การศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริมที่ฝังในท่อ Corrugated Duct

A Study of Behavior of Reinforcement Steel Embedded in Corrugated Duct

วัฒนพงศ์ หิรัญมาลย์[1], ศิรัณ หงษ์ยศ[2], ชวลิต แซ่ฟ้า[3], วุฒิชัย หาญสุวรรณชัย[3] และ สิทธิพร กุลวงศ์[3]

[1]อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จ.กรุงเทพมหานคร

[2]Solution Manager บริษัท Allplan software Singapore Pte,.Ltd, Singapore

[3]นักศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จ.กรุงเทพมหานคร

**Corresponding author; E-mail address: Chawalitsaefa@gmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของรอยต่อโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปซึ่งใช้เหล็กเสริมที่ฝังในท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสี ภายใต้อัตราส่วนของวัสดุประสานที่แตกต่างกัน 4 สัดส่วน คือ อัตราส่วนการผสมระหว่างปูนเกร้าท์ (Non-Shrink Grout) กับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (Portland Cement Type 1) ในอัตราส่วนปูนเกร้าท์ต่อปูนซีเมนต์ 1:0, 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสามารถในการรับแรงดึงและพฤติกรรมของรอยต่อประเภทนี้ผ่านกำลังที่พัฒนาร่วมกันระหว่างเหล็กเสริมกับวัสดุประสานในท่อลูกฟูก จากผลการทดสอบพบว่าเหล็กเสริมที่ทำงานในท่อเหล็กลูกฟูกร่วมกับวัสดุประสานในอัตราส่วน 1:0, 1:1 และ 1:2 สามารถรับกำลังดึงจนเกิดการวิบัติที่เหล็ก ในส่วนของเหล็กเสริมที่ทำงานในท่อเหล็กลูกฟูกร่วมกับวัสดุประสานในอัตราส่วน 1:3 อาจจะยังไม่ชัดเจนว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานก่อสร้างจริงได้ เนื่องจากพฤติกรรมการรับกำลังดึงของเหล็กเสริมของชิ้นตัวอย่างทดสอบ 1 จาก 3 ชิ้น รับกำลังได้ถึงจุดครากและจุดประลัยแต่ไปไม่ถึงจุดวิบัติของเหล็ก เนื่องจากเกิดการรูดระหว่างเหล็กเส้นกับวัสดุประสาน

คำสำคัญ: ท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสี, วัสดุประสาน, ปูนเกร้าท์, คอนกรีตสำเร็จรูป

Abstract

This research aims to study the behavior and failure characteristics of precast concrete structure joints using reinforcing steel embedded in galvanized corrugated duct. The fours mixing ratio between non-shrink grout and Portland Cement Type 1 will be used as grouting material to fill in corrugated duct are 1:0, 1:1, 1:2 and 1:3. The tensile strength and behavior of this type of joint due to the joint strength that developed between reinforcing steel and grouting material in corrugated duct will be investigated. From the test results, it was found that the behavior of reinforcing steel working in corrugated steel pipes together with cementitious materials in the ratio of 1:0, 1:1 and 1:2 can support the tensile strength until failure at the steel reinforcement. In terms of behavior of reinforcing steel working in corrugated steel pipe with binder in ratio 1:3 may not be clear. Due to the tensile behavior of the reinforcing steel of 1 of the 3 test specimens, it was unable to support the tensile strength until failure occurred at the reinforcing steel.

Keywords: Corrugated duct, Bonding material, Non-shrink grout, Precast concrete

1. คำนำ

ปัจจุบันโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete) เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถควบคุมคุณภาพในการผลิตชิ้นงานได้ดี มีความสะดวกและรวดเร็วในงานก่อสร้างจริง เป็นต้น ซึ่งในโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปจำเป็นต้องมีจุดต่อ (Joint Connection) ไว้ต่อกับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่หรือโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปด้วยกัน ซึ่งเกิดความไม่ต่อเนื่องของเหล็กเสริมและคอนกรีต ความยาวของระยะทาบเหล็กเสริมที่ไม่เพียงพอ ส่งผลให้พฤติกรรมการรับน้ำหนักและโมเมนต์ดัดของรอยต่อลดลง ทำให้ความปลอดภัยในการใช้อาคารลดน้อยลง

จุดต่อของโครงสร้างมีหลากหลายรูปแบบ วิธีหนึ่งของการเว้นระยะต่อทาบในโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูป คือ การใช้ท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสี (Corrugated Duct) ความสามารถในการรับกำลังของจุดต่อทาบด้วยท่อเหล็กลูกฟูกถึงพฤติกรรมของโครงสร้างยังไม่เป็นที่ชัดเจนนัก

โครงงานวิศวกรรมนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของรอยต่อโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปโดยใช้ท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีในการเชื่อมต่อ มุ่งเน้นที่จะศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของรอยต่อโดยใช้ท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีภายใต้แรงดึง เพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการรับแรงดึงของเหล็กเสริมคอนกรีตที่ฝังในท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีแล้วนำไปพัฒนา

และประยุกต์ใช้กับงานก่อสร้างจริง ช่วยลดต้นทุนการก่อสร้างและระยะเวลาทำงาน และมีความมั่นใจในประสิทธิภาพของโครงสร้าง

2. วิธีการศึกษา

2.1 รูปแบบการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่คำนึงถึงการใช้งานจริงในเรื่องโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปที่มีจุดต่อระหว่างโครงสร้างที่ใช้ท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสี โดยจะทำการทดสอบหาแรงยึดหน่วงของเหล็กมีพฤติกรรมรับกำลังดึง ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine, (UTM) แล้วทำการเก็บข้อมูลเพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไปวิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

2.2 วัสดุประสานภายในท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสี

โดยทั่วไปแล้วในงานก่อสร้างจริงวัสดุประสานกับเหล็กเสริมภายในท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสี (Corrugated Duct) นิยมใช้เป็นปูนเกร้าท์ (Non-Shrink Grout) แต่มีข้อจำกัดคือ ปูนเกร้าท์มีราคาสูงเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ทั่วไป ดังนั้นในงานก่อสร้างจริงที่ต้องใช้ปูนเกร้าท์ปริมาณมาก จะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในงานก่อสร้างสูงขึ้น เพื่อความประหยัดในงานก่อสร้างจริง งานวิจัยนี้จึงมีการตั้งสมมติฐานให้มีการผสมระหว่างปูนเกร้าท์กับปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (Portland Cement Type 1) ในอัตราส่วน ดังนี้

1) อัตราส่วน ปูนเกร้าท์ล้วน (1:0)
2) อัตราส่วน ปูนเกร้าท์ 1 ส่วน ต่อ ปูนซีเมนต์ 1 ส่วน (1:1)
3) อัตราส่วน ปูนเกร้าท์ 1 ส่วน ต่อ ปูนซีเมนต์ 2 ส่วน (1:2)
4) อัตราส่วน ปูนเกร้าท์ 1 ส่วน ต่อ ปูนซีเมนต์ 3 ส่วน (1:3)

2.2.1 อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ (W/C)

ทำการทดสอบหาปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมของวัสดุประสานตามมาตรฐาน EN 445 [1] โดยมีจุดมุ่งหมายหลักคือ ทำให้วัสดุประสานในทุกอัตราส่วนมีความสามารถในการไหลที่เท่ากัน หรือใกล้เคียงกันมากที่สุด ดังนั้นวัสดุประสานในอัตราส่วนที่แตกต่างกันก็จะมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่แตกต่างกันด้วยเช่นกัน

2.2.2 การทดสอบหาความต้านทานแรงอัดของวัสดุประสาน

ใช้การทดสอบโดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM C 109/C 109M – 95 [2] เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดของตัววัสดุประสาน (f_c') โดยค่ากำลังอัดประลัยของวัสดุประสาน จะใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบระยะฝังของเหล็ก (Development length)

ค่ากำลังรับแรงอัดของตัววัสดุประสาน (f_c') โดยทั่วไปใช้อายุที่ 28 วัน แต่ในงานก่อสร้างจริงต้องแข่งขันกับเวลา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบกำลังของวัสดุประสานที่อายุ 3 และ 7 วัน

2.2.3 ค่าความต้านทานแรงอัดของวัสดุประสานที่อายุ 3 วัน

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานแรงอัดของวัสดุประสานที่อายุ 3 วัน

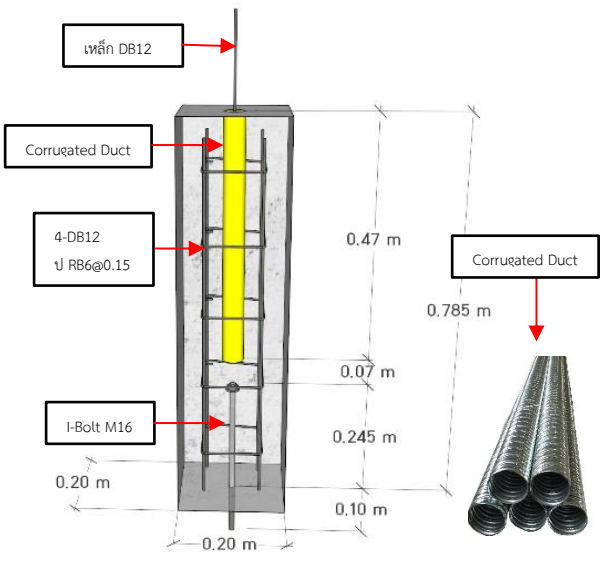
สัดส่วนวัสดุประสาน	ค่าความต้านทานแรงอัด (ksc)
1:0	564
1:1	405
1:2	371
1:3	350

หมายเหตุ เนื่องจากคอนกรีตหลักภายนอกท่อมีกำลังอัด 240 ksc ซึ่งน้อยกว่ากำลังอัดของทุกอัตราส่วนที่อายุ 3 วัน ดังนั้นการออกแบบระยะฝังจึงถูกกำหนดด้วยกำลังของคอนกรีตภายนอก และไม่มีการทดสอบที่อายุ 7 วัน

2.3 ตัวอย่างทดสอบ

ชิ้นตัวอย่างทดสอบจะมีหน้าตัดและความยาวที่เท่ากันทุกชิ้นตัวอย่างในทุกสัดส่วนการผสมของวัสดุประสานกับเหล็กเสริมภายในท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสี แต่จะแตกต่างกันในส่วนของระยะฝังของเหล็กภายในท่อขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานแรงอัดของแต่ละอัตราส่วนโดยการออกแบบตามมาตรฐาน วสท. 011008-21 [3] เนื่องจากคอนกรีตหลักภายนอกท่อมีกำลังอัด 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งน้อยกว่ากำลังอัดของทุกอัตราส่วนที่อายุ 3 วัน ตามตารางที่ 1 ดังนั้นการออกแบบระยะฝังจึงถูกกำหนดด้วยกำลังของคอนกรีตภายนอก ชิ้นตัวอย่างทดสอบในแต่ละอัตราส่วนจึงมีขนาดเท่ากัน คือ 12×20×78.5 เซนติเมตร ระยะฝังของเหล็กในท่อ 47 เซนติเมตร และมีการออกแบบให้อีกด้านของชิ้นตัวอย่างที่จะทำการดึงให้มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กเสริมที่ฝังในท่อ โดยการฝังโบลท์แบบ (I Bolt) ดังตัวอย่างในรูปที่ 1

และเนื่องด้วยข้อจำกัดของเครื่องทดสอบ UTM ในเรื่องของช่วงความยาวช่วงการดึง งานวิจัยนี้จึงเน้นการทดสอบเฉพาะเหล็กข้ออ้อย SD40 ขนาด 12 มม. (DB12)



รูปที่ 1 ลักษณะชิ้นตัวอย่างทดสอบ

สมการสำหรับการออกแบบระยะฝังของเหล็กเสริมภายในท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสี ตามมาตรฐาน วสท.0011008-21 ดังตารางที่ 2

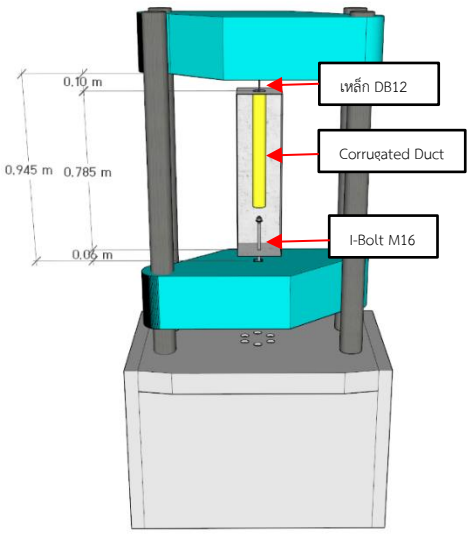
ตารางที่ 2 สมการแบบง่ายสำหรับระยะฝังเหล็กรับแรงดึงตามมาตรฐาน วสท. 011008-21

เงื่อนไข	ขนาดของเหล็กข้ออ้อยและลวดข้ออ้อย	
	20 มม. และเล็กกว่า	22 มม. และใหญ่กว่า
1. ระยะหุ้มไม่น้อยกว่า d_b 2. ช่องว่างระหว่างเหล็กเส้นหรือลวดที่ทำให้เกิดแรงหรือต่อทาบกันไม่น้อยกว่า d_b 3. มีเหล็กลูกตั้งหรือเหล็กปลอกน้อยสุดตามมาตรฐานล้อมรอบตลอดความยาว l_d หรือ 1. ระยะหุ้มไม่น้อยกว่า d_b 2. ช่องว่างระหว่างเหล็กเส้นหรือลวดที่ทำให้เกิดแรงหรือทาบกันไม่น้อยกว่า $2d_b$	$\frac{f_y\psi_t\psi_e}{6.6\lambda\sqrt{f_c'}}d_b$	$\frac{f_y\psi_t\psi_e}{5.3\lambda\sqrt{f_c'}}d_b$
กรณีอื่น	$\frac{f_y\psi_t\psi_e}{4.4\lambda\sqrt{f_c'}}d_b$	$\frac{f_y\psi_t\psi_e}{3.5\lambda\sqrt{f_c'}}d_b$

หมายเหตุ ระบบ MKS-Metric หน่วยแรงเป็น กก./ซม.^{2}

2.4 วิธีทดสอบ

การทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กที่ฝังในเนื้อคอนกรีตอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบกำลังดึงของเหล็ก มาตรฐาน มอก. 24-2548 [4] ซึ่งทำการทดสอบค่าความสามารถในการรับกำลังดึงโดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM) และมีการวัดค่ากำลังรับแรงดึงกับระยะการยืดตัว (Elongation) โดยตรงจากเครื่องทดสอบ UTM โดยใช้โปรแกรม TRAPEZIUMX ซึ่งได้ทำการวัดความยาวเดิมของเหล็กเสริมก่อนการทดสอบ เพื่อนำมาคำนวณหาค่าความเครียด (Strain) โดยมีตัวอย่างรูปแบบการทดสอบดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 รูปแบบการติดตั้งชิ้นตัวอย่างในการทดสอบ

3. ผลและการวิเคราะห์ผลการศึกษา

โครงงานวิศวกรรมนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของรอยต่อคานคอนกรีตโดยใช้ท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสี (Corrugated Duct) ในการเชื่อมต่อ มุ่งเน้นที่จะศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของรอยต่อโดยใช้ท่อภายใต้แรงดึง โดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine, UTM) ซึ่งได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

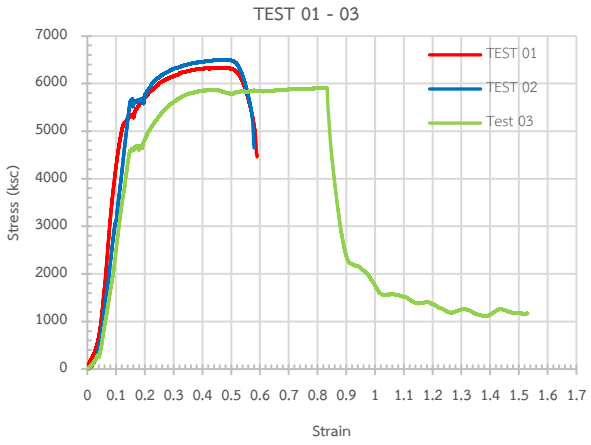
3.1 กำลังรับแรงดึงของชิ้นตัวอย่างการทดสอบ

การศึกษาพฤติกรรมการรับกำลังดึงของเหล็กเสริมที่ฝังในท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสี โดยทำการทดสอบชิ้นตัวอย่างช่วงที่เป็นคอนกรีต 20x20x78.5 เซนติเมตร มีระยะฝังเหล็ก 47 เซนติเมตร ในแต่ละสัดส่วนวัสดุประสาน จำนวน 12 ตัวอย่างโดยมีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

3.1.1 การทดสอบชิ้นตัวอย่างที่มีวัสดุประสานในอัตราส่วน ปูนเกร้าท์ 1 ส่วน ต่อ ปูนซีเมนต์ 3 ส่วน

พฤติกรรมและความสามารถในการรับแรงดึง

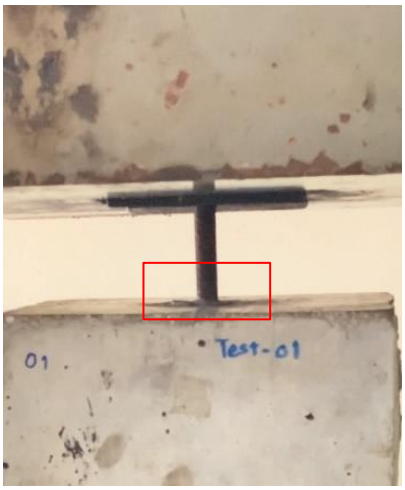
ในการทดสอบกำลังรับแรงดึงของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่มีวัสดุประสานในอัตราส่วน 1:3 จากการเก็บข้อมูลและนำมาพล็อตกราฟระหว่างความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain) สำหรับชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ 1, 2 และ 3 ดังกราฟในรูปที่ 3



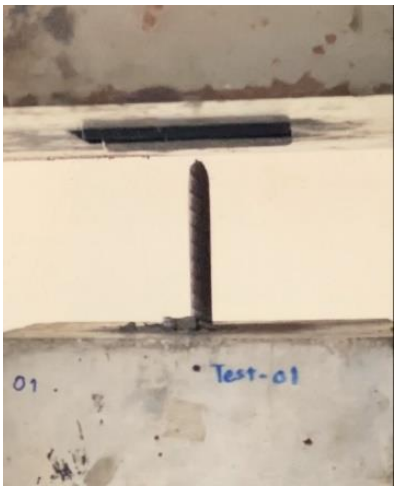
รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ 1, 2 และ 3

จากกราฟรูปที่ 3 แสดงถึงพฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่ฝังในท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2 จากการสังเกตพฤติกรรมการรับกำลังดึงของเหล็กเสริม มีจุดสำคัญที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ 4 จุดคือ จุดคราก (Yield Point), จุดที่เริ่มมีการแตกของวัสดุประสาน, จุดประลัย (Ultimate Point) และจุดวิบัติ (Rupture Point) พฤติกรรมการรับกำลังดึงของเหล็กเสริมที่ฝังในท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีสำหรับชิ้นตัวอย่างที่ 1 และ 2 มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือสามารถรับแรงดึงได้เกินจุดครากของเหล็กเสริม (Yield Point) หลังจากเลยจุดครากไปเพียงเล็กน้อยก็เริ่มมีการแตกของวัสดุประสานบริเวณปากท่อ แต่ก็ยังสามารถรับกำลังได้จนถึงค่ากำลังดึงประลัย (Ultimate Point) และ

สามารถรับแรงดึงจนถึงจุดวิบัติ (Rupture Point) จนเกิดการวิบัติที่เหล็กเสริม โดยมีตัวอย่างการเริ่มแตกของวัสดุประสาน และการวิบัติของชิ้นตัวอย่างทดสอบดังรูปที่ 4 และ 5

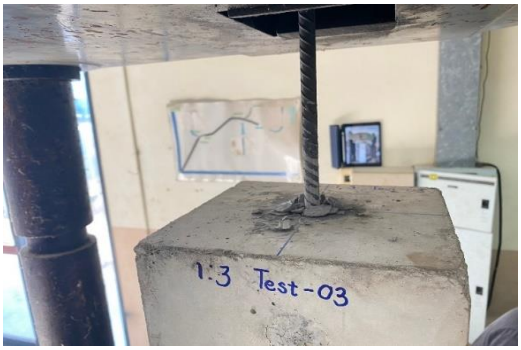


รูปที่ 4 รอยแตกของวัสดุประสานที่เริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีของชิ้นตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 5 ลักษณะการวิบัติของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ 1

ส่วนชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ 3 จากการทดสอบผลปรากฏว่าเหล็กเสริมมีการหลุดออกจากท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสี โดยมีจุดที่สำคัญที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ 5 จุด คือ จุดคราก (Yield Point), จุดที่เริ่มมีการแตกของวัสดุประสาน, จุดประลัย (Ultimate Point), จุดที่เริ่มมีการเลื่อนหลุดของเหล็กเสริม และจุดที่เริ่มเกิดการสูญเสียแรงยึดหน่วง พฤติกรรมการรับกำลังดึงของเหล็กเสริมที่ฝังในท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีสำหรับชิ้นตัวอย่างที่ 3 คือสามารถรับแรงดึงได้เกินจุดครากของเหล็กเสริม (Yield Point) หลังจากเลยจุดครากไปเพียงเล็กน้อยก็เริ่มมีการแตกของวัสดุประสานบริเวณปากท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีแต่ก็ยังสามารถรับกำลังได้จนถึงค่ากำลังดึงประลัย (Ultimate Point) และหลังจากจุดประลัยก็เกิดการเลื่อนหลุดของเหล็กเสริมออกจากท่อโดยไม่เกิดการวิบัติที่เหล็กเสริม โดยมีตัวอย่างการวิบัติของชิ้นตัวอย่างทดสอบดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ลักษณะการวิบัติของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ 3

จากรูปที่ 4, 5 และ 6 การวิบัติที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ พบว่าเริ่มมีการเกิดรอยร้าวของวัสดุประสานเล็กน้อยบริเวณผิวท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีก่อนถึงจุดประลัยของเหล็กเสริม จากรอยร้าวที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นถึงการยืดตัวที่แตกต่างกันระหว่างวัสดุประสานกับเหล็ก เมื่อเหล็กมีการยืดตัวมากกว่าวัสดุประสาน ส่งผลให้เกิดรอยร้าวของวัสดุประสาน แต่สำหรับชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2 ยังสามารถรับแรงดึงได้ถึงจุดประลัยของเหล็ก แสดงให้เห็นว่าวัสดุประสานมีแรงยึดหน่วงที่มากพอต่อเหล็กเสริมที่ไม่ทำให้เหล็กเสริมหลุดออกมาจากท่อและทำให้เกิดการวิบัติที่เหล็กเสริมดังรูปที่ 5 ซึ่งแตกต่างจากชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ 3 ที่เกิดการเลื่อนหลุดของเหล็กจากท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีเป็นระยะประมาณ 6.38 เซนติเมตร

การวิเคราะห์การยืดตัวของชิ้นตัวอย่าง จากกราฟในรูปที่ 3 การยืดตัวในแกนนอนเป็นการยืดตัวของเหล็กเสริมเป็นหลักซึ่งได้จากการอ่านค่าจากเครื่อง UTM เพราะไม่สามารถวัดค่าการยืดตัวของวัสดุในชิ้นตัวอย่างได้โดยตรง และค่าการยืดตัวส่วนใหญ่เกิดบริเวณปากจับเหล็กเสริมของเครื่องทดสอบสำหรับตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2 ตามภาพการวิบัติในรูปที่ 5 ในส่วนของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ 3 การยืดตัวในช่วงแรกของการทดสอบเป็นการยืดตัวของเหล็กเนื่องจากการดึง แต่หลังจากเกิดการเลื่อนหลุดของเหล็กออกจากท่อที่ค่ากำลังรับแรงดึงประมาณ 5800 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าการยืดตัวที่อ่านค่าจากเครื่องทดสอบส่วนใหญ่เป็นการยืดตัวเนื่องจากการเลื่อนหลุดของเหล็กเสริม

3.1.2 สรุปผลการทดสอบชิ้นตัวอย่างที่มีวัสดุประสานในอัตราส่วน ปูนเกร้าท์ 1 ส่วน ต่อ ปูนซีเมนต์ 3 ส่วน

จากผลการทดสอบชิ้นตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 ชิ้น ผลปรากฏว่าชิ้นตัวอย่างทุกชิ้นสามารถรับแรงดึงได้เกินจุดครากของเหล็กเสริม และยังสามารถรับกำลังได้จนถึงค่ากำลังดึงประลัย เพียงแต่ว่าชิ้นตัวอย่างที่ 3 ไม่สามารถรับกำลังดึงจนถึงจุดวิบัติ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเทวัสดุประสานภายในท่อที่อาจมีโพรงเกิดขึ้นจึงหยุดทำการทดสอบ โดยที่เหล็กเสริมไม่วิบัติ ซึ่งแตกต่างจากชิ้นตัวอย่างที่ 1 และ 2 ที่สามารถรับกำลังจนถึงจุดวิบัติ ดังนั้นจึงได้สรุปค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบของทั้ง 3 ตัวอย่าง ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สรุปผลค่าการทดสอบชิ้นตัวอย่างที่มีวัสดุประสานในอัตราส่วน 1:3

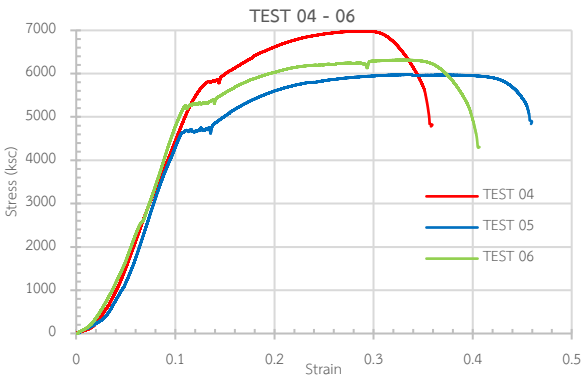
ค่ากำลังดึง ณ จุดต่าง ๆ (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	
กำลังดึงที่จุดคราก (Yield Strength)	5119
กำลังดึงที่จุดประลัย (Ultimate Strength)	6223
กำลังดึงที่จุดวิบัติ (Rupture Strength)	4581

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยกำลังดึงที่จุดคราก (Yield Strength) และกำลังดึงที่จุดประลัย (Ultimate Strength) คำนวณได้จากค่ากำลังดึงของชิ้นตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 ชิ้น และสำหรับกำลังดึงที่จุดวิบัติ (Rupture Strength) เนื่องจากชิ้นตัวอย่างที่ 3 ไม่เกิดการวิบัติที่เหล็กเสริม ดังนั้นค่าเฉลี่ยที่แสดงคำนวณจากการพิจารณาเฉพาะ ชิ้นตัวอย่างที่ 1 และ 2

3.1.3 การทดสอบชิ้นตัวอย่างที่มีวัสดุประสานในอัตราส่วน ปูนเกร้าท์ 1 ส่วน ต่อ ปูนซีเมนต์ 2 ส่วน

พฤติกรรมและความสามารถในการรับแรงดึง

ในการทดสอบกำลังรับแรงดึงของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่มีวัสดุประสานในอัตราส่วน 1:2 จากการเก็บข้อมูลและนำมาพล็อตกราฟระหว่างความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain) ของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ 4, 5 และ 6 ดังกราฟรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ 4, 5 และ 6

จากกราฟรูปที่ 7 แสดงถึงพฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่ฝังในท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ 4, 5 และ 6 จากการสังเกตพฤติกรรมการรับกำลังดึงของเหล็กเสริม มีจุดสำคัญที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ 4 จุดคือ จุดคราก (Yield Point), จุดที่เริ่มมีการแตกของวัสดุประสาน, จุดประลัย (Ultimate Point) และจุดวิบัติ (Rupture Point) พฤติกรรมการรับกำลังดึงของเหล็กเสริมที่ฝังในท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีจะมีความแตกต่างกันในเรื่องของการยืดตัว ส่วนการรับกำลังมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือสามารถรับแรงดึงได้เกินจุดครากของเหล็กเสริม (Yield Point) หลังจากเลยจุดครากไปเพียงเล็กน้อยก็เริ่มมีการแตกของวัสดุประสานบริเวณปากท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสี แต่ยังสามารถรับกำลังได้จนถึงค่ากำลังดึงประลัย (Ultimate Point) และสามารถรับแรงดึงจนถึงจุดวิบัติ (Rupture Point) จนเกิดการวิบัติที่เหล็กเสริม โดยมีตัวอย่างการวิบัติของชิ้นตัวอย่างทดสอบดังรูปที่ 8

รูปที่ 8 ลักษณะการวิบัติของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ 4

จากรูปที่ 8 การวิบัติที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ พบว่าเริ่มมีการเกิดรอยร้าวของวัสดุประสานเล็กน้อยบริเวณปากท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีก่อนถึงจุดประลัยของเหล็กเสริม รอยร้าวนี้เกิดจากการยืดตัวที่แตกต่างกันระหว่างวัสดุประสานกับเหล็ก เมื่อเหล็กมีการยืดตัวมากกว่าวัสดุประสานส่งผลให้เกิดรอยร้าวของวัสดุประสาน แต่ชิ้นตัวอย่างยังสามารถรับแรงดึงได้ถึงจุดประลัยของเหล็ก แสดงให้เห็นว่าวัสดุประสานมีแรงยึดหน่วงที่มากพอต่อเหล็กเสริมที่ไม่ทำให้เหล็กเสริมหลุดออกมาจากท่อและทำให้เกิดการวิบัติที่เหล็กเสริม ดังรูปที่ 8

การวิเคราะห์การยืดตัวของชิ้นตัวอย่าง จากกราฟในรูปที่ 7 การยืดตัวในแกนนอนเป็นการยืดตัวของเหล็กเสริมเป็นหลักซึ่งได้จากการอ่านค่าจากเครื่อง UTM เพราะไม่สามารถวัดค่าการยืดตัวของวัสดุในชิ้นตัวอย่างได้โดยตรง และค่าการยืดตัวส่วนใหญ่เกิดบริเวณช่วงกลางของเหล็กเสริมตัวอย่างตามภาพการวิบัติในรูปที่ 8

3.1.4 สรุปผลการทดสอบชิ้นตัวอย่างที่มีวัสดุประสานในอัตราส่วน ปูนเกร้าท์ 1 ส่วน ต่อ ปูนซีเมนต์ 2 ส่วน

จากผลการทดสอบชิ้นตัวอย่างทดสอบทั้ง 3 ชิ้น ผลปรากฏว่าชิ้นตัวอย่างทุกชิ้นสามารถรับแรงดึงได้เกินจุดครากของเหล็กเสริม สามารถรับกำลังได้จนถึงค่ากำลังดึงประลัย และสามารถรับแรงดึงจนถึงจุดวิบัติ จนเกิดการวิบัติที่เหล็กเสริม ดังนั้นจึงได้สรุปค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบของทั้ง 3 ตัวอย่าง ดังตารางที่ 4

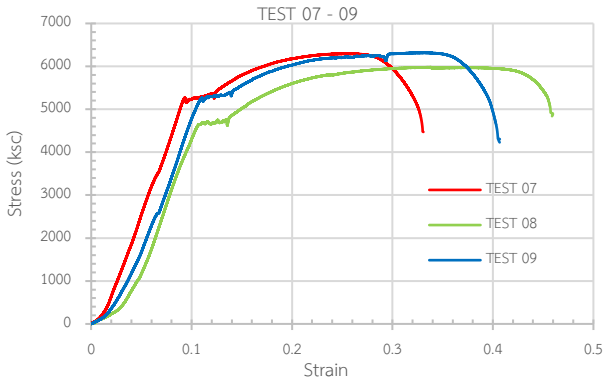
ตารางที่ 4 สรุปผลค่าการทดสอบชิ้นตัวอย่างที่มีวัสดุประสานในอัตราส่วน 1:2

ค่ากำลังดึง ณ จุดต่าง ๆ (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	
กำลังดึงที่จุดคราก (Yield Strength)	5070
กำลังดึงที่จุดประลัย (Ultimate Strength)	6312
กำลังดึงที่จุดวิบัติ (Rupture Strength)	4859

3.1.5 การทดสอบชิ้นตัวอย่างที่มีวัสดุประสานในอัตราส่วน ปูนเกร้าท์ 1 ส่วน ต่อ ปูนซีเมนต์ 1 ส่วน

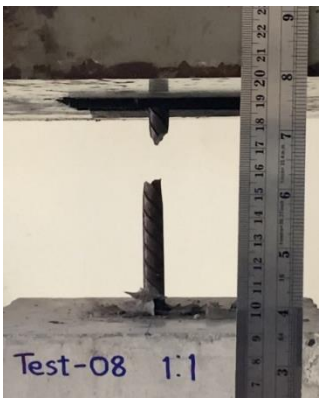
พฤติกรรมและความสามารถในการรับแรงดึง

ในการทดสอบกำลังรับแรงดึงของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่มีวัสดุประสานในอัตราส่วน 1:1 จากการเก็บข้อมูลและนำมาพล็อตกราฟระหว่างความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain) ของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ 7, 8 และ 9 ดังกราฟรูปที่ 9



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ 7, 8 และ 9

จากกราฟรูปที่ 9 แสดงถึงพฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่ฝังในท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ 7, 8 และ 9 จากการสังเกตพฤติกรรมการรับกำลังดึงของเหล็กเสริม มีจุดสำคัญที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ 4 จุดคือ จุดคราก (Yield Point), จุดที่เริ่มมีการแตกของวัสดุประสาน, จุดประลัย (Ultimate Point) และจุดวิบัติ (Rupture Point) พฤติกรรมการรับกำลังดึงของเหล็กเสริมที่ฝังในท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีจะมีความแตกต่างกันในเรื่องของการยืดตัว ส่วนการรับกำลังมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือสามารถรับแรงดึงได้เกินจุดครากของเหล็กเสริม (Yield Point) หลังจากเลยจุดครากไปเพียงเล็กน้อยก็เริ่มมีการแตกของวัสดุประสานบริเวณปากท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีแต่ก็ยังสามารถรับกำลังได้จนถึงค่ากำลังดึงประลัย (Ultimate Point) และสามารถรับแรงดึงจนถึงจุดวิบัติ (Rupture Point) จนเกิดการวิบัติที่เหล็กเสริม โดยมีตัวอย่างการวิบัติของชิ้นตัวอย่างทดสอบดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ลักษณะการวิบัติของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ 8

จากรูปที่ 10 การวิบัติที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ พบว่าเริ่มมีการเกิดรอยร้าวของวัสดุประสานเล็กน้อยบริเวณปากท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีก่อนถึงจุดประลัยของเหล็กเสริม จากรอยร้าวที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นถึงการยืดตัวที่แตกต่างกันระหว่างวัสดุประสานกับเหล็ก เมื่อเหล็กมีการยืดตัวมากกว่าวัสดุประสาน ส่งผลให้เกิดรอยร้าวของวัสดุประสาน แต่ชิ้นตัวอย่างยังสามารถรับแรงดึงได้ถึงจุดประลัยของเหล็ก แสดงให้เห็นว่าวัสดุประสานมีแรงยึดหน่วงที่มากพอต่อเหล็กเสริมที่ไม่ทำให้เหล็กเสริมหลุดออกมาจากท่อและทำให้เกิดการวิบัติที่เหล็กเสริม ดังรูปที่ 10

การวิเคราะห์การยืดตัวของชิ้นตัวอย่าง จากกราฟในรูปที่ 9 การยืดตัวในแกนนอนเป็นการยืดตัวของเหล็กเสริมเป็นหลักซึ่งได้จากการอ่านค่าจากเครื่อง UTM เพราะไม่สามารถวัดค่าการยืดตัวของวัสดุในชิ้นตัวอย่างได้โดยตรง และค่าการยืดตัวส่วนใหญ่เกิดบริเวณช่วงกลางของเหล็กเสริมตัวอย่างตามภาพการวิบัติในรูปที่ 10

3.1.6 สรุปผลการทดสอบชิ้นตัวอย่างที่มีวัสดุประสานในอัตราส่วน ปูนเกร้าท์ 1 ส่วน ต่อ ปูนซีเมนต์ 1 ส่วน

จากผลการทดสอบชิ้นตัวอย่าง 3 ชิ้น ผลปรากฏว่าชิ้นตัวอย่างทุกชิ้นสามารถรับแรงดึงได้เกินจุดครากของเหล็กเสริม สามารถรับกำลังได้จนถึงค่ากำลังดึงประลัย และสามารถรับแรงดึงจนถึงจุดวิบัติ จนเกิดการวิบัติที่เหล็กเสริม ดังนั้นจึงได้สรุปค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบของทั้ง 3 ตัวอย่าง ดังตารางที่ 5

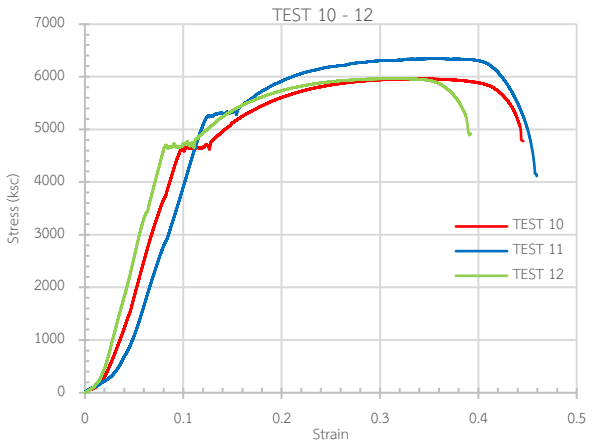
ตารางที่ 5 สรุปผลค่าการทดสอบชิ้นตัวอย่างที่มีวัสดุประสานในอัตราส่วน 1:1

ค่ากำลังดึง ณ จุดต่าง ๆ (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	
กำลังดึงที่จุดคราก (Yield Strength)	5060
กำลังดึงที่จุดประลัย (Ultimate Strength)	6291
กำลังดึงที่จุดวิบัติ (Rupture Strength)	4493

3.1.7 การทดสอบชิ้นตัวอย่างที่มีวัสดุประสานในอัตราส่วน ปูนเกร้าท์ 1 ส่วน ต่อ ปูนซีเมนต์ 0 ส่วน

พฤติกรรมและความสามารถในการรับแรงดึง

ในการทดสอบกำลังรับแรงดึงของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่มีวัสดุประสานในอัตราส่วน 1:0 จากการเก็บข้อมูลและนำมาพล็อตกราฟระหว่างความเค้น (Stress) กับความเครียด (Strain) ของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ 10, 11 และ 12 ดังกราฟรูปที่ 11



รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ 10, 11 และ 12

จากกราฟรูปที่ 11 แสดงถึงพฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่ฝังในท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ 10, 11 และ 12 จากการสังเกตพฤติกรรมการรับกำลังดึงของเหล็กเสริม มีจุดสำคัญที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ 4 จุดคือ จุดคราก (Yield Point), จุดที่เริ่มมีการแตกของวัสดุประสาน, จุดประลัย (Ultimate Point) และจุดวิบัติ (Rupture Point) พฤติกรรมการรับกำลังดึงของเหล็กเสริมที่ฝังในท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีจะมีความแตกต่างกันในเรื่องของการยืดตัว ส่วนการรับกำลังมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือสามารถรับแรงดึงได้เกินจุดครากของเหล็กเสริม (Yield Point) หลังจากเลยจุดครากไปเพียงเล็กน้อยก็เริ่มมีการแตกของวัสดุประสานบริเวณปากท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีแต่ก็ยังสามารถรับกำลังได้จนถึงค่ากำลังดึงประลัย (Ultimate Point) และสามารถรับแรงดึงจนถึงจุดวิบัติ (Rupture Point) จนเกิดการวิบัติที่เหล็กเสริม โดยมีตัวอย่างการวิบัติของชิ้นตัวอย่างทดสอบดังรูปที่ 12

รูปที่ 12 ลักษณะการวิบัติของชิ้นตัวอย่างทดสอบที่ 10

จากรูปที่ 12 การวิบัติที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ พบว่าเริ่มมีการเกิดรอยร้าวของวัสดุประสานเล็กน้อยบริเวณปากท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีก่อนถึงจุดประลัยของเหล็กเสริม จากรอยร้าวที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นถึงการยืดตัวที่แตกต่างกันระหว่างวัสดุประสานกับเหล็ก เมื่อเหล็กมีการยืดตัวมากกว่าวัสดุประสาน ส่งผลให้เกิดรอยร้าวของวัสดุประสาน แต่ชิ้นตัวอย่างยังสามารถรับแรงดึงได้ถึงจุดประลัยของเหล็ก แสดงให้เห็นว่าวัสดุประสานมีแรงยึดหน่วงที่มากพอต่อเหล็กเสริมที่ไม่ทำให้เหล็กเสริมหลุดออกมาจากท่อและทำให้เกิดการวิบัติที่เหล็กเสริม ดังรูปที่ 12

การวิเคราะห์การยืดตัวของชิ้นตัวอย่าง จากกราฟในรูปที่ 11 การยืดตัวในแกนนอนเป็นการยืดตัวของเหล็กเสริมเป็นหลักซึ่งได้จากการอ่านค่าจากเครื่อง UTM เพราะไม่สามารถวัดค่าการยืดตัวของวัสดุในชิ้นตัวอย่างได้โดยตรง และค่าการยืดตัวส่วนใหญ่เกิดบริเวณปากจับเหล็กเสริมของเครื่องทดสอบตัวอย่างตามภาพการวิบัติในรูปที่ 12

3.1.8 สรุปผลการทดสอบชิ้นตัวอย่างที่มีวัสดุประสานในอัตราส่วน ปูนเกร้าท์ 1 ส่วน ต่อ ปูนซีเมนต์ 0 ส่วน

จากผลการทดสอบชิ้นตัวอย่าง 3 ชิ้น ผลปรากฏว่าชิ้นตัวอย่างทุกชิ้นสามารถรับแรงดึงได้เกินจุดครากของเหล็กเสริม สามารถรับกำลังได้จนถึงค่ากำลังดึงประลัย และสามารถรับแรงดึงจนถึงจุดวิบัติ จนเกิดการวิบัติที่เหล็กเสริม ดังนั้นจึงได้สรุปค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบของทั้ง 3 ตัวอย่าง ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สรุปผลค่าการทดสอบชิ้นตัวอย่างที่มีวัสดุประสานในอัตราส่วน 1:0

ค่ากำลังดึง ณ จุดต่าง ๆ (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	
กำลังดึงที่จุดคราก (Yield Strength)	4889
กำลังดึงที่จุดประลัย (Ultimate Strength)	6084
กำลังดึงที่จุดวิบัติ (Rupture Strength)	4585

4. สรุป

4.1 พฤติกรรมและความสามารถในการรับกำลังดึงของเหล็กเสริมที่ฝังในท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสี (Corrugated Duct)

เนื่องด้วยวิธีการตรวจการยืดตัว (Elongation) ตลอดความยาวชิ้นงานจากเครื่องทดสอบ UTM แล้วนำมาคำนวณหาค่าความเครียด (Strain) ส่งผลทำให้ค่าความเครียดที่จุดครากของตัวอย่างที่มากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเครียดที่จุดครากของเหล็กเสริม เนื่องจากกราฟความเค้นความเครียด (Stress-strain relationship) ด้วยการวัดโดยวิธีนี้ จะทำให้การยืดตัวที่ได้เป็นการยืดตัวทั้งของเหล็กเสริมและโบลท์ รวมถึงการเคลื่อนตัวจากการรูดออกของเหล็กเสริมและโบลท์ (Slip) ทั้งสองฝั่ง ด้วยข้อจำกัดดังกล่าว อาจส่งผลให้ค่าการยืดที่ได้จากการทดสอบจะมากกว่าความเป็นจริง แต่เนื่องด้วยการศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นที่จะทราบถึงความสามารถในการรับแรงดึงของเหล็กเสริมกับวัสดุประสานดังนั้นการยืดตัวดังกล่าวจึงไม่ได้พิจารณาเป็นส่วนหลักในการศึกษาครั้งนี้

จากผลการทดสอบความสามารถในการรับกำลังดึงของจุดต่อโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จที่ใช้จุดต่อแบบท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสี (Corrugated Duct) ในสัดส่วนวัสดุประสานที่แตกต่างกันพบว่า

ความสามารถในการรับกำลังดึงของเหล็กเสริมที่ฝังในท่อที่มีวัสดุประสานในอัตราส่วนปูนเกร้าท์ต่อปูนซีเมนต์ 1:2, 1:1 และ 1:0 สามารถรับกำลังดึงได้เกินจุดครากของเหล็กเสริม สามารถรับกำลังได้จนถึงค่ากำลังดึงประลัย และสามารถรับแรงดึงจนถึงจุดวิบัติ จนเกิดการวิบัติที่เหล็กเสริมทั้ง 3 อัตราส่วนที่ทำการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังดึงของเหล็กเสริมตามมาตรฐาน มอก. 24-2548 ค่ากำลังดึงที่ได้จากการทดสอบมีค่ามากกว่ามาตรฐาน จึงสรุปได้ว่าการใช้จุดต่อแบบท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสี เป็นส่วนประกอบของจุดต่อของโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จโดยใช้วัสดุประสานในอัตราส่วน 1:0, 1:1 และ 1:2 มีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างจริง

ในส่วนของตัวอย่างทดสอบที่ใช้สัดส่วนของวัสดุประสานในอัตราส่วนปูนเกร้าท์ต่อปูนซีเมนต์ 1:3 มีข้อแตกต่างคือชิ้นตัวอย่างที่ 3 ที่ทำการทดสอบในสัดส่วนวัสดุประสานดังกล่าวเกิดการเลื่อนหลุดของเหล็กเสริมออกจากท่อนั่นหมายความว่าสัดส่วนของวัสดุประสาน 1:3 ยังมีข้อกำจัดในด้านของความปลอดภัยในการใช้งาน แม้ค่าความสามารถในการรับกำลังดึงสำหรับกำลังดึงที่จุดคราก (Yield Strength) และกำลังดึงที่จุดประลัย (Ultimate Strength) เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังดึงของเหล็กเสริมตาม

มาตรฐาน มอก. 24-2548 พบว่าค่ากำลังดึงที่ได้จากการทดสอบจะมีค่ามากกว่ามาตรฐาน จึงสรุปได้ว่าการใช้จุดต่อแบบท่อเหล็กลูกฟูกชุบสังกะสีเป็นส่วนประกอบของจุดต่อของโครงสร้างคอนกรีตสำเร็จรูปสำหรับการใช้วัสดุประสานในอัตราส่วน 1:3 ในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างจริงอาจมีปัญหาเกี่ยวกับความสามารถในการรับกำลังของโครงสร้าง

4.2 เปรียบเทียบงบประมาณของวัสดุประสานแต่ละสัดส่วน

เนื่องจากสัดส่วนวัสดุประสานในอัตราส่วน 1:3 อาจจะยังไม่ชัดเจนว่าสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานก่อสร้างจริงทางกลุ่มงานวิจัยจึงได้ทำการพิจารณาเปรียบเทียบงบประมาณเฉพาะส่วนของวัสดุประสานในอัตราส่วน 1:0, 1:1 และ 1:2 จากปริมาณการใช้จริงในงานวิจัยนี้ ถ้าหากคิดราคาการใช้ปูนเกร้าท์ล้วนหรืออัตราส่วน 1:0 เป็น 100% เมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนอื่น ๆ ที่มีการผสมกับปูนซีเมนต์ จะสามารถช่วยประหยัดงบประมาณในส่วนของวัสดุประสานโดยคิดเป็นค่าร้อยละได้ดังนี้

1) อัตราส่วน 1:1 ประหยัดได้ถึง 34 % เมื่อเทียบกับอัตราส่วน 1:0
2) อัตราส่วน 1:2 ประหยัดได้ถึง 45 % เมื่อเทียบกับอัตราส่วน 1:0

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายฝ่าย ซึ่งคณะผู้จัดทำซาบซึ้งและประทับใจเป็นอย่างยิ่งจึงขอกราบขอบคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ วัฒนพงศ์ หิรัญมาลย์ ที่ให้คำแนะนำคำปรึกษาในทุกด้านงานของงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] The European Standard EN 445:2007, Grout for prestressing tendons – Test methods (Grout Spread Method)

[2] ASTM C 109/C 109M – 95 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. Or (50 mm) Cube Specimens), 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428, United States.

[3] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมชูปถัมภ์ (2564). *มาตรฐานสำหรับการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง*, กรุงเทพฯ

[4] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (24-2548), *เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต : เหล็กข้ออ้อย*