หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การวิเคราะห์คุณสมบัติวัสดุและเปรียบเทียบ

3.1 อัตราการเกิดคาร์บอเนชั่น

การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเป็นปัญหาหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับความทนทานของคอนกรีต การเกิดคาร์บอเนชั่น จะทำให้ pH ลดลงจาก 12.5 เป็น 8.3 ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว และส่งผลให้เหล็กเสริมในบริเวณที่คอนกรีตล้อมรอบมีค่า pH เป็นกลางและเกิดสนิมขึ้น ในการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ขึ้นกับตัวแปรต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- คุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีต โครงสร้างของรูพรุน ปริมาณน้ำในรูพรุน จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่กระจายก๊าซในเนื้อคอนกรีต โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะทำให้เกิดคาร์บอเนชั่นและก๊าซออกซิเจนซึ่งจะทำให้เกิดสนิมของเหล็กเสริม
- สภาวะแวดล้อมที่โครงสร้างตั้งอยู่ คือ ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
- สารประกอบเคมีของคอนกรีต เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งจะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ให้เกิดคาร์บอเนต

ในการเก็บข้อมูลของของสะพาน ประกอบด้วย อายุของสะพาน กำลังอัดคอนกรีต และความลึกคาร์บอเนชั่น อายุของสะพานกษัตริย์ศึกมีอายุประมาณ 65 ปี กำลังอัดคอนกรีตวัดโดย Schmidth Hammer ตามมาตรฐาน ASTM C850-79 ค่ากำลังจะมีค่าเฉลี่ยได้ดังตารางที่ 2.4 และความลึกคาร์บอเนชั่นที่วัดได้ โดยใช้ฟีนอฟธาลีน มีความลึกเฉลี่ยได้ดังตารางที่ 2.4

3.1.1 สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์

สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีความสำคัญต่อความพรุนและขนาดของช่องว่างในคอนกรีต ดังแสดงในสมการ (2.13) และ (2.15) จะเห็นว่า สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จะมีความสัมพันธ์กับ กำลังอัดของคอนกรีต ตามข้อมูลจาก ACI Committee 211 ดังแสดงในรูปที่ --- แต่กำลังอัดคอนกรีตจากความสัมพันธ์ดังกล่าว ต้องเป็นกำลังอัดที่อายุ 28 วัน แต่เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า กำลังอัดคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นตามอายุ ดังนั้นจะสามารถหาสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของคอนกรีตโครงสร้าง

สะพานกษัตริย์ศึกได้จากกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน จากสมการ (2.4) และเปรียบเทียบได้ด้วย CEB MODEL CODE 1990 ตามสมการที่ (2.5) ทั้งนี้โดยใช้ความชื้นสัมพัทธ์ในตารางที่ 3.1 หรือรูปที่ 3.2 และกำลังที่สำรวจได้ตามที่แสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งจะพบว่ากำลังชิ้นส่วนโครงสร้างแต่ละส่วนจะมีค่าเฉลี่ย ตามที่แสดงในตารางที่ -- ซึ่งพบว่ากำลังที่ 28 วัน ในคานมีค่าสูงสุด 369 กก./ตร.ซม. ต่ำสุด 302 กก./ตร.ซม. เฉลี่ย 334 กก./ตร.ซม. ในตอม่อ และ เสา มีค่าเฉลี่ย 308 กก./ตร.ซม.

3.1.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการสร้างสมการจากข้อมูลของ Papadakis et.al. ดังสมการ (2.12) และ(2.13) โดยการแทนค่า B_0 และ ε_p ด้วย 1.2×10^{-3} และ (0.63w-0.05) ตามลำดับ จะสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากสมการที่ (2.12) ดังนี้ คือ

$$\sqrt{D_{e,co_2}} = 1.2x10^{-3}.(0.63w - 0.05).\left(1 - \frac{RH}{100}\right) \qquad (3.1)$$

เมื่อ $D_{e,CO2}$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

w คือ สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์

RH คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์

อนึ่ง เมื่อแทนค่าความชื้นสัมพัทธ์ ในเขตกรุงเทพมหานครจาก กรมอุตุนิยมวิทยา ตามตารางที่ 3.1 หรือรูปที่ 3.2 จะได้สัมประสิทธิ์การแพร่ ดังแสดงในตารางที่ -- ทั้งนี้อาศัยข้อมูลทางสถิติ พิจารณาความเชื่อมั่นของความชื้นสัมพัทธ์ คิดเป็นร้อยละ 95 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 68.75% และยึดถือสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ตามที่แสดงในตารางที่ 3.1 อนึ่ง การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายประสิทธิผลตาม CEB MODEL CODE 1990 ซึ่งกำหนดว่า

$$\log D_{co_2} = -\left(7 + 0.0025 f_c'\right) \qquad (3.2)$$

โดยที่ $0.5x10^{-8} \le D \le 5x10^{-8}$ ตร.ม./วินาที แล้วพิจารณาเปรียบเทียบตามที่แสดงในตารางที่ 3.1

3.1.3 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากการวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ โดยมีจุดตรวจวัดอยู่ที่ชั้น 6 อาคาร 10 คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2536 ได้ค่าดังแสดงในรูปที่ 3.3 ในที่นี้จะใช้ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยรายปีในการวิเคราะห์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 356 ส่วนในล้านส่วนโดยปริมาตร (ppmv) จากสมการ

$$P.V = n.R_0.K \qquad (3.3)$$

เมื่อ P คือ ความดันบรรยากาศมีค่าเท่ากับ 1.01×10^5 นิวตัน/ตร.ม.

V คือ ปริมาตรของก๊าซ (ลบ.ม.) มีค่าเท่ากับ 3.56×10^{-4} ลบ.ม.

n คือ จำนวนโมลของก๊าซ

R_0 คือ ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 8.314 จูล/โมล-เคลวิน

K คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

ในเขตกรุงเทพมหานคร ได้บันทึกอุณหภูมิโดยกรมอุตุนิยมวิทยา ตามที่แสดงในตารางที่ 3.2 อุณหภูมิมีค่าเฉลี่ย 27.8 °C หรือ 300.8 เคลวิน เมื่อแทนค่าลงในสมการ (3.3) จะได้ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.01438 โมล/ลบ.ม. ซึ่งจะได้นำไปพิจารณาในการคำนวณความลึกคาร์บอเนชั่นต่อไป

3.1.4 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์

จากสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ได้จากความสัมพันธ์ที่แสดงในรูปที่ 3.1 หากกำหนดให้น้ำที่ใช้ในการผสมมีค่าเท่ากับ 175 กก./ลบ.ม. จะสามารถหาปริมาณของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกตก่อนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ทำให้เราสามารถคำนวณหาปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ อนึ่งมวลโมเลกุลของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกต ของซีเมนต์แบบที่ 1 ภายใต้ปริมาณซีเมนต์ 1 กก. จะประกอบด้วย C_3S 228 และ C_2S 172 กรัม ตามลำดับ คำนวณหาปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ {Ca(OH)2} ได้จากสมการ (3.4) คือ

$$\left[Ca(OH)_2\right] = \left[\frac{3}{2} \text{x} \frac{0.49}{228} + \frac{1}{2} \text{x} \frac{0.25}{172}\right] \text{x} 1000 \text{x} \text{ปริมาณซีเมนต์} \qquad (3.4)$$

มีหน่วยเป็น โมล/ลบ.ม. ของคอนกรีต

3.1.5 ความลึกของคาร์บอเนชั่น

จากค่าที่ได้จากการคำนวณต่างๆ ข้างต้น เป็นตัวแปรที่แทนลงในสมการ (2.25) จะได้อัตราการเกิดคาร์บอเนชั่น คิดเป็นความลึก

$$d_c(t) = 1.2x10^{-3}x(0.63w - 0.05).(1 - 0.6875)\sqrt{\frac{2x0.01438.t}{\left[\frac{3}{2}x\frac{0.49}{228} + \frac{1}{2}x\frac{0.25}{172}\right]x1000x\frac{175}{w}}} \quad (3.5)$$

$$d_c(t) = 2.4187x10^{-6}.(0.63w - 0.05)\sqrt{wt} \quad (3.6)$$

เมื่อ d_c คือ ความลึกของคาร์บอเนชั่น ใช้แทนค่า x ในสมการ(2.25) (ม.)

t คือ อายุของคอนกรีต (วินาที)

ในทำนองเดียวกัน หากจะพิจารณาเปลี่ยนหน่วยให้สอดคล้องกับสภาพการเก็บข้อมูล จะได้ดังต่อไปนี้

$$d_c(t) = 1.358(0.63w - 0.05)\sqrt{wt} \quad (3.7)$$

โดยที่ w คือ สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ หาได้จากความสัมพันธ์กับกำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน

d_c คือ ความลึกของคาร์บอเนชั่น (ซม.)

t คือ อายุของคอนกรีต (ปี)

ข้อมูลจากสะพานกษัตริย์ศึก ดังแสดงในตารางที่ 2.4 หากำลังที่ 28 วันจากสมการ (2.4) ได้สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์จากรูปที่ 3.1 และ เมื่อแทนค่าลงในสมการ (3.7) จะได้ k ต่างๆตามที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

จากสมการที่ (3.7) หากพิจารณาอัตราความลึกคาร์บอเนชั่น เป็นสัดส่วนของรากกำลังที่สองของเวลา ดังสมการ

$$d_c(t) = k.\sqrt{t} \quad (3..8)$$

เมื่อ $d_c(t)$ คือ ค่าความลึกคาร์บอเนชั่นที่เวลาใดๆ

t คือ อายุของคอนกรีต

จาก CEB MODEL CODE 1990 นั้นกำหนดให้การแพร่ประสิทธิผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ (3.2) จากสมการ (2.5) ได้กำลังอัดที่ 28 วัน ตามที่ได้แสดงใน

ตารางที่ 2.4 ทำให้ได้ค่า D_{CO2} หรือ D แสดงในตารางที่ 2.4 และกำหนดให้ C_1/a มีค่าโดยประมาณ 7×10^{-6} สำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติในสภาวะแวดล้อมมาตรฐาน และเมื่อเราแทนค่า D_{CO2} ที่ได้จากตารางที่ 2.4 และค่า C_1/a ลงในสมการ (2.25) ทำให้ได้ค่า k ต่างๆดังแสดงในตารางที่ 2.4

จากความสัมพันธ์ตามรูปที่ 2.8 ถึง 2.10 และค่าจากตารางที่ 3.1 พบว่าค่าความลึกคาร์บอเนชั่นเฉลี่ยที่ได้จากสมการ (3.7) ให้ค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงที่สุด เนื่องจาก สมการจะมีการพิจารณาถึงปริมาณซีเมนต์, สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์, ความชื้นสัมพันธ์ และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในขณะที่สมการอื่น ๆ พิจารณาเฉพาะตัวแปรหลัก แล้วให้ตัวแปรอื่นเป็นค่าคงที่เท่านั้น เช่น Hamada และ Smolczyk จะพิจารณาตัวแปรหลักตัวแปรเดียวคือ สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์เป็นสำคัญ โดยให้ค่าอื่น ๆ เป็นค่าคงที่ โดยมีเงื่อนไขคือ สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์มากกว่าหรือน้อยกว่า 0.6 สมการ CEB เป็นเช่นเดียวกันคือ กำหนดให้ c/a เป็นค่าคงที่ มีค่าเปลี่ยนแปลงแต่เพียง ค่าการแพร่ประสิทธิผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เท่านั้น

จากตารางที่ 3.1 เห็นว่า ค่าการแพร่ที่ได้จาก CEB มีค่ามากกว่าจากสมการ (3.1) เนื่องจาก การหาค่าการแพร่จาก CEB จะพิจารณาจากกำลังคอนกรีต หรือสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่านั้น ในขณะที่สมการ (3.1) จะพิจารณาถึงผลจากค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศด้วย ทำให้ค่าที่ออกมามีค่าน้อยกว่าค่าจาก CEB เล็กน้อย และค่าคงที่ของค่า C_1/a มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากสมการ (3.7) ส่งผลให้ค่าการพยากรณ์ความลึกของคาร์บอเนตในสมการ (3.7) มีค่ามากกว่าการพยากรณ์จาก CEB และให้ค่าที่ใกล้เคียงค่าจากการสำรวจมากกว่า

จากสมการ (3.5) พิจารณาตัวแปรทุกตัว โดยใช้ค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 68.75% หรือที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ทำให้สามารถย่อรูปจากสมการ (3.5) เป็นสมการ (3.7) ได้ และจากค่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ดังตารางที่ 3.1 ทำให้ได้ค่าความลึกคาร์บอเนชั่นเฉลี่ยในทุกชิ้นส่วนของโครงสร้างมีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.98 ของค่าจากการสำรวจ สำหรับของ Hamada, Smolczyk และ CEB ให้ค่าประมาณ 0.96, 1.15 และ 0.80 ของค่าจากการสำรวจดังแสดงในตารางที่ 3.1 ตามลำดับ ดังนั้นในการศึกษานี้จะพิจารณาความลึกของคาร์บอเนชั่น โดยใช้ค่าจากสมการ (3.7) เนื่องจากให้ค่าเฉลี่ยใกล้เคียงที่สุด

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้น พิจารณาได้ว่าตัวแปรที่สำคัญต่อการเกิดคาร์บอเนชั่น คือ สัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์, ปริมาณซีเมนต์, ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และจะเห็นว่า ถ้าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีค่ามาก ทำให้ค่าการแพร่ของ

ก๊าซมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้การเกิดคาร์บอเนตมีอัตราการเกิดที่เร็วขึ้น ค่าการพยากรณ์ความลึกของคาร์บอเนตที่ได้ในเวลาเดียวกันจะมีค่ามากว่า กรณีที่มีค่าสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ

3.2 ความกว้างและระยะห่างของรอยแตกร้าว

ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทั่วไปมักจะมีการแตกร้าวเนื่องจากโมเมนต์ดัด รอยแตกร้าวนี้ถ้ามีขนาดกว้างมากและแตกถึงผิวของเหล็กเสริม จะสามารถก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้ เช่น ทำให้ความแข็งแกร่งของโครงสร้างลดลง และทำให้เกิดสนิมเหล็กได้เร็วกว่าอัตราการเกิดสนิมโดยทั่วไป ในการแตกร้าวแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทข้างต้น การศึกษาเพื่อหาขนาดความกว้างและระยะห่างระหว่างรอยแตกจึงมีมากมาย เพื่อศึกษาถึงขนาดและการป้องกันโดยการใช้จำนวนเหล็กเสริมที่มากขึ้นและคอนกรีตที่หุ้มเหล็กมีเพียงพอ

จากสมการ (2.42) ได้ค่าระยะห่างระหว่างรอยร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก แต่ยังได้อยู่ในรูปของฟังก์ชันของ x/L จากการศึกษาที่ผ่านมา เราสามารถกำหนดฟังก์ชัน x/L และสามารถหาค่า J_1 และ J_2 ได้ดังตารางที่ 3.3 และแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด ,u_m , ดังนี้

$$u_m = 1.265\sqrt{f_c'} \qquad (3.9)$$

f_c' คือ กำลังอัดประลัยที่ 28 วัน ของคอนกรีต

เมื่อแทนค่าลงในสมการ (2.42) ทำให้เราสามารถหาระยะห่างระหว่างรอยร้าวได้ดังตารางที่ 3.3

3.3 อัตราการเกิดสนิม

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเป็นสาเหตุหนึ่งของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างลดลง สนิมที่เกิดขึ้นจะดันให้เนื้อคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมแตกออก และหน้าตัดของเหล็กเสริมจะมีขนาดลดลง ทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างจะลดลง การพิจารณาอายุการใช้งานของโครงสร้างจะเริ่มต้นจากช่วงเวลาที่การก่อสร้างสิ้นสุด จนกระทั่งโครงสร้างเกิดความเสียหายจนอยู่ในสภาวะที่ต้องซ่อมแซม CEB Bullentin No 162 ได้แบ่งระดับความเสียหายออกเป็น 5 ระดับด้วยกันดังตารางที่ 3.4 อายุการใช้งานของโครงสร้าง แบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง ได้แก่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ช่วงเวลาเริ่มต้น (Initial period) เป็นช่วงเวลาที่โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในบริเวณคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม โดยที่เหล็กเสริมยังอยู่ในสภาวะไม่ถูกกระตุ้น (Passivity) ช่วงเวลานี้จะนับจากการก่อสร้างสิ้นสุด ซึ่งกำหนดให้คอนกรีตเริ่มเกิดคาร์บอเนชั่นจากผิวโครงสร้าง ไปจนกระทั่งเนื้อคอนกรีตบริเวณผิวเหล็กเสริมเกิดคาร์บอเนชั่น และเป็นช่วงเวลาที่เหล็กเสริมเริ่มถูกกัดกร่อนในสภาวะกระตุ้น (Activity)

- ช่วงเวลาการกัดกร่อน (Corrosion period) เป็นช่วงเวลาที่เหล็กเสริมเริ่มถูกกัดกร่อนในสภาวะกระตุ้นต่อจากช่วงเวลาเริ่มต้น ไปจนกระทั่งโครงสร้างมีระดับความเสียหายอาจต้องซ่อมแซม

3.3.1 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในช่วงเวลาเริ่มต้น

ในช่วงเวลาเริ่มต้นที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ เป็นการพิจารณาเฉพาะการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเท่านั้น ในช่วงเวลาระหว่างการเกิดคาร์บอเนชั่นก่อนที่จะเริ่มช่วงเวลากัดกร่อน ฟิล์มออกไซด์ที่ผิวเหล็กเสริมมีคุณสมบัติเป็นคาโธด และมีพื้นผิวส่วนที่เป็นอาโนดน้อยมาก ดังนั้น ในสภาวะดังกล่าว การเกิดสนิมจะสอดคล้องกับการเกิดสนิมที่ควบคุมการกัดกร่อนโดยอาโนด ซึ่งวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้ไม่มากกว่า $1x10^{-7}$ แอมป์/ตร.ซม. ขึ้นกับระดับความอิ่มตัวของน้ำภายในรูพรุน ช่วงระยะเวลาในการกัดกร่อนของเหล็กเสริมด้วยอัตรานี้จะพิจารณาจากช่วงเวลาของการเกิดคาร์บอเนชั่นจากผิวโครงสร้างจนกระทั่งถึงผิวเหล็ก ดังนั้นจากสมการ (2.25) จะได้

$$t_i = \frac{L^2.a}{2D_e.c_1} \qquad (3.10)$$

เมื่อ t_i คือ ช่วงเวลาเริ่มต้น (วินาที)

L คือ ความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็ก (ม.)

a คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทำให้คอนกรีตหนึ่งหน่วยปริมาตรเกิดคาร์บอเนตสมบูรณ์

D_e คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

c_1 คือ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผิวคอนกรีต

3.3.2 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในช่วงเวลากัดกร่อน

เมื่อคอนกรีตเกิดคาร์บอเนชั่นจนถึงผิวเหล็กเสริม อัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจะเปลี่ยนไป เนื่องจากสภาวะของคอนกรีตที่ล้อมรอบเหล็กเสริมมีการเปลี่ยนแปลง การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตตลอดความยาวเหล็กเสริมจะไม่มีความสม่ำเสมอ โดยเหล็กเสริมบริเวณที่คาร์บอเนชั่นเข้าถึง ฟิล์มออกไซด์จะสลายไปทำให้มีคุณสมบัติเป็นอาโนด และเหล็กเสริมบริเวณที่คาร์บอเนชั่นยังเข้าไม่ถึง จะมีคุณสมบัติเป็นคาโธด ดังนั้นสภาวะการเกิดสนิมจะสอดคล้องกับการเกิดสนิมที่ควบคุมการกัดกร่อนโดยความต้านทาน อัตราการเกิดสนิมตามสภาวะดังกล่าวจะมีช่วงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากว้างมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับความชื้นภายในคอนกรีต

3.3.3 อัตราการเกิดสนิม

ในการทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จะอยู่ภายใต้อัตราการกัดกร่อนที่คงที่ในการพิจารณาการสิ้นสุดอายุการใช้งานก่อนที่จะมีการซ่อมแซม เพื่อให้โครงสร้างมีกำลังเท่าเดิมนั้น จะพิจารณาระดับความเสียหายตามข้อกำหนดของ CEB Bulletin No 162 ตามตารางที่ 3.4 เนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมจะส่งผลต่อการลดลงของเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือหน้าตัดของเหล็กเสริม ดังนั้น ระดับความเสียหายที่พิจารณาจะกล่าวถึง การลดลงของเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือหน้าตัดของเหล็กเสริมเป็นสำคัญ

กำหนดให้ความหนาแน่นของเหล็กเท่ากับ 7.85 กรัม/ลบ.ซม. ทำให้สามารถเขียนอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริม (ในหน่วย มม./ปี) ได้ดังนี้

$$R_{ci} = (2.89x10^{-4}x365x24x60x60x10/7.85).i_{ci} \quad (3.11)$$

หรือ (ช่วงเวลาเริ่มต้น) $R_{ci} = 11625i_{ci}$ (3.12)

และ (ช่วงเวลากัดกร่อน) $R_{cc} = 11625i_{cc}$ (3.13)

ดังนั้น เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมที่เกิดสนิมกับเวลาได้ดังนี้

เมื่อ $t<t_i$; $\phi(t) = \phi_i - 23250i_{ci}.t$ (3.14)

$t>t_i$; $\phi(t) = \phi_i - 23250i_{ci}.t_i - 23250i_{cc}(t-t_i)$ (3.15)

โดยที่ ϕ_i คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (มม.)

$\phi(t)$ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมที่เวลา t (มม.)

i_{ci} คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาเริ่มต้น (1×10^{-7} แอมป์/ตร.ซม.)

i_{cc} คือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลากัดกร่อน (6.11×10^{-7} แอมป์/ตร.ซม.)

จากสมการ (3.14) และ (3.15) สามารถเขียนได้ใหม่ ดังนี้

เมื่อ $t<t_i$; $\phi(t) = \phi_i - 2.325 \times 10^{-3} t$ (3.16)

$t>t_i$; $\phi(t) = \phi_i - 2.325 \times 10^{-3} t_i - 0.0142(t - t_i)$ (3.17)

โดยที่ t_i จะหาได้จากสมการ (3.8)

จากสมการที่ (3.16) และ (3.17) ทำให้เราหาพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม ได้ดังนี้

เมื่อ $t<t_i$; $A_{sc}(t) = \pi . \frac{\phi(t)^2}{4} = \pi . \frac{\left(\phi_i - 2.325 \times 10^{-3} t\right)^2}{4}$ (3.18)

$t>t_i$; $A_{sc}(t) = \pi \frac{\left[\phi_i - 2.325 \times 10^{-3} t_i - 0.0142\left(t - t_i\right)\right]^2}{4}$ (3.19)

3.3.4 อัตราการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีตที่มีรอยแตกร้าว

การแตกร้าวเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดสนิมเหล็ก และเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้กำลังของหน้าตัดลดลงไป คือ ทำให้หน้าตัดประสิทธิผลมีค่าน้อยลง การเกิดรอยแตกร้าวจะทำให้แผ่นฟิล์มบาง ๆ ที่ป้องกันสนิมเหล็กของเหล็กเสริมถูกทำลาย และยังส่งผลให้ออกซิเจนผ่านเข้าไปถึงผิวเหล็กเสริมได้ง่ายกว่าปกติอย่างมาก ทำให้เกิดสนิมเหล็ก ในอัตราที่เร็วขึ้นกว่าปกติ ส่งผลต่อกำลังของหน้าตัดลดลง รอยแตกร้าวขั้นที่ (2) และ (3) โดยส่วนใหญ่เป็นการขยายความกว้าง, และเกิดระยะห่าง ดังนั้นจะเพิ่มการเกิดสนิมมากกว่ารอยกว้างที่แคบกว่า

ในการศึกษาของ Andrade ที่ได้ทำการศึกษาเรื่อง กำลังคงเหลือของโครงสร้างที่เกิดสนิมโดยศึกษาจากการสูญหายของหน้าตัดเหล็กเสริมเนื่องจากสนิม กำหนดให้การลดลงของเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นสัดส่วนโดยตรงกลับอัตราการเกิดสนิม ความสัมพันธ์นี้คือ

$\phi(t) = \phi_i - 0.023 i_{corr} t$ (3.20)

เมื่อ i_{corr} คือ อัตราการเกิดสนิม (ไมโครแอมแปร์/ตร.ซม.)

0.023 เป็นค่าตัวคูณที่แปลงค่าไมโครแอมแปร์/ตร.ซม. ให้อยู่ในรูปของ มม./ปี

Berke (19) ได้ทำการศึกษาเรื่องการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีตที่มีรอยแตกร้าว โดยการทดลองนี้ Berke ได้ใช้ตัวอย่างการทดลองเป็นคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 เส้น ดังรูปที่ 3.4 แล้ววัดค่ากระแสไฟฟ้าจากเหล็กเสริมที่ใช้ในการทดลอง ได้ค่าเฉลี่ยของอัตราการเกิดสนิม , i_{corr} , ประมาณ 1.2 โมโครแอมแปร์/ตร.ซม. แทนค่าลงในสมการ (3.2) ได้

$$\phi(t) = \phi_i - 0.0279t \tag{3.21}$$

ดังนั้น ความสัมพันธ์ของพื้นที่เหล็กเสริมกับเวลาจะเป็นดังนี้

$$A_{sc}(t) = \frac{\pi(\phi_i - 0.0279t)^2}{400} \tag{3.22}$$

จากรูปที่ 3.4 ถึง 3.10 เป็นการแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างหน้าตัดคงเหลือของเหล็กเสริมกับเวลาเนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริม พบว่า อัตราการเกิดสนิมที่เกิดจากรอยแตกร้าวของหน้าตัดมีอัตราที่เร็วที่สุด เนื่องจาก การซึมผ่านของความชื้นและออกซิเจน สามารถผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าปกติ จึงให้อัตราการเกิดสนิมที่เร็วกว่าการเกิดคาร์บอเนชั่น เพราะการเกิดคาร์บอเนชั่นในช่วงเวลาเริ่มต้นที่ความลึกคาร์บอเนชั่นยังไม่ถึงเหล็กเสริม การเกิดสนิมยังเกิดในอัตราที่ต่ำ เนื่องจากเหล็กเสริมมีแผ่นฟิล์มบาง ๆ ป้องกันการเกิดสนิมอยู่ จากผลการศึกษาพบว่า หน้าตัดคงเหลือของเหล็กที่ 65 ปี เนื่องจากการเกิดคาร์บอเนชั่นได้ค่าเท่ากับ 4.85 ตร.ซม. มีค่าลดลงประมาณ 3% ในขณะที่หน้าตัดคงเหลือของเหล็กเสริมที่ 65 ปี เนื่องจากหน้าตัดเกิดรอยแตกร้าวมีค่าเท่ากับ 4.22 ตร.ซม. มีค่าลดลง 14%

พิจารณาตารางที่ 3.4 พบว่าอัตราการเกิดสนิมของหน้าตัดแตกร้าว ทำให้หน้าตัดเหล็กเสริมลดน้อยกว่า 90% ของหน้าตัดเดิม อยู่ในระดับ C ควรมีการซ่อมแซม ส่วนกรณีการเกิดคาร์บอเนชั่น จะพบว่ามีการสูญเสียพื้นที่หน้าตัดเมื่อสะพานมีอายุเฉลี่ยประมาณ 150 ปี