การศึกษาจุดเชื่อมต่อทางแนวดิ่งของผนังรับแรงคอนกรีตสำเร็จรูปที่ถูกใช้ในอาคารพักอาศัยภายใต้แรงถอน

The Study of the Vertical Connection of Precast Concrete Bearing Wall Used in Residential Buildings Under Pull-Out Load

สุรัตน์ เสมสวัสดิ์[1] ชูชัย สุจิวรกุล[2,*]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการถอน และประเมินสมรรถนะของจุดเชื่อมต่อทางแนวดิ่งของผนังรับแรงคอนกรีตสำเร็จรูป จุดเชื่อมต่อทางแนวดิ่งที่นิยมใช้ในปัจจุบันและได้ทำการศึกษามี 2 รูปแบบซึ่งประกอบด้วย จุดเชื่อมต่อโดยใช้เหล็กข้ออ้อย (Dowel connection) และจุดเชื่อมต่อโดยการเชื่อมเหล็กเส้นกับแผ่นเหล็ก (Plate connection) ผนังคอนกรีตที่ใช้ทดสอบมีขนาดหน้าตัด 1200mm x600mm ความหนา 100 mm ติดตั้งเหล็กตะแกรง 6mm@100mm ตรงกึ่งกลางความหนาผนัง และมีเหล็กเสริมพิเศษ 1-DB12 รัดรอบเพื่อป้องกันการแตกร้าว จุดเชื่อมต่อของผนังทั้ง 2 รูปแบบมีการเชื่อมต่อโดยใช้เหล็กเสริมขนาด DB12 สำหรับใช้ในการทดสอบการถอนของจุดเชื่อมต่อผนัง ผลที่ได้จากการทดสอบคือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนกับระยะการเคลื่อนตัวซึ่งวัดโดยอุปกรณ์ LVDT ที่ติดตั้งบนหัวของเหล็กเสริม ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ รูปแบบของจุดเชื่อมต่อ และระยะฝังต่าง ๆ ของเหล็กเสริมที่ใช้ในจุดเชื่อมต่อแต่ละแบบ จากผลการศึกษาพบว่าแรงถอนสูงสุดจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะฝังเพิ่มมากขึ้น โดยผลที่ได้รับจะช่วยให้ผู้ออกแบบเข้าพฤติกรรมการถอน รูปแบบการวิบัติจากการถอน และให้ทราบถึงระยะฝังที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบจุดเชื่อมต่อทางแนวดิ่งต่อไป

คำสำคัญ : จุดเชื่อมต่อทางแนวดิ่ง, ผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ, แรงถอน

Abstract

The purpose of this research was to study the pull-out behavior and to evaluate the performance of vertical connection of the precast concrete bearing wall. Two types of vertical connection of the wall commonly used in construction were investigated in this study, including dowel connection and plate connection. Precast wall concrete samples had 1200mm x 600mm in cross section and 100 mm in thickness. All samples were reinforced with steel wire mesh of 6mm@100 mm in the middle of the thickness and 12-mm deformed bar were added around the edge of the wall to prevent the edge crack. The 12mm deformed bar was used as a vertical connector between precast walls for these two types of connection, and it would be used to evaluate the pull-out behavior. The main results from this test was the relationship between pull-out load and the displacement measured by LVDT installed at the top of the connector bar. Investigated parameters were types of connection and embedded lengths of rebar in concrete used as a vertical connector. It was found that the maximum pull-out load increased as the embedded length of rebar was increased. Furthermore, the results would help designers to better understand pull-out behavior, failure mode of pull-out, and suitable embedded length of rebar for the design of vertical of connection in future.

Keywords: Vertical Connection, Precast concrete wall, Pull-out load

1. บทนำ

ในปัจจุบัน การก่อสร้างด้วยระบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปได้รับความนิยมมากขึ้น ดังนั้นระบบนี้จึงได้กลายเป็นตัวเลือกยอดนิยมของอาคารขนาดเล็กถึงอาคารขนาดใหญ่รวมถึงอาคารสูง การก่อสร้างระบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปมีข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบการก่อสร้างแบบหล่อในที่ ได้แก่ การหล่อชิ้นงานหล่อสำเร็จแบบซ้ำกันทำให้ประหยัดไม้แบบ การควบคุมคุณภาพการผลิตและวัตถุดิบในโรงงานก่อนนำส่งออกไปก่อสร้างจริง การก่อสร้างด้วยระบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปจะให้ความรวดเร็วในการก่อสร้างที่มากกว่า อย่างไรก็ตามปัญหาหลักการก่อสร้างระบบหล่อสำเร็จคือ การควบคุมคุณภาพในการก่อสร้างหรือการติดตั้งหน้างาน เนื่องจากคุณภาพของแรงงานที่มีความรู้ความเข้าใจในติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จรูปมีจำนวนน้อยและมีจำนวนไม่เพียงพอ ดังนั้นในอนาคตปัญหาเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างสำเร็จรูปไม่มาก

ก็น้อยเมื่อมีความต้องการใช้ชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปในการก่อสร้างมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า วิศวกรโยธายังขาดความรู้ความเข้าใจเชิงลึกในการออกแบบชิ้นส่วนสำเร็จรูป โดยเฉพาะจุดเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จรูป

ระบบผนังรับแรงสำเร็จรูป (precast bearing wall system) เป็นระบบของโครงสร้างชนิดหนึ่งที่เป็นที่นิยม เนื่องจากผนังคอนกรีตนอกจากจะใช้ประโยชน์จากการเป็นโครงสร้างอาคารเพื่อรับน้ำหนัก ยังใช้เป็นผนังทางสถาปัตยกรรมเพื่อกั้นส่วนต่างๆ ภายในอาคาร ชิ้นส่วนผนังรับน้ำหนักสำเร็จรูปจะถูกผลิตในโรงงานและนำไปประกอบหรือติดตั้งในพื้นที่การก่อสร้างจริง โดยชิ้นงานผนังแต่ละชิ้นจะมีจุดเชื่อมต่อระหว่างผนังในแนวดิ่งหลายรูปแบบ ทั้งนี้ขึ้นกับผู้ออกแบบและผู้ผลิตจะเลือกรูปแบบจุดเชื่อมต่อที่เหมาะสมที่นำไปใช้ในการก่อสร้างจริง

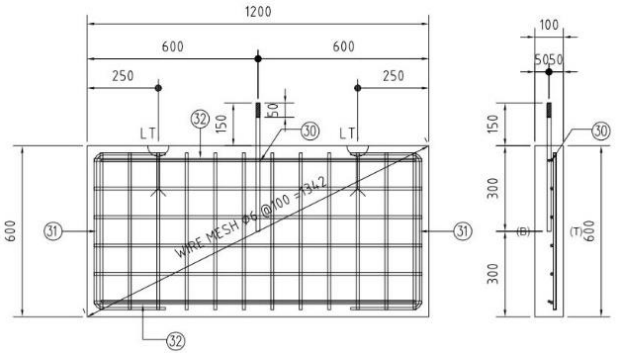
การออกแบบจุดเชื่อมต่อจะพิจารณาจากการทำให้โครงสร้างผนังสำเร็จรูปมีความต่อเนื่องในการรับแรงต่างๆ เพื่อให้สามารถรับน้ำหนักเสมือนกับโครงสร้างคอนกรีตหล่อในที่ โดยทั่วไปผู้ออกแบบจะทำการวิเคราะห์โครงสร้างสำเร็จรูปเสมือนเป็นโครงสร้างที่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยอาจไม่ได้คำนึงถึงความสามารถของจุดเชื่อมต่อในแนวดิ่งที่จะทำให้ผนังมีความสามารถในการรับแรงได้อย่างต่อเนื่อง สิ่งสำคัญของการออกแบบจุดเชื่อมต่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูปคือ จุดเชื่อมต่อระหว่างแผ่นคอนกรีตจะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการรับแรงทางแนวราบ (แรงลม หรือแผ่นดินไหว) แรงทางแนวดิ่ง (น้ำหนักตายตัว และน้ำหนักจร) แรงจากการทรุดตัวที่แตกต่างกัน และแรงจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตร นอกจากนี้จุดเชื่อมต่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูปจะต้องมีการยึดรั้งขั้นต่ำเพื่อให้เกิดความเป็นบูรณาภาพของโครงสร้าง (Structural Integrity) จุดเชื่อมต่อทางแนวดิ่งของผนังรับแรงคอนกรีตสำเร็จรูปจะทำหน้าที่ส่งถ่ายแรงทางแนวดิ่งซึ่งอาจจะเป็นแรงอัดและแรงดึง โดยแรงดึงที่เกิดขึ้นที่จุดเชื่อมต่อนี้จะถูกส่งถ่ายผ่านเหล็กเสริมที่ฝังในผนังคอนกรีต รูปแบบเฉพาะของจุดเชื่อมต่อทางแนวดิ่งที่ใช้ในมาตรฐานอเมริกา [1, 2] จะใช้การต่อเหล็กจากการทาบหรือการเชื่อม การต่อเหล็กจากอุปกรณ์เชื่อมต่อทางกล (Mechanical Splice หรือ Couple)) และการเชื่อมต่อโดยใช้ท่อสังกะสี ดังนั้นงานวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปยังประเภทของจุดเชื่อมต่อเหล่านี้ [3, 4] สำหรับในประเทศไทย จุดเชื่อมต่อที่นิยมใช้ในอาคารขนาดเล็ก (สูงไม่เกิน 3 ชั้น) ได้แก่ จุดเชื่อมต่อโดยใช้เหล็กข้ออ้อย (Dowel connection) และจุดเชื่อมต่อโดยการเชื่อมเหล็กเสริมกับแผ่นเหล็ก (Plate connection) โดยจุดต่อนี้ไม่ได้มีการแนะนำในมาตรฐานสากลอย่างชัดเจน จึงจำเป็นต้องมีการทดสอบเพื่อพิสูจน์สมรรถนะของจุดเชื่อมต่อดังกล่าวนี้ นอกจากนี้ ที่ผ่านมาผู้ออกแบบยังขาดความเข้าใจเชิงลึกที่เกี่ยวกับกำลังและพฤติกรรมของจุดเชื่อมต่อนี้ ด้วยเหตุนี้จึงนำไปสู่การศึกษาสมรรถนะจุดเชื่อมต่อทางแนวดิ่งโดยใช้เหล็กข้ออ้อย (Dowel connection) และจุดเชื่อมต่อโดยการเชื่อมเหล็กเสริมกับแผ่นเหล็ก (Plate connection) เพื่อให้เกิดความมั่นใจในการออกแบบให้โครงสร้างที่ใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปมีแข็งแรงและมีความเป็นบูรณาภาพของโครงสร้าง

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมและกำลังยึดเหนี่ยวภายใต้แรงถอนของจุดเชื่อมต่อระหว่างผนังกับผนังทางแนวดิ่ง 2 รูปแบบ Dowel connection Plate connection และเพื่อศึกษาระยะฝังที่เหมาะสมในความสามารถรับแรงถอนของจุดเชื่อมต่อระหว่างผนังกับผนังทางแนวดิ่งทั้ง 2 รูปแบบ

2. การดำเนินการวิจัย

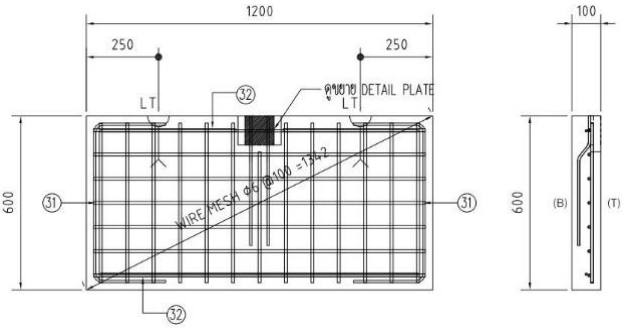
ทำการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงถอนของจุดเชื่อมต่อทางแนวดิ่งของชิ้นส่วนผนังสำเร็จรูปที่นิยมใช้ในปัจจุบัน จำนวน 2 รูปแบบ ดังนี้

2.1.1 Dowel connection (ดังรูปที่ 1 และ 3



รูปที่ 1 จุดเชื่อมต่อผนังสำเร็จรูปแบบ Dowel connection

2.1.2 Plate connection (ดังรูปที่ 2 และ 4)



รูปที่ 2 จุดเชื่อมต่อผนังสำเร็จรูปแบบ Plate connection

2.2.1 คอนกรีตผสมเสร็จ

คอนกรีตผสมเสร็จ เป็นการผสมปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีตที่ผสมเสร็จภายในโรงงานผลิต คอนกรีตที่ใช้มีกำลังอัดเท่ากับ 300 กก/ตร.ซม.

2.2.2 เหล็กเสริมประเภท wire mesh

เหล็กเสริม wire mesh คือเหล็กตะแกรงกล้าเชื่อมติดกันเป็นตะแกรงทำการติดตั้งที่กึ่งกลางผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ ผลิตจากเหล็กรีดเย็น

(Cold-draw steel wire) เส้นลวดที่ใช้มีขนาด 6@150 mm ตามมาตรฐาน ม.อ.ก.747-2549 [4] หรือ ASTM A185-79

2.2.3 เหล็กเสริมข้ออ้อย (Deformed bar)

เหล็กข้ออ้อยเป็นเหล็กเสริมที่มีการขึ้นรอยนูนเป็นปั้งพันวนรอบตลอดเส้นเหล็กเพื่อเป็นการเพิ่มการยึดเหนี่ยวกับคอนกรีต เหล็กชนิดนี้ถูกใช้ในจุดเชื่อมต่อระหว่างผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ โดยมีขนาด DB12 และมีชั้นคุณภาพ SD40 ตามมาตรฐาน ม.อ.ก. 24-2548 [5]

