

การศึกษาอัตราการเสื่อมสภาพของคอนกรีต และอัตราการเกิดสนิม
ของเหล็กเสริมของโครงสร้างสะพานคอนกรีต ในเขตกรุงเทพมหานคร



นาย นิพนธ์ จงพิทักษ์ศิลป์

ศูนย์วิทยพัทยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ.2538

ISBN 974-632-806-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 167 95118

STUDY ON DETERIORATION RATE OF CONCRETE AND CORROSION RATE
OF REINFORCING STEEL OF CONCRETE BRIDGE STRUCTURES
IN BANGKOK METROPOLITAN AREA



Mr. Nipon Jongpitaksseel

ศูนย์วิทยทรัพยากร

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

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department of Civil Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1995

ISBN 974-632-806-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาอัตราการเสื่อมสภาพของคอนกรีต และอัตราการเกิดสนิม
ของเหล็กเสริมของโครงสร้างสะพานคอนกรีต ในเขตกรุงเทพมหานคร

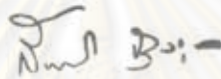
โดย นายนิพนธ์ จงพิทักษ์ศิลป์

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ

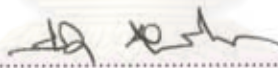


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต



.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ฤงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. วินิต ช่อวิเชียร)



.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ)



.....กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี)



.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว



นิพนธ์ จงพิทักษ์ศิลป์ : การศึกษาอัตราการเสื่อมสภาพของคอนกรีต และอัตราการเกิดสนิมของเหล็กเสริมของโครงสร้างสะพานคอนกรีต ในเขตกรุงเทพมหานคร (STUDY ON DETERIORATION RATE OF CONCRETE AND CORROSION RATE OF REINFORCING STEEL OF CONCRETE BRIDGE STRUCTURES IN BANGKOK METROPOLITAN AREA) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร. เอกสิทธิ์ ลี้มสุวรรณ, 96 หน้า. ISBN 974-632-806-9

ตามปกติเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จะสามารถป้องกันการเกิดสนิม จากคุณสมบัติความเป็นต่างของคอนกรีตที่หุ้มอยู่โดยรอบ แต่สถานะสภาพความเป็นต่างของคอนกรีตจะถูกทำลายด้วยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในเนื้อคอนกรีต เกิดขบวนการคาร์บอนเนชั่นในคอนกรีต และเมื่อปฏิกิริยาเข้าถึงผิวเหล็กเสริมจะทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้หากมีน้ำและก๊าซออกซิเจนอย่างพอเพียง สนิมในเหล็กเสริมจะส่งผลให้กำลังของโครงสร้างลดลง เพราะหน้าตัดของเหล็กเสริมจะลดลง แต่เหล็กเสริมที่เป็นสนิมจะมีปริมาตรเพิ่มมากขึ้นเกิดแรงดันทำให้คอนกรีตปริแตก และเมื่อถึงสภาวะดังกล่าว อัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจะทวีความรุนแรงมากขึ้น เนื่องจากผิวเหล็กจะสัมผัสกับอากาศ และความชื้นโดยตรง

งานวิจัยนี้จะศึกษาขบวนการการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต และการเกิดสนิมของเหล็กเสริม ซึ่งขบวนการการเกิดคาร์บอนเนชั่นเป็นขบวนการทางเคมีฟิสิกส์ จะประกอบด้วย กลไกการควบแน่นของน้ำภายในรูพรุน การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเนื้อคอนกรีต และการทำปฏิกิริยาทางเคมีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และกับสารประกอบซีเมนต์ที่สามารถเกิดคาร์บอนเนตได้ การศึกษาได้จำลองพฤติกรรมทางคณิตศาสตร์ของขบวนการการเกิดคาร์บอนเนชั่นที่มีความซับซ้อนอย่างมากให้เข้าใจพฤติกรรมได้อย่างชัดเจน อัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นที่น่าเสนอ ได้มาจากผลการทดลองของนักวิจัยในอดีตหลายท่าน ร่วมกับการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีที่ทดลอง แล้วจึงนำมาเปรียบเทียบกับผลการวัดความลึกคาร์บอนเนชั่นของโครงสร้างจริงจากตัวอย่างสะพานในเขตกรุงเทพมหานคร ซึ่งพบว่าให้ค่าต่างๆ สอดคล้องกับสภาพสิ่งแวดล้อมในเขตกรุงเทพมหานครเป็นอย่างดี ส่วนขบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริม จะเป็นขบวนการทางไฟฟ้าเคมี เริ่มต้นจากเหล็กเสริมที่ฝังอยู่ในคอนกรีตจะถูกบกรวน เมื่อความชื้นและคาร์บอนไดออกไซด์ ทำปฏิกิริยาทางเคมีเป็นกรดอ่อน ๆ และทำให้ค่า pH ในคอนกรีตค่อย ๆ ลดลง จนมีสภาพก่อให้เกิดการกัดกร่อนที่ผิวเหล็กเสริมเกิดเป็นสนิมเมื่อมีความชื้นหรือน้ำ และออกซิเจนหรืออากาศอย่างพอเพียง อัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในช่วงเริ่มต้น และช่วงปลาย จะแปรผันตรงกับเวลาและความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้ในเขตกรุงเทพมหานคร

การวิจัยนี้ยังได้ศึกษาถึงอายุการใช้งานของโครงสร้างโดยกำหนดให้มีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.5 และหากยึดถือการลดพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมเกินกว่าร้อยละ 10 บ่งบอกระดับความเสียหายของโครงสร้าง อันนำไปสู่การซ่อมแซมปรับปรุงเพื่อให้มีกำลังความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างโดยปราศจากการวิบัติใด ๆ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา.....
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา.....
ปีการศึกษา2538.....

ลายมือชื่อนิสิตนิพนธ์ จงพิทักษ์ศิลป์.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม



C515171 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD:

CARBONATION / CORROSION / DETERIORATION / DURABILITY /SERVICE LIFE

NIPON JONGPITAKSSEEL : STUDY ON DETERIORATION RATE OF CONCRETE AND CORROSION RATE OF REINFORCING STEEL OF CONCRETE BRIDGE STRUCTURES IN BANGKOK METROPOLITAN AREA.

THESIS ADVISOR : PROF. EKASIT LIMSUWAN, Ph.D. 96 pp. ISBN 974-632-806-9

Normally steel bars in reinforced concrete structures are protected from corrosion by high pH of the surrounding concrete. This alkaline environment can be destroyed by chemical reaction of atmospheric carbon dioxide with calcium hydroxide of concrete mass. When this process, called carbonation of concrete, has reached the reinforcing bars, it will induce rust if moisture and oxygen are sufficient. The strength of structure be affected by corrosion due to some reduction of steel area and some volume changes from rust which develops internal force to induce cracks in concrete. When the last state is reached, the corrosion rate becomes more severe due to direct exposure to air and moisture .

This research is undertaken to study the physicochemical processes of carbonation of concrete and the electrochemical process of reinforcing steel corrosion. The carbonation process involves mechanism of water condensation in concrete pore, diffusion of carbon dioxide in the gaseous phase of concrete pore, and step of chemical reaction of carbon dioxide with calcium hydroxide, and some other solid carbonatable constituents of harden cement paste. The mathematical model of very complex behaviors are presented on the basis of empirical fitted curve or semitheory-experiment of several previous researchers. The results are compared to the actual inspection of carbonation depths to obtain reasonable good agreement with local environmental condition of Bangkok. The corrosion model is undertaken of the electrochemical processes of reinforcing steel embedded in concrete. The steel surface can be disturbed from introduction of humidity and carbon dioxide induce chemical reaction to reduce pH from alkalinity to neutral and become acidity. The corrosion of initial and corrosion periods will be subjected to measured means as relative humidity and oxygen as presented. Rate of corrosion in accordance with environmental conditions of relative humidity and carbon dioxide concentration as monitored in Bangkok has taken into consideration.

The research work have also considered the service life of simulated structure of concrete with 0.5 water cement ratio and the reduction of steel area of 10 percents as which the structure can no longer be service prior to some strengthening to sufficient strength capacity as required.

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา.....2538

ลายมือชื่อนิสิต.....นิพนธ์ จงพิทักษ์เศล

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ความรู้ และคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ ในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งความกรุณาตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง ไปอย่างสมบูรณ์ และขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อันประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร. วินิต ช่อวิเชียร ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาติรี และ อาจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนสำเร็จเรียบร้อย

ท้ายสุดนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณมารดา ซึ่งได้ให้โอกาสในการศึกษาเล่าเรียน และให้กำลังใจแก่ผู้เขียนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

นิพนธ์ จงพิทักษ์ศีล

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญภาพ	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ

บทที่

1 บทนำ	1
1.1 ความนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 งานวิจัยที่ผ่านมา	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย	3
1.5 ขอบข่ายของงานวิจัย	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 คาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต	5
2.1 ความนำ	5
2.2 น้ำภายในรูพรุนคอนกรีต	6
2.3 การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในคอนกรีต	9
2.4 ปฏิริยาไฮเดรชัน	13
2.5 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์	15
2.6 การเกิดคาร์บอนเนชั่นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และสารประกอบส่วนที่ ไม่ต้องการน้ำ	17

2.7 อัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่น	18
3 การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีต	25
3.1 ความนำ	25
3.2 การเกิดสนิมทางไฟฟ้าเคมีในคอนกรีต	25
3.3 มวลสะสม การกัดกร่อนเหล็ก และการเกิดสนิมที่ขั้วอิเล็กโตรด	28
3.4 องค์ประกอบที่มีผลต่อการกัดกร่อนเหล็ก	30
3.5 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	32
4 การวิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลการเกิดคาร์บอนเนชั่น	34
4.1 ความนำ	34
4.2 การคำนวณหาค่าตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่น	34
4.3 อัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีตของสะพานที่ทำการสำรวจ	39
5 การวิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลการเกิดสนิมในเหล็กเสริม	43
5.1 ความนำ	43
5.2 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในช่วงเวลาเริ่มต้น	44
5.3 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในช่วงเวลาการกัดกร่อน	46
5.4 อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	47
6 สรุปผลการวิจัย	53
รายการอ้างอิง	55
ประวัติผู้เขียน	96

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ปริมาณโดยน้ำหนักของสารประกอบในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และผลิตภัณฑ์ จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน..... 58
2.2	ค่าตัวคูณปรับแก้ให้เป็นกลางของ Hamada..... 58
2.3	ค่าตัวคูณปรับแก้ให้เป็นกลางของ Kishitani..... 59
4.1	อายุของสะพาน กำลังอัดคอนกรีต และความลึกคาร์บอนเนชั่นเฉลี่ย ที่วัดได้ จากสะพานตัวอย่าง..... 60
4.2	ค่าตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดคาร์บอนเนชั่นในคอนกรีต..... 60
4.3	ค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยที่วัดได้ ในเขตกรุงเทพมหานคร..... 61
4.4	ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่วัดได้ ในเขตกรุงเทพมหานคร..... 62
4.5	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของแต่ละสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ณ ความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน..... 63
5.1	ระดับความเสียหายขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดจากการกัดกร่อน ของเหล็ก..... 63
5.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ และอัตราการกัดกร่อน เหล็กเสริมในคอนกรีต ในช่วงเวลาเริ่มต้น (สำหรับ $w = 0.5$)..... 64
5.3	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ และอัตราการกัดกร่อน เหล็กเสริมในคอนกรีต ในช่วงเวลาการกัดกร่อน (สำหรับ $w = 0.5$)..... 64
5.4	แสดงอายุการใช้งาน และระดับความเสียหายของสะพาน ที่ใช้สัดส่วนน้ำต่อ ซีเมนต์เท่ากับ 0.5 โดยพิจารณา ช่วงเวลาเริ่มต้นตามสมการที่ 2.41 (CEB MODEL)..... 65
5.5	แสดงอายุการใช้งาน และระดับความเสียหายของสะพานที่ใช้สัดส่วนน้ำต่อ ซีเมนต์เท่ากับ 0.5 โดยพิจารณา ช่วงเวลาเริ่มต้นตามสมการที่ 4.10..... 65

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการกระจายขนาดของรูพรุน.....	66
2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศ กับปริมาณน้ำในเนื้อคอนกรีต.....	66
2.3 แบบจำลองรูพรุนอย่างง่ายแสดงปรากฏการณ์ยึดเกาะ.....	67
2.4 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ต่อระดับความอึดตัวของรูพรุน.....	68
2.5 การกระจายขนาดของรูพรุนในซีเมนต์เพสต์ที่ไฮเดรตสมบูรณ์.....	69
2.6 ผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในคอนกรีต.....	69
2.7 การเปลี่ยนแปลงความพรุนของซีเมนต์เพสต์ ตามอายุ และสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์.....	70
2.8 ผังแสดงขบวนการการเกิดคาร์บอนเนชั่น.....	70
2.9 แสดงสัดส่วนของ CO ₂ / CaO ที่วัดได้ ในคอนกรีตที่เกิดคาร์บอนเนต.....	71
2.10 สภาพความเป็นกลางจากผิวหน้าคอนกรีต.....	72
2.11 แบบจำลองอย่างง่ายสำหรับการเกิดคาร์บอนเนชั่นของคอนกรีต.....	73
2.12 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ตามความลึกของคอนกรีตเมื่อเกิดคาร์บอนเนชั่น.....	74
3.1 แบบจำลองอย่างง่ายแสดงการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต.....	75
3.2 ความสัมพันธ์ของการสูญเสียมวลของเหล็ก กับเวลา ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ผลกระทบของค่า pH ที่มีต่อการเริ่มต้นการกัดกร่อน).....	75
3.3 ความสัมพันธ์ของการสูญเสียมวลของเหล็ก กับเวลา ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ผลกระทบของค่า pH และประจุของคลอไรด์).....	76
3.4 ความสัมพันธ์ของการสูญเสียมวลของเหล็ก กับเวลา ในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (ผลกระทบของความเข้มข้นของออกซิเจน).....	76
3.5 ความสัมพันธ์ของการสูญเสียมวลของเหล็ก กับเวลา แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของความชื้นที่มีต่อการกัดกร่อนของเหล็กในทราย.....	77

3.6	อิทธิพลของระดับความอึดตัวของรูปพรรณที่มีต่ออัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริม.....	77
3.7	ไดอะแกรม แสดงความเสียหายเฉพาะที่ในคอนกรีต และโครงสร้างตัวอย่างที่ทำการซ่อมแซม.....	78
3.8	แสดงผลการวัดกระแสแบบเซลล์ขนาดใหญ่(Macrocell) ของตัวอย่างที่ทำการซ่อมแซม.	78
3.9	ค่าของความแรงในการกัดกร่อนที่วัดได้ในคอนกรีต.....	79
3.10	การเปลี่ยนแปลงค่าของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (i_{corr}) กับเวลา.....	79
3.11	การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับความชื้นสัมพัทธ์ตามเวลา.....	80
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน และสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์.....	80
4.2	ความถี่ของความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายเดือนในเขตกรุงเทพมหานคร.....	81
4.3	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ ในปี พ.ศ.2536.....	82
4.4	ความลึกคาร์บอนเนชั่นตามสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 63 เปอร์เซ็นต์....	83
4.5	ความลึกคาร์บอนเนชั่นตามสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65 เปอร์เซ็นต์....	83
4.6	ความลึกคาร์บอนเนชั่นตามสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์....	84
4.7	ความลึกคาร์บอนเนชั่นตามสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75 เปอร์เซ็นต์....	84
4.8	ความลึกคาร์บอนเนชั่นตามสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80 เปอร์เซ็นต์....	85
4.9	ความลึกคาร์บอนเนชั่นตามสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 85 เปอร์เซ็นต์....	85
4.10	ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความลึกคาร์บอนเนชั่น.....	86
4.11	ความลึกคาร์บอนเนชั่นที่วัดได้จากสะพานตัวอย่างเทียบกับสมการที่ 2.29.....	87
4.12	ความลึกคาร์บอนเนชั่นที่วัดได้จากสะพานตัวอย่างเทียบกับสมการที่ 2.30 และ 2.31.....	88
4.13	ความลึกคาร์บอนเนชั่นที่วัดได้จากสะพานตัวอย่างเทียบกับสมการที่ 2.41(CEB MODEL)	89
4.14	ความลึกคาร์บอนเนชั่นที่วัดได้จากสะพานตัวอย่างเทียบกับสมการที่ 4.10.....	90
5.1	อายุการใช้งานของโครงสร้างที่ใช้เหล็กเสริมเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. โดยกำหนดช่วงเวลาเริ่มต้นตามสมการที่ 2.41 (CEB MODEL).....	91
5.2	อายุการใช้งานของโครงสร้างที่ใช้เหล็กเสริมเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มม. โดยกำหนดช่วงเวลาเริ่มต้นตามสมการที่ 2.41 (CEB MODEL).....	92
5.3	แบบจำลองอายุการใช้งานของโครงสร้างเสนอโดย Treadaway.....	93
5.4	แบบจำลองอายุการใช้งานของโครงสร้างเสนอโดย Tuutti.....	93
5.5	อายุการใช้งานของโครงสร้างที่ใช้เหล็กเสริมเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มม. โดยกำหนดช่วงเวลาเริ่มต้นตามสมการที่ 4.10.....	94

- 5.6 อายุการใช้งานของโครงสร้างที่ใช้เหล็กเสริมเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มม. โดยกำหนด
ช่วงเวลาเริ่มต้นตามสมการที่ 4.10..... 95



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

- a = ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทำให้คอนกรีตหนึ่งหน่วยปริมาตรเกิดคาร์บอนเนชันโดยสมบูรณ์
- A = พื้นที่หน้าตัดของตัวกลางที่ก๊าซเคลื่อนที่ตั้งฉาก
- $A_{\text{reduction}}(t)$ = อัตราการลดลงของหน้าตัดเหล็กเสริม ณ เวลาใด ๆ
- B = ค่าคงที่ของ Brunauer, Emmett and Teller (BET)
- B_0 = ค่าคงที่จากการสร้างสมการที่ 2.8
- C = ความเข้มข้นของก๊าซที่กำลังแพร่
- c_1 = ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผิวคอนกรีต
- c_2 = ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แนวการเกิดคาร์บอนเนชัน
- C_2S = ไดแคลเซียมซิลิเกต ($2CaO \cdot SiO_2$)
- C_3A = ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3CaO \cdot Al_2O_3$)
- C_3S = ไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3CaO \cdot SiO_2$)
- C_4AF = เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$)
- CSH = แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$)
- d = เส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุน
- D = สัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซ
- D_{CO_2} = สัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- D_{e,CO_2} = สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- D_e = สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล
- d_k = เส้นผ่าศูนย์กลางเคลวิน (Kelvin diameter)
- d_q = ปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แพร่ผ่านคอนกรีต
- dV = ปริมาตรของคอนกรีต
- d_w = เส้นผ่าศูนย์กลางโมเลกุลของน้ำ
- dx = ระยะทางที่ก๊าซเคลื่อนที่ไป
- E = ค่าคงที่ของคุณสมบัติทางเคมีของผิวรูพรุน
- f = อัตราส่วนของปริมาตรรูพรุนในส่วนที่เป็นน้ำต่อปริมาตรของรูพรุนทั้งหมด
- f_{ck} = กำลังอัดคอนกรีต

f_{cks}	=	กำลังอัดคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 10 MPa
f_d	=	ความหนาแน่นที่นำเชื้อถือของปริมาตรรูปทรงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ d
f_g	=	อัตราส่วนของปริมาตรรูปทรงในส่วนที่เป็นก๊าซต่อปริมาตรของรูปทรงทั้งหมด
f_k	=	อัตราส่วนของปริมาตรน้ำที่อยู่ภายในรูปทรงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางเคลวิน ต่อปริมาตรของรูปทรงทั้งหมด
f_w	=	อัตราส่วนของปริมาตรน้ำที่อยู่ภายในรูปทรงที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางเคลวิน ต่อปริมาตรของรูปทรงทั้งหมด
i^A	=	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่อาโนด
i^C	=	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่คาโธด
i_{oc}	=	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาการกักถ่วง
i_{ci}	=	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาเริ่มต้น
i_{corr}	=	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
J/A	=	อัตราการเคลื่อนที่ของก๊าซ
j_f	=	อัตราการผลิตเฟอร์สไฮดรอกไซด์
j_o^A	=	อัตราการเผาผลาญก๊าซออกซิเจนที่อาโนด
j_o^C	=	อัตราการเผาผลาญก๊าซออกซิเจนที่คาโธด
j_r	=	อัตราการผลิตสนิมเหล็กที่อาโนด
j_s	=	อัตราการกักถ่วงเหล็กที่อาโนด
k	=	สัมประสิทธิ์ของอัตราการเกิดคาร์บอนขึ้น
K_{oi}^C	=	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการเผาผลาญก๊าซออกซิเจนที่คาโธด
K_{fi}	=	ค่าคงที่ของการผลิตเฟอร์สไฮดรอกไซด์
K_{of}	=	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการเผาผลาญก๊าซออกซิเจนที่อาโนด
K_{rf}	=	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาการผลิตสนิมเหล็กที่อาโนด
K_{si}	=	ค่าคงที่ของการกักถ่วงเหล็ก
L	=	ความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็ก
n	=	จำนวนโมลของก๊าซ
N_T	=	กำลังอัดคอนกรีต
p	=	ความดันบรรยากาศ
ppmv	=	ส่วนในล้านส่วนโดยปริมาตร

- PS = ระดับความอึดตัวภายในรูปหุ่นคอนกรีต
 R = ตัวคูณปรับแก้ค่าความเป็นกลาง
 r_a = ตัวแปรจากชนิดของมวลรวม
 r_c = ตัวแปรจากชนิดของซีเมนต์
 R_{cc} = อัตราการกักความร้อนของเหล็กเสริมในช่วงเวลาการกักความร้อน
 R_{ci} = อัตราการกักความร้อนของเหล็กเสริมในช่วงเวลาเริ่มต้น
 RH = ความชื้นสัมพัทธ์
 R_o = ค่าคงที่ของก๊าซ
 r_s = ตัวแปรจากผิวสัมผัส
 t = เวลาใดๆ
 T = อุณหภูมิสัมบูรณ์
 t_c = ช่วงเวลาการกักความร้อน
 t_i = ช่วงเวลาเริ่มต้น
 t_{SL} = อายุการใช้งานของโครงสร้าง
 t_w = ความหนาของแผ่นฟิล์มน้ำ
 v = ปริมาตรของก๊าซ
 w = สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์
 x = ความลึกคาร์บอนเนชั่น
 X = ระยะทางระหว่างระนาบที่อ้างอิง วัดตั้งจากกับหน้าตัด
 x_i = ความลึกคาร์บอนเนชั่นเริ่มต้น
 $[Ca(OH)_2]$ = ความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์
 $[C_{CH}]$ = ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์
 $[C_{CSH}]$ = ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต
 $[CSH]$ = ความเข้มข้นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต
 $\phi(t)$ = เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม ณ เวลาใด ๆ
 ϕ_i = เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมในตอนเริ่มต้น
 $\phi_{reduction}(t)$ = อัตราการลดลงของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม ณ เวลาใด ๆ
 $\partial C / \partial x$ = เกรเดียนความเข้มข้นของก๊าซ
 ϵ_p = ความพูนของซีเมนต์เฟสท์

ϵ_p (carbonated) = ความพรุนของซีเมนต์โพสท์ที่เกิดคาร์บอนเนต

ϵ_p (uncarbonated) = ความพรุนของซีเมนต์โพสท์ที่ไม่เกิดคาร์บอนเนต



ศูนย์วิทยพัธ์พยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย