บทที่ 5

การวิเคราะห์ และเปรียบเทียบผลการเกิดสนิม

5.1 ความนำ

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมเป็นสาเหตุหนึ่งของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่ทำให้อายุการใช้งานของโครงสร้างลดลง สนิมที่เกิดขึ้นจะดันให้เนื้อคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมแตกออก และเส้นผ่าศูนย์กลาง หรือหน้าตัดของเหล็กเสริมมีขนาดลดลง ดังนั้น ความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างจะลดลงด้วย การพิจารณาอายุการใช้งานของโครงสร้างจะเริ่มต้นจากช่วงเวลาที่การก่อสร้างสิ้นสุด ไปจนกระทั่งโครงสร้างมีระดับความเสียหายอยู่ในสภาวะที่ต้องได้รับการซ่อมแซม CEB Bullentin No.162 [27] ได้แบ่งระดับความเสียหายออกเป็น 5 ระดับ ดังตารางที่ 5.1 โครงสร้างที่มีความเสียหายอยู่ในระดับ C และ D ควรที่จะได้รับการซ่อมแซมทันที สำหรับโครงสร้างที่อยู่ในระดับ A และ B ยังคงมีอายุการใช้งานอีกยาวนาน อายุการใช้งานของโครงสร้าง แบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง [28] ได้แก่

1. ช่วงเวลาเริ่มต้น (Initial period) เป็นช่วงเวลาที่โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติในบริเวณคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม (Covering) (ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ พิจารณาเฉพาะการเกิดคาร์บอเนชั่น) โดยที่เหล็กเสริมยังอยู่ในสภาวะไม่ถูกกระตุ้น (Passivity) ให้เกิดการกัดกร่อน ช่วงเวลานี้จะนับจากการก่อสร้างสิ้นสุด ซึ่งกำหนดให้คอนกรีตเริ่มเกิดคาร์บอเนชั่นจากผิว โครงสร้าง ไปจนกระทั่งเนื้อคอนกรีตบริเวณผิวเหล็กเสริมเกิดคาร์บอเนชั่น และเป็นช่วงเวลาที่เหล็กเสริมเริ่มถูกกัดกร่อนในสภาวะกระตุ้น (Activity)

2. ช่วงเวลาการกัดกร่อน (Corrosion period) เป็นช่วงเวลาที่เหล็กเสริมเริ่มถูกกัดกร่อนในสภาวะกระตุ้นต่อจากช่วงเวลาเริ่มต้น ไปจนกระทั่งโครงสร้างมีระดับความเสียหายอาจต้องซ่อมแซม

5.2 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในช่วงเวลาเริ่มต้น

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริม ในช่วงเวลาเริ่มต้นที่กล่าวถึงในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ เป็นการพิจารณาเฉพาะการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเท่านั้น ซึ่งมีผล ทำให้ค่า pH ลดลงจาก 12.5 เป็น 8.3 ในช่วงเวลาระหว่างการเกิดคาร์บอเนชั่นก่อนที่จะเริ่มช่วงเวลาการกัดกร่อน ฟิล์มออกไซด์ที่ผิวเหล็กเสริมยังคงทำหน้าที่ป้องกันการเกิดสนิมซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่า พื้นผิวเหล็กเสริมมีคุณสมบัติเป็นคาโธด และมีพื้นผิวส่วนที่เป็นอาโนดน้อยมาก ดังนั้น ในสภาวะดังกล่าวการเกิดสนิมจะสอดคล้องกับการเกิดสนิมที่ควบคุมการกัดกร่อนโดยอาโนด ซึ่งวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้ไม่มากกว่า 10^{-7} แอมป์ / ซม.^{2} ขึ้นกับระดับความอิ่มตัวของน้ำภายในรูพรุน ช่วงระยะเวลาในการกัดกร่อนของเหล็กเสริมด้วยอัตราดังกล่าวนี้ จะพิจารณาจากช่วงเวลาของการเกิดคาร์บอเนชั่นจากผิวโครงสร้างจนกระทั่งถึงผิวเหล็ก ดังนั้น จากสมการที่ 2.41 จะได้ว่า

$$t_i = \frac{L^2 a}{2 D_e c_i} \qquad 5.1$$

เมื่อ

t_i = ช่วงเวลาเริ่มต้น (วินาที)

L = ความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็ก (เมตร)

a = ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทำให้คอนกรีตหนึ่งหน่วยปริมาตรเกิดคาร์บอเนตสมบูรณ์

D_e = สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

c_1 = ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผิวคอนกรีต

เนื่องจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจะเกิดขึ้นเมื่อฟิล์มออกไซด์สลายไป ซึ่งเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ดังนั้น ค่า a จะพิจารณาเฉพาะปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เท่านั้น

จากสมการที่ 3.8 โดยไม่พิจารณาเครื่องหมาย และแทนค่า K_{si} จะได้ว่า

$$j_s = 2.89 \times 10^{-4} I^A \qquad 5.2$$

จากข้อมูลการบันทึกค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ในเขตกรุงเทพมหานคร ของกรมอุตุนิยมวิทยา ตามตารางที่ 4.3 พบว่ามีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุด และสูงสุด เท่ากับ 63 และ 89 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 77 เปอร์เซนต์ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 4.97 เปอร์เซนต์ เนื่องจากความชื้นภายในคอนกรีตถูกพิจารณาในรูปของระดับความอิ่มตัวภายในรูพรุน ซึ่งขึ้นกับความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ ดังนั้น เมื่อพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 85 หรือความชื้นสัมพัทธ์ เท่ากับ 82 เปอร์เซนต์ และจากรูปที่ 2.4 กำหนดให้ โครงสร้างทั่วไปมีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.5 จะได้ค่าระดับความอิ่มตัวภายในรูพรุน (PS) ประมาณ 48 เปอร์เซนต์ ดังนั้น จากรูปที่ 3.6 จะได้ว่า ในช่วงเวลาเริ่มต้นอัตราการกัดกร่อนเหล็กเสริม ซึ่งวัดในรูปของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะมีค่าประมาณ 1.0×10^{-7} แอมป์ / ซม.^{2} นั่นคือ

$$j_s = 2.89 \times 10^{-4} \times 1.0 \times 10^{-7} = 2.89 \times 10^{-11} \text{ กรัม / ซม.}^2\text{-วินาที}$$

กำหนดให้ความหนาแน่นของเหล็กเท่ากับ 7.85 กรัม/ซม.^{3} ดังนั้นอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริม (ในหน่วย มิลลิเมตร / ปี) มีค่าเท่ากับ

$$R_{ci} = 2.89 \times 10^{-11} \times 60 \times 60 \times 24 \times 365 \times 10 / 7.85 = 1.16 \times 10^{-3} \text{ มม. / ปี}$$

โดย

R_{ci} = อัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในช่วงเวลาเริ่มต้น (มิลลิเมตร / ปี)

ในทำนองเดียวกัน เมื่อพิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 90 หรือความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 83 เปอร์เซนต์ และระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 หรือความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 85 เปอร์เซนต์ พบว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาเริ่มต้น จะมีค่าประมาณ 1.0×10^{-7} แอมป์ / ซม.^{2} ซึ่งเป็นค่าสูงสุดสำหรับการเกิดสนิมที่ควบคุมการกัดกร่อนโดยอาโนด นั่นคือ ที่

ความเชื่อมั่นร้อยละ 85 หรือความชื้นสัมพัทธ์ เท่ากับ 82 เปอร์เซนต์ จะเป็นขีดจำกัดล่างที่ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุด สำหรับการเกิดสนิมในช่วงเวลาเริ่มต้น ตารางที่ 5.2 แสดงถึงอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในช่วงเวลาเริ่มต้น ณ ความชื้นสัมพัทธ์ ในอากาศที่แตกต่างกัน

5.3 อัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในช่วงเวลาการกัดกร่อน

เมื่อคอนกรีตเกิดคาร์บอเนชั่นจนถึงผิวเหล็กเสริม อัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจะเปลี่ยนไป เนื่องจากสภาวะของคอนกรีตที่ล้อมรอบเหล็กเสริมมีการเปลี่ยนแปลง การเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตตลอดความยาวเหล็กเสริมจะไม่มีความสม่ำเสมอ โดยเหล็กเสริมบริเวณที่คาร์บอเนชั่นเข้าถึง ฟิล์มออกไซด์จะสลายไปทำให้มีคุณสมบัติเป็นอาโนด และเหล็กเสริมบริเวณที่คาร์บอเนชั่นยังเข้าไม่ถึง จะมีคุณสมบัติเป็นคาโธด ดังนั้น สภาวะของการเกิดสนิมจะสอดคล้องกับการเกิดสนิมที่ควบคุมการกัดกร่อนโดยความต้านทาน อัตราการเกิดสนิมตามสภาวะดังกล่าวจะมีช่วงของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากว้างมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับความชื้นภายในคอนกรีต ในทำนองเดียวกันกับอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในช่วงเวลาเริ่มต้น ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 85 หรือความชื้นสัมพัทธ์ เท่ากับ 82 เปอร์เซนต์ และสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 จะมีค่าระดับความอิ่มตัวภายในรูพรุนประมาณ 48 เปอร์เซนต์ ดังนั้น ในช่วงเวลาการกัดกร่อน อัตราการกัดกร่อนเหล็กเสริม ซึ่งวัดในรูปของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า จะมีค่าประมาณ 6.11×10^{-7} แอมป์ / ซม.^{2} นั่นคือ

$$j_s = 2.89 \times 10^{-4} \times 6.11 \times 10^{-7} = 1.76 \times 10^{-10} \text{ กรัม / ซม.}^2\text{-วินาที}$$

และอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริม (ในหน่วย มิลลิเมตร / ปี) มีค่าเท่ากับ

$$R_{cc} = 1.76 \times 10^{-10} \times 60 \times 60 \times 24 \times 365 \times 10 / 7.85 = 7.09 \times 10^{-3} \text{ มม. / ปี}$$

โดย

R_{cc} = อัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในช่วงเวลาการกัดกร่อน(มิลลิเมตร / ปี)

ตารางที่ 5.3 แสดงถึงอัตราการกัดกร่อนของเหล็กในช่วงเวลาการกัดกร่อน ณ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่แตกต่างกัน โดยที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 90 หรือความชื้นสัมพัทธ์ เท่ากับ 83 เปอร์เซนต์ และที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 95 หรือความชื้นสัมพัทธ์ เท่ากับ 85 เปอร์เซนต์ จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาการกัดกร่อน ประมาณ 9.28×10^{-7} แอมป์ / ซม.^{2} และ 1.73×10^{-6} แอมป์ / ซม.^{2}ตามลำดับ

5.4 อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในการทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้าง จะอยู่ภายใต้อัตราการกัดกร่อนที่คงที่ เนื่องจากค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่ใช้เป็นค่าความชื้นสัมพัทธ์แบบจุด ในการพิจารณาการสิ้นสุดอายุการใช้งานก่อนที่จะมีการปรับปรุงซ่อมแซม เพื่อให้โครงสร้างมีความสามารถในการรับน้ำหนักได้เกือบเหมือนเดิมนั้น จะพิจารณาระดับความเสียหายตามข้อกำหนดของ CEB Bulletin No.162 ตามตารางที่ 5.1 เนื่องจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมจะส่งผลต่อการลดลงของเส้นผ่าศูนย์กลาง หรือหน้าตัดของเหล็กเสริมโดยตรง ดังนั้น ระดับความเสียหายที่พิจารณาจะกล่าวถึงการลดลงของเส้นผ่าศูนย์กลางหรือ หน้าตัดของเหล็กเสริมเป็นสำคัญ

จากสมการที่ 5.2 และกำหนดให้ความหนาแน่นของเหล็กเท่ากับ 7.85 กรัม / ซม.^{3} จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริม (ในหน่วยมิลลิเมตร / ปี) ได้ ดังนี้

$$R_{ci} = (2.89 \times 10^{-4} \times 60 \times 60 \times 24 \times 365 \times 10 / 7.85)\, i_{ci}$$

หรือ $$R_{ci} = 11{,}623\, i_{ci} \qquad 5.3$$

และ $$R_{cc} = 11{,}623\, i_{cc} \qquad 5.4$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กำหนดให้

ϕ_i = เส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริมในตอนเริ่มต้น (มิลลิเมตร)

$\phi(t)$ = เส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริม ณ เวลาใด ๆ (มิลลิเมตร)

i_{ci} = ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาเริ่มต้น (แอมป์ / ซม.^{2})

i_{cc} = ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วงเวลาการกัดกร่อน (แอมป์ / ซม.^{2})

t_c = ช่วงเวลาการกัดกร่อน (ปี)

ดังนั้น อัตราการลดลงของเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริม ณ เวลาใด ๆ คือ

$$\phi_{reduction}(t) = \frac{\phi_i - \phi(t)}{\phi_i} \times 100 \qquad 5.5$$

โดย $\phi(t) = \phi_i - 23{,}246\, i_{ci} \cdot t_i - 23{,}246\, i_{cc} \cdot t_c$ 5.6

หรือ พิจารณาในรูปของอัตราการลดลงของหน้าตัดเหล็กเสริม ณ เวลาใด ๆ จะได้ว่า

$$A_{reduction}(t) = \frac{\phi_i^2 - \phi^2(t)}{\phi_i^2} \times 100 \qquad 5.7$$

ค่า i_{ci}, i_{cc} และ t_i จะถูกพิจารณาตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้น สำหรับเหล็กเสริมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จะสามารถหาค่า $\phi(t_i)$ และ $A_{reduction}(t_i)$ เมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาเริ่มต้นได้ดังนี้

จากผลการเปรียบเทียบของอัตราการเกิดคาร์บอเนชั่นในบทที่ 4 พบว่าสมการที่ 2.41 (CEB MODEL) จะให้ค่าความลึกคาร์บอเนชั่นใกล้เคียงกับความลึกคาร์บอเนชั่นเฉลี่ยที่วัดได้มากกว่าสมการอื่น โดยเฉพาะเมื่อสะพานตัวอย่างมีอายุมาก ๆ สำหรับโครงสร้างที่มีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5 หรือกำลังอัดคอนกรีตเท่ากับ 330 กก. / ซม.^{2} และมีระยะหุ้มคอนกรีต เท่ากับ 25 มม. จะคำนวณหาค่า t_i ได้จากสมการที่ 5.1 ดังนั้น

$$t_i = \frac{(0.025)^2}{2\times 7\times 10^{-6}\times 10^{-0.025\times 330\times 9.81/100}\times 10^{-7}\times 60\times 60\times 24\times 365} = 91.3 \text{ ปี}$$

จากรูปที่ 2.4(n) และ 3.6 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 82 เปอร์เซนต์ [เท่ากับระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 85] หรือระดับความอิ่มตัวภายในรูพรุน 48 เปอร์เซนต์ จะได้

$$i_{ci} = 1.0 \times 10^{-7} \text{ แอมป์ / ซม.}^2$$

จากสมการที่ 5.6 จะได้เส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริมเมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาเริ่มต้น ดังนี้

$$\phi(t_i) = 10 - 23246 \times 1.0 \times 10^{-7} \times 91.3 = 9.79 \text{ มม.}$$

และจากสมการที่ 5.7 จะได้อัตราการลดลงของหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาเริ่มต้น ดังนี้

$$A_{reduction}(t_i) = \frac{10^2 - 9.79^2}{10^2} \times 100 = 4.20 \text{ เปอร์เซนต์}$$

และสามารถคำนวณหาค่า t_c เมื่อโครงสร้างมีระดับความเสียหายอยู่ที่ระดับ c หรือหน้าตัดของเหล็กเสริมลดลง 10 เปอร์เซนต์ ซึ่งถือว่าเป็นระดับความเสียหายที่ต้องได้รับการซ่อมแซม [28] ได้ดังนี้

จากรูปที่ 2.4(n) และ 3.6 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 82 เปอร์เซนต์ หรือระดับความอิ่มตัวภายในรูพรุน 48 เปอร์เซนต์ จะได้

$$i_{cc} = 6.11 \times 10^{-7} \text{ แอมป์ / ซม.}^2$$

จากสมการที่ 5.7 จะได้เส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริมเมื่อหน้าตัดลดลง 10 เปอร์เซนต์ ดังนี้

$$\phi(t_i + t_c) = \sqrt{10^2 - \frac{10 \times 10^2}{100}} = 9.49 \text{ มม.}$$

จากสมการที่ 5.6 จะได้

$$t_c = \frac{10 - 23246 \times 1.0 \times 10^{-7} \times 91.3 - 9.49}{23246 \times 6.11 \times 10^{-7}} = 20.96 \text{ ปี}$$

ในทำนองเดียวกันจะสามารถหาค่า $\phi(t_i)$, $A_{reduction}(t_i)$, $\phi(t_i + t_c)$ และ t_c ของโครงสร้างสะพานที่มีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.50 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 77, 83, 85 เปอร์เซนต์ ได้ดังตารางที่ 5.4 จากการคำนวณข้างต้นสามารถนำมาเขียนเป็นความสัมพันธ์ ระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางเหล็กเสริมที่ลดลงกับเวลาที่ผ่านไป (ตามสมการที่ 5.5) หรือหน้าตัดเหล็กเสริมที่ลดลงกับเวลาที่ผ่านไป (ตามสมการที่ 5.7) ได้ดังรูปที่ 5.1 สำหรับเหล็กเสริมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ด้วยเงื่อนไขเดียวกัน จะได้ผลดังตารางที่ 5.4 และความสัมพันธ์จะเป็นดังรูปที่ 5.2

จากความสัมพันธ์ ตามรูปที่ 5.1 และ 5.2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงระดับความเสียหายของเหล็กเสริมในคอนกรีตที่เวลาใด ๆ อธิบายได้ว่า ในช่วงเวลาเริ่มต้นอัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่งขึ้นอยู่กับระดับความอิ่มตัวภายในรูพรุนคอนกรีต หรือความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในช่วงเวลานี้ อยู่ในสภาวะการควบคุมการกัดกร่อนโดยอาโนด เมื่อความชื้นสัมพัทธ์มากขึ้นจะทำให้อัตราการกัดกร่อนมากขึ้นด้วย ดังเห็นได้จากความชันของกราฟมากขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มจาก 77 เปอร์เซนต์ เป็น 82 เปอร์เซนต์ แต่อัตราการกัดกร่อนในสภาวะดังกล่าว จะมีขีดจำกัดบนอยู่ที่ 1.0×10^{-7} แอมป์ / ซม.^{2} ดังนั้นที่ระดับความเชื่อมั่น ร้อยละ 85, 90 และ 95 ซึ่งมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ เท่ากับ82, 83 และ 85 เปอร์เซนต์ ตามลำดับ อัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมจะเท่ากัน

สำหรับในช่วงเวลาการกัดกร่อนซึ่งเริ่มต้นหลังจากคาร์บอเนชั่นเข้าถึงผิวเหล็กเสริม อัตราการกัดกร่อนในช่วงเวลาดังกล่าว จะมีค่าสูงกว่าในช่วงเวลาเริ่มต้นทุกความชื้นสัมพัทธ์ จึงทำให้เส้นกราฟมีความชันมากขึ้น แต่ยังเป็นอัตราการกัดกร่อนคงที่ เนื่องจากเป็นการพิจารณาตามแต่ละความชื้นสัมพัทธ์ การกัดกร่อนเหล็กเสริมในช่วงเวลานี้อยู่ในสภาวะการควบคุมการกัดกร่อนโดยความต้านทาน ขึ้นกับระดับความอิ่มตัวภายในรูพรุนคอนกรีต หรือความชื้นสัมพัทธ์ เมื่อความชื้นสัมพัทธ์มากขึ้น จะทำให้อัตราการกัดกร่อนมากขึ้นด้วย ดังเห็นได้จากความชันของกราฟมากขึ้น เมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มจาก 77 เปอร์เซนต์ เป็น 85 เปอร์เซนต์ และเมื่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริมทำให้หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลง 10 เปอร์เซนต์ หรือมีระดับความเสียหายระดับ C โครงสร้างดังกล่าว จะต้องได้รับการซ่อมแซมเพื่อให้มีความสามารถในการใช้งานได้ดีดังเดิม ซึ่งถือเป็นการสิ้นสุดอายุการใช้งานของโครงสร้าง

จากการพิจารณาความถูกต้องและเชื่อถือได้ในการเลือกใช้ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสม พบว่า การเลือกใช้ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 77 เปอร์เซนต์ จะให้ช่วงเวลาการกัดกร่อน 168.5 ปี แต่ถ้าเลือกใช้ความชื้นสัมพัทธ์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 85 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 82 เปอร์เซนต์ หรือเพิ่มขึ้น 6.5 เปอร์เซนต์ จะให้ช่วงเวลาการกัดกร่อน 21.0 ปี หรือลดลง 87.5 เปอร์เซนต์ ในกรณีสำหรับการใช้เหล็กเสริมขนาด 10 มิลลิเมตร ในกรณีการใช้เหล็กเสริมขนาด 20 มิลลิเมตร จะทำให้ช่วงเวลาการกัดกร่อนลดลงจาก 363.1 ปี เป็น 57.6 ปี คิดเป็น 84.1 เปอร์เซนต์ อาจกล่าวได้ว่า ความแตกต่างของความชื้นสัมพัทธ์ทั้งสองกรณี เพียง 6.5 เปอร์เซนต์ จะทำให้ช่วงเวลาการกัดกร่อนลดลงถึง 85 เปอร์เซนต์ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองอายุการใช้งานของงานวิจัยในอดีตพบว่า จะสอดคล้องกับแบบจำลองที่เสนอโดย Treadaway [15] ดังแสดงในรูปที่ 5.3 มากกว่าแบบจำลองที่เสนอโดย Tuutti [6] ดังแสดงในรูปที่ 5.4

ในการพิจารณาอายุการใช้งานของโครงสร้าง จะพบว่า ช่วงเวลาทั้งสองช่วงจะมีความสัมพันธ์กันอย่างยิ่ง โดยพิจารณาจากสมการที่ 2.8 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล จะลดลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น ดังนั้นในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง ช่วงเวลาเริ่มต้นจะนานกว่าช่วงเวลาเริ่มต้นในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ แต่ในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง ช่วงเวลาการกัดกร่อนจะสั้นกว่าช่วงเวลาการกัดกร่อนในสภาวะแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ดังนั้นในการพิจารณาผลกระทบของความชื้นสัมพัทธ์ที่มีต่อช่วงเวลาทั้งสองโดยการพิจารณาช่วงเวลาเริ่มต้น ตามสมการที่ 4.10 จะทำให้แบบจำลองอายุการใช้งานมีความแตกต่าง จากแบบจำลองตามรูปที่ 5.1 และ 5.2 ในส่วนของช่วงเวลาเริ่มต้น กล่าวคือช่วงเวลาเริ่มต้นที่ได้จากความชื้นสัมพัทธ์สูง จะนานกว่าช่วงเวลาเริ่มต้นที่ได้จากความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ

ความแตกต่างระหว่างรูปที่ 5.1 และ 5.2 กับรูปที่ 5.5 และ 5.6 จะแตกต่างกันในส่วนของช่วงเวลาเริ่มต้น เนื่องจากในรูปที่ 5.1 และ 5.2 เป็นความสัมพันธ์ที่เขียนขึ้นจากการคำนวณช่วงเวลาเริ่มต้นตามสมการที่ 2.41 (CEB MODEL) โดยสมการนี้ได้กำหนดเงื่อนไขการนำไปใช้ของสมการตามสภาวะแวดล้อมที่โครงสร้างนั้น ๆ ตั้งอยู่ โดยแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ คอนกรีตที่มีผิวสัมผัสกับฝนโดยตรงและคอนกรีตที่อยู่ใต้กำบังฝน และการนำมาใช้ในงานวิจัยนี้อยู่ภายใต้เงื่อนไขคอนกรีตที่อยู่ใต้ที่กำบังฝน ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการที่ 2.41 (CEB MODEL) จะพบว่าสมการดังกล่าวขึ้นกับตัวแปรเพียงตัวเดียวคือกำลังอัดคอนกรีต

สำหรับรูปที่ 5.5 และ 5.6 เป็นความสัมพันธ์ที่เขียนขึ้นจากการคำนวณช่วงเวลาเริ่มต้นตามสมการที่ 4.10 โดยสมการนี้จะเปลี่ยนแปลงตามความชื้นสัมพัทธ์ และสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังนั้น เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นการเกิดคาร์บอเนชั่นจะช้าลง ทำให้ช่วงเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนคุณสมบัติของเนื้อคอนกรีตที่หุ้มเหล็กให้เป็นกลางยาวนานขึ้น แต่อัตราการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในช่วงเวลานี้จะสูงขึ้นด้วย ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลง จนถึงระดับความเสียหายที่ต้องซ่อมแซมก่อนที่ความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กจะกลายเป็นกลางหมด

อย่างไรก็ตาม การลดลงของเส้นผ่าศูนย์กลาง หรือหน้าตัดของเหล็กเสริมเป็นเพียงตัวแปรตัวหนึ่งทางด้านความทนทานของโครงสร้างที่กำหนดขึ้น เพื่อนำมาพิจารณาถึงความเสี่ยงที่จะก่อให้เกิดการวิบัติของโครงสร้าง อาจมีตัวแปรอื่น ๆ อีก ที่อาจจะทำให้โครงสร้างอยู่ในระดับความเสียหายที่ต่ำกว่ามาตรฐานได้เร็วกว่าตัวแปรที่ใช้พิจารณาในงานวิจัยนี้

ในการกำหนดอายุการใช้งานของโครงสร้างจากอัตราการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตและอัตราการเกิดสนิมของเหล็กดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เพื่อให้มีความเสี่ยงต่อการวิบัติของโครงสร้างน้อยที่สุดภายใต้สภาวะแวดล้อมในเขตกรุงเทพมหานคร วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อเสนอแนะว่า ควรพิจารณาอายุการใช้งานของโครงสร้างเฉพาะช่วงเวลาการเกิดคาร์บอเนชั่นของคอนกรีตเท่านั้น เนื่องด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น คือการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์เพียงเล็กน้อย จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาการกัดกร่อนเป็นอย่างมาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย