ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249374

# ผลของแรงกรรไกรและแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาต่อค่าอัจฉริยะเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตที่ยึดประสานด้วยอีโพซิเมอร์เพสต์

พรชัย ศิริภูมิ พันธ์กระจ่าง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
249374
b0025385 2

# ผลของแรงกระทำคงค้างและแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตที่ยึดประสานกันด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์

นายปีติภูมิ พันธ์กระจับ วศ.บ. (วิศวกรรมโยธา)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2554

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผศ.ดร.ทวิช พูลเงิน)

..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ)

..... กรรมการ
(ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | ผลของแรงกระทำคงค้างและแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตที่ยึดประสานกันด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ |
| หน่วยกิต | 12 |
| ผู้เขียน | นายปิติภูมิ พันธ์กระจับ |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผศ.ดร.ทวิช พูลเงิน |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | ผศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ |
| หลักสูตร | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมโยธา |
| ภาควิชา | วิศวกรรมโยธา |
| คณะ | วิศวกรรมศาสตร์ |
| พ.ศ. | 2554 |


## บทคัดย่อ

249374

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการประยุกต์ใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์ เพื่อทำหน้าที่ยึดประสานเหล็กกับคอนกรีตในงานซ่อมแซม พร้อมทั้งศึกษาคุณสมบัติที่ขึ้นกับเวลาที่อาจส่งผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ซึ่งได้แก่ความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวต่อน้ำหนักบรรทุกคงค้าง (พฤติกรรมการคืบ) และความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวต่อน้ำหนักบรรทุกแบบซ้ำไปซ้ำมา (พฤติกรรมการล้า) การเตรียมตัวอย่างทดสอบทำโดยการเจาะรูในตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม$^3$ ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความลึก 8 มิลลิเมตร และฝังเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ลงในคอนกรีตโดยใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุยึดประสาน จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ในการศึกษานี้มี 3 ส่วนผสม ซึ่งแปรเปลี่ยนตามสัดส่วนของสารตั้งต้น เริ่มจากอัตราส่วนผสมระหว่างเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟูม 60:40 เถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ 60:40 และเถ้าถ่านหินล้วน ใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 18 โมลาร์ และอัตราส่วนโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ($Na_2OSiO_2$:NaOH) เท่ากับ 2.5:1 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 1 3 7 28 และ 90 วันตามลำดับ ความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวต่อน้ำหนักบรรทุกคงค้างและน้ำหนักบรรทุกแบบซ้ำไปซ้ำมาจะทดสอบที่อายุจีโอโพลิเมอร์เพสต์ 28 วัน นับจากวันเริ่มผสม

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์ที่มีอัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟูมร้อยละ 60:40 ให้กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวประลัยที่อายุ 1 วันเท่ากับ 12.7 MPa ซึ่งมากกว่ากำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตโดยตรง (คอนกรีตควบคุม) ที่อายุ 28 วัน ที่มีค่าเท่ากับ 12.3 MPa และกำลังยึดเหนี่ยวยังคง

249374

มากกว่าคอนกรีตควบคุมทุกช่วงอายุการทดสอบ ส่วนจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีอัตราส่วนผสมอื่นต้องการเวลา 7 วันในการพัฒนากำลังเพื่อให้มีกำลังเทียบเท่าคอนกรีตควบคุม ในส่วนของการศึกษาพฤติกรรมการคืบและการล้าของจีโอโพลิเมอร์เพสต์พบว่าวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีความคงทนต่อแรงกระทำคงค้างและแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม อย่างไรก็ตามเมื่อแรงกระทำมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 30 ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสานจะมีความคงทนได้ดีเพียงพอและสามารถกำหนดให้ค่ากำลังยึดเหนี่ยวปลอดภัยของวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์ในการใช้งานเท่ากับร้อยละ 30 ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์เพสต์ / กำลังยึดเหนี่ยว / การคืบ / การล้า

| | |
|---|---|
| Thesis Title | Effect of Sustained and Cyclic Loads on the Bonding Strength of Deformed Bar and Concrete using Geopolymer Paste as Bonding Agent |
| Thesis Credits | 12 |
| Candidate | Mr. Pitipoom Pankrajab |
| Thesis Advisor | Asst. Prof. Dr. Tawich Pulngern |
| Co-Advisor | Asst. Prof. Dr. Smith Songpiriyakij |
| Program | Master of Engineering |
| Field of Study | Civil Engineering |
| Department | Civil Engineering |
| Faculty | Engineering |
| B.E. | 2554 |


Abstract

249374

The aim of this research is to apply the geopolymer paste as the bonding agent between a reinforcing steel bar and concrete as well as studying the time-dependent property, which is the durability of bonding strength under sustained and cyclic loadings. The test specimens were prepared by casting the 15x15x15 $cm^3$ concrete cubic, drilling 12 mm diameter and 80 mm depth hole through the concrete, embedding the 10 mm deformed bar in the hole and using the geopolymer paste as a bonding agent to bond reinforcing steel with concrete. Three mixtures of geopolymer paste were used with 18 M NaOH and sodium silicate to NaOH ratio of 2.5 by weight with various binders, which were fly ash (FA) to silica fume (SF) ratio of 60:40, fly ash to rice hush bark ash (RHBA) ratio of 60:40, and pure FA, respectively. Bonding strength between the deformed bar and concrete were determined at ages of 1 3 7 28 and 90 days, respectively, while the durability of bonding strength was examined at the ages of 28 days.

The test results indicated that the bonding strength of mixture at 1 day with FA:SF ratio of 60:40 was 12.7 MPa, which was higher than that of the control concrete (12.3 MPa at 28 days). For other mixtures, the curing date of 7 days was necessary for the strength development. For creep and fatigue behavior, geopolymer paste presented lower durability under sustained and cyclic loads in comparison with control concrete, especially in high load levels. However, the durability of geopolymer paste was acceptable when the load level was lower than 30% of ultimate bonding

249374

strength. Therefore, this value can be used as a design load when the geopolymer paste is applied as a bonding agent between a rebar and concrete.

Keywords : Geopolymer Paste / Bonding Strength / Creep / Fatigue

# กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของงานศึกษาวิจัยนี้เกิดขึ้นได้ เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ผศ.ดร.ทวิช พูลเงิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร.สมิตร ส่งพิริยะกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ให้คำปรึกษา ขั้นตอน วิธีการศึกษา คำแนะนำแนวความคิดที่เป็นประโยชน์และการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างงานวิจัย รวมทั้งได้ตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเรียบร้อยสมบูรณ์ ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร.ปริญญา จินดาประเสริฐ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่กรุณาให้เกียรติมาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่กรุณาให้เกียรติมาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดอันเป็นประโยชน์แก่งานวิจัยนี้ และขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ อบรมสั่งสอนทักษะการเรียนรู้ในวิชาชีพ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบริษัท PPY Engineering จำกัด ซึ่งให้ความอนุเคราะห์เครื่องทดสอบการคืบในงานวิจัยนี้ และขอบพระคุณนายพร้อมพงศ์ ผุงเพิ่มตระกูล ผู้ให้การช่วยเหลือและให้คำแนะนำทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมถึงขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้างที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมา ความดีและประโยชน์อันใดที่เกิดขึ้นจากงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้แก่บุคคลเหล่านี้และภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

# สารบัญ


| | หน้า |
|---|---|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ข |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ง |
| กิตติกรรมประกาศ | ฉ |
| สารบัญ | ช |
| รายการตาราง | ฎ |
| รายการรูปประกอบ | ฒ |

**บทที่**

| | | |
|---|---|---|
| **1.** | **บทนำ** | **1** |
| 1.1 | ที่มาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 | วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 2 |
| 1.3 | ขอบเขตของการศึกษา | 2 |
| 1.4 | เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ | 3 |
| **2.** | **ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง** | **4** |
| 2.1 | สารจีโอโพลิเมอร์ | 4 |
| 2.2 | ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ | 4 |
| 2.3 | โซเดียมไฮดรอกไซด์ | 7 |
| 2.4 | สารละลายโซเดียมซิลิเกต | 7 |
| 2.5 | แรงยึดเหนี่ยวในการฝังยึด | 8 |
| 2.6 | ลักษณะองค์ประกอบของแรงยึดเหนี่ยว | 8 |
| 2.7 | ระยะฝังยึดเหล็กเสริม | 8 |
| 2.8 | ความคงทนของวัสดุเมื่อรับแรงกระทำคงค้างหรือพฤติกรรมการคืบ (Creep) | 9 |
| 2.9 | ความคงทนของวัสดุเมื่อรับแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาหรือพฤติกรรมการล้า (Fatigue) | 10 |
| 2.10 | ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 12 |

**3. วิธีการทดสอบ** **17**

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ 17

3.1.1 ซิลิกาฟูม 17

3.1.2 เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ 17

3.1.3 เถ้าถ่านหิน 18

3.1.4 สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 18

3.1.5 สารละลายโซเดียมซิลิเกต 18

3.1.6 เหล็กข้ออ้อย 19

3.1.7 อิพ็อกซี่สำหรับงานยึดประสานระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตประเภท ธิโซโทรปิค ชนิด 2 ส่วนผสม 19

3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ 20

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต 20

3.2.2 การเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ 20

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ 21

3.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับคอนกรีตที่ยึดประสานกันด้วยโพลิเมอร์เพสต์ 21

3.3.2 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวต่อแรงกระทำคงค้างระหว่างเหล็กกับคอนกรีตที่ยึดประสานกันด้วยใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์ 21

3.3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวต่อแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาระหว่างเหล็กกับคอนกรีตซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ 24

3.4 วิธีการทดสอบ 25

3.4.1 การทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตที่ยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ 25

3.4.2 การทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตที่ยึดประสานกันด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ต่อแรงกระทำคงค้าง 26

3.4.3 การทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตที่ยึดประสานกันด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ต่อแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมา 28

**4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล** **31**

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้น 31

4.1.1 ซิลิกาฟูม (SF) 31

4.1.2 เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (RHBA) 31

4.1.3 เถ้าถ่านหิน (FA) 31

4.2 กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กข้ออ้อยและคอนกรีตที่ยึดประสานกันด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ 32

4.2.1 กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรกับคอนกรีตที่ยึดประสานกันด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ 33

4.2.2 ผลของขนาดเหล็กเสริมต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับคอนกรีตโดยใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน 36

4.3 ความคงทนของกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวต่อน้ำหนักบรรทุกคงค้างระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่ยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ 37

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะหลุดของเหล็กเสริมเทียบกับเวลาในวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ 38

4.3.2 การคืบสัมพัทธ์และอัตราการคืบของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อรับแรงกระทำคงค้าง 42

4.3.3 สัดส่วนของระยะเลื่อนเนื่องจากการคืบต่อแรงกระทำคงค้างระหว่างเหล็กและคอนกรีตซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ 45

4.4 ผลของแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาที่มีต่อกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตที่ยึดประสานกันด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ 46

4.4.1 กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงเทียบกับรอบการสั่นหลังจากรับแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาระหว่างเหล็กกับคอนกรีตซึ่งยึดประสานกันด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ 47

4.4.2 กำลังยึดเหนี่ยวที่สูญเสียของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์หลังให้แรงกระทำซ้ำไปซ้ำมา 55

4.4.3 กำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือหลังให้แรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์เทียบกับกำลังยึดเหนี่ยวประลัยของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตโดยตรง (คอนกรีตควบคุม) 60

4.5 กำลังยึดเหนี่ยวที่ยอมให้เมื่อวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อรับแรงกระทำคงค้างและแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมา 61

**5. สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ** **63**

5.1 สรุปผลการทดสอบ 63

5.2 ข้อเสนอแนะ 65

**เอกสารอ้างอิง** **66**

**ภาคผนวก**

ก ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมและผลการทดสอบเหล็กข้ออ้อย ชั้นคุณภาพ SD40 71

ข ผลการทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตที่ยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ 74

ค ผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวต่อแรงกระทำคงค้างระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตที่ยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ 82

ง ผลการทดสอบแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมาระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตที่ยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ 93

จ ผลการสอบเทียบเครื่องทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวแบบคงค้าง 134

**ประวัติผู้วิจัย** **138**

# รายการตาราง

**ตาราง** **หน้า**


2.1 คุณลักษณะทางเคมีของโซเดียมซิลิเกตเหลว 8

3.1 แสดงคุณสมบัติของโซเดียมซิลิเกต 18

3.2 คุณสมบัติของเหล็กข้ออ้อยชั้นคุณภาพที่ SD40 19

3.3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ 20

3.4 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สำหรับน้ำหนักเพสต์สด 1,000 กรัม 20

3.5 แสดงขนาดรูเจาะและความลึกของการฝังเหล็ก 25

4.1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟูม เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าถ่านหิน 32

4.2 ผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร โดยใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน 33

4.3 กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 16 และ 20 มิลลิเมตร โดยใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่อายุ 28 วัน 36

4.4 แรงกระทำคงค้างที่ใช้ทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวแบบคงค้างระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับคอนกรีตที่ยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ 38

4.5 การคืบสัมพัทธ์ที่ 1,000 ชั่วโมง เมื่อให้น้ำหนักบรรทุกคงค้างที่ร้อยละ 30 40 และ50 ของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับคอนกรีตซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ 42

4.6 ระยะเลื่อนหลุดเนื่องจากผลของการคืบเทียบกับแรงกระทำคงค้างของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่น้ำหนักบรรทุกร้อยละ 30 40 และ 50 ของกำลังยึดเหนี่ยว 45

4.7 กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ความถี่การสั่น 1.0 Hz 51

4.8 กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ความถี่การสั่น 1.5 Hz 52

4.9 กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างที่สูญเสียไปของจีโอโพลิเมอร์เพสต์หลังจากให้แรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาจำนวน 20,000 รอบ ที่ความถี่ 1.0 Hz เทียบกับกำลังยึดเหนี่ยวประลัยที่ 28 วัน 56

4.10 กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างที่สูญเสียไปของจีโอโพลิเมอร์เพสต์หลังจากให้แรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาจำนวน 20,000 รอบ ที่ความถี่ 1.5 Hz เทียบกับกำลังยึดเหนี่ยวประลัยที่ 28 วัน 57

4.11 ผลของความถี่ของแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมาการสูญเสียของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กข้ออ้อยซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ 59

| | | |
|---|---|---|
| 4.12 | กำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือหลังจากให้แรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์เทียบกับกำลังยึดเหนี่ยวประลัยของคอนกรีตควบคุม | 60 |
| ก.1 | ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมอัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการออกแบบ | 72 |
| ก.2 | ผลการทดสอบแรงดึงของเหล็กข้ออ้อย DB10 ชั้นคุณภาพที่ SD40 | 73 |
| ก.3 | ผลการทดสอบแรงดึงของเหล็กข้ออ้อย DB16 ชั้นคุณภาพที่ SD40 | 73 |
| ก.4 | ผลการทดสอบแรงดึงของเหล็กข้ออ้อย DB20 ชั้นคุณภาพที่ SD40 | 73 |
| ข.1 | ผลการทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตที่ยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟูม 60:40 | 75 |
| ข.2 | ผลการทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตที่ยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ 60:40 | 77 |
| ข.3 | ผลการทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตที่ยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินล้วน | 79 |
| ข.4 | ผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตที่ยึดประสานด้วยวัสดุอิพ็อกซี่ | 80 |
| ข.5 | ผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตโดยตรง | 81 |
| ค.1 | ผลการทดสอบระยะเลื่อนหลุดระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟูม 60:40 แรงกระทำคงค้างร้อยละ 30 ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด | 83 |
| ค.2 | ผลการทดสอบระยะเลื่อนหลุดระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟูม 60:40 แรงกระทำคงค้างร้อยละ 40 ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด | 84 |
| ค.3 | ผลการทดสอบระยะเลื่อนหลุดระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟูม 60:40 แรงกระทำคงค้างร้อยละ 50 ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด | 85 |
| ค.4 | ผลการทดสอบระยะเลื่อนหลุดระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ 60:40 แรงกระทำคงค้างร้อยละ 30 ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด | 86 |
| ค.5 | ผลการทดสอบระยะเลื่อนหลุดระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ 60:40 แรงกระทำคงค้างร้อยละ 40 ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด | 87 |

ค.6 ผลการทดสอบระยะเลื่อนหลุดระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ 60:40 แรงกระทำคงค้างร้อยละ 50 ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด 88

ค.7 ผลการทดสอบระยะเลื่อนหลุดระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินล้วน แรงกระทำคงค้างร้อยละ 30 ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด 89

ค.8 ผลการทดสอบระยะเลื่อนหลุดระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินล้วน แรงกระทำคงค้างร้อยละ 40 ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด 90

ค.9 ผลการทดสอบระยะเลื่อนหลุดระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินล้วน แรงกระทำคงค้างร้อยละ 50 ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด 91

ค.10 ผลการทดสอบระยะเลื่อนหลุดของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตโดยตรง แรงกระทำคงค้างร้อยละ 50 ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด 92

ง.1 ผลการทดสอบแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตที่ยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟูม 60:40 ความถี่ 1.0 Hz 94

ง.2 ผลการทดสอบแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาระหว่างเหล็กกับคอนกรีตที่ยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ 60:40 ความถี่ 1.0 Hz 98

ง.3 ผลการทดสอบแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตที่ยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินล้วน ความถี่ 1.0 Hz 102

ง.4 ผลการทดสอบแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตที่ยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟูม 60:40 ความถี่ 1.5 Hz 106

ง.5 ผลการทดสอบแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาระหว่างเหล็กกับคอนกรีตที่ยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ 60:40 ความถี่ 1.5 Hz 110

ง.6 ผลการทดสอบแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตที่ยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินล้วน ความถี่ 1.5 Hz 114

ง.7 ผลการทดสอบแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตที่ยึดประสานด้วยอิพ็อกซี่ ความถี่ 1.0 Hz 118

ง.8 ผลการทดสอบแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาของเหล็กเสริมที่ทำการฝังในคอนกรีตโดยตรง ความถี่ 1.0 Hz 122

ง.9 ผลการทดสอบแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาของเหล็กเสริมที่ทำการฝังในคอนกรีตโดยตรง ความถี่ 1.5 Hz 126

ง.10 กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตหลังจากให้แรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาของวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟูม 60:40 130
ง.11 กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตหลังจากให้แรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาของวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ 60:40 131
ง.12 กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตหลังจากให้แรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาของวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินล้วน 132
ง.13 กำลังยึดเหนี่ยวหลังจากให้แรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาของวัสดุอิพ็อกซี่ 133
ง.14 กำลังยึดเหนี่ยวหลังจากให้แรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาของเหล็กเสริมที่ฝังในคอนกรีตโดยตรง 133

# รายการรูปประกอบ


| รูป | | หน้า |
|---|---|---|
| 2.1 | โครงสร้างของวัสดุจีโอโพลิเมอร์หรือโพลิไซอะเลต | 6 |
| 2.2 | ความสัมพันธ์ของการคืบตัวของวัสดุ | 10 |
| 2.3 | S-N Curve สองลักษณะ | 12 |
| 3.1 | อิพ็อกซี่สำหรับงานเสียบเหล็กและเชื่อมประสานประเภทธิโซโทรปิคชนิด 2 ส่วนผสม (Sika) | 19 |
| 3.2 | กล่องจับยึดคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว | 21 |
| 3.3 | เครื่องทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวแบบคงค้าง | 22 |
| 3.4 | ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวแบบคงค้าง | 22 |
| 3.5 | เครื่องมือสอบเทียบ | 23 |
| 3.6 | การติดตั้งLoad Cell เข้ากับเครื่องทดสอบ | 23 |
| 3.7 | การเพิ่มน้ำหนักถ่วงครั้งละ50 กิโลกรัมและทำการอ่านค่าแรงดึงที่เกิดขึ้น | 24 |
| 3.8 | เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) สำหรับใช้ทดสอบแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมา | 24 |
| 3.9 | ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานก่อนการทดสอบ | 25 |
| 3.10 | เหล็กสานตะกร้อสำหรับเสริมกำลังในก้อนคอนกรีต | 26 |
| 3.11 | เหล็กข้ออ้อยที่ทำการเชื่อมเหล็กประกับข้างและแผ่นเหล็กขนาดยาว | 26 |
| 3.12 | วิธีการทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวแบบคงค้าง | 28 |
| 3.13 | เหล็กข้ออ้อยที่ทำการเชื่อมประกับข้างเพื่อป้องกันการยึดหดและการโก่งเดาะ | 29 |
| 3.14 | การติดตั้งตัวอย่างทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวต่อแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา | 29 |
| 3.15 | วิธีการทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวต่อแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมา | 30 |
| 4.1 | ความเป็นผลึกของวัสดุโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD) | 32 |
| 4.2 | ร้อยละกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมโดยใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานเทียบกับอิพ็อกซี่และคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน | 35 |
| 4.3 | กำลังยึดเหนี่ยวที่ 28 วันระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมโดยใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานเทียบกับคอนกรีตควบคุม โดยใช้เหล็กข้ออ้อยขนาด 10 16 และ 20 มิลลิเมตร | 37 |
| 4.4 | วิธีการติดตั้งตัวอย่างทดสอบและการให้น้ำหนักบรรทุกคงค้าง | 38 |

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเลื่อนหลุด(Slip Displacement)ของเหล็กข้ออ้อยเทียบกับเวลา ซึ่งยึดประสานกันด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ตามส่วนผสมต่างๆ เมื่อให้แรงกระทำคงค้างที่ร้อยละ 30 และเปรียบเทียบกับตัวควบคุมที่ร้อยละ50 ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด 39

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเลื่อนหลุด(Slip Displacement)ของเหล็กข้ออ้อยเทียบกับเวลา ซึ่งยึดประสานกันด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ตามส่วนผสมต่างๆ เมื่อให้แรงกระทำคงค้างที่ร้อยละ 40 39

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเลื่อนหลุด(Slip Displacement)ของเหล็กข้ออ้อยเทียบกับเวลา ซึ่งยึดประสานกันด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ตามส่วนผสมต่างๆ เมื่อให้แรงกระทำคงค้างที่ร้อยละ 50 40

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเลื่อนหลุด(Slip Displacement) ของเหล็กข้ออ้อยที่เวลา 1,000 ชั่วโมง และค่ากำลังยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ส่วนผสมต่างๆ 40

4.9 อัตราการคืบของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟูมเท่ากับ 60:40 ที่ให้แรงกระทำคงค้างร้อยละ30 40 และ 50 และเปรียบเทียบคอนกรีตควบคุมที่ให้แรงกระทำคงค้างร้อยละ 50 43

4.10 อัตราการคืบของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เท่ากับ 60:40 ที่แรงกระทำคงค้างร้อยละ30 40 และ 50 และเปรียบเทียบคอนกรีตควบคุมที่ให้แรงกระทำคงค้างร้อยละ 50 43

4.11 อัตราการคืบของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ส่วนเถ้าถ่านหินล้วนที่แรงกระทำคงค้างร้อยละ 30 40 และ 50 และเปรียบเทียบคอนกรีตควบคุมที่ให้แรงกระทำคงค้างร้อยละ 50 44

4.12 วิธีการติดตั้งตัวอย่างทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวแบบซ้ำไปซ้ำมา 47

4.13 กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงเทียบกับจำนวนรอบการสั่นของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่ความถี่ 1.0 Hz. แอมปลิจูดการสั่น 0.50 มิลลิเมตร 47

4.14 กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงเทียบกับจำนวนรอบการสั่นของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่ความถี่ 1.0 Hz. แอมปลิจูดการสั่น 0.75 มิลลิเมตร 48

4.15 กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงเทียบกับจำนวนรอบการสั่นของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่ความถี่ 1.0 Hz. แอมปลิจูดการสั่น 1.0 มิลลิเมตร 48

4.16 กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงเทียบกับจำนวนรอบการสั่นของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่ความถี่ 1.5 Hz. แอมปลิจูดการสั่น 0.50 มิลลิเมตร 49

4.17 กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงเทียบกับจำนวนรอบการสั่นของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่ความถี่ 1.5 Hz. แอมปลิจูดการสั่น 0.75 มิลลิเมตร 49

4.18 กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงเทียบกับจำนวนรอบการสั่นของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่ความถี่ 1.5 Hz. แอมปลิจูดการสั่น 1.0 มิลลิเมตร 50

4.19 ร้อยละกำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่ยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่รอบการสั่นแรกเทียบกับกำลังยึดเหนี่ยวที่ขีดจำกัดการล้า ที่ความถี่ 1.0 Hz 54

4.20 ร้อยละกำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่ยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่รอบการสั่นแรกเทียบกับกำลังยึดเหนี่ยวที่ขีดจำกัดการล้า ที่ความถี่ 1.5 Hz 54

4.21 ร้อยละการสูญเสียของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับคอนกรีตซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์หลังจากให้แรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมาจำนวน 20,000 รอบ ที่ความถี่ 1.0 Hz 58

4.22 ร้อยละการสูญเสียของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับคอนกรีตซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์หลังจากให้แรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมาจำนวน 20,000 รอบ ที่ความถี่ 1.5 Hz 58