ประสิทธิภาพของการบำรุงรักษาโดยใช้สารไซเลนบนโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ภายใต้การแปรผันตามเวลาของสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ในประเทศไทย

อรุษ เพชรเชิดชู[1]

บทคัดย่อ

บทความนี้นิยามคำว่า ประสิทธิภาพของการบำรุงรักษาโดยใช้สารไซเลนว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างช่วงอายุการใช้งานที่ยืดออกของโครงสร้างคอนกรีตหลังการใช้สารไซเลนต่อค่าใช้จ่ายในการใช้สารไซเลน ช่วงอายุการใช้งานที่ยืดออกนี้เป็นผลต่างระหว่างอายุการใช้งานที่ปราศจากการสึกกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีตก่อนและหลังการใช้สารไซเลน อายุการใช้งานทั้งสองนี้ได้รับการประเมินโดยพิจารณาการแพร่ผ่านของคลอไรด์ที่เป็นไปตามสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของกฎข้อที่สองของฟิกซ์ แต่หลังจากการใช้สารไซเลน การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยมีความซับซ้อน เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของคลอไรด์ไม่เป็นค่าคงที่ แต่ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านในคอนกรีตเดิมและคอนกรีตที่มีการใช้สารไซเลน นอกจากนี้ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านนี้ขึ้นกับเวลาอีกด้วยแล้ว การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยจะมีความซับซ้อนมากขึ้น ดังนั้นบทความนี้จึงเสนอการคำนวณทางตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอร์เรนซ์แบบ Crank-Nicolson เพื่อมาช่วยแก้ปัญหา ดังนั้นเมื่อใช้ข้อมูลอิทธิพลของคลอไรด์ที่แปรผันตามเวลาในประเทศไทย สามารถคำนวณปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตกับระยะจากผิวคอนกรีตและกับเวลาทั้งก่อนและหลังการใช้สารไซเลนด้วย 5 กลยุทธ์ที่มีพิจารณาการเสื่อมสภาพของสารไซเลน ทำให้สามารถประเมินอายุการใช้งานหรือเวลาที่ปริมาณคลอไรด์ ณ ตำแหน่งเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับค่าวิกฤตที่ทำให้เหล็กเสริมเริ่มเกิดการสึกกร่อนได้ นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายในการใช้สารไซเลนทั้ง 5 กลยุทธ์จะได้รับการเปรียบเทียบด้วยเช่นกัน จากการศึกษา พบว่าเวลาที่ใช้สารไซเลนมีความสำคัญต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต และกลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุดควรเป็นกลยุทธ์ที่มีประสิทธิภาพที่สุด เนื่องจากพิจารณาทั้งในด้านการยืดอายุการใช้งานและค่าใช้จ่าย

คำสำคัญ: ประสิทธิภาพ การบำรุงรักษา สารไซเลน คอนกรีต อิทธิพลคลอไรด์ที่แปรผันตามเวลา

[1] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โทรศัพท์ 0-2555-2000 ต่อ 8620 อีเมล: aruzp@kmutnb.ac.th

รับเมื่อ 20 กุมภาพันธ์ 2557 ตอบรับเมื่อ 5 มิถุนายน 2557

Performance of Silane-treated Repairs on Concrete Structures under Time-dependent Chloride Environment in Thailand

Aruz Petcherdchoo[1]

Abstract

In this paper, the performance of silane-treated repairs is defined as the ratio of service life extension of concrete structures after silane treatment to its associated cost. The service life extension is defined as the difference between the service life without corrosion of reinforcement in concrete before and after silane treatment. The service life is predicted based on considering the mechanism of chloride diffusion which can be described using the partial differential equation (PDE) of the Fick's second law. After silane treatment, solving the PDE is complicated due to non-constant diffusion coefficient. Furthermore, if the diffusion coefficient is time-dependent, it is even more complicated to solve the PDE. Therefore, numerical computation by the Crank-Nicolson based finite difference method is introduced as a computational tool. From computation, the chloride profiles before and after 5 silane treatment strategies can be calculated on the basis of time-dependent chloride environment in Thailand. Furthermore, the cost of silane treatment is also compared. From the study, the application time of silane treatment is important for service life. And also, the best silane treatment strategy should be judged based on the performance where service life extension and cost are taken into consideration.

Keywords: Performance, Repairs, Silane, Concrete, Time-dependent Chloride Environment

[1] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Tel. 0-2555-2000 Ext. 8620, E-mail: aruzp@kmutnb.ac.th

Received 20 February 2014; Accepted 5 June 2014

1. บทนำ

ในประเทศไทย งบประมาณรายจ่ายประจำปี 2556 ของกรมทางหลวง (ทล.) และกรมทางหลวงชนบท (ทช.) [1] ในการบำรุงรักษาโครงข่ายทางหลวงและทางหลวงชนบทประมาณเท่ากับ 44.5% ของงบประมาณทั้งหมดที่ทั้งสองกรมได้รับ ขณะที่ในประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐานที่มีอายุเก่าแก่เป็นจำนวนมาก พบว่าจากปี ค.ศ. 2005 ถึง 2009 งบประมาณที่ใช้ในการบำรุงรักษาโครงสร้างพื้นฐานให้อยู่ในสภาพดีเพิ่มขึ้นประมาณ 37.5% [2] เมื่อพิจารณาจากตัวอย่างทั้งสองนี้ พบว่างบประมาณในการบำรุงรักษาโครงสร้างมีความสำคัญและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อให้สามารถใช้จ่ายงบประมาณในการบำรุงรักษาโครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่อย่างจำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ จะต้องมีการบริหารจัดการงบประมาณที่เป็นระบบ

ในการบริหารจัดการบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตภายใต้งบประมาณที่จำกัด สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคืออายุการใช้งานที่ยืดออกของโครงสร้างคอนกรีตหลังการบำรุงรักษาและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา เมื่อพิจารณาโครงสร้างคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์ Petcherdchoo [3], [4] ศึกษาอายุการใช้งานก่อนและหลังการบำรุงรักษาด้วยสารไซเลน อย่างไรก็ตามบทความทั้งสองนี้ยังมีสิ่งที่ควรพัฒนาอยู่ 2 สิ่ง หนึ่งคือ ตัวแปรที่ใช้อธิบายการคุกคามของคลอไรด์ในบทความทั้งสองเป็นตัวแปรที่ใช้ในต่างประเทศซึ่งไม่ใช่ประเทศไทย ดังนั้นถ้าต้องการศึกษาอายุการใช้งานก่อนและหลังการบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์ในประเทศไทย ข้อมูลสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ต้องเป็นข้อมูลในประเทศไทย สิ่งที่สองคือ บทความทั้งสองกำหนดให้สารไซเลนในคอนกรีตปราศจากการเสื่อมสภาพในช่วงเวลาประสิทธิผลของสารไซเลน (ช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มใช้สารไซเลนจนกระทั่งสารไซเลนเสื่อมสภาพจนหมด) อย่างไรก็ตาม Moradllo et al. [5] พบว่าเมื่อใช้สารเคลือบผิวที่ผิวคอนกรีต สารเคลือบผิวมีการเสื่อมสภาพตามอายุ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการประเมินประสิทธิภาพของการบำรุงรักษาโดยใช้สารไซเลนบนโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ภายใต้การแปรผันตามเวลาของสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ในประเทศไทย โดยประสิทธิภาพของการบำรุงรักษาได้รับการนิยามว่าเป็น อัตราส่วนระหว่างช่วงอายุการใช้งานที่ยืดออก (Service Life Extension) ของโครงสร้างคอนกรีตหลังการใช้สารไซเลนต่อค่าใช้จ่าย (Cost) ในการใช้สารไซเลนของ 5 กลยุทธ์บำรุงรักษา รวมทั้งมีการพิจารณาการเสื่อมสภาพแบบต่างๆ ที่แปรผันตามเวลาในช่วงเวลาประสิทธิผลของสารไซเลน เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์เหล่านี้ จะต้องมีการประเมินอายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตก่อนและหลังการใช้สารไซเลน รวมทั้งค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้อง ดังอธิบายต่อไปนี้

2. การประเมินอายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีต

การประเมินอายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์และมีการบำรุงรักษาด้วยการใช้สารไซเลน ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนสำคัญ คือ การทำนายการแพร่ผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตก่อนและหลังการใช้สารไซเลน ดังอธิบายต่อไปนี้

2.1 ก่อนการใช้สารไซเลน

การทำนายการแพร่ของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตสามารถทำได้โดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation, PDE) ตามกฎข้อที่สองของฟิกซ์ (Fick's Second Laws) [6] ดังนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D(t) \frac{\partial C}{\partial x} \tag{1}$$

โดย C คือปริมาณของคลอไรด์ที่ขึ้นอยู่กับความลึกจากผิวคอนกรีต x และเวลา t ขณะที่ $D(t)$ คือสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตที่แปรผันตามเวลาอันเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำที่เพิ่มขึ้นตามอายุของคอนกรีต

2.2 หลังการใช้สารไซเลน

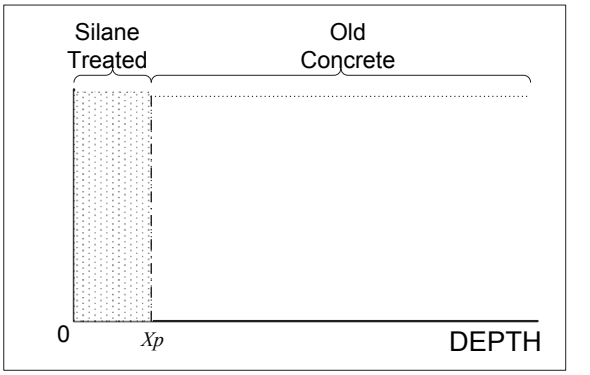
รายงาน NCHRP-558 [7] ได้ให้คำนิยามของการบำรุงรักษาโดยการใช้สารไซเลน (Silane Treatment) ไว้ว่าเป็นการใช้สารเคลือบผิวคอนกรีตที่สามารถผ่านเข้าสู่เนื้อคอนกรีต แล้วทำปฏิกิริยากับรูพรุนในเนื้อคอนกรีตและสร้างผิวไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic Surface) บนรูพรุน ทำให้น้ำและความชื้นไม่สามารถเกาะที่รูพรุนได้ ดังนั้นจึงปราศจากน้ำและความชื้นที่รองรับคลอไรด์ผ่านเข้าสู่เนื้อคอนกรีต ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สามารถหน่วงการแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีตได้

พิจารณาแบบจำลองคอนกรีตเทียบกับความลึกจากผิว ดังรูปที่ 1 พบว่าหลังการใช้สารไซเลน คอนกรีตที่อยู่ระหว่างผิวคอนกรีตและความลึกประสิทธิผลของสารไซเลน (ความลึกเฉลี่ยจากผิวคอนกรีตที่สารไซเลนสามารถผ่านเข้าไปได้ x_p) จะเปลี่ยนคอนกรีตที่มีสารไซเลน ดังนั้นจึงทำให้โครงสร้างคอนกรีตประกอบด้วยวัสดุ 2 ประเภทคือ คอนกรีตเดิม (Old Concrete) และคอนกรีตที่มีสารไซเลน (ไซเลนคอนกรีต: Silane-treated Concrete)

เมื่อคอนกรีตประกอบด้วยวัสดุ 2 ประเภท จะไม่สามารถใช้สมการที่ 1 ในทำนายการแพร่ผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตได้ เนื่องจากสัมประสิทธิการแพร่ผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตหลังการใช้สารไซเลนจะไม่เป็นค่าคงที่ แต่จะเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง x ดังนั้นสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตจึงเป็นทั้งฟังก์ชันของเวลาและตำแหน่ง หรือ $D(t,x)$ ดังนั้นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (PDE) ตามกฎข้อที่สองของฟิกซ์ [6] เป็นดังแสดงต่อไปนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D(t,x) \frac{\partial C}{\partial x} \tag{2}$$

การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในสมการที่ 2 เพื่อหาสมการอย่างง่าย (Close-formed Solution) มีความซับซ้อน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอการคำนวณทางตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอร์เรนซ์ (Finite Difference Method) ในรูปแบบของ Crank-Nicolson [8] มาช่วยแก้ปัญหา เมื่อพิจารณาสมการที่ 2 สามารถเขียนสมการไฟไนต์ดิฟเฟอร์เรนซ์ได้ดังนี้



รูปที่ 1 คอนกรีตกับความลึกจากผิวที่มีการบำรุงรักษาโดยการใช้สารไซเลน

$$\frac{c_{i,j+1} - c_{i,j}}{\Delta t} = \frac{1}{2}\left\{\left[\frac{D_{i+1/2}\left(c_{i+1} - c_i\right)_{,j+1} - D_{i-1/2}\left(c_i - c_{i-1}\right)_{j+1}}{\left(\Delta x\right)^2}\right] + \left[\frac{D_{i+1/2}\left(c_{i+1} - c_i\right)_{,j} - D_{i-1/2}\left(c_i - c_{i-1}\right)_{,j}}{\left(\Delta x\right)^2}\right]\right\} \tag{3}$$

โดย $c_{i,\,j}$ และ $c_{i,\,j+1}$ คือปริมาณของคลอไรด์ที่ตำแหน่งใดๆ i ในคอนกรีต ณ เวลา j และ j+1 ตามลำดับ Δx คือระยะห่างระหว่างจุดที่ใช้คำนวณปริมาณคลอไรด์ ซึ่งเท่ากับ 1 มม. และ Δt คือระยะเวลาที่เปลี่ยนไป ซึ่งเท่ากับ 1 สัปดาห์ นอกจากนี้ $D_{i+1/2}$ และ $D_{i-1/2}$ เท่ากับ $(D_i + D_{i+1})/2$ และ $(D_{i-1} + D_i)/2$ ตามลำดับ

ในการคำนวณทางตัวเลข เมื่อมีการใช้สารไซเลนและคอนกรีตเดิมเปลี่ยนเป็นไซเลนคอนกรีต สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของคอนกรีตจะได้รับการเปลี่ยนค่าเป็นสัมประสิทธิ์ของไซเลนคอนกรีต เช่น ณ ตำแหน่ง x ใดๆ ในคอนกรีต สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของคอนกรีตเดิม $(D_x)_0$ เปลี่ยนเป็นสัมประสิทธิ์ของไซเลนคอนกรีต $(D_x)_{SL}$

นอกจากนี้ยังสามารถสังเกตได้ว่า ถ้าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านเป็นค่าคงที่ สมการที่ 2 จะลดรูปเป็นสมการที่ 1 รวมทั้งสมการที่ 3 จะลดรูปเป็นสมการที่สามารถใช้คำนวณปริมาณคลอไรด์ก่อนการใช้สารไซเลน ดังนี้

$$\frac{c_{i,j+1}-c_{i,j}}{\Delta t}=\frac{D}{2}\left[\frac{\left(c_{i+1,j+1}-2c_{i,j+1}+c_{i-1,j+1}\right)}{\left(\Delta x\right)^2}+\frac{\left(c_{i+1,j}-2c_{i,j}+c_{i-1,j}\right)}{\left(\Delta x\right)^2}\right] \quad (4)$$

