อิทธิพลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานต่อกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์

ธนากร ภูเงินขำ[1*] สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์[2] และ ปริญญา จินดาประเสริฐ[3]

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาอิทธิพลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่มีต่อกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ โดยเถ้าลอยถูกแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 และทำการแปรผันอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00, 1.25 และ 1.50 สารละลายด่างที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 6 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 และบ่มที่อุณหภูมิห้องทุกอัตราส่วนผสม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้น อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50 กำลังรับแรงเฉือนอัดมีแนวโน้มลดลง ซึ่งปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยร้อยละ 15 และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 เป็นอัตราส่วนที่สามารถให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์ได้สูงสุด

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์, อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน, แรงเฉือนอัด, ลักษณะการวิบัติ

---

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

[2] สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

[3] ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

[*] ผู้ติดต่อ, อีเมล์: tanakorn.ph@rmuti.ac.th รับเมื่อ 26 พฤษภาคม 2558 ตอบรับเมื่อ 9 พฤศจิกายน 2558

Influence of Portland Cement Replacement and Sand to Binder Ratio on Slant Shear Strength between Concrete Substrate and Geopolymer

Tanakorn Phoo-ngernkham[1*] Sakonwan Hanjitsuwan[2] and Prinya Chindaprasirt[3]

Abstract

This article presents the influence of both Portland cement replacement and sand to binder ratio (S/B) on slant shear strength between concrete substrate and geopolymer mortar. Fly ash (FA) was replaced with Portland cement (PC) at the dosages of 0, 5, 10 and 15% with various sand to binder ratios of 1.00, 1.25 and 1.50, respectively. The alkali solution for used as liquid alkali were sodium silicate (Na_2SiO_3) and 10 molar sodium hydroxide (NaOH) solutions. The Na_2SiO_3/NaOH ratio of 2.0 and the liquid/binder (L/B) ratio of 0.60 and cure at ambient temperature were used in all mixture. Test results indicated that the slant shear strength between concrete substrate and geopolymer mortar tends to increase with increase in PC replacement. While the S/B ratio increased, the slant shear strength between concrete substrate and geopolymer mortar tends to increase. However at S/B ratio of 1.50, the slant shear strength tends to decrease. The 15% PC replacement with S/B ratio of 1.00 gave the highest slant shear strength between concrete substrate and geopolymer.

Keywords : Geopolymer, Sand to binder ratio, Slant shear strength, Failure mode.

[1] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan

[2] Program in Civil Technology, Faculty of Industrial Technology, Lampang Rajabhat University

[3] Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

[*] Corresponding author, E-mail: tanakorn.ph@rmuti.ac.th Received 26 May 2015, Accepted 9 November 2015

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คอนกรีตจัดเป็นวัสดุที่มีอายุการใช้งานจำกัด และเพื่อยืดอายุการใช้งานของคอนกรีตจึงควรมีการดูแลและซ่อมแซมอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่นการแตกร้าวของผนัง แสดงดังรูปที่ 1 ที่จำเป็นต้องดำเนินการซ่อมแซม ปัจจุบันวัสดุซ่อมแซมที่นิยมใช้ ได้แก่ อีพ็อกซี่และวัสดุโพลิเมอร์ ซึ่งวัสดุดังกล่าวมีคุณสมบัติที่ใช้งานได้สะดวกและให้กำลังสูงในระยะเวลาอันสั้นแต่มีราคาที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่ศึกษาหาวัสดุชนิดอื่นเพื่อใช้เป็น วัสดุซ่อมแซมและวัสดุเชื่อมประสาน เพื่อเพิ่มทางเลือกในการนำไปใช้งาน จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้วัสดุปอซโซลานในปริมาณสูงเป็นวัสดุตั้งต้น จีโอโพลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยใช้หลักการทำปฏิกิริยาของซิลิกาและอะลูมินากับสารละลายด่างและใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้วัสดุเชื่อมประสานที่สามารถรับกำลังได้เช่นเดียวกับซีเมนต์เพสต์ [1] วัสดุตั้งต้นที่นิยมใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ได้แก่ เถ้าลอย เป็นต้น [2-3]

รูปที่ 1 ผนังที่เกิดการแตกร้าว

ในประเทศไทยนิยมใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้น เถ้าลอยเป็นผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหิน ที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งมีเถ้าลอยในปริมาณประมาณ 3 ล้านตันต่อปี [4] เถ้าลอยมีองค์ประกอบหลักของซิลิกา อะลูมินา และแคลเซียมออกไซด์ จากรายงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศพบว่าเถ้าลอยมีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ [4-5] อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์ยังคงมีการพัฒนากำลังได้ช้าที่อุณหภูมิปกติ (25 องศาเซลเซียส) ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้ในงานก่อสร้างจริง จากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าปริมาณแคลเซียมออกไซด์ ที่เพิ่มขึ้นส่งผลเชิงบวกต่อสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ [6] โดยการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อปรับปรุงสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ พบว่าสามารถเพิ่มปริมาณของผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์ [7] ขณะที่ปริมาณของมวลรวมละเอียดส่งผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคในวัสดุ [8] เนื่องจากสมบัติเด่นในการเป็นวัสดุซ่อมแซมควรมีเนื้อแน่นสม่ำเสมอและคุณภาพดี

งานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุซ่อมแซมยังมีไม่มาก เช่น Pacheco-Torgal et al. [9] ได้ศึกษาลักษณะการยึดเหนี่ยวจากการใช้วัสดุจีโอ-โพลิเมอร์จากของเสียจากเหมืองทังสเตนเป็นวัสดุประสาน โดยการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวด้วยวิธีทดสอบแบบเฉือน (Slant shear test) เปรียบเทียบระหว่างจีโอ-โพลิเมอร์กับ วัสดุซ่อมแซมตามท้องตลาด ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับการนำไปใช้เป็นวัสดุซ่อมแซม

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับอีพ็อกซี่ เนื่องด้วยการใช้จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุซ่อมแซมทำให้ตัวอย่างเกิดการวิบัติแบบแบบเสา ซึ่งการวิบัติดังกล่าวบ่งบอกถึงมีความเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างผิวสัมผัส อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบด้านราคาพบว่าจีโอโพลิเมอร์มีราคาต้นทุนที่ถูกกว่าวัสดุซ่อมแซมตามท้องตลาดมาก นอกจากนั้นจากงานวิจัยของ Songpiriyakij et al. [10] ได้ศึกษาแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่มีการใช้จีโอ-โพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานเปรียบเทียบกับอีพ็อกซี่ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุประสานระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม เนื่องด้วยมีค่าการยึดเหนี่ยวที่ใกล้เคียงกับการใช้อีพ็อกซี่ จากเหตุผลดังกล่าวการใช้จีโอโพลิเมอร์จึงเป็นหนึ่งในทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับงานซ่อมแซม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาอิทธิพลของการแทนที่เถ้าลอยด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่มีต่อกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้รับช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของจีโอโพลิเมอร์เมื่อใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมและเป็นทางแนวทางเบื้องต้นในการพัฒนาจีโอโพลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมในอนาคต

2. การเตรียมวัสดุและการทดสอบ

2.1 จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

วัสดุตั้งต้นที่ใช้ผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ประกอบด้วยเถ้าลอย (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (PC) และทราย (RS) ทรายมีโมดูลัสความละเอียดและความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.25 และ 2.63 ตามลำดับ ส่วนสารละลายด่างที่ใช้เป็นของเหลวในส่วนผสมประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 6 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) (13.89% Na_2O, 32.15% SiO_2 และ 46.04% H_2O) โดยองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของ FA และ PC

Chemical compositions	FA (%)	PC (%)
SiO_2	29.32	20.80
Al_2O_3	12.96	4.70
Fe_2O_3	15.64	3.40
CaO	25.79	65.30
MgO	2.94	1.50
Na_2O	2.94	0.40
K_2O	2.93	0.10
SO_3	7.29	2.70
LOI	0.30	0.90
SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3	57.92	-

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Materials	FA	PC
Specific gravity	2.61	3.16
Median particle size, d_{50} (μm)	15.3	14.6
Blaine fineness (cm^2/g)	4,300	3,600

ตารางที่ 3 อัตราส่วนผสม กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

Symbol	FA (g)	PC (g)	RS (g)	28-day strength of geopolmymer	
				f_c (MPa)	f_t (MPa)
1.00S0PC	100	-	100	35.9	3.6
1.00S5PC	95	5	100	40.2	4.7
1.00S10PC	90	10	100	45.3	5.6
1.00S15PC	85	15	100	48.2	6.8
1.25S0PC	100	-	125	37.7	4.9
1.25S5PC	95	5	125	44.1	6.5
1.25S10PC	90	10	125	46.8	8.5
1.25S15PC	85	15	125	54.0	9.1
1.50S0PC	100	-	150	33.6	5.8
1.50S5PC	95	5	150	40.4	7.9
1.50S10PC	90	10	150	45.1	9.4
1.50S15PC	85	15	150	47.7	9.8

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นถึงอิทธิพลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน ดังนั้นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกแทนที่ในเถ้าลอยร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และแปรผันอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน (S/B) เท่ากับ 1.00, 1.25 และ 1.50 ตามลำดับ ในกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ใช้อัตราส่วนของเหลวต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 6 โมลาร์ และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 ทุกอัตราส่วนผสม

การผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เริ่มต้นด้วยผสมเถ้าลอย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และทรายให้เข้ากันเป็นเวลาประมาณ 1 นาที จากนั้นเติมสารละลายด่างที่เตรียมไว้แล้วผสมเป็นเวลาประมาณ 3 นาที โดยก่อนนำสารละลายด่างไปใช้เป็นของเหลวในส่วนผสมต้องทำการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียม-ไฮดรอกไซด์ให้เข้ากันก่อนเป็นเวลา 5 นาที ซึ่งอัตราส่วนผสม กำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ดังแสดงในตารางที่ 3 ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์

Symbols	Setting times of geopolymer mortar	
	Initial (min)	Final (min)
1.00S0PC	16	23
1.00S5PC	7	14
1.00S10PC	4	10
1.00S15PC	4	9
1.25S0PC	23	30
1.25S5PC	10	17
1.25S10PC	11	17
1.25S15PC	7	10
1.50S0PC	31	50
1.50S5PC	14	25
1.50S10PC	12	19
1.50S15PC	9	15

2.2 คอนกรีต

คอนกรีตออกแบบตามมาตรฐาน ACI 211.1-91 [11] วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 มวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบ ขนาด 3/8 นิ้ว โดยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตและกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่าเท่ากับ 36.0 และ 8.5 MPa ตามลำดับ

(ก) ลักษณะตัวอย่างคอนกรีต

(ข) ลักษณะตัวอย่างก่อนทดสอบ

รูปที่ 2 วิธีการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัด

2.3 การเตรียมตัวอย่างกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ประยุกต์จากมาตรฐาน FM3-C882 [12] ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัดเริ่มต้นด้วยเทคอนกรีตที่ถูกออกแบบไว้ลงในแบบหล่อรูปปริซึมขนาด 50x50x125 มิลลิเมตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการถอดแบบและบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน หลังจากครบอายุบ่มตัวอย่างคอนกรีตถูกห่อด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นเป็นเวลา 60 วัน รวมเวลาในการบ่มตัวอย่างคอนกรีตเท่ากับ 90 วัน เพื่อต้องการให้คอนกรีตมีการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสมบูรณ์ [13]

หลังจากการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเรียบร้อยแล้ว ตัวอย่างคอนกรีตถูกตัดแบ่งเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กัน โดยทำมุม 45 องศากับแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 2ก ตามมาตรฐาน FM3-C882 [12] เพื่อทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับวัสดุซ่อมแซม อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการศึกษาลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีตกับวัสดุซ่อมแซมเพิ่มเติม เพื่อพิจารณาลักษณะการยึดเกาะกันระหว่างคอนกรีตกับวัสดุซ่อมแซมเพื่อประกอบผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัดที่ได้รับ ดังนั้นเพื่อทำให้สามารถวิเคราะห์และพิจารณาถึงการใช้จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุซ่อมแซมได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้มุมระนาบเอียงเท่ากับ 45 องศา นอกเหนือจากเหตุผลข้างต้นแล้วผู้วิจัยยังเล็งเห็นว่าการเลือกใช้มุมระนาบเอียงเท่ากับ 45 องศา สามารถตัดตัวอย่างได้ง่ายและลดการแตกร้าวและบิ่น

ของตัวอย่างคอนกรีตได้ดีกว่ามุมระนาบเอียงเท่ากับ 30 องศา

รูปที่ 3 ลักษณะการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัด

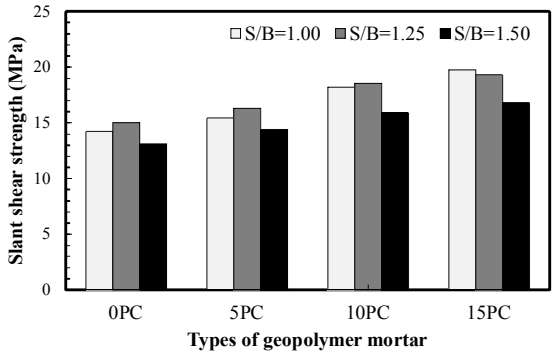
การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัดเริ่มต้นด้วยการเทจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ลงในแบบหล่อรูปปริซึมขนาด 50x50x125 มิลลิเมตร ที่มีตัวอย่างคอนกรีตครึ่งหนึ่ง (แบบหล่อเดิมที่ทำการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต) ซึ่งจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ถูกเทเป็น 2 ชั้นเท่าๆ กัน แต่ละชั้นกระทุ้ง 25 ครั้ง จากนั้นนำตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 1 ชั่วโมง และห่อแบบหล่อด้วยแผ่นพลาสติก หลังจากครบ 24 ชั่วโมง ทำการถอดแบบหล่อ แล้วเก็บตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ไว้ที่อุณหภูมิปกติจนครบอายุการทดสอบที่ 28 วัน ตัวอย่างก่อนการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2ข การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์จะควบคุมอัตราความเร็วของแรงกระทำเท่ากับ 0.30 MPa/s ซึ่งลักษณะการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 3

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 อิทธิพลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอย

กำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตเดิมกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่อายุการบ่ม 28 วัน โดยศึกษาปัจจัยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีการแปรผันปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอยที่มีต่อกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์-มอร์ต้าร์ ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่ากำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้นทุกอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน ตัวอย่างเช่นกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ของ 1.00S0PC, 1.00S5PC, 1.00S10PC และ1.00S15PC เท่ากับ 14.2, 15.4, 18.2 และ 19.8 MPa การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแคลเซียมที่สูงขึ้นช่วยให้มีการทำปฏิกิริยามากขึ้นภายในระบบของจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Parcheco-Torgal et al. [9] ที่ได้มีการรายงานไว้ว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตเดิมกับจีโอโพลิเมอร์สามารถทำปฏิกิริยาซิลิกาและอะลูมินาจากวัสดุตั้งต้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์เกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

(CSH) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (CASH) มากขึ้นที่พื้นผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ส่งผลให้สามารถปรับปรุงกำลังที่พื้นที่เชื่อมต่อกัน ผลการทดสอบของกำลังรับแรงเฉือนอัดสอดคล้องกับผลการทดสอบของกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ดังแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 4 กำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

3.2 อิทธิพลของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน

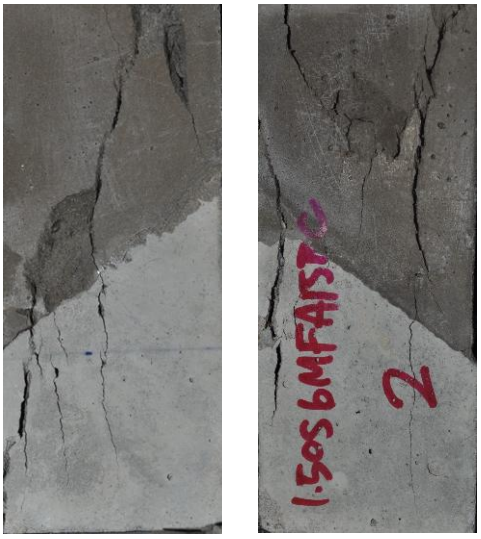
การศึกษาปัจจัยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีการแปรผันอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานต่อกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่ากำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 มีแนวโน้มสูงสุดเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 0 ถึง 10 ตัวอย่างเช่นกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ของ 1.00S10PC, 1.25S10PC และ 1.50S10PC เท่ากับ 18.2, 18.6 และ15.9 MPa อาจเนื่องจากอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 เป็นปริมาณของทรายที่เหมาะสมส่งผลให้มีจีโอโพลิเมอร์มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ (ตารางที่ 4) พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 มีระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็ว ขณะที่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50 มีระยะเวลาการก่อตัวที่ช้ากว่าอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 และ 1.25 ดังแสดงในตารางที่ 4 ส่วนกรณีจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15 พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 มีค่ากำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ดีกว่าอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 และ 1.50 ตัวอย่างเช่นกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ของ 1.00S15PC, 1.25S15PC และ1.50S15PC เท่ากับ 19.8, 19.3 และ 16.8 MPa อาจเนื่องจากจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 เป็นปริมาณของทรายที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.25 และ 1.50 ดังนั้นที่อัตราส่วนดังกล่าวจึงมีความสามารถในการยึดเกาะกับคอนกรีตเดิมได้ดีส่งผลให้มีแนวโน้มของกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีค่าสูงกว่า

3.3 ลักษณะการวิบัติ

เมื่อพิจารณาลักษณะการวิบัติของกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่อายุการบ่ม 28 วัน ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าลักษณะ

การวิบัติของกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ของ 1.00S0PC, 1.00S15PC, 1.25S15PC และ 1.50S15PC สามารถแบ่งลักษณะการวิบัติออกเป็น 2 ลักษณะ คือการวิบัติที่พื้นผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ เนื่องจากความแข็งแรงของคอนกรีตมีมากกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ ได้แก่ 1.00S0PC (รูปที่ 5ก) ขณะที่เมื่อจีโอ-โพลิเมอร์มอร์ต้าร์แทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 15 (1.00S15PC) ดังแสดงในรูปที่ 5ข เกิดการวิบัติแบบเสาคือการแตกร้าวผ่านพื้นที่การเชื่อมต่อกันระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Phoo-ngernkham et al. [14] ที่ได้มีการรายงานไว้ว่าลักษณะการแตกระหว่างคอนกรีตเดิมกับจีโอโพลิเมอร์แบบเสาแสดงถึงการยึดเหนี่ยวที่สูงระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ อีกทั้งจากงานวิจัยดังกล่าวยังได้สรุปเพิ่มเติมไว้ว่าการยึดเกาะที่ดีของจีโอโพลิเมอร์กับคอนกรีตเดิมเป็นการเพิ่มทางเลือกที่น่าสนใจการเลือกใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมเมื่อเปรียบเทียบกับอีพ็อกซี่ แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบถึงอิทธิพลของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่มีผลต่อลักษณะการวิบัติของกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ (รูปที่ 5ข-5ง) พบว่าอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 และ 1.25 มีลักษณะการวิบัติแบบเสามากกว่าอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.50 สอดคล้องกับผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ (รูปที่ 4)

(ก) 1.00S0PC ข) 1.00S15PC



(ค) 1.25S15PC (ง) 1.50S15PC

รูปที่ 5 ลักษณะการวิบัติของกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

4. สรุปผล

จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์-ปอร์ตแลนด์สามารถใช้ทางเลือกในงานวัสดุซ่อมแซมได้ เมื่อพิจารณาค่ากำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ ซึ่งค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้นอาจเนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีความแข็งแรงที่พื้นที่เชื่อมต่อกันและมีความเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างคอนกรีตกับจีโอ-โพลิเมอร์มอร์ต้าร์โดยไม่พบการแยกตัวของพื้นผิวการแตก ขณะที่อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ ซึ่งอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1.00 และ 1.25 สามารถให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนอัดที่ดีทุกปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อาจเนื่องจากปริมาณของทรายดังกล่าวเป็นปริมาณที่เหมาะสมและความเป็นเนื้อเดียวกันส่งผลให้มีความสามารถในการยึดเกาะกับคอนกรีตเดิมได้ดี ดังนั้นจากผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์สามารถสรุปได้ว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และปริมาณของอัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสานที่มีความเหมาะสมสามารถใช้เป็นทางเลือกของวัสดุซ่อมแซมได้เมื่อพิจารณาลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้น โดยกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีค่าอยู่ระหว่าง 15-19 MPa สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานซ่อมแซมประเภทการซ่อมอุดรอยร้าวคอนกรีต หรือการซ่อมแซมผิวหน้าคอนกรีตได้เช่นเดียวกันกับอีพ็อกซี่ซึ่งเป็นวัสดุซ่อมแซมที่มีขายทั่วไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน และสาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ที่อนุเคราะห์วัสดุและเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] J. Davidovits, “Geopolymers : Inorganic polymeric new materials”, Journal of Thermal Analysis 37(8), 1991, pp. 1633-1656.

[2] T. Phoo-ngernkham and S. Hanjisuwan, “Factors of alkali solutions affecting physical properties and microstructure of fly ash geopolymer mortar containing Portland cement”, The Journal of Industrial Technology 10(3), 2014, pp. 61-72.

[3] S. Hanjisuwan, T. Phoo-ngernkham and P. Chindaprasirt, “Properties of fly ash geopolymer paste containing portland cement”, The Journal of Industrial Technology 9(2), 2013, pp. 97-106.

[4] P. Chindaprasirt, T. Chareerat and V. Sirivivatnanon, “Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer”, Cement and Concrete Composites. 29(3), 2007, pp. 24-29.

[5] U. Rattanasak, K. Pankhet and P. Chindaprasirt, "Effect of chemical admixtures on properties of high-calcium fly ash geopolymer". International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials. 18(3), 2011, pp. 364-369.

[6] I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo, A. Fernandez-Jimenez and D.E. MacPhee, "Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram Na_2O-CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O", Cement and Concrete Research 41(9), 2011, pp. 923-931.

[7] A. Palomo, A. Fernández-Jiménez, G Kovalchuk, L.M. Ordoñez and M.C.Naranjo, "OPC-fly ash cementitious systems: Study of gel binders produced during alkaline hydration", Journal of Materials Science 42(9), 2007, pp. 2958-2966.

[8] T. Phoo-ngernkham and T. Sinsiri, "A study on properties of geopolymer mortar made from fly ash incorporated natural zeolite", KMUTT Research and Development Journal 34(1), 2011, pp. 31-44.

[9] F. Pacheco-Torgal, J.P. Castro-Gomes and S. Jalali, "Adhesion characterization of tungsten mine waste geopolymeric binder. Influence of OPC concrete substrate surface treatment", Construction and Building Materials 22(3), 2008, pp. 154-161.

[10] S. Songpiriyakij, T. Pulngern, P. Pungpremtrakul and C. Jaturapitakkul, "Anchorage of steel bars in concrete by geopolymer paste", Materials & Design 32(5), 2011, pp. 3021-3028.

[11] ACI 211.1-91, "Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete:, American Concrete Institute, 1991.

[12] FM 3-C 882, "Florida Test Method for Performance of epoxy-resin systems with concrete by slant shear and compressive strength", In Florida Department of Transportation Standard Specifications for Road and Bridge Construction, 2015.

[13] K.E. Hassan, P.C. Robery and L. Al-Alawi, "Effect of hot-dry curing environment on the intrinsic properties of repair materials", Cement and Concrete Composites 22(6), 2000, pp. 453-458.

[14] T. Phoo-ngernkham, A. Maegawa, N. Mishima, S. Hatanaka and P. Chindaprasirt, "Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA-GBFS geopolymer", Construction and Building Materials 91, 2015, pp. 1-8.