ผลของขนาดคละมวลรวมต่อสภาพแข็งตัวของคอนกรีตสมรรถนะสูง

นายณรงศักดิ์ ลีวานิชกิจ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2539

ISBN 974-633-197-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16396718

EFFECTS OF AGGREGATE GRADATION ON HARDENED STATE OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE

Mr. Narongsak Leevanichakit

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering

Department of Civil Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University

1996

ISBN 974-633-197-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของขนาดคละมวลรวมต่อสภาพแข็งตัวของคอนกรีตสมรรถนะสูง
โดย	นาย ณรงศักดิ์ ลีวานิชกิจ
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. วินิต ช่อวิเชียร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์.ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม)

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ณรงศักดิ์ ลีวานิชกิจ : ผลของขนาดคละมวลรวมต่อสภาพแข็งตัวของคอนกรีตสมรรถนะสูง (EFFECTS OF AGGREGATE GRADATION ON HARDENED STATE OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ , อ.ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม, 148 หน้า. ISBN 974-633-197-3

การพัฒนาคอนกรีตสมรรถนะสูงให้เหมาะสมกับการใช้งานตามคุณสมบัติของความสามารถเทได้ อันประกอบด้วย ค่าการยุบตัวมากกว่า 20 ซม. ค่าการไหลตัวมากกว่า 50 ซม. และคุณสมบัติด้านกำลังสูง โดยกำลังอัดที่ 28 วัน มากกว่า 600 กก./ตร.ซม. และกำลังอัดที่ 1 วัน เกินกว่าร้อยละ 50 ของกำลังอัดที่ 28 วัน

การผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงจะต้องมีวัตถุดิบที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพหลายอย่าง งานวิจัยนี้เน้นผลจากการผสมขนาดคละของมวลรวมอันจะมีต่อคุณสมบัติในสภาพแข็งตัว ซึ่งได้พิจารณาตามมาตรฐานการทดสอบและข้อกำหนดของ ASTM และ ACI ตามลำดับ การปรับปรุงส่วนผสมขนาดคละของหินเล็ก 3/8" กับหินกลาง 3/4" ในสัดส่วนระหว่าง 25:75 ถึง 45:55 พบว่าสัดส่วนที่ 40:60 เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด และขนาดคละของมวลรวมในสัดส่วนทรายต่อมวลรวมพิจารณาในขอบเขตระหว่าง 0.41 - 0.45 พบว่าสัดส่วนที่ 0.45 ให้เกิดเสถียรภาพของส่วนผสมของคอนกรีตได้ดีที่สุด, อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในช่วง 0.22 - 0.46 , น้ำยาเคมีผสมเพิ่มประเภทลดน้ำพิเศษในอัตราส่วน 1.20 - 2.40 % ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ที่ใช้ การศึกษายังพิจารณาสารปอซโซลานของขี้เถ้าลอยและไมโครซิลิกาผสมในอัตรา 15 - 30 % และ 5 - 20% โดยน้ำหนักตามลำดับ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเกี่ยวกับกำลังและความทนทานของคอนกรีต ควบคู่กับการปรับปรุงคุณสมบัติในสภาพเหลวเป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาศึกษา

สัดส่วนผสมของขนาดคละมวลรวมใช้ปรับปรุงให้คุณสมบัติของคอนกรีตเป็นไปตามข้อกำหนดของคอนกรีตสมรรถนะสูงทั้งด้านกำลัง,ความทนทานและคุณสมบัติในสภาพเหลว โดยพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์อยู่ในช่วง 0.24 - 0.34 , ปริมาณน้ำยาเคมีผสมเพิ่ม 1.80 - 2.40 % จะช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานและกำลังของคอนกรีตได้ตามกำหนด, ขี้เถ้าลอยช่วยปรับปรุงความสามารถในการทำงานให้สูงขึ้น ประมาณ 10 -15 % ด้วยส่วนผสมพอเหมาะที่ 15 - 20 % และไมโครซิลิกาจะช่วยเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตให้สูงขึ้น ประมาณ 10 - 26 % ในส่วนผสมพอเหมาะที่ 10 - 20 %

ผลการศึกษาขนาดคละมวลรวมจะช่วยให้ออกแบบส่วนผสมและการผลิตคอนกรีตสมรรถนะสูงด้วยการกำหนดขนาดของมวลรวมหยาบ, กำลังอัดของคอนกรีต, ปริมาณปูนซีเมนต์ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ โดยที่จะให้สมรรถนะสูงทั้งในสภาพเหลวและสภาพแข็ง ทุกประการ

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา โครงสร้าง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

C515163 : MAJOR CIVIL ENGINEERING
KEY WORD : AGGREGATE GRADATION / HIGH PERFORMANCE CONCRETE / HARDENED STATE / HARDENED PROPERTIES

NARONGSAK LEEVANICHAKIT : EFFECTS OF AGGREGATE GRADATION ON HARDENED STATE OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE . THESIS ADVISOR : PROF. EKASIT LIMSUWAN , Ph.D. AND DR. BOONCHAI SATITMANNAITHUM, 148 pp. ISBN 974-633-197-3

Development of high performance concrete to suit workability by means slump of more than 20 cm. and flowability of more than 50 cm. and to suit strength properties by means of compressive strength at 28 days more than 600 kgs./sq.cm. and the strength at 1 day would be more than 50% of those at 28 days

To produce high performance concrete, the constituents must be verified by various test methods. This reseach havel emphasized on effects of aggregate gradation in hardened state of high performance concrete considering test methods and specification comforming to the ASTM and ACI, respectly. Coarse aggregate proportion of 3/8" and 3/4" at ratio of 25:75 to 45:55 were tested to obtain the best gradation at the ratio of 40 : 60 For fine aggregate proportion, the ratio of sand to aggregate ranges from 0.41 to 0.45 have been tested to verify the best proportion at 0.45 to obtained the most stable mix. Mix design contain the water to cement ratio between 0.22 to 0.46 as the superplasticizer admixture at 1.20 to 2.40 % of cement weight. The mineral admixture of fly ash and microsilica between 15 to 30 % and 5 to 20 % by weight, respectly, have been introduced to the mixes to improve strength and durability properties of harden states and to satisfy all related properties of fresh states.

Mix proportion by means of aggregate gradation are adjusted to obtain basic properties classified as high performance concrete in stength, durability and fresh porperties the most suitable mixes have contained water to cement ratio of 0.24 to 0.34 and superplasticizer of 1.80 - 2.40 %. For additional impovement of workability and strength, fly ash and microsilica at dosage of 15 to 20 % and 10 to 20 % by weight of cement respectively, have been introduced to improve workability by 10 to 15 % of flowability due to fly ash and to improve strength by 10 to 26 % in compressive due to microsilica.

As results of this study, aggregate gradation will be considered in mix design to produce high performance concrete by aggregate sizes, means of required strength, cement contents and water to cement ratio to control thus properties at fresh and harden states.

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา โครงสร้าง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่ายเป็นอย่างดียิ่ง ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ อ.ที่ปรึกษา และ อ.ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม อ.ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำรวมทั้งการตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้และขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. วินิต ช่อวิเชียร และศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาตรี คณาจารย์ในภาควิชา วิศวกรรมโยธา ที่ได้กรุณาเป็นประธานคณะกรรมการและกรรมการวิทยานิพนธ์

นอกจากนั้นข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บริษัท น่ำเฮงคอนกรีต (1992) จำกัด, บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และบุคคลที่เกี่ยวข้องที่ได้กรุณาช่วยเหลือในการอนุเคราะห์สถานที่และให้ความสะดวกด้านต่างๆตลอดเวลา ที่ได้เข้าไปศึกษาวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ประโยชน์และความดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ บิดา มารดา พี่น้องของข้าพเจ้า ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลืองานด้านต่างๆและเสริมสร้างกำลังใจ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี

ณรงศักดิ์ ลีวานิชกิจ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตารางประกอบ ..... ฌ

สารบัญรูปภาพประกอบ ..... ฎ

บทที่

1. บทนำ 1

1.1. สภาวะความเป็นมา 1

1.2. งานวิจัยที่ผ่านมา 3

1.3. วัตถุประสงค์ของการวิจัย 6

1.4. ขอบเขตของการวิจัย 6

1.5. ขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน 6

1.6. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 7

2. คอนกรีตสมรรถนะสูงและการทดสอบ 8

2.1. คอนกรีตสมรรถนะสูง 8

2.2. วัตถุดิบ 9

2.3. ส่วนผสมของคอนกรีตสมรรถนะสูง 19

2.4. คุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูง 20

3. ปฏิภาคส่วนผสมที่เหมาะสมของมวลรวม 46

3.1. ขนาดคละมวลรวม 46

3.2. การทดสอบขนาดคละมวลรวม 47

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า

3.3. การออกแบบและการปรับปรุงสัดส่วนขนาดคละมวลรวม..... 48
3.4. การออกแบบส่วนผสมเพื่อทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูง..... 51
3.5. การผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง..... 53

4. ผลการทดสอบคุณสมบัติและการวิเคราะห์..... 72
4.1. คำนำ..... 72
4.2. ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต..... 72
4.3. การวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติในสภาพแข็งตัว..... 73
4.4. การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตด้วยสารปอซโซลาน ขี้เถ้าลอย
และ ไมโครซิลิกา..... 82
4.5. การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูงจากงานวิจัย..... 83

5. สรุปการวิจัย..... 114

รายการอ้างอิง..... 117
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. ตัวอย่างการออกแบบคอนกรีตสมรรถนะสูง..... 121
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบคุณสมบัติ..... 124
ประวัติผู้เขียน..... 148

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตารางประกอบ

หน้า

ตารางที่ 1.1. ข้อกำหนดของคอนกรีตสมรรถนะสูง....2
ตารางที่ 2.1. อิทธิพลต่อคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์....29
ตารางที่ 2.2. วิธีการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของวัสดุที่ใช้ในงานคอนกรีตสมรรถนะสูง....29
ตารางที่ 2.3. ขอบเขตปริมาณของสิ่งเจือปนในมวลรวมที่ยอมให้....31
ตารางที่ 2.4. ปริมาณของสารเจือปนในน้ำที่ยอมให้....31
ตารางที่ 2.5. ประเภทน้ำยาผสมเพิ่มตามมาตรฐาน ASTM C - 494....32
ตารางที่ 2.6. คุณสมบัติของไมโครซิลิกา (Condensed Silica Fume)....32
ตารางที่ 2.7. คุณสมบัติทางเคมีของขี้เถ้าลอย(Fly Ash) ตามมาตรฐาน ASTM C - 618....33
ตารางที่ 2.8. การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพเหลว....33
ตารางที่ 2.9. การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตในสภาพแข็งตัว....34
ตารางที่ 3.1. ขนาดคละมวลรวมตามมาตรฐาน ASTM C - 33....54
ตารางที่ 3.2. มาตรฐานขนาดคละของมวลรวมสำหรับคอนกรีตปั๊ม....54
ตารางที่ 3.3. ขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C - 33 กำหนด S/A = 0.40....55
ตารางที่ 3.4. ขอบเขตขนาดคละมวลรวมที่ใช้พิจารณาศึกษา....55
ตารางที่ 3.5. การผสมขนาดคละของมวลรวมขนาด 3/8" และ 3/4"....56
ตารางที่ 3.6. หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างของมวลรวม....56
ตารางที่ 3.7. หน่วยน้ำหนักและปริมาณช่องว่างของมวลรวมตามสัดส่วนทรายต่อมวลรวม (S/A = 0.0 - 1.0)....57
ตารางที่ 3.8. ขนาดคละมวลรวมที่สัดส่วนทรายต่อมวลรวม....58
ตารางที่ 3.9. ผลต่างของขนาดคละมวลรวมที่ใช้เทียบกับขอบเขตที่ศึกษา....58
ตารางที่ 3.10. โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบ ที่สัดส่วนทรายต่อมวลรวมต่างกัน....59
ตารางที่ 3.11. โมดูลัสความละเอียดของทราย ที่สัดส่วนทรายต่อมวลรวมต่างกัน....59
ตารางที่ 3.12. ส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตสมรรถนะสูง....60
ตารางที่ 3.13. ส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตสมรรถนะสูง ผสมขี้เถ้าลอย....61
ตารางที่ 3.14. ส่วนผสมของตัวอย่างทดสอบคอนกรีตสมรรถนะสูง ผสมไมโครซิลิกา....61

