คุณสมบัติพื้นฐานของ Reactive Powder Concrete

บุรฉัตร ฉัตรวีระ [1] ธวัชชัย คงศักดิ์ตระกูล [2] และ ณรงค์ศักดิ์ มากุล [3]

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต คลองหลวง ปทุมธานี 12121

รับเมื่อ 14 กุมภาพันธ์ 2550 ตอบรับเมื่อ 5 กันยายน 2550

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการออกแบบและพัฒนาคอนกรีตชนิด Reactive Powder โดยคุณสมบัติที่ทำการศึกษาประกอบด้วย คุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกล สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ ความสามารถในการลดน้ำ และระยะเวลาการก่อตัว นอกจากนั้นคุณสมบัติทางกลได้แก่ กำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน จากผลการทดสอบ พบว่าปริมาณสารลดน้ำที่เหมาะสมในการผลิต Ultra High Strength Concrete (UHSC) ที่ทำให้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีค่าสูงสุดร้อยละ 6 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และปริมาณซิลิกาฟูมที่เหมาะสมในการผลิต UHSC ร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ นอกจากนั้นค่าอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ที่เหมาะสมในการผลิต Reactive Powder Concrete มีค่าเท่ากับ 0.23

[1] *รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา*

[2] *วิศวกร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา*

[3] *นักวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา*

Basic Properties of Reactive Powder Concrete

Burachat Chatveera [1], Thawatchai Kongsaktrakoon [2], and Narongsak Makul [3]

Thammasat University, Rangsit Center, Khlong Luang, Pathum Thani 12121

Received 14 February 2007 ; accepted 5 September 2007

Abstract

The objective of this research was to study the guidelines for the design and development of reactive powder concrete. The properties studied were physical and mechanical properties of reactive powder concrete. The physical properties were water reducing ability and setting time. Moreover, the mechanical properties tested were compressive strength at the ages of 1, 3, 7 and 28 days. From preliminary test results, it was found that the optimal water reducing agent content for producing the ultra high strength concrete (UHSC) which caused the highest compressive strength of concrete at the age of 28 days was 6% by weight of cement. The suitable content of silica fume was 25% by weight of cement. Furthermore, the optimal water-to-cement ratio (w/c) for producing the reactive powder concrete (RPC) was 0.23.

[1] *Associate Professor Dr., Department of Civil Engineering.*

[2] *Engineer, Department of Civil Engineering.*

[3] *Researcher, Department of Civil Engineering.*

1. บทนำ

คอนกรีตกำลังสูงเริ่มคิดและถูกนำมาใช้งานก่อสร้างทางหลวงและในโครงสร้างที่อยู่นอกชายฝั่งและโครงสร้างสะพานที่มีช่วงความยาวมากในสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1965 และได้มีการบัญญัติความหมายของคอนกรีตสมรรถนะสูง (High Performance Concrete) อย่างเป็นทางการขึ้นโดย American Concrete Institute (ACI) และหนึ่งในชนิดของคอนกรีตสมรรถนะสูงคือ Reactive Powder Concrete

Reactive Powder Concrete คือ วัสดุที่มีซีเมนต์เป็นตัวประสานมวลรวมต่างๆ โดยใช้องค์ความรู้ทางด้านโครงสร้างระดับจุลภาคของคอนกรีตร่วมกับความรู้ทางด้านเคมีของปูนซีเมนต์และคอนกรีตโดยหลักการของ RPC คือ

1. ทำให้คอนกรีตเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) ให้มากที่สุดโดยไม่ใช้มวลรวมหยาบ

2. ปรับปรุงความหนาแน่นอัดแน่นโดยการจัดสัดส่วนผสมให้แน่นที่สุดโดยใช้วิธีการออกแบบคอนกรีตแบบใหม่

3. ปรับปรุงโครงสร้างระดับจุลภาคเพื่อเพิ่มความคงทนในระยะยาว โดยการให้ความร้อนหลังการก่อตัวซึ่งช่วยทำให้การหดตัวน้อยลง

4. ปรับปรุงความเหนียวให้ดีขึ้นโดยการผสมเส้นใยเหล็กขนาดเล็ก

ผู้คิดค้นวิจัย RPC เป็นคณะแรกคือ คณะวิจัยของ HDR Engineering Inc ซึ่งเป็นบริษัทผู้ก่อตั้งบริษัท Bouygues โดยเริ่มทำการศึกษาตั้งแต่ช่วงต้น ค.ศ. 1990 และในปี ค.ศ. 1995 Richard และ Cheyrezy (1995) ได้รายงานผลการพัฒนา Reactive Powder Concrete ดังมีสัดส่วนผสมดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของ RPC โดยน้ำหนักเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์

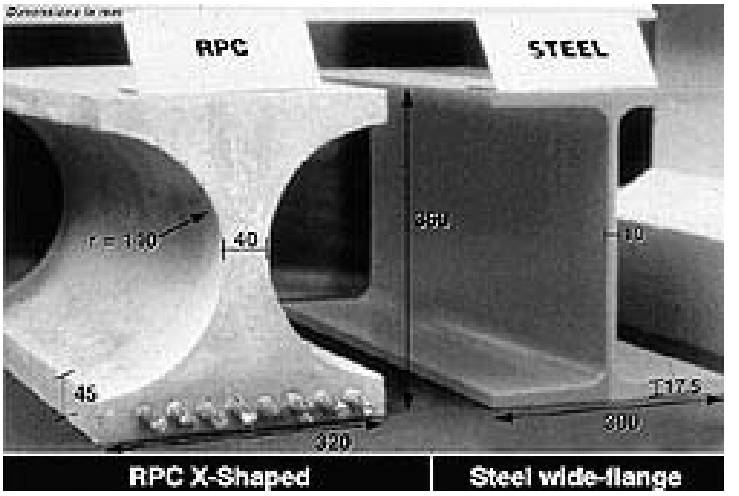
Compositions	RPC 200				RPC 800	
	Non fibered		Fiber		Silica Aggregates	Steel Aggregates
Portland Cement	1	1	1	1	1	1
Silica fume	0.25	0.23	0.25	0.23	0.23	0.23
Sand 150 - 600 μm	1.1	1.1	1.1	1.1	0.5	-
Crushed quartz d_{50} = 10 μm	-	0.39	-	0.39	0.39	0.39
Superplasticizer (Polyacrylate)	0.016	0.019	0.016	0.019	0.019	0.019
Steel fiber L = 12 mm	-	-	0.175	0.175	-	-
Steel fiber L = 3 mm	-	-	-	-	0.63	0.63
Steel Aggregates μ 800 μm	-	-	-	-	-	1.49
Water	0.15	0.17	0.17	0.19	0.19	0.19
Compacting pressure	-	-	-	-	50 MPa	50 MPa
Heat treatment temperature	20 °C	90 °C	20 °C	90 °C	250-400 °C	250-400 °C

โดยปกติ RPC 200 มีกำลังอัดสูงถึง 1,700 - 2,300 กก./ซม.^{2} กำลังดัดอยู่ระหว่าง 300-600 กก./ซม.^{2} ในขณะที่ RPC 800 ที่ใช้ทรายเป็นส่วนผสมมีกำลังรับแรงอัดสูงอยู่ระหว่าง 4,900-6,800 กก./ซม.^{2} ส่วน RPC 800 ที่ใช้เส้นใยเหล็กเป็นส่วนผสมมีกำลังรับแรงอัดสูงถึง 6,500 - 8,100 กก./ซม.^{2} RPC 800 มีกำลังรับแรงดัดอยู่ระหว่าง 450 - 1,410 กก./ซม.^{2}

ต่อจากนั้นได้งานวิจัยของ Collepardi และคณะ [1] ได้ศึกษาจนสามารถที่จะผลิต Reactive Powder Concrete ที่มีกำลังต้านทานแรงอัดสูงกว่า 1,000 กก./ซม.^{2} ขึ้นไป

และมีกำลังต้านทานแรงดัดมากกว่า 160 กก./ซม.^{2} ขึ้นไป สาเหตุที่ทำให้คุณสมบัติทางกลของ RPC จากการศึกษาของ Collepardi มีกำลังแตกต่างจาก Richard และ Cheyrezy [2] ซึ่งสามารถพัฒนา Reactive Powder Concrete โดยส่วนผสมที่ใช้ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 1,000 กก. ทรายละเอียดและควอทซ์บด 900-1000 กก. ซิลิกาฟูม 230 กก. น้ำ 150-180 กก. และเส้นใยเหล็กละเอียด 630 กก. ร่วมกับน้ำยา ลดน้ำอย่างยิ่งยวด ตัวอย่างถูกอัดให้แน่นด้วยวิธีทางกลและบ่มที่อุณหภูมิ 400 °ซ ซึ่งทำให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังต้านทานแรงอัดสูงถึง 6,800 กก./ซม.^{2} และกำลังต้านทานแรงดัดสูงถึง 1,000 กก./ซม.^{2} และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น 7.5 x 10^5 กก./ซม.^{2} นั้น เนื่องจากได้ใช้มวลรวมหยาบแทนที่ทรายคัดขนาดเพื่อลดความยุ่งยากในขบวนการผลิตและลดต้นทุนการผลิต RPC ลง และยังได้พยายามใช้เส้นใยเหล็กที่มีขนาดใกล้เคียงกับที่ใช้ในการผลิต steel fiber reinforced concrete (SFRC) ทั่วไปซึ่งสามารถหาวัสดุได้ง่ายกว่าและราคาถูกกว่ามาก

แม้ว่า RPC จะเป็นคอนกรีตที่ได้รับการพัฒนาคุณภาพในหลายๆ ด้านแต่เนื่องจาก RPC มีต้นทุนการผลิตที่สูงจึงไม่คุ้มค่าที่จะนำมาใช้แทนคอนกรีตธรรมดา ในขณะเดียวกัน RPC มีคุณสมบัติทางกลหลายด้านที่ใกล้เคียงกับเหล็กจึงเกิดความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ที่จะนำ RPC มาใช้แทนโครงสร้างเหล็ก [3] ได้แสดงให้เห็นถึงหน้าตัดเปรียบเทียบระหว่างคานคอนกรีตอัดแรงที่ใช้ RPC ซึ่งสามารถรับแรงดัดได้เท่ากับคานเหล็กที่มีความลึกเท่ากัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 1



รูปที่ 1 หน้าตัดของคาน RPC อัดแรงเทียบกับคานเหล็กที่มีกำลังรับแรงดัดเท่า ๆ กัน

จากวิวัฒนาการด้านงานโครงสร้างที่ผ่านมาวัสดุประเภทคอนกรีตและวัสดุที่ทำจากปูนซีเมนต์ถูกใช้เพื่อรับกำลังอัดเท่านั้น แต่ RPC ได้อยู่เหนือข้อจำกัดนี้และได้นำเสนอแนวทางใหม่ให้กับการออกแบบคอนกรีตอัดแรงเพราะ RPC สามารถที่จะรับแรงดึงได้ ทำให้ไม่ต้องการการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนและเหล็กเสริมอื่นๆ ทำให้ต้นทุนในการเสริมเหล็กลดลง แต่สิ่งสำคัญที่ขาดไม่ได้คือ แรงงานที่จะทำให้คุณภาพของ RPC เป็นไปตามที่ออกแบบไว้

โดยหลักการ RPC จัดเป็นคอนกรีตในกลุ่ม Ultra High Performance Concrete (UHPC) ประกอบด้วยวัสดุเหล่านี้

1. ปูนซีเมนต์ Richard และ Cheyrezy [2] ได้ทำการพัฒนา RPC โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งต่อมา Collepardi และคณะ [3,4] ได้ทำการทดลองกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 พบว่าปูนซีเมนต์ที่เหมาะแก่การนำมาผลิต RPC จะเป็นปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 5 ที่มี C_3A ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ประเภทอื่นๆ

2. ซิลิกาฟูม เป็นสารที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต Silicon และ Ferro-silicon Alloy ซึ่งประกอบ

ด้วยวัตถุดิบคือ หินควอร์ต ถ่านและเหล็กหลอมรวมกันด้วยความร้อนประมาณ 2,000 °ซ รูปแบบของซิลิกาฟูมมี 2 ประเภทคือ ซิลิกาฟูมอัดแน่น (Densified Silica Fume) และ ซิลิกาฟูมที่ไม่อัดแน่น (Undensified Silica Fume) ซึ่งประเภทที่มีจำหน่ายส่วนใหญ่จะเป็นซิลิกาฟูมอัดแน่น เนื่องจากมีขนาดใหญ่กว่าและไม่ฟุ้งกระจายไปในอากาศ ผงซิลิกานี้หากสูดดมเข้าไปและเกิดการสะสมขึ้นในปอดจะทำให้เกิดโรค Silicosis ได้เช่นเดียวกับฝุ่นที่เกิดจากกระบวนการโม่หินปูน หรือขบวนการผลิตปูนซีเมนต์ วัสดุประเภทนี้ไม่มีการผลิตในประเทศไทยแต่มีจำหน่ายในประเทศโดยบริษัทเคมีภัณฑ์ที่ใช้ในงานก่อสร้าง คุณภาพขั้นต่ำของซิลิกาฟูมควรจะผ่านมาตรฐานตาม ASTM C1240 [5] ซึ่งกำหนดให้มีสัดส่วนของ SiO_2 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 85 ขึ้นไป

3. ทราย เป็นทรายละเอียดคัดขนาดที่มีขนาดระหว่าง 0.15-0.6 มม. เท่านั้น

4. สารผสมเพิ่มประเภทลดน้ำยิ่งยวด จากการวิจัยที่ผ่านมา [6] พบว่า สารประเภทที่เป็นส่วนประกอบของ Acrylic Polymer ให้ผลดีที่สุดทั้งในด้านความสามารถในการลดน้ำและการทำงานได้

5. เส้นใยเหล็ก จากการค้นคว้าวิจัยที่ผ่านมามีการใช้เส้นใยเหล็กหลายขนาด พบว่าขนาด ความยาว 13 มม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.16 มม. จะมีความเหมาะสมในการใช้งานมากที่สุด โดยผสมในอัตราส่วนร้อยละ 1.5-3.0 โดยปริมาตร ซึ่งวัสดุนี้ไม่มีการผลิตในประเทศไทยจำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศและไม่มีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาด

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1.1 ศึกษาแนวทางการออกแบบและพัฒนา Reactive Powder Concrete โดยการใช้วัสดุที่สามารถหาได้ภายในประเทศให้มากที่สุด

2.1.2 ศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงกลและกายภาพของ Reactive Powder Concrete ที่พัฒนาขึ้นเพื่อนำคุณสมบัติต่างๆ มาพิจารณาใช้งานตามความเหมาะสมต่อไป

2.2 ขอบเขตของงานวิจัย

2.2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

2. ซิลิกาฟูมชนิดอัดแน่น (Condensed Silica Fume) ซึ่งสามารถหาองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูมและซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ดังแสดงไว้ในส่วนของผลการทดสอบและวิจารณ์ผล โดยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ซิลิกาฟูมมีค่าซิลิกอนได้ออกไซด์เท่ากับร้อยละ 84.44 ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานขั้นต่ำของ ASTM C1240 [5] ที่กำหนดไว้ที่ร้อยละ 85 อยู่เล็กน้อยและมีค่าไอรอน (III) ออกไซด์ (Fe_2O_3) สูงถึงร้อยละ 4.52

3. สารลดน้ำประเภท Polycarboxylate ซึ่งจัดเป็นสารผสมเพิ่มประเภท F ตามมาตรฐาน ASTM C494 [7] มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.02 ปริมาณใช้งานปกติที่ผู้ผลิตแนะนำในการใช้งานคือ ร้อยละ 0.2 - 1.5 โดยน้ำหนักของซีเมนต์

4. ทรายแม่น้ำที่ใช้ในการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จมีขนาดคละก่อนคัดแยกขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C136 [8] ซึ่งเป็นทรายละเอียดคัดขนาดที่มีขนาดระหว่าง 0.15 - 0.60 มม. และน้ำประปา

2.2.2 สัดส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดตัวอักษรย่อสำหรับสัดส่วนผสมคอนกรีตไว้ดังต่อไปนี้

X	X	X	X	X	X
1	2	3	4	5	6

โดยที่

หลักที่ 1 และ 2 - ใช้บอกสัดส่วนร้อยละปริมาณน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก หรือ w/c เช่น 23 หมายถึงคอนกรีตมีค่า w/c เท่ากับ 0.23 โดยในงานวิจัยนี้ใช้ค่า w/c อยู่ในช่วงระหว่าง 0.20 - 0.31

หลักที่ 3 และ 4 - ใช้บอกสัดส่วนร้อยละของปริมาณสารลดน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก ซึ่ง 2 หลัก เช่น

06 บอกถึงคอนกรีตนั้นใช้ปริมาณสารลดน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าปริมาณสารลดน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก อยู่ในช่วงร้อยละ 4 -12

หลักที่ 5 และ 6 - ใช้บอกสัดส่วนร้อยละของปริมาณซิลิกาฟูมต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก เช่น 25 บอกถึงคอนกรีตนั้นมีสัดส่วนของปริมาณซิลิกาฟูมต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ร้อยละ 25 ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าปริมาณซิลิกาฟูมต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 15 - 35

หลักที่ 7 ถึง 9 - ใช้บอกค่า γ คือสัดส่วนปริมาตรของปูนซีเมนต์เพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวมอัดแน่น ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองกับ γ ที่มีค่าระหว่าง 160 สำหรับชื่อสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ไม่แสดงค่า γ ไว้แสดงว่าไม่ได้นำค่า γ มาเป็นปัจจัยสำคัญในการทดลอง

2.2.3 วิธีการศึกษาและมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาสัดส่วนผสมของ RPC โดยการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุตามมาตรฐานดังนี้

2.2.3.1 การทดสอบวัสดุ

1. มวลรวม ทดสอบหาหน่วยน้ำหนักและช่องว่างระหว่างมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C29 [9] ค่าความถ่วงจำเพาะและร้อยละการดูดซับน้ำของมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน ASTM C128 [10] และขนาดคละและโมดูลัสความละเอียดของมวลรวม ตามมาตรฐาน ASTM C136 [8]

2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีและความละเอียด

3. ซิลิกาฟูม ทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี X-ray Fluorescence

2.2.3.2 การผสมคอนกรีต

การผสมคอนกรีตทำโดยการใช้สว่านมือติดกับใบกวน ซึ่งในช่วงแรกใช้เครื่องสว่านที่มีรอบการหมุนเท่ากับ 640 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการผสมเป็นเวลา 7 นาที จึงได้คอนกรีตเป็นเนื้อเดียวกันได้

2.2.3.3 การทำคอนกรีตให้แน่น

ในเบื้องต้นใช้เหล็กขนาด 2.54 X 2.54 ซม. ที่ใช้ในการตำสำหรับเก็บตัวอย่างคอนกรีตตามมาตรฐาน BS 181 Part 3 ในการอัดคอนกรีตให้แน่น แต่เนื่องจากตัวอย่างที่เก็บมีขนาด 5.0 X 5.0 X 5.0 ซม.^{3} จึงเปลี่ยนเป็นเหล็กกลมขนาด 2.54 ซม. ที่ใช้สำหรับอัดทรายเพื่อทดสอบการดูดซึมความชื้นของทรายในการอัดคอนกรีตแทน โดยแบ่งการตำเป็น 2 ชั้นๆ ละ 10 ครั้ง และอัดให้แน่นด้วยเกรียง

2.2.3.4 การบ่มคอนกรีต

การบ่มทำโดยแช่ในน้ำหลังจากถอดแบบที่อายุ 1 วัน แล้วนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ 25.0 ± 2.0 °ซ

3. ผลการทดสอบและการวิจารณ์ผล

3.1 คุณสมบัติพื้นฐานของ RPC

จากผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูมเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าซิลิกาฟูมมีปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เท่ากับร้อยละ 84.4 มากกว่าปูนซีเมนต์กว่า 4 เท่า แต่มีปริมาณต่ำกว่าค่ากำหนดตามมาตรฐาน ASTM C1240 [5] เล็กน้อย ซึ่งกำหนดไว้ที่ร้อยละ 85.0 และมีค่าไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) สูงถึงร้อยละ 4.52 ในขณะที่ค่าความความละเอียดของซิลิกาฟูมในรูปของเบลนมีค่าสูงถึง 18,600 ซม.^{2}/ก.

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซิลิกาฟูม

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์	ซิลิกาฟูม
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	20.7	84.4
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	5.2	3.0
ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3)	3.4	4.5
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.7	1.8
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.2	1.5
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.1	0.08
โปแตสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.4	1.7
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	2.5	0.8
แคลเซียมอิสระ (Free CaO)	0.7	0.3
น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา (LOI)	1.4	2.3
คุณสมบัติทางกายภาพ	**ปูนซีเมนต์**	**ซิลิกาฟูม**
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.12
ความละเอียดแบบเบลน (ซม.^{2}/ก.)	3,400	18,600

3.2 ผลของซิลิกาฟูม

ซิลิกาฟูมเป็นส่วนประกอบสำคัญของ RPC ซึ่งจำเป็นต้องใช้ในปริมาณมาก โดยปกติซิลิกาฟูมมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ประมาณ 100 เท่า จึงมีผลกระทบทั้งปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมและระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต สารลดน้ำที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นสารลดน้ำอย่างแรง (Superplasticizer) ตามมาตรฐาน ASTM C 494 [7] กลุ่ม F ซึ่งจำเป็นต้องใช้ในปริมาณที่สูงกว่าการใช้งานปกติเพื่อให้เกิดความสามารถในการทำงานได้ เนื่องจาก RPC ประกอบด้วยมวลรวมละเอียดเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีมวลรวมหยาบ อีกทั้งประกอบด้วยซิลิกาฟูมที่มีความละเอียดสูงกว่าการใช้งานทั่วไป

การศึกษานี้ช่วยบอกให้ทราบถึงข้อจำกัดทางด้านระยะเวลาการก่อตัวของ UHSC อันเนื่องมาจากวัตถุดิบทั้งสองนี้ เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบสัดส่วนผสมและนำไปใช้งานจริง

คอนกรีตที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์คงที่เท่ากับ 930 กิโลกรัม ปริมาณน้ำคงที่เท่ากับ 214 กิโลกรัม ซึ่งมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.23 ปริมาณของสารลดน้ำคงที่ที่ร้อยละ 6 โดยปรับเพิ่มและลดซิลิกาฟูมและมวลรวมละเอียดที่ใช้ ใช้ปริมาณซิลิกาฟูมต่อปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 15, 20, 25, 30 และ 35 ตามลำดับ ดังแสดงส่วนผสมของคอนกรีตในตารางที่ 3 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ของระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตกับสัดส่วนของซิลิกาฟูมต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 4

จากการทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของคอนกรีตซึ่งควบคุมทั้งปริมาณสารลดน้ำไว้ที่ร้อยละ 6 และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.23 โดยใช้ปริมาณซิลิกาฟูมต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 และ 0.35 ตามลำดับ พบว่าปริมาณซิลิกาฟูมต่อปูนซีเมนต์ มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต โดยปริมาณซิลิกาฟูมที่เพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาการก่อตัวลดลงทั้งระยะเริ่มต้นและสุดท้าย กล่าวคือ การเพิ่มของสัดส่วนซิลิกาฟูมต่อปูนซีเมนต์ทุกๆ ร้อยละ 5 มีผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายลดลงประมาณ 40 - 70 นาที เนื่องจากความละเอียดของซิลิกาฟูมส่งให้มีการดูดซับน้ำได้ดีและเติมแทรก (Filling) เข้าไปในช่องว่างของโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทำให้กลไกการแข็งตัวเร็วขึ้น [11]

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่สัดส่วนร้อยละซิลิกาฟูมต่อปูนซีเมนต์ระหว่าง 0.15 - 0.35

ส่วนประกอบ	สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ปริมาณซิลิกาฟูมต่างๆ				
	230615	230620	230625	230630	230635
ปูนซีเมนต์ (กก./ม.^{3})	930	930	930	930	930
ซิลิกาฟูม (กก./ม.^{3})	140	186	233	279	326
มวลรวมละเอียด (กก./ม.^{3})	1100	1050	1000	960	905
สารลดน้ำ (ล./ม.^{3})	56	56	56	56	56
น้ำจากสารลดน้ำ (ล./ม.^{3})	40	40	40	40	40
น้ำในการผสม (กก./ม.^{3})	174	174	174	174	174
ปริมาณน้ำทั้งหมด (กก./ม.^{3})	214	214	214	214	214
น้ำหนักรวม (กก./ม.^{3})	2399	2396	2392	2399	2390
ปริมาณสารลดน้ำ ต่อปูนซีเมนต์ (ร้อยละ)	6	6	6	6	6
Water-to-Cement Ratio	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
Water-to-Binder Ratio	0.20	0.19	0.18	0.18	0.17
ร้อยละของปริมาณ ซิลิกาฟูมต่อปูนซีเมนต์	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35

ตารางที่ 4 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่สัดส่วนซิลิกาฟูมต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก

สัดส่วนซิลิกาฟูมต่อปูนซีเมนต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย (นาที)
15	284	348
20	228	277
25	154	203
30	132	180
35	82	134

3.3 ผลของปริมาณสารลดน้ำต่อระยะเวลาการก่อตัว

ผลของปริมาณสารลดน้ำต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตเริ่มจากการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของปริมาณสารลดน้ำต่อคอนกรีตโดยน้ำหนัก ที่ร้อยละ 4, 6, 8, 10 และ 12 โดยกำหนดให้ค่า w/c คงที่เท่ากับ 0.23 ปริมาณปูนซีเมนต์และซิลิกาฟูมคงที่เท่ากับ 930 และ 233 กก. ตามลำดับ โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณสารลดน้ำ และทราย ซึ่งรายละเอียดของสัดส่วนผสมในการทดลองแสดงในตารางที่ 3 แต่เปลี่ยนสารลดน้ำและซิลิกาฟูมเท่านั้น ผลของระยะเวลาการก่อตัวที่ปริมาณสารลดน้ำต่างๆ ได้แสดงไว้ตารางที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

จากความสัมพันธ์ของปริมาณสารลดน้ำที่มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวของ UHSC โดยกำหนดปริมาณสารลดน้ำต่อน้ำหนักปูนซีเมนต์ที่อยู่ในช่วงร้อยละ 4 - 12 และเพิ่มสัดส่วนสารลดน้ำต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 2 และให้ส่วนผสมอื่นๆ มีปริมาณคงที่คือ ปูนซีเมนต์เท่ากับ 930 กก. ซิลิกาฟูมเท่ากับ 233 กก. (ร้อยละ 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์) และมีค่า w/c เท่ากับ 0.23

ผลการทดลองกับสารลดน้ำและซิลิกาฟูม พบว่าการเพิ่มปริมาณสารลดน้ำมีผลอย่างมากต่อระยะเวลาการก่อตัวโดยเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำทำให้ระยะเวลาการก่อตัวทั้งการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายเพิ่มขึ้น โดยเมื่อระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายที่ 3 ชั่วโมง พบว่าควรใช้สารลดน้ำไม่เกินร้อยละ 6 ต่อน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และเมื่อเพิ่มสัดส่วนสารลดน้ำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ พบว่าที่สัดส่วนสารลดน้ำต่อปูนซีเมนต์ร้อยละ 12 พบว่าคอนกรีตไม่ก่อตัวภายในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 5 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่สัดส่วนปริมาณสารลดน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ร้อยละ 4 - 12

ส่วนประกอบ	สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ปริมาณซิลิกาฟูมต่างๆ				
	230425	230625	230825	231025	231225
ปูนซีเมนต์ (กก./ม.^{3})	930	930	930	930	930
ซิลิกาฟูม (กก./ม.^{3})	233	233	233	233	233
มวลรวมละเอียด (กก./ม.^{3})	1020	1010	980	970	950
สารลดน้ำ (ล./ม.^{3})	37	56	74	93	112
น้ำจากสารลดน้ำ (ล./ม.^{3})	27	40	53	67	80
น้ำในการผสม (กก./ม.^{3})	187	174	161	147	134
ปริมาณน้ำทั้งหมด (กก./ม.^{3})	214	214	214	214	214
น้ำหนักรวม (กก./ม.^{3})	2407	2402	2378	2373	2358
ปริมาณสารลดน้ำต่อปูนซีเมนต์ (ร้อยละ)	4	6	8	10	12
Water-to-Cement Ratio	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Water-to-Binder Ratio	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18

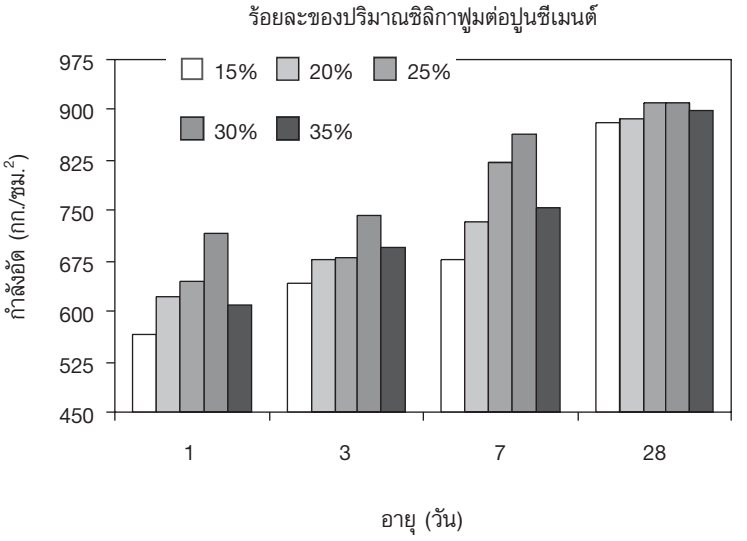
ตารางที่ 6 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่สัดส่วนร้อยละของสารลดน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก

ระยะเวลาการก่อตัว	ระยะเวลาการก่อตัวที่ปริมาณสารลดน้ำต่างๆ (นาที)				
	ร้อยละ 4	ร้อยละ 6	ร้อยละ 8	ร้อยละ 10	ร้อยละ 12
เริ่มต้น	37	158	285	473	> 1440
สุดท้าย	69	210	345	720	> 1440

การออกแบบสัดส่วนผสมของ UHSC จำเป็นต้องคำนึงถึงปริมาณของสารลดน้ำที่ใช้ด้วย หากใช้สารลดน้ำสัดส่วนที่น้อยเกินไประยะเวลาการก่อตัวสั้นมากจนไม่สามารถทำงานได้ทัน ในขณะที่สารลดน้ำในสัดส่วนที่มากเกินไประยะเวลาการก่อตัวจะยาวมากจนทำให้ระยะเวลาการถอดแบบนานขึ้น และมีผลกระทบต่อการพัฒนากำลังอัด จากผลการทดสอบจะเห็นว่าสารลดน้ำประเภทเดียวกัน ดังนั้นในการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมจริงจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสารลดน้ำทุกครั้ง

3.4 ผลของซิลิกาฟูมและสารลดน้ำต่อกำลังอัด

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณซิลิกาฟูมและสารลดน้ำที่มีต่อกำลังอัด โดยการเปลี่ยนปริมาณสารลดน้ำ ซิลิกาฟูม และค่า w/c เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปริมาณของสารทั้งสอง โดยค่า w/c ที่ใช้ในการทดลองมีค่าตั้งแต่ 0.21 - 0.25 โดยในขณะที่เพิ่ม w/c คือการลดสัดส่วนของสารลดน้ำลงเพื่อรักษาค่าความสามารถในการทำงานได้ให้ใกล้เคียงกัน สัดส่วนผสมของคอนกรีตและค่ากำลังอัดที่ 1, 3, 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ดังแสดงตัวอย่างคอนกรีตที่สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ w/c เท่ากับ 0.25 สัดส่วนสารลดน้ำที่ร้อยละ 6 ในตารางที่ 3 และจากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน พบว่าการเพิ่มปริมาณของซิลิกาฟูมจากร้อยละ 18 ถึง 30 มีผลทำให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจากซิลิฟูมที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งเป็นที่สร้างกำลังให้กับคอนกรีตเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณของซิลิกาฟูมจากร้อยละ 35 ทำให้การพัฒนากำลังของคอนกรีตลดลงเนื่องปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงจนไม่เพียงพอต่อการสร้างปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน



รูปที่ 2 กำลังอัดของคอนกรีตที่ w/c = 0.25 และสารลดน้ำที่ร้อยละ 6

3.5 ผลของสัดส่วนปริมาตรของซีเมนต์เพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวมอัดแน่น

ผลของสัดส่วนปริมาตรซีเมนต์เพสต์ต่อช่องว่างของมวลรวมอัดแน่นหรือ γ ต่อกำลังอัดของคอนกรีตเพื่อให้สามารถกำหนดช่วงของ γ ได้จึงได้ศึกษาถึงสัดส่วนผสมของ RPC และ UHSC ของ S.Collepardi และคณะ [1,3,4] และ Blais และ Couture [12] พบว่าน้ำหนักของมวลรวมละเอียดอยู่ระหว่าง 1,030 - 1,220 กก./ม.^{3} หรือค่า γ ของทั้งสองอยู่ในช่วง 180 - 240 แต่จากการทดสอบข้างต้นมีการใช้เส้นใยเหล็กผสมร่วมอยู่

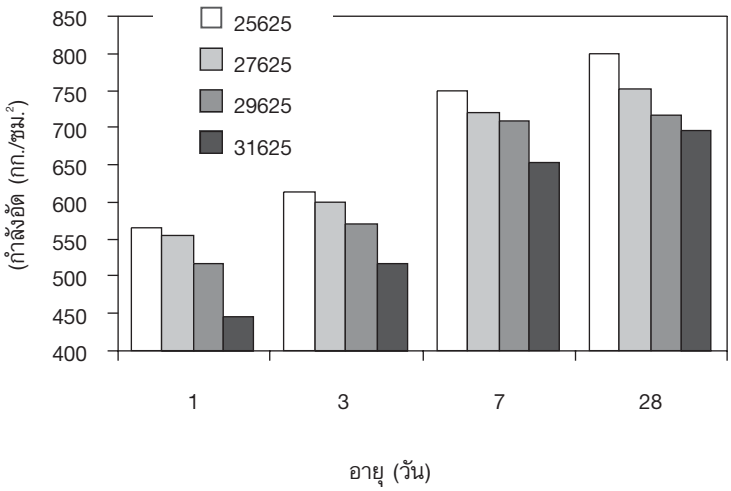
ในการทดลองจึงได้เลือกใช้ค่า γ เท่ากับ 160, 190, 210, 230 และ 260 เพื่อให้ครอบคลุมค่า γ ของงานวิจัยในอดีต และปริมาณซิลิกาฟูมอยู่ที่ร้อยละ 25 และสารลดน้ำใช้ที่ร้อยละ 6 พร้อมทั้งทดสอบที่ค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ตั้งแต่ 0.23, 0.25, 0.27 0.29 และ 0.31 เพื่อดูผลของปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นที่มีต่อกำลังอัด พร้อมทั้งทำการวัดความสามารถทำงานได้ด้วยการวัดค่าการไหลแผ่ตามมาตรฐาน ASTM C230 [13] ในการคำนวณหาปริมาณน้ำที่ใช้จริงในการทดลองนี้ได้บวกชดเชยน้ำส่วนที่ถูกดูดซับโดยมวลรวมไว้ที่ร้อยละ 1.0 สูงกว่าค่าการดูดซับน้ำของ

มวลรวมที่มีค่าร้อยละ 0.85 อยู่เล็กน้อย

สำหรับตัวอย่างสัดส่วนของคอนกรีตที่กำหนด γ เท่ากับ 160 แสดงในตารางที่ 7 โดยเมื่อพิจารณากำลังของคอนกรีต จากการทดลองหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ค่า w/c โดยควบคุมปริมาณสารลดน้ำที่ร้อยละ 6 และปริมาณซิลิกาฟูมที่ร้อยละ 25 ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่ากำลังเพิ่มขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้นและลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 7 สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 160

ส่วนประกอบ	สัดส่วนผสมคอนกรีตที่ปริมาณซิลิกาฟูมต่างๆ				
	230625	**250625**	**270625**	**290625**	**310225**
ปูนซีเมนต์ (กก./ม.^{3})	759	737	717	698	679
ซิลิกาฟูม (กก./ม.^{3})	190	184	179	174	170
ทราย (กก./ม.^{3})	1280	1280	1280	1280	1280
สารลดน้ำ (ล./ม.^{3})	46	44	43	42	41
น้ำ (ล./ม.^{3})	144	155	165	174	183
น้ำหนักรวม (กก./ม.^{3})	2419	2401	2384	2368	2353
ชดเชยน้ำที่ถูกดูดซับด้วยทราย (ล./ม.^{3})	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
ปริมาณน้ำ (ล./ม.^{3})	162	172	181	189	198
น้ำหนักปรับแก้ (กก./ม.^{3})	2431	2414	2397	2381	2366
Water-to-Cement Ratio	0.23	0.25	0.27	0.29	0.31



รูปที่ 4 กำลังอัดของคอนกรีตที่ γ เท่ากับ 160

5. สรุปผลการศึกษา

จากผลการวิจัยสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. ปริมาณซิลิกาฟูมในส่วนผสมของ UHSC มีผลกระทบต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต โดยเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาฟูมขึ้นมีผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวสั้นลง

2. ปริมาณสารลดน้ำในส่วนผสมของ UHSC มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต โดยเมื่อเพิ่มปริมาณสารลดน้ำมีผลในการยืดระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งที่ทำให้ระยะเวลาก่อตัวยาวนานมากหรืออาจจะไม่ก่อตัวเลย

3. คอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำและซิลิกาฟูมมีกำลังอัดสูงสุดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 942 กก./ซม.^{2} ที่ w/c เท่ากับ 0.23 และใช้ปริมาณซิลิกาฟูมร้อยละ 25 ปริมาณสารลดน้ำเท่ากับร้อยละ 6 มีการก่อตัวระยะสุดท้ายที่ 180 นาที

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ตามสัญญาเลขที่ RDG4850044 บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ทุนวิจัยเพิ่มเติมและการทดสอบหาองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี นอกจากนั้นคุณค่าของบทความฉบับนี้ขออุทิศแด่การจากไปอย่างไม่มีวันกลับของนายธวัชชัย คงศักดิ์ตระกูล ไว้ ณ ที่นี้

7. เอกสารอ้างอิง

1. Collepardi S., Coppola L., Trolie R., and Collepardi M., “Mechanical, Properties of Modified Reactive Powder Concrete”, Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference on “Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete”, SP-173, pp. 1-21, (1997).

2. Richard, P. and Cheyrezy, M.H. “Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength”, Concrete Technology: Past, Present, and Future, Proceedings of the V. Mohan Malhotra Symposium, ACI SP-144, S. Francisco 1994, pp. 507-518. Editor: P.K. Mehta.

3. Collepardi S., Troli R., Monosi S. and Favoni O., L'Influenza del tipo di fibre sulle prestazioni di conglomerati tipo RPC / The Influence of the Fiber Type on the Performance of RPC Industria Italiana del Cemento, n. 786, April 2003.

4. Collepardi S., S.Monosi, G. Pignoloni, R. Troli and M. Collepardi, Modified Reactive Powder Concrete with Artificial Aggregate, Proceedings of Sixth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Nice, France, 10-13 October 2000, pp. 447 - 459.

5. American Society for Testing and Materials, “ASTM C1240-05 Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious”, Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, Philadelphia, PA, USA, 2005.

6. Coppola L., Troli R., Borsoi A., Zaffaroni P., and Collepardi M., “Influence of Superplasticizer Type on the Compressive Strength of RPM”, Proceedings of Fifth CANMET/ACI International Conference on “Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete”, Roma, 7-10 Ottobre (1997), SP 173, pp. 512-536.

7. American Society for Testing and Materials, “ASTM C494/C494M-05a Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete”, Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, Philadelphia, PA, USA, 2005.

8. American Society for Testing and Materials, “ASTM C136-06 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates”, Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, Philadelphia, PA, USA, 2006.

9. American Society for Testing and Materials, “ASTM C29/C29M-97(2003) Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate”, Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, Philadelphia, PA, USA, 2003.

10. American Society for Testing and Materials, “ASTM C128-04a Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate”, Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, Philadelphia, PA, USA, 2004.

11. Kumar M. P., “Advancement in Concrete Technology”, Concrete International, June 1999.

12. Piere Y.B. and Marco C., “Precast, Prestressed Pedestrian Bridge - Wolrd's First Reactive Powder Concrete Structure”, PCI Journal September-October 1999.

13. American Society for Testing and Materials, “ASTM C230/C230M-03 Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement”, Annual Book of ASTM Standard Vol. 4.02, Philadelphia, PA, USA, 2003.