

ผลของความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กที่มีผลต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป
EFFECT OF EMBEDDED LENGTH OF DEFORMED BARS WELDED TO STEEL PLATE
ON PRECAST REINFORCED CONCRETE BEAM

ชูธง กงแก้ว^{1,*} สิทธิชัย แสงอาทิตย์² และ จักษดา ชำรงวุฒิ³

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

²รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

³ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

*Corresponding author address: chuthong.kongkaew@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงผลการศึกษาโดยการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อสำเร็จรูปที่มีจุดเชื่อมต่อเป็นแผ่นเหล็กเชื่อมกับเหล็กข้ออ้อยฝังที่ส่วนรองรับ โดยใช้การทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด (4-point loading test) เพื่อศึกษาผลของความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กบริเวณจุดรองรับต่อความสามารถในการรับแรงกระทำและลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นคานที่มีขนาดหน้าตัดกว้าง 0.175 ม. ลึก 0.35 ม. และ ยาว 4.0 ม. จุดเชื่อมต่อของคานทำด้วยแผ่นเหล็กหน้าตัดกว้าง 0.25 ม. ลึก 0.15 ม. และหนา 0.02 ม. ที่เชื่อมด้วยเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. (DB16) ยาว 0.5, 1.0 และ 1.5 ม. จากผลการทดสอบพบว่า สำหรับคานตัวอย่างทดสอบที่มีตัวแปรควบคุมต่าง ๆ เหมือนกัน เมื่อความยาวระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยเพิ่มขึ้น ความสามารถรับแรงกระทำของคานตัวอย่างทดสอบที่ค่าการอ่อนตัวของคาน $L/240$ จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝัง 0.5 ม. เท่ากับ 4.27 และ 12.23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยรูปแบบการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบเปลี่ยนจากการวิบัติแบบแตกร้าวในแนวตั้งของคานกริดเนื่องจากการเลื่อน (slip) ของแผ่นเหล็กที่จุดรองรับเป็นการวิบัติแบบเฉือนทแยง (diagonal shear failure) ที่บริเวณจุดรองรับไปจนถึงที่ระยะประมาณ $L/3$ ของคานทั้งสองด้าน จากนั้น จึงเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งของคานกริดเนื่องจากการเลื่อน (slip) ของแผ่นเหล็กที่จุดรองรับ

คำสำคัญ: คานคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อสำเร็จรูป, จุดต่อ, ความยาวระยะฝัง

Abstract

This paper presents the result from the experimental study on precast reinforced concrete beams, having connection in the form of deformed bars welded to steel plate at the support sections. The experiments were performed by using the four-point loading test. The objectives of the research are to study the effects of the embedded length of deformed bars to the load-carrying capacity and the modes of failure of the beam specimens. The beams specimens have the cross section of 0.175 m width and 0.35 m depth with 4.0 m clear span. The beam's connections at the ends of the beam were made of steel plate, having the cross section of 0.25 m width, 0.15 m depth and 0.02 m thickness, and welded with 16 mm diameter (DB16) deformed bars, having the length of 0.5, 1.0 and 1.5 m embed to the end portions of the beams. According to the experiments, it was found that, for the specimens with the same control-variables, when the embedded length of deformed bars was increased, the load-carrying capacity of the beam specimens at the deflection of $L/240$ increased, compared to the specimens with 0.5 m the deformed bars, of 4.27 and 12.23 percent, respectively. Also, the modes of failure of the specimens are changed from the vertical concrete cracks of concrete due to the slip of the steel plate at the support sections to the diagonal shear failure of the specimens in the areas between the supports and the $1/3$ of the beam's span of both ends of the beam and, then, in the form of the vertical concrete cracks of concrete due to the slip of the steel plate at the support sections.

Keywords: Precast reinforced concrete beam, Connection, Embedded length

1. บทนำ

ในอดีตที่ผ่านมา โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนใหญ่ในประเทศไทยเป็นโครงสร้างแบบเสา-คาน โดยก่อสร้างแบบหล่อในที่

(cast-in-place) ซึ่งใช้แบบหล่อ แรงงานคน ค่าใช้จ่ายในโครงการ และเวลาในการก่อสร้างมาก อีกทั้งยังเป็นการยากที่จะควบคุมคุณภาพในการก่อสร้าง เนื่องจากคุณภาพฝีมือแรงงานของคณงานมักแตกต่างกันไปรายบุคคล เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าว ในปัจจุบัน

จึงได้มีการพัฒนาระบบการก่อสร้างแบบหล่อสำเร็จรูป (Precast) โดยพบว่า มีข้อดีหลายประการ เช่น การก่อสร้างทำได้อย่างรวดเร็ว ประหยัดงบประมาณในการก่อสร้าง และสามารถควบคุมคุณภาพ การก่อสร้างได้ดีขึ้น และที่สำคัญระบบก่อสร้างดังกล่าวช่วยลดขยะ จากงานก่อสร้างเนื่องจากเศษปูนและไม้แบบได้ ช่วยส่งเสริมการ รักษาสภาพแวดล้อมที่ดีในสถานที่ก่อสร้างและชุมชนใกล้เคียงซึ่ง สอดรับกับแนวคิดอาคารเขียว (green building) [4],[5]

ในปัจจุบัน ผู้รับเหมาก่อสร้างได้นำระบบการก่อสร้างแบบ สำเร็จรูปมาใช้ กับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดเล็ก เช่น บ้านพัก อาศัย โรงงาน และอาคารพาณิชย์ เป็นต้น มากขึ้นอย่างมาก ทั้งใน ส่วนของพื้นที่ สำเร็จรูป คานา หล่อสำเร็จรูป เสา หล่อสำเร็จรูป และผนังฯ หล่อสำเร็จรูป โดยมีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในช่วงสิบกว่าปีที่ผ่านมา แต่สิ่งที่สำคัญที่สุดสิ่งหนึ่งของการก่อสร้าง แบบสำเร็จรูปคือ จุดต่อระหว่างโครงสร้าง เช่น ในกรณีของการ ก่อสร้างระบบคานและเสา เป็นต้น ที่จะต้องมีความแข็งแรงและ ความแกร่งเพียงพอในการรองรับแรงกระทำ โดยที่จุดต่อจะต้องเกิด การวิบัติหลังจากการวิบัติขององค์อาคาร ซึ่งในการศึกษานี้มี วิตุประสงค์ในการพัฒนาจุดเชื่อมต่อนาน-เสาสำหรับการก่อสร้าง อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดเล็ก

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโดยการทดสอบคาน คอนกรีตเสริมเหล็กหล่อสำเร็จรูปที่มีจุดเชื่อมต่อนาน-เสาเชื่อม กับเหล็กข้ออ้อยฝั่งที่ส่วนรองรับ ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวได้มีหน่วยงาน ก่อสร้างแห่งหนึ่งที่ได้ไปศึกษาดูงานนำเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่น เหล็กโดยมีระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อยเท่ากับ 0.5 ม. เข้ามาใช้ใน หน่วยงานก่อสร้าง โดยใช้การทดสอบแบบแรงกระทำ 4 จุด (4-point loading test) เพื่อศึกษาผลของความยาวระยะฝั่งของเหล็ก ข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กบริเวณจุดรองรับ และลักษณะการวิบัติ (modes of failure) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กและจุดเชื่อมต่อ โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ ความยาวระยะฝั่งของเหล็กข้ออ้อย ที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก (l_c) ทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 0.5, 1.0 และ 1.5 ม.

2. ตัวอย่างทดสอบและวิธีการทดสอบ

2.1. การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

การทดสอบหาคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นไปตาม มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (Thai Industrial Standard) หรือ มอก. ประกอบด้วย (1) การทดสอบเหล็กเสริมตาม มอก. 20-2559 (เหล็กเส้นกลม) [7] และ มอก. 24-2559 (เหล็กข้ออ้อย) [8] (2) การทดสอบแผ่นเหล็กดำตาม มอก. 1479-2541 [9] และ (3) การทดสอบคอนกรีตตาม มอก. 409-2525 [10] ซึ่งได้ผลการ ทดสอบหาคุณสมบัติทางกล ดังแสดงในตารางที่ 1 และพบว่า วัสดุที่ ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไปตามที่ มอก. ที่เกี่ยวข้องกำหนด

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุ	กำลังคราก เฉลี่ย (MPa)	กำลังสูงสุด เฉลี่ย (MPa)	โมดูลัส ยืดหยุ่นเฉลี่ย (GPa)
คอนกรีต	-	40.33	29.85
เหล็กข้ออ้อย (DB16)	590.10	645.21	198.5
เหล็กเส้นกลม (RB6)	370.20	493.46	195.3
แผ่นเหล็ก (Steel plate)	404.74	568.42	196.3

2.2. คานตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก สำเร็จรูป ซึ่งออกแบบโดยวิธีกำลังตามมาตรฐานการออกแบบ วสท. 1008-38 [6] โดยที่ไม่นำเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กมา พิจารณา คานตัวอย่างทดสอบมีขนาดหน้าตัด กว้าง 0.175 ม. ลึก 0.35 ม. และยาว 4.0 ม. (clear span) จำนวนทั้งหมด 6 ตัวอย่าง คือ คานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่น เหล็กที่ระยะฝั่งเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 1.5 ม. ชุดละ 2 ตัวอย่าง เหล็ก เสริมรับแรงดึงและอัดเป็นเหล็กข้ออ้อย (DB16 เกรด SD40) เหล็ก เสริมรับแรงเฉือนเป็นเหล็กเส้นกลม (RB6 เกรด SR24) และแผ่น เหล็กที่ใช้เชื่อมต่อนานเข้ากับคอนกรีตที่ปลายคานในส่วนจุด รองรับของคานเชื่อมมีขนาด กว้าง 0.25 ม. ลึก 0.15 ม.หนา 0.020 ม. (เกรด SS400) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยออกแบบให้แผ่นเหล็กยื่น ออกมาจากปลายคานตัวอย่างทดสอบด้านละ 0.1 ม. และให้มีเหล็ก ข้ออ้อยขนาด DB16 เกรด SD40 มาเชื่อมต่อตามความยาวระยะฝั่ง ที่กำหนด ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดของคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ โดยชื่อของคานตัวอย่างทดสอบถูกกำหนดในรูป PRCB-Y โดยที่ PRCB คือ ตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อสำเร็จรูป และ Y หมายถึง ความยาวระยะฝั่งเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก มีหน่วยเป็นเมตร

รูปที่ 2 แสดงลักษณะของคานตัวอย่างทดสอบ ซึ่งขอให้สังเกต ตำแหน่งของแผ่นเหล็กและเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก รูปที่ 3 แสดงหน้าตัดคานที่จุดฝั่งแผ่นเหล็กที่จุดเชื่อมต่อของปลายคาน (section A-A) และจุดรองรับและที่จุดกึ่งกลางของความยาวคาน (section B-B) จากรูป จะเห็นได้ว่า คานตัวอย่างทดสอบ PRCB-Y ตัวอย่างทดสอบถูกผลิตขึ้นโดยช่างฝีมือแรงงานตามแบบที่กำหนด โดยมีการติดมาตรวัดความเครียด (strain gauge) ที่เหล็กส่วนที่รับ แรงดึงบริเวณกึ่งกลางของคานตัวอย่างทดสอบ เพื่อใช้ในการ ตรวจสอบความเครียดของเหล็กเสริมภายใต้แรงกระทำ เพื่อ

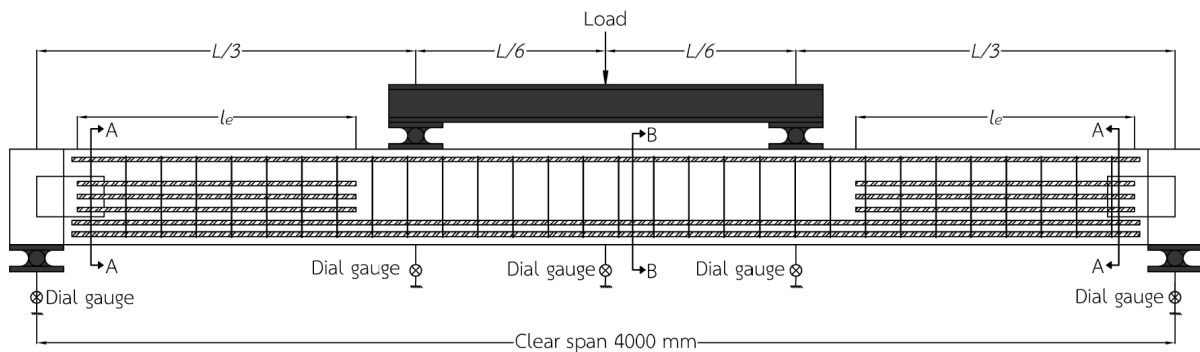
ตรวจสอบว่าเหล็กเสริมเกิดการคราก (yielding) ระหว่างการทดสอบหรือไม่ และได้รับการบ่มคอนกรีตตามที่ วสท. กำหนด เมื่อแกะแบบหล่อคานตัวอย่างทดสอบแล้ว จะมีการหล่อคอนกรีตหุ้มแผ่นเหล็กที่เหลื่อเพื่อจำลองคอนกรีตส่วนที่หล่อแทนเสา โดยคอนกรีตส่วนนี้จะวางอยู่บนจตุรองรับ



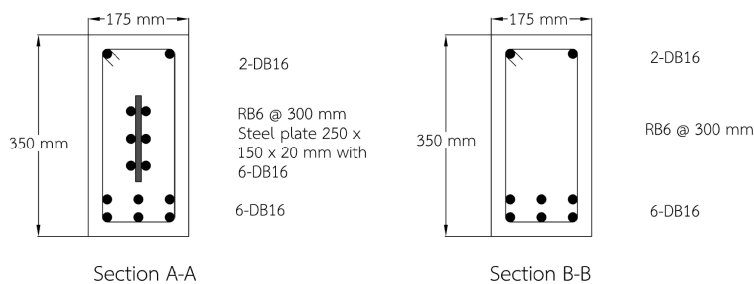
รูปที่ 1 เหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมติดกับแผ่นเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 2 รายละเอียดคานตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

คานตัวอย่างทดสอบ	ระยะฝั่งเหล็ก (ม.)	ระยะห่างเหล็กปลอก (ม.)	ความยาว (ม.)	จำนวนเหล็กเสริมรับแรงดึง	จำนวนเหล็กเสริมรับแรงอัด	Mode of failure ที่ออกแบบ
PRCB-0.5	0.5	0.3	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear failure
PRCB-1.0	1.0	0.3	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear failure
PRCB-1.5	1.5	0.3	4.0	6-DB16	2-DB16	Shear failure



รูปที่ 2 ลักษณะของคานตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3 หน้าตัดคานที่จุดที่ฝังแผ่นเหล็กที่จุดเชื่อมต่อของปลายคานและจตุรองรับและที่จุดกึ่งกลางของความยาวคาน

2.3. การทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป

ขั้นตอนการทดสอบคานตัวอย่างทดสอบมีดังนี้ (1) ติดตั้งคานตัวอย่างทดสอบเข้ากับ loading frame ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยวางคานตัวอย่างทดสอบในรูปแบบคานบนจตุรองรับอย่างง่าย (simple supported beam) โดยให้คอนกรีตส่วนที่หล่อแทนเสาวางอยู่ที่จตุรองรับทั้งสองด้านและรอยต่ออยู่ตรงตำแหน่งของขอบจตุรองรับ (2) นำคานถ่ายแรงวางบนหลังคานตัวอย่างทดสอบจากนั้นนำ

กระบอกไฮดรอลิก (hydraulic cylinder) วางบนคานถ่ายแรงและปรับให้อยู่ในตำแหน่งที่หัว hydraulic cylinder ชนกับ loading frame ในรูปแบบการทดสอบแรงกระทำสี่จุด (4-point loading test) (3) ติดตั้ง dial gauge ที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบ 1 ตัว ที่ระยะ L/6 โดยวัดจากกึ่งกลางคานไปทั้งทางด้านซ้ายและขวาด้านละ 1 ตัว และที่จตุรองรับของคานตัวอย่างทดสอบด้านละ 1 ตัว รวมทั้งหมดจำนวน 5 ตัว เพื่อวัดระยะการแอ่นตัวของคานตัวอย่าง

ทดสอบ (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 และบันทึกค่าแรงกระทำที่ค่าการแอ่นตัวที่กลางคานเท่ากับ 0.5 มม. พร้อมกับกับการบันทึกค่าการแอ่นตัวจาก dial gauge อีก 4 ตัว บันทึกค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมจาก strain gauge indicator และตรวจสอบรอยร้าวที่เกิดขึ้นกับคานตัวอย่างทดสอบ (7) ทำข้อที่ 6 จนคานตัวอย่างทดสอบมีค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางคานตัวอย่างทดสอบเท่ากับ $L/120$ ซึ่งมีค่าประมาณ 2 เท่าของค่าการแอ่นตัวที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบ วสท. จากนั้นทำการถอด dial gauge ทั้งหมดออกจากคานตัวอย่างทดสอบ เพื่อป้องกันการเสียหายจากการทดสอบ และทำการให้แรงกระทำจนตัวอย่างมีความเสียหายในระดับที่มากพอ บันทึกค่าแรงและค่าความเครียดสุดท้าย สังเกตลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบอย่างละเอียดใช้ปากกาขีดตามรอยร้าวที่เกิดจากแรงที่กระทำ และถ่ายรูปเพื่อเก็บเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผลการทดสอบต่อไป



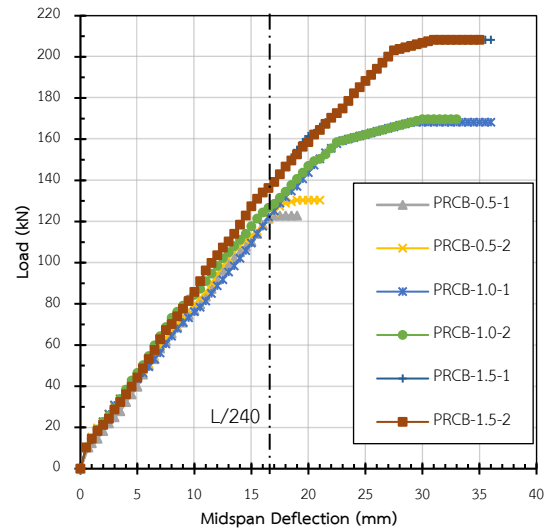
รูปที่ 4 การติดตั้งคานตัวอย่างทดสอบเข้ากับ loading frame

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 พฤติกรรมการรับแรงของคาน

รูปที่ 5 แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางความยาวคานตัวอย่างทดสอบ จากแผนภาพความสัมพันธ์ พบว่า ในภาพรวม คานตัวอย่างทดสอบทั้ง 6 ตัวอย่างมีพฤติกรรมการรับแรงกระทำที่คล้ายคลึงกัน โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วงที่ชัดเจน ในช่วงแรกคานตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้น (linear) จนถึงจุดที่แรงกระทำมีค่าประมาณ 85-90% ของแรงกระทำสูงสุด (P_{max}) ที่ทดสอบได้ โดยเริ่มเกิดรอยร้าวตามมุมประมาณ 90 องศาที่แนวของคานตัวอย่างทดสอบขนาดเล็กบริเวณกึ่งกลางความยาวและที่รอยต่อระหว่างคานและคอนกรีตที่

หล่อแทนเสา จากนั้น ตัวอย่างจะมีพฤติกรรมเข้าสู่ช่วงที่สอง ซึ่งความชันของเส้นกราฟจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยมีลักษณะแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) โดยแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ขณะที่ระยะการแอ่นตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีรอยร้าวปรากฏเพิ่มจำนวนมากขึ้นและขยายตัวมากขึ้นจนถึงจุดที่หยุดการทดสอบคานเนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือทดสอบ



รูปที่ 5 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะการแอ่นตัวที่กึ่งกลางความยาวคาน

ตารางที่ 3 แสดงค่าแรงกระทำต่อคานตัวอย่างทดสอบที่วัดได้เมื่อคานมีค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางความยาว $L/240$ ($P_{L/240}$) ซึ่งเป็นการแอ่นตัวสูงสุดของคานในสภาวะการใช้งานที่มาตรฐานการออกแบบคาน วสท. กำหนด (กรณีคานไม่มีผนังใต้ท้องคาน) จากตารางพบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝั่ง 1.0 และ 1.5 ม. มีความสามารถในการรับแรงกระทำที่สภาวะการแอ่นตัวใช้งาน ($P_{L/240}$) มากกว่าคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝั่ง 0.5 ม. เท่ากับ 4.27 และ 12.23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มระยะฝั่งเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงในช่วงใช้งาน (service load) ได้บ้างแต่ไม่มาก

ตารางที่ 3 ค่าแรงกระทำต่อคานตัวอย่างทดสอบที่วัดได้เมื่อคานมีค่าการแอ่นตัวที่กึ่งกลางความยาว $L/240$ ($P_{L/240}$)

คานตัวอย่างทดสอบ	ระยะฝั่งเหล็ก (ม.)	$P_{L/240}$ (kN)	$P_{L/240}$ ที่เพิ่มขึ้น (%)
PRCB-0.5	0.5	121.45	-
PRCB-1.0	1.0	126.64	4.27
PRCB-1.5	1.5	136.30	12.23

ตารางที่ 4 แสดงถึงการเปรียบเทียบค่าแรงกระทำสูงสุด (P_{max}) ที่ได้จากการทดสอบ จากตารางจะเห็นได้ว่า คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝังเท่ากับ 1.0 และ 1.5 ม. มีค่าแรงกระทำสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับค่าแรง P_{max} ของคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝังเท่ากับ 0.5 ม. เท่ากับ 36.84 และ 69.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มระยะฝังเหล็กข้ออ้อยฯ ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงสูงสุดของคานตัวอย่างทดสอบได้ค่อนข้างมาก

ตารางที่ 4 ค่าแรงกระทำต่อคานตัวอย่างทดสอบสูงสุด (P_{max}) ที่ได้จากการทดสอบ

คานตัวอย่างทดสอบ	P_{max} (kN)	P_{max} ที่เพิ่มขึ้น (%)
PRCB-0.5	122.93	-
PRCB-1.0	168.22	36.84
PRCB-1.5	208.30	69.44

3.2 ลักษณะการวิบัติของคาน

รูปที่ 6 แสดงลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบ ซึ่งจะเห็นได้ว่า คานตัวอย่างทดสอบมีลักษณะการวิบัติ 2 รูปแบบ คือ (1) คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝังเท่ากับ 0.5 ม. พบว่า คานตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติขึ้นแบบทันทีทันใด (abrupt failure) โดยการแตกร้าวในแนวตั้งของคอนกรีตที่จุดต่อระหว่างคานและจุดรองรับที่ปลายคาน เนื่องจากการเลื่อน (slip) ของแผ่นเหล็ก (slip mode) ดังแสดงในรูปที่ 6(a) และ (2) คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝังเท่ากับ 1.0 และ 1.5 ม. พบว่า ช่วงแรก คานจะเกิดการรอยแตกร้าวของคอนกรีตทำมุมประมาณ 40-45 องศากับแนวระดับที่บริเวณจุดรองรับจนถึงช่วง $L/3$ ของคานตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 ด้านในรูปแบบเฉือนทแยง (diagonal shear failure) จากนั้น จึงเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งของคอนกรีตเนื่องจากการเลื่อน (slip) ของแผ่นเหล็ก เพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 6(b) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความยาวของระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กช่วยให้คานตัวอย่างทดสอบเปลี่ยนลักษณะการวิบัติจากแบบทันทีทันใด เป็นการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไป (progressive failure) มากขึ้น



(a) ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยระยะฝังเท่ากับ 0.5 ม.



(b) ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยระยะฝังเท่ากับ 1.0 และ 1.5 ม.

รูปที่ 6 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างทดสอบ

4. สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบผลของระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กพบว่า

4.1 เมื่อเปรียบเทียบคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝัง 1.0 และ 1.5 ม. กับคานตัวอย่างทดสอบที่มีระยะฝัง 0.5 ม. พบว่า คานตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมรับแรงกระทำแบบเชิงเส้น (linear) จนถึงจุดวิบัติและเกิดการวิบัติแบบทันทีทันใดเปลี่ยนเป็นมีพฤติกรรมรับแรงกระทำแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ในช่วงแรก มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจนถึงจุดที่แรงกระทำมีค่าประมาณ 85-90% ของแรงกระทำสูงสุด (P_{max}) ที่ทดสอบได้ โดยเริ่มเกิดรอยร้าวขนาดเล็กบริเวณปลายคานเนื่องจากแรงเฉือนให้ความแข็งแรงของคานลดลงอย่างมาก และเข้าสู่ช่วงที่สอง ที่เป็นพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) โดยแรงกระทำมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ขณะที่ระยะการแอ่นตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีรอยร้าวเนื่องจากแรงเฉือนปรากฏเพิ่มจำนวนมากขึ้นและขยายตัวมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความยาวของระยะฝังของเหล็ก

ข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ช่วยให้คานตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรม การรับแรงที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มากขึ้น เมื่อคานตัวอย่างทดสอบ รับแรงสูงสุด

4.2 คานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ ระยะฝังเท่ากับ 1.0 และ 1.5 ม. มีความสามารถรับแรงกระทำใช้ งานที่ค่าการแอ่นตัว $L/240$ มากกว่าคานตัวอย่างทดสอบที่มีเหล็ก ข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่นเหล็กที่ระยะฝังเท่ากับ 0.5 ม. และเพิ่มมากขึ้น ตามความยาวของระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยเท่ากับ 4.27 และ 12.23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถรับ แรงกระทำสูงสุด (P_{max}) พบว่า คานที่มีเหล็กข้ออ้อยเชื่อมกับแผ่น เหล็กที่ระยะฝังเท่ากับ 1.0 และ 1.5 ม. มีความสามารถในการรับ แรงกระทำสูงสุดเพิ่มขึ้นเพิ่มมากขึ้นตามความยาวของระยะฝังของ เหล็กข้ออ้อย เท่ากับ 36.84 และ 69.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่ง แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มระยะฝังเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็ก ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงสูงสุดของคานตัวอย่างทดสอบ ได้ค่อนข้างมาก แต่เพิ่มความสามารถในการรับแรงในช่วงใช้งานของ คานตัวอย่างทดสอบได้เล็กน้อย

4.3 การเพิ่มระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับแผ่นเหล็กของ คานตัวอย่างทดสอบจาก 0.5 ม. เป็น 1.0 ม. และ 1.5 ม. ช่วยเพิ่ม แรงยึดเหนี่ยวของแผ่นเหล็กและส่วนของคอนกรีตที่ปลายคาน (ที่ แทนคอนกรีตในหั่วเสา) ซึ่งทำให้เปลี่ยนลักษณะการวิบัติของคาน ตัวอย่างทดสอบจากการวิบัติแบบแตกร้าวในแนวตั้งของคอนกรีตที่ จุดต่อระหว่างคานและจุดรองรับปลายคานเนื่องจากการเลื่อนของ แผ่นเหล็ก (slip mode) เป็นการวิบัติแบบเฉือนทแยง (diagonal shear failure) ที่บริเวณจุดรองรับไปจนถึงที่ระยะประมาณ $L/3$ ของคานทั้งสองด้าน จากนั้น จึงเกิดรอยแตกร้าวในแนวตั้งของ คอนกรีตเนื่องจากการเลื่อนของแผ่นเหล็กเพียงเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็น ว่า การเพิ่มความยาวของระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่เชื่อมกับ แผ่นเหล็ก ช่วยให้คานตัวอย่างทดสอบเปลี่ยนลักษณะการวิบัติจาก แบบทันทีทันใดเป็นการวิบัติแบบค่อยเป็นค่อยไปมากขึ้น

5. การอ้างอิง

[1] 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. *The Seventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction*, August 27-29, Kochi, Japan.

- [2] 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, 177-190.
- [3] มงคล จิรวชิรเดช (2549). *การออกแบบคานกริดเสริมเหล็ก Reinforced Concrete Design Working Stress Design Strength Design Method Forth Edition*, สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี
- [4] จักขดา อารังวุฒิ (2548). *การตรวจสอบคานคอนกรีตเสริม เหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กวางน้ำฝังที่ส่วนรองรับภายใต้แรง กระทำเป็นจุดตามขวาง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี
- [5] จักขดา อารังวุฒิ และ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2548). คาน คอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีเหล็กวางน้ำฝังที่ส่วนรองรับ ภายใต้แรงกระทำเป็นจุดตามขวาง. *การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10*, พฤษภาคม 2-4, ชลบุรี, ประเทศไทย
- [6] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (2538). *มาตรฐานสำหรับการออกแบบอาคารคอนกรีตเสริม เหล็ก โดยวิธีกำลัง*, กรุงเทพฯ
- [7] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (20-2559) , *เหล็กเส้น เสริมคอนกรีต : เหล็กเส้นกลม*
- [8] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (24-2559) , *เหล็กเส้น เสริมคอนกรีต : เหล็กข้ออ้อย*
- [9] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (1479-2541) , *เหล็กกล้าทรงแบนรีดร้อน สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป*
- [10] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (409-2525), *วิธีทดสอบ ความต้านทานแรงอัดของแท่งคอนกรีต*