

แนวทางการประเมินโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผลกระทบจากคลอไรด์ โดยใช้ทฤษฎีความน่าเชื่อถือ

จงศิลป์ สุขุมจริยพงศ์^{*1)} สงวน วงษ์สวัสดิกุล²⁾ และ สรรค์ สยามิภักดี³⁾

บทคัดย่อ

การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดผลกระทบเนื่องจากคลอไรด์ คือปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่ง ที่ส่งผลทำให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลง คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเกิดการแตกร้าว และโครงสร้างอาจเกิดการวิบัติต่อไปได้ บทความนี้นำเสนอแนวทางการประเมินสภาพโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดผลกระทบเนื่องจากคลอไรด์ โดยใช้ทฤษฎีความน่าเชื่อถือ ผลการศึกษาพบว่า ถ้าต้องการให้โครงสร้างมีปลอดภัยจากผลกระทบของคลอไรด์ โครงสร้างควรมีค่าความปลอดภัยกลางไม่น้อยกว่า 1.00 ค่าความน่าวิบัติไม่เกินกว่า 0.50 และค่าดัชนีความน่าเชื่อถือไม่น้อยกว่า 0.00 และจากกรณีศึกษาเพื่อวิเคราะห์หาอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปลอดภัยจากผลของคลอไรด์ โดยใช้ตัวชี้วัดทั้ง 3 ค่า จะได้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน

คำสำคัญ : คลอไรด์ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ทฤษฎีความน่าเชื่อถือ

* ¹⁾ อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล, E-mail: aob_32@hotmail.com

²⁾ รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

³⁾ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล

Guideline for Assessment of Reinforced Concrete Structure Attacked by Chloride

Chongsin Sookoomjariyapong^{*1)} Sanguan Vongchavalitkul²⁾ Sun Sayamipuk³⁾

ABSTRACT

The deterioration of reinforced concrete structures due to chloride attack is one of major factors which lead to reduction of steel cross section, concrete cracking and structural failure. This paper presents the method of assessment of reinforced concrete structure attacked by chloride based on the reliability theory. The results from this research revealed that the reinforced concrete structure could be safed from chloride when the reinforced concrete structure had the central safety factor (CSF) not less than 1.00, the probability of failure (P_f) not excess than 0.50 and the reliability index (β) not less than 0.00. From case study, the analysis result of the service life of reinforced concrete structures from each parameter is consistent with each other.

Keywords: Chloride, Reinforced Concrete Structure, Reliability Theory

^{* 1)} Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Vongchavalitkul University,
E-mail: aob_32@hotmail.com

²⁾ Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Vongchavalitkul University

³⁾ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Vongchavalitkul University

1. บทนำ

การเสื่อมสภาพของเหล็กเสริมภายในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก อาจเกิดขึ้นเนื่องจากสภาพแวดล้อมต่างๆ ตามอายุการใช้งานของโครงสร้าง(คณะกรรมการคอนกรีตและวัสดุ คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, 2540) โดยการเสื่อมสภาพของเหล็กเสริมในช่วงเวลาที่คอนกรีตต้องรับน้ำหนักบรรทุกใช้งานถือว่าเป็นช่วงเวลาที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากผลการเสื่อมสภาพของเหล็กเสริมทำให้โครงสร้างสูญเสียความสามารถในการรับแรง การเสื่อมสภาพของเหล็กเสริมอาจเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น คลอไรด์ การเกิดคาร์บอนชั้น ซัลเฟต เป็นต้น ผลเนื่องจากคลอไรด์ถือได้ว่าเป็นสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งต่อการเสื่อมสภาพของเหล็กเสริม (Li, C.Q., 2003) มีผลให้พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมลดลง เหล็กเสริมสูญเสียกำลังในการรับแรง คอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเกิดการแตกร้าว และโครงสร้างอาจเกิดการวิบัติได้ในเวลาต่อมา ดังนั้น จึงจำเป็นต้องจัดหาเครื่องมือสำหรับใช้ประเมินสภาพโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาใช้ในการวางแผนป้องกันผลกระทบเนื่องจากคลอไรด์ต่อไป ช่วงเวลาที่ผ่านมามีการพัฒนาผลงานวิจัย สำหรับประเมินสภาพโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผลกระทบเนื่องจากคลอไรด์อย่างต่อเนื่อง (Li, C.Q., 2003) (Liang, M.T. et al., 2002) และพบว่าหลายปัจจัยมีผลต่อการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง เช่น ระยะเวลา คอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ชนิดของปูนซีเมนต์ในการใช้งาน เป็นต้น ดังนั้น ถ้าทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของเหล็กเสริม จะสามารถยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างให้ยาวนานขึ้นได้

บทความนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อนำเสนอแนวทางสำหรับใช้ประเมินสภาพโครงสร้างที่มีผลกระทบเนื่องจากคลอไรด์โดยใช้ทฤษฎีความน่าเชื่อถือ และเสนอปัจจัยที่สามารถช่วยป้องกันผลจากคลอไรด์ โดยกำหนดสมมุติฐานการศึกษาในงานวิจัยนี้ว่า โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะอยู่ในช่วงเวลาที่มีความปลอดภัยจากคลอไรด์ เมื่อการแทรกซึมของคลอไรด์เข้ามาในคอนกรีตยังไม่ถึงเหล็กเสริม สำหรับแนวทางที่ได้นำเสนอนี้สามารถ

นำไปประยุกต์ใช้กำหนดระยะหุ้มคอนกรีตที่เหมาะสมเพื่อยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างต่อไป

2. ทฤษฎี

2.1 กฎการแพร่กระจายข้อที่สองของ Fick (Fick's Second Law of Diffusion)

กฎการแพร่กระจายข้อที่สองของ Fick (Sarja, A. and Vesikari, E., 1996) ได้นำเสนอเพื่อใช้ในการประเมินสภาพโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดผลกระทบเนื่องจากคลอไรด์ โดยมีรูปสมการที่ขึ้นกับเวลาได้ดังนี้

$$C_{(x,t)} = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right] \quad (1)$$

เมื่อ

$C_{(x,t)}$ คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ระยะ x จากผิวคอนกรีต ณ เวลา t (kg/m^3 of concrete)

C_s คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (kg/m^3 of concrete)

x คือ ความลึกที่คลอไรด์แทรกผ่านผิวคอนกรีต (m)

D_c คือ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์ (m^2/year)

t คือ เวลา (year)

erf คือ ฟังก์ชันความผิดพลาด

(Error Function)

อาจเขียนสมการที่ (1) ในรูปความลึกที่คลอไรด์สามารถแทรกผ่านคอนกรีตได้ดังสมการที่ (2)

$$x = 2\sqrt{D_c t} \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{(x,t)}}{C_s} \right) \right] \quad (2)$$

2.2 ทฤษฎีความน่าเชื่อถือ (Reliability Theory)

การคำนวณหาค่าส่วนเผื่อความปลอดภัย (Safety Margin; Z) ของโครงสร้าง โดยอาศัยพื้นฐานของทฤษฎีความน่าเชื่อถือ (Nowak, A.S. and Collins, K.R., 2000) (สงวน วงษ์ชวลิตกุล, 2549) สามารถคำนวณหาค่าได้จากความแตกต่างระหว่างตัวแปรสุ่มความต้านทานการวิบัติ (Resistance, R) เช่น ระยะหุ้มคอนกรีต กำลังอัด

ประลัยของคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เป็นต้น กับตัวแปรสุ่มของแรงหรือผลของสภาพแวดล้อมที่กระทำต่อโครงสร้าง (Load, S) เช่น ความเข้มข้นของปริมาณคลอไรด์ น้ำหนักที่กระทำต่อโครงสร้าง เป็นต้น ดังนั้นสมการความน่าวิบัติ (Probability of failure, P_f) ของโครงสร้างสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3)

$$P_f = P(Z = R - S \leq 0) \quad (3)$$

ถ้า R และ S คือ ตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) และมีค่าเฉลี่ย (Mean) μ_R และ μ_S ค่าความแปรปรวน (Variance) σ_R^2 กับ σ_S^2 ตามลำดับ จะได้ว่า Z มีการแจกแจงแบบปกติเช่นกัน และมีค่าเฉลี่ยกับค่าความแปรปรวนดังสมการที่ (4) และ (5)

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S \quad (4)$$

$$\sigma_Z^2 = \sigma_R^2 + \sigma_S^2 \quad (5)$$

ดังนั้น สมการที่ (3) จึงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปได้ดังสมการที่ (6)

$$P_f = P(Z < 0) = \Phi\left(\frac{0 - \mu_Z}{\sigma_Z}\right) \quad (6)$$

เมื่อ

$\Phi(\cdot)$ คือ ฟังก์ชันการแจกแจงปกติมาตรฐาน (Standard normal distribution function)

เมื่อแทนสมการที่ (4) และ (5) ในสมการที่ (6) สามารถเขียนสมการความน่าวิบัติของโครงสร้างได้ ดังนี้

$$P_f = \Phi\left(\frac{-(\mu_R - \mu_S)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}\right) = \Phi(-\beta) \quad (7)$$

เมื่อ

β คือ ดัชนีความน่าเชื่อถือ (Reliability Index)

แต่เนื่องจากความไม่แน่นอนของความต้านทานการวิบัติและแรงที่เกิดขึ้นกับโครงสร้าง การกำหนดระดับความเสี่ยงควรต้องใช้ค่าตัวประกอบความปลอดภัยกลาง

(Central Safety Factor, CSF) (สงวน และจงศิลป์, 2548) ค่าตัวประกอบความปลอดภัยกลางสามารถคำนวณหาค่าได้ดังสมการที่ (8)

$$CSF = \frac{E[R]}{E[S]} = \frac{\mu_R}{\mu_S} \quad (8)$$

เมื่อ $E[\cdot]$ คือ ค่าคาดหวังหรือค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่ม

ในบางกรณีสามารถกำหนดให้ ความต้านทานการวิบัติเป็นค่าคงที่หรือค่าที่แน่นอน (Deterministic) ได้ (Sarja, A. and Vesikari, E., 1996) จึงมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นศูนย์ ดังนั้น สมการที่ (7) และ (8) จึงอาจเขียนใหม่ในรูปดังต่อไปนี้

$$P_f = \Phi\left(\frac{-(R - \mu_S)}{\sqrt{\sigma_S^2}}\right) \quad (9)$$

$$\beta = \frac{(R - \mu_S)}{\sqrt{\sigma_S^2}} \quad (10)$$

$$CSF = \frac{R}{\mu_S} \quad (11)$$

2.3 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution function, CDF)

การศึกษานี้ใช้วิธีทางสถิติประกอบการวิเคราะห์และประเมินผล ตัวแปรสุ่มคือข้อมูลที่ได้จากการทดสอบคือ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีตและปริมาณคลอไรด์ ณ ตำแหน่งใดๆ จากผิวคอนกรีต ได้ถูกวิเคราะห์เพื่อระบุลักษณะการแจกแจง ในการศึกษาครั้งนี้มีฟังก์ชันการแจกแจงสะสมที่เกี่ยวข้องคือ การแจกแจงแบบ Exponential มีสมการดังนี้ (Nowak, A.S. and Collins, K.R., 2000)

$$F_X(x) = 1 - e^{-x/\theta}, 0 \leq x \leq \infty \quad (12)$$

เมื่อ x คือ ตัวแปรสุ่มของการแจกแจงแบบ Exponential

θ คือ พารามิเตอร์ขนาด (Scale Parameter)

3. วิธีดำเนินการศึกษา

การศึกษานี้ใช้ผลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ของโครงสร้างผนังคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ภายในอาคารหอหล่อเย็น (Cooling Tower) จังหวัดชลบุรี เป็นโครงสร้างที่มีอายุการใช้งาน 13 ปี ณ วันที่ทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต และเกิดการแตกร้าวเสียหายของระยะหุ้มคอนกรีตที่ชัดเจน โครงสร้างมีระยะหุ้มคอนกรีตเฉลี่ยประมาณ 40 มม. และใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 การทดสอบได้เจาะตัวอย่างทดสอบจากผนังโครงสร้าง 4 ตัวอย่าง แต่ละตัวอย่างถูกตัดเป็นชิ้นส่วนเพื่อนำมาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ 2 ชิ้น ความหนาของแต่ละชิ้นส่วนทดสอบคือ 50 มม. ผู้วิจัยจึงแบ่งข้อมูลเป็น W_{50} และ W_{100} ตามระยะห่างจากผิวหน้าคอนกรีต ชิ้นส่วนชุดแรก (W_{50}) วัดจากผิวหน้าคอนกรีตถึงระยะ 50 มม. ชิ้นส่วนชุดที่สอง (W_{100}) วัดจากระยะ 50 มม. ถึงระยะ 100 มม. โดยข้อมูล W_{50} ถูกกำหนดให้เป็นข้อมูลของปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าคอนกรีต และข้อมูล W_{100} ถูกกำหนดให้เป็นข้อมูลของปริมาณคลอไรด์ที่ระยะ 100 มม. จากผิวหน้าคอนกรีต จากนั้นจึงวิเคราะห์ประเภทการແຈກແຈງ ค่าเฉลี่ย (μ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ของข้อมูลแต่ละชุด แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อประเมินสภาพโครงสร้างต่อไป

บทความนี้เน้นการวิเคราะห์ข้อมูลการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในระดับต่างๆ ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยไม่ได้พิจารณาถึงปัจจัยอื่นที่มีผลต่อความสามารถแทรกเข้าของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต เช่น ปริมาณคลอไรด์ที่ผิว อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ กำลังอัดของคอนกรีต ประเภทของปูนซีเมนต์ การใช้วัสดุปอซโซลาน เป็นต้น ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ร่วมกับสมมุติฐานการศึกษาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เพื่อประเมินช่วงเวลาที่ใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กปลอดภัยจากคลอไรด์ โดยใช้ 3 ตัวชี้วัดในการประเมินผลคือ ค่าความปลอดภัยกลาง ค่าดัชนีความน่าเชื่อถือ และค่าดัชนีความน่าเชื่อถือของโครงสร้าง และพิจารณาผลเมื่อสมมุติว่าโครงสร้างใช้

ระยะหุ้มคอนกรีตที่แตกต่างกันคือ 40 มม. 50 มม. และ 75 มม.

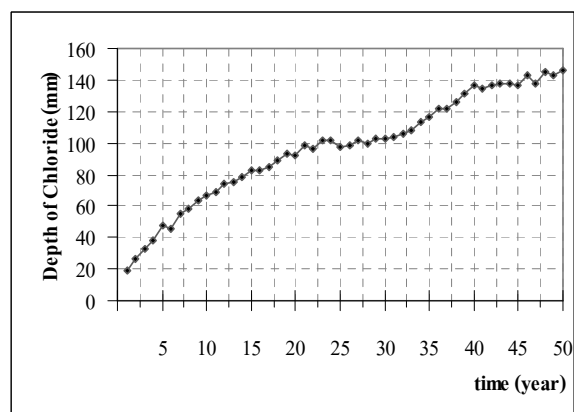
4. ผลการศึกษา

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่ได้จากการทดสอบโครงสร้างพบว่า ปริมาณคลอไรด์มีการແຈກແຈງแบบ Exponential ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือ ค่าเฉลี่ย (μ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณคลอไรด์ของผลการทดสอบโครงสร้างผนังคอนกรีตเสริมเหล็ก

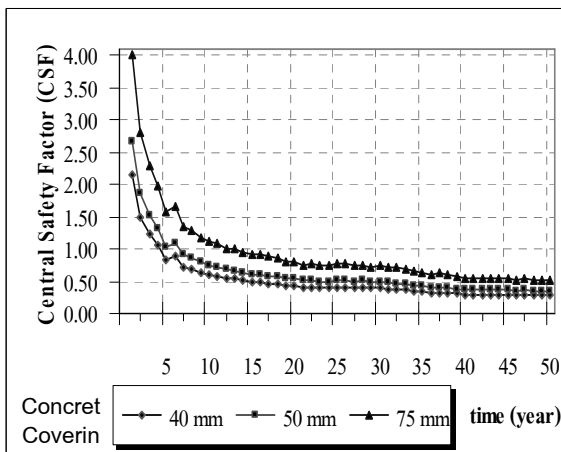
ชื่อตัวอย่างทดสอบ (ระยะจากผิวคอนกรีต)	ค่าเฉลี่ย (μ) (kg/m ³ of concrete)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) (kg/m ³ of concrete)	ประเภทการແຈກແຈງ
W_{50} (50 mm)	12.38	12.38	Exponential
W_{100} (100 mm)	5.35	5.35	Exponential

จากข้อมูลทางสถิติในตารางที่ 1 เมื่อจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล (Nowak, A.S. and Collins, K.R., 2000) และวิเคราะห์ผลโดยใช้กฎการแพร่กระจายข้อที่สองของ Fick และทฤษฎีความน่าเชื่อถือ จะได้ผลการประเมินสภาพโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1 2 3 และ 4 โดยมีรายละเอียดดังนี้



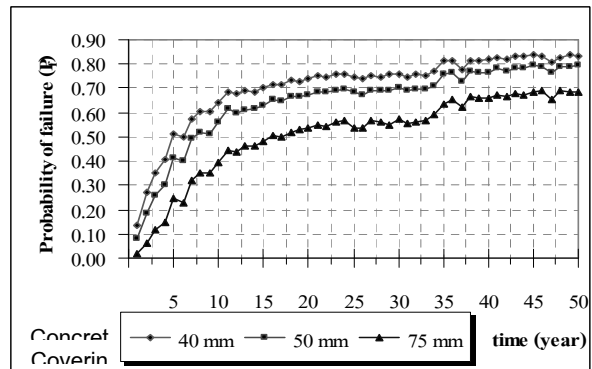
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความลึกที่คลอไรด์แทรกผ่านคอนกรีตกับเวลา

รูปที่ 1 พบว่าค่าเฉลี่ยความลึกที่คลอไรด์แทรกผ่านคอนกรีตได้ในแต่ละปี มีแนวโน้มแทรกผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้มากขึ้น เมื่อระยะเวลาที่คอนกรีตสัมผัสกับคลอไรด์ยาวนานขึ้น ดังนั้น ถ้าต้องการป้องกันเหล็กเสริมไม่ให้ถูกกัดกร่อนเนื่องจากผลของคลอไรด์ วิธีป้องกันที่สามารถทำได้โดยง่ายคือ การเลือกใช้ระยะหุ้มคอนกรีตที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อม เช่น จากกรณีศึกษาถ้าต้องการให้โครงสร้างที่มีคุณสมบัติเหมือนกันและอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมเดียวกัน ปลอดภัยจากผลเนื่องจากคลอไรด์ที่จะแทรกผ่านคอนกรีตถึงเหล็กเสริมในระยะเวลา 10 ปี ควรใช้ระยะหุ้มคอนกรีตประมาณ 65 ม.ม.



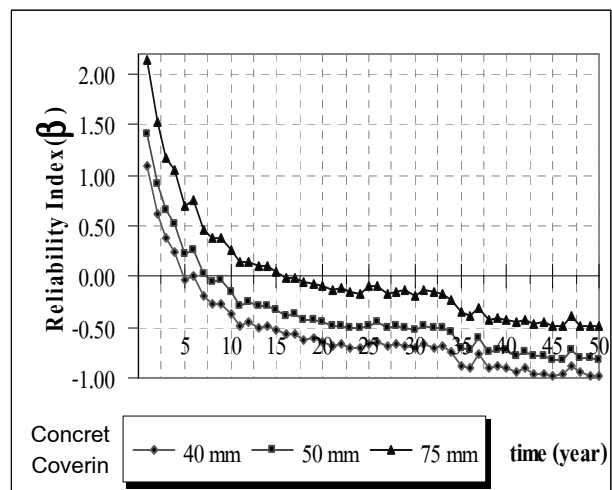
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความปลอดภัยกลางกับเวลาเมื่อโครงสร้างที่มีระยะหุ้มคอนกรีตต่างกัน

รูปที่ 2 เมื่อใช้ค่าความปลอดภัยกลางพิจารณาสภาพโครงสร้างพบว่า โครงสร้างที่มีระยะหุ้มคอนกรีตน้อยกว่ามีแนวโน้มของค่าความปลอดภัยกลางน้อยกว่าโครงสร้างที่มีระยะหุ้มคอนกรีตมากกว่าที่เวลาเดียวกัน จากสมมุติฐานการศึกษาของงานวิจัยที่กำหนดช่วงเวลาที่โครงสร้างมีความปลอดภัยจากคลอไรด์ เมื่อคำนวณหาค่าความปลอดภัยกลางในช่วงเวลาดังกล่าวได้ผลว่าค่าความปลอดภัยกลางจะต้องมีค่ามากกว่า 1.00 ดังนั้นจากรูปที่ 2 เมื่อใช้ค่าความปลอดภัยกลางเท่ากับ 1.00 ประเมินสภาพโครงสร้างที่มีระยะหุ้มคอนกรีต 40 ม.ม. 50 ม.ม. และ 75 ม.ม. พบว่าโครงสร้างมีอายุการใช้งานที่ปลอดภัยจากคลอไรด์เป็นเวลาประมาณ 7.0 ปี 9.4 ปี และ 14.0 ปี ตามลำดับ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความน่าวิบัติของโครงสร้างที่มีระยะหุ้มคอนกรีตต่างกับกับเวลา

เมื่อประเมินสภาพของโครงสร้างโดยนำเสนอในรูปของค่าความน่าวิบัติจะได้ผลดังรูปที่ 3 และพบว่าโครงสร้างที่มีระยะหุ้มคอนกรีตน้อยกว่ามีแนวโน้มของค่าความน่าวิบัติมากกว่า โครงสร้างที่มีระยะหุ้มคอนกรีตมากกว่า ณ เวลาเดียวกัน และค่าความน่าวิบัติจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาที่โครงสร้างสัมผัสกับคลอไรด์ยาวนานขึ้น จากสมมุติฐานการศึกษาเมื่อใช้ประกอบการคำนวณหาค่าความน่าวิบัติในช่วงเวลาที่โครงสร้างปลอดภัยจากคลอไรด์ จะได้ค่าความน่าวิบติน้อยกว่าเท่ากับ 0.50 ดังนั้น เมื่อใช้ค่าความน่าวิบัติเท่ากับ 0.50 ประเมินช่วงเวลาที่โครงสร้างปลอดภัยจากคลอไรด์สำหรับโครงสร้างที่มีระยะหุ้มคอนกรีต 40 ม.ม. 50 ม.ม. และ 75 ม.ม. จะได้เวลาประมาณ 7.5 ปี 10.1 ปี และ 15.8 ปี ตามลำดับ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความน่าเชื่อถือของโครงสร้างที่มีระยะหุ้มคอนกรีตต่างกับกับเวลา

จากรูปที่ 4 เมื่อใช้ดัชนีความน่าเชื่อถือประเมินสภาพโครงสร้างพบว่า ค่าดัชนีความน่าเชื่อถือของโครงสร้างมีแนวโน้มลดลง เมื่อโครงสร้างต้องสัมผัสกับคลอไรด์ยาวนานขึ้น และที่เวลาเดียวกันโครงสร้างที่มีระยะหุ้มคอนกรีตน้อยกว่า จะมีแนวโน้มของค่าดัชนีความน่าเชื่อถือน้อยกว่าโครงสร้างที่มีระยะหุ้มคอนกรีตมากกว่า และเมื่อคำนวณหาค่าดัชนีความน่าเชื่อถือของโครงสร้างในช่วงเวลาที่โครงสร้างปลอดภัยจากคลอไรด์จะได้อายุการใช้งานของโครงสร้างที่ปลอดภัยจากคลอไรด์เป็นเวลานาน 7.7 ปี 10.3 ปี และ 16.5 ปี ตามลำดับ

ผลการประเมินโดยใช้ตัวชี้วัดทั้ง 3 ค่า จะได้ค่าประมาณช่วงเวลาที่โครงสร้างปลอดภัยจากคลอไรด์ใกล้เคียงกัน สำหรับแต่ละระยะหุ้มคอนกรีตที่แตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาผลประเมินโครงสร้างที่มีระยะหุ้มคอนกรีต 40 ม.ม. ซึ่งเป็นระยะหุ้มคอนกรีตที่สอดคล้องกับสภาพโครงสร้างจริง จะได้ช่วงเวลาที่โครงสร้างปลอดภัยจากผลของคลอไรด์เป็นเวลาประมาณ 7 ถึง 8 ปี หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นเวลาเริ่มต้นก่อนโครงสร้างจะเสียหายแนวโน้มของผลการประเมินค่อนข้างสอดคล้องกับสภาพจริงของโครงสร้างที่เกิดความเสียหายชัดเจนเมื่อมีอายุได้ 13 ปี

5. สรุปผลการศึกษา

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผลกระทบจากคลอไรด์ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. โครงสร้างที่มีระยะหุ้มคอนกรีตน้อยกว่า มีแนวโน้มของค่าความปลอดภัยกลางน้อยกว่า โครงสร้างที่มีระยะหุ้มคอนกรีตมากกว่าที่เวลาต่างกัน และถ้าต้องการให้โครงสร้างมีความปลอดภัยจากผลกระทบของคลอไรด์ โครงสร้างควรมีค่าความปลอดภัยกลางไม่น้อยกว่า 1.00

2. โครงสร้างที่มีระยะหุ้มคอนกรีตน้อยกว่ามีแนวโน้มของค่าความน่าเชื่อถือมากกว่า โครงสร้างที่มีระยะ

หุ้มคอนกรีตมากกว่าที่เวลาต่างกัน และถ้าต้องการให้โครงสร้างมีความปลอดภัยจากผลกระทบของคลอไรด์ โครงสร้างควรมีค่าความน่าเชื่อถือไม่เกินกว่า 0.50

3. โครงสร้างที่มีระยะหุ้มคอนกรีตน้อยกว่า มีแนวโน้มของค่าดัชนีความน่าเชื่อถือน้อยกว่า โครงสร้างที่มีระยะหุ้มคอนกรีตมากกว่าที่เวลาต่างกัน และถ้าต้องการให้โครงสร้างมีความปลอดภัยจากผลกระทบของคลอไรด์ โครงสร้างควรมีค่าดัชนีความน่าเชื่อถือไม่น้อยกว่า 0.00

6. ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาและจัดทำฐานข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณคลอไรด์ สำหรับโครงสร้างที่อยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมทางทะเล เช่น ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวปริมาณคลอไรด์ที่ระดับความลึกต่างๆ ของโครงสร้างประเภทปูนซีเมนต์ที่ใช้ ระยะห่างจากโครงสร้างถึงทะเล เป็นต้น เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางการออกแบบและบำรุงรักษาโครงสร้างให้มีอายุการใช้งานที่เหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำสาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล ทุกท่าน ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการเขียนบทความนี้ตลอดมา

เอกสารอ้างอิง

- คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา. 2540. **ข้อกำหนดมาตรฐานวัสดุและการก่อสร้าง สำหรับโครงสร้างคอนกรีต**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. สงวน วงษ์ชวลิตกุล และจงศิลป์ สุขุมจริยพงศ์. 2548. "ค่าคาดหวังกำลังขององค์อาคาร" **การประชุมวิชาการโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10**. 2 - 4 พฤษภาคม พ.ศ. 2548. กรุงเทพฯ. สงวน วงษ์ชวลิตกุล. 2549. **ทฤษฎีความน่าเชื่อถือในงานวิศวกรรมโยธา**. พิมพ์ครั้งที่ 1. นครราชสีมา.

ACI Committee 365. 2005. **ACI 365.1R-00 Service Life Prediction-State-of-the-Art Report**

Liang, M.T., Lin L.H. and Liang C.H. 2002. "Service Life Prediction of Existing Reinforced Concrete Bridge Exposed to Chloride Environment." **Journal of Infrastructure System.** 8(3): 76-85.

Li, C.Q. 2003. "Life Cycle Modeling of Corrosion Affected Concrete Structures - Initiation." **Journal of Materials in Civil Engineering.** 15(6): 594-601.

Nowak, A.S. and Collins, K.R. 2000. **Reliability of Structures.** Singapore : McGraw-Hill.

Sarja, A. and Vesikari, E. 1996. **Durability Design of Concrete Structures.** London : E & FN SPON.