3. ตัวแปรที่ในใช้การประเมินอายุการใช้งาน

3.1 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิว

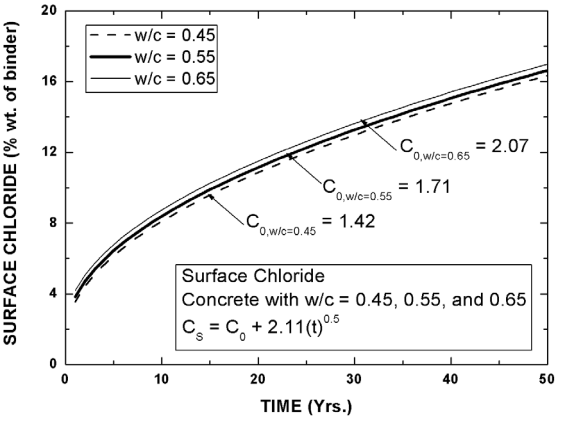
ปริมาณคลอไรด์ที่ผิว (Surface Chloride) เป็นตัวแปรที่ใช้แสดงสิ่งแวดล้อมคลอไรด์บริเวณผิวคอนกรีต ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ระยะทางที่โครงสร้างห่างจากน้ำทะเล สภาพแวดล้อมภายนอกพื้นผิวโครงสร้าง [9] (เช่น ลักษณะของอากาศ การกระเซ็นของน้ำ น้ำขึ้น-น้ำลง) และคุณสมบัติของคอนกรีต เป็นต้น

ในการคำนวณทางตัวเลข ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวเป็นตัวแปรที่ใช้ระบุถึงสภาพขอบเขต (Boundary Condition) เอกสารและงานวิจัยหลายฉบับได้รวบรวมข้อมูลสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ในหลายๆ พื้นที่ ตัวอย่างเช่น ในประเทศไทย มาตรฐาน มยผ. 1332-50 [10] กำหนดให้ค่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิวเป็นค่าคงที่ โดยโครงสร้างตั้งอยู่ใกล้บริเวณน้ำขึ้น-น้ำลงมีปริมาณคลอไรด์ที่ผิวมีค่าเท่ากับ 13 กก./ลบ.ม. และโครงสร้างบนพื้นดินที่ห่างจากฝั่งทะเล 100 ม. มีปริมาณคลอไรด์ที่ผิวเท่ากับ 4.5 กก./ลบ.ม.

งานวิจัยนี้ใช้ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวที่เสนอแนะในงานวิจัยของ Petcherdchoo [11] ซึ่งใช้ข้อมูลสิ่งแวดล้อมคลอไรด์รวมทั้งคอนกรีตที่ทดลองในประเทศไทย และพัฒนาสมการปริมาณคลอไรด์ที่ผิวที่แปรผันตามอายุคอนกรีตหรือเวลา t ในหน่วย % wt. of binder ดังนี้

$$C_S(t)=10^{[0.814(w/c)-0.213]}+2.11\sqrt{t} \quad (5)$$

โดย *w/c* คืออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เมื่อ *w/c* เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวเป็นดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวที่แปรผันตามอายุคอนกรีต

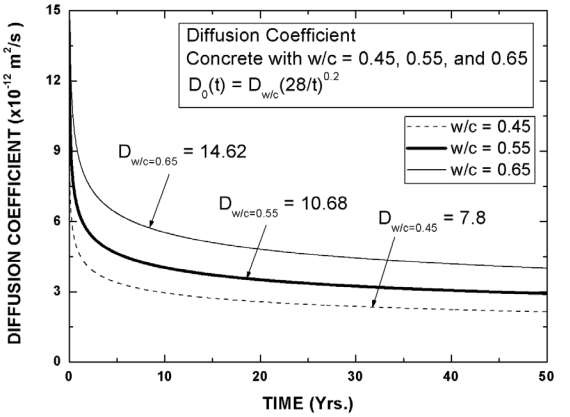
3.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ในคอนกรีตก่อนบำรุงรักษา

การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตภายใต้สิ่งแวดล้อมคลอไรด์สัมพันธ์กับความต้านทานในการแพร่ผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีต ซึ่งอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของคลอไรด์ (Chloride Ion Diffusion Coefficient) ในคอนกรีต ถ้าคอนกรีตมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านสูง คลอไรด์จะแพร่ผ่านเข้าสู่คอนกรีตได้ง่าย แต่ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านมีค่าต่ำ คลอไรด์จะแพร่ผ่านเข้าคอนกรีตได้ยาก สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ เช่น คอนกรีตไซเลนคอนกรีต เป็นต้น

ในการคำนวณทางตัวเลข สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านเป็นตัวแปรที่ใช้แสดงถึงคุณสมบัติทางวัสดุ (Material Property) ของคอนกรีต บทความนี้ใช้สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านที่แปรผันตามอายุของคอนกรีตหรือเวลา *t* ที่เสนอในงานวิจัยของ Petcherdchoo [11] ดังนี้

$$D_0(t)=10^{[1.776+1.364(w/c)]}\left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^{0.2} \quad (6)$$

โดย t_{ref} เท่ากับ 28 วัน เมื่อ *w/c* มีค่าเท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านเป็นดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 สัมประสิทธิ์การแพร่ที่แปรผันตามอายุคอนกรีต

3.3 ตัวแปรในกลยุทธ์บำรุงรักษา

บทความวิจัยนี้ศึกษาและเปรียบเทียบกลยุทธ์ในการบำรุงรักษาโดยการใช้สารไซเลน ดังแสดงในตารางที่ 1 เมื่อพิจารณากลยุทธ์ต่าง ๆ ในตารางที่ 1 พบว่าประกอบไปด้วย 5 กลยุทธ์บำรุงรักษา (SL1 ถึง SL5) และมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 4 ตัวแปร ดังนี้

3.3.1 เวลาในการบำรุงรักษาและช่วงเวลาประสิทธิผล

บทความนี้ประยุกต์ใช้เวลาในการบำรุงรักษาและช่วงเวลาประสิทธิผล (ช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มใช้สารไซเลนจนกระทั่งสารไซเลนเสื่อมสภาพจนหมด, t_{DUR}) ที่นำเสนอในเอกสารของ Denton [12] และ Carter and McGettigan [13] ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 สังเกตได้ว่าเวลาในการบำรุงรักษาโดยใช้สารไซเลนทั้ง 5 กลยุทธ์เป็นแบบตามกำหนดเวลา (Time-based) โดยมี SL1 เป็นกลยุทธ์พื้นฐาน (Baseline Strategy) และยังสังเกตได้ว่าเวลาบำรุงรักษาในครั้งถัดไปและช่วงเวลาประสิทธิผลของ SL1 แตกต่างกัน 2.5 ปี ค่าความแตกต่างนี้แสดงว่า หลังสารไซเลนเสื่อมสภาพจนหมด จากนั้นอีก 2.5 ปี จึงทำการใช้สารไซเลนอีกครั้งหนึ่ง ขณะที่ SL2 เป็นกลยุทธ์ที่กำหนดให้ใช้สารไซเลนในครั้งถัดไป ณ เวลาสิ้นสุดของช่วงเวลาประสิทธิผลทันที จึงทำให้สารไซเลนมีอิทธิพลต่อคอนกรีตตลอดเวลาตั้งแต่เริ่มใช้งานครั้งแรก ขณะที่เวลาในการใช้ SL3 ครั้งแรกเร็วกว่า SL2 นอกจากนี้เวลาในการใช้สารไซเลนและช่วงเวลาประสิทธิผลของ SL4 และ SL5 เท่ากันกับของ SL1

3.3.2 สัมประสิทธิ์การแพร่ในคอนกรีตหลังบำรุงรักษาและความลึกประสิทธิผล

Shimomura [14] กล่าวว่าตัวแปรที่สัมพันธ์กับอิทธิพลของสารไซเลนมี 2 ตัวแปรสำคัญ คือความลึกประสิทธิผลของสารไซเลน (ความลึกเฉลี่ยจากผิวคอนกรีตที่สารไซเลนสามารถผ่านเข้าไปได้ x_p) มีค่าประมาณ 30 มม. และสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านในไซเลนคอนกรีต (Silane-treated Concrete) มีค่าประมาณ 29% ของคอนกรีตเดิม (Old Concrete)

Moradllo et al. [5] ได้ทำการทดลองเพื่อหาการเสื่อมสภาพของสารที่กระทำที่ผิวคอนกรีตแบบต่าง ๆ

ตารางที่ 1 กลยุทธ์ในการบำรุงรักษา

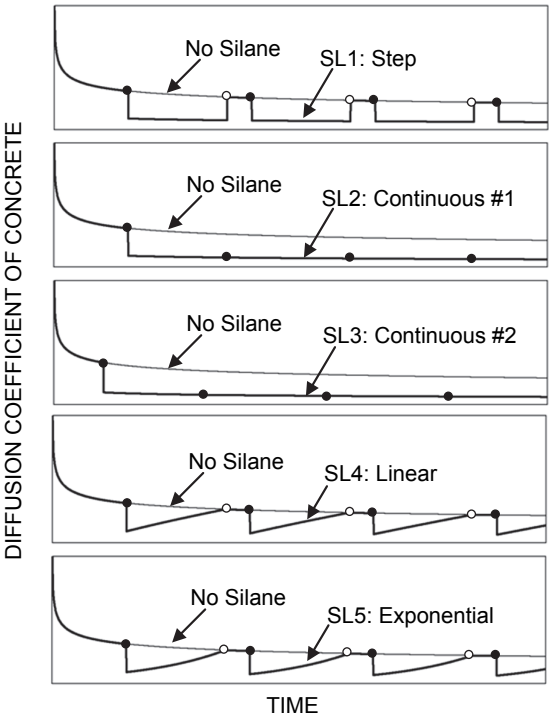
กลยุทธ์	เวลาบำรุงรักษา (ปี)		ช่วงเวลาประสิทธิผล (ปี) (t_{DUR})	ฟังก์ชันที่แปรผันตามเวลาของการเสื่อมสภาพของสารไซเลนในช่วงเวลาประสิทธิผล	ความลึกประสิทธิผล (มม.)
	ครั้งแรก (t_{1ST})	ครั้งถัดไป (t_{SUB})			
SL1 (Baseline)	7.5	ทุก ๆ 12.5	10	$D_{SL}(t) = 0.29 D_0(t)$	30
SL2	7.5	ทุก ๆ 10			
SL3	5	ทุก ๆ 10			
SL4	7.5	ทุก ๆ 12.5		$D_{SL}(t) = \left[0.29 + 0.071(t - t_{APP})\right] D_0(t)$	
SL5	7.5	ทุก ๆ 12.5		$D_{SL}(t) = \left[0.29 e^{0.054(t - t_{APP})}\right] D_0(t)$	

ข้อสังเกต t_{APP} คือเวลาที่ทำการบำรุงรักษา ซึ่งเท่ากับ 7.5, 20, 32.5, 45, 57.5,....ปี

และสรุปว่าสารที่ใช้กระทำที่ผิวคอนกรีตมีการเสื่อมสภาพก่อนสิ้นสุดช่วงเวลาประสิทธิผล นอกจากนี้ฟังก์ชันการเสื่อมสภาพสามารถถูกกำหนดให้มีลักษณะแบบฟังก์ชันเอกโพเนนเชียล (Exponential Function)

บทความนี้เลือกใช้สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของคลอไรด์ในไซเลนคอนกรีตและความลึกประสิทธิผลเท่ากับ 29% ของสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านในคอนกรีตเดิมและ 30 มม. ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 ดังนั้นเมื่อมีการใช้สารไซเลนด้วยกลยุทธ์ SL1 ถึง SL5 สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านในไซเลนคอนกรีตเปลี่ยนไปเป็น 29% ของคอนกรีตเดิม นอกจากนี้สารไซเลนในกลยุทธ์ SL1 ถึง SL3 ปราศจากการเสื่อมสภาพก่อนจุดสิ้นสุดของช่วงเวลาประสิทธิผล นั่นคือสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของคลอไรด์เท่ากับ 29% ของคอนกรีตเดิมตลอดช่วงเวลาประสิทธิผล และยังคงแปรผันตามเวลา ขณะที่สารไซเลนใน SL4 และ SL5 มีการเสื่อมสภาพตามอายุของคอนกรีตก่อนจุดสิ้นสุดของช่วงเวลาประสิทธิผล โดยเลือกให้ลักษณะการเสื่อมสภาพเป็นแบบฟังก์ชันเส้นตรง (Linear Function) และฟังก์ชันเอกโพเนนเชียล (Exponential Function) เพื่อใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบ นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าการหาค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ในฟังก์ชันทั้งสองนี้ทำได้โดยการแก้สมการหาค่าที่สอดคล้องกับการเสื่อมสภาพและช่วงเวลาประสิทธิผล นั้นคือ 0.29 และ 10 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาเวลาในการบำรุงรักษาและช่วงเวลาประสิทธิผลในหัวข้อ 3.3.1 รวมทั้งสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตที่ไม่มีและมีการใช้สารไซเลนในหัวข้อนี้ สัมประสิทธิ์การแพร่ในคอนกรีตเทียบกับเวลา (อายุคอนกรีต) ของทั้ง 5 กลยุทธ์เป็นดังแสดงในรูปที่ 4 โดยสังเกตได้ว่าเส้นบางและเส้นหนา คือสัมประสิทธิ์การแพร่ในคอนกรีตที่ไม่มีและมีการใช้สารไซเลน ตามลำดับ จุดดำและจุดขาว คือจุดเริ่มต้นของการใช้สารไซเลนและจุดสิ้นสุดของช่วงเวลาประสิทธิผล ตามลำดับ ขณะที่ช่วงเวลาระหว่างจุดดำถึงจุดขาวคือ ช่วงเวลาประสิทธิผลของสารไซเลนสังเกตได้ว่า SL2 และ SL3 ไม่มีจุดขาวเนื่องจากการใช้สารไซเลนเกิดขึ้น ณ จุดสิ้นสุดของช่วงเวลาประสิทธิผล



รูปที่ 4 สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีต

3.4 ปริมาณคลอไรด์วิกฤต

Schiessl and Raupach [15] นิยามว่า ปริมาณคลอไรด์วิกฤตเป็นปริมาณคลอไรด์ที่จำเป็นในการทำลายแผ่นฟิลม์บาง ๆ ที่เคลือบผิวเหล็กเสริม โดยแผ่นฟิลม์นี้ทำหน้าที่รักษาความเฉื่อยในการทำปฏิกิริยาของเหล็กเสริม Chalee et al. [16] ได้กล่าวว่าค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตที่ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตล้วนเริ่มเกิดการสึกกร่อนมีค่าเท่ากับ 0.9% wt. of binder

เพื่อศึกษาอายุการใช้งานของโครงสร้างที่ปราศจากการสึกกร่อนของเหล็กเสริม บทความนี้จึงใช้ค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤตเท่ากับ 0.9% wt. of binder เป็นตัวแปรที่ใช้เปรียบเทียบอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตหลังการใช้สารไซเลน โดยกำหนดว่า เมื่อใดก็ตามที่ปริมาณคลอไรด์ที่ตำแหน่งของเหล็กเสริมมีเท่ากับค่าวิกฤต อายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตที่ปราศจากการสึกกร่อนของเหล็กเสริมจะสิ้นสุดลง

4. ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา

Denton [12] ได้กล่าวไว้ว่าค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษากลุ่มสะพานโดยการใช้สารไซเลน 1 ครั้งจะอยู่ระหว่าง 0.3 k£ ถึง 77 k£ ต่อพื้นที่การใช้ 1 ตร.ม. ขณะที่ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 38.77 k£ ต่อพื้นที่การใช้ 1 ตร.ม.

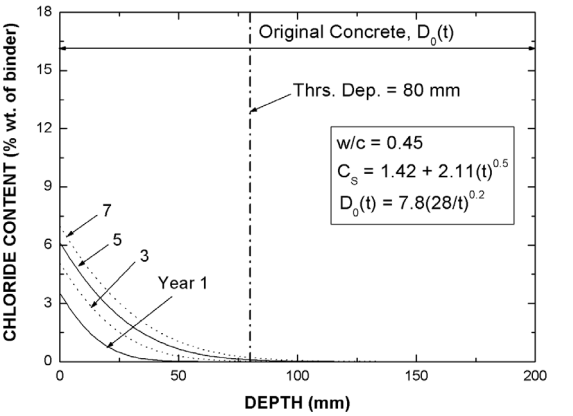
บทความนี้เลือกใช้ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยในการบำรุงรักษา 1 ครั้งเท่ากับ 38.77 k£ (1 £ ประมาณเท่ากับ 55 บาทไทย [17]) ต่อพื้นที่การใช้ 1 ตร.ม. และเป็นค่าพื้นฐานที่ใช้เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในกลยุทธ์ SL1 ถึง SL5 รวมทั้งใช้ในการพิจารณาประสิทธิภาพของการบำรุงรักษา

5. ตัวอย่างการประเมิน

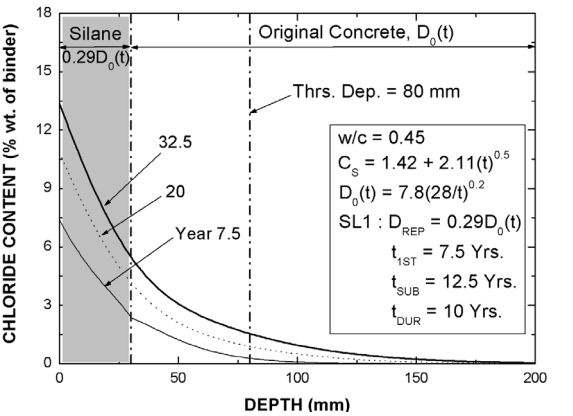
5.1 อายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีต

เมื่อใช้โปรแกรมไฟไนต์ดิฟเฟอร์เรนซ์แบบ Crank-Nicolson ที่พัฒนาตามสมการที่ 3 เพื่อพิจารณาการแพร่ผ่านของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ภายใต้การสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ในประเทศไทยและมีสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านแปรผันตามอายุคอนกรีต ดังแสดงในสมการที่ 5 และ 6 ตามลำดับ พบว่าเมื่อพิจารณาโครงสร้างคอนกรีตเดิมที่มี *w/c* เท่ากับ 0.45 และใช้ SL1 ปริมาณคลอไรด์ (Chloride Content) กับความลึกจากผิวคอนกรีต (Depth) เป็นดังรูปที่ 5

จากรูปที่ 5ก ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวเพิ่มขึ้นตามอายุคอนกรีตและแพร่ผ่านเข้ามาในคอนกรีตเรื่อยๆ จากปีที่ 1 จนถึงปีที่ 7 สังเกตได้ว่าอัตราการแพร่ของคลอไรด์ช้าลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านมีค่าน้อยลงเมื่ออายุของคอนกรีตเพิ่มขึ้น (ดูรูปที่ 3 ประกอบ) เมื่อพิจารณารูปที่ 5ข พบว่าการใช้สารไซเลนกับคอนกรีตเกิดขึ้นครั้งแรก ณ ปีที่ 7.5 (7 ปี 6 เดือน) ซึ่งเป็นไปตามกลยุทธ์ SL1 ดังนั้นสัมประสิทธิ์การแพร่ในคอนกรีตเดิมจึงเปลี่ยนไปเป็นไซเลนคอนกรีต หรือเท่ากับ $0.29D_0(t)$ นอกจากนี้ยังสังเกตได้อีกว่าพื้นที่แรเงากว้างเท่ากับช่วงความลึกประสิทธิผล (x_p) หลังจากนั้นเป็นเวลาเท่ากับ 10 ปี (ช่วงเวลาประสิทธิผล) นั่นคือ ณ ปีที่ 17.5 อิทธิพลของสารไซเลนที่กระทำครั้งแรกสิ้นสุดลง ต่อมาการใช้สาร



ก) ปริมาณคลอไรด์ปีที่ 1 ถึงปีที่ 7

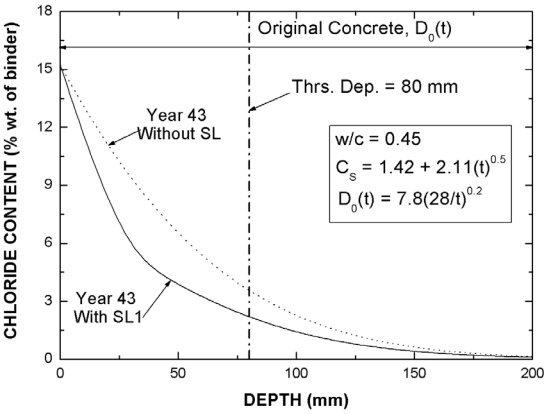


ข) ปริมาณคลอไรด์ปีที่ 7.5 ถึงปีที่ 32.5

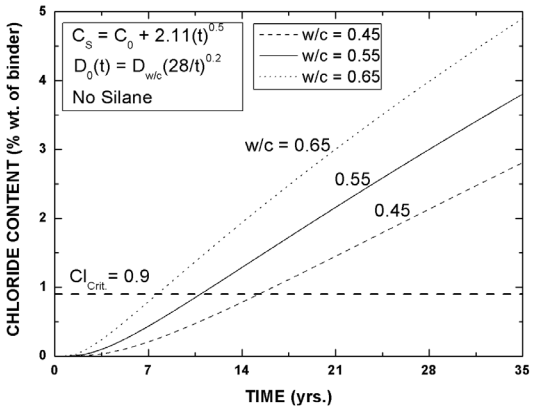
รูปที่ 5 ปริมาณคลอไรด์เทียบกับความลึกจากผิวคอนกรีตเมื่อมีการใช้กลยุทธ์ SL1

ไซเลนครั้งที่สองเกิดขึ้น ณ ปีที่ 20 (หรือ 12.5 ปีหลังจากการใช้สารไซเลนครั้งแรก) ทำให้คอนกรีตเดิมเปลี่ยนเป็นไซเลนคอนกรีตเป็นเวลา 10 ปี หลังจากนั้นมีการใช้สารไซเลนต่อไปเป็นวัฏจักร เช่น ณ ปีที่ 32.5, 45, 57.5 เป็นต้น

รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ไม่มีและมีการใช้สารไซเลน ณ ปีที่ 43 พบว่าปริมาณคลอไรด์แพร่เข้าไปในโครงสร้างคอนกรีตที่มีการใช้สารไซเลนช้ากว่าที่ไม่มีการใช้ นอกจากนี้ยังพบว่า



รูปที่ 6 ปริมาณคลอไรด์เทียบกับความลึกจากผิวคอนกรีต เมื่อไม่มีและมีการใช้กลยุทธ์ SL1



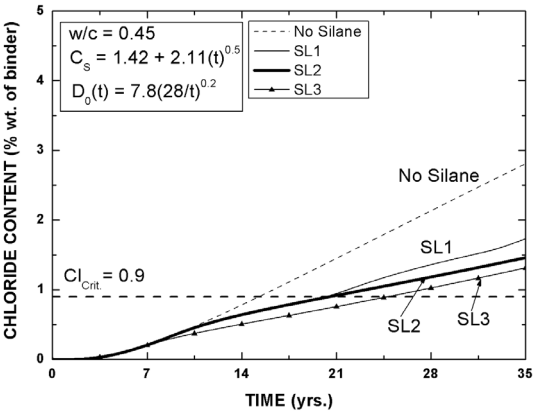
รูปที่ 7 ปริมาณคลอไรด์เทียบกับอายุของคอนกรีต เมื่อไม่มีการใช้สารไซเลน

แม้มีการใช้สารไซเลน แต่ปราศจากพื้นที่แรเงาในช่วงความลึกประสิทธิผล เพราะช่วงเวลาประสิทธิผลของสารไซเลนที่กระทำ ณ ปีที่ 32.5 (ดูรูปที่ 5 ประกอบ) สิ้นสุดลง ณ ปีที่ 42.5 ทำให้ไม่มีสารไซเลนในคอนกรีต ณ ปีที่ 43

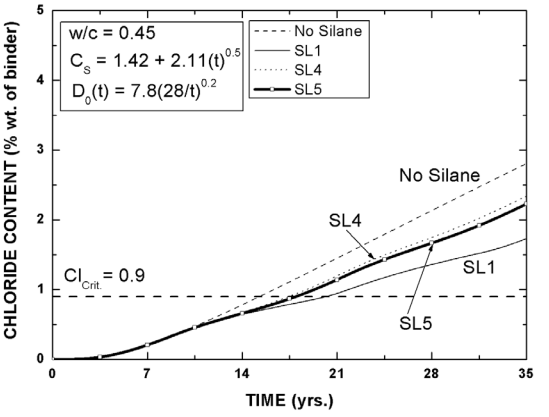
เมื่อพิจารณา ณ ความลึกวิกฤต 80 มม. ซึ่งเป็นระยะหุ้มเหล็กเสริมของคอนกรีตที่แนะนำไว้ในมาตรฐานในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ในทะเล [18] ปริมาณคลอไรด์เทียบกับอายุของคอนกรีตที่มี *w/c* เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 และไม่มีการใช้สารไซเลนเป็นดังรูปที่ 7 พบว่าปริมาณคลอไรด์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ถ้าเวลาที่ปริมาณคลอไรด์นี้เท่ากับค่าปริมาณคลอไรด์วิกฤต (0.9% wt. of binder) เป็นอายุการใช้งานที่ปราศจากการสึกกร่อนของเหล็กเสริมแล้ว โครงสร้างคอนกรีตที่มี *w/c* เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 จะมีอายุการใช้งานเท่ากับ 15.29, 10.29 และ 7.67 ปีตามลำดับ ดังนั้นคอนกรีตที่มี *w/c* ต่ำกว่าจะมีคุณภาพดีกว่า เพราะปริมาณคลอไรด์ที่ผิวและสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านต่ำกว่า (ดูรูปที่ 2 และ 3 ประกอบ) ทำให้คลอไรด์แพร่ผ่านได้น้อยกว่า และโครงสร้างคอนกรีตมีอายุการใช้งานยาวกว่า

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์กับอายุของคอนกรีตที่มี *w/c* เท่ากับ 0.45 เมื่อไม่มีการใช้สารไซเลนและมีการใช้ SL1 ถึง SL5 พบว่าเมื่อมีการใช้ SL1, SL2 และ SL3 ดังแสดงในรูปที่ 8ก อายุการใช้งานที่ปราศจากการสึกกร่อนของเหล็กเสริมเท่ากับ 20.23, 20.5 และ 24.87 ปี ตามลำดับ ถ้าเปรียบเทียบระหว่าง SL1 กับ SL2 พบว่าการใช้สารไซเลนครั้งแรกของทั้งสองกลยุทธ์เกิดขึ้นพร้อมกัน ณ ปีที่ 7.5 ขณะที่การใช้สารไซเลนครั้งที่ 2 ของ SL1 เกิดขึ้น ณ ปีที่ 20 ซึ่งเป็นเวลาที่ปริมาณคลอไรด์มีค่าประมาณเท่ากับค่าวิกฤต ดังนั้นการใช้สารไซเลนในครั้งที่ 2 นี้จึงมีอิทธิพลต่อการยืดอายุการใช้งานเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามการใช้สารไซเลนครั้งที่ 2 ของ SL2 เกิดขึ้น ณ ปีที่ 17.5 ซึ่งเป็นเวลาก่อนที่ปริมาณคลอไรด์มีค่าเท่ากับค่าวิกฤตเพียงเล็กน้อย ทำให้การใช้สารไซเลนในครั้งที่ 2 นี้มีอิทธิพลต่อการยืดอายุการใช้งานมากกว่าการใช้ SL1 เล็กน้อย นอกจากนี้ยังสังเกตได้อีกว่าอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตที่ใช้กลยุทธ์ SL3 ยาวกว่าที่ใช้กลยุทธ์ SL2 เนื่องจากการใช้สารไซเลนครั้งแรกของ SL3 เร็วกว่าทำให้การใช้ SL3 มีโอกาสเกิดขึ้นได้บ่อยกว่า

รูปที่ 8ข เปรียบเทียบการใช้ SL1, SL4 และ SL5 ซึ่งมีเวลาในการใช้สารไซเลนเหมือนกัน (ดูตารางที่ 1) พบว่าการใช้ SL1 ดีกว่า SL4 และ SL5 เพราะสารไซเลนใน SL1 ไม่มีการเสื่อมสภาพในช่วงเวลาประสิทธิผล แต่



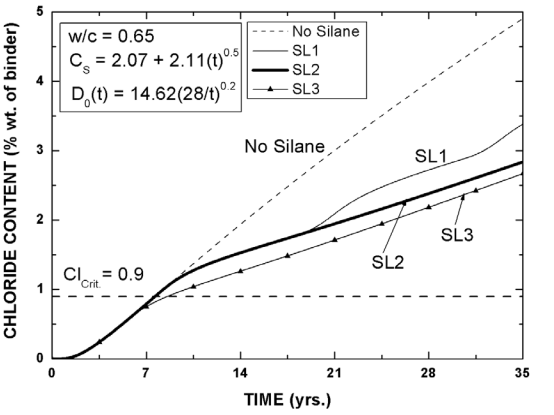
ก) ไม่มีและมีการบำรุงรักษาโดย SL1, SL2, SL3



ข) ไม่มีและมีการบำรุงรักษาโดย SL1, SL4, SL5

รูปที่ 8 ปริมาณคลอไรด์เทียบกับอายุของคอนกรีตที่มี *w/c* = 0.45 เมื่อไม่มีและมีการใช้สารไซเลน

สารไซเลนใน SL4 และ SL5 จะเสื่อมสภาพแบบฟังก์ชันเส้นตรงและฟังก์ชันเอกโพเนนเชียล ตามลำดับ ทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ในช่วงเวลาประสิทธิผลของ SL4 และ SL5 มีค่าสูงกว่า (ดูรูปที่ 4) ดังนั้นการแพร่ผ่านของคลอไรด์ในคอนกรีตเมื่อใช้ SL4 และ SL5 จึงมีมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ SL5 ดีกว่า SL4 เล็กน้อย เนื่องจากการเสื่อมสภาพของสารไซเลนใน SL5 เป็นแบบฟังก์ชันเอกโพเนนเชียล ซึ่งมีอัตราการเสื่อมสภาพช้ากว่า



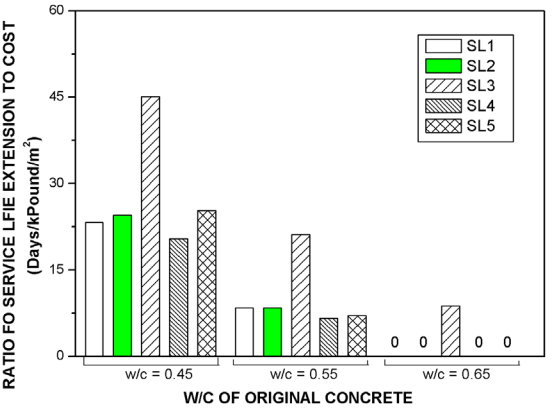
รูปที่ 9 ปริมาณคลอไรด์เทียบกับอายุของคอนกรีตที่มี *w/c* = 0.65 เมื่อไม่มีและมีการบำรุงรักษาด้วยกลยุทธ์ SL1, SL2, SL3

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มี *w/c* เท่ากับ 0.65 ปริมาณคลอไรด์เทียบกับอายุของคอนกรีตที่ไม่มีการใช้สารไซเลนและมีการใช้ SL1 ถึง SL3 เป็นดังรูปที่ 9 เมื่อมีการใช้ SL1 และ SL2 พบว่าไม่มีอิทธิพลต่อการยืดอายุการใช้งาน เนื่องจาก ณ ปีที่ 7.5 ซึ่งเป็นเวลาที่ใช้สารไซเลนครั้งแรก ปริมาณคลอไรด์มีค่าประมาณเท่ากับค่าวิกฤต ทำให้อิทธิพลของสารไซเลนต่อการยืดอายุการใช้งานไม่สามารถเกิดขึ้นได้ทัน แต่ถ้าใช้ SL3 ซึ่งเกิดขึ้นครั้งแรก ณ ปีที่ 5 สามารถยืดอายุการใช้งานได้อีก 8.6 ปี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าในการพิจารณาเวลาที่ใช้สารไซเลน ต้องพิจารณาอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเดิม มิฉะนั้นสารไซเลนจะไม่สามารถยืดอายุการใช้งานที่ปราศจากการสึกกร่อนของเหล็กเสริมได้เลย

ตารางที่ 2 แสดงอิทธิพลของ SL1 ถึง SL5 ในการยืดอายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตที่มี *w/c* เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 ตัวอย่างเช่น โครงสร้างคอนกรีตที่มี *w/c* เท่ากับ 0.45 และใช้ SL1 อายุการใช้ที่ยืดออกเท่ากับ 4.94 ปี เพราะอายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตเมื่อไม่มีและมีการใช้ SL1 เท่ากับ 15.29 และ 20.23 ปี ตามลำดับ

ตารางที่ 2 อายุการใช้งานที่ยืดออกและค่าใช้จ่าย

w/c ของคอนกรีตเดิม	กลยุทธ์บำรุงรักษา	อายุการใช้งานที่ยืดออก (ปี)	ค่าใช้จ่าย (k£/m²)
0.45	SL1	4.94	77.54
	SL2	5.21	77.54
	SL3	9.58	77.54
	SL4	2.17	38.77
	SL5	2.69	38.77
0.55	SL1	0.89	38.77
	SL2	0.59	38.77
	SL3	4.5	77.54
	SL4	0.7	38.77
	SL5	0.75	38.77
0.65	SL1	0	38.77
	SL2	0	38.77
	SL3	0.93	38.77
	SL4	0	38.77
	SL5	0	38.77



รูปที่ 10 ประสิทธิภาพของการบำรุงรักษา

รวมทั้งไม่แนะนำให้มีการใช้สารไซเลนในทางปฏิบัติ

ค่าใช้จ่ายในช่วงอายุการใช้งานที่มีการใช้สารไซเลนกับโครงสร้างคอนกรีตที่มี *w/c* เท่ากับ 0.45, 0.55 และ 0.65 เป็นดังตารางที่ 2

5.2 ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา

บทความนี้กำหนดให้ค่าใช้จ่ายในการใช้สารไซเลนขึ้นอยู่กับค่าใช้จ่ายในการใช้สารไซเลน 1 ครั้ง (38.77 k£/m²) และจำนวนครั้งในการใช้สารไซเลนก่อนสิ้นสุดอายุการใช้งานที่ปราศจากการสึกกร่อนของเหล็กเสริม โดยจำนวนครั้งในการใช้จะขึ้นอยู่กับเวลาที่ทำการบำรุงรักษา ตัวอย่างเช่น เมื่อพิจารณาอายุการใช้ของโครงสร้างคอนกรีตที่มี *w/c* เท่ากับ 0.45 และมีการใช้ SL1 โครงสร้างคอนกรีตมีอายุการใช้งานเท่ากับ 20.23 ปี ในช่วงเวลานี้มีการใช้สารไซเลน 2 ครั้ง นั่นคือ ณ ปีที่ 7.5 และ 20 ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการใช้สารไซเลนจำนวน 2 ครั้งนี้จึงเท่ากับ 77.54 k£/m² ดังแสดงในตารางที่ 2 แต่ถ้ามีการใช้ SL5 โครงสร้างคอนกรีตมีอายุการใช้งานเท่ากับ 17.98 ปี (เพิ่มขึ้น 2.69 ปี) ในช่วงเวลานี้มีการใช้สารไซเลน 1 ครั้ง นั่นคือ ณ ปีที่ 7.5 ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการใช้สารไซเลนจำนวน 1 ครั้งนี้จึงเท่ากับ 38.77 k£/m² และยังสังเกตได้ว่าการใช้ SL5 ครั้งที่สอง ณ ปีที่ 20 ไม่นำมาคิด เพราะไม่ได้อยู่ช่วงอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต

5.3 ประสิทธิภาพของการบำรุงรักษา

เมื่อพิจารณาตารางที่ 2 สังเกตได้ว่าการใช้ SL3 กับคอนกรีตที่มี *w/c* เท่ากับ 0.55 พบว่าสามารถยืดอายุการใช้งานได้ยาวกว่าการใช้ SL1 เนื่องจากการใช้สารไซเลนครั้งแรกของ SL3 เกิดขึ้นเร็วกว่า ทำให้จำนวนครั้งในการใช้สารไซเลนเกิดขึ้นบ่อยกว่าและค่าใช้จ่ายในช่วงอายุการใช้ที่ปราศจากการสึกกร่อนของเหล็กเสริมสูงกว่า นั่นคือกลยุทธ์ที่สามารถยืดอายุการใช้งานได้ยาวกว่าจะมีค่าใช้จ่ายยิ่งสูง ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าการพิจารณาเฉพาะอายุการใช้งานหรือค่าใช้จ่ายไม่เพียงพอต่อการเลือกกลยุทธ์ที่เหมาะสมที่สุด ด้วยเหตุนี้บทความนี้จึงเสนอให้เปรียบเทียบกลยุทธ์ต่าง ๆ โดยใช้ประสิทธิภาพของการบำรุงรักษา ซึ่งมีคำนิยามว่าเป็นเป็นอัตราส่วนระหว่างอายุการใช้งานที่ยืดออก (Service Life Extension) กับค่าใช้จ่ายในการใช้สารไซเลน (Cost) เมื่อนำค่าทั้งสองที่แสดงในตารางที่ 2 มาคำนวณหาประสิทธิภาพของการบำรุงรักษา และแสดงในรูปที่ 10 พบว่าการใช้ SL3 มีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกันใน 5 กลยุทธ์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง

คอนกรีตที่มี *w/c* เท่ากับ 0.45 และ 0.55 พบว่า SL4 มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด แต่เมื่อคอนกรีตมี *w/c* เท่ากับ 0.65 พบว่า SL1, SL2, SL4 และ SL5 ไม่มีประสิทธิภาพ เพราะไม่สามารถยืดอายุการใช้งานได้เลย (ดูรูปและคำอธิบายในรูปที่ 9 ประกอบ)

เมื่อพิจารณาเพิ่มเติมในตารางที่ 2 และเปรียบเทียบอายุการใช้งานที่ยืดออกเมื่อใช้กลยุทธ์ SL2 และ SL5 กับโครงสร้างคอนกรีตมี *w/c* เท่ากับ 0.45 พบว่าการใช้ SL2 สามารถยืดอายุโครงสร้างคอนกรีตได้มากกว่าการใช้ SL5 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่าการใช้ SL5 กับโครงสร้างที่มี *w/c* เท่ากับ 0.45 มีประสิทธิภาพมากกว่าใช้ SL2 เนื่องค่าใช้จ่ายของกลยุทธ์ SL5 มีอิทธิพลต่ออายุที่ยืดออกมากกว่า ดังนั้นการใช้กลยุทธ์ SL5 จึงคุ้มค่ามากกว่ากลยุทธ์ SL2

6. สรุป

บทความนี้ศึกษาอายุการใช้งาน ค่าใช้จ่ายและประสิทธิภาพของการบำรุงรักษาโดยใช้สารไซเลนบนโครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ภายใต้การแปรผันตามเวลาของสิ่งแวดล้อมคลอไรด์ในประเทศไทย โดยการคำนวณทางตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอร์เรนซ์แบบ Crank-Nicolson จากการศึกษา พบว่า

1. การแพร่ผ่านของคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตที่มีการใช้สารไซเลนมีอัตราช้ากว่าที่ไม่มีการใช้สารไซเลน

2. การเริ่มใช้สารไซเลนครั้งแรกยิ่งเร็วเท่าใด อิทธิพลของสารไซเลนต่อการยืดอายุการใช้งานจะยิ่งดีขึ้น เนื่องจากสารไซเลนสามารถแสดงอิทธิพลในการยืดอายุการใช้งานได้อย่างเต็มที่ แต่ถ้าเวลาที่ใช้สารไซเลนใกล้เคียงกับอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต สารไซเลนจะไม่สามารถแสดงอิทธิพลในการยืดอายุการใช้งานได้อย่างเต็มที่ ดังนั้นในการพิจารณาเวลาที่ใช้สารไซเลนต้องพิจารณาอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตด้วย

3. บทความนี้นิยามให้ประสิทธิภาพของการบำรุงรักษาเป็นอัตราส่วนระหว่างอายุการใช้งานที่ยืดออกกับค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา โดยค่าใช้จ่ายนี้จะคำนวณเฉพาะที่อยู่ในช่วงอายุการใช้งานที่ปราศจากการสึกกร่อนของเหล็กเสริม ทำให้สามารถเลือกกลยุทธ์ที่คุ้มค่าที่สุดทั้งในด้านค่าใช้จ่ายและการยืดอายุการใช้งาน อย่างไรก็ตามข้อมูลค่าใช้จ่ายในการใช้สารไซเลนสำหรับประเทศไทยยังมีไม่เพียงพอ ดังนั้นข้อมูลนี้จึงยังเป็นที่ต้องการ

4. สารไซเลนที่มีการเสื่อมสภาพเร็วกว่าจะทำให้โครงสร้างคอนกรีตมีอายุการใช้งานสั้นกว่า อย่างไรก็ตามข้อมูลฟังก์ชันการเสื่อมสภาพของสารไซเลนนี้ยังมีไม่เพียงพอ ดังนั้นงานวิจัยในหัวข้อนี้จึงยังเป็นที่ต้องการ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยในบทความนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือภายใต้โครงการเลขที่ KMUTNB-GEN-56-05 และ KMUTNB-GOV-57-03

เอกสารอ้างอิง

[1] Library2. (2014, January 23). [Online]. Available: http://library2.parliament.go.th/giventake/content_hr/hr24/d052155-09.pdf.

[2] N.M. Okasha and D.M. Frangopol, "Advanced modeling for efficient computation of life-cycle performance prediction and service-life estimation of bridge," *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 24, no. 6, pp. 548-56, 2010.

[3] A. Petcherdchoo, "Service life cycle assessment of chloride attacked concrete structures with silane treatment considering environmental impacts," in *10th Int. Sym. on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia*, 2011.

[4] A. Petcherdchoo, "Predicting service life and cost of chloride exposed concrete structures with repairs by cover replacement and silane treatment," in *17th Nat. Con. on Civil Eng*., 2012.

[5] M.K. Moradllo, M. Shekarchi, and M. Hoseini,

"Time-dependent performance of concrete surface coatings in tidal zone of marine environment," *Construction and Building Materials*, vol. 30, pp. 198-205, 2012.

[6] D.U. Von Rosenberg, *Methods for the numerical solution of partial differential equations*, Elsevier Publishing Co., 1969.

[7] NCHRP-558, *Manual on service life of corrosion-damaged reinforced concrete bridge superstructure elements*, TRB, 2006.

[8] W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, and B.P. Flannery, *Numerical recipes in C: the art of scientific computing*, Cambridge University Press, Second Edition, 1999.

[9] C. Alonso, M. Castellote, and C. Andrade, "Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements," *Electrochinica Acta*, vol. 47, pp. 3469-3481, 2002.

[10] Ministry of Interior (MOI), "Standard of Concrete Structures with considering Durability and Service Life," Dept. of Public Works and Town & Country Planning, Ministry of Interior, pp. 1332-50, 2007 (in Thai).

[11] A. Petcherdchoo, "Time dependent models of apparent diffusion coefficient and surface chloride for chloride transport in fly ash concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 38, pp. 497-507, 2013.

[12] S. Denton, *Data estimates for different maintenance options for reinforced concrete cross-heads*, *Highways Agency*, Bristol, U.K: Parsons Brinckerhoff Ltd., 2002.

[13] P. Carter and E. McGettigan, *The fundamental of cleaning and coating concrete*, Chapter 8: Coating Materials: Sealer, 2001.

[14] T. Shimomura, "Evaluation of effectiveness of surface protecting materials for concrete by numerical analysis," *Proc. of an int. workshop on durability of reinforced concrete under combined mechanical and climatic loads*, 2005.

[15] P. Schiessl and M. Raupach, "Influence of concrete composition and microclimate on the critical chloride content in concrete," *Corrosion of Reinforcement in Concrete*, 1990.

[16] W. Chalee, C. Jaturapitakkul, P. Chindaprasirt, "Predicting the chloride penetration of fly ash concrete in seawater," *Mar. Struct*., pp. 341-53, 2009.

[17] Bank of Thailand. (2014, May 16). [Online]. Available: http://www.bot.or.th/Thai/Statistics/FinancialMarkets/ExchangeRate/_layouts/Application/ExchangeRate/ExchangeRate.aspx

[18] Ministry of Construction and Transportation (MOCT), *Standard specification for concrete structures on durability*, 2004 (in Korean).