบจากเหล็กแผ่นรีดร้อนชั้นคุณภาพ SS400 (มอก. 1479-2541) [19] คณะวิจัยจึงได้ทำการทดสอบหาค่าลึงครากและแรงดึงของแผ่นเหล็กที่ใช้ก่อสร้างคานทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบของชิ้นงานที่ไม่มีการเชื่อม (ตัวอย่าง I) กับชิ้นงานที่มีการเชื่อม (ตัวอย่าง II) โดยได้ทำการทดสอบที่ห้องทดสอบวัสดุ สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ โดยผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 1 พบว่าค่าเฉลี่ยของโมดูลัสยืดหยุ่น (Young's Modulus) ของแผ่นเหล็กที่ไม่มีการเชื่อม (I) และมีการเชื่อม (II) เท่ากับ 205 จิกะปาสกาล และ 201 จิกะปาสกาล ตามลำดับ ค่ากำลังสูงสุดเฉลี่ยของแผ่นเหล็กที่ไม่มีการเชื่อม (I) และมีการเชื่อม (II) เท่ากับ 371 เมกะปาสกาล และ 345 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ค่ากำลังครากเฉลี่ยของแผ่นเหล็กที่ไม่มีการเชื่อม (I) และมีการเชื่อม (II) เท่ากับ 300 เมกะปาสกาล และ 330 เมกะปาสกาล ค่าหน่วยการยืดตัวเฉลี่ยที่จุดครากของแผ่นเหล็กที่ไม่มีการเชื่อม (I) และมีการเชื่อม (II) เท่ากับ 0.27 % และ 0.26 % ตามลำดับ และค่าหน่วยการยืดตัวเฉลี่ยสูงสุดของแผ่นเหล็กที่ไม่มีการเชื่อม (I) และมีการเชื่อม (II) เท่ากับ 13.1 % และ 12.5 % ตามลำดับ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กที่ไม่มีการเชื่อม (I) และมีการเชื่อม (II)

	โมดูลัสยืดหยุ่น (กิกะปาสกาล)	กำลังสูงสุด (เมกะปาสกาล)	กำลังคราก (เมกะปาสกาล)	หน่วยการยืดตัวที่ จุดคราก (%)	หน่วยการยืดตัว สูงสุด (%)
	208 (202)	335 (336)	271 (295)	0.27 (0.26)	15.1 (14.2)
	205 (201)	379 (320)	312 (317)	0.28 (0.27)	12.2 (12.3)
	202 (201)	399 (379)	319 (379)	0.26 (0.25)	11.3 (10.1)
เฉลี่ย	205 (201.3)	371 (345)	300.7 (330.3)	0.27 (0.26)	13.1 (12.5)

หมายเหตุ : ตัวอย่าง I คือ ผลการทดสอบจากเหล็กแผ่นที่ไม่มีการเชื่อม และตัวอย่าง II คือผลการทดสอบจากตัวอย่างเหล็กแผ่นที่มีการเชื่อม

3.5.2 คุณสมบัติของคอนกรีต

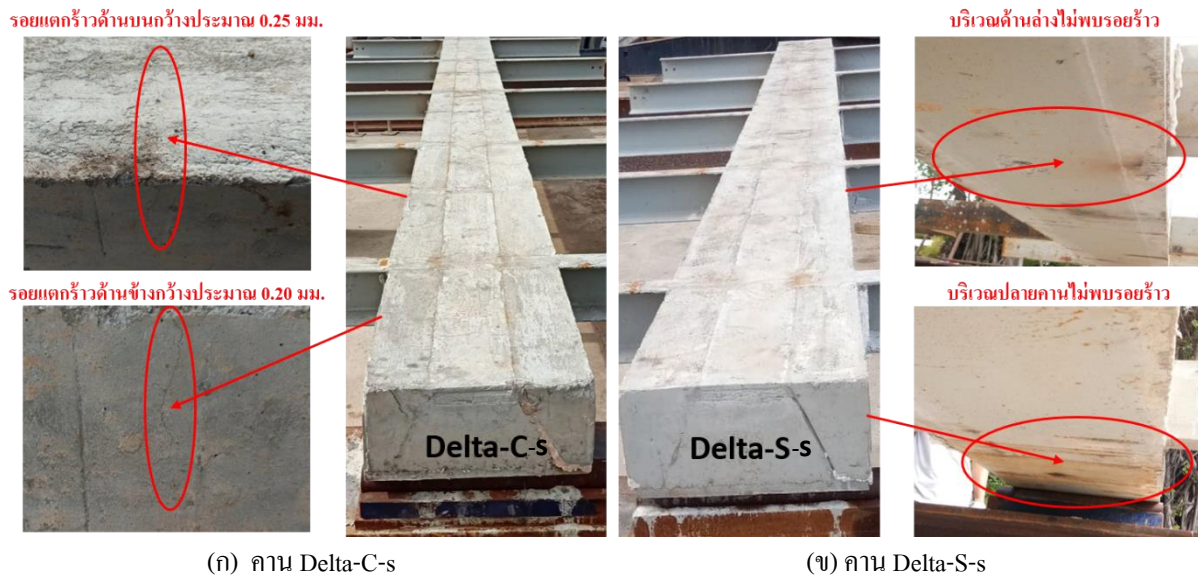
คอนกรีตที่ใช้ในการเทหล่อคานนี้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 กำหนดกำลังระบุเท่ากับ 38 เมกะปาสกาล ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดทรงลูกบาศก์ที่ 28 วัน เท่ากับ 45.2 เมกะปาสกาล ค่ากำลังอัดทรงกระบอกที่ 28 วัน เท่ากับ 40.2 เมกะปาสกาล ค่ากำลังรับแรงดึง เท่ากับ 4.1 เมกะปาสกาล และค่ากำลังรับแรงดัดแบบของคานปริซึม เท่ากับ 5.2 เมกะปาสกาล ตามมาตรฐาน มอก.231-2552 [20]

4. ผลการทดสอบ

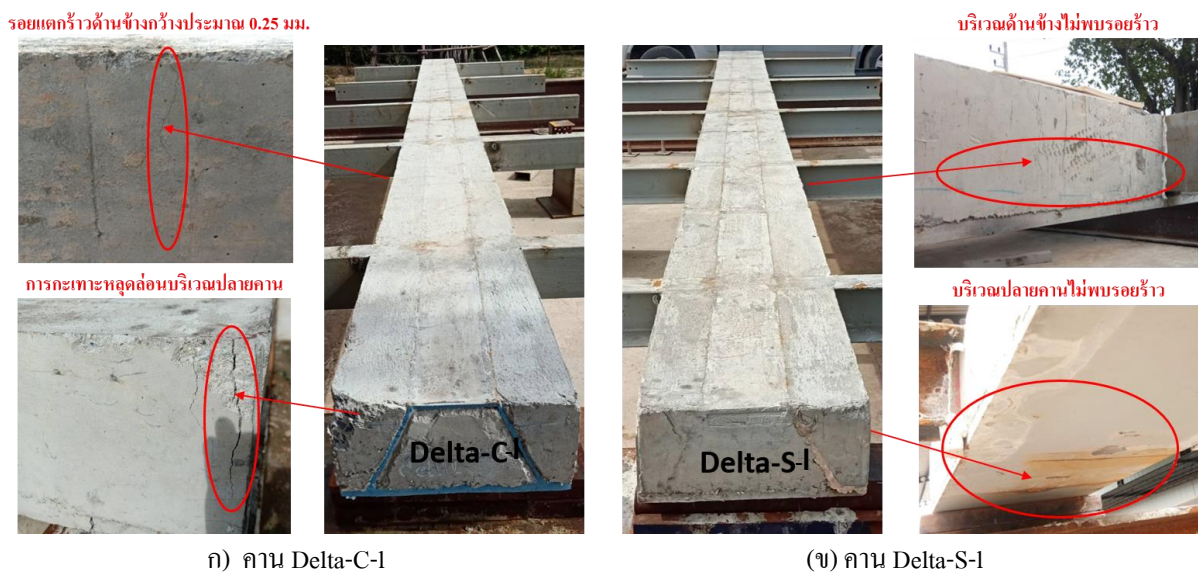
4.1 พฤติกรรมรอยร้าว

จากการทดสอบการให้น้ำหนักบรรทุกของตัวอย่างคาน Delta-C-s และคาน Delta-S-s โดยตัวอย่างคาน Delta-C-s ที่ทดสอบแบบระยะสั้น พบรอยแตกร้าวของคอนกรีตกว้างประมาณ 0.20 มิลลิเมตร จะเกิดรอยร้าวบริเวณด้านข้างจำนวน 2 จุด (รูปที่ 6-ก) เมื่อเทียบกับคาน Delta-S-s ไม่พบการแตกร้าวจากการทดสอบให้น้ำหนักแบบระยะสั้น (รูปที่ 6-ข) และในส่วนบริเวณปลายของคาน ไม่พบการเลื่อนไถล (Slip) ระหว่างคอนกรีตและคานเหล็กอย่างเด่นชัด ซึ่งสามารถใช้สมมติฐานในการพัฒนาแบบจำลอง Bond Interaction ระหว่างคอนกรีตและคานเหล็กเป็นแบบยึดแน่น และไม่มีเลื่อนไถล สำหรับการวิเคราะห์การแอ่นตัวของคานทดสอบโดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 5

ในส่วนของการทดสอบแบบระยะยาว ตัวอย่างคาน Delta-C-1 มีรูปแบบและตำแหน่งการเกิดรอยร้าวเช่นเดียวกับการทดสอบแบบระยะสั้น คือพบรอยร้าวบริเวณด้านข้างของคาน และรอยแตกร้าวของคอนกรีตกว้างประมาณ 0.25 มิลลิเมตร และพบการกะเทาะหลุดล่อนของคอนกรีตแตกที่บริเวณปลายคาน (รูปที่ 7-ก) ซึ่งเกิดจากการที่แผ่นเหล็กกระแทกขณะเคลื่อนย้ายน้ำหนักออก สำหรับตัวอย่างคาน Delta-S-1 ที่มีเหล็กเดือย (Dowel reinforcement) เชื่อมติดที่ช่องเปิดตลอดแนวคาน จากการสังเกตความเสียหายตลอดคาน ทั้งด้านบน และด้านล่าง ไม่พบรอยร้าว (รูปที่ 7-ข) และในส่วนบริเวณปลายของคาน ไม่พบการเลื่อนไถล (Slip) ระหว่างคอนกรีตและคานเหล็ก เช่นเดียวกับคาน Delta-C-1



รูปที่ 6 ลักษณะรอยร้าวของตัวอย่างคานทดสอบแบบระยะสั้น (ก) คาน Delta-C-s และ (ข) คาน Delta-S-s

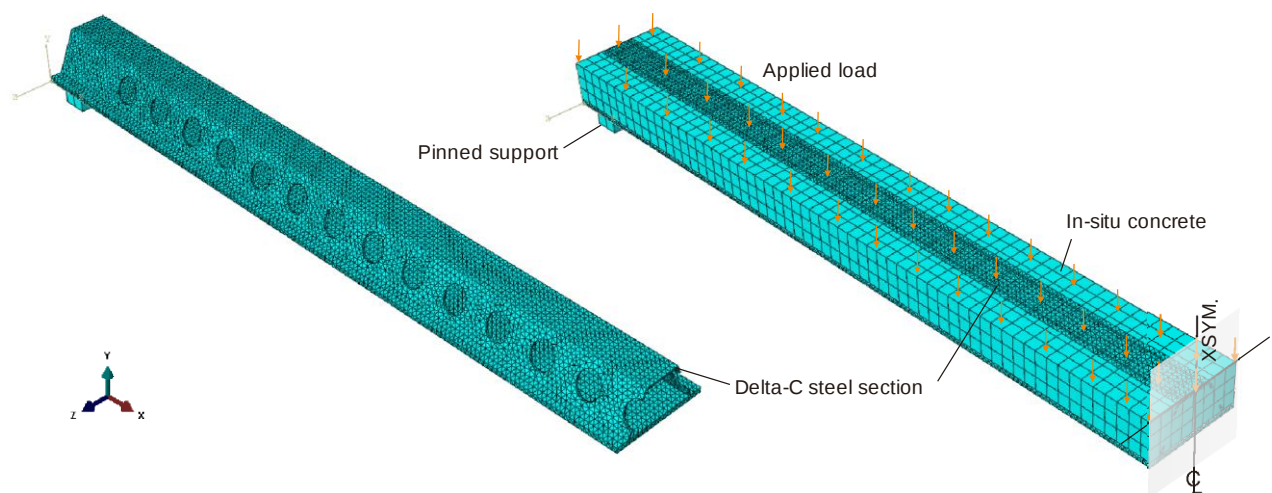


รูปที่ 7 ลักษณะรอยร้าวของตัวอย่างคานทดสอบแบบระยะยาว (ก) คาน Delta-C-l และ (ข) คาน Delta-S-l

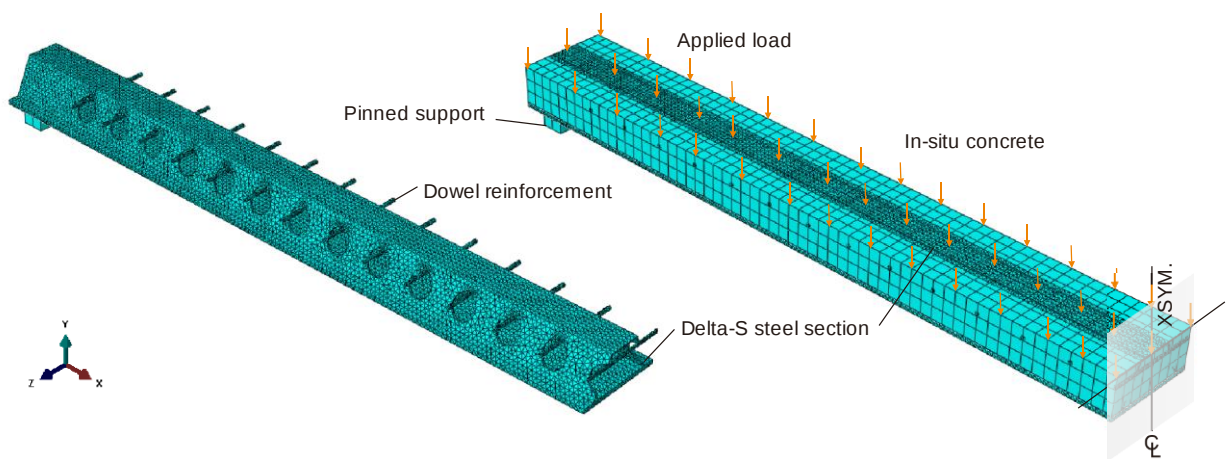
5. การวิเคราะห์การแอ่นตัวของคานทดสอบโดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์การแอ่นตัวของคานทดสอบโดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม ABAQUS version 6.14 [21] ดังมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยต่อเนื่อง [22] ระหว่างมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ (ดำเนินการทดสอบภาคสนาม 3 เดือน) ร่วมกับ University of Warwick (พัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการแอ่นตัวของคานคอมโพสิตเทียบกับผลการทดสอบภาคสนาม โดยแบบจำลองรูปแบบชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับโครงสร้างคอนกรีต คือ ชนิด 8-node linear brick (C3D8R) และสำหรับโครงสร้างคานเหล็กประกอบ คือ ชนิด

10-node quadratic tetrahedron (C3D10) ใน Library ของโปรแกรม ABAQUS ซึ่งเป็นการสร้างรูปแบบเอลิเมนต์ภายในขอบเขตตามที่ผู้ใช้กำหนด (User define) ในส่วนของการจำลองรูปแบบการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กประกอบ ซึ่งจะสอดคล้องกับผลจากการตรวจวัดโดย Dial gauge S4 และ S5 ซึ่งไม่พบการเลื่อนไถล (Slip) ระหว่างคอนกรีตและคานเหล็ก ดังนั้นถือว่าคานเป็นคอมโพสิตโดยสมบูรณ์ และใช้แบบจำลองการยึดเหนี่ยวประเภท Hard Contact ในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ทำการกำหนดตำแหน่งของการติดตั้ง Dial gauge ที่ตำแหน่งเดียวกันกับการติดตั้งภาคสนาม และกำหนดค่าน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ทดสอบจริง (ค่าน้ำหนักแผ่กระจาย $w = 3560$ กิโลกรัมต่อเมตร) ทั้งนี้แบบจำลองในการวิเคราะห์จะใช้ความยาวของคานครึ่งสมมาตร (3000 มิลลิเมตร) เพื่อประหยัดทรัพยากรในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์



(ก) 3D mesh for Delta-C specimen



(ข) 3D mesh for Delta-S specimen

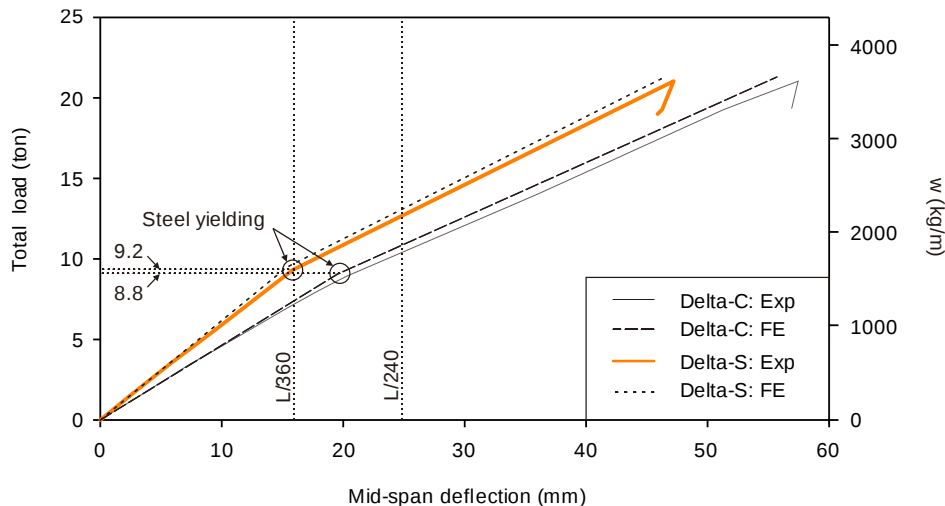
รูปที่ 8 แบบจำลอง 3 มิติ ชนิดระนาบความเครียด (Plane strain) ของโครงสร้างแปลงทดสอบ

การจำลองสภาพการยึดรั้งของแบบจำลองจะใช้ฐานรองรับแบบหมุดได้ (Pinned support) ซึ่งใช้ในการทดสอบภาคสนาม และกำหนดคุณสมบัติวัสดุ คือ คอนกรีตโดยกำหนดความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียด (Constitutive concrete model) ตามสมการกำหนดโดย Model Code 2010 [23] ในส่วนของเหล็กแผ่นประกอบ ทำการกำหนดจุดครากและจุดเปลี่ยนที่จุดเดียวกัน

ดังนั้นข้อกำหนดของการวิบัติ (Failure criteria) ในแบบจำลองในการวิเคราะห์นี้คือ กำหนดเมื่อ 1) โครงสร้างเหล็กแผ่นประกอบถึงจุดคราก และ/หรือ 2) ความเครียดของคอนกรีตถึงค่าความเครียดประลัย

5.1 การแอ่นตัวของคานทดสอบจากน้ำหนักบรรทุกทดสอบระยะสั้น

การทดสอบสามารถในการรับกำลังน้ำหนักแบบแผ่กระจาย (Distribution Load Test) ของคาน Delta-C-s และ คาน Delta-S-s โดยวางน้ำหนักแบบแผ่กระจายและทำการวัดค่าการแอ่นตัว รูปที่ 9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักรวม (Total Load) กับระยะแอ่นตัวที่กลางคาน (Mid-span Deflection) โดยให้น้ำหนักสูงสุดที่ 21000 กิโลกรัม หรือ 3560 กิโลกรัมต่อเมตร ผลทดสอบของคาน Delta-C-s พบว่าเมื่อน้ำหนักบนคานเท่ากับ 1254 กิโลกรัมต่อเมตร จะให้ระยะการแอ่นตัวเท่ากับ L/360 ในขณะที่น้ำหนักบนคานเท่ากับ 1725 กิโลกรัมต่อเมตร จะให้ระยะการแอ่นตัวเท่ากับ L/240 ซึ่งน้อยกว่าค่าของคาน Delta-S-s คือมีน้ำหนัก 1500 กิโลกรัมต่อเมตร และ 2118 กิโลกรัมต่อเมตรที่ทำให้คานแอ่นตัวที่ระยะ L/360 และ L/240 ตามลำดับ จะเห็นว่าน้ำหนักบรรทุกของคาน Delta-S-s เพิ่มขึ้นร้อยละ 19.6 เทียบกับคาน Delta-C-s ที่ระยะการแอ่นตัวที่เท่ากับ L/360 ค่าน้ำหนักบรรทุกของคาน Delta-S-s เพิ่มขึ้นร้อยละ 22.7 เมื่อเทียบกับคาน Delta-C-s ที่ระยะการแอ่นตัวที่เท่ากับ L/240 และเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบจริงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงดังรูปที่ 9 พบว่าผลจากการทดสอบจริงมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองมาก จะเริ่มเห็นความแตกต่าง คือ ที่จุด Steel yielding ซึ่งต่างกันร้อยละ 8.2 และที่ Load สูงสุดต่างกันร้อยละ 10.4 แล้วพบว่าคานทดสอบ Delta-C-s จะมีความแตกต่างมากกว่าคานทดสอบ Delta-S-s เนื่องจากอิทธิพลของรอยร้าว เมื่อเกินรอยร้าวเยอะ จะทำให้ค่าจากการวิเคราะห์กับค่าจากการทดสอบจริงต่างกันมากอย่างเห็นได้ชัด

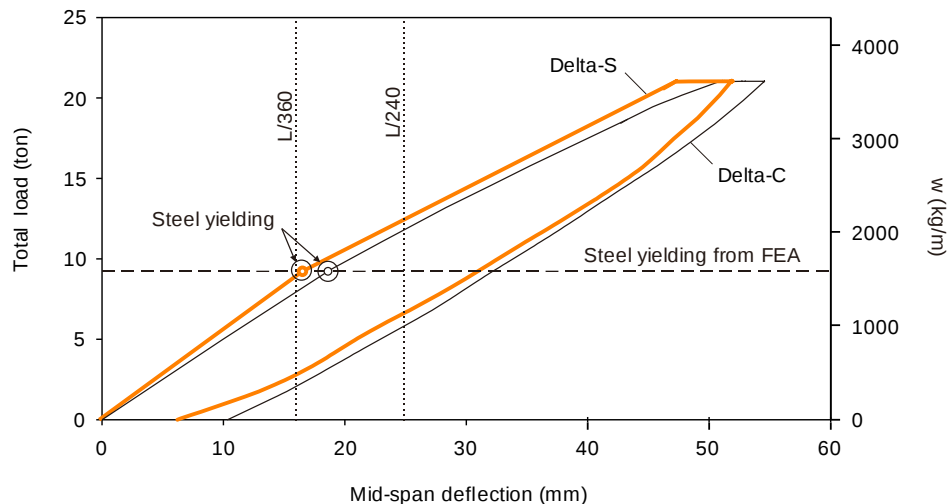


รูปที่ 9 ผลการเปรียบเทียบการแอ่นตัวของคานทดสอบจากน้ำหนักบรรทุกทดสอบระยะสั้น

5.2 การแอ่นตัวของคานทดสอบจากน้ำหนักบรรทุกทดสอบระยะยาว

รูปที่ 10 แสดงผลการเปรียบเทียบการแอ่นตัวของคานทดสอบจากน้ำหนักบรรทุกทดสอบระยะยาวจากแบบจำลองและจากการตรวจวัดภาคสนาม เป็นระยะเวลา 3 เดือน จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบตัวอย่างคาน Delta-C-1 พบว่าที่ระยะการแอ่นตัว L/360 และ L/240 ของ ตรงกับค่าน้ำหนัก 1644 กิโลกรัมต่อเมตร และ 1994 กิโลกรัมต่อเมตร ซึ่งน้อยกว่าค่าน้ำหนักของคาน Delta-S-1 คือ 1702 กิโลกรัมต่อเมตร และ 2355 กิโลกรัมต่อเมตร ที่ระยะการแอ่นตัว L/360 และ L/240 ตามลำดับ โดยพบว่าค่าน้ำหนัก

บรรทุกของคาน Delta-S-1 เพิ่มขึ้นร้อยละ 3.5 เทียบกับคาน Delta-C-1 ที่ระยะการแอ่นตัว $L/360$ และค่าน้ำหนักบรรทุกของคาน Delta-S-1 เพิ่มขึ้นร้อยละ 18.1 เทียบกับคาน Delta-C-1 ที่ระยะการแอ่นตัว $L/240$



รูปที่ 10 ผลการเปรียบเทียบการแอ่นตัวของคานทดสอบจากน้ำหนักบรรทุกทดสอบระยะยาว

5.3 การวิเคราะห์สตีฟเนสคานคอมโพสิตและอิทธิพลของเหล็กเดือย (Dowel Reinforcement)

การวิเคราะห์สตีฟเนสคานคอมโพสิตและอิทธิพลของเหล็กเดือย แสดงใน ตารางที่ 2 และรูปที่ 9-10 จะพบว่าเมื่อน้ำหนักกระทำเพิ่มขึ้น การแอ่นตัวก็จะเพิ่มมากขึ้นไปด้วยและเมื่อเปรียบเทียบคาน Delta-C กับ คาน Delta-S จะเห็นว่าค่าการแอ่นตัวของคาน Delta-S จะมีค่าน้อยกว่าคาน Delta-C ทั้งการทดสอบในระยะสั้น และระยะยาว เมื่อรับน้ำหนักเท่ากันที่ $L/240$ และ $L/360$

ค่าประสิทธิภาพของคานทดสอบในภาวะใช้งาน ค่า K_e เป็นค่าที่ได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการแอ่นตัวที่กลางคาน (รูปที่ 10) ในช่วงก่อนเกิดการคราก และประสิทธิภาพของคานทดสอบในภาวะสุดขีด K_y คือความชันหลังจากการเกิดคราก ในการทดสอบแบบระยะสั้น คาน Delta-C-s จะได้ค่า K_e เท่ากับ 510 กิโลกรัมต่อมิลลิเมตร K_y เท่ากับ 370 กิโลกรัมต่อมิลลิเมตร ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าคาน Delta-S-s (K_e เท่ากับ 620 กิโลกรัมต่อมิลลิเมตร และ K_y เท่ากับ 420 กิโลกรัมต่อมิลลิเมตร) และในส่วนของการทดสอบแบบระยะยาว คาน Delta-C-1 จะได้ค่า K_e เท่ากับ 460 กิโลกรัมต่อมิลลิเมตร K_y เท่ากับ 330 กิโลกรัมต่อมิลลิเมตร คาน Delta-S-1 จะได้ค่า K_e เท่ากับ 600 กิโลกรัมต่อมิลลิเมตร K_y เท่ากับ 400 กิโลกรัมต่อมิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นว่า คาน Delta-S-1 จะมีค่าความแข็งแรงมากกว่าคาน Delta-C-1 เท่ากับร้อยละ 30 และร้อยละ 21 สำหรับ K_e และ K_y ตามลำดับ

การศึกษาค่าดูดซับพลังงาน (x , กิโลกรัม-มิลลิเมตร) ในภาวะสุดขีดของคานคอมโพสิต ซึ่งหาจากพื้นที่ใต้กราฟ (รูปที่ 9-10) ในการทดสอบแบบระยะสั้น คาน Delta-C-s จะมีค่า x เท่ากับ 642 กิโลกรัม-มิลลิเมตร คาน Delta-S-s จะได้ค่า x เท่ากับ 538 กิโลกรัม-มิลลิเมตร การทดสอบแบบระยะยาว คาน Delta-C-1 จะได้ค่า x เท่ากับ 613 กิโลกรัม-มิลลิเมตร คาน Delta-S-1 จะได้ค่า x เท่ากับ 596 กิโลกรัม-มิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นว่าคาน Delta-C จะมีการดูดซับพลังงานมากกว่าคาน Delta-S คิดเป็นร้อยละ 19 และ 2.8 สำหรับการทดสอบแบบระยะสั้นและระยะยาว ตามลำดับ ซึ่งพบว่าคานตัวอย่างที่ไม่มีเหล็กเดือย มีค่าการดูดซับพลังงาน ที่มากกว่าคานตัวอย่างที่มีเหล็กเดือย เนื่องจากที่ค่าน้ำหนักที่เท่ากัน คานตัวอย่างที่ไม่มีเหล็กเดือย มีการแอ่นตัวที่น้อยกว่าร้อยละ 15-20

การศึกษาค่าประสิทธิภาพของคานทดสอบในภาวะสุดขีดของคานคอมโพสิตและอิทธิพลของเหล็กเดือย (Dowel Reinforcement) จากดัชนีความเหนียว m คือ อัตราส่วนระหว่าง d_{max}/d_y ในการทดสอบแบบระยะสั้น คาน Delta-C-s จะมีค่า m เท่ากับ

2.84 คาน Delta-S-s จะได้ค่า m เท่ากับ 2.85 การทดสอบแบบระยะยาว คาน Delta-C-1 จะได้ค่า m เท่ากับ 2.90 คาน Delta-S-1 จะได้ค่า m เท่ากับ 2.93 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนระหว่าง d_{max}/d_y ของคาน Delta-S-1 และคาน Delta-S-1 เพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 1-3 ดังนั้นผลของการใส่เหล็กเคียบ ไม่มีผลในการเพิ่มความเหนียวของคานทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ แต่มีผลเพิ่มประสิทธิภาพการรับน้ำหนักและความสามารถต้านทานการแอ่นตัวที่ภาวะใช้งาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และในส่วนของภาวะสุดท้าย ผลของความคืบจะทำให้คาน Delta-C-1 มีค่าการแอ่นตัวคงค้าง (d_r) มากกว่าค่าการแอ่นตัวคงค้าง (d_r) ของคาน Delta-S-1 เท่ากับร้อยละ 57

ตารางที่ 2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของคานทดสอบ

Loading duration	Beam Ref.	w_{max} (กก./ม)	$w @$ $L/240$	$w @$ $L/360$	d_y (มม.)	d_{max} (มม.)	d_r (มม.)	K_e	K_y	x (กก.-มม.)	m
								(กก/มม.)			
Short-term	Delta-C-s	3560	1725.4	1254.2	19.87	56.50	-	510	370	642.19	2.84
	Delta-S-s		2118.6	1500.0	16.40	46.80	-	620	420	538.38	2.85
Long-term	Delta-C-l		1994.0	1644.0	19.25	55.87	10.08	460	330	613.61	2.90
	Delta-S-l		2355.9	1702.7	16.32	47.76	6.38	600	400	596.62	2.93

หมายเหตุ: w is the applied uniform load, d_{max} is the mid-span deflection at the load w_{max} , d_r is the residual deflection for long-term loading, x is the anergy absorption, m is the ductility defined as the ratio of d_{max}/d_y , and K_e, K_y are the stiffness of load-deflection curve before yielding and after yielding, respectively.

6. สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดสอบคานเหล็กประกอบคอมโพสิต โดยมีการให้น้ำหนักบรรทุกแบบระยะสั้นและแบบระยะยาว เป็นระยะเวลา 3 เดือน สามารถสรุปผลการทดสอบดังนี้

- จากการทดสอบที่ภาวะใช้งาน พบว่าเมื่อระยะการแอ่นตัว $L/360$, $L/240$ ของตัวอย่างคาน Delta-C-s ตรงกับค่าน้ำหนักได้เท่ากับ 1254 กิโลกรัมต่อเมตร และ 1725 กิโลกรัมต่อเมตร ซึ่งน้อยกว่าค่าน้ำหนักของคาน Delta-S-s คือ 1500 กิโลกรัมต่อเมตร และ 2118 กิโลกรัมต่อเมตร ที่ระยะการแอ่นตัว $L/360$ และ $L/240$ ตามลำดับ โดยพบว่าค่าน้ำหนักบรรทุกของคาน Delta-S-s เพิ่มขึ้นร้อยละ 19.6 เทียบกับคาน Delta-C-s ที่ระยะการแอ่นตัว $L/360$ และค่าน้ำหนักบรรทุกของคาน Delta-S-s เพิ่มขึ้นร้อยละ 22.7 เทียบกับคาน Delta-C-s ที่ระยะการแอ่นตัว $L/240$ และเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดสอบจริงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงดังรูปที่ 9 พบว่าผลจากการทดสอบจริงมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองมาก จะเริ่มเห็นความแตกต่าง คือ ที่จุด Steel yielding ซึ่งต่างกันร้อยละ 8.2 และที่ Load สูงสุดต่างกันร้อยละ 10.4 แล้วพบว่าคานทดสอบ Delta-C-s จะมีความแตกต่างมากกว่าคานทดสอบ Delta-S-s เนื่องจากอิทธิพลของรอยร้าว เมื่อเกินรอยร้าวเยอะ จะทำให้ค่าจากการวิเคราะห์กับค่าจากการทดสอบจริงต่างกันมากอย่างเห็นได้ชัด
- ค่าประสิทธิภาพของคานทดสอบในภาวะใช้งาน ในการทดสอบแบบระยะสั้น คาน Delta-C-s จะได้ค่า K_e เท่ากับ 420 กิโลกรัมต่อมิลลิเมตร, K_y เท่ากับ 330 กิโลกรัมต่อมิลลิเมตร ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าคาน Delta-S-s (K_e เท่ากับ 620 กิโลกรัมต่อมิลลิเมตร, K_y เท่ากับ 420 กิโลกรัมต่อมิลลิเมตร) และในส่วนของ การทดสอบแบบระยะยาว คาน Delta-C-l จะได้ค่า K_e เท่ากับ 510 กิโลกรัมต่อมิลลิเมตร, K_y เท่ากับ 370 กิโลกรัมต่อมิลลิเมตร คาน Delta-S-l จะได้ค่า K_e เท่ากับ 600 กิโลกรัม

ต่อมิลลิเมตร K_y เท่ากับ 400 กิโลกรัมต่อมิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่า คาน Delta-S-I จะมีค่า stiffness มากกว่า คาน Delta-C-I เท่ากับร้อยละ 30 และ 21 สำหรับ K_x และ K_y ตามลำดับ

- การศึกษาค่าดัดชันพลังงาน (x , กิโลกรัม-มิลลิเมตร) ในภาวะสุดขีดของคานคอมโพสิต ในการทดสอบแบบระยะสั้น คาน Delta-C-s จะมีค่า x เท่ากับ 642 กิโลกรัม-มิลลิเมตร คาน Delta-S-s จะได้ค่า x เท่ากับ 538 กิโลกรัม-มิลลิเมตร การทดสอบแบบระยะยาว คาน Delta-C-I จะได้ค่า x เท่ากับ 613 กิโลกรัม-มิลลิเมตร คาน Delta-S-I จะได้ค่า x เท่ากับ 596 กิโลกรัม-มิลลิเมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่าคาน Delta-C-I จะมีการดัดชันพลังงานมากกว่าคาน Delta-S-I คิดเป็นร้อยละ 19 และ 2.8 สำหรับการทดสอบแบบระยะสั้นและระยะยาว ตามลำดับ ซึ่งพบว่าคานตัวอย่างที่ไม่มีเหล็กเคียวย มีค่าการดัดชันพลังงาน ที่มากกว่าคานตัวอย่างที่มีเหล็กเคียวย เนื่องจากที่คานน้ำหนักที่เท่ากัน คานตัวอย่างที่มีเหล็กเคียวย มีการแอ่นตัวที่น้อยกว่าร้อยละ 15-20
- จากการทดสอบที่ภาวะสุดขีด ที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดเท่ากับ 3560 กิโลกรัมต่อเมตร ซึ่งกำหนดโดยช่วงระยะการวัดสูงสุดของเครื่องวัดระยะแอ่นตัว จะเห็นได้ว่าคาน Delta-S-I ที่มีการใส่เหล็กเคียวย (Dowel Reinforcement) ไม่มีผลในการเพิ่มความเหนียวของคานทดสอบอย่างมีนัยสำคัญ (เพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 1-3)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการประกวด Structural Steel Improvement for Young Engineers (SSI 4YE 2019/2020) บริษัทสหวิริยาสตีล อินดัสตรี จำกัด (มหาชน) คณะวิจัยขอขอบคุณบริษัท เอ โอ สตีล จำกัด ที่อนุเคราะห์ตัวอย่างคานเหล็กคอมโพสิตแบบมีช่องเปิด รวมไปถึงสถานที่ทดสอบสำหรับทดสอบในโครงการวิจัยนี้ และขอขอบคุณ Dr. Reyes Garcia จาก University of Warwick, UK สำหรับการอนุเคราะห์ผลจากแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Mbc, *Composite Slabs and Beams using Steel Decking : Best Practice for Design and*, no. January 2009. 2014.
- [2] B. Y. Huo and C. A. D'Mello, Push-out tests and analytical study of shear transfer mechanisms in composite shallow cellular floor beams, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 88, pp. 191–205, 2013, doi: 10.1016/j.jcsr.2013.05.007.
- [3] G. Ranzi, S. Al-Deen, L. Ambrogio, and B. Uy, Long-term behaviour of simply-supported post-tensioned composite slabs, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 88, pp. 172–180, 2013, doi: 10.1016/j.jcsr.2013.05.010.
- [4] T. Limazie and S. Chen, FE modeling and numerical investigation of shallow cellular composite floor beams, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 119, pp. 190–201, 2016, doi: 10.1016/j.jcsr.2015.12.022.
- [5] T. Limazie and S. Chen, Effective shear connection for shallow cellular composite floor beams, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 128, pp. 772–788, 2017, doi: 10.1016/j.jcsr.2016.10.010.
- [6] M. Lawson, P. Beguin, R. Obiala, and M. Braun, Slim-floor construction using hollow-core and composite decking systems, *Steel Constr.*, vol. 8, no. 2, pp. 85–89, 2015, doi: 10.1002/stco.201510018.
- [7] S. Al-Deen, G. Ranzi, and Z. Vrcelj, Full-scale long-term experiments of simply supported composite beams with solid slabs, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 67, no. 3, pp. 308–321, 2011, doi: 10.1016/j.jcsr.2010.11.001.
- [8] S. Al-Deen, G. Ranzi, and Z. Vrcelj, Full-scale long-term and ultimate experiments of simply-supported composite beams with steel deck, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 67, no. 10, pp. 1658–1676, 2011, doi: 10.1016/j.jcsr.2011.04.010.
- [9] S. Chen, T. Limazie, and J. Tan, Flexural behavior of shallow cellular composite floor beams with innovative shear connections, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 106, pp. 329–346, 2015, doi: 10.1016/j.jcsr.2014.12.021.

- [10] Slimflor, and , Slimdek, Construction : European developments, p. 14052, 2020.
- [11] G. Hauf and U. Kuhlmann, Deformation calculation methods for slim floors, *Steel Constr.*, vol. 8, no. 2, pp. 96–101, 2015, doi: 10.1002/stco.201510017.
- [12] R. M. Lawson, J. Lim, S. J. Hicks, and W. I. Simms, Design of composite asymmetric cellular beams and beams with large web openings, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 62, no. 6, pp. 614–629, 2006, doi: 10.1016/j.jcsr.2005.09.012.
- [13] M. V. Leskelä, Shallow floor integrated beams and their components: Comparison of behavior, *Proc. Conf. Compos. Constr. Steel Concr. IV*, pp. 164–177, 2000, doi: 10.1061/40616(281)15.
- [14] Y. Wang, L. Yang, Y. Shi, and R. Zhang, Loading capacity of composite slim frame beams, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 65, no. 3, pp. 650–661, 2009, doi: 10.1016/j.jcsr.2008.05.012.
- [15] N. Baldassino, G. Roverso, G. Ranzi, and R. Zandonini, Service and Ultimate Behaviour of Slim Floor Beams: An Experimental Study, *Structures*, vol. 17, no. September 2018, pp. 74–86, 2019, doi: 10.1016/j.istruc.2018.10.001.
- [16] O. Hechler, M. Braun, R. Obiala, U. Kuhlmann, F. Eggert, and G. Hauf, CoSFB-Composite Slim-Floor Beam: Experimental Test Campaign and Evaluation, *Compos. Constr. Steel Concr. VII - Proc. 2013 Int. Conf. Compos. Constr. Steel Concr.*, pp. 158–172, 2013, doi: 10.1061/9780784479735.013.
- [17] I. M. Ahmed and K. D. Tsavdaridis, Shear connection of prefabricated slabs with LWC - Part1: Experimental and analytical studies, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 169, p. 106016, 2020, doi: 10.1016/j.jcsr.2020.106016.
- [18] IGaging. *Digital Dial Indicator*, 2020. Available from: incrementaltools.com/igaging_Digital_Dial_Indicator_p/iga-35-128.htm [Accessed 10 June 2020].
- [19] Sahaviriya Steel Industries PLC. *SS400 steel is a structural hot Rolled steel*, 2556. Available from: <https://ssi-steel.com/index>. [9 July 2020].
- [20] Thai Industrial Standards Institute. *Thai Industrial Standards TISI.213-2552*, 2520. Available from: http://www.fio.co.th/web/tisi_fio/fulltext/TIS213-2552.pdf. [15 July 2563].
- [21] ABAQUS. (2016). *FEA software and User's Manual version 6.14*, Hibbitt, karlsson Sorensen Inc., Rhode Island, USA, <http://www.abaqus.com>, [1 March 2020]
- [22] RJST. *Finite element analysis for Composite steel beam with open web*, 2019. Available from: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/RJST>. [8 March 2020]
- [23] Fib Bulletin No. 56. *Model Code 2010 - First complete draft, Volume 2*, 2010. Available from: <https://www.fib-international.org>. [29 March 2020]