

การทดสอบเพื่อตรวจสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อย
เชื่อมกับแผ่นเหล็กฝังที่ส่วนรองรับภายใต้แรงกระทำเป็นจุดแบบตามขวาง

**Experimental Investigation on Precast Reinforced Concrete Beams with
Deformed Bars Welded to Steel Plates and Embedded at Support
Sections under Transverse Point Loads**

ชูธง กองแก้ว¹ สิทธิชัย แสงอาทิตย์^{1*} และ จักษดา ชำรงวุฒิ²

Chuthong Kongkaew^{1*} Sittichai Seangatith^{1*} and Jaksada Thumrongwut²

Received: 13 January 2023, Revised: 28 March 2023, Accepted: 4 September 2023

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝังที่ส่วนรองรับ โดยทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกล ลักษณะการวิบัติ และผลของระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ฝังที่ส่วนรองรับที่มีผลต่อกำลังของคาน และเปรียบเทียบผลกับค่าที่คำนวณจากสมการการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก วสท. 1008-38 ตัวอย่างเป็นคานขนาด full scale กว้าง 0.175 ม. ลึก 0.35 ม. และ span ยาว 4.0 ม. จุดเชื่อมต่อทำด้วยแผ่นเหล็กกว้าง 0.25 ม. ลึก 0.15 ม. และหนา 0.02 ม. เชื่อมด้วยเหล็กข้ออ้อย DB16 ที่มีระยะฝังยาว 500 (คานอ้างอิง) 1,000 และ 1,500 มม. จากการทดสอบพบว่า คานมีพฤติกรรม bilinear โดยช่วงแรกมีพฤติกรรม linear elastic จนแรงกระทำมีค่าประมาณ 80-90 เปอร์เซ็นต์ของแรงกระทำสูงสุด คานๆ จะเข้าสู่พฤติกรรม non-linear จากนั้น คานๆ จะเกิดการแอ่นตัวอย่างรวดเร็ว และเกิดการวิบัติที่สภาวะใช้งาน (ที่ค่าการโก่งตัว $L/240$) โดยคานที่ใช้เหล็กข้ออ้อยยาว 1,000 และ 1,500 มม. มีกำลังต้านทานแรงกระทำสูงกว่าคานอ้างอิงอยู่ในช่วง 4.27 ถึง 17.45% โดยการวิบัติของคานๆ เปลี่ยนจากการวิบัติแบบแตกร้าวในแนวตั้งของคอนกรีต เนื่องจากการเลื่อนของแผ่นเหล็กที่จูดรองรับ เป็นการวิบัติแบบ flexural failure บริเวณกึ่งกลางคานและ diagonal shear failure ตามที่ได้ออกแบบไว้ เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนกำลังรับแรงกระทำช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นจากการทดสอบ

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

¹ School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

² สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isarn, Muang, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): sitichai@sut.ac.th

ต่อแรงกระทำช่วงยึดหย่อนจากสมการของ วสท. 1008-38 พบว่า อยู่ในช่วง 1.70 ถึง 2.86 ขึ้นอยู่กับความยาวของระยะฝังของเหล็กข้ออ้อย

คำสำคัญ: คานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป, จุดต่อ, ความยาวระยะฝังเหล็กเสริม

ABSTRACT

This paper presents an experimental investigation on precast reinforced concrete beams with connections in the form of deformed bars welded to a steel plate and embedded at the support sections, using a four-point loading test. The objectives are to study the mechanical behaviors, failure modes and effects of the embedded length of the deformed bars on the strength of the beams, and to compare the results with those calculated using the EIT 1008-38 RC beam design equations. The beams have a cross section of 0.175 m in width and 0.35 m in depth, with a span of 4.0 m. The beam's connections were made of steel plates with a cross section of 0.25 m in width, 0.15 m in depth, and 0.02 m in thickness, and were welded to DB16 bars with embedded lengths of 500 (reference beam), 1,000 and 1,500 mm. From the experiments, all of the beams exhibited bilinear behaviors. They behaved linearly elastic up to about 80-90 percent of their maximum load-carrying capacity, and then they behaved non-linearly with a rapid increase in deflection until failure. Under service conditions (at a deflection of $L/240$), the beams with embedded lengths of 1,000 and 1,500 mm had a load-carrying capacity 4.27 to 17.45% higher than that of the reference beams. The failure modes can be separated into two patterns. The beams exhibited vertical cracks in the concrete at the support sections due to the slip of the steel plate, and then they failed either in flexural failure or diagonal shear failure, in accordance with the experimental design. Finally, when comparing the ratios between the linear elastic load-carrying capacity of the beams from the experiments and that from EIT 1008-38's equations, the ratios are in the range of 1.70 to 2.86, depending on the embedded length of the deformed bars.

Key words: precast reinforced concrete beam, connection, embedded length

บทนำ

ในอดีตที่ผ่านมา โครงการก่อสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนใหญ่ในประเทศไทยเป็นโครงสร้างแบบระบบเสา-คาน โดยก่อสร้างแบบหล่อในที่ (cast-in-place) ซึ่งใช้แบบหล่อ แรงงานคน ค่าใช้จ่ายในโครงการ และเวลาในการก่อสร้างมาก อีกทั้งยังเป็นการยากที่จะควบคุมคุณภาพในการก่อสร้างเนื่องจากคุณภาพฝีมือแรงงานของคนงานมักแตกต่างกัน

กันไปรายบุคคล เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าว ในปัจจุบัน จึงได้มีการพัฒนาระบบการก่อสร้างแบบสำเร็จรูป (precast) โดยพบว่า มีข้อดีหลายประการ เช่น การก่อสร้างทำได้อย่างรวดเร็ว ประหยัดงบประมาณในการก่อสร้าง และสามารถควบคุมคุณภาพการก่อสร้างได้ดีขึ้น และที่สำคัญระบบก่อสร้างดังกล่าวช่วยลดขยะจากงานก่อสร้างเนื่องจากเศษปูนและไม้แบบได้ ช่วยส่งเสริมการ

รักษาสภาพแวดล้อมที่ดีในสถานที่ก่อสร้างและชุมชนใกล้เคียงซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดอาคารเขียว (Yip *et al.*, 1999; Thumrongvut and Seangatith, 2005)

ในปัจจุบัน ผู้รับเหมาก่อสร้างได้นำระบบการก่อสร้างแบบสำเร็จรูปมาใช้ กับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดเล็ก เช่น บ้านพักอาศัย โรงงาน และอาคารพาณิชย์ เป็นต้น มากขึ้นอย่างมาก ทั้งในส่วนของพื้นสำเร็จรูป กานสำเร็จรูป เสาสำเร็จรูป และผนังสำเร็จรูป โดยมีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องในช่วงสิบกว่าปีที่ผ่านมา แต่สิ่งที่สำคัญที่สุดสิ่งหนึ่งของการก่อสร้างแบบสำเร็จรูปคือ จุดต่อระหว่างโครงสร้าง เช่น ในกรณีของการก่อสร้างระบบเสา-คาน เป็นต้น ที่จะต้องมีความแข็งแรงและความแกร่งเพียงพอในการรองรับแรงกระทำ โดยที่จุดต่อจะต้องเกิดการวิบัติหลังจากการวิบัติขององค์อาคาร (Guo *et al.*, 2018) นอกจากนั้นแล้ว จากการศึกษาคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กทรงน้ำผึ้งที่ส่วนรองรับพบว่า ระยะผึ้งมีผลต่อกำลังของคาน โดยคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กทรงน้ำผึ้งที่ส่วนรองรับมีกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกสูงกว่าคานอ้างอิง และความสามารถในการรับแรงเฉือนของคานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อระยะผึ้งของเหล็กทรงน้ำผึ้งมีค่าเพิ่มขึ้น (Thumrongvut and Seangatith, 2005)

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีจุดเชื่อมต่อเป็นเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝั่ที่ส่วนรองรับ โดยใช้การทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด (four-point loading test) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรง ลักษณะการวิบัติ (modes of failure) และผลของระยะผึ้ง (embedded length, l_e) ของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก เปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง ที่มีแผ่นเหล็กเชื่อมกับเหล็กข้ออ้อยที่ระยะผึ้งเท่ากับ 500 มม. และสมการการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ วสท.

1008-38 (Engineering Institute of Thailand, 1995) โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ความยาวระยะผึ้งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก (embedded length, l_e) ทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 500 (คานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง) 1,000 และ 1,500 มม. และระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน (spacing, S) ได้แก่ 100, 300 และ 500 มม.

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

การทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก.) ประกอบด้วย (1) การทดสอบเหล็กเสริม (เหล็กเส้นกลม) ตามมาตรฐาน มอก. 20-2559 (Thai Industrial Standards Institute, 2016a) และ (เหล็กข้ออ้อย) มอก. 24-2559 (Thai Industrial Standards Institute, 2016b) (2) การทดสอบแผ่นเหล็ก คำนวณตามมาตรฐาน มอก. 1479-2541 (Thai Industrial Standards Institute, 1998) และ (3) การทดสอบคานคอนกรีตตามมาตรฐาน มอก. 409-2525 (Thai Industrial Standards Institute, 1982) ซึ่งได้ผลการทดสอบหาคุณสมบัติทางกล ดังแสดงในตารางที่ 1 และพบว่า วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไปตามที่ มอก. ที่เกี่ยวข้องกำหนด

Table 1 Mechanical properties of materials, used in the experimental investigation.

Materials	Averaged yielding stress (MPa)	Averaged ultimate stress (MPa)	Averaged modulus of elasticity (GPa)	Percent elongation (%)
Concrete (380 kg/cm ² , cylinder)	-	40.33	29.85	-
Deformed bar (DB16, SD40)	590.10	645.21	198.5	20.29
Round bar (RB6, SR24)	370.20	493.46	195.3	23.86
Steel plate (SS400)	404.74	568.42	196.3	19.88

2. คานตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป ซึ่งออกแบบโดยวิธีกำลัง (strength design method) ตามมาตรฐานการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ (วสท. 1008-38) โดยที่ไม่นำเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมาพิจารณาในการออกแบบ คานตัวอย่างทดสอบมีขนาดหน้าตัดกว้าง 0.175 ม. ลึก 0.35 ม. และยาว 4.0 ม. (clear span) จำนวนทั้งหมด 24 ตัวอย่าง แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มโดยมีกลุ่มละ 8 ตัวอย่าง ได้แก่ (1) คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก จำนวน 2 ตัวอย่าง และคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก จำนวน 6 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยมีเหล็กเสริมรับแรงดึงเป็นเหล็กข้ออ้อย (5-DB16 เกรด SD40) เหล็กเสริมด้านรับแรงอัดเป็นเหล็กข้ออ้อย (2-DB16 เกรด SD40) เหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็นเหล็กเส้นกลม (RB6 เกรด SR24) มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเท่ากับ 100 มม. และแผ่นเหล็กที่ใช้เชื่อมต่อกานเข้ากับคอนกรีตที่ปลายคานในส่วนของจุดรองรับของคานมีขนาด กว้าง 0.25 ม. ลึก 0.15 ม. หนา 0.02 ม. (เกรด SS400) ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยออกแบบให้แผ่นเหล็กยื่นออกมาจากปลายคาน

ตัวอย่างทดสอบด้านละ 0.1 ม. และให้มีเหล็กข้ออ้อยขนาด DB16 มาเชื่อมต่อตามความยาวระยะฟุ้งที่กำหนด (2) คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก จำนวน 2 ตัวอย่าง และคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก จำนวน 6 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยมีเหล็กเสริมรับแรงดึงเป็นเหล็กข้ออ้อย (6-DB16 เกรด SD40) เหล็กเสริมด้านรับแรงอัดเป็นเหล็กข้ออ้อย (2-DB16 เกรด SD40) เหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็นเหล็กเส้นกลม (RB6 เกรด SR24) มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเท่ากับ 300 มม. และแผ่นเหล็กที่ใช้เชื่อมต่อกานเข้ากับคอนกรีตที่ปลายคานในส่วนของจุดรองรับของคานมีขนาด กว้าง 0.25 ม. ลึก 0.15 ม. หนา 0.020 ม. (เกรด SS400) โดยออกแบบให้แผ่นเหล็กยื่นออกมาจากปลายคานตัวอย่างทดสอบด้านละ 0.1 ม. และให้มีเหล็กข้ออ้อยขนาด DB16 มาเชื่อมต่อตามความยาวระยะฟุ้งที่กำหนด และ (3) คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก จำนวน 2 ตัวอย่าง และคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก จำนวน 6 ตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยมีเหล็กเสริมรับแรงดึงเป็นเหล็กข้ออ้อย (6-DB16 เกรด SD40) เหล็กเสริม

ด้านรับแรงอัดเป็นเหล็กข้ออ้อย (2-DB16 เกรด SD40) เหล็กเสริมรับแรงเฉือนเป็นเหล็กเส้นกลม (RB6 เกรด SR24) มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนเท่ากับ 500 มม. และแผ่นเหล็กที่ใช้เชื่อมต่อกันเข้ากับคอนกรีตที่ปลายคานในส่วนของจุดรองรับของคานมีขนาด กว้าง 0.25 ม. ลึก 0.15 ม.หนา

0.020 ม. (เกรด SS400) ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยออกแบบให้แผ่นเหล็กยื่นออกมาจากปลายคาน ตัวอย่างทดสอบด้านละ 0.1 ม. และให้มีเหล็กข้ออ้อยขนาด DB16 มาเชื่อมต่อตามความยาวระยะฟุ้งที่กำหนด



Figure 1 Deformed bars welded to steel plate, used in the experimental investigation.

ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดของคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย โดยชื่อของคานตัวอย่างทดสอบถูกกำหนดในรูปแบบ XX-YYYY-ZZZ โดยที่ XX หมายถึง ตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ RC คือ คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่น

เหล็ก และ PC คือ คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฟุ้งที่ส่วนรองรับ YYYY หมายถึง ความยาวระยะฟุ้งเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และ ZZZ หมายถึง ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

Table 2 Details of the beam specimens, used in the experimental investigation.

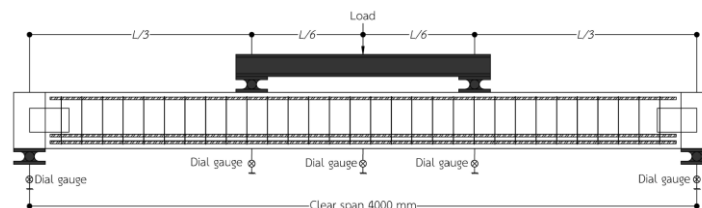
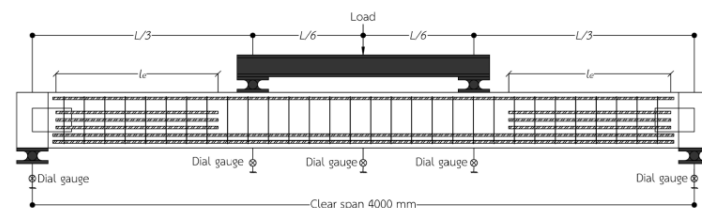
Group	Code of beam specimen	Steel embedded length (mm)	Stirrup spacing (mm)	Span (m)	Number of tensile steel reinforcement	Number of compressive steel reinforcement	Mode of failure
1	RC-0000-100	0	100	4.0	5-DB16	2-DB16	Flexural
	PC-0500-100	500	100	4.0	5-DB16	2-DB16	Flexural
	PC-1000-100	1000	100	4.0	5-DB16	2-DB16	Flexural
	PC-1500-100	1500	100	4.0	5-DB16	2-DB16	Flexural
2	RC-0000-300	0	300	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear
	PC-0500-300	500	300	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear
	PC-1000-300	1000	300	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear
	PC-1500-300	1500	300	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear

Table 2 Continuous

Group	Code of beam specimen	Steel embedded length (mm)	Stirrup spacing (mm)	Span (m)	Number of tensile steel reinforcement	Number of compressive steel reinforcement	Mode of failure
3	RC-0000-500	0	500	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear
	PC-0500-500	500	500	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear
	PC-1000-500	1000	500	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear
	PC-1500-500	1500	500	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear

ภาพที่ 2 แสดงลักษณะของคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กทั้ง 3 กลุ่ม ภาพที่ 3 แสดงลักษณะของคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กทั้ง 3 กลุ่ม ซึ่งขอให้สังเกตตำแหน่งของแผ่นเหล็กและเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ภาพที่ 4 แสดงหน้าตัดคานที่จุดฝังแผ่นเหล็กที่จุดเชื่อมต่อของปลายคาน (section A-A) และจุดรองรับและที่จุดกึ่งกลางของความยาวคาน (section B-B) ของคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กทั้ง 3 กลุ่ม ภาพที่ 5 แสดงหน้าตัดคานที่จุดฝังแผ่นเหล็กที่จุดเชื่อมต่อของปลายคาน (section A-A) และจุดรองรับและที่จุดกึ่งกลางของความยาวคาน (section B-B) ของคานตัวอย่างทดสอบ

ที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กทั้ง 3 กลุ่ม โดยคานตัวอย่างทดสอบถูกผลิตขึ้นโดยช่างฝีมือแรงงานตามแบบที่กำหนด โดยมีการติดมาตรวัดความเครียด (strain gauge) ที่เหล็กส่วนที่รับแรงดึงบริเวณกึ่งกลางของคานตัวอย่างทดสอบ เพื่อใช้ในการตรวจสอบความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำเพื่อตรวจสอบว่าเหล็กเสริมเกิดการคราก (yielding) ระหว่างการทดสอบหรือไม่ และได้รับการบ่มคอนกรีตตามที่ วสท.1008-38 กำหนด (Engineering Institute of Thailand, 1995) เมื่อแกะแบบหล่อคานตัวอย่างทดสอบแล้ว จะมีการหล่อคอนกรีตหุ้มแผ่นเหล็กที่เหลือเพื่อจำลองคอนกรีตส่วนที่หล่อแทนเสา โดยคอนกรีตส่วนนี้จะวางอยู่บนจุดรองรับ

**Figure 2** Details of the beam specimen without deformed bars welded to steel plate.**Figure 3** Details of the beam specimen with deformed bars welded to steel plate.

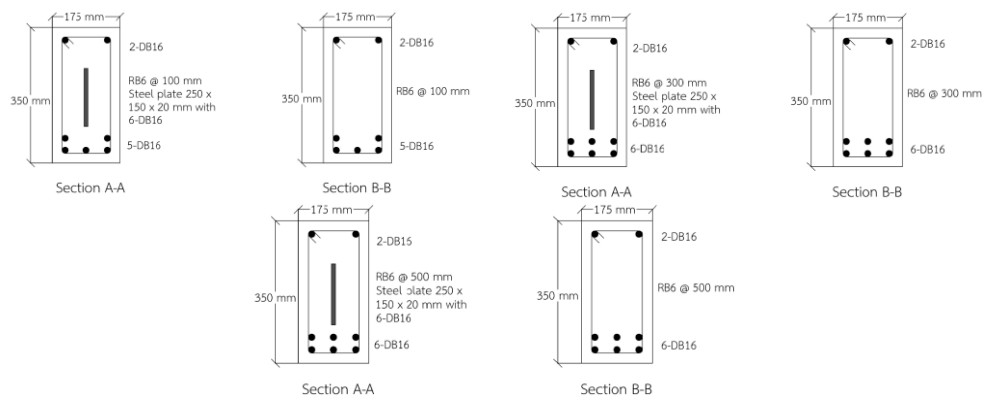


Figure 4 Cross-section of the beam specimen without deformed bars welded to steel plate: Group 1 to 3.

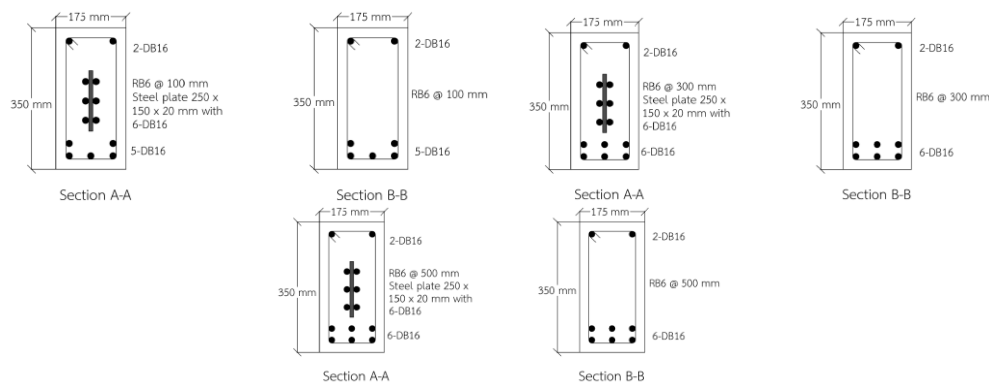


Figure 5 Cross-section of the beam specimen with deformed bars welded to steel plate: Group 1 to 3.

3. การทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป

ขั้นตอนการทดสอบคานตัวอย่างทดสอบมีดังนี้ (1) ติดตั้งคานตัวอย่างทดสอบเข้ากับ loading frame ดังแสดงในภาพที่ 6 โดยวางคานตัวอย่างทดสอบในรูปแบบคานบนจุดรองรับอย่างง่าย (simple supported beam) โดยให้คอนกรีตส่วนที่หล่อแทนเสาวางอยู่ที่จุดรองรับทั้งสองด้านและรอยต่ออยู่ตรงตำแหน่งของขอบจุดรองรับ (2) นำคานถ่ายแรงวางบนหลังคานตัวอย่างทดสอบจากนั้นนำกระบอกลิควัสดุ (hydraulic cylinder) วางบนคานถ่ายแรงและปรับให้อยู่ในตำแหน่งที่หัว hydraulic cylinder ชนกับ loading frame ในรูปแบบการทดสอบแรงกระทำสี่จุด (4-point loading test) (3) ติดตั้ง dial gauge ที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบ 1 ตัว ที่ระยะ $L/6$ โดยวัดจากกึ่งกลางคานไปทั้งทางด้านซ้ายและ

ขวาด้านละ 1 ตัว และที่จุดรองรับของคานตัวอย่างทดสอบด้านละ 1 ตัว รวมทั้งหมดจำนวน 5 ตัว เพื่อวัดระยะการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 7 (4) เชื่อมต่อ strain gauge เข้ากับ strain gauge indicator (5) ทำการ pre-loading ให้กับคานตัวอย่างทดสอบ เพื่อให้คานตัวอย่างทดสอบ dial gauge และ strain gauge อยู่ในสภาพพร้อมทดสอบ (6) เริ่มทำการทดสอบแบบ displacement-controlling test โดยให้แรงกระทำผ่าน hydraulic pump และบันทึกค่าแรงกระทำที่ค่าการแอ่นตัวที่กลางคานทุก ๆ 0.5 มม. พร้อมกับการบันทึกค่าการแอ่นตัวจาก dial gauge อีก 4 ตัว บันทึกค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมจาก strain gauge indicator และตรวจสอบรอยร้าวที่เกิดขึ้นกับคานตัวอย่างทดสอบ (7) ทำซ้ำข้อที่ 6 จนคานตัวอย่างทดสอบจนกระทั่งคาน

ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ จากนั้น ทำการถอด dial gauge ทั้งหมดออกจากคานตัวอย่างทดสอบ เพื่อป้องกันการเสียหายจากการทดสอบ และทำการให้แรงกระทำจนตัวอย่างมีความเสียหายในระดับที่มากพอ บันทึกค่าแรงและค่าความเครียดสุดท้าย

สังเกตลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบอย่างละเอียดใช้ปากกาขีดตามรอยร้าวที่เกิดจากแรงที่กระทำ และถ่ายรูปเพื่อเก็บเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผลการทดสอบต่อไป

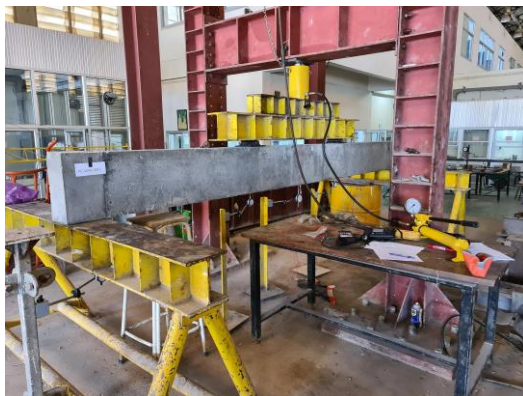


Figure 6 Installation of a beam specimen into the loading frame.

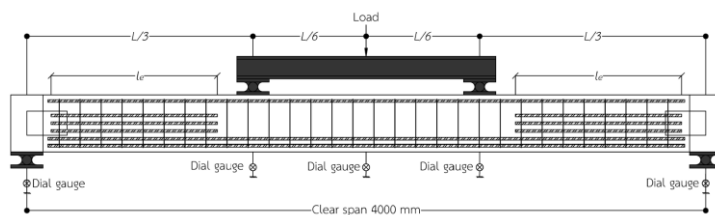


Figure 7 Details of locations of dial gauges on beam specimens.

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. พฤติกรรมการรับแรงของคานตัวอย่างทดสอบ

ภาพที่ 8 แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการรับแรงกระทำและค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางความยาวคานตัวอย่างทดสอบ จากแผนภาพความสัมพันธ์ พบว่า ในภาพรวม คานตัวอย่างทดสอบทั้ง 24 ตัวอย่างมีพฤติกรรมการรับแรงกระทำที่คล้ายคลึงกัน โดยมีพฤติกรรมแบบ bilinear แบ่งออกเป็น 2 ช่วงที่ชัดเจน ในช่วงแรกคานตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) จนกระทั่งแรงกระทำมีค่าประมาณ 80-90% ของแรงกระทำสูงสุดที่ทดสอบได้ (P_{max})

โดยเริ่มเกิดรอยร้าวทำมุมประมาณ 90 องศากับแนวของคานตัวอย่างทดสอบขนาดเล็กบริเวณกึ่งกลางความยาวและที่รอยต่อระหว่างคานและคอนกรีตที่หล่อแทนเสา จากนั้น ตัวอย่างจะมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงที่สอง ซึ่งความชันของเส้นกราฟจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น (non-linear) โดยแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ขณะที่ระยะการแอ่นตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีรอยร้าวปรากฏเพิ่มจำนวนมากขึ้นและขยายตัวมากขึ้นจนถึงจุดที่คานตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ โดยสังเกตที่คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กทั้ง 3 กลุ่ม พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กไม่สามารถต้านทาน

แรงกระทำได้เกินกว่า ความสามารถในการรับแรงกระทำที่สภาวะใช้งานหรือ $P_{L/240}$ เนื่องจากการไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กฝึงที่ส่วนรองรับ ส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่

หล่อแทนเสาข้อข้างต่ำ ทำให้แผ่นเหล็กที่ฝังบริเวณส่วนรองรับเกิดการรูดออกจากคานตัวอย่างทดสอบ และส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใดที่บริเวณส่วนรองรับ

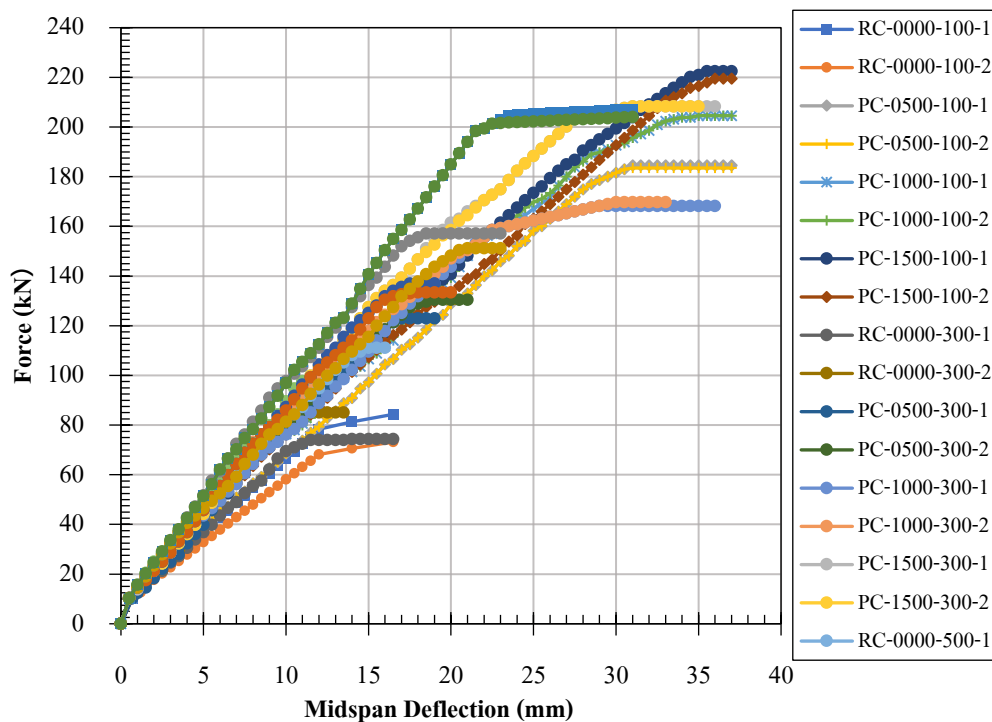


Figure 8 Diagram of the force versus midspan deflection of the beam specimens.

ตารางที่ 3 แสดงค่าความสามารถในการรับแรงกระทำของคานตัวอย่างทดสอบที่วัดได้เมื่อคานตัวอย่างทดสอบมีค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบเท่ากับ $L/240$ หรือ $P_{L/240}$ ซึ่งเป็นค่าการแอ่นตัวที่สภาวะใช้งานของมาตรฐานการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ วสท. 1008-38 กำหนด (Engineering Institute of Thailand, 1995) (กรณีไม่มีผนังใต้ท้องคาน) จากตารางเมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่าคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กทั้ง 3 กลุ่ม มีความสามารถในการรับแรงกระทำต่ำกว่าอยู่ในช่วง 15.76-38.76 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมี

ความสามารถในการรับแรงกระทำเพิ่มขึ้นตามความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กอยู่ในช่วง 8.36-13.93 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 อยู่ในช่วง 4.27-12.23 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และอยู่ในช่วง 12.39-17.45 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก มีความสามารถในการรับแรงกระทำช่วงสภาวะใช้งาน (service load) ที่ต่ำมาก ในขณะที่การเพิ่มความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงกระทำช่วงใช้งานได้เล็กน้อย

Table 3 Applied forces when the beam specimens have the midspan deflection of $L/240$ ($P_{L/240}$) and % of increase/decrease of $P_{L/240}$.

Group	Code of beam specimen	Steel embedded length (mm)	$P_{L/240}$ (kN)	% of increase/decrease of $P_{L/240}$ (%)
1	RC-0000-100	0	84.33	-20.90
	PC-0500-100	500	106.60	-
	PC-1000-100	1000	115.51	+8.36
	PC-1500-100	1500	121.45	+13.93
2	RC-0000-300	0	74.38	-38.76
	PC-0500-300	500	121.45	-
	PC-1000-300	1000	126.64	+4.27
	PC-1500-300	1500	136.30	+12.23
3	RC-0000-500	0	72.45	-45.05
	PC-0500-500	500	131.84	-
	PC-1000-500	1000	148.17	+12.39
	PC-1500-500	1500	154.85	+17.45

Remark: The + and – signs indicate the increase and decrease of the force $P_{L/240}$, respectively.

ตารางที่ 4 แสดงถึงการเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงกระทำสูงสุด (P_{max}) ที่ได้จากการทดสอบ จากตาราง เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กทั้ง 3 กลุ่มมีความสามารถในการรับแรงกระทำต่ำกว่าอยู่ในช่วง 18.96-54.31 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีความสามารถในการรับแรงกระทำเพิ่มขึ้นตามความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กอยู่

ในช่วง 10.86-20.51 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 อยู่ในช่วง 36.84-69.45 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และอยู่ในช่วง 14.62-51.13 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก มีความสามารถในการรับแรงกระทำสูงสุดที่ต่ำมาก ในขณะที่การเพิ่มความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงกระทำสูงสุดได้ค่อนข้างมาก

Table 4 Maximum applied forces at the failure of the beam specimens (P_{max}) and % of increase/decrease of P_{max} .

Group	Number of beam specimen	Steel embedded length (mm)	P_{max} (kN)	% of increase/decrease of P_{max} (%)
1	RC-0000-100	0	84.33	-54.31
	PC-0500-100	500	184.55	-
	PC-1000-100	1000	204.59	+10.86
	PC-1500-100	1500	222.41	+20.51
2	RC-0000-300	0	74.38	-39.49
	PC-0500-300	500	122.93	-
	PC-1000-300	1000	168.22	+36.84
	PC-1500-300	1500	208.30	+69.45
3	RC-0000-500	0	72.45	-47.13
	PC-0500-500	500	137.04	-
	PC-1000-500	1000	157.08	+14.62
	PC-1500-500	1500	207.11	+51.13

Remark: The + and – signs indicate the increase and decrease of the force $P_{L/240}$, respectively.

2. ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบ

ภาพที่ 9 แสดงลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 จะเห็นได้ว่า คานตัวอย่างทดสอบมีลักษณะการวิบัติแบ่งออกเป็นทั้งหมด 2 รูปแบบ ได้แก่ (1) คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติขึ้นแบบทันทีทันใด (abrupt failure) โดยเกิดการแตกร้าวในแนวตั้งของคานคอนกรีตที่จุดต่อระหว่างคานตัวอย่างทดสอบและคานคอนกรีตที่บริเวณปลายจุกรองรับ เนื่องจากการเลื่อนของแผ่นเหล็ก (slip mode) ดังแสดงในภาพที่ 9(a) และ (2) คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะห่างเท่ากับ 500, 1000 และ 1500 มม. พบว่า ช่วงแรก คานจะเกิดรอยแตกร้าวของคานคอนกรีตทำมุมประมาณ 90 องศาับแนวระดับที่บริเวณกึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบในรูปแบบ

flexural failure จากนั้นจึงเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งของคอนกรีตเนื่องจากการเลื่อน (slip) ของแผ่นเหล็ก โดยที่รอยร้าวลดลงตามความยาวระยะห่างของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ดังแสดงในภาพที่ 9(b)

ภาพที่ 10 แสดงลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 จะเห็นได้ว่า คานตัวอย่างทดสอบมีลักษณะการวิบัติแบ่งออกเป็นทั้งหมด 2 รูปแบบ ได้แก่ (1) คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติขึ้นแบบทันทีทันใด โดยการแตกร้าวในแนวตั้งของคอนกรีตที่จุดต่อระหว่างคานตัวอย่างทดสอบและจุกรองรับที่ปลายคานตัวอย่างทดสอบเนื่องจากการเลื่อนของแผ่นเหล็ก ดังแสดงภาพที่ 10(a) และ (2) คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเท่ากับ 500, 1000 และ 1500 มม. พบว่า ช่วงแรก คานตัวอย่างทดสอบจะเกิดรอยร้าว

ของคอนกรีตทำมุมประมาณ 40-45 องศากับแนวระดับที่บริเวณจุดรองรับจนถึงช่วงประมาณ $L/3$ ของคานตัวอย่างทดสอบทั้งหมดในรูปแบบเฉือนทแยง (diagonal shear failure) จากนั้น จึงเกิดรอยร้าวใน

แนวตั้งของคอนกรีตเนื่องจากการเลื่อนของแผ่น โดยที่รอยร้าวลดลงตามความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ดังแสดงในภาพที่ 10(b)



Figure 9 Failure of the beam specimen Group 1:

(a) specimen without deformed bars welded to steel plate. (b) specimen with deformed bars welded to steel plate



Figure 10 Failure of the beam specimen Group 2:

(a) specimen without deformed bars welded to steel plate. (b) specimen with deformed bars welded to steel plate

จากการสังเกตลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบ พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติที่บริเวณรอยต่อ โดยที่บริเวณคานตัวอย่างทดสอบนั้นไม่เกิดการวิบัติขึ้นเลย เมื่อมีเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กฝังเข้าไปในคานตัวอย่างทดสอบ ส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติขึ้นที่บริเวณคานตัวอย่างทดสอบก่อน หลังจากนั้นเมื่อแรง

กระทำเพิ่มขึ้นจึงเริ่มเกิดรอยร้าวที่เกิดจากการแยกตัวกันระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่หล่อแทนเสา โดยที่รอยร้าวบริเวณจุดเชื่อมต่อมีแนวโน้มลดลงตามความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบมีลักษณะการวิบัติที่มีความค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure) มากยิ่งขึ้น



Figure 11 Failure of the beam specimen Group 3:

(a) specimen without deformed bars welded to steel plate. (b) specimen with deformed bars welded to steel plate

3. ผลของระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบกำลังรับแรงกระทำช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นที่ได้จากการทดสอบ ($P_{y, test}$) กำลังรับแรงกระทำจากสมการการออกแบบของ วสท. 1008-38 ($P_{y, calculated}$) พบว่า คานตัวอย่างทดสอบมีค่าอัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$ (ที่แสดงถึงระดับความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก) เพิ่มขึ้นตามความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก จากตารางสามารถแบ่งรูปแบบความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกได้ทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่ (1) รูปแบบที่ไม่มีความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก คานตัวอย่างทดสอบที่อยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก และคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิงทั้ง 3 กลุ่ม พบว่า คานตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีค่าอัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$ ค่อนข้างต่ำกว่าค่าที่ยอมให้ใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกได้ (ค่าที่ยอมให้ใช้งานประมาณ 2.0) เนื่องจากคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติที่บริเวณเชื่อมต่อก่อนที่จะเกิดการวิบัติตามที่ได้ออกแบบไว้ และคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิงเกิดการวิบัติตามที่ได้ออกแบบไว้เพียงเล็กน้อย เมื่อแรงกระทำเพิ่มมากขึ้นจะเกิดการวิบัติที่บริเวณจุดเชื่อมต่อแทน ซึ่งลักษณะการวิบัติที่บริเวณจุดเชื่อมต่อ

เกิดขึ้นแบบทันทีทันใด ส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบมีกำลังต้านทานแรงกระทำที่ค่อนข้างต่ำ (2) รูปแบบที่มีความปลอดภัยปานกลาง คานตัวอย่างทดสอบที่อยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 ที่มีความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเท่ากับ 1000 และ 1500 มม. ที่ออกแบบให้เกิดการวิบัติแบบ flexural failure พบว่า คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มนี้มีอัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$ ใกล้เคียงกับค่าที่ยอมให้ใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก เนื่องจากเมื่อแรงกระทำเพิ่มมากขึ้นคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มดังกล่าวเกิดการวิบัติตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยที่รอยร้าวที่บริเวณจุดเชื่อมต่อลดน้อยลงตามความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก และ (3) รูปแบบที่มีความปลอดภัยเพียงพอต่อการใช้งาน คานตัวอย่างทดสอบที่อยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 ที่มีความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเท่ากับ 1000 และ 1500 มม. ที่ออกแบบให้เกิดการวิบัติแบบ shear failure พบว่า คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มนี้จะมีอัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$ อยู่ในช่วงของค่าที่ยอมให้ใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก เนื่องจากเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ฝังเข้าไปในแนวขวางมีส่วนช่วยในการต้านทานแรงเฉือนได้ค่อนข้างมาก ส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบดังกล่าวมีอัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$ ที่สามารถใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกได้ ซึ่ง

แสดงให้เห็นว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กหรือมีความยาวระยะฝังที่ไม่เพียงพอส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$ ที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก ในขณะที่เมื่อคานตัวอย่างทดสอบมี

ความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเพียงพอส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อ $P_{y, calculated}$ เพียงพอต่อการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก

Table 5 Applied forces when the beam specimens reach linear elastic limit ($P_{y, test}$), calculated strength of the beam specimens from EIT equations ($P_{y, calculated}$) and ratio of $P_{y, test}/P_{y, calculated}$

Group	Number of beam specimen	$P_{y, test}$ (kN)	$P_{y, calculated}$ (kN)	Ratio of $P_{y, test}/P_{y, calculated}$
1	RC-0000-100	78.39	116.86	0.67
	PC-0500-100	180.09	116.86	1.54
	PC-1000-100	198.65	116.86	1.70
	PC-1500-100	217.95	116.86	1.87
2	RC-0000-300	73.94	77.49	0.95
	PC-0500-300	118.48	77.49	1.53
	PC-1000-300	159.31	77.49	2.06
	PC-1500-300	200.14	77.49	2.58
3	RC-0000-500	72.16	69.62	1.04
	PC-0500-500	130.36	69.62	1.87
	PC-1000-500	148.17	69.62	2.13
	PC-1500-500	199.39	69.62	2.86

ภาพที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือน และความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก พบว่า เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบหน่วยรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคานตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 กลุ่ม เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีหน่วยแรงเฉือนลดลงอยู่ในช่วง 17.19-56.20

เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เมื่อความยาวของเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเพิ่มขึ้นหน่วยแรงเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 10.73-20.90 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 อยู่ในช่วง 34.19-68.38 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และอยู่ในช่วง 14.06-53.13 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นต่ำมาก ในขณะที่การเพิ่มความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ส่งผลให้หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในคาน

ตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยสำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 เนื่องจากเหล็กเสริมรับแรงเฉือนมีระยะห่างที่เพียงพอในการต้านทานแรงเฉือนที่เกิดขึ้น และมีหน่วยแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก

สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 เนื่องจากเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กช่วยเสริมกำลังต้านทานแรงเฉือนร่วมกับเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่มีระยะห่างไม่เพียงพอ

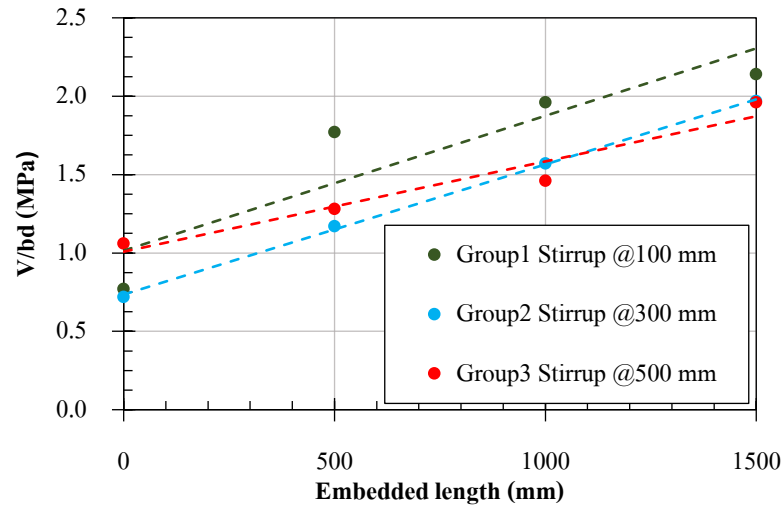


Figure 12 Shear stress in the beam specimen versus steel embedded length.

Table 6 Shear stress in the beam specimen.

Group	Code of beam specimen	Steel embedded length (mm)	Shear stress (MPa)	% of increase/decrease of shear stress (%)
1	RC-0000-100	0	0.77	-56.50
	PC-0500-100	500	1.77	-
	PC-1000-100	1000	1.96	+10.73
	PC-1500-100	1500	2.14	+20.90
2	RC-0000-300	0	0.73	-37.61
	PC-0500-300	500	1.17	-
	PC-1000-300	1000	1.57	+34.19
	PC-1500-300	1500	1.97	+68.38
3	RC-0000-500	0	0.74	-42.19
	PC-0500-500	500	1.28	-
	PC-1000-500	1000	1.46	+14.06
	PC-1500-500	1500	1.96	+53.13

Remark: The + and – signs indicate the increase and decrease of the force $P_{L/240}$, respectively.

สรุป

จากการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรง ลักษณะการวิบัติ และผลของระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กพบว่า

(1) จากความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการต้านทานแรงกระทำ และค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางของคานตัวอย่างทดสอบทั้ง กลุ่ม 3 พบว่า คานตัวอย่างทดสอบส่วนใหญ่มีพฤติกรรมการรับแรงแบบ bilinear โดยในช่วงแรกคานตัวอย่างทดสอบจะมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) จนกระทั่งเมื่อแรงกระทำมีค่าประมาณ -80 เปอร์เซ็นต์ของความสามารถในการ 90 ด้านทานแรงกระทำสูงสุด (P_{max}) คานตัวอย่างทดสอบจะเริ่มเข้าสู่ช่วงพฤติกรรมที่ ซึ่งเป็นพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น 2 (nonlinear) โดยที่ค่าการแอ่นตัวของคานตัวอย่างทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความสามารถในการต้านทานแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จนกระทั่งคานตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ โดยที่ค่าความสามารถในการต้านทานแรงกระทำเพิ่มขึ้นตามความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก

(2) เมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่า ที่ความสามารถในการต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งานหรือ P_{L240} พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีความสามารถในการรับแรงกระทำที่สภาวะใช้งานลดลงอยู่ในช่วง 15.76-38.76 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การเพิ่มความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงกระทำช่วงใช้งานได้อีกในช่วง 8.36-13.93 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 อยู่ในช่วง 4.27-12.23 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และอยู่ในช่วง 12.39-17.45 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบ

กลุ่มที่ 3 และเมื่อเปรียบเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง ที่ความสามารถในการต้านทานแรงกระทำสูงสุดหรือ P_{max} พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมีความสามารถในการรับแรงกระทำที่สภาวะใช้งานลดลงอยู่ในช่วง 18.96-54.31 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การเพิ่มความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงกระทำช่วงใช้งานได้อีกในช่วง 10.86-20.51 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 อยู่ในช่วง 36.84-69.45 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และอยู่ในช่วง 14.62-51.13 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีความสามารถในการต้านทานแรงกระทำช่วงสภาวะใช้งาน และความสามารถในการต้านทานแรงกระทำสูงสุดต่ำลงมา ในขณะที่การเพิ่มความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงกระทำที่สภาวะใช้งานได้เล็กน้อย และช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานแรงกระทำสูงสุดได้ค่อนข้างมาก

(3) การมีเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก และการเพิ่มความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นระหว่างคานตัวอย่างทดสอบกับคอนกรีตที่หล่อแทนเสา ส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติจากการวิบัติแบบแตกร้าวในแนวตั้งของคอนกรีตที่เป็นจุดต่อระหว่างคานตัวอย่างทดสอบและจุดรองรับเนื่องจากการเลื่อนของแผ่นเหล็ก (slip mode) เป็นการวิบัติแบบ flexural failure ที่บริเวณกึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 และการวิบัติแบบ diagonal shear failure ที่บริเวณจุดรองรับไปจนถึงระยะประมาณ $L/3$ ของคานตัวอย่างทดสอบสำหรับคานตัวอย่างทดสอบ

กลุ่มที่ 2 และ 3 จากนั้นจึงเกิดรอยแตกร้าวในแนวโค้งของคอนกรีตเนื่องจากการเลื่อนของแผ่นเหล็ก โดยที่รอยร้าวลดลงตามความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การมีเหล็กข้ออ้อย และการเพิ่มความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ส่งผลให้คานตัวอย่างทดสอบเปลี่ยนลักษณะการวิบัติจากแบบทันทีทันใดให้มีการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไปมากยิ่งขึ้น

(4) เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นที่ได้จากการทดสอบ ($P_{y, test}$) ต่อกำลังต้านทานแรงกระทำช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นที่ได้จากสมการของ วสท.1008-38 ($P_{y, calculated}$) พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็ก และคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิงทุกกลุ่มมีอัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อกับ $P_{y, calculated}$ ที่ไม่เพียงพอต่อการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก เนื่องจากเกิดการวิบัติที่บริเวณจุดเชื่อมต่อเป็นหลัก คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 ที่มีความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเท่ากับ 1000 และ 1500 มม. ที่ออกแบบให้เกิดการวิบัติแบบ flexural failure มีอัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อกับ $P_{y, calculated}$ ที่ใกล้เคียงต่อการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก เนื่องจากเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีส่วนช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนเพียงเล็กน้อย และคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 ที่มีความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กเท่ากับ 1000 และ 1500 มม. ที่ออกแบบให้เกิดการวิบัติแบบ shear failure มีอัตราส่วน $P_{y, test}$ ต่อกับ $P_{y, calculated}$ ที่เพียงพอต่อการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก เนื่องจากเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีส่วนช่วยเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนได้ค่อนข้างมาก

(5) เมื่อเปรียบเทียบหน่วยแรงเฉือนกับคานตัวอย่างทดสอบอ้างอิง พบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กมี

หน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นลดลงอยู่ในช่วง 17.19-56.50 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เมื่อความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 10.73-20.90 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 อยู่ในช่วง 34.19-68.38 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และอยู่ในช่วง 14.06-53.13 เปอร์เซ็นต์ สำหรับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ช่วยเพิ่มหน่วยแรงเฉือนให้กับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 เล็กน้อย เนื่องจากคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่เพียงพอในการต้านทานแรงเฉือน และช่วยเพิ่มหน่วยแรงเฉือนให้กับคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 ได้ค่อนข้างมาก เนื่องจากคานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 มีระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนไม่เพียงพอในการต้านทานแรงเฉือน การเพิ่มความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กจึงช่วยเสริมหน่วยแรงเฉือนเพื่อชดเชยระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือนที่ไม่เพียงพอ นอกจากนั้นแล้ว ตัวแปรที่สำคัญอีกตัวแปรหนึ่งคือ ระยะห่างของเหล็กปลอกที่ต่างกันตั้งแต่ 100 300 และ 500 มม. ที่ส่งผลต่อลักษณะการวิบัติ (mode of failure) ของคานจากรูปแบบ flexural ไปสู่ shear โดยพบว่า คานตัวอย่างทดสอบในการศึกษานี้จำเป็นต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดของเหล็กปลอกรับแรงเฉือนของ วสท 1008-38 เพื่อให้คานมีการวิบัติในรูปแบบ flexural ที่เหมาะสม

ข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบคานตัวอย่างทดสอบในการศึกษานี้ ผู้วิจัยขอเสนอข้อเสนอแนะในการนำผลการศึกษานี้ไปใช้งานตามรูปแบบความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุก ดังนี้

(1) รูปแบบที่มีความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกทุก ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 2 และ 3 ที่มีระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อย 1000 และ 1500 มม. ที่ออกแบบให้วิบัติแบบ shear failure พบว่าเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ที่ฝังในแนวขวางมีส่วนช่วยในการรับแรงเฉือนของคานและทำให้มีอัตราส่วนระหว่างกำลังต้านทานแรงกระทำช่วงยึดหยุ่นเชิงเส้นที่ได้จากการทดสอบต่อกำลังต้านทานแรงกระทำช่วงยึดหยุ่นจากสมการของ วสท. 1008-38 พบว่า อยู่ในช่วง 2.06 ถึง 2.86 ซึ่งถือว่า อยู่ในช่วงที่ยอมรับให้ใช้งานได้

(2) รูปแบบที่มีความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกปานกลาง ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่ 1 ที่มีระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อย 1000 และ 1500 มม. ที่ออกแบบให้วิบัติแบบ flexural failure นั้น พบว่า คานตัวอย่างทดสอบดังกล่าวเกิดการวิบัติตามลักษณะที่กำหนด จากนั้น จึงเกิดการวิบัติที่บริเวณจุดเชื่อมต่อ ดังนั้น ถ้าหากต้องการนำไปใช้งานแล้ว วิศวกรควรพิจารณาลดความสามารถในการต้านทานแรงกระทำของคานโดยใช้ตัวคูณลดกำลังที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการใช้งานมากขึ้น

(3) รูปแบบที่ไม่มีความปลอดภัยในการใช้งานรับน้ำหนักบรรทุกทุก ได้แก่ คานตัวอย่างทดสอบทุกกลุ่ม ที่ไม่มีระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อย และที่มีระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อย 500 มม. พบว่า ไม่ควรมาใช้งานรับแรงกระทำตามสมการการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย 1008-38 เนื่องจากคานตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กเกิดการวิบัติที่บริเวณจุดเชื่อมต่อ ก่อนที่จะเกิดการวิบัติในลักษณะที่กำหนด คานตัวอย่างทดสอบอ้างอิงเกิดการวิบัติตามที่ยออกแบบเพียงเล็กน้อย เมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นจะเกิดการวิบัติที่บริเวณจุดเชื่อมต่อ และทำให้

มีความสามารถในการต้านทานแรงกระทำต่ำกว่าที่สมการออกแบบ ทำนาย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนงบประมาณ สถานที่ และเครื่องมือทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- Engineering Institute of Thailand. 1995. **Reinforced Concrete Design: Strength Design Method (EIT Standard 1008-38)**. Engineering Institute of Thailand under His Majesty the King's Patronage, Bangkok.
- Guo, X., Gao, S., Wang, L. and Bui, T.N. 2018. Bearing capacity of embedded channel-shaped steel connections at precast concrete beam end. **Engineering Structures** 175(1): 177-190.
- Thai Industrial Standards Institute. 1982. **Notification of the Ministry of Industry (TIS 409-2525) 1982 Title: Test method for compressive strength of concrete specimens**. Government Gazette vol.99, Special Part 51 (dated April 9, 1982). (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. 1998. **Notification of the Ministry of Industry (TIS 1479-2541) 1998 Title: Hot-rolled flat steel of commercial and drawing qualities**. Government Gazette vol.116, Special Part 107 (dated December 24, 1999). (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. 2016a. **Notification of the Ministry of Industry (TIS 20-2559)**

2016 Title: Steel bars for reinforcing concrete: Round bar. Government Gazette vol.133, Special Part 87 (dated May 24, 2016). (in Thai)

Thai Industrial Standards Institute. 2016b. **Notification of the Ministry of Industry (TIS 24-2559)**

2016 Title: Steel bars for reinforcing concrete: Deformed bar. Government Gazette vol.133, Special Part 87 (dated May 24, 2016). (in Thai)

Thumrongvut, J. and Seangatith, S. 2005. Precast Reinforced Concrete Beams with Steel Channel Sections Embedded at the Support Sections under Transverse Point Loads, pp. 1-6. **In Tenth National Convention on Civil Engineering.** Engineering Institute of Thailand under His Majesty the King's Patronage.

Yip, W.K., Teng, S., Ting, S.K. and Hu, H.B. 1999. Behaviour of precast reinforced concrete beams with structural steel I-section embedded at the support section, pp. 973-978. **In Seventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction.** Kochi University of Technology, Kochi, Japan.