2.3.1 ตัวอย่างผนังคอนกรีตสำเร็จรูปที่ใช้ในการทดสอบ

ผนังคอนกรีตมีขนาดหน้าตัดเท่ากับ 60X120 ซม. และความหนาเท่ากับ 10 ซม. ทำการเสริมเหล็ก wire mesh 6@150 mm ที่กึ่งกลางของผนัง และเหล็กเสริม DB12 รัดรอบผนัง โดยมีรูปแบบจุดเชื่อมต่อที่กลางความหนาของผนังทั้ง 2 รูปแบบ โดยรายละเอียดของตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ 1

ระยะฝังของรูปแบบจุดเชื่อมต่อแบบ Dowel connection มีระยะฝังของเหล็กข้ออ้อยที่ฝังในผนังคอนกรีตแตกต่างกัน 5 ระดับ ได้แก่ 5, 10, 15, 20 และ 30 ซม. ส่วนระยะฝังของรูปแบบจุดเชื่อมต่อแบบ Plate connection มีระยะฝังของเหล็กหนวดกุ้ง 2 เส้นที่เชื่อมติดกับแผ่นเหล็กที่ฝังในผนังคอนกรีตแตกต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ 5, 10, 20 และ 30 ซม.

ตารางที่ 1 รายละเอียดผนังหล่อสำเร็จในงานวิจัยนี้

ชื่อชิ้นงาน	ระยะฝังของเหล็กในคอนกรีต (ซม.)	รายละเอียดการฝังเหล็ก
จุดเชื่อมต่อแบบ Dowel Connection (ดูรูปที่ 1 และ 3)		
DW-5	5 ซม	1-DB12 ฝังกลางความหนาผนัง
DW-10	10 ซม	1-DB12 ฝังกลางความหนาผนัง
DW-15	15 ซม	1-DB12 ฝังกลางความหนาผนัง
DW-20	20 ซม	1-DB12 ฝังกลางความหนาผนัง
DW-30	30 ซม	1-DB12 ฝังกลางความหนาผนัง
จุดเชื่อมต่อแบบ Plate Connection (ดูรูปที่ 2 และ 4)		
PW-15	15 ซม	เพลทเชื่อมกับ 2-DB12 บล็อกโฟม 5 ซม. ฝังในผนัง
PW-20	20 ซม	เพลทเชื่อมกับ 2-DB12 บล็อกโฟม 5 ซม. ฝังในผนัง
PW-30	30 ซม	เพลทเชื่อมกับ 2-DB12 บล็อกโฟม 5 ซม. ฝังในผนัง
PW-40	40 ซม	เพลทเชื่อมกับ 2-DB12 บล็อกโฟม 5 ซม. ฝังในผนัง

2.3.2 การเตรียมตัวอย่างผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จที่ใช้ในการทดสอบ

1.ทำการประกอบแบบเหล็กสำหรับผนังสำเร็จรูปหนา 10 ซม

2.ทำการวางเหล็กเสริม wire mesh 6@150 mm ที่กึ่งกลางของผนังและเสริมเหล็ก DB12 รัดรอบผนัง จากนั้นทำการวางจุดเชื่อมต่อรูปแบบต่าง ๆ ที่จะทำการศึกษาทั้ง 2 แบบ

3.เทคอนกรีตลงในแบบเหล็กที่มีการวางเหล็กเสริมและอุปกรณ์จุดเชื่อมต่อไว้แล้ว

4.เทคอนกรีตที่ใช้ลงในแบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ เพื่อเป็นตัวอย่างในการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีต

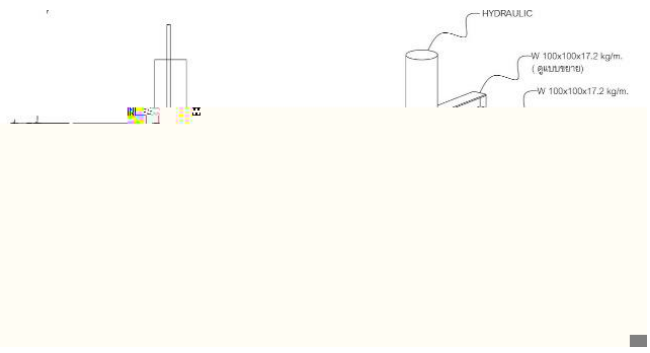
5.ทำการถอดแบบและยกผนังหล่อสำเร็จเมื่อคอนกรีตมีอายุอย่างน้อย 12 ชม. และนำไปเก็บชิ้นงานตามสภาพการผลิตจริง



รูปที่ 3 ตัวอย่างจุดเชื่อมต่อแบบ Dowel Connection โดยฝังเหล็ก 1-DB12



รูปที่ 4 ตัวอย่างจุดเชื่อมต่อแบบ Plate Connection โดยฝังแผ่นเหล็กเชื่อมกับเหล็กหนวดกุ้ง 2-DB12



รูปที่ 5 ชุดทดสอบการการถอนของจุดเชื่อมต่อทางแนวดิ่งของผนังคอนกรีตสำเร็จรูป

2.4.1 นำโครงเหล็กที่ใช้ในการทดสอบ (Testing frame) มาวางค่อมชิ้นงานผนังหล่อสำเร็จให้ตรงกับตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 5

2.4.2 ติดตั้งโหลดเซลล์ (Load cell) บนโครงเหล็กทดสอบบริเวณกึ่งกลางผนัง และ ติดตั้งกระบอกไฮดรอลิกบนโหลดเซลล์ พร้อมกับติดตั้งไฮดรอลิกแบบมือโยก ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 โหลดเซลล์ ขนาด 20 tons พร้อมชุดไฮดรอลิก

2.4.3 ติดตั้งจุดเชื่อมต่อเหล็ก (Steel connection) เพื่อใช้สำหรับส่งถ่ายแรงระหว่างกระบอกไฮดรอลิกกับเหล็กเสริม DB12 ที่ฝังในผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ พร้อมกับติดตั้งอุปกรณ์ LVDT บนผิวด้านบนของเหล็กเสริม DB12 ที่ฝังในผนังคอนกรีตสำเร็จรูป เพื่อวัดการเคลื่อนตัวของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 7

2.4.4 บันทึกค่าการทดสอบ เมื่อทำการทดสอบโดยให้แรงโดยกดปั๊มไฮดรอลิกแบบมือโยก ค่อยๆ เพิ่มแรงถอนไปที่จุดเชื่อมต่อของผนังหล่อสำเร็จอย่างช้าๆ

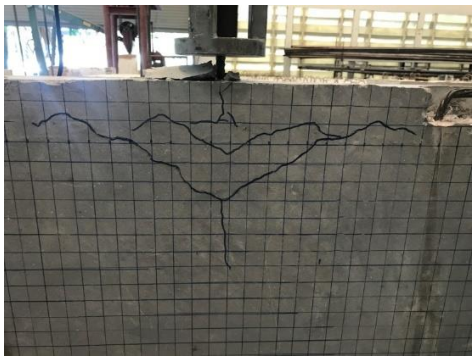


รูปที่ 7 ติดตั้ง LVDT บนหัวเหล็ก DB12

2.4.5

8 9

2.4.6



รูปที่ 8 บันทึกรอยร้าวที่เกิดขึ้นโดยใช้ปากกา



รูปที่ 9 ภาพการวิบัติของชิ้นตัวอย่าง

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

การทดสอบการถอน (pull-out test) ของจุดเชื่อมต่อผนังคอนกรีตสำเร็จรูปเป็นการจำลองสภาพการยึดรั้งทางแรงดึง (Tension tie) ที่เกิดขึ้นที่จุดเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จ 2 ชิ้นมาต่อกันในแนวดิ่ง ซึ่งจากการทดสอบได้พบว่าผนังคอนกรีตหล่อสำเร็จที่มีระยะฝังแตกต่างกันจะให้พฤติกรรมการถอนที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ แยกเป็น 2 ส่วน คือ ผลการทดสอบของการถอนของจุดเชื่อมต่อผนังคอนกรีตสำเร็จรูปแบบ Dowel Connection และแบบ Plate Connection

การทดสอบการถอนของจุดเชื่อมต่อแบบ Dowel Connection

พฤติกรรมของการถอนที่ได้จากการทดสอบการถอนของจุดเชื่อมต่อแบบ Dowel Connection ที่ระยะฝังในคอนกรีตแตกต่างกัน ได้แสดงในรูปที่ 10 นอกจากนี้ ตารางที่ 2 ได้ให้รายละเอียดที่สำคัญ ได้แก่ ค่าแรงถอนสูงสุด และการเคลื่อนตัวของเหล็กเสริมที่แรงถอนสูงสุด และลักษณะการวิบัติเมื่อเกิดแรงถอนสูงสุด

3.1.1 ผลการทดสอบ Dowel connection ที่ระยะฝัง 5–15 cm

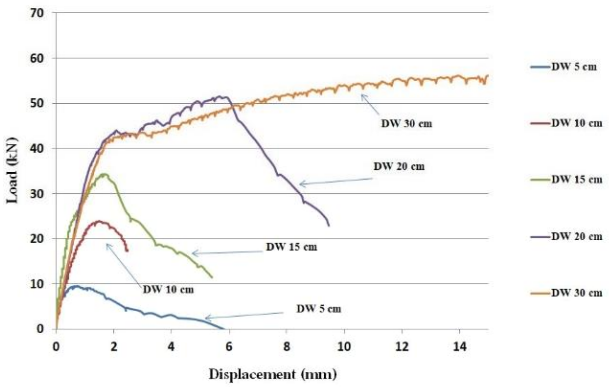
จากตารางที่ 2 และรูปที่ 10 พบว่า ในช่วงแรกมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนกับระยะการเคลื่อนที่ของจุดเชื่อมต่อเป็นเชิงเส้น (Linear Elastic) เมื่อเพิ่มแรงถอนมากขึ้นจนถึงแรงถอนสูงสุดจะเกิดการวิบัติแบบ Concrete

Breakout (รูปที่ 11) แรงถอนสูงสุดหรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตสูงสุดมีค่าเท่ากับ 9.57, 23.88, 33.46 kN ที่ระยะฝัง 5, 10, 15 cm ตามลำดับ

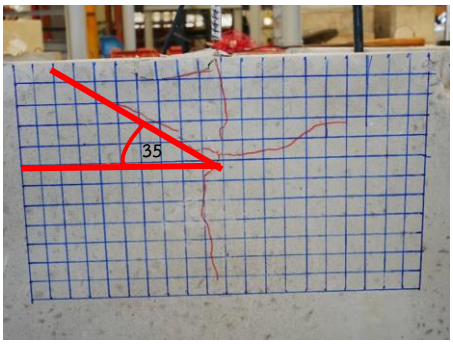
หากพิจารณาลักษณะการแตกของคอนกรีตที่ระยะฝังไม่มาก (5 cm – 15 cm) พบว่ารอยแตกอยู่ที่ระดับความลึกสูงสุดใกล้เคียงกับระยะฝังเหล็กเสริม คือประมาณร้อยละ 90 ของระยะฝังเหล็กเสริมในผนังคอนกรีต และรอยแตกทำมุมประมาณ 35 องศา ซึ่งระนาบรอยแตกที่พบมีลักษณะสอดคล้องกับที่รายงานในมาตรฐาน ACI318 [1] ในเรื่องการวิบัติแบบ Concrete Breakout จากการถอนของพุกในคอนกรีต

ตารางที่ 2 รายละเอียดผลการทดสอบ Dowel connection

ชื่อตัวอย่าง	ระยะฝัง (cm)	แรงถอนสูงสุด (kN)	การเคลื่อนตัวที่แรงถอนสูงสุด (mm)	รูปแบบการวิบัติ
DW-5	5	9.57	0.72	Concrete Breakout Failure
DW-10	10	23.88	1.49	Concrete Breakout Failure
DW-15	15	33.46	1.64	Concrete Breakout Failure
DW-20	20	51.51	5.66	Bond Failure
DW-30	30	57.85	12.7	Steel Failure



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนกับระยะการเคลื่อนตัวของจุดเชื่อมต่อแบบ Dowel connection ของทุกระยะฝัง

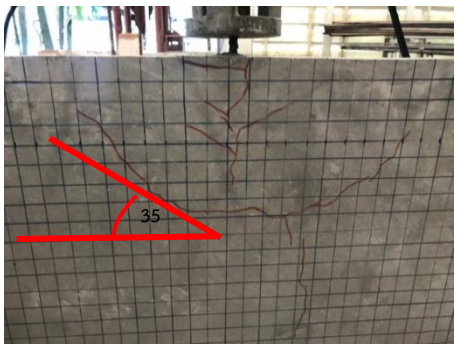


รูปที่ 11 การวิบัติของ Dowel connection ฝัง 5–15cm

3.1.2 ผลการทดสอบ Dowel connection ที่ระยะฝัง 20 cm

จากตารางที่ 2 และรูปที่ 12 พบว่าในช่วงแรกมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนกับระยะการเคลื่อนที่ของจุดเชื่อมต่อเป็นเชิงเส้น และเมื่อเพิ่มแรงถอนมากขึ้นจนถึงแรงถอนสูงสุดจะเกิดการวิบัติแบบ Bond Failure (รูปที่ 12) โดยเหล็กเสริมจะถูกถอนออกมา แรงถอนสูงสุดหรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับคอนกรีตสามารถรับได้มีค่าเท่ากับ 51.51 kN

ที่ระยะฝัง 20 cm จะมีแรงต้านทานแรงถอนมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมกับคอนกรีตมากขึ้นตาม แต่ยังไม่เพียงพอที่จะยึดรั้งเหล็กกับคอนกรีตไว้ได้ จะทำให้เกิดลักษณะการวิบัติของจุดเชื่อมต่อเกิดขึ้นเป็นแบบเหล็กรูดออกจากคอนกรีต ซึ่งเป็นการวิบัติแบบ “Bond Failure” ค่าแรงยึดเกาะระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมสามารถหาได้จากเอกสารอ้างอิง [7], [8]



รูปที่ 12 การวิบัติของ Dowel connection ฝัง 20 cm

3.1.3 ผลการทดสอบ Dowel connection ที่ระยะฝัง 30 cm

ตารางที่ 2 และรูปที่ 13 พบว่า ในช่วงแรกมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนกับระยะการเคลื่อนที่ของจุดเชื่อมต่อเป็นเชิงเส้น และเมื่อเพิ่มแรงถอนมากขึ้นจนถึงค่าสูงสุดจะสังเกตุการวิบัติของจุดเชื่อมต่อแบบการขาดที่เหล็กเสริม “ Steel Failure in Tension” ดังแสดงในรูปที่ 13 ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับคอนกรีตที่ได้รับเท่ากับ 57.85 kN

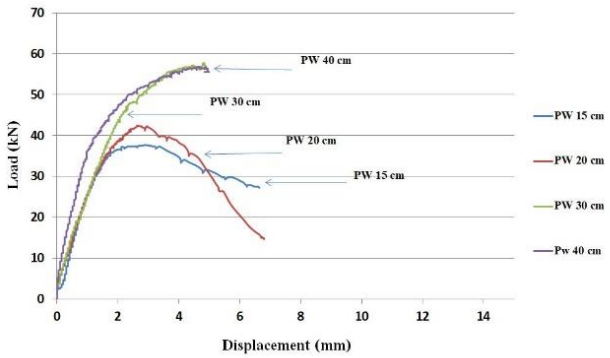


รูปที่ 13 การวิบัติของ Dowel connection ระยะฝัง 30 cm

ตารางที่ 3 รายละเอียดผลการทดสอบ Plate connection

ชื่อตัวอย่าง	ระยะฝัง (cm)	แรงถอนสูงสุด (kN)	การเคลื่อนตัวที่แรงถอนสูงสุด (mm)	รูปแบบการวิบัติ
PW-15	15	37.69	2.88	Concrete Breakout Failure
PW-20	20	42.43	2.62	Concrete Breakout Failure
PW-30	30	56.85	4.8	Steel failure
PW-40	40	56.85	4.6	Steel failure

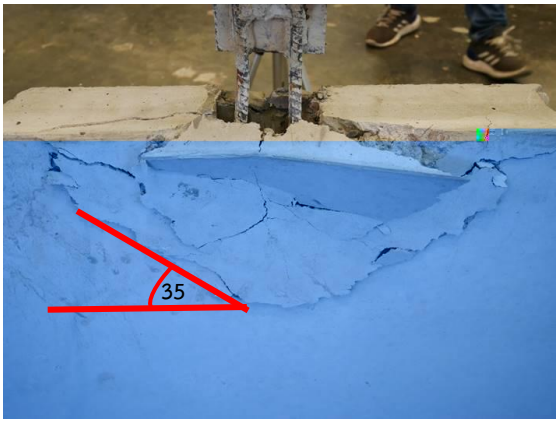
รายละเอียดผลที่ได้จากการทดสอบการถอนของจุดเชื่อมต่อแบบ Plate connection ที่ระยะฝังในคอนกรีตแตกต่างกัน ได้แสดงในรูปที่ 14 โดยแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของการถอน นอกจากนี้ ตารางที่ 3 ได้ทำการสรุปค่าแรงถอนสูงสุด และการเคลื่อนตัวของเหล็กเสริมสำหรับใช้เป็นจุดเชื่อมต่อที่ค่าแรงถอนสูงสุด และลักษณะการวิบัติเมื่อเกิดแรงถอนสูงสุดของจุดเชื่อมต่อ



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนกับระยะการเคลื่อนตัวของจุดเชื่อมต่อ ในทุกระยะฝัง

3.2.1 ผลการทดสอบ Plate connection ที่ระยะฝัง 15–20 cm

จากตารางที่ 3 และรูปที่ 14 พบว่า ในช่วงแรกมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนกับกับระยะการเคลื่อนที่ของจุดเชื่อมต่อเป็นเชิงเส้น เนื่องจากแรงถอนที่จุดเชื่อมต่อมีค่าแรงไม่เกินแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับคอนกรีต เมื่อเพิ่มแรงถอนมากขึ้นจะเกิดการวิบัติเป็นแบบ “Concrete Breakout” ดังแสดงในรูปที่ 15 โดยค่าแรงถอนสูงสุดที่ได้รับเท่ากับ 37.69 และ 42.43 kN ที่ระยะฝัง 15 และ 20 cm ตามลำดับ ลักษณะการวิบัติของคอนกรีตจะเกิดรอยแตกคอนกรีตที่ระดับความลึกสูงสุดใกล้เคียงกับระยะฝังเหล็กเสริม (ประมาณร้อยละ 90 ของระยะฝัง) โดยทำมุมกับระนาบประมาณ 35 องศา ถึงที่ผิวผนังด้านบน ซึ่งลักษณะรอยแตกคล้ายกับที่พบในจุดเชื่อมต่อแบบ Dowel Connection แต่ขนาดความกว้างรอยแตกที่ปลายล่างสุดมีขนาดกว้างกว่า โดยมีความกว้างเท่ากับระยะห่างของเหล็กหนวดกุ้งทั้งสองที่ฝังในคอนกรีต



รูปที่ 15 การวิบัติของ Plate connection ระยะฝัง 15–20 cm

3.2.2 ผลการทดสอบ Plate connection ที่ระยะฝัง 30–40 cm

จากตารางที่ 3 รูปที่ 14 พบว่าในช่วงแรกมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงถอนกับระยะการเคลื่อนที่ของจุดเชื่อมต่อเป็นเชิงเส้น เมื่อเพิ่มแรงถอนมากขึ้นพฤติกรรมการถอนจะเป็นแบบไร้เชิงเส้นจนกระทั่งเหล็กเสริมเกิดการขาด ซึ่งเป็นการวิบัติแบบ “ Steel Failure in Tension” ค่าแรงถอนสูงสุดได้รับเท่ากับ 56.85 และ 56.85 kN ที่ระยะฝัง 30 และ 40 cm ตามลำดับ ถ้าหากพิจารณาที่ระยะฝังที่ 30–40cm นี้ จะเห็นว่าจุดเชื่อมต่อจะมีระยะฝังมากเพียงพอต่อการต้านทานแรงถอน แต่พฤติกรรมการยืดตัวของเหล็กเสริมค่อนข้างสั้น โดยไม่สังเกตเห็นเหมือนที่ได้รับในจุดเชื่อมต่อแบบ Dowel Connection ซึ่งเห็นว่าเหล็กยืดออกอย่างมาก (Ductile) เนื่องจากเหล็กเสริมเหล็กได้ผ่านความร้อนสูงจากการเชื่อมและเย็นตัวอย่างรวดเร็ว จึงเกิดความเปราะ

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองภายใต้แรงถอนบริเวณจุดเชื่อมต่อในแนวดิ่งของผนังคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีระยะฝังของ

เหล็กเสริมที่ใช้เชื่อมต่อแตกต่างกัน จากผลการทดสอบสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

-

-

-

ACI318 1

5 kN

-

Concrete Breakout Failure

Bond Failure Dowel connection 15

Plate connection 15 20

-

Dowel connection

30

5 kN

- Plate connection

5. ข้อเสนอแนะ

-

เอกสารอ้างอิง

[1] ACI Committee 318, 2019, **Building Code Requirement for Structural Concrete** (ACI318-19), Detroit, MI

[2] Precast/ Prestressed Concrete Institute, 2010, **PCI Design Handbook 7th Edition**, Chicago, IL

3 Einea, A , Yehia, S , & Tadros, M K , 1999, Lap splices in confined concrete, **ACI Structural Journal**, 96 6 , 947–955

4 Steuck, K P , Eberhard, M O , & Stanton, J F , 2009, Anchorage of large diameter reinforcing bars in ducts, **ACI Structural Journal**, 106 4 , 506–513

[5] มาตรฐานอุตสาหกรรม, **ตะแกรงเหล็กกล้าเชื่อมติดคอนกรีต มอก. 747-2549,** [Online], http://research.rid.go.th/vijais/moa/fulltext/TIS737-2549.pdf [2018, June 9]

[6] มาตรฐานอุตสาหกรรม, **เหล็กเส้นเสริมคอนกรีตเหล็กข้ออ้อย มอก. 24-2548,** [Online], http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2559/E/119/12.PDF [2018, August 16]

[7] คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, 2555, **มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง**, สำนักพิมพ์ โกลบอล กราฟฟิค จำกัด, กรุงเทพมหานคร.

[8] Wight, James K. and Macgregor. James G., 2011, **Reinforced Concrete Mechanics and Design 6th**, Pearson Education, pp.367-426.