การทดสอบรอยต่อชิ้นส่วนคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่ออกแบบเพื่อป้องกันการวิบัติแบบเฉือน
วิชา โครงงานทางวิศวกรรมโยธา
Testing of precast reinforced concrete beam joints designed to prevent shear failure.

ณัฐภัทร บุญยัง[1] ณัฐวุฒิ ทรัพย์วัฒนไพศาล[2] และ รศ.ดร. วิทิต ปานสุข[3]

[1,2,3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

สำหรับโครงงาน “การทดสอบรอยต่อชิ้นส่วนคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่ออกแบบเพื่อป้องกันการวิบัติแบบเฉือน” นี้จัดทำขึ้นโดยอาศัยความรู้ในการออกแบบโครงสร้างเหล็กและการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมาผสมผสานกันเพื่อวิเคราะห์การรับแรงของรอยต่อ รวมถึงการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของคานคอนกรีตสำเร็จรูป แล้วนำไปออกแบบให้สามารถรับแรงได้ จากนั้นจึงทำการทดสอบชิ้นส่วนรอยต่อคาน-เสาคอนกรีตสำเร็จรูปที่ออกแบบว่าสามารถใช้งานได้จริง โดยมีการทดลองคานอยู่ 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างที่ 1 คือ การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมของคานว่ามีรูปแบบการวิบัติเป็นอย่างไร ผลการทดสอบคือ มีลักษณะการวิบัติแบบแรงเฉือน (จุดรองรับแบบบากปลายคานแตกร้าวแบบเฉือน) ตัวอย่างที่ 2 คือ การทดสอบต่อเนื่องเพื่อป้องกันการวิบัติแบบเฉือนโดยการเสริมเหล็กแนวเฉียงบริเวณหน้าตัดวิกฤต ผลการทดสอบคือ ไม่เกิดลักษณะการวิบัติแบบเฉือนแต่มีลักษณะการวิบัติแบบโมเมนต์ดัด ซึ่งเป็นไปตามจุดประสงค์ที่ต้องการ ตัวอย่างที่ 3 คือ การออกแบบรอยต่อด้วยชิ้นส่วนเหล็กเพื่อให้การประกอบชิ้นส่วนสำเร็จรูปดำเนินการได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้หลักการเสริมเหล็กจากพฤติกรรมการรับแรงของคานในตัวอย่างที่ 2 มาประกอบ และจากการทดสอบตัวอย่างที่ 3 พบว่าสามารถต้านทานแรงเฉือนได้มากกว่าแรงเฉือนที่ใช้ในการออกแบบ ดังนั้นจึงผ่านตามวัตถุประสงค์ คือ 1. การศึกษาพฤติกรรมของคานสำเร็จรูป และเสริมเหล็กเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติจากแรงเฉือนที่บริเวณหน้าตัดวิกฤตของคานและ 2. เพื่อทดสอบรอยต่อระหว่างคานและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีการฝังเหล็กกล่องที่หน้าเสาและฝังสลักเกลียวในคานเพื่อยึดกับเหล็กกล่อง

คำสำคัญ: คอนกรีตสำเร็จรูป, การวิบัติแบบเฉือน, รอยต่อคานคอนกรีตสำเร็จรูป

Abstract

For the project "Testing of precast reinforced concrete beam joints designed to prevent shear failure" it was developed utilizing knowledge in structural steel design and reinforced concrete structure design, integrating them to analyze joint load-bearing capacities, including studying the load-bearing behavior of precast concrete beams, and then designing them to withstand forces. Subsequently, tests were conducted on the precast beam-column joint components to verify their practical applicability. Three sample tests were performed. The first sample test aimed to study the behavior of the beam to understand the mode of failure. The test results indicated shear failure characteristics (point of support failure at the beam end, shear failure). The second sample test aimed to prevent shear failure by reinforcing inclined steel bars in the critical section. The test results showed no shear failure, meeting the intended objective. Instead, moment-induced failure characteristics were observed. The third sample test involved designing joints with steel components to expedite assembly using principles derived from the load-bearing behavior observed in the second sample test. The test results showed higher shear resistance compared to the design shear resistance, thus fulfilling the objectives: Studying the behavior of precast beams and reinforcing steel to prevent shear failure at critical sections and Testing joints between beams and precast reinforced concrete columns with embedded box steel at column faces and threaded inserts in the beams for steel connection.

Keywords: Precast concrete, Shear failure, Precast reinforced concrete beam joints

1. บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในอดีตการสร้างบ้านจะต้องหล่อคอนกรีตในที่เท่านั้นเนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องของเทคโนโลยีและองค์ความรู้ แต่ในปัจจุบันการสร้างบ้านส่วนมากมักจะเป็นระบบคอนกรีตสำเร็จรูป ถึงแม้ว่าจะมีต้นทุนการผลิตในแต่ละชิ้นส่วนสูงกว่าแบบหล่อในที่ แต่ก็ประหยัดค่าแรงงานและค่าไม้แบบได้ โดยรวมแล้วการสร้างบ้านด้วยระบบคอนกรีตสำเร็จรูป จะทำให้โครงการก่อสร้างมีต้นทุนที่ต่ำกว่าแบบหล่อในที่ นอกจากนั้นชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป ก็มีกรรมวิธีการผลิตที่สามารถควบคุมให้มีความสม่ำเสมอได้ทั้งปริมาณและลักษณะทางกายภาพ หากมีการผลิตรูปแบบเดิมซ้ำกันมาก ๆ ก็จะยิ่งทำให้ต้นทุนลดน้อยลง และเนื่องจากระบบคอนกรีตสำเร็จรูป สามารถเพิ่มปริมาณการก่อสร้างได้เป็นจำนวนมาก ทำให้ประหยัดเวลา แต่การก่อสร้างด้วยระบบคอนกรีตสำเร็จรูป นั้นจำเป็นที่จะต้องใช้เงินลงทุนที่สูงมากในระยะแรก ต้องมีบุคลากรที่มีความรู้ความชำนาญในการควบคุมการก่อสร้างด้วยระบบคอนกรีตสำเร็จรูป

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาพฤติกรรมของคานสำเร็จรูป และเสริมเหล็กเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติจากแรงเฉือนที่บริเวณหน้าตัดวิกฤตของคาน รวมถึง การทดสอบรอยต่อระหว่างคานและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีการฝังเหล็กกล่องที่หน้าเสาและฝังสลักเกลียวในคานเพื่อยึดกับเหล็กกล่อง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

จากวัตถุประสงค์หลักในศึกษาพฤติกรรมของรอยต่อคานสำเร็จรูปที่มีการบาก จึงกำหนดขอบเขตของการศึกษาไว้ดังนี้ ศึกษาเฉพาะพฤติกรรมรอยต่อแบบแห้ง (Dry joint) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปเท่านั้น ออกแบบตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง และศึกษาเฉพาะคานและรอยต่อคานและเสาคอนกรีตสำเร็จรูปของอาคารขนาดเล็กตามกฎกระทรวงฉบับที่ 47

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อให้ได้ชิ้นส่วนรอยต่อที่มีประสิทธิภาพ มีความแข็งแรงที่ทนต่อแรงเฉือนได้ และชิ้นส่วนมีความสามารถในการถ่ายแรงจากคานลงสู่เสา (ไม่เกิด failure ที่ joint)

2. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูป

ระบบโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูปแบบต่าง ๆ ในปัจจุบันได้มีการจดทะเบียนลิขสิทธิ์ไว้ในประเทศต่าง ๆ มากมายหลายระบบ ส่วนใหญ่เป็นระบบ ที่พัฒนาขึ้นในประเทศยุโรปทางตะวันออก ระบบเหล่านี้สามารถแบ่งได้หลายลักษณะ (ไตรรัตน์ จารุทัศน์, 2542) เช่น แบ่งตามชนิดของโครงสร้าง แบ่งตามชนิดของวัสดุที่เลือกใช้ แบ่งตามรูปแบบของชิ้นส่วนที่ประกอบกันแบ่งตามลักษณะการก่อสร้าง

ระบบเสาและคาน (Skeleton Frame or Column and Beam) ระบบนี้คือระบบโครงสร้างที่รู้จักและใช้กันอย่างแพร่หลายจนเกือบจะเป็นระบบเดียวที่ใช้กันในประเทศไทย ระบบเสาและคานนิยมใช้สำหรับอาคารที่ไม่สามารถใช้ระบบผนังรับน้ำหนักได้ เนื่องจากความจำเป็นทางด้านการใช้สอยที่ต้องการเปิดเนื้อที่ให้ผ่านถึงกันได้ตลอด เช่นอาคารโรงงาน สำนักงาน โรงเรียน เป็นต้น

หลักการโครงสร้างแบบเสาและคานก็คือ การรับน้ำหนักจากพื้นลงสู่คาน จากคานลงสู่เสา โดยโครงสร้างระบบนี้จะแตกต่างจากโครงสร้างแบบหล่อคอนกรีตในที่ ในกรณีที่เสาและคานเป็นแบบหล่อสำเร็จรูปแล้วนำมาประกอบกัน ยังมีความแตกต่างจากระบบหล่อในที่อีกประการหนึ่ง คือ โครงสร้างระบบเสาและคานสำเร็จรูปมักจะมีแนวคานสำเร็จอยู่เพียงแนวใดแนวหนึ่งเท่านั้นไม่มีคานที่วิ่งเข้าสู่เสาทั้งสี่ด้านเหมือนกับการหล่อในที่ เพราะจะทำให้เกิดความยุ่งยากในการผลิตและการติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จเป็นอย่างมาก ดังนั้นในระบบสำเร็จรูปจึงมีคานเฉพาะในแนวที่รับน้ำหนักจากแผ่นพื้นเท่านั้น ส่วนในอีกแนวหนึ่งซึ่งไม่มีคานยึดนั้นจะถูกยึดโดยแผ่นพื้นหรือผนัง

โครงสร้างระบบเสาและคาน ข้อดีของระบบนี้ คือ ขนาดของชิ้นส่วนต่าง ๆ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ทำให้ขนย้ายสะดวก อาจใช้อุปกรณ์ยกที่มีขนาดเล็กทำให้การขนส่งมีความสะดวกมากขึ้น ข้อเสียของระบบนี้อยู่ตรงที่จำนวนรอยต่อของชิ้นส่วนมีเพิ่มมากขึ้น ทำให้เสียเวลาสำหรับงานติดตั้งเพิ่มขึ้น จะต้องออกแบบรอยต่อขึ้นเป็นพิเศษที่จะให้โครงสร้างที่ต่อกันแล้วเกิดความต่อเนื่องและความแข็งแกร่งและรอยต่อนั้นจะต้องสามารถทำงานได้ง่ายและรวดเร็ว การกำหนดจุดที่มีการต่อกันให้น้อยลง ออกแบบชิ้นส่วนบางชิ้นให้ต่อเนื่องกันเป็นชิ้นเดียวจากโรงงานเลือกกำหนดตำแหน่งจุดต่อที่จะทำงานได้สะดวก เป็นต้น

2.1.1 ขั้นตอนการก่อสร้างอาคารระบบชิ้นส่วนสำเร็จรูป

ลักษณะโดยทั่วไปของการก่อสร้างอาคารระบบสำเร็จรูปนั้น จะมีขั้นตอนหลักๆ อยู่ 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก คือ ทำการผลิตชิ้นส่วนสำเร็จรูปตามที่แบบกำหนด ซึ่งในขั้นตอนนี้จะประกอบด้วยส่วนงานสำคัญสามส่วน คือ งานจัดทำโรงงานหรือลานหล่อ การทำแบบหล่อ และงานผลิตชิ้นส่วนสำเร็จรูป ขั้นตอนที่สอง คือ การขนส่งชิ้นส่วนสำเร็จรูปจากโรงงานผลิตไปยังสถานที่ก่อสร้างด้วยรถบรรทุกธรรมดาหรือรถบรรทุกที่ออกแบบมาเฉพาะขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะชิ้นส่วนสำเร็จรูป ขั้นตอนที่สาม คือ ดำเนินการประกอบชิ้นส่วนสำเร็จรูปให้เป็นโครงสร้างอาคาร ในขั้นตอนนี้จะประกอบด้วยงานสำคัญสองส่วน คือ การยกชิ้นส่วนสำเร็จรูปและลักษณะอาคาร การประกอบจุดรอยต่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูป จะมีการใช้อุปกรณ์ค้ำยัน เพื่อให้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปอยู่ที่ตำแหน่งในลักษณะของการใช้งานเอาไว้ชั่วคราวและทำการประกอบจุดรอยต่ออย่างถาวร ซึ่งมีทั้งแบบใช้การเชื่อม แบบการเกราท์ และแบบใช้เหล็กโคเวล ฯลฯ หลังจากนั้นก็จะเป็นการเก็บความเรียบร้อยของส่วนโครงสร้าง เช่น การแต่งผิวรอยต่อของชิ้นส่วนแต่ละชิ้น เป็นต้น เพื่อจะได้เริ่มงานก่อสร้างส่วนอื่นๆ ต่อไป

2.1.2 ข้อดีและข้อจำกัดของการก่อสร้างที่ใช้ระบบชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป

การนำเอาระบบการก่อสร้างโดยใช้ชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปมาช่วยในงานนั้นจะมีประโยชน์อย่างมากในโครงการที่มีปริมาณการผลิตจำนวนมาก หรือมีลักษณะซ้ำๆ กัน เช่น โครงการบ้านจัดสรร เป็นต้น ด้วยข้อดีในเรื่องของการลดเวลาและต้นทุน รวมถึงการควบคุมคุณภาพของงานในโครงการเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ระบบหล่อในที่ ส่วนข้อจำกัด เช่น เรื่องการลงทุนเริ่มแรกในการผลิต แรงงานจะต้องมีความชำนาญ และการดัดแปลงอาคารหลังการก่อสร้างทำได้ยาก เป็นต้น โดยแต่ละขั้นตอนในการทำงานตั้งแต่การผลิต การขนส่ง และการติดตั้ง

2.2 ลักษณะของรอยต่อในการก่อสร้างระบบสำเร็จรูประบบโครงสร้างชิ้นส่วนสำเร็จรูป

รอยต่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูป สำหรับการก่อสร้างระบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปมีความสำคัญต่อความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร รอยต่อจะต้องสามารถรับและส่งถ่ายแรงที่เกิดขึ้นได้ตามสมมติฐานของการออกแบบ ง่ายต่อการติดตั้ง สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท

2.2.1 รอยต่อแบบเปียก (Wet joint)

เป็นลักษณะที่เกิดจากการเทเกราท์ (Grouting) ด้วยวัสดุเชื่อมระหว่างรอยต่อของชิ้นส่วนสำเร็จรูป รอยต่อนี้จะไม่สามารถรับแรงได้ทันทีต้องรอจนกว่าวัสดุมีความแข็งแรงตามกำหนด รอยต่อชนิดนี้จะลดปัญหาทางด้านการประกอบชิ้นส่วนสำเร็จรูปเข้าด้วยกัน รอยต่อแบบนี้ ได้แก่ รอยต่อแบบการใช้เหล็กโดเวล-เกราท์ และแบบเกราท์ระหว่างรอยต่อ (Dry Pack)

2.2.2 รอยต่อแบบแห้ง (Dry joint)

เป็นลักษณะที่เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จรูปด้วยวัสดุที่สามารถรับแรงได้ทันที ได้แก่ การใช้สลักเกลียว (Bolting) และการเชื่อม (Welding) โดยหลังจากการประกอบเสร็จจะทำการปิดรอยต่อด้วยวัสดุปิดหน้าเพื่อป้องกันความชื้น และความเรียบร้อยของงานด้วยวัสดุจำพวก ปูนทราย อีพรอกซี่ วัสดุทากันสนิม อย่างใดอย่างหนึ่งตามการออกแบบ

2.2.3 รอยต่อแบบอัดแรงภายหลัง (Post Tensioned joint)

เป็นลักษณะที่เกิดขึ้นภายในชิ้นส่วนสำเร็จรูปแต่ละชิ้นหรือระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จรูป โดยจะใช้เหล็กเสริมอัดแรง (Prestressing Steel) เป็นวัสดุที่ใช้ดึงและยึดปลายของเหล็กเสริมไว้ที่ชิ้นส่วนสำเร็จรูป การดึงจะทำหลังจากหล่อชิ้นส่วนสำเร็จรูปหรือหลังจากติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จรูปแล้วเสร็จ สำหรับเหล็กเสริมอัดแรงทั่วไปมีสามชนิด (นเรศ พันธราธร, 2541) คือ ลวดอัดแรง (Prestressing Wire) ลวดเกลียวอัดแรง (Prestressing Stand) และเหล็กเส้นอัดแรง (Prestressing Bar) ซึ่งโดยปกติลวดอัดแรงจะถูกร้อยผ่านท่อและอัดน้ำปูนเข้าในท่อหลังการอัดแรง

2.3 การส่งผ่านแรงที่กระทำระหว่างรอยต่อของชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป

แรงอัด การส่งผ่านแรงโดยตรง เป็นการถ่ายแรงอัดของชิ้นส่วนสำเร็จรูปที่สัมผัสกันโดยตรง จะไม่มีวัสดุใส่กั้นระหว่างชิ้นส่วนสำเร็งรูป เหมาะกับจุดที่มีแรงอัดหรือแรงกดไม่มาก การส่งผ่านแรงโดยวัสดุ เป็นการส่งผ่านแรงอัดของชิ้นส่วนสำเร็จรูปโดยมีวัสดุมารองระหว่างชิ้นส่วนสำเร็จรูปและ ไม่ทำให้ผิวสัมผัสของชิ้นส่วนสำเร็จรูปเสียหาย

แรงดึง การทาบเหล็ก เป็นลักษณะที่ใช้กันมาก เป็นการเว้นส่วนที่มีการทาบของเหล็กโครงสร้างที่ใช้ รับแรงดึงและจะหล่อคอนกรีตในที่หลังจากติดตั้งเสร็จ จำนวนและปริมาณจะขึ้นอยู่กับการออกแบบ

การใช้สลักเกลียว สามารถใช้ส่งผ่านแรงทั้งแรงดึงหรือแรงเฉือน สลักเกลียวมีลักษณะเป็น แบบเกลียว แบบเสมอ เป็นต้น

การเชื่อม ลักษณะเหมือนการเชื่อมทาบเหล็ก แต่ใช้ระยะทาบน้อยกว่าโดยใช้รอยเชื่อมแทน การรับแรงดึงภายหลัง เป็นลักษณะจุดรอยต่อที่เกิดขึ้นภายในชิ้นส่วนสำเร็จรูปแต่ละชิ้นส่วนสำเร็จรูป โดยจะใช้ลวดอัดแรงเป็นวัสดุที่ใช้ดึงและยึดปลายของลวดอัดแรงไว้ที่ชิ้นส่วนสำเร็จรูป การดึงจะกระทำภายหลังจากหล่อชิ้นส่วนสำเร็จรูปเสร็จแล้วหรือหลังจากติดตั้งชิ้นส่วนสำเร็จรูปเสร็จแล้ว

แรงเฉือน แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุ (Friction bond) เป็นแรงที่เกิดจากผิวของวัสดุสองชนิดขึ้นไป ที่ประกบหรือแนบกันแล้วก่อให้เกิดความฝืด ความฝืดดังกล่าวนี้เองจะช่วยให้เกิดแรงต้านในทิศทางตรงกันข้ามที่สามารถต้านทานแรงเฉือนได้ แรงดังกล่าวจะมากหรือน้อยมักขึ้นอยู่กับวัสดุทั้งสองมีผิวที่ฝืดมากน้อยเพียงใด เช่น การใช้เข็มเจาะแล้วเทคอนกรีตอัดแรงลงในหลุมเจาะทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวดินกับผิวของเนื้อคอนกรีตตลอดทั้งแนวเสาเข็ม เป็นต้น

การใช้สลักเกลียวเป็นการทำให้รอยต่อชิ้นส่วนสำเร็จรูปมีความแข็งแรงได้อีกวิธีหนึ่ง บางวิธีในการออกแบบรอยต่อการใช้สลักเกลียวนั้นจะช่วยให้การก่อสร้างนั้นง่ายและสะดวก สวยงามมากขึ้น ในบางครั้งการใช้สลักเกลียวอาจทำให้รอยต่อดังกล่าวแข็งเกร็งหรือกลายเป็นรอยต่อแบบอิสระก็ได้

การเชื่อมเป็นวิธีการที่ง่ายสุดในการก่อสร้างระบบชิ้นส่วนสำเร็จรูปในประเทศไทย วิธีนี้นิยมใช้เนื่องจากมีความแข็งแรงของโครงสร้าง

2.4 กำลังต้านทานแรงเฉือนของหน้าตัดคาน

2.4.1 กำลังต้านแรงเฉือนของคอนกรีต

$$V_c = 0.17\lambda\sqrt{f_c'}\,b_w d \quad (1)$$

V_c หมายถึง กำลังต้านทานแรงเฉือนคอนกรีต, λ คือ Modification factor (Normal weight concrete λ=1), f_c' คือ กำลังของคอนกรีต, b_w คือ ความกว้างของหน้าตัดคาน และ d คือ ความลึกประสิทธิผลของคาน

2.4.2 เหล็กเสริมรับแรงเฉือน

เหล็กปลอกตามขวาง (ตั้งฉากกับแนวคาน)

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} \quad (2)$$

เหล็กคอม้าในแนวเฉียง

$$V_s = A_v f_{yt} \sin\alpha \quad (3)$$

V_s หมายถึง กำลังต้านทานแรงเฉือนของเหล็กเสริม,A_v คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม, f_{yt} คือ กำลังครากของเหล็กปลอก, s คือ ระยะห่างของเหล็กปลอก และ α คือ มุมที่ทำกับแนวคาน

2.4.3 การออกแบบรับแรงเฉือน

$$\emptyset V_n \geq V_u \tag{4}$$

$$V_n = V_c + V_s \tag{5}$$

V_u หมายถึง แรงเฉือนประลัยบนหน้าตัด, V_n คือ แรงเฉือนระบุของหน้าตัด และ $\emptyset$ คือ ตัวคูณปรับลดค่าแรงเฉือนระบุ($\emptyset = 0.75$)

2.5 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดของหน้าตัดคาน

$$a = \frac{A_{ps_s} f_{ps_s} + A_s f_y - A'_s f_y}{0.85 f'_c b} \tag{6}$$

$$M_n = A_{ps_s} f_{ps_s} \left(d_p - \frac{a}{2}\right) + A_s f_y \left(d - \frac{a}{2}\right) + A'_{ps_w} f_{ps_w} \left(\frac{a}{2} - d'\right) \tag{7}$$

M_n หมายถึง กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดระบุของคาน, A_{ps_s} คือ พื้นที่หน้าตัดของลวด PC Strand, A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม, A'_s คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็ก (รับแรงอัด), f_{ps_s} คือ กำลังครากของลวด PC Strand, f_y คือ กำลังครากของเหล็กเสริม, d_p คือ ความลึกจากหลังคานจนถึงจุดศูนย์กลางของลวด PC Strand และ d' คือ ความลึกจากหลังคานจนถึงจุดศูนย์กลางของเหล็ก (รับแรงอัด)

2.6 กำลังแรงระบุของรอยเชื่อม

2.6.1 รอยเชื่อมแบบพอก

$$A_w = L_e \times t_e \tag{8}$$

A_w หมายถึง พื้นที่ประสิทธิผลของรอยเชื่อม, L_e คือ ความยาวประสิทธิผลของรอยเชื่อม, t_e คือ ความหนาประสิทธิผลของรอยเชื่อม และ a คือ ขนาดขาเชื่อม

หมายเหตุ กรณีขนาดขาเชื่อมเท่ากัน กำหนดให้ $t_e = 0.707a$

2.6.2 กำลังแรงระบุของลวดเชื่อม

$$R_n = F_{nw} A_w \tag{9}$$

R_n หมายถึง กำลังแรงระบุของวัสดุชิ้นงานหรือรอยเชื่อม, F_{nw} คือ กำลังแรงระบุของลวดเชื่อม และ A_w คือ พื้นที่ประสิทธิผลของรอยเชื่อม

2.7 หน่วยแรงยึดเหนี่ยวในเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

2.7.1. หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ยอมให้

$$f = 3.23 \times \frac{1}{d} \sqrt{f'_c} \tag{10}$$

f หมายถึง หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ยอมให้ และ d คือ ขนาดของเหล็ก

2.7.2. แรงยึดเหนี่ยวในเหล็ก

$$T = \pi d l f \tag{11}$$

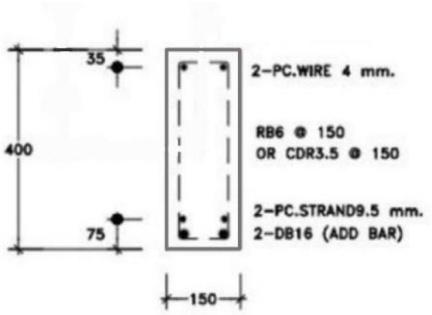
T หมายถึง แรงยึดเหนี่ยวในเหล็ก และ l คือ ระยะฝังยึด

3. ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยครั้งนี้แบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของคานที่มีการบากกับการใส่เหล็กปลอกเพื่อช่วยรับแรงเฉือน และการใช้ประโยชน์จากพฤติกรรมดังกล่าวเพื่อพัฒนารอยต่อชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูป โดยมีตัวอย่างการทดลองอยู่ 3 ตัวอย่างคือ 1. คานที่มีรอยบากที่หน้าตัด 2.คานที่มีรอยบากที่หน้าตัดและมีเหล็กวางเฉียงอยู่เหนือบริเวณรอยบาก และ 3.คานที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนรอยต่อที่ทำจากเหล็กกล่องและสลักเกลียว

3.1 ตัวอย่างการทดลอง

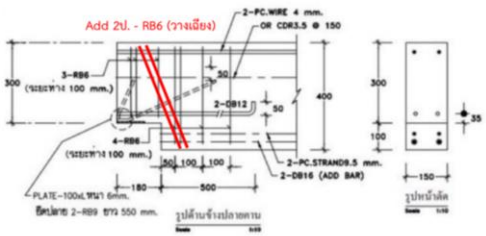
คานที่ 1 และ 2 เป็นคานขนาด 150 x 400 x 3860 มิลลิเมตร เท่ากัน แตกต่างที่ คานที่ 2 มีการใส่เหล็กเฉียงเพื่อใช้รับแรงเฉือน และคานที่ 3 เป็นการใช้เหล็กมาเป็นเป็นรอยต่อของคอนกรีตสำเร็จรูป



รูปที่ 1 แบบ Drawing หน้าตัดคานในการทดลองที่ 1 และ 2

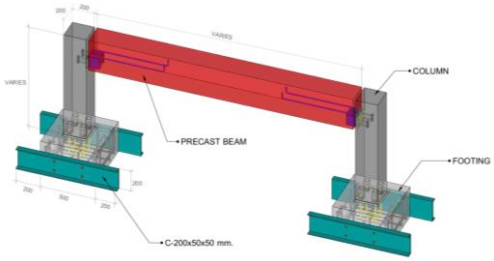
รูปที่ 2 คานในการทดลองที่ 1

รูปที่ 3 คานในการทดลองที่ 2



รูปที่ 4 แบบ Drawing รูปด้านข้างของคานในการทดลองที่ 2

รูปที่ 5 คานและเสาในการทดลองที่ 3



รูปที่ 6 แบบ Drawing ของคาน-เสาสำเร็จรูปในการทดลองที่ 3

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

3.2.1. เครื่องทดสอบแรงกด

เครื่องทดสอบแรงกด AMSLER 500T (Universal Testing Machine) ใช้สำหรับวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทดสอบ จุดประสงค์หลักเพื่อหาความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งวัสดุที่สามารถใช้ทดสอบ เช่น ยาง, พลาสติก, เหล็ก, โลหะ, คอนกรีต, ไม้ และอื่นๆ โดยใช้สำหรับการทดสอบต่างๆ เช่น การทดสอบแรงกด การทดสอบแรงดัด การทดสอบแรงเฉือน และการทดสอบอื่น ๆ ที่ถูกกำหนดตามมาตรฐานของการทดสอบ

3.2.2. แม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack)

แม่แรงไฮดรอลิก (Hydraulic Jack) คือ อุปกรณ์ใส่แรงอัดไปที่ตัวอย่างเพื่อให้สามารถค่อย ๆ เพิ่มแรงได้อย่างละเอียด

3.2.3. Load Cell ขนาด 50 ตัน

โหลดเซลล์ (Load Cell) คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนจากแรงหรือน้ำหนักที่กระทำต่อตัวโหลดเซลล์ เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ทางเราสามารถนำสัญญาณทางไฟฟ้านี้แล้วทำการบันทึกค่าที่วัดได้ลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่าน Data Logger เพื่อทำการวัดค่าและบันทึกค่าที่วัดได้ลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ตามช่วงเวลาที่เรากำหนดไว้

3.2.4. Linear Variable Differential Transformer (LVDT)

Linear Variable Differential Transformer (LVDT) เป็นอุปกรณ์วัดการเปลี่ยนตำแหน่งหรือการเคลื่อนตัวด้วยตัวทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น หลักการทำงานจะอาศัยการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำตามตำแหน่งการเคลื่อนที่ต่อเข้ากับ Data Logger เพื่อทำการวัดค่าและบันทึกค่าที่วัดได้ลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ตามช่วงเวลาที่เรากำหนดไว้

3.2.5. Data Logger

Data Logger เป็นเครื่องบันทึกข้อมูลแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้จากการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง บันทึกข้อมูลและแสดงผลโดยการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถแสดงผลข้อมูลขณะที่ทำการทดสอบได้ ใช้ร่วมกับ Load Cell เพื่อวัดค่าแรงอัดที่กระทำต่อคาน และ ใช้ร่วมกับ LVDT เพื่อวัดค่าการเคลื่อนที่ของคาน

3.3 วิธีดำเนินการทดสอบ

วัดเตรียมพื้นที่ในห้องทดสอบเพื่อเตรียมขนาดตัวอย่างคานและเสาให้พอดีกับพื้นที่ที่มีอย่างเหมาะสม เตรียมคานโดยเสริมเหล็กที่มากขึ้น เพื่อให้ไม่เกิดการวิบัติแบบโมเมนต์ดัด ที่คานก่อนเกิดการวิบัติแบบเฉือนที่รอยต่อและจะทดสอบแรงกดเป็นแรงกระทำจุดเดียวที่กลางคาน เพื่อให้เกิดแรงเฉือนวิกฤติที่รอยต่อ ก่อนทดสอบมีการติดตั้งโหลดเซลล์ขนาด 50 ตัน บริเวณด้านบนกึ่งกลางคานและติดตั้งเครื่องบันทึกข้อมูล (Data Logger) ไปบนโหลดเซลล์ขนาด 50 ตัน เพื่อเก็บค่าแรงที่กระทำต่อคานโดยละเอียดด้วยคอมพิวเตอร์ อีกทั้งยังติดตั้ง ทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนแปลงความเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น (LVDT) ไว้บริเวณด้านล่างกึ่งกลางคานเพื่อเก็บค่าการโก่งตัว จากนั้นจึงเริ่มใส่แรงผ่าน โหลดเซลล์ขนาด 50 ตัน เก็บค่าแรงและการโก่งตัวที่เกิดขึ้น จนคานเริ่มมีรอยร้าวและรอยต่อเริ่มวิบัติ จึงจะหยุดใส่โหลดการเก็บรวบรวมข้อมูลเก็บค่าแรงอัดที่กระทำต่อคานผ่าน Load cell 50 ตัน ด้วย Data Logger และ เก็บค่าการโก่งตัวของคานด้วย LVDT โดยจะเก็บค่าระหว่างการเพิ่มน้ำหนักกระทำทุก ๆ 0.2 วินาทีเพื่อให้ได้ข้อมูลอย่างละเอียดโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวเก็บข้อมูลระหว่างการทดสอบ ทำการเก็บค่าระหว่างการเพิ่มน้ำหนักกระทำจนหน้าตัดคานเริ่มเกิดรอยร้าวและรอยต่อเริ่มเกิดการพังจึงหยุดเพิ่มน้ำหนักกระทำและเก็บค่าแรงอัดสูงสุดที่ตัวอย่างสามารถรับได้

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำค่าแรงอัดและการโก่งตัวที่อ่านได้จากคอมพิวเตอร์มาวิเคราะห์ โดยจะพลอตกราฟแรงอัดเทียบกับการโก่งตัวเพื่อวิเคราะห์ พฤติกรรมของตัวอย่างการทดลอง หลังจากนั้นจะวิเคราะห์แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่รอยต่อว่าสามารถรับแรงได้เท่ากับหรือมากกว่าแรงที่ใช้ในการออกแบบ

4. ผลดำเนินงานวิจัย

4.1 ผลการทดสอบโดยเก็บค่าแรงอัดและการโก่งตัวมาวิเคราะห์

4.1.1. ผลการทดสอบของตัวอย่างที่ 1

ค่าแรงกดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 144.83 กิโลนิวตัน และมีค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดเท่ากับ 139.76 กิโลนิวตัน-เมตร มีลักษณะการวิบัติแบบแรงเฉือน (จุดรองรับแบบบากปลายคานแตกร้าวแบบเฉือน) แสดงดังรูปที่ 7 และ 8

รูปที่ 7 จุดรองรับแบบบากปลายคานฝั่งขวาแตกร้าวแบบเฉือน

รูปที่ 8 จุดรองรับแบบบากปลายคานฝั่งซ้ายแตกร้าวแบบเฉือน

4.1.2. ผลการทดสอบของตัวอย่างที่ 2

ค่าแรงกดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 158.58 กิโลนิวตัน และมีค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดเท่ากับ 153.03 กิโลนิวตัน-เมตร มีลักษณะการวิบัติแบบโมเมนต์ดัด แสดงดังรูปที่ 9 และ 10

รูปที่ 9 รอยแตกร้าวบริเวณท้องคานที่เกิดจากการวิบัติแบบโมเมนต์ดัด

4.1.3. ผลการทดสอบของตัวอย่างที่ 3

ในตัวอย่างที่ 3 มีการออกแบบน้ำหนักกระทำที่ 215.82 กิโลนิวตัน จากการทดลองพบว่า เมื่อใส่น้ำหนักกระทำไปจนถึง 215.82 กิโลนิวตัน แล้วยังไม่เกิดการวิบัติ จึงทำการใส่โหลดต่อไปเพื่อสังเกตพฤติกรรมของตัวอย่างการทดสอบ พบว่าเมื่อใส่โหลดไปจนถึง 263.20 กิโลนิวตัน โหลดเริ่มมีแนวโน้มลดลง จึงสรุปได้ว่าตัวอย่างการทดลองนี้รับโหลดได้สูงสุดที่ 263.20 กิโลนิวตัน หลังจากนั้นจึงหยุดการทดสอบเนื่องจากสามารถรับโหลดได้มากกว่าที่ออกแบบไว้แล้ว

รูปที่ 10 รอยแตกร้าวของคานตัวอย่างที่ 3

รูปที่ 11 สภาพของ Slot (Joint) จากการทดลองของคานตัวอย่างที่ 3

5. สรุปผลงานวิจัย

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีการบาก และเสริมเหล็กเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการวิบัติจากแรงเฉือนที่บริเวณหน้าตัดวิกฤตของคาน ในตัวอย่างการทดลองที่ 1 และตัวอย่างการทดลองที่ 2 จากนั้นจึงนำหลักการการเสริมเหล็กไปออกแบบ และทดสอบรอยต่อระหว่างคานและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีการฝังเหล็กกล่องที่หน้าเสาและฝังสลักเกลียวในคานเพื่อยึดกับเหล็กกล่อง สามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้

5.1.1. ตัวอย่างการทดลองที่ 1

จากการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่มีการบาก แต่ยังไม่มีการเสริมเหล็กในแนวเฉียง พบว่ามีค่าแรงกดสูงสุดที่ 144.83 กิโลนิวตัน มีค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ 139.76 กิโลนิวตัน-เมตร และคานเกิดลักษณะการวิบัติแบบเฉือน (Shear Failure)

5.1.2. ตัวอย่างการทดลองที่ 2

จากผลการทดสอบของตัวอย่างการทดลองที่ 1 จึงได้ใส่เหล็กในแนวเฉียงเพิ่มในตัวอย่างการทดลองที่ 2 เพื่อช่วยรับแรงเฉือนเพื่อไม่ให้เกิด

ลักษณะการวิบัติแบบแรงเฉือน แล้วไปเกิดลักษณะการวิบัติแบบโมเมนต์ดัด (Flexural Failure) แทน ซึ่งเมื่อทดสอบแล้วพบว่ามีค่าแรงกดสูงสุดที่ 158.58 กิโลนิวตัน มีค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ 153.03 กิโลนิวตัน-เมตร และคานเกิดลักษณะการวิบัติแบบโมเมนต์ดัด เป็นจริงตามทฤษฎี

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบผลการทดสอบที่ 1 และผลการทดสอบที่ 2

การทดสอบ	ผลการทดลอง		ลักษณะการวิบัติ
	แรงกด (กิโลนิวตัน)	ค่าโมเมนต์ดัด (กิโลนิวตัน-เมตร)	
1	144.83	139.76	วิบัติแบบเฉือน
2	158.58	153.03	วิบัติแบบโมเมนต์ดัด

5.1.3. ตัวอย่างการทดลองที่ 3

จากการทดสอบของตัวอย่างการทดสอบของตัวอย่างการทดลองที่ 1 และตัวอย่างการทดลองที่ 2 ได้มีการนำหลักแนวคิดการใส่เหล็กเสริมในแนวเฉียงเพื่อรับแรงเฉือนในคานมาใช้ต่อ แล้วทำการออกแบบรอยต่อระหว่างคานและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปให้มีความสะดวกและรวดเร็วสำหรับการก่อสร้างมากขึ้น และเมื่อทดสอบความสามารถการรับแรงของรอยต่อแล้วจึงได้ผลการทดสอบว่ามีค่าแรงกดสูงสุดที่ 263.16 กิโลนิวตัน จึงสรุปได้ว่าสามารถรับแรงได้ตามโหลดที่ได้ออกแบบไว้ 215.82 กิโลนิวตัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของรอยต่อคาน-เสาคอนกรีตสำเร็จรูปด้วยแรงกระทำแบบพลวัตในลักษณะของแรงกระทำเนื่องจากแผ่นดินไหว และควรจะมีการศึกษาพฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีตบริเวณรอยต่อคาน-เสาคอนกรีตสำเร็จรูป โดยใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์ชั้นสูง เช่น ระเบียบวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ เพื่ออธิบายสาเหตุและลักษณะของการแตกร้าว

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานการทดสอบรอยต่อชิ้นส่วนคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูปที่ออกแบบเพื่อป้องกันการวิบัติแบบเฉือนฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เพราะความกรุณาและช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลาย ๆ ท่าน คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์วิทิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัยที่ได้ความกรุณาอย่างสูงในการให้คำแนะนำ คำปรึกษาและให้ความรู้ในการทำวิจัย การตรวจทาน การแก้ไขและการเขียนโครงการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี ตลอดจนความห่วงใยและเป็นกำลังใจให้แก่คณะผู้จัดทำเสมอมา

ขอขอบคุณสถานที่ทดสอบวัสดุของคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดสอบและเก็บผลการทดสอบชิ้นส่วนโครงสร้างได้อย่างครบถ้วนและแม่นยำ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบในครั้งนี้ ซึ่งคอยช่วยเหลือติดต่อประสานงานทุกอย่างในการทำโครงงานชิ้นนี้ ทำให้คณะผู้วิจัยสามารถทำงานจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

คุณความดีหรือประโยชน์ที่ได้รับจากโครงงานการพัฒนารอยต่อชิ้นส่วนคอนกรีตสำเร็จรูปสำหรับโครงสร้างขนาดเล็กฉบับนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบแด่บุพการี ผู้มีพระคุณทุกท่านและครูบาอาจารย์ที่เคยอบรมสั่งสอนมาตั้งแต่แรกเริ่มจนถึงปัจจุบัน

เอกสารอ้างอิง

[1] ไตรรัตน์ จารุทัศน์, “ระบบการก่อสร้างอุตสาหกรรมสำหรับที่พักอาศัยของผู้ที่มีรายได้ปานกลางในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542

[2] มามี โตบารมีกุล, “การศึกษาระบบการก่อสร้างอาคารสำเร็จรูปในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540

[3] Don, A. W, “Construction Materials and Processes”, Third Edition, U.S.A.: McGRAW-HILL, 1986

[4] อเนกพงศ์ ธรรมาธิวัฒน์, “การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของรอยต่อคาน-เสาคอนกรีตสำเร็จรูป”, สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์, 2554

[5] M. Jiravacharadet, “Bond, Anchorage and Development Length”. Institute of Engineering Suraneree University of Technology.

[6] ทักษิณ เทพชาตรี, อัครวัชร เล่นวารี, “พฤติกรรมและการออกแบบโครงสร้างเหล็ก”, ปรับปรุงครั้งที่ 3, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[7] พูลศักดิ์ เพียรสุสม, กรวิชญ์ ทิพย์รักษ์, วิทิต ปานสุข, “การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีกำลังในทางปฏิบัติ (Reinforced concrete design)”, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2565

[8] พูลศักดิ์ เพียรสุสม, พิชชา จองวิวัฒสกุลม “Prestressed Concrete Design” ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย