



กำลังและความเหนียวของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายแบบยึดตรึง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำ
หลายรอบ

**STRENGTH AND DUCTILITY OF RESTRAINED STEEL-CONCRETE COMPOSITE BEAMS
UNDER CYCLIC LOADS**

สราวุฒิ ยอดมณี^{1*} ต่อกุล กาญจนาลัย² และตระกูล อร่ามรักรักษ์³

¹นิสิตปริญญาเอก, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²ศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

³รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

*Corresponding author: yodmunees@gmail.com

บทคัดย่อ

คานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตเป็นที่นิยมใช้ในการก่อสร้างสะพาน เป็น โครงสร้างเชิงประกอบ (Composite structures) ที่ประกอบด้วยเหล็กหรือเหล็กที่นำมาประกอบกับพื้นคอนกรีตยึดติดกันด้วยตัวยึดรับแรงเฉือน เพื่อให้ร่วมกันทำหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุก ตามมาตรฐานการออกแบบ AISC และ AASHTO การทดสอบพบว่าน้ำหนักบรรทุกของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายยึดตรึงที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณ์ มีค่าเฉลี่ยมากกว่าน้ำหนักบรรทุกกระทำเฉลี่ยของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายยึดตรึงที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบบางส่วน 5.528 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอัตราส่วนความเหนียวของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิต ซึ่งมีปลายแบบยึดตรึงที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณ์ มีอัตราส่วนความสามารถในการเปลี่ยนรูปน้อยกว่าคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิต ซึ่งมีปลายแบบยึดตรึงที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบบางส่วน อัตราส่วนความเหนียว 12.636 เปอร์เซ็นต์ ในทางปฏิบัติคานสะพานควรออกแบบเป็นคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณ์เพราะจะมีกำลังสูงสุดมากกว่า ไม่เกิดการเคลื่อนตัวระหว่างผิวสัมผัสของแผ่นพื้นคอนกรีตกับเหล็กเสริมและมีความคงทนเพียงพอ

คำสำคัญ : กำลัง, ความเหนียว, คานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายแบบยึดตรึง, น้ำหนักบรรทุกกระทำหลายรอบ

ABSTRACT

Steel-concrete composite, which is known as composite structure has been popularly constructed for bridge construction. It is made from steel connected with slab concrete holding together again with shear connectors. This facilitates in loading capacity according to AISC and AASHTO standard designs. The results of the research bring out the fact that the fully composite has more loading capacity than the partially composite, that is 5.528 percent. The study also focuses on the deformation capacity ratio

Sarawat Yodmune^{1*} Torkul Kamjanalai² and Torkul Aramrak³

¹Doctor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

²Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

³Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

between the fully composite and the partial composite under the above mentioned condition. In this aspect , it is found that the deformation capacity of the fully composite is less than the partial composite, that is 12.636 percent. Drawing from the study, it is suggested that at the practical level, the steel concrete composite have to be design as the fully composite because with this design, it is able to hold the highest strength, prevent slipping between steel and slab concrete , and increase the durability.

KEYWORDS: Strength, Ductility, Restrained steel-concrete composite beams, Cyclic loads

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมสะพานสำหรับการขนส่งได้ก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว มีการวิเคราะห์ออกแบบสะพานช่วงยาวขึ้นและขณะเดียวกันมีการพัฒนาวัสดุของโครงสร้างคานสะพานที่กำลังและความเหนียวมีค่าสูงเพื่อให้มีความสามารถต้านทานต่อแรงกระทำและการเสียดรูปเนื่องจากการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกจาก 21 ตัน เป็นน้ำหนักบรรทุก 25 ตัน เพื่อสอดคล้องกับการเพิ่มน้ำหนักระดับสากล [1,2,3] จากปริมาณจราจรที่สูงขึ้นมากและมีจำนวนรอบกระทำถี่ขึ้น ซึ่งพฤติกรรมของคานสะพานที่ต้านทานน้ำหนักบรรทุกที่เปลี่ยนแปลงนี้ จะต้องมีการศึกษาวิจัยให้เข้าใจดีขึ้น โดยเฉพาะสำหรับสะพานทางหลวงที่มีความยาวช่วง 40-60 เมตร ระบบคานสะพานที่มีประสิทธิภาพเป็นชนิดคานคอมโพสิตซึ่งประกอบด้วยคานเหล็กรูปพรรณและแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กชนิดหล่อในที่ซึ่งยึดกับคานเหล็กด้วยตัวยึดรับแรงเฉือน (Shear connectors) เป็นวัสดุที่เหมาะสมที่จะรับน้ำหนักบรรทุกจรที่เพิ่มขึ้น [4,6]

คานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตแบบต่อเนื่องมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในอาคารสูงและสะพาน สามารถลดความลึกและน้ำหนักของคานได้ 20-30 เปอร์เซ็นต์ โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลาสติก (Plastic analysis) สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีอีลาสติกไม่เพียงพอต่อโมเมนต์ที่สูงกว่าบริเวณจุดรองรับภายในและกึ่งกลางช่วงคาน ในกรณีที่ความต้านทานโมเมนต์ลบที่จุดรองรับภายในโดยทั่วไปมีค่าน้อยกว่าที่จุดกึ่งกลางช่วงคานเนื่องจากการกระจายของโมเมนต์ของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตแบบต่อเนื่อง [7]

การวิจัยกำลังและความเหนียวของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายแบบยึดรั้ง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำหลายรอบ จะเป็นประโยชน์ในการศึกษาพฤติกรรมการวิบัติและการออกแบบคานสะพานให้มีกำลังสูงสุด ความเหนียวเพียงพอสำหรับสะพานทางหลวงของประเทศไทย

2. การทดลอง

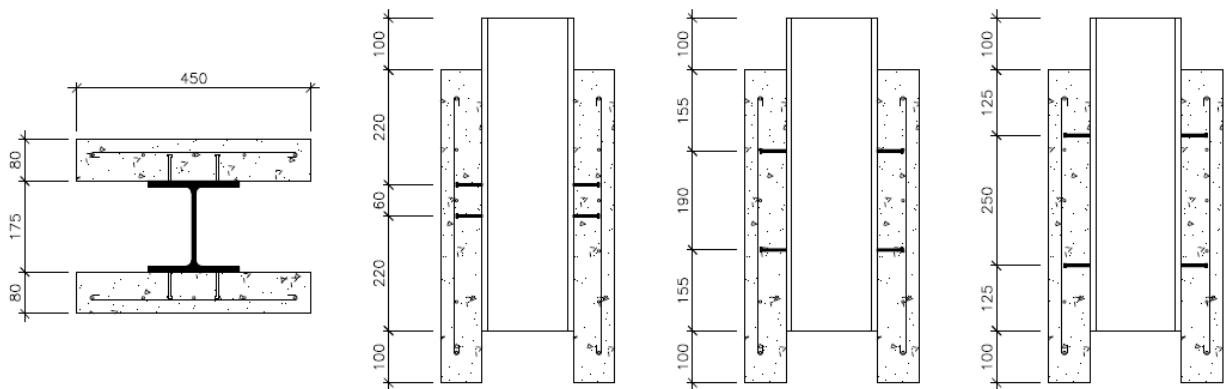
2.1 กำลังรับแรงเฉือนของตัวยึดรับแรงเฉือน

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยใช้ตัวยึดรับแรงเฉือนยึดติดกับคานเหล็กรูปพรรณแบบ Double shear ระยะ 6, 19 และ 25 เซนติเมตร สำหรับระยะ 25 เซนติเมตร เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันการออกแบบคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบบางส่วน คุณสมบัติของตัวยึดรับแรงเฉือนดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของตัวยึดรับแรงเฉือน

Material	Yield strength (ksc)	Tensile strength (ksc)	Shear strength (ksc)
Shear connectors	3515	4289	3216

โดยให้แรงกระทำแบบสถิต อัตรา 1 ตัน/นาที บันทึกแรงกระทำและการเคลื่อนหลุดของแผ่นพื้นคอนกรีต สำหรับพื้นคอนกรีตมีกำลังอัดของคอนกรีตอายุ 28 วัน เท่ากับ 33.4 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของตัวยึดรับแรงเฉือนดังรูปที่ 1 และ 2 ส่วนรูปแบบการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนดังตารางที่ 2



รูปที่ 1 ตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงเฉือน



รูปที่ 2 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของตัวยึดรับแรงเฉือน

ตารางที่ 2 รูปแบบการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน

Type	Specimens	Spacing of shear connectors (cm)
Fully composite action	S1	6
Partially composite action	S2	19
Partially composite action	S3	25

2.2 คานเหล็ก-คอนกรีต ชนิดคอมโพสิต

คานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตดังรูปที่ 3 ประกอบด้วยคานเหล็ก A-B ความยาว 3.60 เมตร และคานรอง B-C ความยาว 2.00 เมตร มีจุดรองรับแบบจุดหมุนและสื่อกั้นตำแหน่ง A และ B คานรองเป็นปลายยึดรั้ง (Restrained) ดังรูปที่ 4 แรงกระทำเป็นจุด (Point load) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานและตำแหน่งที่กำลังต้านทาน โมเมนต์คดบวก M^+ มากที่สุด กรณี Monotonic loading สำหรับการออกแบบคานเหล็ก-คอนกรีต ชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายแบบยึดรั้ง 2 ประเภท ดังนี้

2.2.1 คานเหล็ก-คอนกรีต ชนิดคอมโพสิตที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณ์ (Fully composite) ไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวระหว่างผิวสัมผัสของพื้นคอนกรีตกับคานเหล็กรูปพรรณ ระยะของตัวยึดรับแรงเฉือน 6 เซนติเมตร

2.2.2 คานเหล็ก-คอนกรีต ชนิดคอมโพสิตที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบบางส่วน (Partially composite) ยอมให้เกิดการเคลื่อนตัวระหว่างผิวสัมผัสของพื้นคอนกรีตกับคานเหล็กรูปพรรณ ระยะของตัวยึดรับแรงเฉือน 19 เซนติเมตร ช่วงคานหลักและระยะของตัวยึดรับแรงเฉือน 6 เซนติเมตร ช่วงคานรองเพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวที่ผิวสัมผัสในช่วงคานรอง

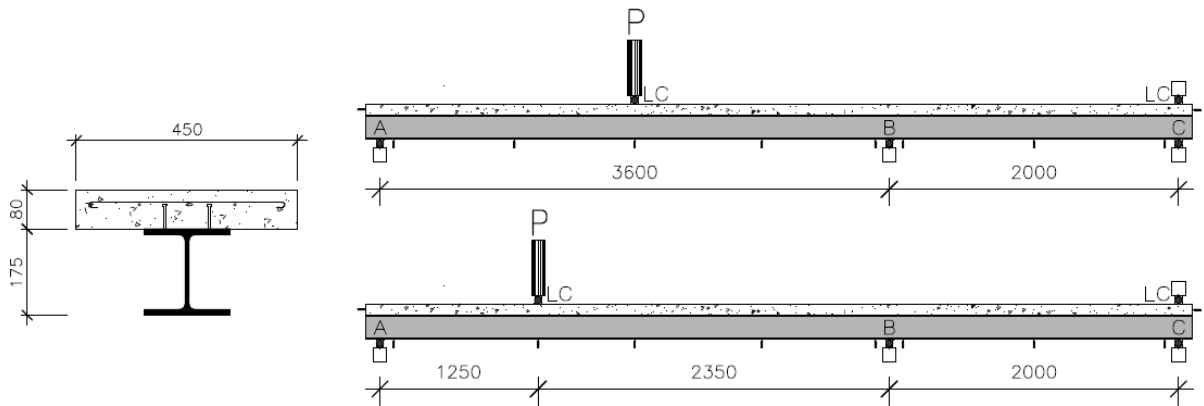
2.3 คุณสมบัติของวัสดุ

การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุสำหรับคานเหล็ก-คอนกรีต ชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายแบบยึดรั้งดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของคานเหล็กรูปพรรณและเหล็กเสริมคอนกรีต

Material	Yield strength (ksc)	Tensile strength (ksc)
Steel beam	3506	4732
Reinforcement	4750	6858

แรงกระทำต่อคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายแบบยึดรั้ง ภายใต้แรงกระทำแบบสถิต (Monotonic load) โดยให้แรงกระทำอย่างสม่ำเสมอ อัตรา 1 ตัน/นาที่ และสำหรับแรงกระทำแบบหลายรอบ (Cyclic load) ให้แรงกระทำอย่างสม่ำเสมอ อัตรา 1 ตัน/นาที่ และเพิ่มขึ้นครั้งละ 12 เปอร์เซ็นต์ หรือ $0.12 P_{max}$ ของน้ำหนักกระทำสูงสุดในการทดสอบภายใต้น้ำหนักกระทำแบบสถิต เมื่อเพิ่มแรงกระทำสูงสุดทำการลดแรงกระทำอย่างต่อเนื่องจนถึงศูนย์และเพิ่มแรงกระทำในรอบต่อไป ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดน้ำหนัก (Load cell) อุปกรณ์ตรวจวัดการโก่งตัว (LVDT) และอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain gauge) บันทึกแรงกระทำ การโก่งตัว มุมหมุนที่จุดรองรับภายใน การเคลื่อนหลุดของพื้นคอนกรีตที่ผิวสัมผัสกับคานเหล็กรูปพรรณ ความเครียดของเหล็กรูปพรรณ ตัวยึดรับแรงเฉือน เหล็กเสริมและพื้นคอนกรีต



รูปที่ 3 คานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิต ซึ่งมีปลายแบบยึดรั้งแรงกระทำที่กึ่งกลางคานและแรงกระทำที่โมเมนต์บวกสูงสุด



รูปที่ 4 การทดสอบคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิต ซึ่งมีปลายแบบยึดรั้งและฐานรองรับแบบยึดรั้ง (Restrained support)

จากการวิเคราะห์กำลังต้านทานด้าน โมเมนต์ดัดของหน้าตัดคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิต โดยวิธีทฤษฎีพลาสติกมีกำลังต้านทาน โมเมนต์บวกพลาสติกของหน้าตัด M_p^+ เท่ากับ 15.519 ตัน-เมตร และกำลังต้านทาน โมเมนต์ลบพลาสติกของหน้าตัด M_p^- เท่ากับ 11.290 ตัน-เมตร สำหรับรูปแบบการทดสอบคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตดังตารางที่ 4

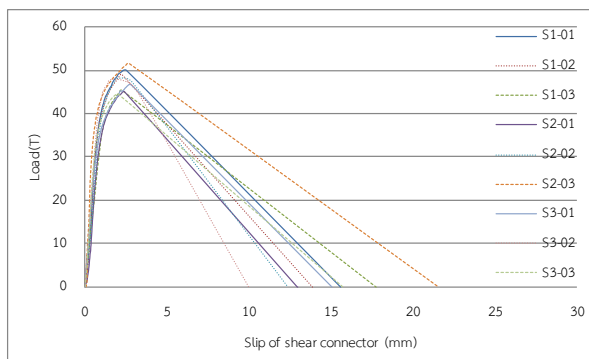
ตารางที่ 4 รูปแบบการทดสอบคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิต

Type	Specimens	Type of loading	Position of loading
Fully composite beam	SCCB-S1-SM-01	Monotonic	Middle
	SCCB-S1-CM-02	Cyclic	Middle
	SCCB-S1-CP-03	Cyclic	Maximum positive moment
Partially composite beam	SCCB-S2-SM-01	Monotonic	Middle
	SCCB-S2-CM-02	Cyclic	Middle
	SCCB-S2-CM-03	Cyclic	Middle
	SCCB-S2-CP-04	Cyclic	Maximum positive moment

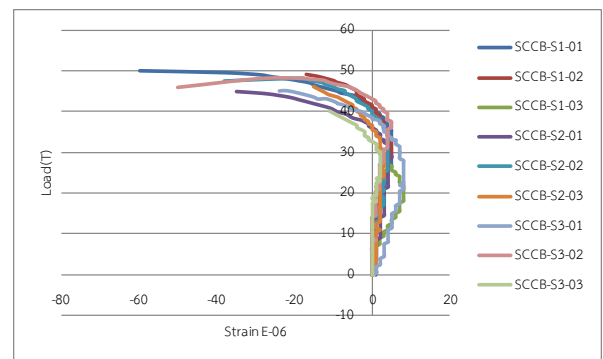
3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 กำลังรับแรงเฉือนของตัวยึดรับแรงเฉือนโดยวิธี Push-out test

กำลังรับแรงเฉือนของตัวยึดรับแรงเฉือนที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณ์ดังรูปที่ 5 พบว่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดเฉลี่ยที่ระยะของตัวยึดรับแรงเฉือน 6 เซนติเมตร เท่ากับ 48.15 ตัน การแตกร้าวเริ่มต้นเฉลี่ย First crack เท่ากับ 15.75 ตัน และการเลื่อนของตัวยึดรับแรงเฉือนเฉลี่ย เท่ากับ 2.35 มิลลิเมตร ความเครียดของตัวยึดรับแรงเฉือนเฉลี่ย (Vertical shear connector strain) เท่ากับ $38.50E-6$ ไมโครสเตรน สำหรับกำลังรับแรงเฉือนของตัวยึดรับแรงเฉือนที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบบางส่วน พบว่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดเฉลี่ยที่ระยะของตัวยึดรับแรงเฉือน 19 เซนติเมตร เท่ากับ 48.22 ตัน การแตกร้าวเริ่มต้นเฉลี่ย First crack เท่ากับ 15.66 ตัน และการเลื่อนของตัวยึดรับแรงเฉือนเฉลี่ย เท่ากับ 2.34 มิลลิเมตร ความเครียดของตัวยึดรับแรงเฉือนเฉลี่ย เท่ากับ $26.50E-6$ ไมโครสเตรน เมื่อพิจารณากำลังรับแรงเฉือนของตัวยึดรับแรงเฉือนที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบบางส่วน พบว่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดเฉลี่ยที่ระยะของตัวยึดรับแรงเฉือน 25 เซนติเมตร เท่ากับ 46.37 ตัน การแตกร้าวเริ่มต้นเฉลี่ย First crack เท่ากับ 13.59 ตัน และการเลื่อนของตัวยึดรับแรงเฉือนเฉลี่ย เท่ากับ 2.12 มิลลิเมตร ความเครียดของตัวยึดรับแรงเฉือนเฉลี่ย เท่ากับ $31.00E-6$ ไมโครสเตรน



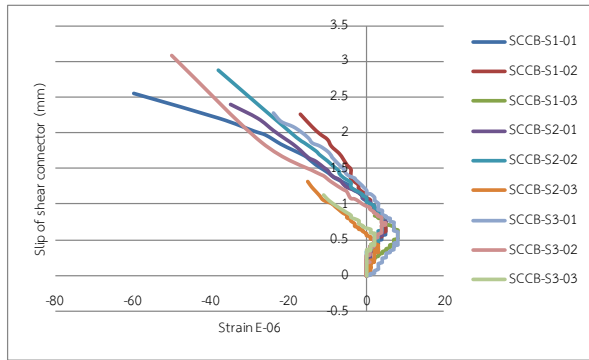
รูปที่ 5 การเลื่อนของตัวยึดรับแรงเฉือนกับน้ำหนักสูงสุด



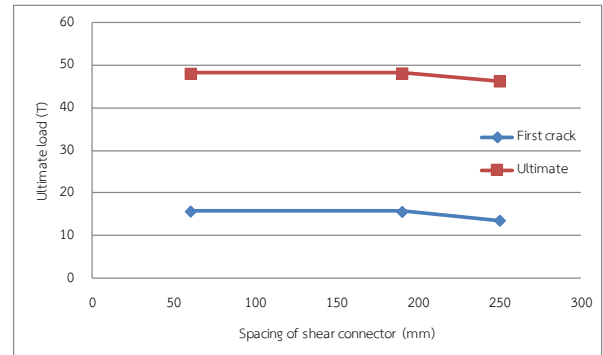
รูปที่ 6 ความเครียดของตัวยึดรับแรงเฉือนกับน้ำหนักสูงสุด

ความเครียดของตัวยึดรับแรงเฉือนที่ระยะตัวยึดรับแรงเฉือน 6, 19 และ 25 เซนติเมตร พบว่าความเครียดของตัวยึดรับแรงเฉือนที่ระยะตัวยึดรับแรงเฉือน 6 เซนติเมตร มีความเครียดมากที่สุด เท่ากับ $60.00E-6$ ไมโครสเตรน รองลงมาที่ระยะตัวยึดรับแรงเฉือน 25 เซนติเมตร เท่ากับ $50.00E-6$ ไมโครสเตรน และความเครียดน้อยที่สุดที่ระยะตัวยึดรับแรงเฉือน 19 เซนติเมตร $35.00E-6$ ไมโครสเตรน ตามลำดับดังรูปที่ 6

สำหรับความเครียดของตัวยึดรับแรงเฉือนกับการเลื่อนของตัวยึดรับแรงเฉือนดังรูปที่ 7 พบว่าความเครียดที่ระยะตัวยึดรับแรงเฉือน 6, 19 และ 25 เซนติเมตร สอดคล้องกับการเลื่อนของตัวยึดรับแรงเฉือนมากที่สุด ที่ระยะตัวยึดรับแรงเฉือน 6, 19 และ 25 เซนติเมตร และความเครียดของตัวยึดรับแรงเฉือนมากที่สุด เท่ากับ $474 E-6$ ไมโครสเตรน และ $15000 E-6$ ไมโครสเตรน ซึ่งใกล้เคียงกับค่า Breaking strain ของตัวยึดรับแรงเฉือน



รูปที่ 7 ความเครียดของตัวยึดรับแรงเฉือนกับน้ำหนักรสูงสุด



รูปที่ 8 ระยะกับน้ำหนักรสูงสุดของตัวยึดรับแรงเฉือน

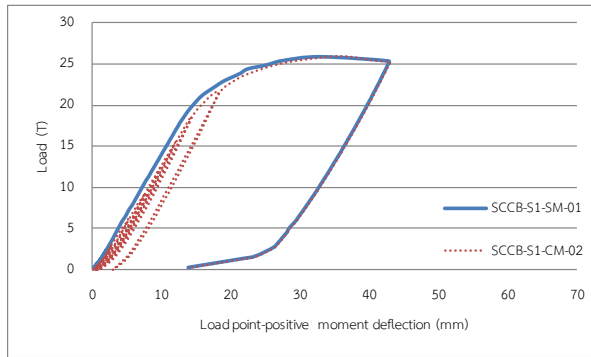
ระยะของตัวยึดรับแรงเฉือนกับน้ำหนักรกระทำสูงสุดดังรูปที่ 8 พบว่าระยะของตัวยึดรับแรงเฉือนมีผลกระทบต่อน้ำหนักรกระทำสูงสุดของตัวยึดรับแรงเฉือนที่บริเวณตำแหน่งการแตกร้าวของคอนกรีตเริ่มต้นและตำแหน่งการวิบัติหรือตำแหน่งที่น้ำหนักรกระทำสูงสุด นอกจากนี้ระยะของตัวยึดรับแรงเฉือนที่มากขึ้นส่งผลกระทบต่อน้ำหนักรกระทำสูงสุดลดลงอย่างชัดเจน ระยะตัวยึดรับแรงเฉือน 6 เซนติเมตร เท่ากับ 48.15 ตัน ระยะตัวยึดรับแรงเฉือน 19 เซนติเมตร เท่ากับ 48.22 ตัน และระยะตัวยึดรับแรงเฉือน 25 เซนติเมตร เท่ากับ 46.37 ตัน ตามลำดับ

3.2 คานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิต

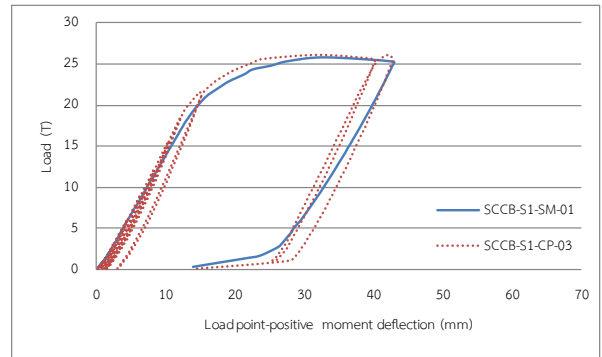
3.2.1 กำลัง

การทดสอบคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายยึดรับแรง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบ ที่ระยะของตัวยึดรับแรงเฉือนเท่ากับ 6 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของน้ำหนักรบรรทุกและการโก่งตัวดังรูปที่ 9 และ 10 พบว่า SCCB-S1-CP-03 น้ำหนักรบรรทุกกระทำสูงสุด เท่ากับ 26.03 ตัน การโก่งตัวของคานที่ตำแหน่งน้ำหนักรบรรทุกกระทำ 32.10 มิลลิเมตร SCCB-S1-CM-02 น้ำหนักรบรรทุกกระทำสูงสุด เท่ากับ 26.01 ตัน การโก่งตัวของคานที่ตำแหน่งน้ำหนักรบรรทุกกระทำ 35.89 มิลลิเมตร SCCB-S1-SM-01 น้ำหนักรบรรทุกกระทำสูงสุด เท่ากับ 25.85 ตัน การโก่งตัวของคานที่ตำแหน่งน้ำหนักรบรรทุกกระทำ 32.93 มิลลิเมตร ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายยึดรับแรง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบสถิต ระยะของตัวยึดรับแรงเฉือน 6 เซนติเมตร SCCB-S1-SM-01 กับคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายยึดรับแรง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบสถิต ระยะของตัวยึดรับแรงเฉือน 19 เซนติเมตร SCCB-S2-SM-01 ดังรูปที่ 11 พบว่า SCCB-S1-SM-01 น้ำหนักรบรรทุกกระทำสูงสุด เท่ากับ 25.85 ตัน การโก่งตัวของคานที่ตำแหน่งน้ำหนักรบรรทุกกระทำ 32.92 มิลลิเมตร สามารถรับน้ำหนักรบรรทุกได้มากกว่า SCCB-S2-SM-01 น้ำหนักรบรรทุกกระทำสูงสุด เท่ากับ 24.87 ตัน การโก่งตัวของคานที่ตำแหน่งน้ำหนักรบรรทุกกระทำ 29.91 มิลลิเมตร

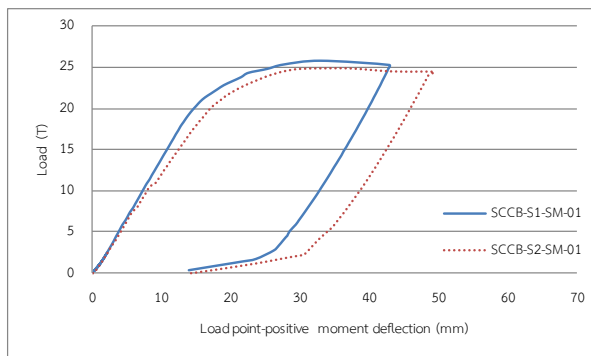


รูปที่ 9 น้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัว SCCB-S1-SM-01 และ SCCB-S1-CM-02

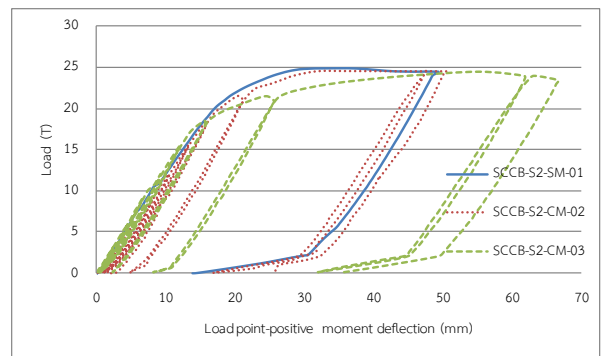


รูปที่ 10 น้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัว SCCB-S1-SM-01 และ SCCB-S1-CP-03

สำหรับคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายยึดตรึง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบ ระยะเวลาของตัวยึดรับแรงเฉือนเท่ากับ 19 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัว พบว่า SCCB-S2-CP-04 สามารถรับน้ำหนักบรรทุกมากที่สุด เท่ากับ 25.55 ตัน การโก่งตัวของคานที่ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกกระทำ 31.83 มิลลิเมตร SCCB-S2-SM-01 น้ำหนักบรรทุกกระทำสูงสุด เท่ากับ 24.87 ตัน การโก่งตัวของคานที่ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกกระทำ 29.91 มิลลิเมตร SCCB-S2-CM-02 น้ำหนักบรรทุกกระทำสูงสุด เท่ากับ 24.52 ตัน การโก่งตัวของคานที่ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกกระทำ 32.06 มิลลิเมตร และ SCCB-S2-CM-03 น้ำหนักบรรทุกกระทำสูงสุด เท่ากับ 24.52 ตัน การโก่งตัวของคานที่ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกกระทำ 33.69 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังภาพที่ 12



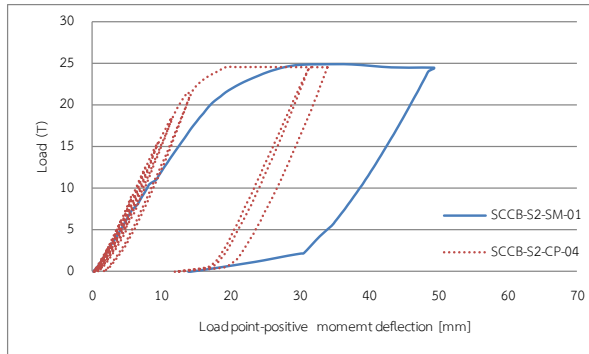
รูปที่ 11 น้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัว SCCB-S1-SM-01 และ SCCB-S2-SM-01



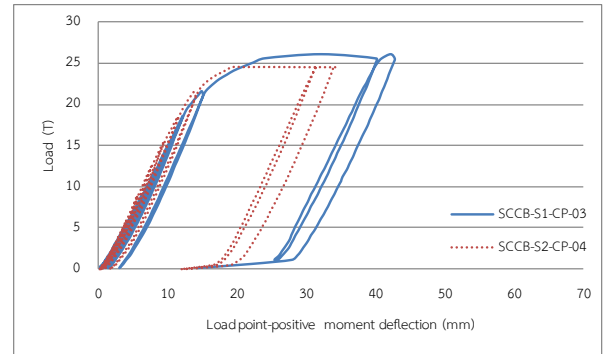
รูปที่ 12 น้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัว SCCB-S2-SM-01, SCCB-S2-CM-02 และ SCCB-S2-CM-03

ส่วนคานเหล็ก-คอนกรีต ชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายแบบยึดตรึง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบ ระยะเวลาของตัวยึดรับแรงเฉือน 6 เซนติเมตร SCCB-S1-CP-03 กับคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายแบบยึดตรึง ภายใต้ น้ำหนักบรรทุกแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบ ระยะเวลาของตัวยึดรับแรงเฉือน 19 เซนติเมตร SCCB-S2-CP-04 ดังรูปที่ 13 และ 14 พบว่า SCCB-S1-CP-03 น้ำหนักบรรทุกกระทำสูงสุด เท่ากับ 26.03 ตัน การโก่งตัวของคานที่ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกกระทำ

32.10 มิลลิเมตร สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากกว่า SCCB-S1-CP-04 น้ำหนักบรรทุกกระทำสูงสุด เท่ากับ 25.55 ตัน การโก่งตัวของคานที่ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกกระทำ 31.83 มิลลิเมตร



รูปที่ 13 น้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัว SCCB-S2-SM-01 และ SCCB-S2-CP-04

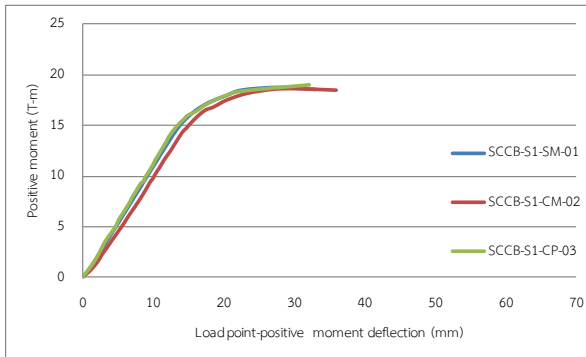


รูปที่ 14 น้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัว SCCB-S1-CP-03 และ SCCB-S2-CP-04

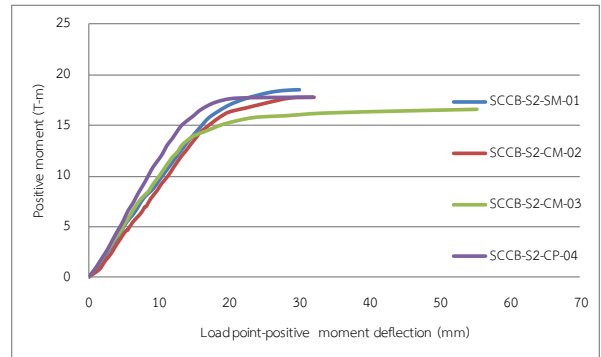
3.2.2 กำลังต้านทานโมเมนต์คัต

คานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายแบบยึดครั้ง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณ์ SCCB-S1-SM-01, SCCB-S1-CM-02 และ SCCB-S1-CP-03 เมื่อพิจารณาจาก Envelope curves ของโมเมนต์คัต กำลังต้านทานบวกสูงสุด M_u^+ เท่ากับ 18.555, 18.439 และ 18.948 ตัน-เมตร กำลังต้านทานโมเมนต์ลบสูงสุด M_u^- เท่ากับ 9.903, 9.065 และ 3.226 ตัน-เมตร การโก่งตัวที่จุดน้ำหนักบรรทุกกระทำ เท่ากับ 32.93, 35.89 และ 32.10 มิลลิเมตร มุมหมุนที่จุดรองรับภายในของ เท่ากับ 0.0143, 0.0103 และ 0.0131 เรเดียน ดังรูปที่ 15

สำหรับคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายแบบยึดครั้ง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบบางส่วน SCCB-S2-SM-01, SCCB-S2-CM-02, SCCB-S2-CM-03 และ SCCB-S2-CP-04 เมื่อพิจารณาจาก Envelope curves ของโมเมนต์คัต มีกำลังต้านทานโมเมนต์บวกสูงสุด M_u^+ เท่ากับ 18.503, 17.778, 16.603 และ 17.744 ตัน-เมตร กำลังต้านทานโมเมนต์ลบสูงสุด M_u^- เท่ากับ 7.075, 7.674, 10.064 และ 4.723 ตัน-เมตร การโก่งตัวที่จุดน้ำหนักบรรทุกกระทำ เท่ากับ 29.91, 32.06, 33.69 และ 31.83 มิลลิเมตร มุมหมุนที่จุดรองรับภายในของ เท่ากับ 0.0020, 0.0132, 0.0173 และ 0.0093 เรเดียน ดังรูปที่ 16



รูปที่ 15 Envelope curves ของคานเหล็ก-คอนกรีต ที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณ์



รูปที่ 16 Envelope curves ของคานเหล็ก-คอนกรีต ที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบบางส่วน

กำลังต้านทาน โมเมนต์ดัด การ โกงตัว และมูมหมุนที่จุดรองรับภายในของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอม โพลิตซึ่งมีปลายแบบ ยึดรั้ง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณ์ มีกำลังต้านทาน โมเมนต์ดัด การ โกงตัวและมูมหมุนที่จุดรองรับภายในมากกว่าคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอม โพลิตซึ่งมีปลายแบบยึดรั้ง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบบางส่วน กำลังต้านทาน โมเมนต์ดัดสูงสุด M_u^+ เท่ากับ 5.623 เปอร์เซ็นต์ และกำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุด M_u^- เท่ากับ 0.153 เปอร์เซ็นต์ การ โกงตัว เท่ากับ 5.553 เปอร์เซ็นต์ และมูมหมุนที่จุดรองรับภายใน เท่ากับ 22.115 เปอร์เซ็นต์

3.2.3 อัตราส่วนความเหนียว R'

อัตราส่วนความเหนียวหรืออัตราส่วนความสามารถในการเปลี่ยนรูปของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอม โพลิตซึ่งมีปลายแบบ ยึดรั้ง สามารถคำนวณจากอัตราส่วนความสามารถของการเปลี่ยนรูป (Deformation capacity) [5] จากสมการที่ 1

$$R' = \frac{\Delta_{\max}^+}{\Delta_p} - 1 \quad (1)$$

เมื่อ R' อัตราส่วนความเหนียวหรืออัตราส่วนความสามารถในการเปลี่ยนรูป

Δ_{\max}^+ การ โกงตัวของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอม โพลิตที่จุดน้ำหนักบรรทุกกระทำเมื่อน้ำหนักดัดรองรับกำลังต้านทาน โมเมนต์ดัดเลขตำแหน่งกำลังต้านทาน โมเมนต์ดัดสูงสุด

Δ_p การ โกงตัวของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอม โพลิตที่ที่จุดน้ำหนักบรรทุกกระทำเมื่อน้ำหนักดัดรองรับกำลังต้านทาน พลาสติก โมเมนต์ จากพฤติกรรมการคัดแบบอีลาสติก (Elastic)

1) คานเหล็ก-คอนกรีต ชนิดคอมโพลิตที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณ์

อัตราส่วนความเหนียวของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอม โพลิตซึ่งมีปลายแบบยึดรั้ง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิต และแบบกระทำหลายรอบที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบสมบูรณ์ พบว่าอัตราส่วนความเหนียว SCCB-S1-SM-01, SCCB-S1-CM-02

และ SCCB-S1-CP-03 มีอัตราส่วนความความเหนียว R' เท่ากับ 2.019, 1.690 และ 2.059 ตามลำดับ โดยอัตราส่วนความเหนียวเฉลี่ย เท่ากับ 1.923 ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 อัตราส่วนความเหนียวของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณ์

Specimen	Δ_p (mm)	Δ_{max} (mm)	R'
S1-SM-01	14.20	42.88	2.019
S1-CM-02	15.88	42.71	1.690
S1-CP-03	13.96	42.72	2.059

เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนความเหนียวคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตที่มีซึ่งมีปลายยึดรั้ง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิต SCCB-S1-SM-01 พบว่าคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตที่มีซึ่งมีปลายยึดรั้ง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบกระทำหลายรอบ SCCB-S1-CM-02 อัตราส่วนความเหนียวลดลง 16.295 เปอร์เซ็นต์ และคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตที่มีซึ่งมีปลายยึดรั้ง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบกระทำหลายรอบ SCCB-S1-CP-03 อัตราส่วนความเหนียวเพิ่มขึ้น เท่ากับ 1.981 เปอร์เซ็นต์

2) คานเหล็ก-คอนกรีต ชนิดคอมโพสิตที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบบางส่วน

สำหรับอัตราส่วนความเหนียวของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายแบบยึดรั้ง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบบางส่วน พบว่าอัตราส่วนความเหนียว SCCB-S2-SM-01, SCCB-S2-CM-02, SCCB-S2-CM-03 และ SCCB-S2-CP-04 มีอัตราส่วนความเหนียว เท่ากับ 2.039, 1.791, 3.306 และ 1.526 ตามลำดับ โดยอัตราส่วนความสามารถในการเปลี่ยนรูปเฉลี่ย เท่ากับ 2.166 ดังตารางที่ 6 เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนความเหนียว คานเหล็ก-คอนกรีต ชนิดคอมโพสิตที่มีซึ่งมีปลายยึดรั้ง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิต SCCB-S2-SM-01 พบว่าคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตที่มีซึ่งมีปลายยึดรั้ง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบกระทำหลายรอบ SCCB-S2-CM-02, SCCB-S2-CP-04 อัตราส่วนความเหนียวลดลง 12.163 และ 25.159 เปอร์เซ็นต์ และคานเหล็ก-คอนกรีต ชนิดคอมโพสิตที่มีซึ่งมีปลายยึดรั้ง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบกระทำหลายรอบ SCCB-S2-CM-03 อัตราส่วนความเหนียวเพิ่มขึ้น เท่ากับ 62.138 เปอร์เซ็นต์

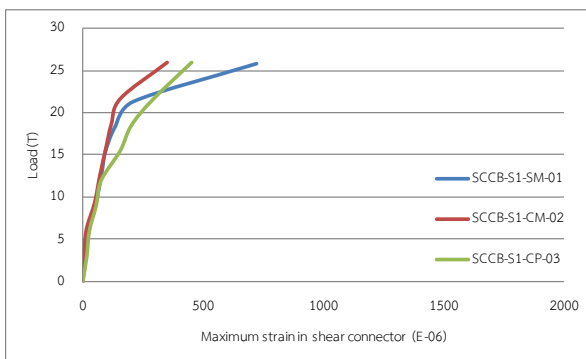
ตารางที่ 6 อัตราส่วนความเหนียวของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบบางส่วน

Specimen	Δ_p (mm)	Δ_{max} (mm)	R'
S2-SM-01	16.23	49.34	2.039
S2-CM-02	17.50	48.85	1.791
S2-CM-03	15.48	66.64	3.306
S2-CP-04	13.37	33.77	1.526

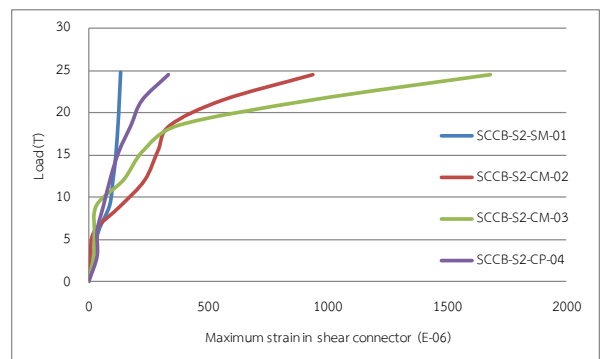
การวิเคราะห์อัตราส่วนความเหนียวของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายแบบยึดรั้ง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณและแบบบางส่วน พบว่าระยะของตัวยึดรับแรงเดือน 6 และ 19 เซนติเมตร รูปแบบของน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบส่งผลต่อกำลังและอัตราส่วนความเหนียว ซึ่งคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายแบบยึดรั้งที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณ ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบมีอัตราส่วนความเหนียวน้อยกว่าคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายแบบยึดรั้งที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบบางส่วน เท่ากับ 12.636 เปอร์เซนต์

3.2.4 ความเครียดของตัวยึดรับแรงเดือนในคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิต

ความเครียดของตัวยึดรับแรงเดือนของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายแบบยึดรั้ง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณดังรูปที่ 17 พบว่าความเครียดของตัวยึดรับแรงเดือน SCCB-S1-SM-01, SCCB-S1-CM-02 และ SCCB-S1-CP-03 มีความเครียดของตัวยึดรับแรงเดือน เท่ากับ $722.67E-06$, $348.67E-06$ และ $451.33E-06$ ไมโครสเตรน ตามลำดับ



รูปที่ 17 ความเครียดของตัวยึดรับแรงเดือนของคานเหล็ก-คอนกรีต ชนิดคอมโพสิตที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณ

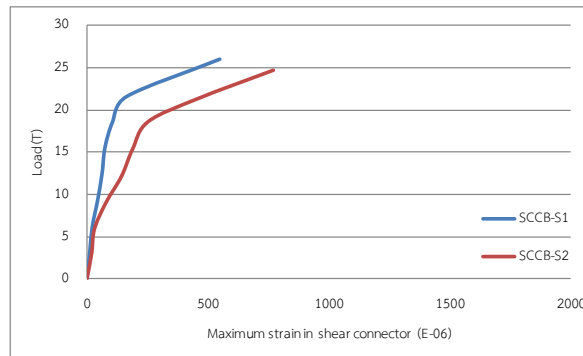


รูปที่ 18 ความเครียดของตัวยึดรับแรงเดือนของคานเหล็ก-คอนกรีต ชนิดคอมโพสิตที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบบางส่วน

เมื่อพิจารณาผลของน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบ พบว่าความเครียดของตัวยึดรับแรงเดือนของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณ ความเครียดลดลงอย่างเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับคานเหล็ก-คอนกรีต ชนิดคอมโพสิตที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบบางส่วน ซึ่ง SCCB-S1-CM-02 และ SCCB-S1-CP-03 ความเครียดของตัวยึดรับแรงเดือนลดลง เท่ากับ 51.75 และ 37.55 เปอร์เซนต์ ดังรูปที่ 18

สำหรับความเครียดของตัวยึดรับแรงเดือนของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายแบบยึดรั้ง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบบางส่วน พบว่า SCCB-S2-SM-01, SCCB-S2-CM-02, SCCB-S2-CM-03 และ SCCB-S2-CP-04 มีความเครียดของตัวยึดรับแรงเดือน เท่ากับ $131.00E-06$, $940.33E-06$, $1680.67E-06$ และ $332.33E-06$ ไมโครสเตรน ตามลำดับ

นอกจากนี้ผลของน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบ พบว่าระยะของตัวยึดรับแรงเฉือนและรูปแบบของน้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบส่งผลกระทบต่อความเครียดของตัวยึดรับแรงเฉือนเป็นหลักดังรูปที่ 19 โดยคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายแบบยึดรั้ง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบที่ระยะของตัวยึดรับแรงเฉือนเท่ากับ 19 เซนติเมตร ความเครียดเฉลี่ยมากกว่าที่ระยะของตัวยึดรับแรงเฉือนเท่ากับ 6 เซนติเมตร เท่ากับ 40.582 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 19 ความเครียดของตัวยึดรับแรงเฉือนเฉลี่ยของคานเหล็ก-คอนกรีต ชนิดคอมโพสิตที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณและแบบบางส่วน

4. สรุปผล

การศึกษากำลังและความเหนียวของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายแบบยึดรั้ง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำหลายรอบสรุปได้ดังนี้

1. กำลังรับแรงเฉือนของตัวยึดรับแรงเฉือน โดยวิธี Push-out test ซึ่งกำลังรับแรงเฉือน การเลื่อนและการแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากระยะของตัวยึดรับแรงเฉือน 6, 9 และ 25 เซนติเมตร สำหรับกำลังรับแรงเฉือนที่การแตกร้าวเริ่มต้นและกำลังรับแรงเฉือนสูงสุดที่ระยะรับแรงเฉือน 6 และ 19 เซนติเมตร มีกำลังรับแรงเฉือนใกล้เคียงกันและมากกว่ากำลังรับแรงเฉือนที่การแตกร้าวเริ่มต้นระยะตัวยึดรับแรงเฉือน 25 เซนติเมตร เท่ากับ 15.562 เปอร์เซ็นต์ และกำลังรับแรงเฉือนสูงสุด เท่ากับ 3.914 เปอร์เซ็นต์

2. น้ำหนักบรรทุกของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายยึดรั้งที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณ ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิตและกระทำแบบหลายรอบมากกว่าคานเหล็ก-คอนกรีต ชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายยึดรั้งที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบบางส่วน ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิตและกระทำแบบหลายรอบ เท่ากับ 5.528 เปอร์เซ็นต์

3. กำลังต้านทานโมเมนต์ดัด การโค้งตัว มุมหมุน ที่จุดรองรับภายในของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายยึดรั้งที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณ ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิตและกระทำแบบหลายรอบมากกว่าคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตซึ่งมีปลายแบบยึดรั้ง ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบบางส่วน กำลังต้านทานโมเมนต์บวกสูงสุด M_u^+ เท่ากับ 5.623 เปอร์เซ็นต์ และกำลังต้านทานโมเมนต์ลบสูงสุด M_u^- เท่ากับ 0.153 เปอร์เซ็นต์ การโค้งตัว เท่ากับ 5.553 เปอร์เซ็นต์ และมุมหมุนที่จุดรองรับภายใน เท่ากับ 22.115 เปอร์เซ็นต์

4. อัตราส่วนความเหนียวของคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิต ซึ่งมีปลายแบบยึดรั้งที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณ์ ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบมีอัตราส่วนความเหนียวน้อยกว่าคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิต ซึ่งมีปลายแบบยึดรั้งที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบบางส่วน อัตราส่วนความเหนียวเฉลี่ย เท่ากับ 12.636 เปอร์เซ็นต์

5. ความเครียดของตัวยึดรับแรงเฉือนในคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิต ซึ่งมีปลายแบบยึดรั้งที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณ์ ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบน้อยกว่าความเครียดของตัวยึดรับแรงเฉือนในคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิต ซึ่งมีปลายแบบยึดรั้งที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบบางส่วน ภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำแบบสถิตและแบบกระทำหลายรอบ เท่ากับ 35.083 เปอร์เซ็นต์

สำหรับปัจจุบันน้ำหนักบรรทุกสะพานทางหลวงมีค่าเพิ่มขึ้นจากน้ำหนักบรรทุก 21 ตัน เป็นน้ำหนักบรรทุก 25 ตัน ในทางปฏิบัติคานสะพานควรรออกแบบเป็นคานเหล็ก-คอนกรีตชนิดคอมโพสิตที่มีพฤติกรรมเชิงประกอบแบบสมบูรณ์ เพราะจะมีกำลังสูงสุดมากกว่าไม่เกิดการเคลื่อนตัวระหว่างผิวสัมผัสของพื้นคอนกรีตกับคานเหล็กและมีความคงทนเพียงพอ

เอกสารอ้างอิง

- [1] AASHTO, AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications*, American of State Highway and Transportation Officials., 2012.
- [2] ACI 318- 08 and ACI318M- 08, *Building Code Requirements for Structural Concrete*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI., 2008
- [3] AISC 303-10, *Code of Standard Practice for Steel Buildings and Bridges*, , American Institute of Steel Construction, Chicago, IL., 2010.
- [4] Ernst, S., Bridge, R. Q., and Wheeler, A. Correlation of beam test with pushout tests in steel-concrete composite beams. *Journal of structural Engineering*, 2010, ASCE, 136(2) 183-192
- [5] Galambos, T. V. *Deformation and Energy Absorption Capacity of Steel Structures in the Inelastic Range*, Steel Research and Construction, AISI, Bulletin No. 8, Washington, DC, 1968.
- [6] Loh, H. Y., Uy, B., and Bradford, M. A. (2004). The Effects of partial shear connection in the hogging moment regions of composite beams Part I-Experimental study. *Journal of Constructional Steel Research*, 2004, 60(6), 897-919.
- [7] Shiming Chen, Yuanlin Jia. Required and available moment redistribution of continuous steel-concrete composite beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64, 167-175.