การทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพจากคลอไรด์ด้วยความน่าจะเป็น

Service Life Predicted of RC Structure Deterioration Subjected to Chloride with Probability

ธีรนาถ ราชรองเมือง[1,*] วันชัย ยอดสุดใจ[2]

[1,2] สาขาวิชาเทคโนโลยีโครงสร้างเพื่อสิ่งแวดล้อมสรรค์สร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพมหานคร

**Corresponding author; E-mail address: teeranard.ra@ku.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบระยะเวลาที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิม (T_{Co}) ของโครงสร้าง ซึ่งคอนกรีตจะเริ่มแตกร้าว (T_{Cr}) ภายหลังจากที่เหล็กเสริมเกิดสนิม โดยการใช้แบบจำลองเพื่อจำลองสภาพแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการเกิดสนิมสองแบบจำลองคือ (1) แบบจำลองที่ใช้สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์คงที่ (D_{CC}) และ (2) แบบจำลองที่ใช้สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ที่ลดลงตามระยะเวลา (D_{CV}) ซึ่งจะทำการสุ่มตัวแปรต้นในการนำเข้าแบบจำลองด้วยการสุ่มเลือกค่าตามลักษณะการกระจายตัวของตัวแปรนั้นๆ และทำการหาความน่าจะเป็นของการเกิด T_{Cr} ด้วยการจำลองแบบมอนติคาร์โล (Monti Carlo Simulation) โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการใช้ Harmonic mean ซึ่งเป็นค่ามัธยฐานของ T_{Cr} สองกลุ่มที่มาจากผลลัพธ์ของ T_{Cr} ทั้งหมด โดยจะทำการคำนวณค่า Harmonic mean ตั้งแต่จำนวนรอบที่ 1,000 เป็นต้นไป และหยุดทำการจำลองเมื่อค่า Harmonic mean มีค่าไม่เกิน 0.001 การใช้วิธีนี้ทำให้สามารถคำนวณระยะเวลาที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดสนิมและระยะเวลาที่โครงสร้างเริ่มแตกร้าวได้โดยใช้ระยะเวลาและจำนวนครั้งในการทำ Monti Carlo Simulation ที่น้อยกว่า โดยผลลัพธ์จากแบบจำลองพบว่าที่ความน่าจะเป็น 10% แบบจำลองแบบ D_{CC} ให้ผลของ T_{Co} คือ 4.00 ปี และ T_{Cr} คือ 4.03 ปี แบบจำลองแบบ D_{CV} ให้ผลของ T_{Co} คือ 4.05 ปี และ T_{Cr} คือ 4.11 ปี ที่ความน่าจะเป็น 50% แบบจำลองแบบ D_{CV} ให้ผลของ T_{Co} คือ 11.58 ปี และ T_{Cr} คือ 12.18 ปี ซึ่งคิดเป็นค่าประมาณ 2 เท่าของแบบจำลอง D_{CC} ซึ่งให้ผลของ T_{Co} คือ 6.01 ปี และ T_{Cr} คือ 6.31 ปี ตามลำดับ

คำสำคัญ: สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์, การเกิดสนิม, ความน่าจะเป็น

Abstract

In this research, two different diffusion models were employed to calculate the probability of the time to initial corrosion (T_{Co}) of rebar and the time to initial crack (T_{Cr}) of reinforced concrete using Monte Carlo simulation. The first model assumed a constant chloride diffusion coefficient (D_{CC}) over time, while the second model allowed for a variable chloride diffusion coefficient (D_{CV}). The results from both models were compared to determine the effect of assuming D_{CV} on the predicted corrosion and crack initiation times. The research employed an efficient method for reducing the number of iterations, including the calculation of the harmonic mean of the median of prior results and the splitting of these results into two groups, with the harmonic mean being calculated at the end of each iteration when the iteration number exceeded 1,000. The simulation was halted when the harmonic mean was less than 0.001, thus improving the overall efficiency of the study. The analysis showed that at a 10% probability, the T_{Co} and the T_{Cr} for the D_{CC} model were 4.00 years and 4.03 years, respectively, while for the D_{CV} model, the T_{Co} and the T_{Cr} were 4.05 years and 4.11 years, respectively. At 50% probability, the T_{Co} and the T_{Cr} for the D_{CC} model were 6.01 years and 6.31 years, respectively, while for the D_{CV} model, the T_{Co} and the T_{Cr} were 11.58 years and 12.18 years, respectively. These results suggest that assuming a variable diffusion coefficient leads to a significant increase in the predicted T_{Co} and T_{Cr}.

Keywords: chloride diffusion coefficient, corrosion, probability

1. คำนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ท่ามกลางสภาพแวดล้อมทางทะเล เช่น ท่าเรือ สะพาน โครงสร้างพื้นฐานต่างๆ ยังคงประสบปัญหาการกัดกร่อนของเหล็กเสริมภายในเนื่องจากการแพร่กระจายของคลอไรด์ เมื่อคลอไรด์แพร่ผ่านคอนกรีตและเข้าถึงเหล็กเสริมภายใน คลอไรด์จะทำลายชั้นแพสซิฟฟิล์มและก่อให้เกิดการกัดกร่อนขึ้น [1] ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการกัดกร่อนจะขยายตัวจนเต็มช่องว่างรูพรุนภายในและก่อให้เกิดความเค้นดึง เมื่อความเค้นดึงเพิ่มขึ้นจนเกินความต้านทานแรงดึงของคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตแตกออกจนเกิดความเสียหายและสูญเสียความสามารถในการรับกำลังในที่สุด การคาดการณ์อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ท่ามกลางสภาพแวดล้อมทางทะเลจึงเป็นสิ่งสำคัญในเพื่อกำหนดระยะเวลาการบำรุงรักษาหรือซ่อมแซมโครงสร้างดังกล่าวที่เกิดความเสียหาย

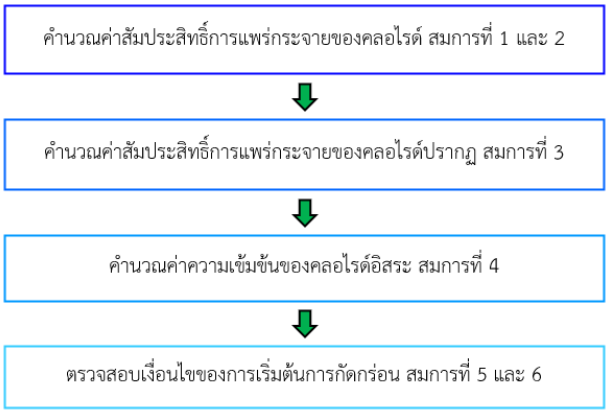
ผู้วิจัยหลายท่านได้มีการนำเสนอแบบจำลองการคาดการณ์อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ท่ามกลางสภาพแวดล้อมทางทะเล เช่น แบบจำลองเชิงประจักษ์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคาดการณ์อายุการใช้งานของโครงสร้างในสภาพแวดล้อมทางทะเล [2] แบบจำลองการคาดการณ์อายุการใช้งานของเสาเข็มสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่แปรผันตามเวลาโดยความน่าจะเป็น [3] การสร้างแบบจำลองเพื่อคาดการณ์อายุการใช้งานโครงสร้างโดยใช้ความน่าจะเป็นเนื่องจากคลอไรด์ [4] เป็นต้น โดยทั่วไปแบบจำลองการคาดการณ์อายุการใช้งานของโครงสร้างมีตัวแปรที่จะนำเข้าแบบจำลอง เช่น ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิว ค่าความเข้มข้นของคลอไรด์วิกฤต ความหนาของระยะหุ้มคอนกรีตและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ โดยวิธีการสุ่มตามช่วงและการกระจายของข้อมูลตามรูปแบบที่กำหนด ในการสร้างแบบจำลองเพื่อคาดการณ์อายุการใช้งานของโครงสร้างท่ามกลางสภาพแวดล้อมทางทะเลนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ถือเป็นตัวแปรสำคัญในการวัดอัตราการแพร่ของคลอไรด์ ซึ่งแบบจำลองที่ใช้คาดการณ์อายุการใช้งานของโครงสร้างที่กล่าวข้างต้นนั้นใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์แบบคงที่ในการวิเคราะห์

ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่ทำการทดลองเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ เช่น การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ [5] พบว่า ระยะเวลา 30 วัน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ มีค่า 3.1 x10^{-12} m^2/s ระยะเวลา 60 วัน มีค่า 2.65 x10^{-12} m^2/s และระยะเวลา 120 วัน มีค่า 2.10 x10^{-12} m^2/s การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ที่ระยะเวลาต่างๆ [6] พบว่า ที่ระยะเวลา 40 วัน สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ มีค่า 17.5x10^{-12} m^2/s ที่ระยะเวลา 200 วัน มีค่า 4.0 x10^{-12} m^2/s และที่ระยะเวลา 400 วัน มีค่า 1.8 x10^{-12} m^2/s. การทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ในคอนกรีต [7] พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ที่ระยะเวลา 94 วัน มีค่า 1.24 x10^{-11} m^2/s ที่ระยะเวลา 142 วัน มีค่า 8.22 x10^{-12} m^2/s และที่ระยะเวลา 181 วัน มีค่า 6.45 x10^{-12} m^2/s ตามลำดับ จากข้อมูลของงานวิจัยข้างต้นพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์มีค่าไม่คงที่และลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ เพื่อสร้างแบบจำลองที่มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริง จึงใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์แบบไม่คงที่ซึ่งอาจทำให้ได้แบบจำลองอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ท่ามกลางสภาพแวดล้อมทางทะเลที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น

2. การวิเคราะห์อายุการใช้งานของโครงสร้าง

การคาดการณ์อายุการใช้งานของโครงสร้างที่ตั้งอยู่ท่ามกลางสภาพแวดล้อมทางทะเลแบ่งเป็นสองส่วน คือ ระยะเวลาที่โครงสร้างเริ่มเกิดการกัดกร่อน (time to initial corrosion) และระยะเวลาที่โครงสร้างเริ่มเกิดรอยร้าว (time to initial crack)

2.1 ระยะเวลาเริ่มต้นการกัดกร่อน (time to Initial corrosion) ระยะเวลาที่โครงสร้างเริ่มเกิดการกัดกร่อนเริ่มเกิดขึ้นเมื่อคลอไรด์แพร่กระจายผ่านเข้ามาในโครงสร้างและสะสมจนมีความเข้มข้นเท่ากับค่าคลอไรด์วิกฤตจะทำให้ชั้นแพสซิฟฟิล์มที่บริเวณเหล็กเสริมถูกทำลาย เมื่อมีความชื้นและออกซิเจนเพียงพอจึงเริ่มเกิดการกัดกร่อน [3] โดยมีกระบวนการ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพกระบวนการหาระยะเวลาเกิด Initial corrosion

สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ (chloride diffusion coefficient) มีความสำคัญมากเนื่องจากใช้ในการวัดอัตราการแพร่ของคลอไรด์และยังเกี่ยวเนื่องกับองค์ประกอบของวัสดุในการผสมคอนกรีต ช่องว่างภายใน ความชื้น อุณหภูมิ อายุ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 1

$$D_c = D_{c,ref}\, f_1(T)\, f_2(t) \qquad (1)$$

เมื่อ $D_{c,ref}$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ (m^2/s) ภายใต้อายุและอุณหภูมิอ้างอิง, $f_1(T)$ และ $f_2(t)$ คือฟังก์ชั่น ดังสมการที่ 2 เมื่อ R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol/K) , U_c คือ พลังงานกระตุ้นสำหรับการแพร่กระจายของคลอไรด์ (kJ/mol) , T_{ref} คือ อุณหภูมิอ้างอิง (296 K), T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

$$f_1(T)=\exp\left[\frac{U_c}{R}\left(\frac{1}{T_{ref}}-\frac{1}{T}\right)\right];\ f_2(t)=\left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m \quad (2)$$

t คือ อายุของคอนกรีต (วัน), m คือ ดัชนีการสลายตัวตามเวลาของการแพร่กระจายของคลอไรด์

คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ปรากฏ ดังสมการที่ 3

$$D_a=\frac{D_c}{1+\frac{k}{w_e}} \quad (3)$$

เมื่อ D_a คือสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ปรากฏ (m^2/s), k คือความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์, w_e คือ ปริมาณน้ำที่ระเหย

คำนวณค่าความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระซึ่งกระจายอยู่รอบโครงสร้างดังสมการที่ 4

$$C_f=C_{fs}\left(1-erf\frac{x}{2\sqrt{D_a t}}erf\frac{y}{2\sqrt{D_a t}}\right) \quad (4)$$

เมื่อ C_{fs} คือ ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิว (kg/m^3) x และ y คือตำแหน่งใดๆในโครงสร้าง ซึ่งในการคำนวณจะให้ค่าใดค่าหนึ่งเป็นศูนย์, C_f คือ ความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระในช่องว่าง

การคาดการณ์ระยะเวลาเริ่มการกัดกร่อนเมื่อเกิดการกัดกร่อนเกิดขึ้นที่ชิ้นส่วนโครงสร้าง เมื่อมีการแทรกซึมของการกัดกร่อนเข้าไปที่ผิวของเหล็กจะทำให้เกิดสภาวะจำกัดซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ 5

$$G_1(x,t)=C_{th}-C(x,t) \quad (5)$$

$G_1(x,t)$ คือ สภาวะขีดจำกัด (limit state function), C_{th} คือ ความเข้มข้นของคลอไรด์วิกฤต, $C(x,t)$ คือความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ระยะเวลา t และ x คือตัวแปรสุ่ม

คำนวณความน่าจะเป็นของระยะเวลาเริ่มต้นการกัดกร่อนได้ดังสมการที่ 6

$$p_i=\int_{G1(x,t)\le 0} f_x(x)dx$$

เมื่อ p_i คือ ความน่าจะเป็นของการเริ่มต้นการกัดกร่อน

2.2 ระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าว (time to initial Crack) เมื่อเหล็กเริ่มสึกกร่อนดำเนินไปมากขึ้น ความดันที่ขยายตัวจะทำให้เกิดความเค้นดึงและความเครียดที่ผนังของคอนกรีตภายในเมื่อแรงดึงที่ส่วนใดส่วนหนึ่งของเส้นรอบวงด้านในเกินความต้านทานแรงดึงของคอนกรีต รอยแตกที่เกิดจากการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นที่ส่วนเชื่อมต่อกันระหว่างเหล็กและคอนกรีตจากนั้นจะค่อย ๆ ขยายไปทางผิวด้านนอก [8]

ในการคาดการณ์ระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวจะต้องคำนวณมวลของเหล็กที่สูญเสียไปเนื่องจากการกัดกร่อน ดังสมการที่ 7

$$M_{loss}=2.315\times10^{-9}\pi d_0 i_{corr}t \quad (7)$$

M_{loss} คือมวลของเหล็กที่สูญเสีย, i_{corr} คือ อัตราการกัดกร่อน, d_0 คือพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมตั้งต้น

คำนวณการขยายตัวตามแนวรัศมี ดังสมการที่ 8

$$p_r=\frac{E_{cef}}{(\eta+1+\nu_c)}\left[\frac{M_{loss}}{\rho_s}\frac{(\alpha_v-1)}{\pi d_0 r_0}-\frac{\delta_0}{r_0}\right] \quad (8)$$

เมื่อ p_r คือความเค้นการขยายตัวแนวรัศมี, ρ_s คือ ความหนาแน่นของเหล็ก, α_v คือ อัตราส่วนการขยายตัว, ν_c คือ อัตราส่วนปัวซองของระยะหุ้มคอนกรีต, δ_0 คือ ความหนาของรูพรุนที่มีการกระจายสม่ำเสมอ, E_{cef} คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นประสิทธิผลของคอนกรีต, r_0 คือ ผลของการคืบของระยะหุ้มคอนกรีต ซึ่ง $r_0=d_0/2$

ตรวจสอบเงื่อนไขของการเกิดรอยร้าวของคอนกรีต ดังสมการที่ 9

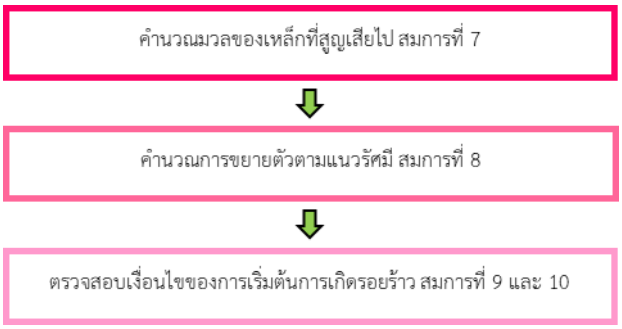
$$G_2(x,t)=p_{cr}(x)-p_r(x,t) \quad (9)$$

เมื่อ $p_{cr}(x)$ คือ ค่าความเค้นการขยายตัววิกฤต ณ เวลาที่เกิดการกัดกร่อน, $p_r(x,t)$ คือ ความเค้นการขยายตัว ณ เวลา (t)

คำนวณความน่าจะเป็นของการเริ่มต้นเกิดรอยร้าว ดังสมการที่ 10

$$p_c=\int_{G_2(x,t)\le 0} f_x(x)dx \quad (10)$$

เมื่อ p_c คือ ความน่าจะเป็นของการเริ่มต้นการเกิดรอยร้าว, $f_x(x)$ คือฟังก์ชันการสุ่มร่วมกันของตัวแปรสุ่ม โดยมีกระบวนการดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพกระบวนการหาระยะเวลาเกิด Initial crack

3. กระบวนการ Monte Carlo Simulation

การคาดการณ์อายุการใช้งานของโครงสร้างนั้นเนื่องจากตัวแปรที่นำเข้าเป็นข้อมูลที่มีความไม่แน่นอน ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องนำเข้าข้อมูลโดยวิธีการสุ่มตามช่วงและการกระจายของข้อมูลตามรูปแบบที่กำหนด

ซึ่งอายุการใช้งานของโครงสร้างที่ได้จากแบบจำลองจะออกมาในรูปแบบของความน่าจะเป็นตามการนำเข้าของข้อมูล ซึ่งในการวิเคราะห์อายุการใช้งานของโครงสร้างจะใช้วิธีมอนติคาร์โล

วิธีมอนติคาร์โล คือวิธีการจำลองที่สร้างขึ้นโดยใช้หลักทางสถิติเพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ หรือฟิสิกส์ โดยวิธีการสุ่มตัวอย่างในลักษณะของการกระจายข้อมูลที่เลียนแบบข้อมูลจริง ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งตัวแปรที่ใช้นำเข้าแบบจำลองออกเป็นสองส่วน คือ ตัวแปรที่กำหนดขึ้นหมายถึงตัวแปรที่ถูกกำหนดให้มีค่าคงที่เพื่อใช้ในการคำนวณในสมการต่างๆ ของแบบจำลอง เช่น R มีค่า 8.314 J/mol/K, U_c มีค่า 35.0 (kJ/mol) และตัวแปรสุ่มหมายถึงตัวแปรที่นำเข้าแบบจำลองโดยวิธีการสุ่มตามช่วงและการกระจายของข้อมูลตามรูปแบบที่กำหนด T มีลักษณะการกระจายของข้อมูลแบบปกติ (Normal Distribution), C_{fs} มีลักษณะการกระจายของข้อมูลแบบล็อคนอร์มัล (Lognormal) ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการนำเข้าแบบจำลองและลักษณะการกระจายข้อมูลได้ทำการรวบรวมจากงานวิจัยต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวแปรสุ่มสำหรับนำเข้าแบบจำลอง

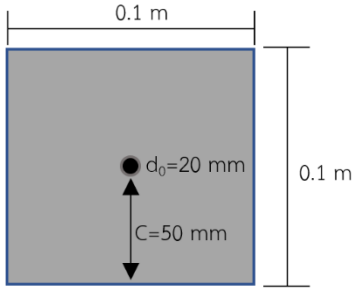
Variable	Distribution	Mean	Cov
C_{fs} (kg/m^3)	Lognormal	5.275	0.50
C_{th} (kg/m^3)	Uniform	0.835	0.247
$D_{c,ref}$(m^2/s)	Lognormal	8.2x10^{-12}	0.20
T(K)	Normal	296	0.10
c(mm)	Normal	50	0.50
m	Normal	0.2	0.20
R_c (ohms)	Lognormal	1.01	1.12
icorr (μA/cm^2)	Lognormal	1.06	0.34
E_c (Mpa)	Normal	4733(f_c)$^{0.5}$	0.12
f_{ct} (Mpa)	Normal	0.6227(f_c)$^{0.5}$	0.20
α_v	Beta	3.01	0.27

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ จากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ด้วยไฟฟ้า [7] ได้เก็บข้อมูลความเข้มข้นของคลอไรด์ (kg/m^3) จากการเจาะสำรวจโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสนามที่ระยะความลึกต่างๆ ได้แก่ 5, 10, 15 และ 20 มิลลิเมตร จากผิวหน้าของโครงสร้าง ทำให้ทราบถึงค่าความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ระยะต่างๆ ในการนำมาหาความสัมพันธ์ เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ปรากฏต่อไป ซึ่งสามารถแสดงได้ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ระยะความลึกจากผิวหน้า

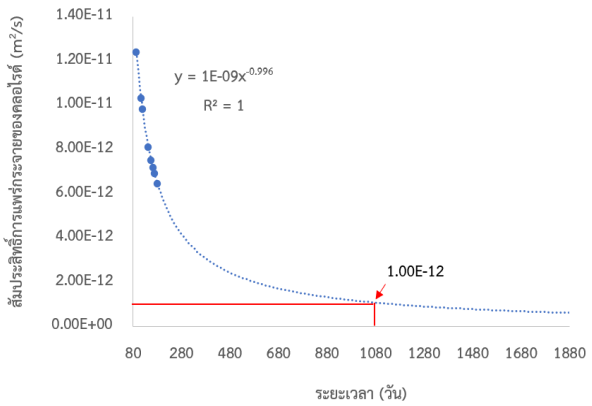
Depth from exposed surface (mm)	Cl (%) by weight of concrete (kg)	Cl content (kg/m3)
5	0.140	3.08
10	0.067	1.47
15	0.044	0.97
20	0.040	0.88

ซึ่งชิ้นส่วนโครงสร้างที่ใช้ในการจำลองเป็นเสาคอนกรีตเสริมเหล็กสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 0.1 x 0.1 เมตร โดยมีเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตรอยู่ตรงกลาง และมีระยะคอนกรีตหุ้ม 50 มิลลิเมตร



รูปที่ 3 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 0.10 x 0.10 เมตร

ในงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลปริมาณคลอไรด์จากการทดสอบที่ระยะความลึกต่างๆ สร้างความสัมพันธ์ตามกฎของฟิค (Fick'2nd law) จะทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ที่ระยะเวลาต่างๆ ดังรูปที่ 4 ซึ่งงานวิจัยนี้ได้กำหนดใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์น้อยที่สุด คือ 1.0x10^{-12} m^2/s ที่ 1,080 วัน จากนั้นจึงนำข้อมูลต่างๆของตัวแปรสุ่มเข้าแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของอายุการใช้งานโครงสร้าง



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์และระยะเวลา

2.3 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในแบบจำลอง

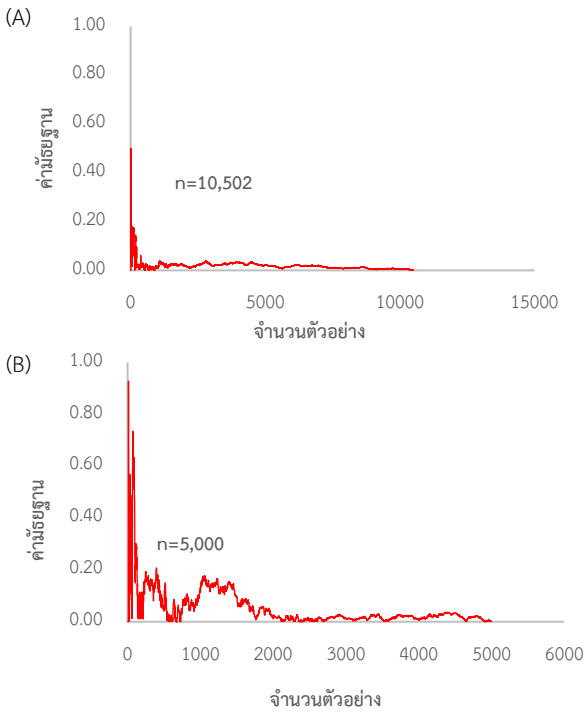
ในการวิเคราะห์หาอายุการใช้งานของโครงสร้างแบบจำลองจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ในส่วนแรกแบบจำลองจะจำลองหาระยะเวลาที่โครงสร้างเริ่มเกิดการกัดกร่อน หลังจากนั้นเมื่อมีการกัดกร่อนเกิดขึ้นแบบจำลองจะทำการจำลองเพื่อหาระยะเวลาที่โครงสร้างจะเริ่มเกิดรอยร้าวซึ่งเป็นส่วนที่สองต่อไป

สำหรับจำนวนตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์เพื่อคาดการณ์อายุการใช้งานของโครงสร้าง ในงานวิจัยอื่นๆมีการกำหนดจำนวณตัวอย่างที่ใช้ในแบบจำลองแตกต่างกันไป เช่น แบบจำลองการคาดการณ์อายุการใช้งานของเสาเข็มสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่แปรผันตามเวลาโดยความน่าจะเป็น [3] ได้ใช้จำนวนตัวอย่างในการ วิเคราะห์อายุการใช้งานของโครงสร้าง 1,000,000 ตัวอย่าง การทำนายอายุการใช้งานของท่าเรือคอนกรีตที่แตกร้าวด้วยความน่าจะเป็น [9] ใช้จำนวน 20,000 ตัวอย่าง ในการวิเคราะห์อายุการใช้งานโครงสร้าง และแบบจำลองความน่าจะเป็นสำหรับทำนายอายุการใช้งานโครงสร้าง [4] ใช้ตัวอย่างจำนวณ 32,768 ตัวอย่าง เพื่อนำมาวิเคราะห์อายุการใช้งานโดยใช้วิธี โมดิฟาย มอนติคาร์โล เนื่องจากข้อจำกัดของคอมพิวเตอร์ สำหรับงานวิจัยนี้เสนอใช้วิธีการหาจำนวณตัวอย่างจากผลลัพธ์ของแบบจำลอง หากค่ามัธยฐานของผลลัพธ์ของแบบจำลองมีค่าไม่เกิน 0.001 ถือว่าจำนวณตัวอย่างนั้นเพียงพอแล้ว

เมื่อกรอกข้อมูลต่างๆ ของตัวแปรแล้วเสร็จ แบบจำลองจะให้ผลลัพธ์ออกมารูปแบบของระยะเวลาที่โครงสร้างเริ่มเกิดการกัดกร่อน และระยะเวลาที่โครงสร้างจะเริ่มเกิดรอยร้าว งานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบระหว่างผลลัพธ์ของอายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กระหว่างแบบจำลองที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์แบบคงที่ (Constant Chloride diffusion coefficient) และ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ที่ลดลงตามระยะเวลา (Dynamic Chloride diffusion coefficient)

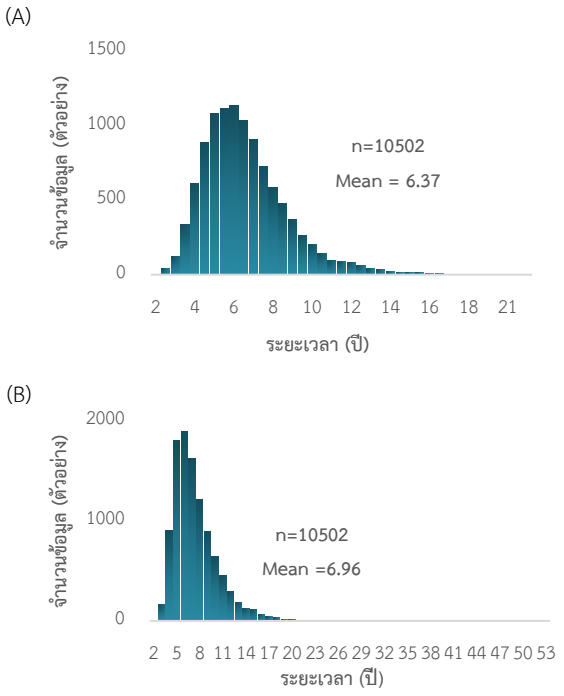
4. ผลและการวิจารณ์

จากแบบจำลองเพื่อคาดการณ์อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ท่ามกลางสภาพแวดล้อมทางทะเล โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์แบบคงที่ (Constant Chloride diffusion coefficient) จำนวน 10,502 ตัวอย่าง และแบบจำลองที่ค่าใช้สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ที่ลดลงตามระยะเวลา (Dynamic Chloride diffusion coefficient) ซึ่งมีจำนวน 5,000 ตัวอย่าง ตามลำดับ เนื่องจากค่ามัธยฐานของผลลัพธ์จากแบบจำลองจะมีค่าเข้าสู่ 0.001 จึงได้หยุดทำการจำลอง ซึ่งได้กำหนดไว้ให้เป็นค่าต่ำสุดของแบบจำลองเพื่อทำการจำกัดจำนวนตัวอย่างในการจำลองข้อมูล แสดงดังรูปที่ 5

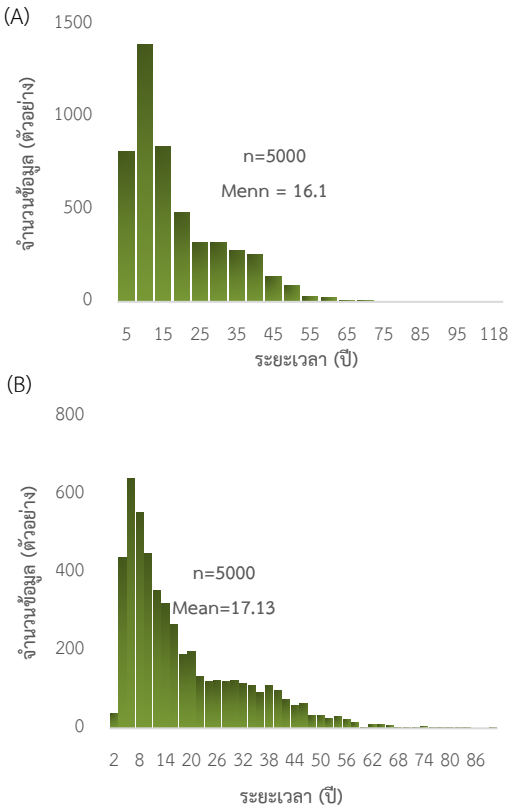


รูปที่ 5 (A) จำนวนตัวอย่างและ Hamonic mean ของแบบจำลองแบบ D_{CC}
(B) จำนวนตัวอย่างและ Hamonic mean ของแบบจำลองแบบ D_{CV}

ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์จะแสดงจำนวนครั้งของระยะเวลาที่โครงสร้างจะเริ่มเกิดการกัดกร่อนและเกิดรอยร้าวตามลำดับ เมื่อนำข้อมูลมาจัดเรียงจากน้อยไปมากสามารถแสดงลักษณะของการกระจายข้อมูลได้ ดังรูปที่ 6 และ 7

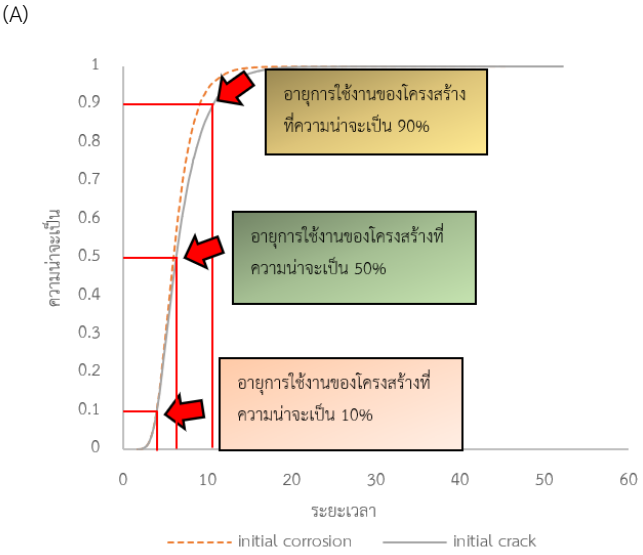


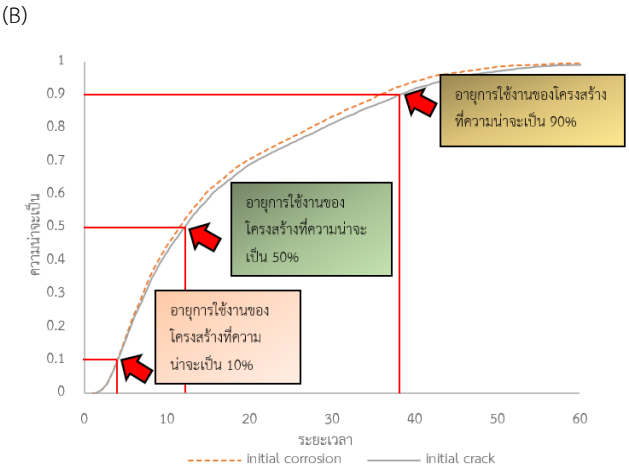
รูปที่ 6 (A) ระยะเวลาเริ่มต้นเกิดสนิมและจำนวนข้อมูลของแบบจำลอง D_{CC}
(B) ระยะเวลาเริ่มต้นเกิดรอยร้าวและจำนวนข้อมูลของแบบจำลอง D_{CC}



รูปที่ 7 (A) ระยะเวลาเริ่มต้นเกิดสนิมและจำนวนข้อมูลของแบบจำลอง D_{CV}
(B) ระยะเวลาเริ่มต้นเกิดรอยร้าวและจำนวนข้อมูลของแบบจำลอง D_{CV}

จากแผนภาพการกระจายข้อมูลของระยะเวลาเริ่มต้นการกัดกร่อนและระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวดังรูปที่ 6 และ 7 สามารถวิเคราะห์ให้อยู่ในรูปแบบของความน่าจะเป็นซึ่งแสดงในรูปแบบของเส้นโค้งความถี่สะสมของทั้งสองแบบจำลองดังรูปที่ 8





รูปที่ 8 (A) ความน่าจะเป็นของอายุการใช้งานโครงสร้างจากแบบจำลอง D_{CC}
(B) ความน่าจะเป็นของอายุการใช้งานโครงสร้างจากแบบจำลอง D_{CV}

จากรูปที่ 8 แบบจำลองวิเคราะห์ระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดการกัดกร่อนและระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวซึ่งใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์แบบคงที่ ที่ความน่าจะเป็น 10% คือ 4.00 ปี และ 4.03 ปี ที่ความน่าจะเป็น 50% คือ 6.01 ปี และ 6.31 ปี และที่ความน่าจะเป็น 90% คือ 9.10 และ 10.69 ปี ตามลำดับ รูปที่ 6B แบบจำลองวิเคราะห์ระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดการกัดกร่อนและระยะเวลาเริ่มต้นการเกิดรอยร้าวซึ่งใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ลดลงตามระยะเวลา ความน่าจะเป็น 10% คือ 4.10 ปี และ 4.11 ปี ที่ความน่าจะเป็น 50% คือ 11.57 ปี และ 12.17 ปี และที่ความน่าจะเป็น 90% คือ 35.76 ปี และ 38.16 ปี ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกที่ความน่าจะเป็น 10% แบบจำลองทั้งสองให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ของแบบจำลองที่ใช้ค่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ลดลงตามระยะเวลามีค่าลดลงไม่มาก สำหรับความน่าจะเป็น 50% แบบจำลองที่ใช้ค่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ลดลงตามระยะเวลาให้ผลลัพธ์ที่มากกว่าถึงร้อยละ 50 และที่ความน่าจะเป็น 90% แบบจำลองทั้งสองให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกันถึง 4 เท่า เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ลดลงตามระยะเวลามีค่าลดลงจนถึงค่าน้อยที่สุดแล้ว

5. สรุปผล

แบบจำลองเพื่อคาดการณ์อายุการใช้งานของโครงสร้างที่ตั้งอยู่ท่ามกลางสภาพแวดล้อมทางทะเลโดยการจำกัดจำนวนข้อมูลด้วยค่า harmonic mean โดยแบบจำลองที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์แบบคงที่ใช้จำนวนตัวอย่างทั้งหมด 10,502 ตัวอย่าง และแบบจำลองที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของคลอไรด์ลดลงตามระยะเวลาใช้จำนวนตัวอย่างทั้งหมด 5,000 ตัวอย่าง การจำกัดจำนวนตัวอย่างด้วยวิธีดังกล่าว

ข้างต้นทำให้งานวิจัยนี้แตกต่างกับงานวิจัยอื่นๆ ที่ใช้จำนวนตัวอย่างจำนวนมาก เช่น แบบจำลองการคาดการณ์อายุการใช้งานของเสาเข็มสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่แปรผันตามเวลาโดยความน่าจะเป็น [3] ใช้จำนวนตัวอย่างในการวิเคราะห์ 1,000,000 ตัวอย่าง และแบบจำลองความน่าจะเป็นสำหรับทำนายอายุการใช้งานโครงสร้าง [4] ใช้ข้อมูลจำนวณ 32,768 ตัวอย่าง เพื่อนำมาวิเคราะห์อายุการใช้งานเนื่องจากข้อจำกัดของคอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถลดระยะเวลาและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ลงได้ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองเพียงเล็กน้อย

ผลของแบบจำลองระหว่างแบบจำลองใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์แบบคงที่และแบบจำลองที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของคลอไรด์ลดลงตามระยะเวลาที่ความน่าจะเป็น 10% แรกให้ผลที่ไม่แตกต่างกันมาก ที่ความน่าจะเป็น 50% อายุการใช้งานของโครงสร้างระหว่างแบบจำลองทั้งสองมีค่าต่างกันถึง 50% ซึ่งเกิดจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ที่ลดลงตามระยะเวลาซึ่งตรงกับความเป็นจริง ทำให้ผลลัพธ์ของแบบจำลองที่ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ลดลงตามระยะเวลามีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าเป็น 2 เท่า

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร.วันชัย ยอดสุดใจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักผู้ริเริ่มหัวข้อในการวิจัยนี้ตลอดจนให้คำปรึกษาแนะนำเพื่อปรับปรุงให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์ คุณอภิศักดิ์ จุฑาศิริวงศ์ ผู้คอยช่วยเหลือ แนะนำ ชี้แนะแนวทางตลอดจนเขียนโปรแกรมสร้างแบบจำลองเพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] Zhao, Y. X. and W. L. Jin (2006). Modeling the Amount of Steel Corrosion at the Cracking of Concrete Cover. *Advances in Structural Engineering*, 9(5), pp. 687-696.

[2] Chen, X., Ming, Y., FU, F. and Chen, P. (2022). Numerical and Empirical Models for Service Life Assessment of RC Structures in Marine Environment. *International Journal of Concrete Structures and Materials,* 16(11), pp. 1-12

[3] Xu, Q., Shi, D., Shao, W. (2019). Service life prediction of RC square piles based on time-varying probability analysis. *Construction and Building Materials*, 227 pp. 1-9

[4] Bentz, E. C. (2003). Probabilistic Modeling of Service Life for Structures. *ACI Materials Journal,* 100(5), pp. 391-397.

[5] Wang, Y. and K. Fu (2019). Comparisons of instantaneous chloride diffusion coefficients determined by RCM method and chloride natural diffusion test. *Construction and Building Materials,* 223, pp. 595-604.

[6] Zhang, Y., Zhou, X., Zhao, J., Zhuang, H., Gao, Y., Zhang, Y. (2019). Time dependency and similarity of decay process of chloride diffusion in concrete under simulated marine tidal environment. *Construction and Building Materials*, 205, pp. 332-343.

[7] Erdogdu, S., Kondratova, I. L., Bremner, T. W. (2004). Determination of chloride diffusion coefficient of concrete using open-circuit potential measurements. *Cement and Concrete Research*, 34(4), pp. 603-609.

[8] Li, W., Xu, C., Ho, S. C., Wang, B., Song, G. (2017). Monitoring Concrete Deterioration Due to Reinforcement Corrosion by Integrating Acoustic Emission and FBG Strain Measurements. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 17(3) pp. 657.

[9] Kwon, S. J., Na, U. J., Park, S. S., Jung, S. H. (2009). Service life prediction of concrete wharves with early-aged crack: Probabilistic approach for chloride diffusion. *Structural Safety*, 31(1), pp.75-83