ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
E41021

DEVELOPMENT OF BLENDED CALCIUM CARBIDE RESIDUE AND POZZOLANS AS A CEMENTITIOUS MATERIAL IN CONCRETE

MR. NATTAPONG MAKARATAT

A DISSERTATION SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
(CIVIL ENGINEERING)
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI
2011

b00255412

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
E41021

Development of Blended Calcium Carbide Residue and Pozzolans as a Cementitious Material in Concrete

Mr. Nattapong Makaratat M.Eng. (Civil Engineering)

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy (Civil Engineering)
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
King Mongkut's University of Technology Thonburi
2011

Dissertation Committee

..... Chairman of Dissertation Committee
(Prof. Prinya Chindaprasirt, Ph.D.)

..... Member and Dissertation Advisor
(Prof. Chai Jaturapitakkul, Ph.D.)

..... Member
(Assoc. Prof. Anek Siripanichgorn, M.Eng.)

..... Member
(Asst. Prof. Smith Songpiriyakij, Ph.D.)

..... Member
(Asst. Prof. Tawich Pulngern, Ph.D.)

THE NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF THAILAND RESEARCH LIBRARY

Copyright reserved

Dissertation Title	Development of Blended Calcium Carbide Residue and Pozzolans as a Cementitious Material in Concrete
Dissertation Credits	36
Candidate	Mr. Nattapong Makaratat
Dissertation Advisor	Prof. Dr. Chai Jaturapitakkul
Program	Doctor of Philosophy
Field of Study	Civil Engineering
Department	Civil Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2554

Abstract

E41021

This dissertation was aimed to develop the industrial wastes as a new concrete binder consisting of mixtures of ground calcium carbide residue (CR) and ground pozzolanic materials such as pulverized coal combustion fly ash (FM), fluidized bed combustion fly ash (FN), palm oil fuel ash (PA), and rice husk-bark ash (RA). A new binder from CR-pozzolans mixtures containing no Ordinary Portland Cement (OPC) or 10 percent of OPC by weight of binder was used as a binder in normal-strength concrete, high-strength concrete and concrete bricks. Fresh concrete properties, mechanical properties, and water permeability of the concrete were evaluated. In addition, basic properties of concrete brick were tested.

The results indicated that compressive strength of CR-pozzolans concrete ranged from 10.4 to 33.5 MPa at 28 days and increased to 14.2 to 56.1 MPa at 90 days even though it contained no Portland cement. The mechanical properties of CR-pozzolans concrete were similar to those of Portland cement concrete although the binder of concrete did not have OPC or had 10 percent of OPC by weight of binder. The modulus of elasticity and the splitting tensile strength of CR-pozzolans concrete increased with the increase of compressive strength. Use of OPC at 10 percent by weight of binder significantly improved compressive strength, elastic modulus, and splitting tensile strength of CR-pozzolans concrete. Although CR-pozzolan concrete had small amount of OPC of 55 kg/m^3, it produced the compressive strength of 42.3 MPa at 28 days, which increased to 72.4 MPa at 180 days.

CR-FM mixtures with W/B ratio of 0.25 produced high-strength concrete but had heat evolution much lower than Portland cement concrete NC(0.25). The highest temperature rises of CR-FM(0.25) and CR-FM(0.25)10 concrete were 11 and 15°C which were about 0.26 and 0.36 times that of NC(0.25) concrete, respectively. The water permeability of CR-pozzolan concrete varied from $0.65x10^{-12}$ to $81.92x10^{-12}$ m/s at 28 days depending on its compressive strengths. The use of 45 kg/m^3 OPC to replace CR-pozzolan binder resulted in effective increase of the impermeability as well as the

E41021

compressive strength of CR-pozzolan concrete. At 90 days, the water permeability values of CR-pozzolan concrete were lower than those of Portland cement concrete NC(0.65) (cement content 300 kg/m^3,) although the lower compressive strengths of the CR-pozzlans concrete were also found.

CR-FM and CR-PA mixtures could be used as a binder for concrete facing brick with high-strength and high resistance to moisture penetration according to ASTM C1634 for normal weight classification. CR-FM and CR-PA concrete bricks had compressive strength of 26.5 and 27.4 MPa at 28 days, respectively. In addition, concrete brick made from CR-FN binder was classified as having moderate strength and resistance to moisture penetration of concrete building brick according to ASTM C55 for normal weight classification.

In conclusion, the mixtures of calcium carbide residue and pozzolanic materials could be used not only as a new binder in concrete and concrete brick, but could also help to reduce the production of Portland cement and disposal of calcium carbide residue and pozzolanic materials. This new binder material is a real friendly material for environment and should be promoted to be used in concrete construction industry.

Keywords : Calcium Carbide Residue / Fly Ash / Palm Oil Fuel Ash / Rice Husk-Bark Ash / High-Strength Concrete / Water Permeability / Concrete Brick

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และวัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุประสานในคอนกรีต
หน่วยกิต	36
ผู้เขียน	นายณัฐพงศ์ มกระธัช
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศ.ดร. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล
หลักสูตร	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2554

บทคัดย่อ

E 41021

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือการพัฒนาส่วนผสมจากวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมให้เป็นวัสดุประสานชนิดใหม่ในคอนกรีต ซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์ (CR) และวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหินแม่เมาะ (FM) เถ้าถ่านหินภาคกลาง (FN) เถ้าปาล์มน้ำมัน (PA) และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (RA) วัสดุประสานชนิดใหม่นี้ไม่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงร้อยละ 10 ของน้ำหนักวัสดุประสาน ในส่วนผสมของคอนกรีตกำลังปกติ คอนกรีตกำลังสูง และอิฐคอนกรีต งานวิจัยนี้ทำการประเมินคุณสมบัติของคอนกรีตสด คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต และค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต รวมทั้งทำการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของอิฐคอนกรีต

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมวัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุประสานให้กำลังอัดอยู่ในช่วง 10.4 ถึง 33.5 เมกกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน และให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 14.2 ถึง 56.1 เมกกะปาสคาล ที่อายุ 90 วัน แม้ว่าคอนกรีตดังกล่าวไม่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสม คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมวัสดุปอซโซลานคล้ายกับคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แม้ว่าวัสดุประสานดังกล่าวไม่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสมเพียงร้อยละ 10 ของน้ำหนักวัสดุประสาน โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และกำลังดึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้น การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงร้อยละ 10 ของน้ำหนักวัสดุประสานในคอนกรีต ส่งผลให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมาก รวมถึงกำลังดึงและค่าโมดูลัสยืดหยุ่น แม้ว่าคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมวัสดุปอซโซลานใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ต

E41021

แลนด์ในปริมาณที่น้อยมากเพียง 55 กก/ม^3 แต่สามารถให้กำลังอัดที่สูงถึง 42.3 เมกกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็น 72.4 เมกกะปาสคาล ที่อายุ 180 วัน

ส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และเถ้าถ่านหิน (CR-FM) ที่ใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.25 นอกจากให้ค่ากำลังอัดสูงแล้วยังมีอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน NC(0.25) ค่อนข้างมาก โดยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นสูงสุดของคอนกรีต CR-FM(0.25) และ CR-FM(0.25)10 มีค่าเท่ากับ 11 และ 15 องศาเซลเซียส หรือประมาณ 0.26 และ 0.36 เท่าของอุณหภูมิคอนกรีต NC(0.25) ตามลำดับ คอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมวัสดุปอซโซลานมีค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตอยู่ในช่วง $0.65x10^{-12}$ ถึง $81.92x10^{-12}$ เมตร/วินาที ที่อายุ 28 วัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่ากำลังอัด การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แทนที่ในวัสดุประสานเพียง 45 กก/ม^3 ส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำและกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยที่อายุ 90 วัน ค่าการซึมของน้ำผ่านคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมวัสดุปอซโซลานมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ NC(0.65) (ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 300 กก/ม^3) แม้ว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ผสมวัสดุปอซโซลานมีค่าต่ำกว่าด้วยเช่นกัน

ส่วนผสมของ CR-FM และ CR-PA สามารถใช้เป็นวัสดุประสานสำหรับอิฐคอนกรีตหรือก้อนประดับที่มีน้ำหนักปกติ โดยอิฐคอนกรีตที่ได้มีกำลังอัดสูง และมีความต้านทานต่อการดูดซึมของน้ำสูง เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C1634 อิฐคอนกรีต CR-FM และ CR-PA ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 26.5 และ 27.4 เมกกะปาสคาล ที่อายุ 28 วัน ตามลำดับ สำหรับอิฐคอนกรีตที่ทำจากส่วนผสมของ CR-FN สามารถจัดอยู่ในอิฐคอนกรีตสำหรับก่อสร้างน้ำหนักปกติที่ให้กำลังอัดปานกลาง และสามารถต้านทานต่อการดูดซึมของน้ำได้ดี เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C55

ส่วนผสมของกากแคลเซียมคาร์ไบด์และวัสดุปอซโซลานนอกจากสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุประสานชนิดใหม่ในคอนกรีตและอิฐคอนกรีตแล้ว ยังสามารถช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจากการลดการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และลดปัญหาการทิ้งของทั้งกากแคลเซียมคาร์ไบด์และวัสดุปอซโซลานได้ กล่าวได้ว่าวัสดุประสานชนิดใหม่นี้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสูง และควรได้รับการส่งเสริมให้มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างคอนกรีตต่อไป

คำสำคัญ : กากแคลเซียมคาร์ไบด์ / เถ้าถ่านหิน / เถ้าปาล์มน้ำมัน / เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ / คอนกรีตกำลังสูง / การซึมของน้ำผ่านคอนกรีต / อิฐคอนกรีต

ACKNOWLEDGEMENTS

Firstly, I would like to thank my advisor, Prof. Chai Jaturapitakkul for all his kind encouragement, his valuable guidance and support all the time. I am also grateful to my committee members, Prof. Prinya Chindaprasirt, Assoc. Prof. Anek Siripanichgorn, Asst. Prof. Smith Songpiriyakij, and Asst. Prof. Tawich Pulngern for their constructive evaluation of this dissertation. Their expertise and continual guidance inspire my enthusiasm for carrying on my research during the whole study period.

I would like to thank the concrete laboratory and department of civil engineering for providing excellent equipment and computing facilities. Sincere gratitude is due to all supporting staffs in civil engineering department for their suggestions and assistance in solving all general problems. I also wish to thank all staffs in concrete laboratory for providing useful tips and equipment for my measurement campaign.

My special thanks go to the financial supports from the Thailand Research Fund (TRF) under TRF Senior Research Scholar Grant No. RTA5080020 and RTA5380002, the Commission on Higher Education, Ministry of Education. Thanks are also extended to the National Research Council of Thailand. Furthermore, I would like to express thanks to my friends in KMUTT for our friendship during these several years. Their kind support has comforted me during these tough periods.

Finally, I would like to express my utmost gratitude to my parents and my family. With their infinitely great support throughout these difficult times, I am able to finish my research and complete my PhD study successfully as expected.

In Loving Memory of My Mother

CONTENTS

		PAGE
ENGLISH ABSTRACT		ii
THAI ABSTRACT		iv
ACKNOWLEDGEMENTS		vi
CONTENTS		vii
LIST OF TABLES		ix
LIST OF FIGURES		xi
CHAPTER		
1. INTRODUCTION		**1**
1.1	Problem Statements	1
1.2	Objectives	2
1.3	Scope of Study	3
1.4	Details of the Dissertation	3
2. LITERATURE REVIEW		**5**
2.1	Calcium Carbide Residue	5
2.2	Pozzolanic Material	7
2.2.1	Fly Ash	7
2.2.2	Palm Oil Fuel Ash	9
2.2.3	Rice Husk-Bark Ash	10
2.3	High Strength Concrete	12
2.4	Water Permeability	14
2.5	Concrete Brick	15
3. METHODOLOGY		**17**
3.1	Materials	17
3.1.1	Calcium Carbide Residue	17
3.1.2	Fly Ash	18
3.1.3	Palm Oil Fuel Ash	19
3.1.4	Rice Husk-Bark Ash	19
3.1.5	Portland Cement Type I	20
3.1.6	Water	20
3.1.7	Superplasticizer	20
3.1.8	Aggregates	20
3.2	Method of Study	21
3.2.1	Material Properties	21
3.2.2	Mix Proportions of Concrete	21
3.2.3	Mix Proportions and Formation of Concrete Brick	24
3.2.4	Test Program	25
3.2.4.1	Mechanical Properties of Concrete	25

3.2.4.2 Heat Evolution Test 25
3.2.4.3 Water Permeability of Concrete 26
3.2.4.4 Compressive Strength and Water Absorption of Concrete Brick 28
3.3 List of Abbreviations 28
3.3.1 Concrete 28
3.3.2 Concrete Brick 28

4. RESULTS AND DISCUSSIONS 29
4.1 Properties of Calcium Carbide Residue and Pozzolanic Materials 29
4.1.1 Physical Properties 29
4.1.2 Chemical Compositions 31
4.2 Fresh Concrete Properties 32
4.2.1 Requirement of Superplasticizer 33
4.2.2 Setting Times of Concrete 34
4.2.3 Heat Evolution of Concrete 36
4.3 Mechanical Properties of Concrete 38
4.3.1 Compressive Strength of Concrete 38
4.3.2 Modulus of Elasticity of Concrete 42
4.3.3 Splitting Tensile Strength of Concrete 43
4.4 Water Permeability of Concrete 45
4.5 Use of CR-Pozzolans Binder for Concrete Brick 48
4.5.1 Compressive Strength of Concrete Brick 48
4.5.2 Density and Water Absorption of Concrete Brick 50
4.5.3 Comparison with Standard Specifications for Concrete Building Brick (ASTM C55) and Concrete Facing Brick (ASTM C1634) 51

5. CONCLUSIONS AND FUTURE WORKS 53
5.1 Conclusions 53
5.2 Future Works 54

REFERENCES 56

APPENDIX 63
A Setting Times of Concretes 63
B Heat Evolution of Fresh Concretes 79
C Compressive Strength of Concretes 81
D Modulus of Elasticity of Concretes 90
E Splitting Tensile Strength of Concretes 95
F Water Permeability of Concretes 100
G Compressive Strength and Water Absorption of Concrete Bricks 141

CURRICULUM VITAE 146

LIST OF TABLES

TABLE		PAGE
2.1	Strength, absorption, and density classification requirements for concrete building brick (ASTM C55)	15
2.2	Strength, absorption, and density classification requirements for concrete facing brick (ASTM C1634)	15
3.1	Mix proportions of concrete	22
3.2	Mix proportions of concrete brick	25
4.1	Physical properties of CR, FM, FN, PA, RA, and OPC	31
4.2	Chemical compositions of OPC, CR, FM, FN, PA, and RA	32
4.3	Setting times of concretes	35
4.4	Heat evolution of concretes	36
4.5	Compressive strength and elastic modulus of concretes	38
4.6	Splitting tensile strength of concretes	44
4.7	Water permeability of concretes	47
4.8	Compressive strengths of concrete bricks	49
4.9	Physical properties of concrete brick at 28 days	50
4.10	Comparison with concrete building brick (ASTM C55) for normal weight	51
4.11	Comparison with concrete facing brick (ASTM C1634) for normal weight	52
A.1	Setting times of CR-FN(0.65) concrete	64
A.2	Setting times of CR-FN(0.65)10 concrete	65
A.3	Setting times of NC(0.65) concrete	66
A.4	Setting times of CR-FM(0.45) concrete	67
A.5	Setting times of CR-FM(0.45)10 concrete	68
A.6	Setting times of CR-FN(0.45) concrete	69
A.7	Setting times of CR-FN(0.45)10 concrete	70
A.8	Setting times of CR-PA(0.45) concrete	71
A.9	Setting times of CR-PA(0.45)10 concrete	72
A.10	Setting times of CR-RA(0.45) concrete	73
A.11	Setting times of CR-RA(0.45)10 concrete	74
A.12	Setting times of NC(0.45) concrete	75
A.13	Setting times of CR-FM(0.25) concrete	76
A.14	Setting times of CR-FM(0.25)10 concrete	77
A.15	Setting times of NC(0.25) concrete	78
B.1	Heat evolution of fresh concretes	80
C.1	Compressive strengths of CR-FN(0.65) concrete	82
C.2	Compressive strengths of CR-FN(0.65)10 concrete	82
C.3	Compressive strengths of NC(0.65) concrete	83
C.4	Compressive strengths of CR-FM(0.45) concrete	83

C.5 Compressive strengths of CR-FM(0.45)10 concrete 84
C.6 Compressive strengths of CR-FN(0.45) concrete 84
C.7 Compressive strengths of CR-FN(0.45)10 concrete 85
C.8 Compressive strengths of CR-PA(0.45) concrete 85
C.9 Compressive strengths of CR-PA(0.45)10 concrete 86
C.10 Compressive strengths of CR-RA(0.45) concrete 86
C.11 Compressive strengths of CR-RA(0.45)10 concrete 87
C.12 Compressive strengths of NC(0.45) concrete 87
C.13 Compressive strengths of CR-FM(0.25) concrete 88
C.14 Compressive strengths of CR-FM(0.25)10 concrete 88
C.15 Compressive strengths of NC(0.25) concrete 89
D.1 Modulus of elasticity of concretes at 28 days 91
D.2 Modulus of elasticity of concretes at 90 days 93
E.1 Splitting tensile strength of concretes at 28 days 96
E.2 Splitting tensile strength of concretes at 90 days 98
F.1 Water permeability of CR-FM(0.45) concrete at 28 days 101
F.2 Water permeability of CR-FM(0.45) concrete at 90 days 103
F.3 Water permeability of CR-FM(0.45)10 concrete at 28 days 105
F.4 Water permeability of CR-FM(0.45)10 concrete at 90 days 107
F.5 Water permeability of CR-FN(0.45) concrete at 28 days 109
F.6 Water permeability of CR-FN(0.45) concrete at 90 days 111
F.7 Water permeability of CR-FN(0.45)10 concrete at 28 days 113
F.8 Water permeability of CR-FN(0.45)10 concrete at 90 days 115
F.9 Water permeability of CR-PA(0.45) concrete at 28 days 117
F.10 Water permeability of CR-PA(0.45) concrete at 90 days 119
F.11 Water permeability of CR-PA(0.45)10 concrete at 28 days 121
F.12 Water permeability of CR-PA(0.45)10 concrete at 90 days 123
F.13 Water permeability of CR-RA(0.45) concrete at 28 days 125
F.14 Water permeability of CR-RA(0.45) concrete at 90 days 127
F.15 Water permeability of CR-RA(0.45)10 concrete at 28 days 129
F.16 Water permeability of CR-RA(0.45)10 concrete at 90 days 131
F.17 Water permeability of NC(0.65) concrete at 28 days 133
F.18 Water permeability of NC(0.65) concrete at 90 days 135
F.19 Water permeability of NC(0.45) concrete at 28 days 137
F.20 Water permeability of NC(0.45) concrete at 90 days 139
G.1 Compressive strengths of CR-FM concrete brick 142
G.2 Compressive strengths of CR-FN concrete brick 142
G.3 Compressive strengths of CR-PA concrete brick 143
G.4 Compressive strengths of CR-RA concrete brick 143
G.5 Compressive strengths of NB concrete brick 144
G.6 Water absorption of concrete bricks 145

LIST OF FIGURES

FIGURE		PAGE
2.1	Calcium carbide residue is released from factory	5
2.2	Disposal area of calcium carbide residue	6
3.1	Calcium carbide residue after sun-dried for 3-4 days	17
3.2	Landfill of Mae Moh power plant in northern part of Thailand	18
3.3	Fly Ash of NPS power plant in central part of Thailand	18
3.4	Palm oil fuel ash heap	19
3.5	Disposal area of rice husk-bark ash	20
3.6	Powder of ground calcium carbide residue	21
3.7	Test program	23
3.8	Fabrication of concrete brick specimen	24
3.9	Heat evolution of concrete test	26
3.10	Water permeability setup for testing concrete	27
4.1	Scanning electron microscope images of CR, FM, FN, PA, and RA	30
4.2	Particle size distributions of materials	31
4.3	Relationship between temperature rise and duration time after casting	37
4.4	Compressive strengths of concretes at W/B ratio of 0.65	39
4.5	Compressive strengths of concretes at W/B ratio of 0.45	40
4.6	Compressive strengths of concretes at W/B ratio of 0.25	41
4.7	Relationship between modulus of elasticity and square root of compressive strength of concrete	43
4.8	Relationship between splitting tensile strength and square root of compressive strength of concrete	45
4.9	Relationship between water permeability and compressive strength of concrete	48
4.10	Compressive strengths of concrete bricks	50
A.1	Setting times of CR-FN(0.65) concrete	64
A.2	Setting times of CR-FN(0.65)10 concrete	65
A.3	Setting times of NC(0.65) concrete	66
A.4	Setting times of CR-FM(0.45) concrete	67
A.5	Setting times of CR-FM(0.45)10 concrete	68
A.6	Setting times of CR-FN(0.45) concrete	69
A.7	Setting times of CR-FN(0.45)10 concrete	70
A.8	Setting times of CR-PA(0.45) concrete	71
A.9	Setting times of CR-PA(0.45)10 concrete	72
A.10	Setting times of CR-RA(0.45) concrete	73
A.11	Setting times of CR-RA(0.45)10 concrete	74
A.12	Setting times of NC(0.45) concrete	75
A.13	Setting times of CR-FM(0.25) concrete	76
A.14	Setting times of CR-FM(0.25)10 concrete	77

A.15 Setting times of NC(0.25) concrete 78
F.1 Water permeability of CR-FM(0.45) concrete at 28 days 102
F.2 Water permeability of CR-FM(0.45) concrete at 90 days 104
F.3 Water permeability of CR-FM(0.45)10 concrete at 28 days 106
F.4 Water permeability of CR-FM(0.45)10 concrete at 90 days 108
F.5 Water permeability of CR-FN(0.45) concrete at 28 days 110
F.6 Water permeability of CR-FN(0.45) concrete at 90 days 112
F.7 Water permeability of CR-FN(0.45)10 concrete at 28 days 114
F.8 Water permeability of CR-FN(0.45)10 concrete at 90 days 116
F.9 Water permeability of CR-PA(0.45) concrete at 28 days 118
F.10 Water permeability of CR-PA(0.45) concrete at 90 days 120
F.11 Water permeability of CR-PA(0.45)10 concrete at 28 days 122
F.12 Water permeability of CR-PA(0.45)10 concrete at 90 days 124
F.13 Water permeability of CR-RA(0.45) concrete at 28 days 126
F.14 Water permeability of CR-RA(0.45) concrete at 90 days 128
F.15 Water permeability of CR-RA(0.45)10 concrete at 28 days 130
F.16 Water permeability of CR-RA(0.45)10 concrete at 90 days 132
F.17 Water permeability of NC(0.65) concrete at 28 days 134
F.18 Water permeability of NC(0.65) concrete at 90 days 136
F.19 Water permeability of NC(0.45) concrete at 28 days 138
F.20 Water permeability of NC(0.45) concrete at 90 days 140