SWU Engineering Journal (2017) 12(1), 106-113
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – มิถุนายน พ.ศ.2560

กำลังอัดของรีแอคทีฟเพาเดอร์คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมควบแน่นและไม่เสริมเส้นใยเหล็ก

Compressive Strength of Densified-Silica Fume-Based Reactive Powder Concrete without Steel Fiber

ชัชวาลย์ พัฒนโยธากุล[1] นิพันธ์ ใหญ่อรุณ[2] นิดา ชัยมูล[3] กริสน์ ชัยมูล[4]*
[1]สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย
จังหวัดมหาสารคาม 44150
[2]กองทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง กรมทางหลวง แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพมหานครฯ 10400
[3]หน่วยวิจัยแหล่งน้ำและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย
จังหวัดมหาสารคาม 44150
[4]หน่วยวิจัยทางด้านวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย
จังหวัดมหาสารคาม 44150
*Corresponding author: Email: k.chaimoon@msu.ac.th

บทคัดย่อ

รีแอคทีฟเพาเดอร์คอนกรีตเป็นคอนกรีตกำลังสูงมากชนิดหนึ่งที่พัฒนาขึ้นโดยมีซิลิกาฟูมไม่ควบแน่นเป็นหนึ่งในวัสดุหลัก แม้ซิลิกาฟูมไม่ควบแน่นจะมีอนุภาคขนาดเล็กมากๆ ทำให้เหมาะที่จะเป็นส่วนผสมรีแอคทีฟเพาเดอร์คอนกรีต แต่ก็เป็นวัสดุที่หายากเพราะฟุ้งกระจายง่ายไม่สะดวกในการขนย้าย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำลังอัดของรีแอคทีฟเพาเดอร์คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมควบแน่นและไม่เสริมเส้นใยเหล็ก การศึกษานี้ใช้อัตราส่วนซิลิกาฟูมต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก (F/C) เท่ากับร้อยละ 20 25 และ 30 และอัตราส่วนสารลดน้ำยิ่งยวดต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก (SP/C) เท่ากับร้อยละ 2.0 2.5 3.0 3.5 และ 4.0 การทดสอบประกอบด้วยการไหลแผ่และกำลังอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน จากผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของรีแอคทีฟเพาเดอร์คอนกรีตขึ้นกับปริมาณสารลดน้ำยิ่งยวดและปริมาณซิลิกาฟูม SP/C ที่เหมาะสมสำหรับ F/C ร้อยละ 20 25 และ 30 เท่ากับ ร้อยละ 3.5 2.5 และ 4.0 โดยให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 1,193 1,140 และ 1,321 ksc ตามลำดับ

คำสำคัญ: คอนกรีตกำลังสูงมาก รีแอคทีฟเพาเดอร์คอนกรีต กำลังอัด ซิลิกาฟูมควบแน่น

ABSTRACT

Reactive powder concrete (RPC) is an ultra-high strength concrete originally developed using un-densified silica fume as a main material. Although the highly refined particles of un-densified silica fume make it suitable for RPC, un-densified silica fume is not commercially available as it is difficult to handle and transport. This research aims to study the compressive strength of the RPC using densified silica fume without steel fiber. In this study, the ratios of silica fume to cement (F/C) of 20%, 25% and 30% by weight and the ratios of superplasticizer to cement (SP/C) of 2.0%, 2.5%, 3.0%, 3.5%, and 4.0% by weight were considered. The flows and the compressive strengths at 3, 7 and 28 days of the RPC were tested. From

the test results, it was found that the compressive strength of the RPC depended on the amounts of superplasticizer and silica fume. The appropriate SP/C for F/C of 20%, 25% and 30% was 3.5%, 2.5%, and 4.0% which gave the 28-day compressive strength of 1,193 1,140, and 1,321 ksc, respectively.

Keyword: ultra-high strength concrete, reactive powder concrete, compressive strength, densified silica fume

1. บทนำ

ในช่วงต้นคริสต์ทศวรรษ 1990 ได้มีการพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงมากชนิดหนึ่งขึ้น มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน 2,000 - 8,000 ksc มีชื่อเรียกว่า รีแอคทีฟเพาเดอร์คอนกรีต (reactive powder concrete, RPC) [1-2] RPC มีคุณสมบัติทางกลและความคงทนที่สูงมาก ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่น RPC จึงกลายเป็นนวัตกรรมที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก หลายๆ ประเทศกำลังหันมาศึกษาวัสดุชนิดนี้ [3-5]

ในการพัฒนา RPC อยู่บนหลักการพื้นฐาน 5 อย่าง [2] คือ (1) การเพิ่มความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneity enhancement) ด้วยเหตุที่การวิบัติของคอนกรีตโดยส่วนใหญ่มักจะพบว่าเกิดจากการแตกร้าวที่ผิวสัมผัสระหว่างหินกับมอร์ต้าร์ ฉะนั้นจึงไม่มีการใส่มวลรวมหยาบหรือหินในส่วนผสม และที่จริงแล้ว RPC จึงเป็นเพียงมอร์ต้าร์ไม่ใช่คอนกรีต (2) การเพิ่มการอัดแน่น (compacted density enhancement) โดยการใช้วัสดุที่มีขนาดคละดีและโดยการใช้ความดันก่อนและระหว่างการก่อตัว (3) การทำให้โครงสร้างจุลภาคดีขึ้น (microstructure enhancement) โดยการบ่มร้อนหลังการแข็งตัว (4) การเพิ่มความเหนียว (ductility enhancement) โดยการใส่เส้นใยเหล็กขนาดเล็กในส่วนผสม และ (5) ยังคงใช้วิธีการผสมและการหล่อที่ใช้ทั่วไป โดยหลักการ 3 อย่างแรกเป็นหลักการใหญ่ที่ทำให้ RPC มีกำลังสูง อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเป็นเนื้อเดียวกันโดยไม่ใส่มวลรวมหยาบในส่วนผสม (หลักการแรก) และการใช้วัสดุที่มีขนาดคละดีในหลักการที่สอง เป็นหัวใจหลักของ RPC ส่วนการใช้ความดันในหลักการที่สอง และการบ่มร้อน (หลักการที่สาม) ขึ้นกับกระบวนการผลิต และเป็นเพียงทางเลือกเท่านั้น

ตามหลักการแล้ว RPC ผลิตจากส่วนผสมหลัก 5 อย่าง คือ (1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มี C_3A ต่ำ เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2 และ 5 (2) ทรายควอรตซ์ละเอียด (fine quartz sand) ขนาด 0.15 – 0.60 mm (3) น้ำ (4) ซิลิกาฟูมไม่ควบแน่น (un-densified silica fume) และ (5) สารลดน้ำยิ่งยวด (superplasticizer) ในกรณีที่ต้องการเพิ่มความเหนียวจะใส่เส้นใยเหล็ก (steel fiber) เข้าไปด้วย

คุณสมบัติของ RPC ขึ้นกับวัสดุและส่วนผสม อย่างไรก็ตามวัสดุบางอย่าง เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มี C_3A ต่ำ และซิลิกาฟูมไม่ควบแน่น เป็นวัสดุที่ไม่ได้มีจำหน่ายโดยทั่วไป โดยเฉพาะซิลิกาฟูมไม่ควบแน่นเนื่องจากมีขนาดอนุภาคเล็กมาก ฟุ้งกระจายง่าย และไม่สะดวกในการขนส่ง

ในต่างประเทศ เช่น นิวซีแลนด์ [6] และ ฮ่องกง [7] ได้มีการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ปริมาณสารลดน้ำยิ่งยวด อุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มร้อน ต่อคุณสมบัติของ RPC โดยใช้วัสดุที่มีในประเทศ และในหลายประเทศมีการประยุกต์ใช้ RPC แล้ว ในประเทศไทยยังไม่มีการผลิตหรือประยุกต์ใช้ RPC เนื่องจากงานวิจัยยังคงมีอยู่อย่างจำกัด [8-11] โดยเฉพาะอิทธิพลของปริมาณสารลดน้ำยิ่งยวดและปริมาณซิลิกาฟูม แม้จะมีรายงานใน [8] แต่ก็เป็นการศึกษาที่ใช้ปริมาณสารลดน้ำยิ่งยวดคงที่ค่าหนึ่งกับปริมาณซิลิกาฟูมที่คงที่ค่าหนึ่งเท่านั้น งานวิจัยนี้เป็นการรายงานผลการศึกษากำลังอัดของรีแอคทีฟเพาเดอร์คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมควบแน่นและไม่มีการใส่เส้นใยเหล็ก โดยมีปริมาณสารลดน้ำยิ่งยวดและปริมาณซิลิกาฟูมเป็นตัวแปรที่ศึกษา ต่อจากที่ได้มีการรายงานผลการศึกษาเบื้องต้นใน [11]

2. การทดสอบ

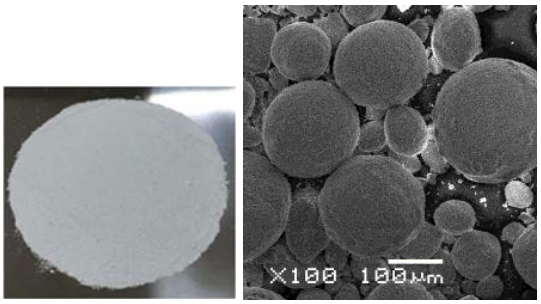
2.1 วัสดุ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และซิลิกาฟูมที่ใช้

องค์ประกอบทางเคมีหรือคุณสมบัติ	วัสดุ	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1	ซิลิกาฟูมควบแน่น
SiO_2	17.50 %	96.50 %
Al_2O_3	4.08 %	0.12 %
Fe_2O_3	3.16 %	<0.01 %
CaO	62.40 %	0.64 %
SO_3	3.59 %	0.22 %
ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเชิงปริมาตร	15.40 μm	80.27 μm

วัสดุ 5 อย่างที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ RPC ประกอบด้วย (1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 (2) ทรายแม่น้ำคัดขนาดให้มีขนาดระหว่าง 0.15 - 0.60 mm ซึ่งมีค่าโมดูลัสความละเอียด (fineness modulus, F.M.) ประมาณ 1.68 (3) น้ำประปา (4) ซิลิกาฟูมควบแน่นที่ได้จากบริษัทผู้ขายในประเทศซึ่งนำเข้าซิลิกาฟูมจากต่างประเทศ และ (5) สารลดน้ำยิ่งยวดประเภทโพลีคาร์บอกซิเลต (polycarboxylate) ซึ่งจัดอยู่ในประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C494 [12] ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบหลักทางเคมีซึ่งวิเคราะห์โดยวิธี x-ray fluorescence (XRF) spectrometry และขนาดอนุภาคที่วิเคราะห์ด้วยวิธี laser diffraction ของปูนซีเมนต์และซิลิกาฟูม ซิลิกาฟูมที่ใช้มี SiO_2 เท่ากับร้อยละ 96.50 มากกว่าร้อยละ 85 เป็นไปตามข้อกำหนดของซิลิกาฟูมสำหรับงานคอนกรีตที่ระบุใน ASTM C1240 [13]

รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างของซิลิกาฟูมและลักษณะอนุภาคที่กำลังขยาย 100 เท่าจากกล้อง scanning electron microscopy (SEM) โดยลักษณะอนุภาคของซิลิกาฟูมเป็นลักษณะควบแน่นคืออนุภาคจับรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเชิงปริมาตรใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ประมาณ 5 เท่า รูปร่างของอนุภาคส่วนใหญ่เป็นทรงกลมที่สมบูรณ์และพื้นผิวขรุขระเล็กน้อย



รูปที่ 1 ตัวอย่างและลักษณะอนุภาคของซิลิกาฟูมที่ใช้

2.2 อัตราส่วนผสม

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสม RPC

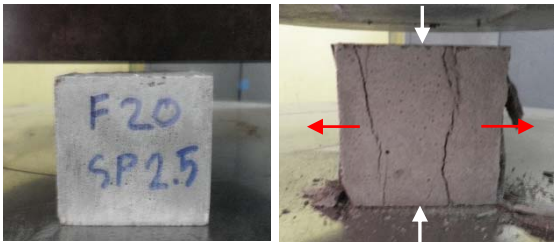
วัสดุ	น้ำหนัก (kg/m^3)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1	935
ทรายแม่น้ำสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง	1030
น้ำ	215*
ซิลิกาฟูมควบแน่น	187.0, 233.8, 280.5
สารลดน้ำยิ่งยวด	18.7, 23.4, 28.0, 32.7, 37.4

* ไม่รวมปริมาณน้ำที่มีในสารลดน้ำยิ่งยวดและในทรายสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง

อัตราส่วนผสม RPC แสดงในตารางที่ 2 โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนัก คือ อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ (S/C) คงที่ประมาณ 1.1 ทรายที่ใช้ในส่วนผสมอยู่ในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) คงที่ประมาณ 0.23 ไม่รวมปริมาณน้ำที่มีในสารลดน้ำยิ่งยวดและในทรายสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง อัตราส่วนผสมดังกล่าวได้มาจากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [2, 6, 8] และจากการศึกษาเบื้องต้น [10-11] สำหรับอัตราส่วนซิลิกาฟูมต่อปูนซีเมนต์ (F/C) ที่พิจารณาเท่ากับ 0.20 0.25 และ 0.30 หรือร้อยละ 20 25 และ 30 ตามลำดับ ทั้งนี้ ร้อยละ 25 เป็นค่าที่แนะนำให้ใช้สำหรับ RPC [2] และอัตราส่วนสารลดน้ำยิ่งยวดต่อ

ปูนซีเมนต์ (SP/C) ที่พิจารณาเท่ากับ 0.020 0.025 0.030 0.035 และ 0.040 หรือร้อยละ 2.0 2.5 3.0 3.5 และ 4.0 ตามลำดับ

2.3 การเตรียมตัวอย่างทดสอบและวิธีทดสอบ



รูปที่ 2 ตัวอย่างการทดสอบกำลังอัดและลักษณะการแตกร้าว

ในการเตรียมตัวอย่างทดสอบใช้วิธีการที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้น [11] ซึ่งวิธีการผสม RPC ได้แนวทางจากวิธีการผสมที่รายงานใน [6] เริ่มด้วยการผสมปูนซีเมนต์และซิลิกาฟูมด้วยเครื่องผสมมอร์ต้าร์ แล้วค่อยๆ เติมส่วนผสมของน้ำและสารลดน้ำยิ่งยวดที่เตรียมไว้ก่อนประมาณร้อยละ 75 ของทั้งหมดลงในเครื่องผสม แล้วจึงใส่ทรายลงในเครื่องผสม ผสมสักระยะแล้วค่อยเทส่วนผสมของน้ำและสารลดน้ำยิ่งยวดส่วนที่เหลือลงไป ผสมต่อจนได้ RPC ที่มีส่วนผสมเข้ากันดี แล้วทำการทดสอบค่าการไหลแผ่ตามมาตรฐาน ASTM C 1437 [14] ก่อนเท RPC ลงในแบบหล่อรูปลูกบาศก์ขนาด 5 cm x 5 cm x 5 cm แล้วทำการเขย่าด้วยโต๊ะสั่นสะเทือน 3 ครั้งๆ ละ 10 วินาที หลังการเทลงแบบหล่อ ใช้แผ่นพลาสติกหุ้มทั้งแบบหล่อเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นของส่วนผสม หลังจากนั้น 24 ชั่วโมง จึงแกะตัวอย่างทดสอบออกจากแบบหล่อ แล้วบ่มโดยการแช่ตัวอย่างทดสอบในอ่างน้ำภายในห้องปฏิบัติการ จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบมีอายุครบตามการทดสอบ การทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน ทำตามมาตรฐาน ASTM C109/ C109M [15] รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างการทดสอบกำลังอัดและลักษณะการแตกร้าว จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่ารอยแตกร้าวเกิดขึ้นในแนวที่เกือบขนานกับแนวแรงอัดที่กระทำ นั้นแสดงว่าก้อนตัวอย่างวิบัติเนื่องจากแรงดึง เพราะระนาบที่ขนานกับแรงอัดจะเป็นระนาบที่เกิดความเค้นดึงสูงสุด ลักษณะการวิบัติเช่นนี้เป็นพฤติกรรมของวัสดุที่แข็งแต่เปราะ

3. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

ตารางที่ 3 ถึง ตารางที่ 5 แสดงผลการทดสอบค่าการไหลแผ่และกำลังอัดเฉลี่ยที่อายุ 3 7 และ 28 วัน และรูปที่ 3 (ก) ถึง 3 (ค) แสดงลักษณะการพัฒนากำลังอัดตามอายุ เมื่อใช้อัตราส่วนซิลิกาฟูมต่อปูนซีเมนต์ (F/C) ร้อยละ 20 25 และ 30 ตามลำดับ ค่ากำลังอัดเฉลี่ยได้จากการทดสอบตัวอย่าง 4 ก้อน แต่เลือกค่ามาเพียง 3 ค่าเพื่อหาค่าเฉลี่ย โดย 3 ค่าที่เลือกเป็นค่าที่ทำให้สัมประสิทธิ์ของความแปรปรวน (coefficient of variation, COV) มีค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้ค่า COV เท่ากับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) หารด้วยค่าเฉลี่ย

จากผลการทดสอบการไหลแผ่จะเห็นได้ว่า ด้วยผลของสารลดน้ำยิ่งยวดซึ่งทำหน้าที่เพิ่มปริมาณน้ำอิสระในส่วนผสม เป็นผลให้ค่าการไหลแผ่มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณสารลดน้ำยิ่งยวด โดยค่าการไหลแผ่มีค่าอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 103 ถึงร้อยละ 148 มีค่าค่อนข้างสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่แนะนำสำหรับมอร์ต้าร์ทั่วไปตามมาตรฐาน ASTM C 1437 [14] ซึ่งแนะนำว่าควรมีค่าระหว่างร้อยละ 105 ถึงร้อยละ 115 เช่นเดียวกับที่รายงานใน [11]

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบค่าการไหลแผ่และกำลังอัดเมื่อใช้ F/C ร้อยละ 20

SP/C	การไหลแผ่	กำลังอัดเฉลี่ย (ksc)		
		3 วัน	7 วัน	28 วัน
2.0 %	110 %	563	512	716
2.5 %	135 %	664	619	644
3.0 %	136 %	890	933	1,007
3.5 %	139 %	836	1,032	1,193
4.0 %	148 %	969	959	1,126

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบค่าการไหลแผ่และกำลังอัดเมื่อใช้ F/C ร้อยละ 25

SP/C	การไหลแผ่	กำลังอัดเฉลี่ย (ksc)		
		3 วัน	7 วัน	28 วัน
2.0 %	113 %	770	864	1,034
2.5 %	114 %	783	796	1,140
3.0 %	139 %	891	811	1,038
3.5 %	141 %	830	891	990
4.0 %	144 %	730	850	976

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบค่าการไหลแผ่และกำลังอัดเมื่อใช้ F/C ร้อยละ 30

SP/C	การไหลแผ่	กำลังอัดเฉลี่ย (ksc)		
		3 วัน	7 วัน	28 วัน
2.0 %	103 %	753	683	928
2.5 %	114 %	805	863	994
3.0 %	124 %	621	812	1,120
3.5 %	140 %	709	933	1,007
4.0 %	148 %	729	953	1,321

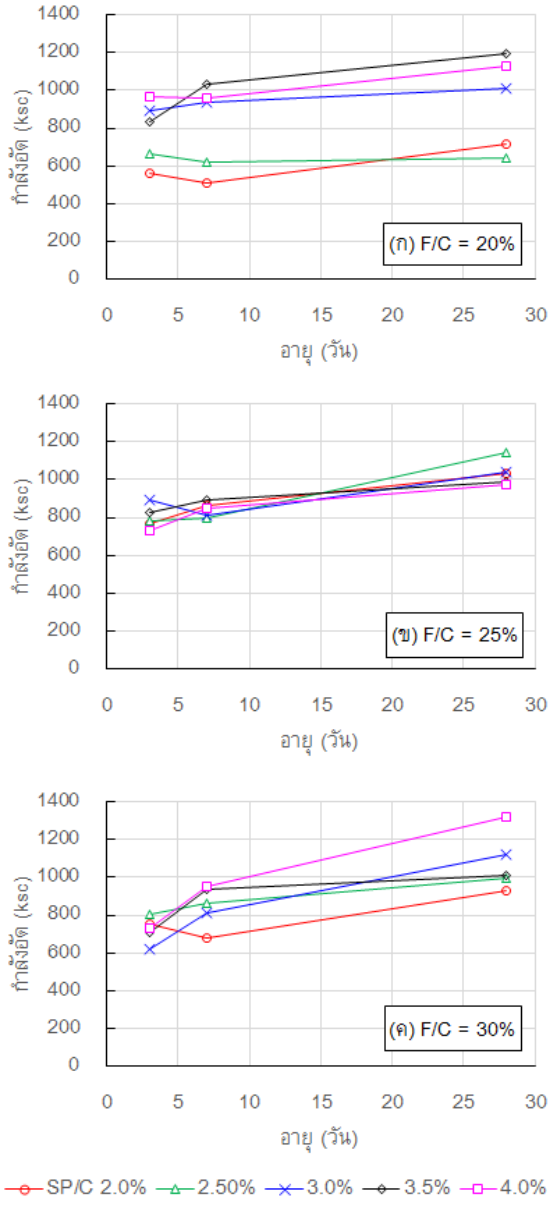
จากผลการทดสอบกำลังอัดในภาพรวมพบว่ากำลังอัดของ RPC ขึ้นกับปริมาณสารลดน้ำยิ่งยวดและปริมาณซิลิกาฟูมในส่วนผสม สอดคล้องกับที่รายงานใน [8, 11] ทั้งนี้ปริมาณสารลดน้ำยิ่งยวดที่เหมาะสมขึ้นกับปริมาณซิลิกาฟูมที่ใช้ สารลดน้ำยิ่งยวดช่วยให้ RPC ซึ่งใช้ค่า W/C ที่ต่ำมากยังคงมีความสามารถในการทำงานได้ดี ด้วยการลดความต้องการปริมาณน้ำของคอนกรีต อย่างไรก็ตาม RPC ก็ยังใช้ซิลิกาฟูมที่มีอนุภาคละเอียดมากซึ่งเมื่อแตกตัวจะมีอนุภาคเล็กกว่าซีเมนต์ อนุภาคที่เล็กนั้นจะช่วยอุดช่องว่างในวัสดุและทำให้วัสดุมีความหนาแน่นสูง (high packing density) อันทำให้ช่วยลดความต้องการน้ำระหว่างช่องว่างด้วยและช่วยเพิ่มกำลังอัด แต่การแตกตัวของอนุภาคซิลิกาฟูมนั้นก็ขึ้นกับสารลดน้ำยิ่งยวด [16] ดังนั้นคุณสมบัติของ RPC จึงขึ้นกับผลกระทบโดยรวม (combined effect) ของปริมาณสารลดน้ำยิ่งยวดและปริมาณซิลิกาฟูมที่ใช้ สำหรับแต่ละปริมาณซิลิกาฟูมที่ใช้จะมีปริมาณสารลดน้ำยิ่งยวดที่เหมาะสมดังรายละเอียดด้านล่าง อนึ่งแม้ตามทฤษฎีวิชาการของคอนกรีตกำลังอัดของคอนกรีตจะต้องเป็นไปตามอายุของการบ่มในน้ำ แต่ในบางอัตราส่วนผสมซึ่งไม่ได้เลือกเป็นส่วนผสมที่เหมาะสม พบว่าให้ค่ากำลังอัดไม่ได้เพิ่มขึ้นตามอายุ ซึ่งผลการทดสอบในลักษณะนี้ก็พบว่ามีการรายงานใน [6] เช่นกัน ผลกระทบโดยรวมของปริมาณสารลดน้ำยิ่งยวดและปริมาณซิลิกาฟูมอาจจะเป็นสาเหตุได้ เนื่องจากผลกระทบหนึ่งของสารลดน้ำยิ่งยวดต่อคอนกรีตก็คือช่วยให้กำลังอัดในช่วงต้นสูง

เมื่อใช้ F/C ร้อยละ 20 จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า SP/C ร้อยละ 3.5 ให้กำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วันสูงที่สุดเท่ากับ 1,032 และ 1,193 ksc ตามลำดับ ในขณะที่ SP/C ร้อยละ 4.0 ให้กำลังอัดที่อายุ 3 วันสูงที่สุดเท่ากับ 969 ksc ดั้งนั้น SP/C ร้อยละ 3.5 น่าจะเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดทั้งในด้านกำลังอัดและค่าใช้จ่าย ทั้งนี้ SP/C ร้อยละ 3.5 ให้กำลังอัดที่อายุ 3 วันเท่ากับ 836 ksc น้อยกว่าที่ได้จาก SP/C ร้อยละ 4.0 เท่ากับ 133 ksc หรือน้อยกว่าประมาณร้อยละ 13.72

เมื่อใช้ F/C ร้อยละ 25 จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่า SP/C ร้อยละ 2.5 ให้กำลังอัดที่อายุ 28 สูงที่สุดเท่ากับ 1,140 ksc ในขณะที่ SP/C ร้อยละ 3.5 ให้กำลังอัดที่อายุ 7 สูงที่สุดเท่ากับ 891 ksc ดั้งนั้น SP/C ร้อยละ 2.5 น่าจะเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดทั้งในด้านกำลังอัดที่อายุ 28 วันและค่าใช้จ่าย ทั้งนี้ SP/C ร้อยละ 2.5 ให้กำลังอัดที่อายุ 3 และ 7 วันเท่ากับ 783 และ 796 ksc น้อยกว่าที่ได้จาก SP/C ร้อยละ 3.5 เท่ากับ 47 และ 95 ksc หรือน้อยกว่าประมาณร้อยละ 5.66 และ 10.66 ตามลำดับ

เมื่อใช้ F/C ร้อยละ 30 จากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่า SP/C ร้อยละ 4.0 ให้กำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วันสูงที่สุดเท่ากับ 953 และ 1,321 ksc ตามลำดับ ในขณะที่ SP/C ร้อยละ 2.5 ให้กำลังอัดที่อายุ 3 วันสูงที่สุดเท่ากับ 805 ksc ดั้งนั้น SP/C ร้อยละ 4.0 น่าจะเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดในด้านกำลังอัด ทั้งนี้ SP/C ร้อยละ 4.0 ให้กำลังอัดที่อายุ 3 วันเท่ากับ 729 ksc น้อยกว่าที่ได้จาก SP/C ร้อยละ 2.5 เท่ากับ

76 ksc หรือน้อยกว่าประมาณร้อยละ 9.44 ทั้งนี้เพื่อยืนยันผลการทดสอบ ได้ทำการทดสอบที่ SP/C ร้อยละ 4.5 เพิ่มเติม พบว่า RPC มีค่าการไหลแผ่มากกว่าร้อยละ 148 แต่ที่อายุ 3 วัน RPC ไม่แข็งตัว และมีกาลังอัดเฉลี่ยที่อายุ 7 และ 28 วัน เท่ากับ 330 และ 1145 ksc ตามลำดับ น้อยกว่ากำลังอัดที่ได้จากการใช้ SP/C ร้อยละ 4.0



รูปที่ 3 ลักษณะการพัฒนากำลังอัดตามอายุ

นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความแตกต่างของกำลังอัดที่แต่ละอายุ พบว่า เมื่อใช้ F/C ร้อยละ 20 กำลังอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน มีความแตกต่างกันไม่มากกว่า 406 520 และ 549 ksc ตามลำดับ เมื่อใช้ F/C ร้อยละ 25 กำลังอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน มีความแตกต่างกันไม่มากกว่า 161 95 และ 164 ksc ตามลำดับ และเมื่อใช้ F/C ร้อยละ 30 กำลังอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน มีความแตกต่างกันไม่มากกว่า 184 270 และ 393 ksc ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ F/C ร้อยละ 25 ปริมาณสารลดน้ำยิ่งยวดมีผลต่อกำลังอัดที่แต่ละอายุน้อยลงเมื่อเทียบกับเมื่อใช้ F/C ร้อยละ 20 และ 30 โดยจะสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบรูปที่ 3 (ก) ถึง 3 (ค) ทั้งนี้อาจจะเป็นผลเนื่องจากปริมาณซิลกาฟูม F/C ร้อยละ 25 เป็นปริมาณที่พอดีต่อการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ $Ca(OH)_2$ ที่เป็นของเหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น [2]

4. สรุปผล

จากผลการศึกษากำลังอัดของ RPC ที่ใช้ซิลิกาฟูมควบแน่นและไม่เสริมเส้นใยเหล็ก ซิลิกาฟูมควบแน่นมีลักษณะจับรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเชิงปริมาตรใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ประมาณ 5 เท่า RPC ที่ศึกษาใช้อัตราส่วนซิลิกาฟูมต่อปูนซีเมนต์ (F/C) ร้อยละ 20 25 และ 30 และอัตราส่วนสารลดน้ำยิ่งยวดต่อปูนซีเมนต์ (SP/C) ร้อยละ 2.0 2.5 3.0 3.5 และ 4.0 ทุกส่วนผสมใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่เท่ากับ 1.1 และ 0.23 ตามลำดับ และบ่มตัวอย่างทดสอบโดยการแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องจนอายุครบตามการทดสอบ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

(1) RPC มีค่าการไหลแผ่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มปริมาณสารลดน้ำยิ่งยวด โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 103 ถึงร้อยละ 148

(2) กำลังอัดของ RPC ขึ้นกับปริมาณสารลดน้ำยิ่งยวดและปริมาณซิลิกาฟูม โดยปริมาณสารลดน้ำยิ่งยวดที่เหมาะสมขึ้นกับปริมาณซิลิกาฟูม และเมื่อพิจารณาจากกำลังอัดและการพัฒนากำลังอัดตามอายุ พบว่า SP/C ที่เหมาะสมสำหรับ F/C ร้อยละ 20 25 และ 30 เท่ากับ ร้อยละ 3.5 2.5 และ 4.0

โดยให้กำลังอัดที่อายุ 28 วันเท่ากับ 1,193 1,140 และ 1,321 ksc ตามลำดับ

(3) กำลังอัดของ RPC ที่แต่ละอายุ ขึ้นกับปริมาณสารลดน้ำยิ่งยวดน้อยลงเมื่อใช้ F/C ร้อยละ 25 โดยพบว่า เมื่อใช้ F/C ร้อยละ 25 กำลังอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน มีความแตกต่างกันไม่มากกว่า 161 95 และ 164 ksc ตามลำดับ ในขณะที่ใช้ F/C ร้อยละ 20 และ 30 กำลังอัดที่แต่ละอายุมีความแตกต่างกันอยู่ในช่วง 406 ถึง 549 ksc และ 184 ถึง 393 ksc ตามลำดับ

เพื่อเป็นข้อมูลและแนวทางในการประยุกต์ใช้ RPC ในประเทศควรมีการศึกษาผลกระทบของปัจจัยอื่นๆ ด้วยโดยเฉพาะการใส่เส้นใยเหล็ก ซึ่งจะมีผลต่อการไหลแผ่ แม้ RPC จะมีต้นทุนต่อหน่วยแพงเมื่อเทียบกับคอนกรีตทั่วไปที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่ามาก แต่ด้วยความเป็นเนื้อเดียวกันและความเหนียวของ RPC ที่มากกว่าก็ทำให้ RPC มีคุณสมบัติที่อาจเทียบเคียงได้กับเหล็กและเป็นวัสดุทางเลือกใหม่

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนในการทำวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณ บริษัท ดับบลิว. อาร์. เกรซ (ไทยแลนด์) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] M. Cheyrezy, V. Maret and L. Frouin, "Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete)," *Cement and Concrete Research*, vol. 25, no.7, pp. 1491-1500, 1995.

[2] P. Richard and M. Cheyrezy, “Composition of reactive powder concretes,” *Cement and Concrete Research*, vol. 25, no.7, pp. 1501-1511, 1995.

[3] J. Wen-yu, A. Ming-zhe, Y. Gui-ping and W. Jun-min. “Study on reactive powder concrete used in the sidewalk system of the Qinghai-Tibet railway bridge”. *Proceedings of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*. 20/May/2004. Beijing, China: pp. 333-338, (2004).

[4] Y. Tanaka, H. Musha, S. Tanaka and M. Ishida. “Durability performance of UFC sakata-mira footbridge under sea environment”. *Proceedings of the 7th International Conference on Fracture Mechanics Concrete and Concrete Structures*. 23-28/May/2010. Jeju, Korea: pp. 1648-1654, (2010).

[5] M. Rebentrost and R. Annan. (2012, Jan. 30). Design of two reactive powder concrete bridges, [Online], Available: http://www.abece.com.br/web/restrito/restrito/Pdf/CH044.pdf.

[6] N. P. Lee and D. H. Chrisholm. *Reactive Powder Concrete*. Study Report SR 146. Branz Ltd, Judgeford, New Zealand, (2005).

[7] N. K. Man. *Studying the Production Process and Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete Made Using Local Available Materials*. Master of Philosophy. Building and Construction. City University of Hong Kong, (2009).

[8] บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ ธวัชชัย คงศักดิ์ตระกูล. *การพัฒนารีแอคทีฟเพาเดอร์คอนกรีต*. รายงานฉบับสมบูรณ์ RDG4850044. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยและบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน), (2549).

[9] เอกพล บุญมาเลิศ. *การพัฒนารีแอคทีฟเพาเดอร์คอนกรีต*. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. วิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, (2554).

[10] K. Prasertlar and K. Chaimoon, “Properties of Reactive Powder Concrete Using Densified Silica Fume.” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 405-408, pp. 2928-2932, 2013.

[11] C. Martlerng, T. Tongluan, K. Prasertlar and K. Chaimoon, “Effects of Silica Fume and Superplasticizer Contents on Compressive Strength of Reactive Powder Concrete.” *RMUTI Journal Special Issue 1 2015: The Sixth International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB VI)*, pp. 94-97, 2015.

[12] American Society for Testing and Materials, “ASTM C494/C494M: Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete,” *ASTM International*, Philadelphia, USA, 2016.

[13] American Society for Testing and Materials, “ASTM C1240: Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures,” *ASTM International*, Philadelphia, USA, 2015.

[14] American Society for Testing and Materials, “ASTM C1437: Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortars,” *ASTM International*, Philadelphia, USA, 2001.

[15] American Society for Testing and Materials, “ASTM C109/ C109M: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars,” *ASTM International*, Philadelphia, USA, 2002.

[16] J. Plank, C. Schroefl, M. Gruber, M. Lesti and R. Sieber, "Effectiveness of Polycarboxylate Superplasticizers in Ultra-High Strength Concrete: The Importance of PCE Compatibility with Silica Fume," *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 7, no.1, pp. 5-12, 2009.