หน้า

ตารางที่ 4.1. ผลการทดสอบ กลุ่ม A..... 85
ตารางที่ 4.2. ผลการทดสอบ กลุ่ม B..... 85
ตารางที่ 4.3. ผลการทดสอบ กลุ่ม C..... 85
ตารางที่ 4.4. ผลการทดสอบ กลุ่ม D..... 86
ตารางที่ 4.5. ผลการทดสอบ กลุ่ม E..... 86
ตารางที่ 4.6. ผลการทดสอบ กลุ่ม F..... 86
ตารางที่ 4.7. ผลการทดสอบ กลุ่ม G..... 87
ตารางที่ 4.8. ผลการทดสอบ กลุ่ม H..... 87
ตารางที่ 4.9. ผลการทดสอบ กลุ่ม I..... 87
ตารางที่ 4.10. ผลการทดสอบ กลุ่ม J (ขี้เถ้าลอย 15 %)..... 88
ตารางที่ 4.11. ผลการทดสอบ กลุ่ม K (ขี้เถ้าลอย 20 %)..... 88
ตารางที่ 4.12. ผลการทดสอบ กลุ่ม L (ขี้เถ้าลอย 25 %)..... 88
ตารางที่ 4.13. ผลการทดสอบ กลุ่ม M (ขี้เถ้าลอย 15 %)..... 89
ตารางที่ 4.14. ผลการทดสอบ กลุ่ม N (ไมโครซิลิกา 5 %)..... 89
ตารางที่ 4.15. ผลการทดสอบ กลุ่ม O (ไมโครซิลิกา 10 %)..... 89
ตารางที่ 4.16. ผลการทดสอบ กลุ่ม P (ไมโครซิลิกา 15 %)..... 90
ตารางที่ 4.17. ผลการทดสอบ กลุ่ม Q (ไมโครซิลิกา 20 %)..... 90
ตารางที่ 4.18. ผลการทดสอบคุณสมบัติในสภาพแข็งตัว กลุ่ม C..... 91
ตารางที่ 4.19. ผลการทดสอบคุณสมบัติในสภาพแข็งตัว กลุ่ม F..... 91
ตารางที่ 4.20. ผลการทดสอบคุณสมบัติในสภาพแข็งตัว กลุ่ม I..... 91
ตารางที่ 4.21. ผลการทดสอบคุณสมบัติในสภาพแข็งตัว กลุ่ม K..... 92
ตารางที่ 4.22. ผลการทดสอบคุณสมบัติในสภาพแข็งตัว กลุ่ม O..... 92

สารบัญรูปภาพประกอบ

หน้า

รูปที่ 2.1. องค์ประกอบต่างๆของคอนกรีต..... 35
รูปที่ 2.2. การแบ่งชนิดตามรูปร่างของมวลรวม (Partical Shape)..... 35
รูปที่ 2.3. การทดสอบความทนทานต่อการสึกกร่อนโดยวิธี Los Angeles Abrasion.....36
รูปที่ 2.4. การทดสอบหาปริมาณสารอินทรีย์เจือปนในมวลรวมละเอียด..... 36
รูปที่ 2.5. การทดสอบขนาดคละของมวลรวมโดยการร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน.....37
รูปที่ 2.6. การเรียงตัวของขนาดคละมวลรวม (Gradation)..... 37
รูปที่ 2.7. ลักษณะการทำงานของสารลดน้ำอย่างมาก (Superplasticizer Admixture)...38
รูปที่ 2.8. การวางตัวของไมโครซิลิการะหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์.....38
รูปที่ 2.9. การทดสอบการยุบตัว (Slump Test)..... 39
รูปที่ 2.10. การทดสอบการไหลตัว (Flow Testing)..... 39
รูปที่ 2.11. การเยิ้มของคอนกรีต(Bleeding)..... 40
รูปที่ 2.12. การแยกตัวของคอนกรีต (Seggregation)..... 40
รูปที่ 2.13. การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time)..... 41
รูปที่ 2.14. การทดสอบปริมาณอากาศโดยวิธีใช้ความดัน (Air Content)..... 41
รูปที่ 2.15. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength)..... 42
รูปที่ 2.16. การวิบัติของคอนกรีตสมรรถนะสูงจากการทดสอบกำลังอัด (Failure of High Performance Concrete)..... 42
รูปที่ 2.17. การทดสอบกำลังดึงแตกแยกของคอนกรีต (Spliting Tensile Strength)..... 43
รูปที่ 2.18. ค่ากำลังเฉือนโดยวิธีการของมอร์ (Morh's Rupture Diagrame)..... 43
รูปที่ 2.19. การทดสอบกำลังดัดของคอนกรีต (Flexural Strength)..... 44
รูปที่ 2.20. การทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนพัวซองของคอนกรีต โดยเครื่องมือ Compressometer - Extensometer..... 44
รูปที่ 2.21. การทดสอบการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีต (Permeability)..... 45
รูปที่ 2.22. การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Absorption of Concrete)..... 45
รูปที่ 3.1. ขนาดคละมวลรวมของคอนกรีตตามมาตรฐานต่างๆ..... 62

หน้า

รูปที่ 3.2. ขอบเขตขนาดคละมวลรวมกำหนดสำหรับคอนกรีตสมรรถนะสูง ในงานวิจัยนี้.....62
รูปที่ 3.3. ผลการทดสอบขนาดคละของมวลรวมขนาด 3/4" เทียบกับมาตรฐาน ASTM C - 33.....63
รูปที่ 3.4. ผลการทดสอบขนาดคละของมวลรวมขนาด 3/8" เทียบกับมาตรฐาน ASTM C - 33.....64
รูปที่ 3.5. ผลการทดสอบขนาดคละของมวลรวมละเอียด (ทราย) เทียบกับมาตรฐาน ASTM C - 33.....65
รูปที่ 3.6. โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบ ขนาด 3/4".....66
รูปที่ 3.7. โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมหยาบ ขนาด 3/8".....66
รูปที่ 3.8. โมดูลัสความละเอียดของมวลรวมละเอียด (ทราย).....67
รูปที่ 3.9. การรวมขนาดคละของมวลรวมหยาบขนาด 3/8" / 3/4" ที่อัตราการผสมต่างกัน.....68
รูปที่ 3.10. ความสัมพันธ์ของหน่วยน้ำหนักมวลรวมกับสัดส่วนทรายต่อมวลรวม (S/A = 0.0 - 1.0).....69
รูปที่ 3.11. ความสัมพันธ์ของปริมาณช่องว่างในมวลรวมกับสัดส่วนทรายต่อมวลรวม (S/A = 0.0 - 1.0).....70
รูปที่ 3.12. ขนาดคละของมวลรวมตามสัดส่วนทรายต่อมวลรวม (S/A = 0.40 - 0.50).....71
รูปที่ 4.1. กำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ปริมาณสารลดน้ำพิเศษ เท่ากับ 1.20 ลิตร/ ปูนซีเมนต์ 100 กก.....93
รูปที่ 4.2. กำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ปริมาณสารลดน้ำพิเศษ เท่ากับ 1.80 ลิตร/ ปูนซีเมนต์ 100 กก.....93
รูปที่ 4.3. กำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ปริมาณสารลดน้ำพิเศษ เท่ากับ 2.40 ลิตร/ ปูนซีเมนต์ 100 กก.....94
รูปที่ 4.4. ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์.....94
รูปที่ 4.5. อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เทียบกับกำลังอัดที่ 28 วัน เมื่อการไหลตัวตามข้อกำหนด.....95

หน้า

รูปที่ 4.6. ปริมาณปูนซีเมนต์กับกำลังอัดที่ 28 วัน ที่การไหลตัวต่างกัน..... 95
รูปที่ 4.7. กำลังดึงแตกแยกของคอนกรีตสมรรถนะสูง..... 96
รูปที่ 4.8. กำลังเฉือนของคอนกรีตสมรรถนะสูง..... 96
รูปที่ 4.9. กำลังดัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง..... 97
รูปที่ 4.10. ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตสมรรถนะสูง ที่กำลังอัด 746 กก./ตร.ซม. 97
รูปที่ 4.11. โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตสมรรถนะสูง..... 98
รูปที่ 4.12. อัตราส่วนพัวซองของคอนกรีตสมรรถนะสูง..... 98
รูปที่ 4.13. สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตสมรรถนะสูง..... 99
รูปที่ 4.14. การดูดซึมน้ำของคอนกรีตสมรรถนะสูง..... 99
รูปที่ 4.15. การไหลตัวเทียบกับปริมาณปูนซีเมนต์ เมื่อเพิ่มสารปอซโซลาน ขี้เถ้าลอย.... 100
รูปที่ 4.16. การไหลตัวเทียบกับปริมาณปูนซีเมนต์ เมื่อเพิ่มสารปอซโซลาน ไมโครซิลิกา 100
รูปที่ 4.17. กำลังอัดที่ 28 วันกับค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่อัตราการเพิ่มขี้เถ้าลอยต่างกัน..... 101
รูปที่ 4.18. กำลังอัดเทียบกับปริมารปูนซีเมนต์ เมื่อเพิ่มสารปอซโซลาน ไมโครซิลิกา..... 101
รูปที่ 4.19. กำลังอัดที่ 28 วันกับค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ที่อัตราการเพิ่มไมโครซิลิกาต่างกัน..... 102
รูปที่ 4.20. กำลังอัดของคอนกรีตเทียบกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และขี้เถ้าลอย..... 103
รูปที่ 4.21. กำลังอัดของคอนกรีตเทียบกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และไมโครซิลิกา.... 104
รูปที่ 4.22. กราฟเปรียบเทียบกำลังดึงแตกแยกของคอนกรีตสมรรถนะสูง เมื่อเพิ่มสารปอซโซลาน..... 105
รูปที่ 4.23. กราฟเปรียบเทียบกำลังเฉือนของคอนกรีตสมรรถนะสูง เมื่อเพิ่มสารปอซโซลาน..... 105
รูปที่ 4.24. กราฟเปรียบเทียบกำลังดัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง เมื่อเพิ่มสารปอซโซลาน..... 106
รูปที่ 4.25. กราฟเปรียบเทียบโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตสมรรถนะสูง เมื่อเพิ่มสารปอซโซลาน..... 106

หน้า

รูปที่ 4.26. กราฟเปรียบเทียบอัตราส่วนพัวซองของคอนกรีตสมรรถนะสูง เมื่อเพิ่มสารปอซโซลาน..... 107
รูปที่ 4.27. กราฟเปรียบเทียบการซึมผ่านของน้ำของคอนกรีตสมรรถนะสูง เมื่อเพิ่มสารปอซโซลาน..... 107
รูปที่ 4.28. กราฟเปรียบเทียบเปอร์เซนต์การดูดซึมน้ำของคอนกรีตสมรรถนะสูง เมื่อเพิ่มสารปอซโซลาน..... 108
รูปที่ 4.29. Flow Chart การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตสมรรถนะสูง..... 109
รูปที่ 4.30. ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์กับกำลังประลัยของคอนกรีต..... 110
รูปที่ 4.31. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์กับกำลังประลัยของคอนกรีต..... 111
รูปที่ 4.32. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารลดน้ำพิเศษกับ การไหลตัว..... 112
รูปที่ 4.33. กราฟแสดงการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง ด้วยไมโครซิลิกา..... 112
รูปที่ 4.34. กราฟแสดงการเพิ่มการไหลตัวของคอนกรีตสมรรถนะสูง ด้วยขี้เถ้าลอย..... 113

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย