ผลกระทบจากขนาดคละของมวลรวมในสภาพเหลวของคอนกรีตสมรรถนะสูง

นาย กิตติกร ตันเปาว์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2538

ISBN 974-632-636-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16658966

EFFECTS OF AGGREGATE GRADATION ON FRESH STATE OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE

Mr. Kittikorn Tanpao

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Civil Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
1995

ISBN 974-632-636-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบจากขนาดคละของมวลรวมในสภาพเหลวของคอนกรีตสมรรถนะสูง
โดย	นายกิตติกร ตันเปาว์
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดี บัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ถุงสุวรรณ)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. วินิต ช่อวิเชียร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม)

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

กิตติกร ตันเปาว์ : ผลกระทบจากขนาดคละของมวลรวมในสภาพเหลวของคอนกรีตสมรรถนะสูง (EFFECTS OF AGGREGATE GRADATION ON FRESH STATE OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE) อ.ที่ปรึกษา : ศ. ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ , 108 หน้า , ISBN 974-632-636-8

การออกแบบปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูง เพื่อให้ได้คุณภาพดีทั้งในสภาพเหลว และกำลังสูงในสภาพแข็งจะต้องพิจารณาถึงผลกระทบจากวัสดุที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ ปริมาณปูนซีเมนต์, ปริมาณน้ำ, ชนิดและปริมาณสารผสมเพิ่ม รวมถึงขนาดคละและสัดส่วนที่ใช้ของมวลรวมหินและทราย ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาข้อมูลขนาดคละของมวลรวมในอุตสาหกรรมคอนกรีตผสมเสร็จ และออกแบบปรับปรุงสัดส่วนของขนาดคละร่วมกับปริมาณสารผสมเพิ่มที่เหมาะสม เพื่อให้ได้คอนกรีตเหลวที่มีความสามารถเทได้สูง ค่ายุบตัวมากกว่า 20 ซม. มีค่าการไหลแผ่มากกว่า 50 ซม. และปราศจากการแยกตัว โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดรูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน มากกว่า 600 กก.ต่อตร.ซม. และกำลังอัดที่ 1 วันมากกว่า 50 เปอร์เซนต์ของกำลังอัดที่ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งในการกำหนดสัดส่วนผสมคอนกรีตได้ใช้ปริมาณซีเมนต์เท่ากับ 350, 400, 450, 500 และ 550 กก. และการใช้สารลดปริมาณน้ำอย่างมากในอัตรา 1.2, 1.8 และ 2.4 ลิตรต่อซีเมนต์ 100 กก. โดยมีค่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ตั้งแต่ 0.22 ถึง 0.46 และใช้ค่าสัดส่วนทรายต่อมวลรวมเท่ากับ 0.45 นอกจากนี้การใช้วัสดุผสมเพิ่มขี้เถ้าลอยและ ซิลิก้าฟูมในการปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต ได้ใช้ขี้เถ้าลอยแม่เมาะในอัตรา 15%, 20%, 25% และ 30% ส่วนซิลิก้าฟูมในอัตรา 5%, 10%, 15% และ 20% ของปริมาณซีเมนต์โดยน้ำหนัก โดยมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ อยู่ในช่วง 0.29 ถึง 0.46 ในการวิจัยได้ทำการทดสอบคุณสมบัติในสภาพเหลว ได้แก่ ค่าความยุบตัว, ค่าการไหลแผ่, ปริมาณอากาศ, และการก่อตัว เป็นต้น คุณสมบัติในสภาพแข็งจะทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 1 วัน, 7 วัน และ 28 วันตามลำดับ

จากผลการศึกษาข้อมูลขนาดคละของมวลรวม เปรียบเทียบกับมาตรฐานข้อกำหนดของ ASTM และ ACI พบว่าการรวมขนาดคละของหิน 3/4" กับหิน 3/8" ในอัตราส่วน 60:40 และสัดส่วนทรายต่อมวลรวมเท่ากับ 0.45 จะทำให้ได้ขนาดคละของมวลรวมผสมเข้าใกล้มัธยฐานของมาตรฐานมากที่สุด และผลการทดสอบคอนกรีตตามส่วนผสมที่กำหนดพบว่าอัตราการใช้สารลดปริมาณน้ำอย่างสูงที่เหมาะสมประมาณ 1.8 ลิตรต่อซีเมนต์ 100 กก. ให้ค่าการยุบตัวมากกว่า 20 ซม.และมีค่าการไหลแผ่มากกว่า 50 ซม. เมื่อใช้ปริมาณน้ำ 140 และ 160 ลิตรต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศ์กเมตร โดยสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์น้อยกว่า 0.30 จะให้ค่ากำลังอัดโดยเฉลี่ยที่อายุ 1 วัน มากกว่า 300 กก.ต่อตร.ซม. และที่อายุ 28 วัน เฉลี่ยมากกว่า 600 กก.ต่อตร.ซม.

คอนกรีตที่ผสมขี้เถ้าลอยแม่เมาะเพิ่มขึ้น พบว่าจะทำให้มีคุณสมบัติความสามารถเทได้ดีขึ้น โดยมีค่าความยุบตัวโดยเฉลี่ยประมาณ 20-25 ซม. และค่าการไหลประมาณ 55-65 ซม. โดยอัตราการผสมเพิ่มที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20-25% ของปริมาณซีเมนต์ ทั้งนี้จะให้กำลังเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยเฉพาะที่ 1, 7 และ 28 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์รวมกับขี้เถ้าลอยมีค่าต่ำกว่า 0.30 จะให้กำลังที่ 1 วันเกินกว่า 350 กก.ต่อตร.ซม. และที่ 28 วันเกินกว่า 650 กก.ต่อตร.ซม. คอนกรีตที่ผสมซิลิก้าฟูมเพิ่มขึ้นจะช่วยให้คุณสมบัติของคอนกรีตดีขึ้น การยิ้มของคอนกรีตมีน้อยมาก แต่ค่าความข้นเหลวจะลดลง โดยค่าการไหลแผ่เฉลี่ยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 43-52 ซม. ค่าการยุบตัวลดลงเหลือประมาณ 17-22 ซม. แต่กำลังอัดจะสูงขึ้นในอัตราร้อยละ 16 ทุกๆ 10 % ของซิลิก้าฟูมที่เพิ่มขึ้น กำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงถึง 965 กก.ต่อตร.ซม.ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.29 ปริมาณการใช้ซิลิก้าฟูม 20% ในกรณีที่ใช้ปริมาณซิลิก้าฟูม 15% ที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำกว่า 0.36 ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 1วันและ 28 วัน เฉลี่ยมากกว่า 450 และ 700 กก.ต่อตร.ซม.ตามลำดับ อัตราการเพิ่มกำลังจะเป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับปริมาณซิลิก้าฟูมที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสม อัตราที่เหมาะสม จะถูกควบคุมโดยราคา

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา โครงสร้าง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

C515114 : MAJOR CIVIL ENGINEERING
KEY WORD : AGGREGATE GRADATION / HIGH PERFORMANCE CONCRETE / FRESH PROPORTIES / WORKABILITY
KITTIKORN TANPAO : EFFECTS OF AGGREGATE GRADATION ON FRESH STATE OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE . THESIS ADVISOR : PROF. EKASIT LIMSUWAN, Ph.D. 108 pp.
ISBN 974-632-636-8

In concrete mixed design of high performance concrete, the high quality of concrete in each states should be attained ; super flow in fresh state and high strength in harden state. Materials for producing thus concrete such as cement content, cement types, concrete admixtures, must be well graded and in good combination . This study has been conducted to seek for proper aggregate gradation of ready mix industry by improving combined gradation with suitable admixtures and dosages . Minimum requirement of the high performance concrete would be conformed to the workability requirement concrete as slump exceeds 20 cm., flow value is higher than 50 cm., there is no segregation and there is no slump loss in 1.5 hrs.,the strength requirements as compressive strength at 1 day must be higher than 50 % of 28 days strength . and over 28 days strength. ,and the 28 days compressive strength must be higher than 600 ksc. The major variables in the study have considered cement content of 350, 400, 450, 500, and 550 kg/m^3 , superplasticizer dosage of 1.2, 1.8, and 2.4 liter/cement 100 kg. , water to cement ratio of 0.22 to 0.46 and sand to aggregate ratio of 0.45. Where fly ash and silica fume are used ,the dosage varies from 15, 20, 25 ,and 30 percent for fly ash ,and from 5, 10, 15, and 20 percent for silica fume , thus to improve concrete proporties, as which the water to cement ratio ranges from 0.29 to 0.46 . Tests for fresh concrete properties in this study include slump, flow value, air content, setting time ,and the tests for harden properties in compressive strength at 1 day , 7 days and 28 days , respectively.

As a result of the study , gradation data in comparision to the ASTM and ACI standard, has shown the combination of coarse aggregates 3/4" and 3/8" at a ratio of 60:40 and the corresponding sand to aggregate ratio of 0.45 to produce very good gradation closed to the mean value of the standards. The results as concrete properties have shown average slump of more than 20 cm. and average flow value of more than 50 cm. . Appropriate dosage for superplasticizer of 1.8 liter/cement 100 kg. ,with mixing water of 140 and 160 liter/m^3 and water to cement ratio (W/C) less than 0.30 will achieve average compressive strength over 300 ksc and 600 ksc at 1 day and 28 days respectively.

The use of mineral admixture ; fly ash could improve very sligh increase strength but remarkable in workability. The results have shown the average slump to be about 20-25 cm. and the flow value to be about 55-65 cm. . The appropriate addition amount should be around 20-25 percent to achieve average compressive strength of higher than 350 ksc. and 650 ksc. at 1 day and, 28 days respectively as which the W/(C+FA) ratio is less than 0.30 . The use of additional silica fume in the mix ,some affects on fresh properties can be achieved as reducing bleeding; reducing slump and reducing flow value . The flow value will be average around 43-52 cm. as the average slump was about 17-22 cm. , with additional silica fume of 20 percent of cement content but the strength can be as high as 965 ksc. of average 28 days strength of which the water to cement ratio 0.29 . The addition silica fume at 15 percent can achieve average compressive strength over 450 and 700 ksc. at 1 day and 28 days respectively as which the water to cement ratio is less than 0.36 . Concrete strength has shown to be linearly improvement at 16 % of each 10 percentage of silica fume ,but an appropriate dosage will be in accordance with the cost index .

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา โครงสร้าง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ ในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ตลอดจนได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จลุล่วงไปอย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ผู้เขียนยังขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อันประกอบไปด้วย ศาสตราจารย์ ดร. วินิต ช่อวิเชียร และศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี ที่ได้กรุณาตรวจ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ อันจะทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ บริษัท น่ำเฮงคอนกรีต (1992) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย รวมทั้งให้การสนับสนุนการทดสอบในงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายสุดนี้ คุณประโยชน์อันพึงจะได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอมอบให้แก่บิดา มารดา และครูบาอาจารย์ทุกท่าน

กิตติกร ตันเปาว์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ .....ฉ
สารบัญ .....ช
รายการตารางประกอบ .....ฌ
รายการรูปประกอบ .....ฎ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 บทนำ 1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....3
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....9
1.4 การดำเนินการวิจัย 9
1.5 ขอบเขตของการศึกษา.....9

บทที่ 2 คอนกรีตคุณภาพสูง

2.1 นิยามของคอนกรีตคุณภาพสูง.....10
2.2 วัสดุพื้นฐานในการผลิตคอนกรีต.....10
2.2.1 ปูนซีเมนต์.....10
2.2.2 น้ำ.....13
2.2.3 มวลรวม.....13
2.2.4 สารผสมเพิ่ม.....15
2.3 คุณสมบัติของคอนกรีต.....24
2.3.1 ลักษณะของคอนกรีตสด.....24
2.3.2 ความสามารถเทได้.....27
2.3.3 ระยะเวลาก่อตัวและการสูญเสียค่าความยุบตัว.....30
2.3.4 คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต.....30
2.3.5 ความทนทานการต้านทานการซึมผ่าน.....33

หน้า

2.4 ขนาดคละของมวลรวมคอนกรีตคุณภาพสูง....35

บทที่ 3 การทดสอบและการหาสัดส่วนผสม

3.1 การทดสอบหาคุณสมบัติและขนาดคละของมวลรวม....39

3.2 การหาขนาดคละที่เหมาะสมของมวลรวม....42

3.2.1 การรวมขนาดคละ....42

3.2.2 ปริมาณช่องว่างและหน่วยน้ำหนักของมวลรวมที่เหมาะสม....49

3.3 สัดส่วนผสมสำหรับคอนกรีตคุณภาพสูง....55

3.4 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต....61

3.4.1 วิธีการผสมคอนกรีต....61

3.4.2 วิธีการทดสอบคอนกรีต....61

บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต....69

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต....71

4.3 การปรับปรุงคุณสมบัติคอนกรีตด้วยวัสดุผสมเพิ่มขี้เถ้าลอยและซิลิก้าฟูม....72

บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย

5.1 สรุปผลงานวิจัย....103

5.2 ข้อเสนอแนะ....104

รายการอ้างอิง....105

ภาคผนวก....109

ประวัติผู้เขียน

รายการตารางประกอบ

ตารางที่ หน้า

1.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตคุณภาพสูงจากกลุ่มต่างๆ.....2

2.1 สารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์.....11
2.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์.....18
2.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของซิลิก้าฟูมจากแหล่งต่างกัน.....21
2.4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภท 1 และสารปอซโซลาน.....22
2.5 ลักษณะทางกายภาพของ Portland Cement และ Pozzolans.....22
2.6 เกณฑ์กำหนดส่วนขนาดคละของวัสดุผสมหินและทราย (ASTM C33).....35
2.7 ขนาดคละแนะนำของมวลรวมตามมาตรฐาน ACI 304 , DIN 1045.....36
2.8 แสดงขนาดของมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C33 37

3.1 แสดงการ Combined Gradation ของมวลรวมหยาบ.....42
3.2 แสดงการ Combined Gradation ของมวลรวมหินทราย.....43
3.3 ตัวอย่างการเก็บข้อมูลขนาดคละของ มวลรวมละเอียด.....45
3.4 ตัวอย่างการเก็บข้อมูลขนาดคละของ มวลรวมหยาบ.....47
3.5 แสดงผลการทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักและค่าปริมาณช่องว่างของมวลรวม.....50
3.6 แสดงสัดส่วนผสมคอนกรีตที่ทำการทดสอบ.....58
3.7 แสดงสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมขี้เถ้าลอย (Fly Ash).....59
3.8 แสดงสัดส่วนผสมคอนกรีตผสมซิลิก้าฟูม (Silica Fume).....60

4.1 แสดงการทดสอบกลุ่ม A.....74
4.2 แสดงการทดสอบกลุ่ม B.....74
4.3 แสดงการทดสอบกลุ่ม C.....74
4.4 แสดงการทดสอบกลุ่ม D.....75
4.5 แสดงการทดสอบกลุ่ม E.....75
4.6 แสดงการทดสอบกลุ่ม F.....75
4.7 แสดงการทดสอบกลุ่ม G.....76

ตารางที่ หน้า

4.8 แสดงการทดสอบกลุ่ม H....76
4.9 แสดงการทดสอบกลุ่ม I....76
4.10 แสดงการทดสอบกลุ่ม J....77
4.11 แสดงการทดสอบกลุ่ม K....77
4.12 แสดงการทดสอบกลุ่ม L....77
4.13 แสดงการทดสอบกลุ่ม M....77
4.14 แสดงการทดสอบกลุ่ม N....78
4.15 แสดงการทดสอบกลุ่ม O....78
4.16 แสดงการทดสอบกลุ่ม P....78
4.17 แสดงการทดสอบกลุ่ม Q....78
4.18 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติคอนกรีต....79

รายการรูปประกอบ

รูปที่ หน้า

2.1 แสดงการทำปฏิกริยาของซิลิก้าฟูม กับ Ca $(OH)_2$ และการแทรกตัวของ ซิลิก้าฟูมในช่องว่างของซีเมนต์ 23
2.2 แสดงลักษณะของคอนกรีตที่เกิดการแยกตัว 25
2.3 แสดงลักษณะการเยิ้มของน้ำในคอนกรีต 25
2.4 แสดงลักษณะของคอนกรีตคุณภาพสูง ค่าความยุบตัวประมาณ 21 ซม. 26
2.5 แสดงลักษณะของคอนกรีตคุณภาพสูง ค่าการไหลแผ่ประมาณ 65 ซม. 26
2.6 แสดงความสามารถเทได้ ของคอนกรีตคุณภาพสูงในการใช้งานปั้ม 29
2.7 แสดงลักษณะการไหล ของคอนกรีตคุณภาพสูง ผ่านเหล็กเสริมที่หนาแน่น 29
2.8 แสดงลักษณะการวิบัติ ของคอนกรีตคุณภาพสูง 32
2.9 แสดงลักษณะการทดสอบหาค่าโมดูลัสการยืดหยุ่น 32
2.10 แสดงขอบเขตขนาดคละ (Combined Gradation) ตามมาตรฐานต่างๆ 38
2.11 ขอบเขตขนาดคละของมวลรวมสำหรับคอนกรีตคุณภาพสูง 38

3.1 แสดงขนาดคละของมวลรวมหินทรายที่ S/A Ratio ต่างกัน 44
3.2 กราฟแสดงข้อมูลขนาดคละของมวลรวมละเอียด 46
3.3 กราฟแสดงข้อมูลขนาดคละของมวลรวมหยาบ 48
3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักกับค่าสัดส่วนของทรายในมวลรวม 49
3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณช่องว่างกับค่าสัดส่วนของทรายในมวลรวม 49
3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและค่าปริมาณช่องว่าง กับค่าสัดส่วนของทรายในมวลรวม (ตัวอย่างที่ 1) 51
3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและค่าปริมาณช่องว่าง กับค่าสัดส่วนของทรายในมวลรวม (ตัวอย่างที่ 2) 52
3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและค่าปริมาณช่องว่าง กับค่าสัดส่วนของทรายในมวลรวม (ตัวอย่างที่ 3) 53
3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักและค่าปริมาณช่องว่าง กับค่าสัดส่วนของทรายในมวลรวม (ตัวอย่างที่ 4) 54
3.10 แผนภูมิแสดงแนวทางการกำหนดสัดส่วนผสมคอนกรีต 56

รูปที่ หน้า

3.11 แสดงการทดสอบ ค่าความยุบตัวของคอนกรีตสด....62
3.12 แสดงการทดสอบ ค่าการไหลตัวของคอนกรีต....63
3.13 แสดงการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต....64
3.14 กราฟแสดงค่าการก่อตัวของคอนกรีต....64
3.15 แสดงการทดสอบหาปริมาณอากาศในคอนกรีต....65
3.16 แสดงการทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต....66
3.17 แสดงการเก็บตัวอย่างของคอนกรีต....67
3.18 แสดงการ Capping ส่วนปลายของตัวอย่างคอนกรีต....67
3.19 แสดงการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต....68
3.20 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีตกำลังสูง....68

4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Slump กับ Cement Content 80
ที่ปริมาณน้ำ 120 กก.
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Flow Diameter กับ Cement Content 80
ที่ปริมาณน้ำ 120 กก.
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Slump กับ Cement Content 81
ที่ปริมาณน้ำ 140 กก.
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Flow Diameter กับ Cement Content 81
ที่ปริมาณน้ำ 140 กก.
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Slump กับ Cement Content 82
ที่ปริมาณน้ำ 160 กก.
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Flow Diameter กับ Cement Content 82
ที่ปริมาณน้ำ 160 กก.
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Slump กับ อัตราวัสดุผสมเพิ่ม Fly Ash....83
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Flow กับ อัตราวัสดุผสมเพิ่ม Fly Ash....83
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Slump กับ อัตราวัสดุผสมเพิ่ม Silica Fume....84
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Flow กับ อัตราวัสดุผสมเพิ่ม Silica Fume....84
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่า W/C Ratio 85
ที่ใช้ปริมาณสาร Superplasticizer เท่ากับ 1.2 ลิตร ต่อซีเมนต์ 100 กก.

รูปที่ หน้า

4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่า W/C Ratio 86
ที่ใช้ปริมาณสาร Superplasticizer เท่ากับ 1.8 ลิตร ต่อซีเมนต์ 100 กก.
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่า W/C Ratio 87
ที่ใช้ปริมาณสาร Superplasticizer เท่ากับ 2.4 ลิตร ต่อซีเมนต์ 100 กก.
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่า W/C Ratio 88
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่า W/C Ratio 89
ที่ใช้ FA = 15 %
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่า W/C Ratio.....89
ที่ใช้ FA = 20 %
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่า W/C Ratio 90
ที่ใช้ FA = 25 %
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่า W/C Ratio 90
ที่ใช้ FA = 30 %
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่า W/C Ratio 91
ที่ใช้ SF = 5 %
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่า W/C Ratio 91
ที่ใช้ SF = 10 %
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่า W/C Ratio 92
ที่ใช้ SF = 15 %
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่า W/C Ratio 92
ที่ใช้ SF = 20 %
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 1 วัน 93
กับค่า W/C Ratio ของคอนกรีตผสม Fly Ash
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 1 วัน.....93
กับค่า W/C Ratio ของคอนกรีตผสม Silica Fume
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน.....94
กับค่า W/C Ratio ของคอนกรีตผสม Fly Ash
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 วัน 94
กับค่า W/C Ratio ของคอนกรีตผสม Silica Fume

รูปที่ หน้า

4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน 95
กับค่า W/C Ratio ของคอนกรีตผสม Fly Ash
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน 95
กับค่า W/C Ratio ของคอนกรีตผสม Silica Fume
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่า W/C+FA Ratio 96
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับค่า W/C+SF Ratio 97
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณผสมขี้เถ้าลอย 98
ที่ W/C Ratio 0.29
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณผสมซิลิก้าฟูม 98
ที่ W/C Ratio 0.29
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณผสมขี้เถ้าลอย 99
ที่ W/C Ratio 0.32
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณผสมซิลิก้าฟูม 99
ที่ W/C Ratio 0.32
4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณผสมขี้เถ้าลอย 100
ที่ W/C Ratio 0.36
4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณผสมซิลิก้าฟูม 100
ที่ W/C Ratio 0.36
4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณผสมขี้เถ้าลอย 101
ที่ W/C Ratio 0.40
4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณผสมซิลิก้าฟูม 101
ที่ W/C Ratio 0.40
4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณผสมขี้เถ้าลอย 102
ที่ W/C Ratio 0.46
4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดกับปริมาณผสมซิลิก้าฟูม 102
ที่ W/C Ratio 0.46