



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

ปริญญา

วิศวกรรมโยธา

วิศวกรรมโยธา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง แนวทางการซ่อมแซมสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์และ
การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน
Repair Guideline and Life Cycle Cost Analysis of Reinforced Concrete Bridge
Deteriorated by Chloride Attack

นายผู้วิจัย นายสิทธิรินทร์ รัชมสิริพัทธ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ, D.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์สุวิมล สัจฉาณิษฐ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ชาครีย์ บำรุงวงศ์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ปรีชา โสภารัตน์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ, D.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา อีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

แนวทางการซ่อมแซมสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์และการวิเคราะห์
ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน

Repair Guideline and Life Cycle Cost Analysis of Reinforced Concrete Bridge
Deteriorated by Chloride Attack

โดย

นายสิตรินทร์ รัชมุสิกพัทธ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
พ.ศ. 2557

ลิตรินทร์ รัชมสิริพัทธ์ 2557: แนวทางการซ่อมแซมสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่
เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์และการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน ปริญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรม
โยธา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ, D.Eng.
237 หน้า

การศึกษาครั้งนี้วัตถุประสงค์เพื่อประเมินโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยสายตา,
ทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับผลกระทบจากคลอไรด์ในน้ำ
ทะเล และวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของแนวทางการซ่อมแซมโครงสร้างสะพาน
คอนกรีตเสริมเหล็ก

การศึกษาได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างสะพาน 5 แห่ง ด้วยสายตาและเจาะเก็บผง
คอนกรีตสะพานนำไปทดสอบหาปริมาณคลอไรด์เพื่อใช้ทำนายระยะเวลาเริ่มต้นการกัดกร่อนโดยใช้
กฎข้อที่สองของฟิคและสมการของ Pulvis สำหรับการทำนายการสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมใช้
สมการของ JCI และ Markeset จากนั้นคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของแนวทางการ
ซ่อมแซมโครงสร้าง 41 วิธี

ผลการศึกษาพบว่าความเสียหายในโครงสร้างสะพานพบที่เสามากกว่าคานและพื้นและพบ
การเสื่อมสภาพระดับที่ 1 (รอยร้าวเล็กๆหรือเกิดสนิมแบบจุดที่ผิวคอนกรีต) มากที่สุดซึ่งพบมากใน
เสา การวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์พบว่าปริมาณคลอไรด์ที่เสาและคานมีแนวโน้มสูงกว่าปริมาณคลอ
ไรด์ที่พื้นเมื่อผลการตรวจสอบด้วยสายตาอยู่ในระดับการเสื่อมสภาพเดียวกัน อีกทั้งปริมาณคลอไรด์
ที่ผิวคอนกรีตและการเสื่อมสภาพที่ตรวจสอบได้ด้วยสายตาามีแนวโน้มที่จะลดน้อยลงเมื่อระยะทาง
จากชายฝั่งเพิ่มมากขึ้น ผลการทำนายการเสื่อมสภาพด้วยสมการของ Pulvis (ระยะเวลาเริ่มต้นการ
กัดกร่อน) ร่วมกับสมการของ Markeset (ระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริม) ได้ผลระดับการ
เสื่อมสภาพที่ใกล้เคียงกับระดับการเสื่อมสภาพจากการสำรวจด้วยสายตามากที่สุด และจากการ
วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน (100 ปี) พบว่า การป้องกันการเกิดสนิมโดยเคลือบผิว
คอนกรีตด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่มีการเสื่อมสภาพน้อย (ระดับ1หรือ2) เป็นวิธีที่ให้ค่าใช้จ่ายต่ำ
ที่สุด

Sistarin Ratchamusikpat 2014: Repair Guideline and Life Cycle Cost Analysis of Reinforced Concrete Bridge Deteriorated by Chloride Attack. Master of Engineering (Civil Engineering), Major Field: Civil Engineering, Department of Civil Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Wanchai Yodsudjai, D.Eng. 237 pages.

The purposes of this study were to visual inspect reinforced concrete bridges, to predict lifetime of reinforced concrete structure in chloride environment and to calculated life-cycle costs of various maintenance plans for deteriorated RC bridges

The five existing reinforced concrete bridges were visual inspected and The chloride profiles were investigated. The lifetime of the bridge was calculated, the Fick's second law and Pulvis's equation (for initiation period). The JCI's equation and Markeset's equation (for propagation period). In addition, the life-cycle costs of 41 maintenance methods for the deteriorated RC bridges were calculated.

As a result, it was found that the deteriorated of RC bridges was mostly found in column comparing to the beam and slab. The most deterioration found in column was classified on level 1 (partially cracks or spotted rust on surface concrete structure). The chloride content in column and beam were likely higher than that of slab when the level of deterioration assessed by visual inspection was similar. The Chloride contents and level of deterioration were decreased when the distance from coastline were increased. The prediction of deteriorated level by using the Pulvis's equation (for initiation period) and Markeset's equation (for propagation period) was mostly consistence with the result from the visual inspection. In addition, the lowest life-cycle cost among 41 Maintenance methods was the PU coating in low deteriorated RC bridges (level 1 or 2)

Student's signature

Thesis Advisor's signature

/ /

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คงจะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ถ้าขาดบุคคลอันเป็นที่เคารพเหล่านี้ ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ยอดสุดใจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ให้คำปรึกษาแนะนำเรื่องของการค้นคว้าเกี่ยวกับงานวิจัย ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงการมอบความรู้ที่เป็นประโยชน์ อีกทั้งยังได้ปลูกฝังแนวความคิดทางด้านวิศวกรรม และจริยธรรมที่มีส่วนช่วยส่งเสริมต่อการพัฒนาศักยภาพของข้าพเจ้า และขอขอบคุณรองศาสตราจารย์สุวิมล สัจจาณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ซึ่งให้คำปรึกษาและแนะนำในสิ่งที่ เป็นประโยชน์งานวิจัยตลอดจนการให้ความกรุณาตรวจแก้ไขข้อบกพร่องในวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ขอขอบคุณกรมทางหลวงชนบท ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ ข้อมูล และประสานงานการลงพื้นที่สำรวจสะพานเพื่อประกอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณงบประมาณในการทำวิจัยซึ่งส่วนหนึ่งมาจาก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ขอขอบคุณช่วงเวลาที่ดี กำลังใจจากเพื่อนนิสิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยให้คำปรึกษา เวลา กำลังกาย ในการทำงานวิจัยครั้งนี้ นอกจากบุคคลผู้มีพระคุณดังที่กล่าวมาข้างต้น ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และน้องสาว ที่ได้มอบกำลังใจและการสนับสนุนในทุกด้านจนทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอมอบความดีทั้งปวงแด่ บิดา มารดา อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทั้งหมดที่กล่าวมานี้ล้วนมีส่วนให้งานวิจัยนี้สามารถดำเนินไปได้ด้วยดีตลอดเวลาที่ทำการวิจัย ผู้เขียนขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

สิตรินทร์ รัชมุสิกพัทธ์

มีนาคม 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(8)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(14)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	43
อุปกรณ์	43
วิธีการ	45
ผลและวิจารณ์	57
สรุปและข้อเสนอแนะ	134
สรุป	134
ข้อเสนอแนะ	135
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	136
ภาคผนวก	143
ภาคผนวก ก คุณสมบัติคอนกรีต	144
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต	147
ภาคผนวก ค ผลการทำนายปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต	162
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน	176
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	237

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงสุดในคอนกรีตจากมาตรฐานและข้อกำหนดต่างๆ	9
2 ปริมาณคลอไรด์อิสระสูงสุดในคอนกรีตจากมาตรฐานและข้อกำหนดต่างๆ	10
3 การแบ่งระดับการเสื่อมสภาพตามคู่มือการซ่อมบำรุงโครงสร้างทำเรือ	15
4 ข้อกำหนดในการซ่อมแซมและการป้องกันที่เหมาะสมสำหรับพื้นผิวสภาพของโครงสร้าง	31
5 ข้อดีและข้อเสียจากการซ่อมแซมด้วยประจุไฟฟ้าแบบใช้ระบบกระแสไฟฟ้า	34
6 ข้อดีและข้อเสียจากการซ่อมแซมด้วยประจุไฟฟ้าแบบใช้ระบบโลหะกักกร่อน	35
7 การประมาณค่าควบคุมและประกัน	43
8 เวลาน้ำขึ้นและน้ำลงปากแม่น้ำท่าจีน จังหวัดสมุทรสาคร เดือนพฤษภาคมช่วง วันที่ทำการเจาะเก็บตัวอย่างผกคอนกรีต	48
9 เวลาน้ำขึ้นและน้ำลงปากน้ำระยอง จังหวัดระยอง เดือนพฤษภาคมช่วง วันที่ทำการเจาะเก็บตัวอย่างผกคอนกรีต	49
10 สรุปแนวทางในการเลือกวิธีการซ่อมแซมโครงสร้างตามระดับการเสื่อมสภาพ	52
11 สรุปรายละเอียดของสะพานที่ทำการตรวจสอบ	57
12 สรุปผลการตรวจสอบและประเมินโครงสร้างสะพานด้วยสายตา	59
13 ค่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิว (C_0) ของโครงสร้างสะพานที่ทำการทดสอบ	61
14 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ไอออน (D) ของโครงสร้างสะพานที่ทำการทดสอบ	62
15 ผลการทำนายการเสื่อมสภาพของสะพานด้วยกฎข้อที่สองของฟิคและสมการของ Pulvis	72
16 ระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมคอนกรีตจากการคำนวณด้วย สมการของ JCI	74
17 ระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมคอนกรีตในรูปฟังก์ชันของเวลาต่อ อัตราการกัดกร่อนของ Markeset	74
18 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับการทำนายอายุโครงสร้าง ด้วยกฎข้อที่สองของฟิคร่วมกับ JCI ของสะพาน S1	86

สารบัญตาราง (ต่อ)

[illegible]

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
29 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายระยะเวลา เริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis ร่วมกับระยะเวลา การสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน S1	93
30 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายระยะเวลา เริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis ร่วมกับระยะเวลา การสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน S2	93
31 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายระยะเวลา เริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis กับระยะเวลา การสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน R1	94
32 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายระยะเวลา เริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis กับระยะเวลา การสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน R2	95
33 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายระยะเวลา เริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis กับระยะเวลา การสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน R3	95
34 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ด้วยกฎข้อที่สองของฟิคกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วย สมการของ JCI ของสะพาน S1	98
35 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ด้วยกฎข้อที่สองของฟิคกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วย สมการของ Markeset ของสะพาน S1	100
36 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน S1	102

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
37 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน S1	104
38 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ด้วยกฎข้อที่สองของฟิคกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วย สมการของ JCI (1998) ของสะพาน S2	106
39 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ด้วยกฎข้อที่สองของฟิคกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วย สมการของ Markeset (2008) ของสะพาน S2	107
40 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน S2	109
41 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis (1994) กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset (2008) ของสะพาน S2	111
42 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ด้วยกฎข้อที่สองของฟิคกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วย สมการของ JCI (1998) ของสะพาน R1	114
43 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ด้วยกฎข้อที่สองของฟิคกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วย สมการของ Markeset (2008) ของสะพาน R1	117

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
44 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis (1994) กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI (1998) ของสะพาน R1	119
45 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis (1994) กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset (2008) ของสะพาน R1	121
46 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis (1994) กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI (1998) ของสะพาน R2	123
47 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis (1994) กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset (2008) ของสะพาน R2	125
48 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis (1994) กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI (1998) ของสะพาน R3	128
49 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis (1994) กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset (2008) ของสะพาน R3	130
50 แนวทางการซ่อมแซมสะพานที่ทำการตรวจสอบทั้ง 5 แห่งในแต่ละระดับความเสียหาย จากการทำนายอายุของโครงสร้างด้วยแบบจำลองทั้ง 4 ประเภท	132

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก1 ข้อกำหนดของคอนกรีตตามมาตรฐานของกรมโยธาธิการ	145
ก2 ปริมาณส่วนผสมของคอนกรีตต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีตทรงกระบอกกำลังอัด 250 กก./ตร.ซม.	146
ข1 ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในสะพาน S1	148
ข2 ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในสะพาน S2	151
ข3 ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในสะพาน R1	154
ข4 ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในสะพาน R2	158
ข5 ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในสะพาน R3	160
ง1 ราคาวัสดุและค่าแรงในปีที่ก่อสร้างสะพาน	182
ง2 ตัวอย่างการประมาณราคาก่อสร้างสะพาน S2 ในปี 2530	183
ง3 สรุปราคาค่าก่อสร้างสะพานทั้ง 5 แห่ง	188
ง4 ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม	188

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ความเสียหายจากการเป็นสนิมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจาก คลอไรด์ไอออนในน้ำทะเล	5
2 ความเสียหายจากการเป็นสนิมของราวสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจาก ไอเกลือในบรรยากาศ	5
3 ขั้นตอนในการดำเนินการบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	7
4 แบบจำลองการวางแผนซ่อมแซมโครงสร้าง	8
5 ตำแหน่งการเสื่อมสภาพในเหล็กเสริมคอนกรีตที่ขั้วบวก (Anode) และ การเกิดสนิมที่ขั้วลบ (Cathode)	13
6 การแบ่งช่วงการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ไอออน	14
7 การสูญเสียหน้าตัดและเกิดสนิมขยายตัวในคอนกรีตเสริมเหล็ก	17
8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกัดกร่อน อัตราการกัดกร่อน และความกว้างรอยแตก	18
9 การแบ่งระดับการเสื่อมสภาพ	20
10 รอยแตกร้าวที่พื้นด้านบนสะพาน	21
11 การหลุดกะเทาะบริเวณพื้นด้านบนสะพาน	22
12 รอยแตกร้าวที่พื้นด้านใต้สะพาน	23
13 การหลุดกะเทาะบริเวณใต้พื้นสะพาน	23
14 การหลุดลอกบริเวณใต้พื้นสะพาน	24
15 การแตกร้าวบริเวณคานขวางของสะพานเนื่องจากแรงเฉือน	25
16 การหลุดกะเทาะบริเวณคานขวางของสะพาน	25
17 การหลุดลอกบริเวณคานขวางของสะพาน	26
18 การแตกร้าวที่เสาของสะพาน	26
19 การหลุดกะเทาะที่เสาของสะพาน	27
20 การสึกกร่อนบริเวณตอม่อสะพาน	27
21 ประเภทของการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์	28
22 การลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี	30
23 การถ่ายประจุไฟฟ้าในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	31
24 การซ่อมแซมด้วยวิธีการฉีดยาอัดรอยร้าว	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
25	ประเภทของวิธีการซ่อมแซมด้วยวิธีการเคลือบผิวคอนกรีต
26	การซ่อมคอนกรีตที่เสื่อมสภาพและหลุดล่อนในบริเวณแนวตั้งด้วยวิธีซ่อมแซมด้วยมือ
27	การซ่อมแซมด้วยวิธีแทนที่ด้วยคอนกรีตและเสริมเหล็กเสริม
28	การตรวจสอบและบันทึกผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยสายตาลงบนแบบฟอร์ม
	(ก) วัดขนาดสะพาน (ข) บันทึกขนาดและความเสียหายลงบนแบบฟอร์ม
29	การตรวจสอบตำแหน่งเหล็กเสริมและเก็บผงคอนกรีตจากโครงสร้าง (ก) การตรวจสอบตำแหน่งเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตด้วยเครื่องสแกนตำแหน่งเหล็กเสริม
	(ข) การเจาะเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตจากโครงสร้าง
30	ตำแหน่งที่ทำการเจาะเก็บผงคอนกรีตจากโครงสร้าง
31	การเก็บผงคอนกรีตและซ่อมแซมรูเจาะ (ก) ช่องเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตพร้อมทั้งระบุรายละเอียด (ข) การซ่อมแซมรูเจาะด้วยซีเมนต์ไร้การหดตัว
32	การทดสอบปริมาณคลอไรด์ในผงปูน (ก) การแช่ผงปูนในน้ำปราศจากไอออน
	(ข) การกรองผงปูน (ค) สารละลายโพแทสเซียมไนเตรต (ง) สารละลายโซเดียมคลอไรด์ กระตุ้นการทำงานของเครื่องทดสอบปริมาณคลอไรด์ไอออน
	(จ) การทดสอบปริมาณคลอไรด์ไอออน (ฉ) การทดสอบความเป็นกรด-เบส
33	ตัวอย่างภาพความเสียหายในระดับต่างๆ
34	เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในคานคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 4 ของสะพาน S1
35	เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในคานคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 5 ของสะพาน S2
36	เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในคานคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 1 ของสะพาน R1
37	เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในคานคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 0 ของสะพาน R2
38	เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในคานคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 0 ของสะพาน R3
39	ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีตจากชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน
40	ปริมาณคลอไรด์ที่ระดับเหล็กเสริมจากชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน
41	กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากชายฝั่งกับปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต
42	กราฟเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีตและปริมาณคลอไรด์ที่ระดับเหล็กเสริมกับระดับความเสียหายที่พบบริเวณคานสะพาน S1

สารบัญภาพ (ต่อ)

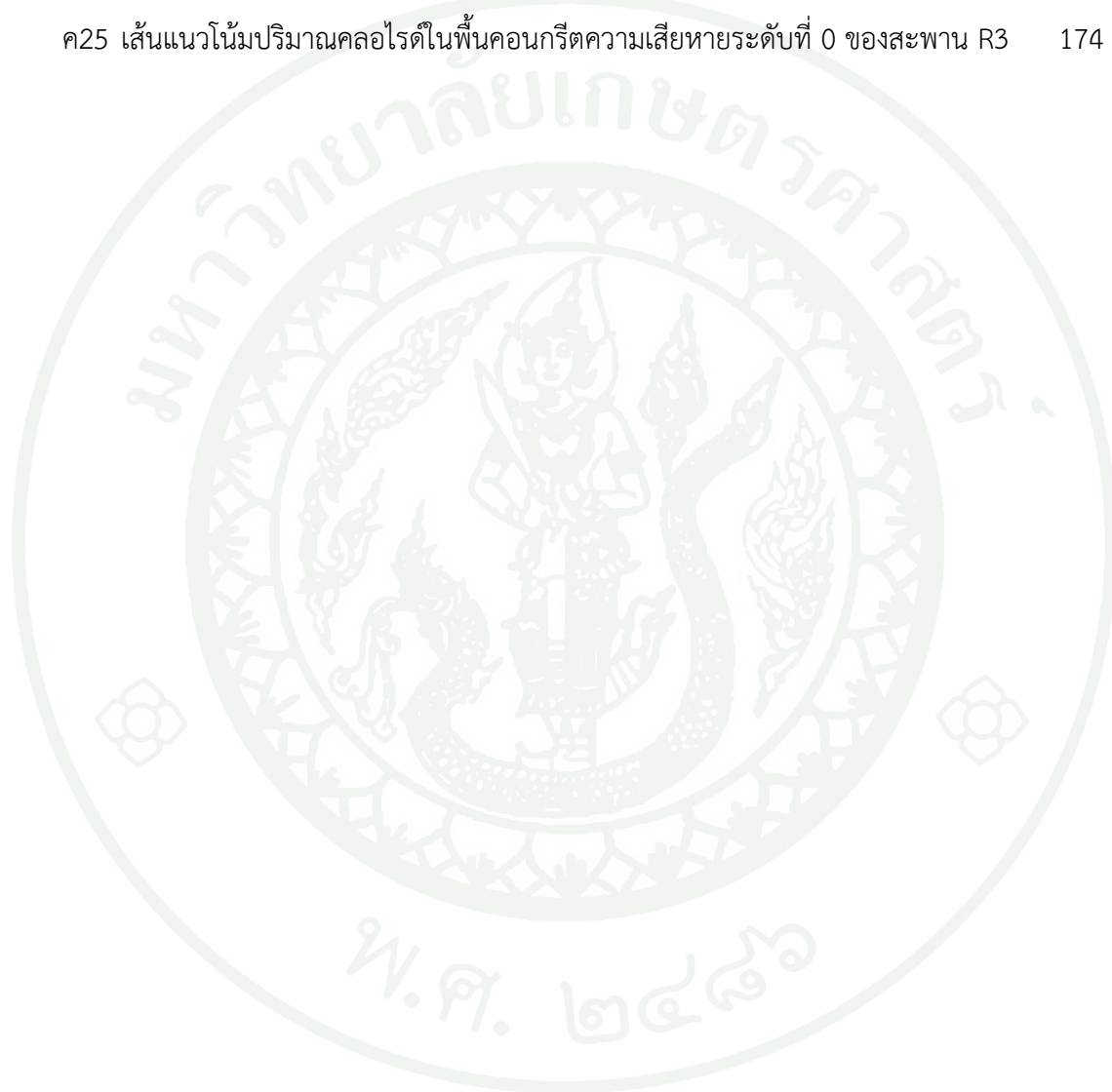
ภาพที่	หน้า
43 กราฟเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีตและปริมาณคลอไรด์ที่ระดับเหล็กเสริมกับระดับความเสียหายที่พบบริเวณเสาสะพาน R1	70
44 กราฟเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีตและปริมาณคลอไรด์ที่ระดับเหล็กเสริมกับระดับความเสียหายที่พบบริเวณเสาสะพาน R1	71
45 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพจากกฎข้อที่สองของฟิคและสมการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมของ JCI	75
46 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพจากกฎข้อที่สองของฟิคและสมการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมของ Markeset	76
47 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพจากสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน S1	77
48 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพจากสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน S2	78
49 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพจากสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน R1	79
50 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพจากสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน R2	80
51 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพจากสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน R3	81
52 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพจากสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน S1	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
53 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพ จากสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการ ของ Markeset ของสะพาน S2	83
54 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพ จากสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการ ของ Markeset ของสะพาน R1	84
55 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพ จากสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการ ของ Markeset ของสะพาน R2	85
56 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพ จากสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการ ของ Markeset ของสะพาน R3	85
57 กราฟเปรียบเทียบระดับการเสื่อมสภาพที่ตรวจพบด้วยสายตา กับ ระดับการเสื่อมสภาพจากการทำนายด้วยแบบจำลองของสะพาน S1 S2 และ R1	96
 ภาพผนวกที่	
ข1 ปริมาณคลอไรด์ตามความลึกของคานสะพาน S1	148
ข2 ปริมาณคลอไรด์ตามความลึกของเสาสสะพาน S1	149
ข3 ปริมาณคลอไรด์ตามความลึกของพื้นสะพาน S1	149
ข4 ปริมาณคลอไรด์ตามความลึกของคานสะพาน S2	151
ข5 ปริมาณคลอไรด์ตามความลึกของเสาสสะพาน S2	152
ข6 ปริมาณคลอไรด์ตามความลึกของพื้นสะพาน S2	152
ข7 ปริมาณคลอไรด์ตามความลึกของคานสะพาน R1	155
ข8 ปริมาณคลอไรด์ตามความลึกของเสาสสะพาน R1	155
ข9 ปริมาณคลอไรด์ตามความลึกของพื้นสะพาน R1	156
ข10 ปริมาณคลอไรด์ตามความลึกของคานสะพาน R2	158

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ค24 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในคานคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 0 ของสะพาน R3	173
ค25 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในพื้นที่คอนกรีตความเสียหายระดับที่ 0 ของสะพาน R3	174



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

กม.	=	กิโลเมตร
ม.ม.	=	มิลลิเมตร
ซม.	=	เซนติเมตร
ม.	=	เมตร
กก./ซม. ²	=	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
กก./ม. ³	=	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ซม. ² /ปี	=	ตารางเซนติเมตรต่อปี
มก./ม. ³	=	มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
ม. ² /วินาที	=	ตารางเมตรต่อวินาที
km	=	กิโลเมตร
kg/m ³	=	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
mA/m ²	=	มิลลิแอมป์ต่อตารางเมตร
MPa	=	เมกะปาสคาล
μA/cm ²	=	ไมโครแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร
μm	=	ไมโครเมตร
ISE	=	Ion Selective Electrode

แนวทางการซ่อมแซมสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์และ การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน

Repair Guideline and Life Cycle Cost Analysis of Reinforced Concrete Bridge Deteriorated by Chloride Attack

คำนำ

สะพานในประเทศไทยมีอยู่เป็นจำนวนมากและสะพานจำนวนหนึ่งตั้งอยู่ในบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเล ในทะเล หรือบริเวณที่โครงสร้างสะพานได้รับผลกระทบจากเกลือและคลอไรด์ เช่น สะพานเชื่อมระหว่างแผ่นดินใหญ่กับเกาะ สะพานข้ามแม่น้ำ, ลำคลอง ปัญหาที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างที่เผชิญสภาวะสิ่งแวดล้อมทะเล คือความคงทนของโครงสร้างอันเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของวัสดุซึ่งจัดเป็นสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงชนิดหนึ่ง การเสื่อมสภาพของโครงสร้างชายฝั่งทะเลนั้นอาจเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น การกัดเซาะ การตกผลึกของเกลือ และอีกสาเหตุสำคัญอย่างหนึ่งคือการสูญเสียชั้นฟิล์มของเหล็กเสริม โครงสร้างเหล่านี้จะมีการผุกร่อนที่รวดเร็วกว่าโครงสร้างโดยทั่วไปโดยเกลือและคลอไรด์จะไปทำลายชั้นฟิล์มที่เคลือบเหล็กเสริม เมื่อชั้นฟิล์มที่ปกป้องเหล็กเสริมสูญเสียไป การผุกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีตก็จะเกิดขึ้น สาเหตุเหล่านี้ส่งผลให้อายุการใช้งานของโครงสร้างสั้นลงกว่าที่ได้ออกแบบไว้

ปัจจุบันกรมทางหลวงชนบทมีสะพานในขนาดเล็กที่ต้องรับผิดชอบบำรุงรักษาจำนวนมากคือมากกว่า 8,000 สะพาน ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบสะพานอยู่เสมอเพื่อป้องกันความเสียหายหรืออุบัติเหตุของสะพาน ซึ่งในปัจจุบันกรมทางหลวงชนบทได้ศึกษาและพัฒนากระบวนการบริหารบำรุงสะพาน (Bridge Maintenance Management System: BMMS) โดยได้รับความร่วมมือจากองค์การความร่วมมือระหว่างประเทศของญี่ปุ่น (JICA) ในการตรวจสอบและเก็บข้อมูลสะพาน ทั้งข้อมูลทางกายภาพและข้อมูลความเสียหายของสะพาน

ดังนั้นการประเมินโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ และวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายเพื่อเปรียบเทียบทางเลือกในการซ่อมแซมโครงสร้างจึงเป็นแนวทางในการซ่อมแซมสะพานได้อย่างตรงกับสาเหตุการเสื่อมสภาพและเหมาะสมสูงสุด อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการจัดทำคู่มือบำรุงรักษาสะพานที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ต่อไป

วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ตรวจสอบโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ด้วยสายตาและเจาะเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตจากชิ้นส่วนโครงสร้างเพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์
2. ทำนายอายุและเปรียบเทียบผลการทำนายกับสภาพจริงของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ด้วยแบบจำลองการเสื่อมสภาพ
3. เสนอแนวทางการซ่อมแซมโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ที่เหมาะสมกับแต่ละระดับการเสื่อมสภาพ

ขอบเขตการวิจัย

กรมทางหลวงชนบทมีสะพานที่ต้องบำรุงรักษามากกว่า 8,000 แห่งและส่วนหนึ่งเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ ดังนั้นจึงทำการศึกษาโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องมาจากการกัดกร่อนโดยคลอไรด์จำนวน 5 สะพานในภาคกลางและภาคตะวันออก โดยกำหนดขอบเขตดังนี้

1. ตรวจสอบความเสียหายที่พบบนโครงสร้างด้วยสายตาอ้างอิงตามการประเมินระดับการเสื่อมสภาพด้วยสายตาของ International Committee on Concrete Model Code for Asia (2004) และเจาะเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้าง
2. ทำนายอายุการใช้งานที่คงเหลือของโครงสร้างจากระยะเวลาเริ่มต้นการกัดกร่อนด้วยกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) และสมการของพัลวิส (Pulvis) ร่วมกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมคอนกรีตด้วยสมการของ JCI และสมการของมาเคเซท (Markeset)

3. คำนวณค่าใช้จ่ายส่วนค่าแรงงานและค่าวัสดุของโครงสร้างสะพานส่วนเหนือพื้นดินในปีที่ก่อสร้างสะพานร่วมกับค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาโครงสร้างด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 41 วิธี ในรูปแบบค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อปี เพื่อเปรียบเทียบแนวทางการซ่อมแซมโครงสร้างที่เหมาะสมในแต่ละระดับความเสียหาย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. การมีระบบการประเมินสภาพโครงสร้างเพื่อบำรุงรักษาที่เหมาะสม จะมีผลต่ออายุการใช้งานของสะพานที่ยืนยาวมากขึ้น
2. ข้อมูลบริเวณและระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ ทำให้สามารถออกแบบโครงสร้างเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเสียหายที่จะเกิดสำหรับสะพานใหม่ที่จะสร้างใหม่ในอนาคตได้อย่างเหมาะสมมากขึ้น
3. เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาผลของการกัดกร่อนในโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กอันเนื่องมาจากคลอไรด์
4. ทำให้ได้แนวทางการป้องกันหรือซ่อมแซมโครงสร้างและค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานที่เหมาะสมสูงสุด ซึ่งเป็นประโยชน์ในการลดงบประมาณในการซ่อมแซมโครงสร้าง และสามารถนำเงินไปเพิ่มงบประมาณในการพัฒนาระบบโครงสร้างพื้นฐานอย่างอื่นได้

การตรวจเอกสาร

1. แนวคิดและทฤษฎี

การออกแบบโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในปัจจุบัน วิศวกรผู้ออกแบบมักจะคำนึงถึงคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเป็นหลัก เช่นกำลังรับแรงอัดหรือกำลังรับแรงดัดของโครงสร้าง โดยไม่คำนึงถึงการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง แต่ในความเป็นจริงโครงสร้างสะพานที่เผชิญสภาวะคลอไรด์ เช่น สะพานที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเล หรือในทะเล เป็นโครงสร้างที่ต้องการความทนทานเป็นพิเศษ เนื่องจากต้องเผชิญการกัดกร่อนทั้งจากแรงกระทำทางกล เช่น คลื่นลม หรือแรงกระแทกจากน้ำ นอกจากนี้ยังได้รับผลกระทบจากการกัดกร่อนจากคลอไรด์และอิทธิพลน้ำขึ้นน้ำลง จึงทำให้โครงสร้างมีแนวโน้มเสื่อมสภาพเร็วขึ้น มีอายุใช้งานสั้นกว่าที่ออกแบบไว้ หากโครงสร้างขาดการดูแลตรวจสอบจะส่งผลให้สะพานชำรุดและวิบัติลงในที่สุด ดังนั้นเพื่อให้เกิดความคุ้มค่าจึงต้องมีการตรวจสอบและซ่อมบำรุงที่เหมาะสมกับความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง โดยใช้หลักการประเมินความเสียหายและทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างที่คงเหลือในอนาคต เพื่อนำมาวิเคราะห์แนวทางในการวางแผนซ่อมแซมต่อไป

การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นหนึ่งในรูปแบบการเสื่อมสภาพของโครงสร้างที่เผชิญสภาวะคลอไรด์และพบเห็นได้ทั่วไปในประเทศไทยโดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ใกล้ทะเล โดยทั่วไปเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตนั้นจะได้รับการปกป้องจากการเกิดสนิม ด้วยสภาวะความเป็นด่างของคอนกรีตจากการที่ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำและเกิดฟิล์มบางๆเคลือบผิวเหล็กไว้ อย่างไรก็ตามสภาพการปกป้องเหล็กเสริมในคอนกรีตไว้นั้นเสียหายเมื่อคอนกรีตมีความเป็นด่างลดลงถึงระดับหนึ่งจากสาเหตุ เช่น การเกิดคาร์บอนขึ้น หรือเมื่อมีไอออนที่สามารถทำลายฟิล์มที่ป้องกันเหล็กและทำให้เกิดสนิม เช่น คลอไรด์ไอออน ทำลายชั้นฟิล์มออกไซด์ ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) ของเหล็กเสริมลง (Protective Passivity Layer) (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)

คอนกรีตที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทะเลมักจะเกิดปัญหาการผุกร่อนแตกร้าวบนโครงสร้าง ทั้งโครงสร้างส่วนบน และโครงสร้างส่วนล่างเนื่องจากการเผชิญคลอไรด์ไอออนจากน้ำทะเลและไอน้ำทะเลในบรรยากาศ ดังแสดงในภาพที่ 1 และ ภาพที่ 2



ภาพที่ 1 ความเสียหายจากการเป็นสนิมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากคลอไรด์ไอออนในน้ำทะเล

ภาพที่ 1 แสดงให้เห็นลักษณะความเสียหายของสะพานบริเวณอำเภอบางปะกง จังหวัดฉะเชิงเทรา ก่อสร้างโดยกรมโยธาธิการเมื่อปี พ.ศ. 2541 พบว่าเสาสะพานมีการเสื่อมสภาพจากการที่เหล็กเสริมภายในคอนกรีตเป็นสนิมเนื่องจากคลอไรด์ เกิดการขยายตัวดันจนคอนกรีตหุ้มแตกร้าวและหลุดร่อนออก อีกทั้งบริเวณนั้นอยู่ในช่วงของที่มีกระแสน้ำขึ้น-น้ำลง ซึ่งบริเวณดังกล่าวโอกาสการเป็นสนิมของเหล็กเสริมนั้นเป็นไปได้ง่าย สังเกตได้จากคราบน้ำทะเลที่ปรากฏอยู่



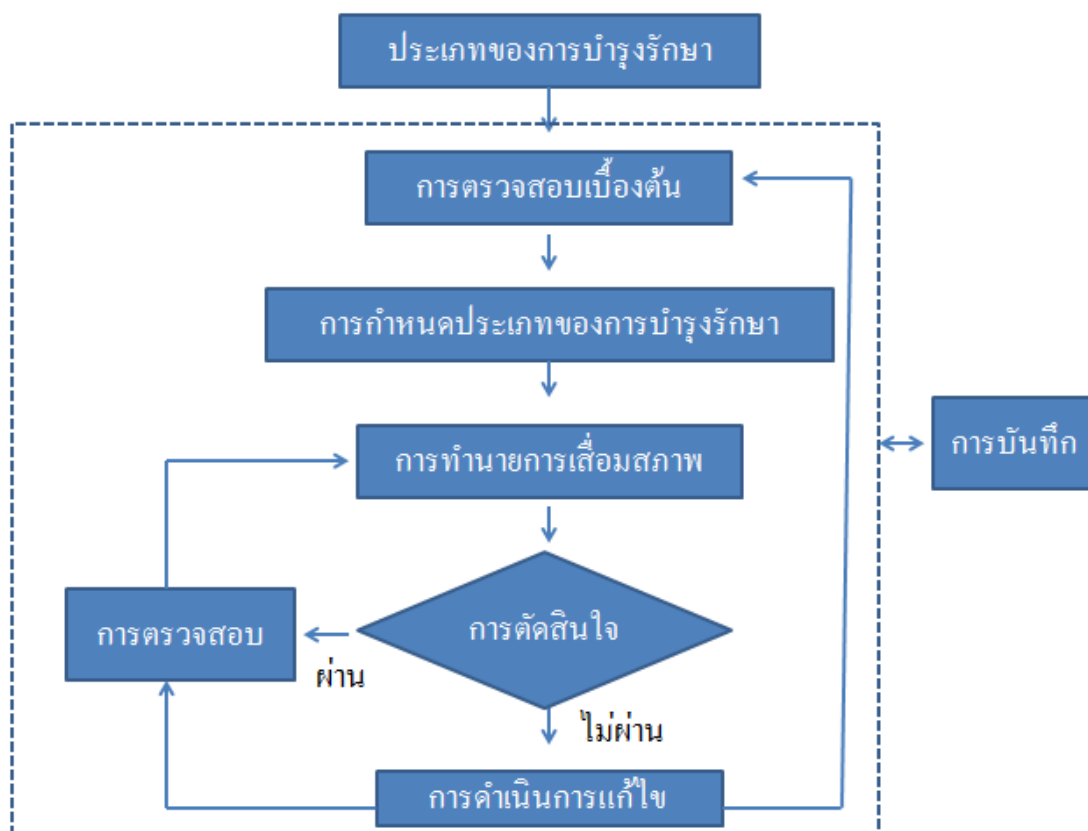
ภาพที่ 2 ความเสียหายจากการเป็นสนิมของราวสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากไอเกลือในบรรยากาศ

ภาพที่ 2 แสดงความเสียหายของราวสะพานบริเวณอำเภอบางปะกง จังหวัดฉะเชิงเทรา ก่อสร้างโดยกรมโยธาธิการเมื่อปี พ.ศ. 2541 แม้ว่าบริเวณราวสะพานด้านบนที่จะไม่ได้สัมผัสกับน้ำทะเลโดยตรงแต่ไอระเหยจกน้ำทะเลก็ส่งผลให้เหล็กเสริมเป็นสนิมได้โดยง่าย

การดูแลรักษาโครงสร้างบริเวณชายฝั่งทะเล หรือห่างจากทะเลไม่มากนัก มักพบปัญหาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเร็วกว่าที่ควรเป็น ทำให้โครงสร้างมีอายุการใช้งานสั้นกว่าที่ออกแบบ และต้องสูญเสียงบประมาณในการซ่อมแซมบำรุงรักษาจำนวนมาก ดังนั้นระบบบริหารการบำรุงรักษาสะพาน (Bridge Maintenance Management System: BMMS) จะเป็นขั้นตอนในการตัดสินใจ เพื่อเสนอแนวทางที่เหมาะสมในการดูแลรักษาตลอดอายุการใช้งานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กควรมีระบบการบำรุงรักษาที่เหมาะสมเพื่อที่สามารถใช้งานได้ตลอดอายุการใช้งาน โดยสามารถประยุกต์ระบบบริหารการบำรุงรักษาสะพานเพื่อใช้กับสะพานที่เสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากคลอไรด์ได้

International Committee on Concrete Model Code for Asia (2004) ได้เสนอขั้นตอนในการบำรุงรักษาที่ให้ความสำคัญกับการตรวจสอบเบื้องต้นเนื่องจากเป็นสิ่งที่ช่วยกำหนดแนวทางในการซ่อมแซมโครงสร้าง และแนวทางการบำรุงรักษาโดยอาศัยการทำนายการเสื่อมสภาพดังแสดงในภาพที่ 3

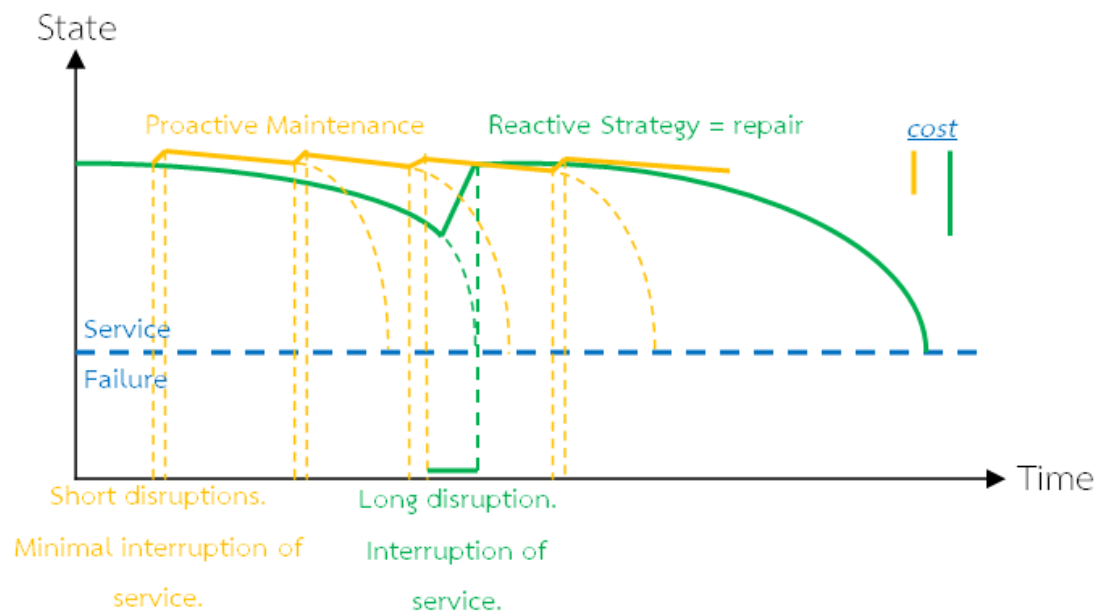


ภาพที่ 3 ขั้นตอนในการดำเนินการบำรุงรักษาโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ที่มา : International Committee on Concrete Model Code for Asia (2004)

Building Research Establishment Ltd. (2003) เสนอว่าระบบการจัดการตลอดอายุการใช้งานที่สามารถใช้เป็นเครื่องมือประเมินแนวโน้มอัตราของการกัดกร่อนของโครงสร้างโดยใช้ผลจากการประเมินอัตราการกัดกร่อนในเหล็กเสริม และพิจารณาระดับการกัดกร่อนสูงสุดที่ยอมได้ในเหล็กเสริม และการเสื่อมสภาพเนื่องจากสาเหตุภายนอกอื่นๆ เช่น คลอไรด์ เป็นต้น โดยวิเคราะห์อัตราการกัดกร่อนที่สามารถลดได้ในโครงสร้างเพื่อให้โครงสร้างมีอายุยืนยาวที่สุด แนวคิดนี้แสดงในภาพที่ 4 ซึ่งจะเห็นความแตกต่างของแนวทางการซ่อมแซมโครงสร้างที่ใช้วิธีการซ่อมแซมต่างกันโดยใช้รูปแบบการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเพื่อสร้างทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการซ่อมแซมโครงสร้าง เช่น ซ่อมพื้นผิว หรือ การซ่อมโดยวิธีการให้กระแสไฟฟ้า เป็นต้น จากภาพที่ 4 พบว่าการตรวจบำรุงรักษาโครงสร้างที่กระทำทุกๆ 5 ปี เพื่อป้องกันโครงสร้างก่อนโครงสร้างวิบัติ จะใช้ระยะเวลาบำรุงรักษาสั้นกว่าการซ่อมแซมโครงสร้างด้วยวิธีอื่นๆ ที่กระทำเมื่อพบความเสียหายแล้ว และต้องกระทำการบำรุงรักษาบ่อยครั้ง ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานในโครงสร้างมี

ค่าใช้จ่ายรวมที่สูงขึ้น ดังนั้นการวิเคราะห์ทางเลือกในการบำรุงรักษาโครงสร้างเป็นรูปแบบค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานที่เป็นมูลค่าปัจจุบันจะให้ทางเลือกที่เหมาะสมสูงสุดได้



ภาพที่ 4 แบบจำลองการวางแผนซ่อมแซมโครงสร้าง

ที่มา : Building Research Establishment Ltd. (2003)

สาเหตุหนึ่งในการเสื่อมสภาพของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญสภาวะแวดล้อมทะเลคือการขาดความเข้าใจในกระบวนการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง ทำให้ไม่มีการวางแผนบำรุงรักษาและประเมินสภาพสะพานที่ดีพอ ดังนั้นการศึกษากลไกการกัดกร่อนในเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์เพื่อให้มีความเข้าใจถึงสาเหตุของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานได้อย่างถูกต้องจึงเป็นเรื่องสำคัญต่อการประเมินการเสื่อมสภาพของโครงสร้างได้อย่างตรงสาเหตุ ซึ่งการประเมินโครงสร้างสะพานทำได้หลายวิธี เช่น การตรวจสอบประเมินโครงสร้างสะพานเบื้องต้นด้วยสายตาและประเมินการเสื่อมสภาพของคอนกรีตตามระดับความเสื่อมสภาพ จากนั้นเจาะเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตเพื่อทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ตามความลึก และรวบรวมข้อมูลบริเวณที่สะพานเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ ท้ายที่สุดข้อมูลเหล่านี้จะนำไปใช้วิเคราะห์เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับผลกระทบจากคลอไรด์โดยเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมแต่ละทางเลือก เพื่อหาวิธีที่เหมาะสมกับแต่ละระดับความเสียหายในโครงสร้างได้

2. การเสื่อมสภาพของโครงสร้างเนื่องจากคลอไรด์ในคอนกรีต

การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผชิญสภาวะสิ่งแวดล้อมทะเล มีสาเหตุหลักมาจากเกลือคลอไรด์ทั่วไปซึ่งมีปริมาณร้อยละ 1.8 โดยน้ำหนักน้ำทะเล (ทวีชัย, 2554) และเป็นสาเหตุหลักของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมโครงสร้างอีกทั้งยังส่งผลด้านคุณสมบัติทางกลในระยะยาว โดยเกลือคลอไรด์นั้นแบ่งประเภทตามที่มาได้ 2 อย่างคือ จากส่วนประกอบในการผสมคอนกรีตและการปนเปื้อนจากสภาวะแวดล้อมภายนอกหลังจากการใช้งานโครงสร้างไปแล้ว

การเจือปนของคลอไรด์จากส่วนผสมคอนกรีตมีที่มาจากหลายสาเหตุ เช่น การใช้น้ำยาผสมคอนกรีตที่มีส่วนประกอบของแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) เป็นต้น ส่วนการปนเปื้อนหลังจากใช้งานโครงสร้างไปแล้วอาจมีสาเหตุมาจากการซึมผ่านจากดิน การสัมผัสละอองน้ำทะเล หรือการใช้เกลือละลายน้ำแข็ง (Deicing salt) ในประเทศที่มีอากาศหนาว อย่างไรก็ตามมีการกำหนดปริมาณเกลือคลอไรด์สูงสุดและเกลือคลอไรด์อิสระที่ยอมรับในแต่ละโครงสร้างตามมาตรฐาน ACI และ BS ดังแสดงในตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดสูงสุดในคอนกรีตจากมาตรฐานและข้อกำหนดต่างๆ

ประเภทโครงสร้าง	ปริมาณคลอไรด์สูงสุด (%โดยน้ำหนักของซีเมนต์)			
	BS 8110	ACI 201	ACI 357	ACI 222
คอนกรีตอัดแรง	0.10		0.06	0.08
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะเผชิญคลอไรด์				
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแห้งหรือไม่มีความชื้น	0.20	0.10	0.10	0.20
คอนกรีตเสริมเหล็กอื่นๆ	0.40	0.15		

ACI 201: American Concrete Institute for guide for durable concrete

ACI 357: American Concrete Institute for guide for the design and construction of fixed concrete offshore structures

ACI 222: American Concrete Institute for corrosion of metals in concrete

BS 8110: British Standard for structural use of concrete

ที่มา : BS (1985), ACI (1997, 2001, 2008)

ปริมาณเกลือคลอไรด์ที่เข้าสู่ภายในคอนกรีตทั้งหมดเรียกว่า เกลือคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ซึ่งเป็นผลรวมของเกลือสองประเภทคือคลอไรด์ที่ถูกยึดจับ (Fixed chloride) กับเกลือคลอไรด์อิสระ (Free chloride) (คณะกรรมการการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)

ตารางที่ 2 ปริมาณคลอไรด์อิสระสูงสุดในคอนกรีตจากมาตรฐานและข้อกำหนดต่างๆ

ประเภทโครงสร้าง	ปริมาณคลอไรด์สูงสุด (%โดยน้ำหนักของซีเมนต์)	
	ACI 318	ACI 222
คอนกรีตอัดแรง	0.06	0.06
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะเผชิญคลอไรด์	0.15	0.15
คอนกรีตเสริมเหล็กในสภาวะแห้งหรือไม่มีความชื้น	1.00	
คอนกรีตเสริมเหล็กอื่นๆ	0.30	

ACI 318: American Concrete Institute for building code requirements for structural concrete and commentary

ACI 222: American Concrete Institute for corrosion of metals in concrete

ที่มา : ACI (1997, 2001)

เกลือคลอไรด์ที่ถูกยึดจับไม่มีผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมคอนกรีต เนื่องจากเป็นเกลือที่ยึดจับไว้ด้วยปฏิกิริยาและเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบแคลเซียมคลอโรลูมิเนียมไฮเดรต (Calcium Chloroaluminate hydrate) หรือเรียกว่า เกลือฟรีเดล (Friedel's salt) หรือถูกจับด้วยปฏิกิริยาไฮเดรชันไว้ที่ผิวบางส่วน เช่น C-S-H และ C-A-H ส่วนเกลือคลอไรด์อิสระคือเกลือคลอไรด์ที่ละลายอยู่ในช่องว่างของคอนกรีต (Pore solution) โดยถ้ามีปริมาณเพียงพอจะส่งผลให้เกิดสนิมขึ้นได้

การเคลื่อนที่ของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีตซึ่งเรียกว่า การแทรกซึมของคลอไรด์ (Chloride penetration) เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้คอนกรีตเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ทำปฏิกิริยากับคอนกรีต สามารถแบ่งสถานะการแทรกซึมของคลอไรด์ได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

1.) จากการแพร่ (Diffusion) เป็นการเคลื่อนที่ของเกลือคลอไรด์จากความแตกต่างของความเข้มข้นของเกลือคลอไรด์เข้าไปยังโพรงของคอนกรีตอิมพั ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law of diffusion) โดยแสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณเกลือคลอไรด์

ทั้งหมดและปริมาณเกลือคลอไรด์อิสระในคอนกรีตเทียบกับระยะทางและเวลา ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$\frac{\partial C_t(x,t)}{\partial t} = -D_a \frac{\partial^2 C_f(x,t)}{\partial^2 x} \quad (1)$$

โดยที่ x คือ ระยะทางจากผิวด้านนอกของคอนกรีต (ซม.)
 t คือ ระยะเวลาที่เผชิญคลอไรด์ (ปี)
 $C_t(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะทาง x จากผิวด้านนอกที่ระยะเวลา t (โมล/ลิตร)
 D_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ในคอนกรีต

2.) จากการดูดไอออน (Ion absorption) เกิดกับโครงสร้างที่อยู่ใต้น้ำทะเลหรือเปียกตลอดเวลา โดยคอนกรีตผิวหน้าจะมีความเข้มข้นเกลือคลอไรด์สูงกว่าความเข้มข้นของเกลือในน้ำทะเล เนื่องจากโพรงคอนกรีตบริเวณผิวมีประจุไฟฟ้าเป็นบวกดึงดูดเกลือคลอไรด์ที่มีประจุเป็นลบเข้ามาภายในคอนกรีต

3.) จากแรงดันน้ำ (Hydraulic pressure) เกิดกับโครงสร้างภายใต้สภาวะน้ำที่มีแรงดัน เช่น อุโมงค์ เขื่อน เป็นต้น ความแตกต่างของแรงดันน้ำทำให้เกลือคลอไรด์เคลื่อนที่เข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้

4.) จากการดึงดูดคาพิลลารี (Capillary suction) เป็นการที่เกลือคลอไรด์เคลื่อนจากภายนอกเข้าไปในโพรงบริเวณผิวหน้าของคอนกรีต พบมากเมื่อโครงสร้างอยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้ง

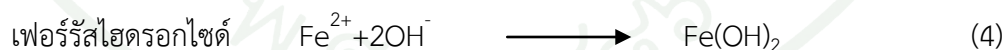
โครงสร้างคอนกรีตที่อยู่ใกล้ทะเลจะเกิดการผุกร่อนของเหล็กเสริมเนื่องจากผลกระทบจากคลอไรด์ แต่ความเสี่ยงที่จะเกิดผลกระทบต่อโครงสร้างมักพบมากในโครงสร้างที่โดนละอองน้ำทะเล และโครงสร้างที่อยู่ในสภาวะเปียกสลับแห้งมากกว่าโครงสร้างที่อยู่ใต้น้ำทะเลตลอดเวลา

โครงสร้างที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้งนั้น คอนกรีตที่แห้งจะเปลี่ยนจากสภาพอิมมัตว์เนื่องจากได้รับเกลือคลอไรด์และน้ำทะเลเข้าไปในคอนกรีตด้วยการแพร่ และการดึงดูดคาพิลลารีซึ่งเมื่อน้ำลงสภาพภายนอกเปลี่ยนเป็นแห้งและเกิดคราบเกลือขึ้นจากนั้นเมื่อเกิดน้ำขึ้นอีกรอบคราบเกลือจึงกลับ

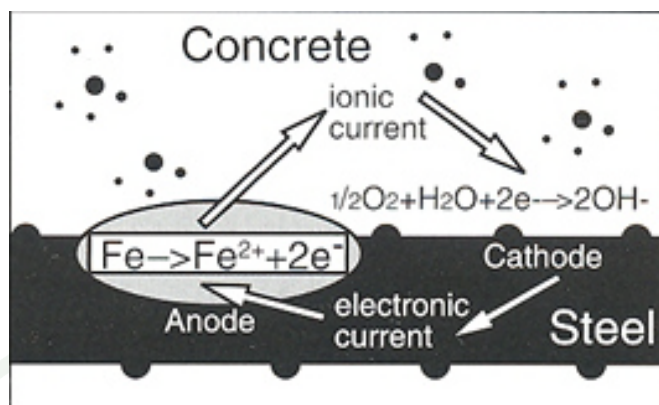
อยู่ในสภาพเปียกอีกครั้ง ความเข้มข้นของคลอไรด์ที่ผิวจึงสูงขึ้น ดังนั้นไอออนของคลอไรด์ซึ่งมีความเข้มข้นสูงที่ผิวจะซึมเข้าสู่ภายในโดยการแพร่ ซึ่งในแต่ละรอบของการเปียกและการแห้ง จะทำให้คลอไรด์บริเวณที่ใกล้ผิวมีความเข้มข้นสูงขึ้นเรื่อยๆ และจะเข้าไปสู่บริเวณคอนกรีตและบริเวณเหล็กเสริมมากขึ้น โดยปกติแล้วภายในของคอนกรีตนั้นไม่สามารถ ทำให้แห้งโดยสมบูรณ์ ดังนั้นการแพร่ของไอออนของคลอไรด์เข้าไปในคอนกรีต ที่แช่อยู่ในน้ำทะเลตลอดเวลา จึงช้ากว่าการเข้าไปของคลอไรด์โดยการเปียกสลับแห้งโดยน้ำทะเล

การเคลื่อนที่ของคลอไรด์ไอออนเข้าไปในเนื้อคอนกรีตนั้นโดยทั่วไปแล้วมักได้รับอิทธิพลจากภาวะความเปียกแห้งเป็นเวลานานกว่าอยู่ในสภาพเปียกมักจะเร่งไอออนของคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตได้เร็วขึ้น แต่ปัจจัยอื่นเช่น อุณหภูมิ ความชื้น การไหลของน้ำทะเล ทิศทางลม ทิศทางแสงอาทิตย์ และการใช้งานของโครงสร้าง ทำให้ในโครงสร้างที่อยู่ในภาวะเปียกสลับแห้งเหมือนกัน มีการผุกร่อนที่ไม่เท่ากัน และการกัดกร่อนจะเกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณไอออนของคลอไรด์เป็นจำนวนมากที่ผิวของเหล็กเสริม ซึ่งทำให้ค่าความเป็นด่างของคอนกรีตลดลงจนถึงระดับวิกฤต (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ [ว.ส.ท.], 2543)

การเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีตเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เกิดเมื่อของเหลวรอบเหล็กเสริมคอนกรีตสูญเสียอิเล็กตรอนและแตกตัวเป็นประจุ ส่งผลให้เหล็กเสริมเกิดการขยายตัวเพิ่มปริมาตร 2-8 เท่า ดังสมการที่ (2) ถึง (6) (Neville 2002)



ปฏิกิริยานี้ประกอบด้วยสองส่วนคือ เกิดการสูญเสียประจุของเหล็กเข้าไปในสารละลายที่ขั้วบวก (Anodic Reaction) ขณะที่ขั้วลบ (Cathode Reaction) เกิดการรวมตัวระหว่างไอออนบวกออกซิเจน และน้ำ ได้ผลผลิตเป็นอะตอมในขั้วลบ ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ตำแหน่งการเสื่อมสภาพในเหล็กเสริมคอนกรีตที่ขั้วบวก (Anode) และการเกิดสนิมที่ขั้วลบ (Cathode)

ที่มา : Broomfield (1997)

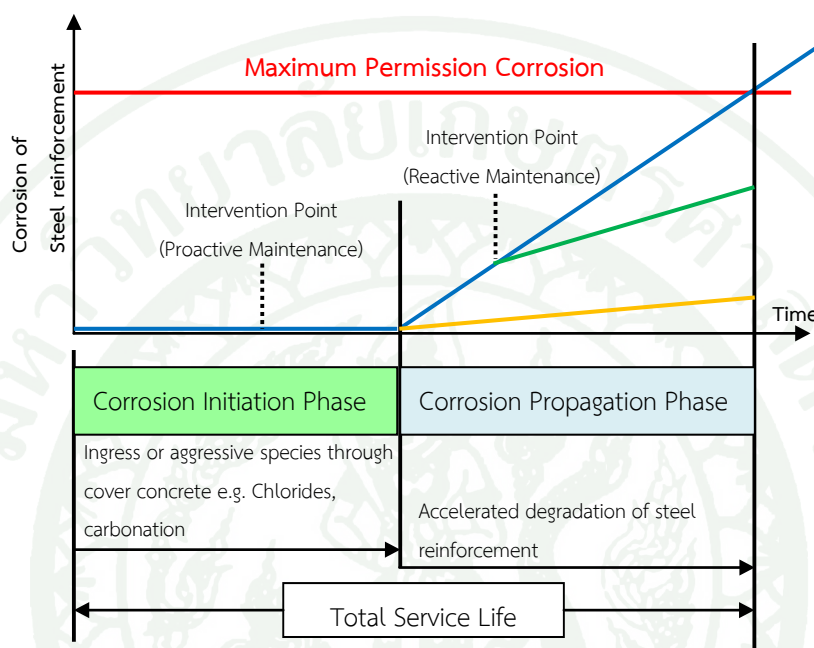
คลอไรด์ไอออนเคลื่อนที่ในคอนกรีตได้โดยอาศัยการเคลื่อนย้ายน้ำในช่องว่าง (Pore) ซึ่งช่องว่างขนาดเล็กในคอนกรีตนั้นมีอยู่มากมาย เมื่อคลอไรด์ซึมผ่านเข้าไปจนถึงผิวของเหล็กเสริมแล้วชั้นฟิล์มถูกทำลาย (Depassivation) จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้มีความเสี่ยงต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริม และหากมีความชื้นและออกซิเจนที่เพียงพอ กระบวนการไฟฟ้าเคมีก็จะเกิดขึ้น

ฟิล์มป้องกัน (Passivation Film) เกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่ได้จากปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นด่างสูง (ค่า PH 12.5 -13.0) (Kouloumbi and Batis, 1992) ก่อเกิดเป็นชั้นฟิล์มออกไซด์บางๆบนผิวเหล็กเสริมทำหน้าที่ป้องกันเหล็กเสริมเป็นสนิม ถ้าฟิล์มป้องกันของเหล็กเสริมในคอนกรีตเสียหาย อาจเกิดเนื่องจากการซึมผ่านของคลอไรด์จึงเป็นสาเหตุของการเกิดสนิม (Amir Poursaee, 2010)

กระบวนการกัดกร่อนบนเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถแยกได้เป็น 2 ช่วง ดังแสดงในภาพที่ 6

1. Initiation phase เป็นช่วงเวลาที่คลอไรด์ไอออนซึมผ่านเข้าไปในเนื้อคอนกรีตจนถึงระดับเหล็กเสริมและมีความเข้มข้นถึงระดับวิกฤต (Threshold) ซึ่งเป็นระดับที่ฟิล์มออกไซด์ที่เคลือบตามผิวเหล็กเสริมถูกทำลายต่อจากนั้นเหล็กเสริมบริเวณนั้นจะเริ่มผุกร่อนเสียหายได้

2. Propagation phase เป็นช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้า ทำให้การผุกร่อนบนเหล็กเสริมเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องรวดเร็วจนอาจเกิดสนิม หรือรอยร้าวบนคอนกรีต และเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัด



ภาพที่ 6 การแบ่งช่วงการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ไอออน

ที่มา : Building Research Establishment Ltd. (2003)

3. การจัดบริเวณการเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์

บริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากเกลือคลอไรด์ได้แก่ โครงสร้างที่อยู่ในทะเลและ โครงสร้างที่โดนละอองจากทะเล แม้ว่าโครงสร้างจะอยู่ห่างจากบริเวณทะเล 3 กิโลเมตร แต่ก็ยังเกิดการสะสมของคลอไรด์ได้เนื่องจากลมที่พัดจากแนวชายฝั่งเข้าสู่แผ่นดินซึ่งทำให้ความเข้มข้น ปริมาณคลอไรด์สะสมที่ผิวคอนกรีตสูงมากขึ้นตามเวลา McGee (1999) ทำการศึกษาสะพาน 1,158 แห่ง ในประเทศออสเตรเลีย พบว่าความเข้มข้นของปริมาณคลอไรด์สะสมจะขึ้นกับลักษณะภูมิประเทศและสภาวะอากาศอีกด้วย แต่พบว่าไม่ส่งผลกระทบมากกับพื้นที่ที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลเกิน 4 เมตร และเสนอความสัมพันธ์ของปริมาณคลอไรด์สะสมที่ผิวต่อระยะทางดังแสดงในสมการที่ (7) ถึง (9)

$$C_0 = 2.95 \text{ kg/m}^3 \quad d < 0.10 \text{ km} \quad (7)$$

$$C_0 = 1.15 - 1.81 \log_{10}(d) \text{ kg/m}^3 \quad 0.10 \text{ km} < d < 2.84 \text{ km} \quad (8)$$

$$C_0 = 0.03 \text{ kg/m}^3 \quad d > 2.84 \text{ km} \quad (9)$$

โดยที่ C_0 คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต
 d คือ ระยะห่างจากชายฝั่งทะเล

4. การตรวจสอบและประเมินความเสียหายของโครงสร้างด้วยสายตา

Port and Harbor Research Institute (1999) กำหนดหลักเกณฑ์พิจารณาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างเนื่องจากเหล็กเสริมเป็นสนิมนั้นเพื่อใช้ในกระบวนการหาสาเหตุของการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง รวมไปถึงการประเมินเพื่อแบ่งความเสียหายเป็นออกเป็นระดับที่ชัดเจน โดยประกอบด้วยการตรวจสอบโครงสร้างขั้นต้นจะต้องตรวจสอบด้วยสายตาเพื่อพิจารณาสภาพความเสียหายโดยรวมระดับความรุนแรง และสาเหตุของความเสียหาย เพื่อประเมินว่าโครงสร้างต้องได้รับการซ่อมแซมหรือไม่ก่อนการตรวจสอบโดยละเอียดโดยต้องเน้นที่โครงสร้างหลักก่อน เช่น เสา คาน พื้น เป็นต้น โดยการแบ่งระดับในการศึกษา เลือกใช้มาตรฐานของคู่มือการซ่อมแซมท่าเรือและโครงสร้างชายฝั่งทะเล (Manual on Maintenance and Rehabilitation of Port and Harbor Structures) ซึ่งแบ่งความเสียหายออกเป็น 6 ระดับ ตั้งแต่ ระดับ 0 ถึงระดับ 5 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3 พิจารณาสภาพความเสียหายที่พบเห็น 3 อย่าง คือ ปริมาณสนิมที่เหล็กเสริม รอยร้าวที่ผิวคอนกรีต และการแตกร้าวของคอนกรีตหุ้ม

ตารางที่ 3 การแบ่งระดับการเสื่อมสภาพตามคู่มือการซ่อมบำรุงโครงสร้างท่าเรือ

ระดับ	0	1	2	3	4	5
สนิมที่เหล็กเสริม	ไม่มี	เกิดสนิมแบบจุด	เกิดสนิมที่ผิวเล็กน้อย	เกิดสนิมที่ผิวจำนวนมาก	เกิดสนิมอย่างรุนแรง	เกิดสนิมอย่างรุนแรงจำนวนมาก
รอยร้าว	ไม่มี	มีรอยร้าวเล็กน้อย	มีรอยร้าวขนาดเล็ก	มีรอยร้าวจำนวนมาก	มีรอยร้าวขนาดใหญ่	-
คอนกรีตหุ้ม	ไม่เสียหาย	ไม่เสียหาย	เกิดรอยแตกบางส่วน	หลุดล่อนบางส่วน	หลุดล่อน	หลุดล่อนรุนแรง

ที่มา : Port and Harbor Research Institute (1999)

5. แบบจำลองการเสื่อมสภาพของวัสดุ

การวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของวัสดุ นิยมใช้กฎข้อที่สองของฟิค ซึ่งคำนวณการกระจายตัวของคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตและอัตราการฟุกร่อนของเหล็กเสริม ปริมาณคลอไรด์ ณ ตำแหน่งเหล็กเสริมที่เข้าสู่เนื้อคอนกรีตเนื่องจากการแพร่ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 10 (Kim *et al.*, 2000)

$$C(x,t) = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{\sqrt{4 D \cdot t}} \right] \right] \quad (10)$$

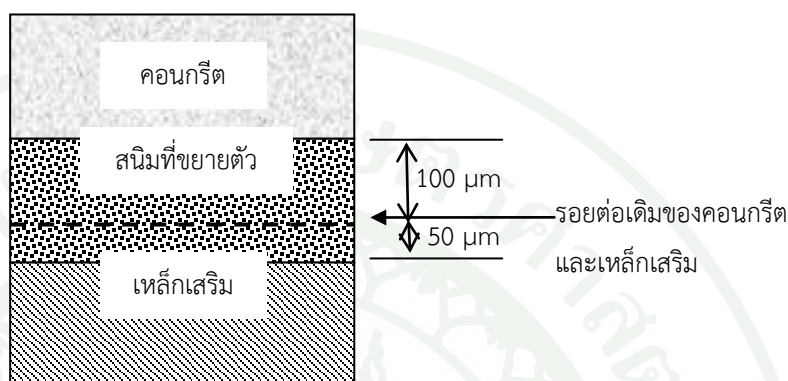
โดยที่	$C(x,t)$	คือ ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ความลึกและเวลาใดๆ
	C_0	คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต
	D	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ไอออน
	X	คือ ความลึกของคอนกรีตจากผิวหน้า
	t	คือ อายุการใช้งานโครงสร้าง (ปี)
	erf	คือ Error function

ค่า C_0 เป็นตัวบ่งบอกถึงสภาพแวดล้อมรอบชิ้นส่วนโครงสร้าง กระบวนการเสื่อมสภาพของโครงสร้างในแต่ละกรณีจะมีความแตกต่างกันอย่างมาก ซึ่งมีสาเหตุมาจากความหลากหลายของสภาพแวดล้อมแต่ละพื้นที่

ค่า D เป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการซึมของคลอไรด์ไอออนในคอนกรีต ซึ่งมีผลต่อความคงทนของโครงสร้าง ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ไอออนอาจมีผลจากคุณภาพของคอนกรีตที่ใช้โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเภทของซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ หรือสาเหตุอื่นเช่น การบ่ม การอัดแน่น สภาพแวดล้อม และเวลา วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่นั้น ทำได้โดยอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ไอออนกับเวลาจากสมการตามกฎข้อที่สองของฟิค

การทำนายระยะเวลาที่โครงสร้างจะเกิดการแตกร้าวเนื่องจากคลอไรด์วิธีหนึ่งคือให้ความสำคัญกับการแปลงอัตราการกัดกร่อนเป็นอัตราการแตกร้าวและอัตราการหลุดล่อน ซึ่งต้องใช้

สมมติฐานเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นของออกไซด์และความเครียดที่ส่งผลให้เกิดการแตกร้าว โดยถือว่าการกัดกร่อนเหล็กเสริมเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ เมื่อเหล็กเสริมมีการสูญเสียหน้าตัดเท่ากับ $50 \mu\text{m}$ จะก่อให้เกิดสนิมเป็นปริมาณ 3 เท่า ส่งผลให้คอนกรีตแตกร้าว ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การสูญเสียหน้าตัดและเกิดสนิมขยายตัวในคอนกรีตเสริมเหล็ก

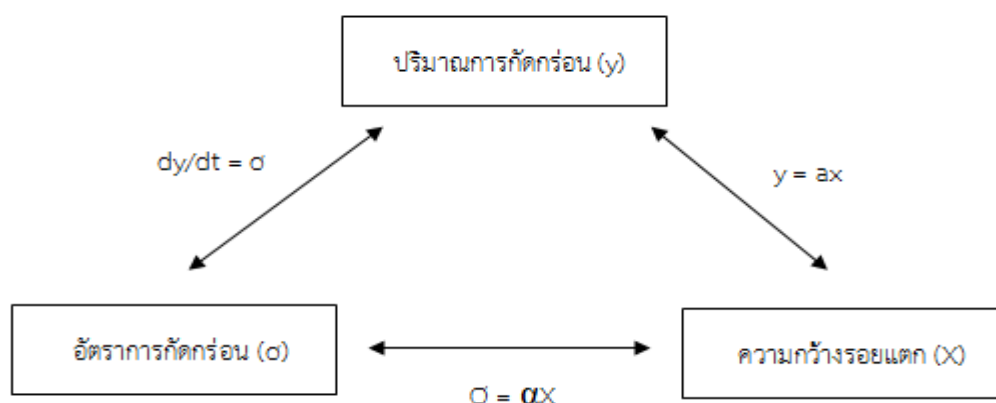
ที่มา : Broomfield (2003)

Pulvis *et.al.* (1994) ทำนายอายุของสะพานคอนกรีตที่เหล็กเริ่มสูญเสียหน้าตัด และคอนกรีตเกิดรอยแตกร้าว โดยทำการทดลองกับพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก แช่ไว้ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3% โดยน้ำหนัก และพิจารณาปัจจัยดังต่อไปนี้ ระยะหุ้มคอนกรีต ปริมาณคลอไรด์ที่ผิว อายุการใช้งานโครงสร้าง และอัตราส่วนน้ำต่อคอนกรีตที่ใช้ก่อสร้างสะพานได้เป็นสมการดังแสดงในสมการที่ 11

$$t_d = [(0.052d^{1.22}t^{0.21})/(C_0^{0.42}P)]^{0.8265} \quad (11)$$

โดยที่	t_d	คือ อายุของสะพานคอนกรีตที่เริ่มสูญเสียหน้าตัด (ปี)
	d	คือ ระยะหุ้มคอนกรีต (ม.ม.)
	C_0	คือ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (ร้อยละน้ำหนักคอนกรีต)
	t	คือ อายุการใช้งานโครงสร้าง (ปี)
	P	คือ อัตราส่วนน้ำต่อคอนกรีตที่ใช้ก่อสร้างสะพาน

เมื่อปริมาณคลอไรด์เพิ่มขึ้นจนมีปริมาณคลอไรด์ 1.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Japan Society of Civil Engineer, 2003) เหล็กเสริมเริ่มเกิดการผุกร่อนอย่างรวดเร็ว เมื่อการผุกร่อนเกิดขึ้นต่อไปเหล็กเสริมจะสูญเสียหน้าตัดจนกระทั่งโครงสร้างสูญเสียความสามารถในการรับน้ำหนักกระทำ มีที่มาจากความสัมพันธ์ดังสมมติฐานแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการกัดกร่อน อัตราการกัดกร่อน และความกว้างรอยแตก

ที่มา : Japan Concrete Institute (1998)

JCI ใช้ความสัมพันธ์ข้างต้น เสนอการจัดรูปสมการเพื่อทำนายปริมาณการสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมได้ดังแสดงในสมการที่ 12 (Japan Concrete Institute, 1998)

$$V_{\text{red}} = \frac{4aW}{\phi_{\text{Fe}}} e^{\alpha t/a} \quad (12)$$

โดยที่	V_{red}	คือ ปริมาตรของเหล็กเสริมที่หายไปจากการกัดกร่อน
	γ_{Fe}	คือ ความหนาแน่นของเหล็กเสริม
	a	คือ ตัวคูณแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่หายไปกับความกว้างของรอยแตก
	w	คือ ความกว้างของรอยแตกเริ่มต้นอันเนื่องมาจากการกัดกร่อน
	ϕ	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมแรกเริ่ม
	α	คือ ตัวคูณแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับความกว้างของรอยแตก
	t	คือ อายุโครงสร้าง (ปี)

Markeset and Myrdal (2008) เสนอการคำนวณอัตราการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมคอนกรีตในรูปฟังก์ชันของเวลาต่ออัตราการกัดกร่อน โดยสมมติให้อัตราการกัดกร่อนเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอเมื่อเวลาผ่านไป และสามารถทำนายระยะเวลาที่จะเกิดการเสื่อมสภาพจนถึงระดับที่ยอมรับได้ด้วยสมการที่ 13

$$L(t, \emptyset) = 100 \{ 1 - (4/\emptyset^2) (\emptyset/2 - 0.0116 i_{\text{corr}} t)^2 \} \quad (13)$$

โดยที่	L	คือ ร้อยละการสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริม
	$\emptyset$	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมแรกเริ่ม (ม.ม.)
	t	คือ อายุการใช้งานโครงสร้าง (ปี)
	i_{corr}	คือ อัตราการกัดกร่อนเหล็กเสริม ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

Vu and Stewart (2000) พัฒนาสมการสำหรับทำนายอัตราการกัดกร่อนเหล็กเสริมที่จุดเริ่มต้นช่วง propagation state ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และระยะคอนกรีตหุ้ม ดังแสดงในสมการที่ 14

$$i_{\text{corr}}(t_0) = 37.8 (1 - w/c)^{-1.64} / d \quad (14)$$

ซึ่งนักวิจัยพบว่าสมมติที่ผิวของเหล็กเสริมสามารถลดการแพร่ไอออนเหล็กจากเหล็กเสริม อีกทั้งอัตราส่วนพื้นที่ระหว่างแอโนดและแคโทดจะลดลงเนื่องจากกระบวนการกัดกร่อน ดังนั้นอัตราการกัดกร่อนจึงลดลงตามเวลา ทำให้ได้สมการดังแสดงในสมการที่ 15

$$i_{\text{corr}}(t) = i_{\text{corr}}(t_0) \cdot 0.85 t^{-0.29} \quad (15)$$

แทนที่สมการที่ (14) ลงในสมการที่ (15) ได้

$$i_{\text{corr}}(t) = 32.1 (1 - w/c)^{-1.64} t^{-0.29} / d \quad (16)$$

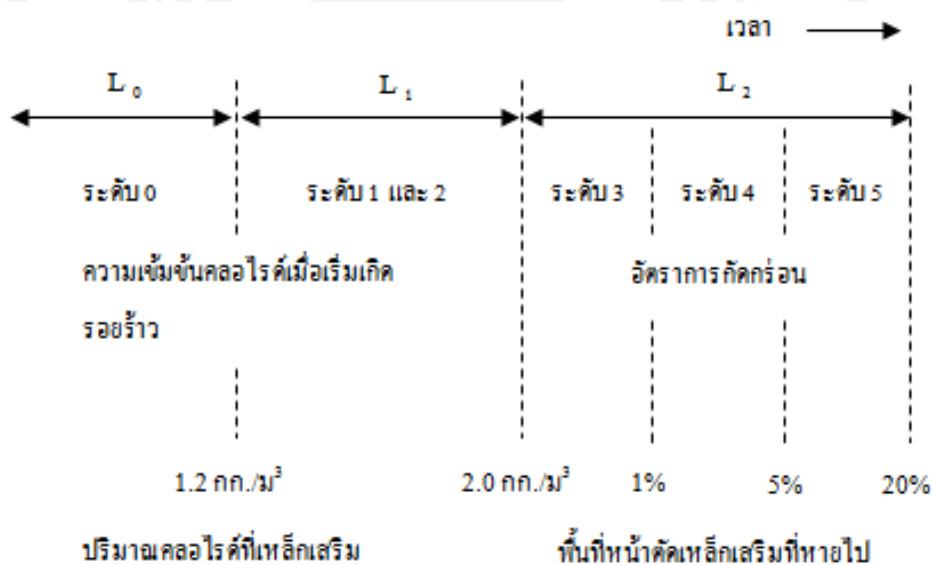
โดยที่	i_{corr}	คือ อัตราการกัดกร่อนเหล็กเสริม ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
	w/c	คือ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

t คือ อายุการใช้งานโครงสร้าง (ปี)

d คือ ระยะหุ้มคอนกรีต (ซม.)

6. การบอกระดับความเสื่อมสภาพของโครงสร้าง

ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการเสื่อมสภาพเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยให้การบำรุงรักษาโครงสร้างดำเนินการได้อย่างเหมาะสมถูกต้องและมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถทำนายอายุการใช้งานของโครงสร้างได้ด้วยซึ่งสามารถพิจารณาจากปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 การแบ่งระดับการเสื่อมสภาพ

ที่มา : International Committee on Concrete Model Code for Asia (2004)

ระดับการเสื่อมสภาพในภาพที่ 9 ได้มาจากการประเมินด้วยสายตาตั้งแต่คอนกรีตไม่มีรอยร้าวเกิดขึ้นที่ผิว โดยปริมาณคลอไรด์สูงสุดที่พิจารณาเป็นระดับ 0 คือ 1.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หลังจากนั้นจะมีรอยร้าวเกิดขึ้นที่คอนกรีตเนื่องจากการขยายตัวของเหล็กเสริม ระยะเวลาดังแต่เริ่มเกิดการกัดกร่อนที่เหล็กเสริมจนกระทั่งเกิดรอยร้าวของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กทำเร็วมีระยะเวลาสั้น เพราะมีปริมาณออกซิเจนแทรกซึมเข้าไปสูง Moriwake (1996) พบว่าเมื่อมีปริมาณคลอไรด์ที่ระดับเหล็กเสริมประมาณ 2.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะเกิดรอยแตกของคอนกรีต และจุดนี้เป็นการเสื่อมสภาพในระดับ 2

หลังจากคอนกรีตเริ่มเกิดรอยร้าว ต้องพิจารณาประสิทธิภาพในการรับน้ำหนักของโครงสร้างที่เสียหายไปซึ่งจากการศึกษาของ Yokota *et al.* (2003) ผ่านการทดลองในห้องปฏิบัติการ และเป็นการทดสอบระยะยาว (Yokota *et al.*, 1999) พบว่าเมื่อเหล็กเสริมเสียหายตัดไปร้อยละ 1 จะเป็นจุดสิ้นสุดของระดับ 3 และเมื่อเหล็กเสริมเสียหายตัดไปเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 5 จะเป็นจุดสิ้นสุดของระดับ 4 เมื่อการสูญเสียหน้าตัดมากกว่านี้ การเสื่อมสภาพจะจัดอยู่ในระดับ 5

7. ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากคลอไรด์

สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนากรมทางหลวงชนบทร่วมกับภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้ศึกษาวิธีการแก้ไขความเสียหายของสะพานจากการเสื่อมลักษณะความเสียหายในกลุ่มที่พบได้มากกับสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพตามชิ้นส่วนต่างๆทั้งโครงสร้างส่วนบน และส่วนล่าง (มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2551) สามารถแยกออกเป็นกลุ่มได้ดังนี้

1) พื้นสะพานด้านบน

1.1) การแตกร้าว (crack) ความเสียหายจากการแตกร้าวของพื้นสะพานด้านบน จะส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของโครงสร้างเมื่อรอยร้าวมีขนาดกว้างมากกว่า 2 มิลลิเมตร โดยเฉพาะรอยแตกร้าวตามแนวของเหล็กเสริมคอนกรีตทั้งแนวตามยาวและแนวตามขวางที่เกิดจากการเป็นสนิมของเหล็กเสริม ในบริเวณที่เหล็กเสริมคอนกรีตมีระยะหุ้ม (covering) น้อยกว่า 25 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 รอยแตกร้าวที่พื้นด้านบนสะพาน

ที่มา : กรมทางหลวง (2549)

1.2) การหลุดกะเทาะ (spalling) ความเสียหายที่เกิดจากการหลุดกะเทาะบนพื้นสะพานด้านบน จะควรซ่อมแซมเมื่อการหลุดกะเทาะที่ผิวหน้าส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยการใช้งาน คือมีความลึกมากกว่า 25 มิลลิเมตร หรือกว้างกว่า 150 มิลลิเมตร ขึ้นไป สาเหตุเกิดจากการเป็นสนิมของเหล็กเสริมจนปริมาตรคอนกรีตมากขึ้นดันคอนกรีตกะเทาะออกมาจนถึงเหล็กเสริม สภาพเช่นนี้ส่งผลต่อแนวโน้มการเกิดสนิมที่มากขึ้นจนทำให้ความแข็งแรงของโครงสร้างลดลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 การหลุดกะเทาะบริเวณพื้นด้านบนสะพาน

ที่มา : กรมทางหลวง (2549)

2) พื้นสะพานด้านล่าง

2.1) การแตกร้าว การแตกร้าวของพื้นด้านล่างมักจะเกิดคู่กับการหลุดกะเทาะ โดยมีความเสียหายจากการเป็นสนิมของเหล็กเสริมดันคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าวและกะเทาะออก ความเสียหายนี้มีแนวโน้มเกิดความรุนแรงเมื่อรอยแตกร้าวตามแนวเหล็กเสริมมีความกว้างมากกว่า 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 รอยแตกร้าวที่พื้นด้านใต้สะพาน

ที่มา : กรมทางหลวง (2549)

2.2) การหลุดกะเทาะ การหลุดกะเทาะของพื้นสะพานด้านล่างมักเกิดบริเวณใต้พื้นและมุมด้านข้างสะพานและมีความรุนแรงมากกว่าผิวบน โดยเฉพาะบริเวณตำแหน่งที่พื้นสะพานวางอยู่บนคานรับ โดยมีสาเหตุจากแรงกระแทกจากพื้นสะพาน ควรซ่อมแซมเมื่อการหลุดกะเทาะที่ผิวหน้าส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยการใช้งาน คือมีความลึกมากกว่า 25 มิลลิเมตร หรือกว้างกว่า 150 มิลลิเมตร ขึ้นไป ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 การหลุดกะเทาะบริเวณใต้พื้นสะพาน

ที่มา : กรมทางหลวง (2549)

2.3) การหลุดลอก (scaling) การหลุดลอกที่เกิดบริเวณพื้นด้านล่างมักเกิดจากการก่อสร้างไม่เป็นไปตามมาตรฐาน เช่น การเกิดรังผึ้งจากการหล่อคอนกรีต เป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายที่จะเกิดต่อความปลอดภัยในโครงสร้าง เช่น สันิมในเหล็กเสริม ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 การหลุดลอกบริเวณใต้พื้นสะพาน

ที่มา : กรมทางหลวง (2549)

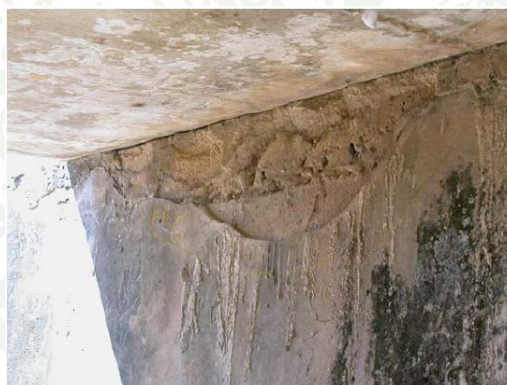
3) คาน

3.1) การแตกร้าว ลักษณะของรอยแตกร้าวที่พบในคานคือ รอยแตกร้าวขนานกับเหล็กเสริมตามยาว และตัดขวางตามแนวของเหล็กปลอก รอยแตกร้าวที่มีขนาดความกว้างเกินกว่า 2 มิลลิเมตร มักจะมีสาเหตุจากการเป็นสนิมของเหล็กเสริมต้นคอนกรีตให้เกิดการแตกร้าว และมีแนวโน้มเกิดความรุนแรงเสียหายมากขึ้นและส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของโครงสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 การแตกร้าวบริเวณคานขวางของสะพานเนื่องจากสนิม

3.2) การหลุดกะเทาะ การหลุดกะเทาะจะเกิดขึ้นมากและมีความรุนแรงบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นสะพานกับคาน โดยการแตกกะเทาะจะเป็นแนวเฉียงลง มีสาเหตุจากแรงกระทำระหว่างพื้นกับคาน อีกทั้งยังมีสาเหตุจากการเป็นสนิมของเหล็กเสริมด้วยดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 การหลุดกะเทาะบริเวณคานขวางของสะพาน

ที่มา : กรมทางหลวง (2549)

3.3) การหลุดลอก การหลุดลอกบริเวณที่เกิดการกัดเซาะในคอนกรีตจากปรากฏการณ์น้ำขึ้น น้ำลง กระแสน้ำ การเสียดสีจากทรายและโคลน การแตกตัวของฟองอากาศ จะมีความรุนแรงและเป็นอันตรายต่อความปลอดภัยของโครงสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 17 การหลุดลอกบริเวณคานขวางของสะพาน

ที่มา : กรมทางหลวง (2549)

4) เสาค้ำและตอม่อ

4.1) การแตกร้าว การแตกร้าวในเสาและตอม่อที่แสดงให้เห็นถึงการเกิดสนิมในเหล็กเสริมจนต้นคอนกรีตแตกร้าวคือ รอยแตกร้าวจะขนานกับตำแหน่งเหล็กแกนแนวตั้งและในแนวนอน ขนานกับเหล็กปลอก ดังนั้นรอยแตกจะมีความลึกตั้งแต่ผิวคอนกรีตจนถึงตำแหน่งเหล็กเสริม ดังแสดงในภาพที่ 18 เป็นการแตกร้าวของเสาที่ อ. แกลง จ.ระยอง



ภาพที่ 18 การแตกร้าวที่เสาของสะพาน

4.2) การหลุดกะเทาะ การหลุดกะเทาะของคอนกรีตที่เกิดขึ้นในตอม่อ เกิดขึ้นต่อเนื่องจากการเป็นสนิมของเหล็กเสริมจนต้นคอนกรีตหุ้มให้แตกร้าวกะเทาะออกมาจนเห็นเหล็กเสริม โดย

จะมีความเสียหายรุนแรงกับตำแหน่งที่คอนกรีตหุ้มน้อยกว่า 2.5 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 19 เป็นการหลุดกะเทาะของเสาที่ อ. แกลง จ.ระยอง



ภาพที่ 19 การหลุดกะเทาะที่เสาของสะพาน

4.3) การหลุดลอกและการสึกกร่อน (scaling and erosion) ความเสียหายที่เกิดกับตอม่อมักจะเกิดจากการกระทำของกระแสน้ำเป็นหลัก ดังแสดงในภาพที่ 20



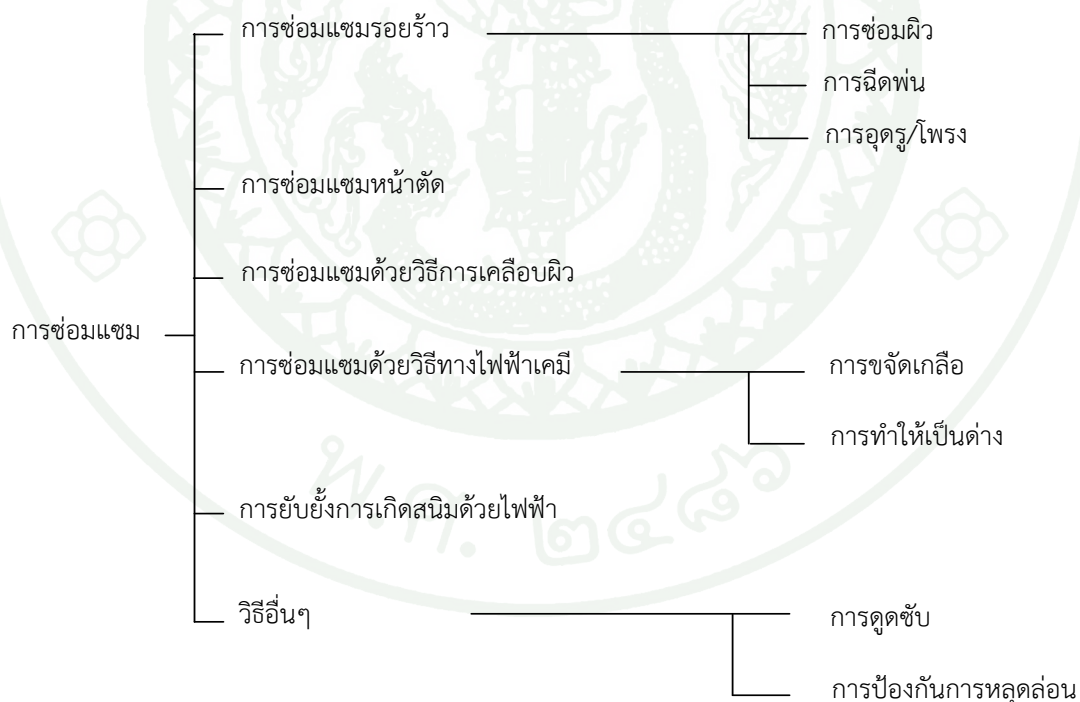
ภาพที่ 20 การสึกกร่อนบริเวณตอม่อสะพาน

ที่มา : กรมทางหลวง (2549)

8. การซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

การซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ มีจุดประสงค์เพื่อควบคุมการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นในโครงสร้าง ฟื้นฟูความทนทานและลดผลกระทบข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้นในโครงสร้างได้ถูกต้องตรงกับลักษณะและสาเหตุของความเสียหายอย่างเหมาะสม

International Committee on Concrete Model Code for Asia (2004) แนะนำวิธีการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์โดยการเลือกใช้วิธีและวัสดุที่เหมาะสมโดยแยกตามระดับความเสียหายจากการเสื่อมสภาพ ชนิดของการเสื่อมสภาพ และประเภทของการเสื่อมสภาพ ซึ่งแบ่งชนิดการซ่อมได้เป็น 6 ประเภทหลักคือ การซ่อมแซมรอยร้าว การซ่อมแซมหน้าตัด การซ่อมแซมด้วยวิธีการเคลือบผิวคอนกรีต การซ่อมแซมด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี การต้านทานการกัดกร่อนด้วยไฟฟ้า และวิธีอื่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 21 เพื่อให้การซ่อมแซมสอดคล้องกับลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 21 ประเภทของการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์

ที่มา : International Committee on Concrete Model Code for Asia (2004)

มาตรฐานสหภาพยุโรป (The European Committee for Standardization, CEN) ได้จัดตั้งคณะทำงาน (Working Group, WG8) เพื่อตรวจสอบผลิตภัณฑ์และระบบสำหรับการป้องกันและการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตโดยขึ้นต่อคณะกรรมการเทคนิค (TC 104) ซึ่งเกี่ยวข้องกับคอนกรีต ต่อมาได้ปรับปรุงการทำงานโดยจัดทำรายงานต่อคณะกรรมการบริหาร (SC) เพื่อซ่อมแซมยาแนวโครงสร้างมอร์ต้าและคอนกรีต จึงเกิดเป็นกลุ่ม TC104/SCS/WG7 ซึ่งมีหน้าที่จัดทำมาตรฐานในการใช้งานผลิตภัณฑ์และระบบ เพื่อให้เป็นข้อกำหนดในการซ่อมแซมและการป้องกันที่เหมาะสมสำหรับพื้นผิวสภาพของโครงสร้าง ดังตารางที่ 4

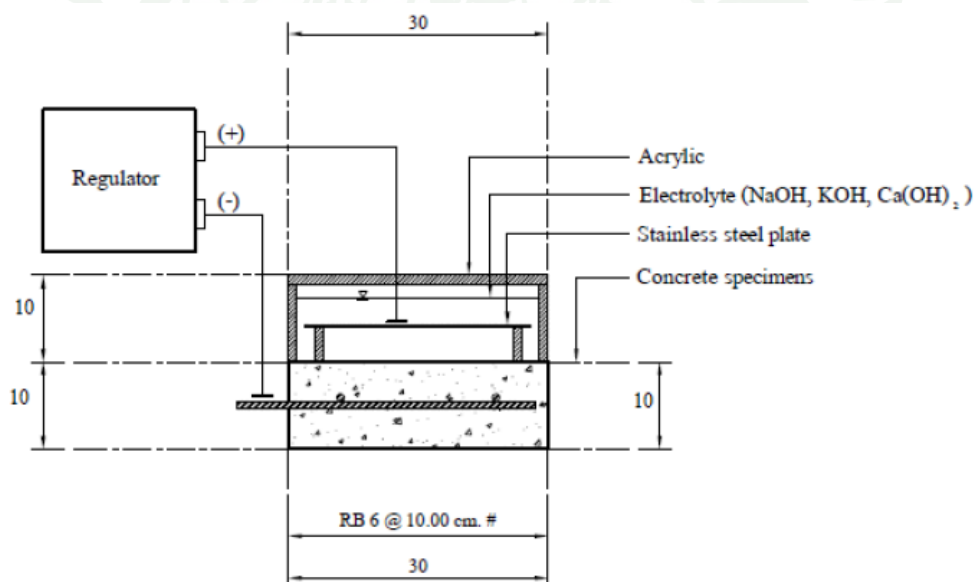
ตารางที่ 4 ข้อกำหนดในการซ่อมแซมและการป้องกันที่เหมาะสมสำหรับพื้นผิวสภาพของโครงสร้าง

คุณสมบัติเฉพาะ	วิธีการซ่อมแซม
ป้องกันการแทรกเข้า	การป้องกันการดูดซับที่ผิว การเคลือบผิว การเคลือบรอยร้าว
ควบคุมความชื้น	การบำรุงรักษาผิว การเคลือบผิว
การฟื้นฟูสภาพของคอนกรีต	การประสานด้วยมอร์ต้า การหล่อคอนกรีตใหม่ การฉีดยาซ่อมคอนกรีตหรือมอร์ต้า
ต้านทานเคมี	การลอกผิวหรือเคลือบผิว การป้องกันการดูดซับ

วิธีการที่นำมาศึกษา สามารถนำมาใช้แนวทางการซ่อมแซมที่เหมาะสมในการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ในประเทศไทยได้เนื่องจากเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับว่ามีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมสูง และมีการศึกษาทางวิชาการอย่างแพร่หลายต่อเนื่อง โดยพิจารณาตามลักษณะความเสียหาย สภาพความรุนแรง และผลกระทบที่เกิดขึ้นกับสะพาน เป็นข้อมูลหลักในการตัดสินใจ

- 1) การลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Chloride Removal: ECR)

การลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีคือ การดึงคลอไรด์ไอออนออกจากคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีที่ต้องจ่ายกระแสไฟตลอดเวลา โดยภาพที่ 22 ได้แสดงตัวอย่างวงจรอย่างง่ายไว้ ซึ่งการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีสามารถสกัดเนื้อคอนกรีตที่ปนเปื้อนคลอไรด์ออกหรือไม่ต้องก็ได้ โดยมีขั้วไฟฟ้าอยู่ในสารละลายซึ่งอยู่นอกคอนกรีตและมีการเชื่อมต่อไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมภายในคอนกรีตมีการให้กระแสไฟฟ้าตรงกับขั้วไฟฟ้าและเหล็กเสริมคอนกรีต โดยให้ขั้วไฟฟ้าภายนอกเป็นขั้วบวก (Anode) และเหล็กเสริมเป็นขั้วลบ (Cathode) มีผลทำให้ความเข้มข้นและการปนเปื้อนของคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตมีค่าลดลง โดยเฉพาะบริเวณเหล็กเสริมซึ่งเป็นขั้วลบ นอกจากนั้นยังมี Hydroxyl ions เกิดขึ้นอีกด้วยซึ่งจะทำให้ค่า pH สูงขึ้นจึงทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตสูงขึ้นส่งผลให้มีความต้านทานการเกิดสนิมที่ดีขึ้น (วันชัย, 2548)



ภาพที่ 22 การลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

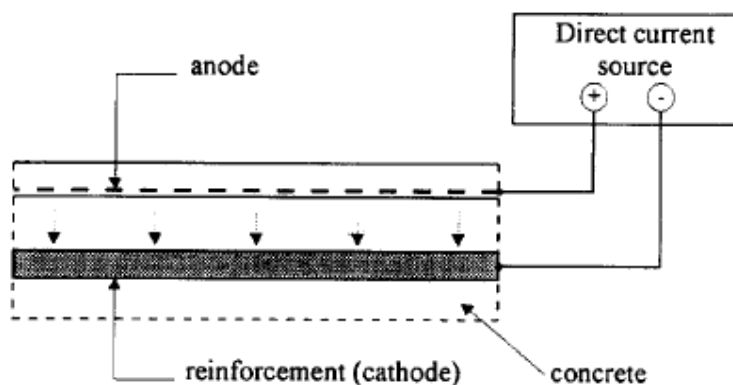
ที่มา : Yodsudjai and Saelim (2013)

W. Yodsudjai and W. Saelim (2013) ได้ทำการทดลองเพื่อหาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ในการลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าปริมาณ 15 โวลต์ กระแสตรงผ่านระหว่างเหล็กเสริมภายในคอนกรีตและอิเล็กโทรดภายนอกใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ Ca(OH)_2 เป็นเวลา 28 วัน ซึ่งผลที่ได้สามารถลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตลงร้อยละ 76 และมี

ปัจจัยเนื่องจากคลอไรด์ไอออนที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตตามระยะทางที่ติดตั้งซึ่งอธิบายได้ด้วยสมการของ Nernst Planck

2) การยับยั้งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมด้วยการถ่ายประจุไฟฟ้า (Cathodic Protection)

การยับยั้งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมด้วยการถ่ายประจุไฟฟ้า เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้กันแพร่หลายอย่างมากในสหราชอาณาจักรและทั่วโลก โดยใช้ได้กับโครงสร้างที่เสื่อมสภาพทุกระดับรวมถึงโครงสร้างที่มีแนวโน้มจะเกิดการเสื่อมสภาพในอนาคตโดยไม่ต้องตัดเอาคอนกรีตส่วนที่เปื้อนคลอไรด์ออกและใช้ได้กับบริเวณที่เข้าถึงได้ยากอีกด้วย Pedferri (1996) ได้แสดงระบบการซ่อมแซมด้วยการถ่ายประจุไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 23 โดยติดตั้งกับไฟฟ้ากระแสตรงเข้ากับคอนกรีตที่ต้องการปกป้องผ่านขั้วแอโนดที่บริเวณผิวและเชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้าแรงดันต่ำผ่านไปยังเหล็กเสริมเพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด หลักการของวิธีนี้คือการยับยั้งการเสียอิเล็กตรอนของส่วนที่มีแนวโน้มเป็นขั้วบวก (Anode) ที่ผิวของเหล็กเสริมโดยหยุดขั้นตอนของปฏิกิริยา $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ และทำให้กระบวนการเกิดสนิมของเหล็กเสริมยุติลงด้วยการให้กระแสไฟฟ้า (Anti-Corrosion Current) ไปยังเหล็กเสริมหลังจากที่ได้ติดตั้งขั้วบวก (Anode) ที่ผิว ซึ่งกระแสไฟฟ้ามีความเข้มข้นประมาณ 10 mA/m^2 และต้องมีการควบคุมกระแสไฟฟ้านี้ไปตลอดอายุโครงสร้าง (Peter Pullar-Strecker, 1987)



ภาพที่ 23 การถ่ายประจุไฟฟ้าในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ที่มา : Pietro Pedferri (1996)

Kier Wilson *et al.* (2012) ได้วิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียของวิธีการยับยั้งการเกิดสนิมด้วยประจุไฟฟ้าทั้ง 2 ระบบ คือ แบบที่ใช้ระบบกระแสไฟฟ้า (Impressed Current Type System) และแบบโลหะกัฏกร่อน (Sacrificed Anode Type System) พบว่า การซ่อมแซมด้วยประจุไฟฟ้ามีตัวแปรหลายอย่าง แต่สองตัวแปรที่สำคัญที่สุดคือ งบประมาณ และ อายุของสะพาน

มีการศึกษาการใช้งานที่เหมาะสมของทั้งสองระบบกันอย่างแพร่หลายทั้งในและต่างประเทศ โดยการศึกษาของ Kier Wilson *et al.* (2012) พบว่าการป้องกันโดยใช้กระแสไฟฟ้ายับยั้งการเกิดสนิมในเหล็กเสริมเหมาะกับโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่และมีอายุการใช้งานมากกว่า 25 ปี ส่วนแบบโลหะกัฏกร่อนที่มีงบประมาณในการซ่อมบำรุงจำกัดและมีอายุใช้งานประมาณ 10 ปี จากการศึกษาของ ณัฐพล และ วันชัย (2548); วันชัย ยอดสุดใจ (2548); Kier Wilson *et al.* (2012); Peddeferri (1995) สามารถสรุปแยกข้อดีและข้อเสียได้ดังตารางที่ 5 และตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ข้อดีและข้อเสียจากการซ่อมแซมด้วยประจุไฟฟ้าแบบใช้ระบบกระแสไฟฟ้า

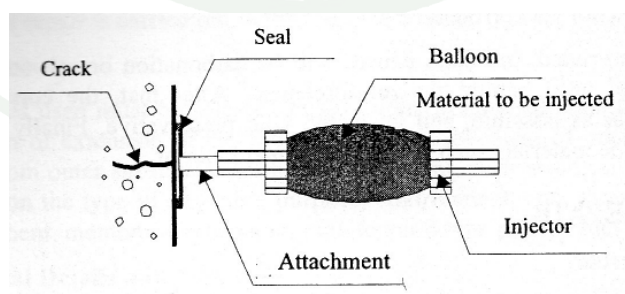
ข้อดี	ข้อเสีย
ไม่ต้องทำลายคอนกรีตเป็นบริเวณกว้าง	ต้องมีการตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ
สามารถติดตามสภาพของเหล็กเสริมได้	มีค่าใช้จ่ายจากการส่งกระแสไฟฟ้า
สามารถปรับเปลี่ยนหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ได้	การติดตั้งขั้วแอโนดต้องระมัดระวังเป็นอย่างดี
มีอายุการใช้งานยาวนาน	ไม่เหมาะกับโครงสร้างคอนกรีตอัดแรง
ใช้ได้ดีแม้ส่วนที่ต้องการปกป้องอยู่ลึก	มีผลกระทบกับสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 6 ข้อดีและข้อเสียจากการซ่อมแซมด้วยประจุไฟฟ้าแบบใช้ระบบโลหะกักร่อน

ข้อดี	ข้อเสีย
ค่าใช้จ่ายต่ำเนื่องจากไม่ต้องใช้กระแสไฟฟ้า	อายุการใช้งานสั้น
สามารถเจาะจงบริเวณที่ต้องการป้องกันได้	ไม่ทราบอายุการใช้งานที่แน่นอน
มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย	ต้องหมั่นตรวจสอบโครงสร้างที่ผูกกร่อนเนื่องจาก ขั้วแอโนดหยุดทำงาน
บำรุงรักษาง่าย	เมื่อเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดต้องทำการ ซ่อมแซมทันที

3) การฉีดอัดรอยร้าว (Injection Method)

International Committee on Concrete Model Code for Asia (2004) ระบุว่า การซ่อมแซมด้วยวิธีการฉีดอัดรอยร้าว เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการซ่อมแซมรอยแตกร้าวขนาด 0.2 มิลลิเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร อีกทั้งยังสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพในการซึมซับน้ำ ความคงทนของคอนกรีต และวิธีการนี้ยังเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างอีกด้วย โดยจะฉีดพ่นคอนกรีตด้วยปั๊มลมซึ่งอาศัยแรงดันจากยางและสปริงเพื่อดันวัสดุซ่อมแซมเข้าไปตามรอยแตกด้วยความเร็วต่ำและแรงดันไม่เกิน 0.4 พาสกาล ดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 การซ่อมแซมด้วยวิธีการฉีดอัดรอยร้าว

ที่มา : International Committee on Concrete Model Code for Asia (2004)

การซ่อมแซมด้วยวิธีการฉีดพ่นรอยร้าวมีข้อดีคือสามารถควบคุมปริมาณการฉีดอัดได้อย่างแม่นยำโดยไม่ต้องอาศัยประสบการณ์ของคณงาน และสามารถใช้งานได้แม้ความกว้างรอยแตกขนาดเล็กเพียง 0.05 มิลลิเมตร วัสดุที่นิยมใช้ในการฉีดพ่นได้แก่ วัสดุประเภทเรซินหรือซีเมนต์ (International Committee on Concrete Model Code for Asia, 2004)

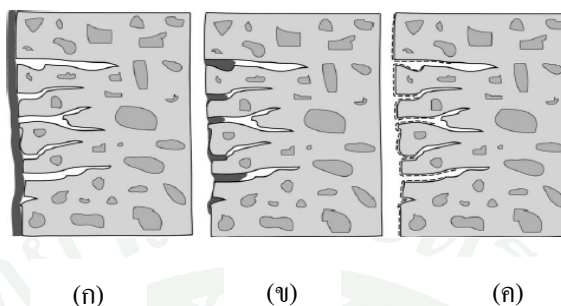
El-Hawary Moetaz *et al.* (2000) ศึกษาประสิทธิภาพของกำลังรับแรงดึงและกำลังยึดหน่วงของคอนกรีตที่ซ่อมแซมรอยแตกกว้างจากการศึกษาด้วยวิธีฉีดอัดอีพ็อกซีเรซินเปรียบเทียบกับระหว่างคอนกรีตธรรมดา และคอนกรีตชนิดทนซัลเฟตภายใต้สภาวะควบคุม และภายในห้องทดลอง พบว่าการซ่อมแซมด้วยอีพ็อกซีเรซินจะมีกำลังสูงขึ้นโดยที่คอนกรีตธรรมดามีประสิทธิภาพด้านกำลังรับแรงดึงและกำลังยึดหน่วงสูงกว่าคอนกรีตทนซัลเฟตแต่กำลังที่ได้จะแตกต่างกันไปตามแต่ชนิดของอีพ็อกซีที่นำมาใช้เป็นวัสดุซ่อมแซม ซึ่งการเลือกชนิดวัสดุซ่อมแซมที่เหมาะสมในการใช้งานต้องอาศัยประสบการณ์จากการทำงาน

4) การซ่อมแซมด้วยวิธีการเคลือบผิวคอนกรีต (Surface Coating)

การซ่อมแซมด้วยวิธีการเคลือบผิวคอนกรีตเป็นวิธีการควบคุมกระบวนการดูดซึมน้ำเข้าไปในเนื้อคอนกรีตซึ่งโครงสร้างที่ต้องเผชิญสภาวะแวดล้อมทะเลจะมีน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการนำคลอไรด์ไอออนเข้าไปยังโพรงคอนกรีต ส่งผลให้เหล็กเสริมคอนกรีตสูญเสียฟิล์มและสึกกร่อนลงในที่สุด ประเภทของการซ่อมแซมด้วยวิธีการเคลือบผิวนั้น สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังแสดงในภาพที่ 25 คือ ชนิดที่เคลือบคลุมหน้าผิว (ก) ชนิดอุดรอยร้าว (ข) และชนิดเคลือบรอยร้าว (ค) (Medeiros and Helene, 2009)

การซ่อมแซมด้วยวิธีการเคลือบผิวคอนกรีตยังสามารถป้องกันการสึกกร่อนที่ผิวคอนกรีต และสามารถลดสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ลงและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างที่ซ่อมแซมได้ Almusallam *et al.* (2003) ได้ทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุเคลือบผิวคอนกรีตเปรียบเทียบกัน 5 ชนิดพบว่า การเคลือบคอนกรีตด้วยโพลียูรีเทน (Polyurethane) มีประสิทธิภาพในการลดความสามารถในการซึมผ่านของคลอไรด์และการซึมผ่านของน้ำสูงสุด อีกทั้งสามารถลดการซึมน้ำในคอนกรีตได้อีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Al-Zahrani *et al.* (2002) ที่ทำการทดลองคุณสมบัติของโพลียูรีเทนทั้งในสภาวะเปียกสลับแห้ง ภาวะร้อนสลับเย็น และทดสอบประสิทธิภาพในการยึดเกาะผิวคอนกรีตของวัสดุเคลือบเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น ซึ่งผลที่ได้วัสดุประเภทโพลียูรีเทน

ก็มีประสิทธิภาพดีที่สุด ต่อมา Medeiros and Helene (2009) พบว่าโพลียูรีเทนมีประสิทธิภาพในการลดค่าสัมประสิทธิ์การซึมคลอไรด์ได้ร้อยละ 86



ภาพที่ 25 ประเภทของวิธีการซ่อมแซมด้วยวิธีการเคลือบผิวคอนกรีต

ที่มา: Medeiros and Helene (2009)

5) การเทคอนกรีตใหม่ (Placement with Concrete)

การเทคอนกรีตใหม่ เป็นวิธีการซ่อมเพื่อให้โครงสร้างรับแรงได้ดังเดิมวิธีนี้นี้เหมาะสมกับรอยร้าวทะลุตลอดความลึกของผนังคอนกรีต หรือคอนกรีตที่ร้าวผ่านเหล็กเสริมและบริเวณที่เกิดรอยร้าวมีขนาดใหญ่และมีความลึก อีกทั้งยังเป็นวิธีที่ทำงานง่ายและเป็นวิธีที่ช่างมีความคุ้นเคยในการใช้งาน จึงมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง หลักการคือการยึดคอนกรีตเก่ากับคอนกรีตใหม่ โดยอาจจะใช้อีพ็อกซี่ น้ำปูนชั้น หรือมอร์ตาร์เก่าเป็นตัวประสาน การซ่อมโดยการเททับด้วยคอนกรีตเป็นการซ่อมกับบริเวณที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่และมีความลึก

ACI Committee E 706 (2007) ได้แนะนำวิธีการซ่อมคอนกรีตที่เสื่อมสภาพและหลุดล่อนในบริเวณแนวตั้งและเหนือหัวด้วยวิธีการซ่อมแซมด้วยมือดังแสดงในภาพที่ 26 ซึ่งเป็นวิธีการซ่อมแซมที่เหมาะสมกับคอนกรีตที่เสียหายเป็นบริเวณไม่กว้างและไม่ลึกมาก โดยเริ่มต้นจากสำรวจหาสาเหตุการเสื่อมสภาพที่แท้จริงในพื้นที่โดยรอบเพื่อเลือกวัสดุในการซ่อมแซมและวิธีการซ่อมแซมได้อย่างถูกต้อง ปัจจัยสำคัญในการซ่อมแซมวิธีนี้ได้แก่ การเตรียมสภาพพื้นผิว วิธีการซ่อมแซม การบ่มและวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซม ความลึกที่แนะนำในการซ่อมแซมสำหรับแนวตั้ง 3 ถึง 70 มิลลิเมตร และบริเวณเหนือหัว 3 ถึง 25 มิลลิเมตร ถ้าต้องการซ่อมแซมในบริเวณที่ลึกกว่านี้มีข้อแนะนำเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ในการซ่อมแซม

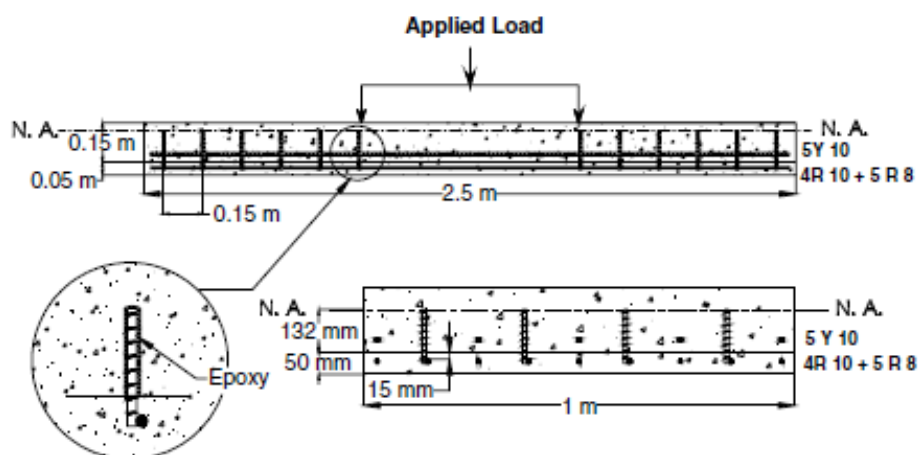


ภาพที่ 26 การซ่อมคอนกรีตที่เสื่อมสภาพและหลุดล่อนในบริเวณแนวตั้งด้วยวิธีซ่อมแซมด้วยมือ

ที่มา : ACI Committee E 706 (2007)

M.Z. Jumaat *et al.* (2006) ได้วิเคราะห์วิธีการซ่อมแซมคานคอนกรีตที่หลุดล่อนให้มีสภาพดีดังเดิมโดยใช้ซีเมนต์เกร้าท์ มอร์ต้า คอนกรีต การพ่นคอนกรีต อีพ็อกซี เพอร์โรซีเมนต์ และเส้นใยไฟเบอร์ ด้วยเทคนิคการซ่อมแซมต่างๆในคอนกรีตที่เสื่อมสภาพเนื่องจากสภาวะแวดล้อม โดยได้แนะนำวิธีการแทนที่ใหม่ด้วยคอนกรีตหรือมอร์ต้าที่มีความสามารถในการเทสูงและก่อตัวได้ ซึ่งเป็นวิธีที่มักจะใช้ในการซ่อมแซมคอนกรีตที่หลุดล่อนและเสียหายเป็นบริเวณกว้าง แต่การซ่อมแซมด้วยวิธีนี้มีข้อควรระวังคือการยึดเกาะประสานกันระหว่างคอนกรีตเก่าและคอนกรีตใหม่ ซึ่งจะเป็นจุดอ่อนในการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมคอนกรีต

Waleed A. Thanoon *et al.* (2005) ได้ทดสอบเปรียบเทียบพฤติกรรมการแตกร้าวของคอนกรีตเสริมเหล็กในพื้นทางเดียว ด้วยวิธีการซ่อมแซม 5 ประเภทคือ ซีเมนต์เกร้าท์ การฉีดคอนกรีต เพอร์โรซีเมนต์ คาร์บอนไฟเบอร์ และการแทนที่ด้วยคอนกรีต พบว่าการซ่อมแซมด้วยวิธีแทนที่ด้วยคอนกรีตและเสริมเหล็กเสริมดังแสดงในภาพที่ 27 มีกำลังรับแรงประลัยสูงที่สุด แต่พบว่ามียอยแตกตามขวางเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงเฉือน



ภาพที่ 27 การซ่อมแซมด้วยวิธีแทนที่ด้วยคอนกรีตและเสริมเหล็กเสริม

ที่มา : Waleed A. Thanoon *et al.* (2005)

การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมทะเลโดยมากเกิดจากเหล็กเสริมภายในคอนกรีตเป็นสนิมแล้วดันให้เนื้อของคอนกรีตหุ้มจนเกิดการแตกร้าวหลุดร่อนเสียหาย แม้ว่าบางครั้งโครงสร้างดังกล่าวใช้ปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟตในการก่อสร้าง แต่สาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายที่แท้จริงเกิดจากเกลือในน้ำทะเลมีหลักสองชนิดคือ เกลือคลอไรด์ (Cl⁻) และเกลือซัลเฟต (SO₄²⁻) ซึ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้า (Sulfate resisting Portland cement) ต้านทานซัลเฟตเท่านั้นจึงเหมาะกับการใช้ในงานคอนกรีตที่ต้องเผชิญเกลือซัลเฟตเพียงอย่างเดียว เห็นได้จากการมีปริมาณสารประกอบไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C₃A) ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทอื่นๆ ทั้งนี้เพื่อลดการเกิดสาร Ettringite ซึ่งก่อให้เกิดการขยายตัวของคอนกรีต และลดความสามารถยึดประสานของคอนกรีตเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนสารประกอบคอนกรีต C-S-H ให้เป็นสาร M-S-H ที่ไม่มีความสามารถยึดประสาน (ทวีชัย, 2552)

ดังนั้นคอนกรีตที่ต้องอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลที่มีทั้งเกลือคลอไรด์และเกลือซัลเฟตควรปรับเปลี่ยนที่รายละเอียดของแบบก่อสร้างหรือปรับปรุงที่คุณสมบัติของคอนกรีตที่ใช้หรืออาจใช้หลายๆ แนวทางประกอบกัน เพื่อให้ได้โครงสร้างคอนกรีตที่มีอายุการใช้งานยาวนานตามที่ต้องการ (ทวีชัย, 2552) แนวทางเหล่านี้ ได้แก่

- เพิ่มระยะหุ้มเหล็กเสริมของคอนกรีตให้มากขึ้น เพื่อให้ระยะทางที่เกลือคลอไรด์จะแทรกซึมเข้าไปถึงผิวเหล็กมีค่ามากขึ้นซึ่งเป็นการยืดอายุการใช้งานของโครงสร้าง
- ลดอัตราส่วนน้ำต่อปริมาณวัสดุประสาน (Water to binder ratio) ในคอนกรีตให้ต่ำลงมากๆ เพื่อให้เนื้อคอนกรีตมีความพรุนน้อยลง ซึ่งจะทำให้ทั้งเกลือซัลเฟตและเกลือคลอไรด์แทรกซึมเข้าไปได้ยากขึ้น
- ปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตด้วยการเลือกใช้วัสดุประสานที่ต้านทานการเสื่อมสภาพของคอนกรีตจากเกลือซัลเฟตและการเกิดสนิมของเหล็กจากเกลือคลอไรด์ ซึ่งอาจใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง (Ordinary Portland cement) ผสมกับเถ้าลอย (Fly ash) โดยใช้เถ้าลอยแทนที่บางส่วนของวัสดุประสานในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้คอนกรีตมีความพรุนต่ำเนื่องจากผลผลิตจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยไปเติมเต็มช่องว่างในคอนกรีตและเพิ่มความสามารถยึดจับเกลือคลอไรด์ในคอนกรีตไม่ให้เคลื่อนที่สูงขึ้น

ปัจจุบันมีการพัฒนาประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างต่อเนื่อง วิธีการหนึ่งที่สามารถทำได้ง่ายและมีต้นทุนต่ำคือการผสมเถ้าลอยที่มีส่วนผสมหลักคือออกไซด์ของทั้งพวกโลหะ เช่น อลูมินัม เหล็ก แมกนีเซียม และออกไซด์ของพวกอโลหะ เช่น ซิลิกอน แคลเซียม ซัลเฟอร์ โซเดียม โพแทสเซียม แต่ทั้งนี้ส่วนผสมหลักคือซิลิกอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการเผาถ่านหินเป็นพลังงานในการผลิตกระแสไฟฟ้า การเพิ่มเถ้าลอยเป็นสารผสมเพิ่มคอนกรีต เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกล กำลังยึดหน่วง ความสามารถในการเท และความสามารถในการป้องกันการสึกกร่อน อีกทั้งเถ้าลอยเป็นวัสดุปอซโซลานิกที่ใช้ในงานคอนกรีตประเทศไทยอย่างแพร่หลายและมีการวิจัยพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั่วโลก

Ahmet Baga and Ilker Topcu (2012) ได้ทำการศึกษาผลกระทบทางกายภาพและผลทางกล รวมทั้งความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนและการป้องกันการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนในคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยปริมาณร้อยละ 0 ร้อยละ 15 ร้อยละ 30 และร้อยละ 45 โดยอัตราส่วนน้ำหนักคอนกรีต บ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วันและ 56 วัน พบว่าเมื่อเพิ่มส่วนผสมของเถ้าลอยเข้าไปในคอนกรีตจะเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนในโครงสร้างออกไปได้สัมพันธ์กับระยะเวลาการบ่มคอนกรีตพบว่าเมื่อบ่มคอนกรีตในน้ำนานขึ้นประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจากการทดลองพบว่าปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมในการใช้งานกับโครงสร้างคอนกรีตเพื่อป้องกันการกัดกร่อนในโครงสร้างคือร้อยละ 15 โดยอัตราส่วนน้ำหนักคอนกรีตและบ่มในน้ำเป็นเวลา 56 วัน

Garces *et al.* (2010) ได้ทำการทดลองประสิทธิภาพการป้องกันการกร่อนในเหล็กเสริมโครงสร้างฝังในซีเมนต์มอร์ต้าที่มีส่วนผสมของเถ้าลอยต่างชนิดกัน โดยใช้เถ้าลอยทั่วไปและเถ้าลอยอีก 3 ชนิดที่พัฒนาขึ้นจากเถ้าลอยทั่วไป คือ เถ้าลอยที่ผ่านการบด เถ้าลอยที่ผลิตไม่เป็นแม่เหล็ก และเถ้าลอยที่ผลิตเป็นแม่เหล็ก ในเผชิญสภาวะคาร์บอนชั้นและแช่อยู่ในน้ำทะเลบางส่วน ผลการทดสอบพบว่า เถ้าลอยที่ผ่านการบด และเถ้าลอยที่ผลิตไม่เป็นแม่เหล็ก มีประสิทธิภาพในการป้องกันสนิมเหล็กเสริมมากที่สุด โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (I_{corr}) ของเถ้าลอยที่ผ่านการบด และเถ้าลอยที่ผลิตไม่เป็นแม่เหล็ก มีค่าอยู่ประมาณ 0.1 และ 0.05 $\mu A/cm^2$ ขณะที่เถ้าลอยปกติและซีเมนต์มอร์ต้ามีค่าประมาณ 0.2 และ 1 $\mu A/cm^2$ ตามลำดับอีกทั้งยังสามารถลดการเคลื่อนที่ของคลอไรด์ลงได้เนื่องจากคอนกรีตมีความทึบขึ้นอีกด้วย

การจำแนกรูปแบบและระดับความเสียหายว่าการเกิดสนิมนั้นเกิดเนื่องมาจากกลไกการเสื่อมสภาพแบบใด ช่วยให้สามารถออกแบบวิธีการซ่อมแซมและเลือกวัสดุซ่อมที่เหมาะสมสำหรับการเสื่อมสภาพแต่ละประเภท ส่งผลให้สามารถปรับปรุงความแข็งแรงของโครงสร้างและชะลอการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กในอนาคตได้

9. การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับผลกระทบจากคลอไรด์

การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานสามารถแบ่งออกเป็นหมวดหมู่ใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภท ดังนี้ (Kim *et al.*, 2010)

ก. การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานโดยทั่วไป เป็นวิธีการประเมินความเป็นไปได้ของระบบการจัดการตลอดอายุการใช้งาน ซึ่งมักจะใช้ในการประเมินเพื่อหาทางเลือกด้วยการวิเคราะห์ประเภทของโครงสร้าง ชนิดของวัสดุ การบำรุงรักษาและซ่อมแซมโครงสร้าง

ข. การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานทางทฤษฎี เป็นวิธีที่สามารถประเมินความเสี่ยงของโครงสร้างได้ โดยใช้การวิเคราะห์แบบความน่าเชื่อถือเปลี่ยนแปลงตามเวลา และความน่าเชื่อถือไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา อีกทั้งยังสามารถพัฒนาระบบด้วยการนำระบบการบำรุงรักษาโครงสร้างเข้าไปด้วย

การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นการวิเคราะห์เพื่อเสนอแนวทางการซ่อมแซมโครงสร้างให้เหมาะสมกับแต่ละระดับความเสียหายมากที่สุดตามราคาที่ได้ประมาณไว้เป็นค่าใช้จ่ายในอนาคต โดยมุ่งเน้นวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายทางเศรษฐศาสตร์จากการซ่อมแซมโครงสร้างสะพานที่เสียหายเนื่องจากคลอไรด์เป็นค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน ซึ่งจะทำให้ทราบค่าใช้จ่ายต่างๆตลอดอายุการใช้งานที่แตกต่างจากการวิเคราะห์หาความคุ้มค่าเพียงอย่างเดียว เนื่องจากจะสนใจเฉพาะเวลาในการคืนทุนว่าเร็วเพียงใด แต่การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน เป็นผลรวมของราคาค่าก่อสร้างรวมกับการบำรุงรักษาโครงสร้างนั้นๆ (Dimitri V. Val and Mark G. Stewart, 2003) สมการที่ใช้วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานแสดงดังสมการที่ 14

$$LCC(T) = C_D + C_C + C_{QA} + C_{IN}(T) + C_M(T) + \sum P_{fi}(T) C_{SFi} \quad (14)$$

โดยที่	C_D	คือ ราคาค่าออกแบบ
	C_C	คือ ราคาค่าก่อสร้าง (ค่าวัสดุรวมค่าแรงงาน)
	C_{QA}	คือ ราคาค่าควบคุมและประกัน
	$C_{IN}(T)$	คือ ราคาค่าการตรวจสอบสภาพ
	$C_M(T)$	คือ ราคาค่าการบำรุงรักษา
	$P_{fi}(T)$	คือ ความน่าจะเป็นสะสมของการแตกลอนตามกาลเวลา
	C_{SFi}	คือ ราคาค่าการเสียหายจากการแตกลอน

การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายเป็นมูลค่าปัจจุบันทำให้สามารถวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุนซ่อมแซมโครงสร้างในอนาคตโดยนำอัตราดอกเบี้ยมาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบแนวทางการซ่อมแซมต่างๆที่ต่างเวลากันมาเป็นมูลค่า ณ เวลาเดียวกัน ซึ่งได้ผลเป็นทางเลือกที่คุ้มค่าในการซ่อมแซมโครงสร้างสูงสุด ซึ่งหาได้ดังแสดงในสมการที่ 15

$$P = F/(1+R)^n$$

$$P = (A/R) * (1 - 1/(1+R)^n) \quad (15)$$

โดยที่	P	คือ มูลค่าปัจจุบัน
	F	คือ มูลค่าเงินในอนาคต
	A	คือ ค่าใช้จ่ายรายปี
	R	คือ อัตราดอกเบี้ย

n คือ จำนวนงวดที่พิจารณา

ราคาค่าก่อสร้างคือผลรวมของค่าวัสดุและแรงงาน มาตรฐานสำหรับโครงสร้างที่มีกำลังคอนกรีต 40 MPa และมีระยะหุ้มคอนกรีต 50 มม. กำหนดให้มีค่าก่อสร้าง (C_c) เท่ากับ 1.0 ส่วนค่าควบคุมและประกันจะประมาณค่าได้ดังตารางที่ 7 (Dimitri V. Val and Mark G. Stewart, 2003) โดยจะอยู่ในพจน์ของราคาค่าก่อสร้าง

ตารางที่ 7 การประมาณค่าควบคุมและประกัน

ระยะหุ้มคอนกรีต (มม.)	$F_c' = 32\text{MPa}$	$F_c' = 40\text{MPa}$	$F_c' = 50\text{MPa}$
30	$-0.072C_c$	$-0.048C_c$	$-0.027C_c$
50	$-0.025C_c$	0.0	$0.022C_c$
70	$0.026C_c$	$-0.052C_c$	$-0.075C_c$

ราคาที่เกี่ยวข้องกับการซ่อมแซมหรือการแทนที่รวมทั้งความสูญเสียจากผู้ใช้งาน เช่น C_{SF} มีความสำคัญเพราะในบางโครงสร้าง ความสูญเสียจากผู้ใช้งานมีมูลค่าสูงกว่าราคาการซ่อมแซม หรือบำรุงรักษาโครงสร้าง อีกทั้งเป็นมูลค่าที่เกิดขึ้นแตกต่างกันตามลักษณะโครงสร้างซึ่งเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ยาก จึงสมมติให้ราคาที่เกิดจากการซ่อมหรือแทนที่โดยไม่มีการปรับปรุงคุณภาพของโครงสร้างมีค่าเท่ากับสองเท่าของราคาค่าก่อสร้างรวมกับราคาของการประกันคุณภาพ นั่นคือ $C_{SF} = 2C_c + C_{QA}$ (Ehlen and Marshall, 1996)

Stewart (2001) ได้เสนอแนวทางการพิจารณาสองแนวทางไว้ โดยสองแนวทางนี้จะแสดงให้เห็นขอบเขตการซ่อมแซมที่แย (แนวทางการซ่อมแซมที่ 1) และดี (แนวทางการซ่อมแซมที่ 2) และสมมติว่าประสิทธิภาพในการซ่อมแซมทั้งสองวิธีเป็น 100%

แนวทางการซ่อมแซมที่ 1

- ซ่อมแซมทันทีที่มีการแตกล่อน
- ไม่ทำการปรับปรุงความทนทานของโครงสร้างที่ทำการซ่อมแซม
- คอนกรีตจะแตกล่อนได้อีกในช่วงอายุการใช้งานที่เหลือของโครงสร้าง นั่นคือ จะมีการซ่อมแซมอีกหลายครั้งโดยจำนวนครั้งสูงสุดที่จะทำการซ่อมแซมจะเท่ากับจำนวนครั้งของการตรวจสอบทั้งหมดตลอดอายุของโครงสร้าง

แนวทางการซ่อมแซมที่ 2

- ซ่อมแซมทันทีที่มีการแตกถล่ม
- จะทำการปรับปรุงคุณภาพของโครงสร้าง นั่นคือโดยการเพิ่มระยะหุ้มของคอนกรีตหรือ/และเพิ่มคุณภาพของคอนกรีต ดังนั้น ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการแตกถล่มตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างจะลดลง

อย่างไรก็ตามจำนวนครั้งที่ทำการซ่อมแซมหรือบำรุงรักษาโครงสร้างขึ้นอยู่กับประเภทของโครงสร้าง,วิธีการใช้งานในปัจจุบัน,ความสามารถในการหาวัสดุ และ อื่นๆที่เป็นไปได้ กระบวนการดังนี้สามารถใช้และเปลี่ยนแปลงเพื่อใช้ในการทำนายและติดตามการเปลี่ยนแปลงทำลาย ความต้องการซ่อมแซม ราคาในการซ่อมแซม ผลกระทบจากการซ่อมแซม ประสิทธิภาพของโครงสร้างที่รับการซ่อมแซมแล้ว เพื่อให้โครงสร้างมีอายุการใช้งานจนถึงอายุที่ได้รับการออกแบบมา

จากข้อมูลความรับผิดชอบขององค์กรและการตรวจเอกสารทั้งหมดดังที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยชิ้นนี้จึงมีความสำคัญและจำเป็นที่จะต้องจัดทำขึ้น เนื่องจากกรมทางหลวงชนบทมีสะพานในการดูแลจำนวนมากถึง 8,000 สะพานและสะพานจำนวนหนึ่งเกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากการกัดกร่อนของคลอไรด์และอิทธิพลจากกระแสน้ำขึ้น น้ำลงที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพที่บริเวณโครงสร้างสะพานส่วนล่าง และละอองเกลือคลอไรด์ในบรรยากาศที่กัดกร่อนโครงสร้างสะพานส่วนบน ทำให้สะพานเสื่อมสภาพรวดเร็วและมีอายุการใช้งานสั้นกว่าอายุที่ได้ทำการออกแบบไว้ ดังนั้นการประเมินการเสื่อมสภาพของโครงสร้างด้วยสายตา การเจาะเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตและการเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์ ประกอบกับข้อมูลอื่นๆเพื่อมาวิเคราะห์ จึงเป็นการตรวจสอบโครงสร้างเพื่อประเมินวิธีการซ่อมแซมโครงสร้างที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน อีกทั้งในปัจจุบันกรมทางหลวงชนบทยังไม่มีคู่มือในการซ่อมแซมสะพานที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ และส่วนหนึ่งของงานวิจัยชิ้นนี้จึงเป็นการจัดทำเป็นคู่มือในการตรวจสอบ ซ่อมแซม เพื่อลดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสะพานของกรมทางหลวงชนบทและนำไปใช้ประกอบการบำรุงรักษาสะพานได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมทั้งในแง่ประสิทธิภาพ วิธีการซ่อมแซมและประเมินค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานในรูปแบบของค่าใช้จ่ายรายปีเพื่อเป็นแนวทางในการบำรุงรักษาสะพานให้เกิดความคุ้มค่าสูงสุด อีกทั้งทำให้สะพานที่อยู่ในสภาพแวดล้อมทะเลมีอายุการใช้งานที่ยืนยาวมากขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ในการตรวจสอบและประเมินความเสียหายด้วยสายตา
 - 1.1 แบบฟอร์มการประเมิน
 - 1.2 กล้องถ่ายรูป
 - 1.3 ไฟฉาย ใช้ในกรณีที่ทำการตรวจสอบในเวลากลางคืน
 - 1.4 ตลับเมตร
 - 1.5 อุปกรณ์วัดขนาดรอยร้าว
 - 1.6 เครื่องตรวจสอบตำแหน่งเหล็กเสริม
2. อุปกรณ์ในการเก็บตัวอย่างคอนกรีต
 - 2.1 สว่านและดอกสว่านเจาะคอนกรีต
 - 2.2 อุปกรณ์เก็บผงคอนกรีต ทำจากหัวอุดท่อ PVC ขนาด 2 นิ้ว เจาะรูตรงกลาง
 - 2.3 ก้านวัดระยะติดสว่าน หรือเวอร์เนีย
 - 2.4 ซองซิปปลาสติก
 - 2.5 ป้ายข้อมูล สำหรับระบุรายละเอียดตัวอย่างในซองพลาสติก
 - 2.6 แปรงขนาดเล็ก
 - 2.7 หัวเป่าลม
 - 2.8 ไฟส่องสว่าง (กรณีที่ต้องเก็บตัวอย่างในเวลากลางคืน)
 - 2.9 ซีเมนต์ไร้การหดตัว (Non-shrink cement) พร้อมอุปกรณ์ซ่อมรูเจาะ
3. อุปกรณ์ในการทดสอบทางเคมี
 - 3.1 เครื่องทดสอบปริมาณคลอไรด์ไอออนในสารละลาย (Metrohm 781 pH/Ion meter)
 - 3.2 กระจกเก็บตัวอย่างคอนกรีต
 - 3.3 ขวดรูปชมพู่
 - 3.4 กระจกตวง
 - 3.5 น้ำปราศจากไอออน

- 3.6 สารละลายโซเดียมคลอไรด์
- 3.7 โพแทสเซียมไนเตรต
- 3.8 สารละลายบัฟเฟอร์
- 3.9 เครื่องชั่งความละเอียด 3 ตำแหน่ง
- 3.10 ปีกเกอร์
- 3.11 กระดาษกรองเบอร์ 1
- 3.12 บิวเรต
- 3.13 กรวยพลาสติก หรือ กรวยแก้ว
- 3.14 แท่งแก้วคนสาร
- 3.15 Volumetric Flask
- 3.16 ดรอปเปอร์
- 3.17 ปิเปต

วิธีการ

1. ศึกษาทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา

การศึกษาทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา มีจุดประสงค์เพื่อรวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำนายและวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก ประสิทธิภาพของวิธีการซ่อมแซมและป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ พบว่าสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตั้งอยู่ใกล้ชายฝั่งทะเล ในทะเล หรือบริเวณที่ได้รับผลกระทบเนื่องจากเกลือคลอไรด์ หากไม่ได้รับการป้องกันหรือซ่อมแซมที่เหมาะสมจะส่งผลให้อายุการใช้งานสั้นลงกว่าที่ได้ออกแบบไว้ อีกทั้งค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานในการบำรุงรักษาสะพานสูงเกินกว่าที่จำเป็น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากับโครงสร้างสะพานชายฝั่งทะเล ทำนายอายุการใช้งานและวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน โดยเลือกวิธีการซ่อมแซมและป้องกันการเสื่อมสภาพของโครงสร้างที่แพร่หลายในประเทศไทย เพื่อหาแนวทางในการซ่อมแซมโครงสร้างที่เหมาะสมสูงสุด

2. การทดสอบภาคสนามเพื่อสำรวจการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพาน

ในการศึกษาครั้งนี้ทำการทดสอบสะพานบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเลจำนวน 5 สะพาน ได้แก่ สะพานที่ ตำบลบางหญ้าแพรก อำเภอเมืองสมุทรสาคร จังหวัดสมุทรสาคร จำนวน 2 สะพาน และ สะพานที่ตำบลพังราด อำเภอแกลง จังหวัดระยอง จำนวน 3 สะพาน

2.1 การทดสอบการเสื่อมสภาพด้วยสายตา

วางแผนการทดสอบโดยแบ่งการตรวจสอบโครงสร้างออกเป็นส่วนๆ เพื่อสะดวกในการประเมินความเสียหายที่พบบนโครงสร้างและการตรวจสอบและประเมินโครงสร้างด้วยสายตาทั้ง ด้านบนและด้านล่างของสะพานอ้างอิงตามการประเมินระดับการเสื่อมสภาพด้วยสายตาของ Port and Harbor Research Institute (1999) ซึ่งมีเกณฑ์การแบ่งระดับความเสียหายตามตารางที่ 3 โดยใช้ขั้นตอนการตรวจสอบด้วยสายตาดังนี้

- ทำแบบฟอร์มในการประเมินผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยสายตา และเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบ
- ตรวจสอบโครงสร้างด้วยสายตาโดยเน้นความเสียหายที่เกิดกับโครงสร้างหลัก เช่น คาน เสา พื้น และบันทึกผลการตรวจสอบลงในแบบฟอร์มพร้อมถ่ายภาพประกอบ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 28 การตรวจสอบและบันทึกผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยสายตาลงบนแบบฟอร์ม (ก) วัดขนาดสะพาน (ข) บันทึกขนาดและความเสียหายลงบนแบบฟอร์ม

2.2 การเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตจากโครงสร้างและตัวอย่างน้ำบริเวณที่สะพานตั้งอยู่

เจาะเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตบริเวณพื้นคาน และเสาทุกความลึก 10 ม.ม. ตามระดับความเสียหายที่พบในโครงสร้างเพื่อทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างและเก็บตัวอย่างน้ำช่วงน้ำขึ้น-น้ำลงเพื่อทดสอบปริมาณคลอไรด์ในน้ำ ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตดำเนินการดังนี้

- ตรวจสอบตำแหน่งเหล็กเสริมในคอนกรีตด้วยเครื่องสแกนตำแหน่งเหล็กเสริม



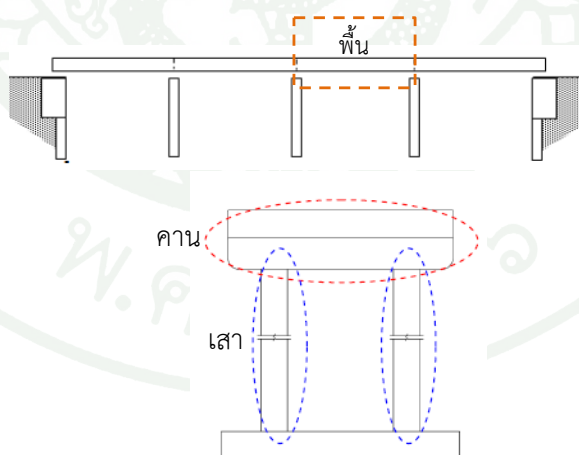
(ก)



(ข)

ภาพที่ 29 การตรวจสอบตำแหน่งเหล็กเสริมและเก็บผงคอนกรีตจากโครงสร้าง (ก) การตรวจสอบตำแหน่งเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตด้วยเครื่องสแกนตำแหน่งเหล็กเสริม (ข) การเจาะเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตจากโครงสร้าง

— เจาะเก็บผงคอนกรีตโดยใช้สว่านเจาะพร้อมเก็บผงทุกระดับความเสียหายที่พบในโครงสร้างพื้น คาน เสา ครึ่งละ 10 ม.ม. จนถึงระดับผิวเหล็กเสริม โดยพื้นจะทำการเจาะเก็บตัวอย่างจากท้องพื้น คานเจาะเก็บตัวอย่างบริเวณด้านข้างใกล้แกนสะเทิน และเสาเก็บตัวอย่างบริเวณช่วงน้ำขึ้น-น้ำลง ส่วนโครงสร้างที่มีการเสื่อมสภาพในระดับ 5 จนกระทั่งคอนกรีตเกิดการหลุดล่อนจะเก็บตัวอย่างจากคอนกรีตบริเวณด้านข้างบริเวณที่หลุดล่อน ดังแสดงในภาพที่ 30



ภาพที่ 30 ตำแหน่งที่ทำการเจาะเก็บผงคอนกรีตจากโครงสร้าง

— เก็บตัวอย่างผงคอนกรีตแยกตามระดับความลึกใส่ซองพลาสติก พร้อมระบุตำแหน่งและระดับความลึกที่เจาะใส่ลงในซอง



(ก)



(ข)

ภาพที่ 31 การเก็บผงคอนกรีตและซ่อมแซมรูเจาะ (ก) ซองเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตพร้อมทั้งระบุรายละเอียด (ข) การซ่อมแซมรูเจาะด้วยซีเมนต์ไร้การหดตัว

- ซ่อมแซมรอยเจาะโดยใช้ซีเมนต์ไร้การหดตัวอุดรูให้เต็มแล้วปาดผิวหน้าให้เรียบเสมอผิวเดิม
- เก็บตัวอย่างน้ำทะเลเพื่อทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในน้ำโดยเก็บตัวอย่างน้ำ 2 ช่วง คือ ขณะน้ำขึ้น และ ขณะน้ำลง จากกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ดังแสดงในตารางที่ 8 และ ตารางที่ 9 ซึ่งแสดงเวลาน้ำขึ้นและน้ำลงของจังหวัดสมุทรสาคร และ ระยอง ตามลำดับ

ตารางที่ 8 เวลาน้ำขึ้นและน้ำลงปากแม่น้ำท่าจีน จังหวัดสมุทรสาคร เดือนพฤษภาคมช่วงวันที่ทำการเจาะเก็บตัวอย่างผงคอนกรีต

วัน	เวลา												
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1.9	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	1.1	1.3
2	1.9	1.8	1.7	1.5	1.3	1.1	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8	1.0	1.2

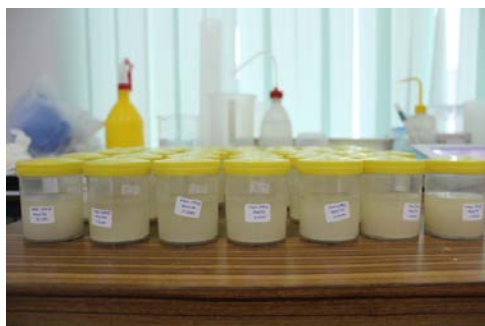
ตารางที่ 9 เวล่าน้ำขึ้นและน้ำลงปากน้ำระยอง จังหวัดระยอง เดือนพฤษภาคมช่วงวันที่ทำการเจาะเก็บตัวอย่างผองคอนกรีต

วัน	เวลา												
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
8	1.2	1.1	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	1.1	1.3	1.4	1.5	1.6	1.6
9	1.2	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.5	1.6	1.7
10	1.2	1.0	0.9	0.8	0.7	0.7	0.8	0.9	1.1	1.2	1.4	1.6	1.7

3. การทดสอบปริมาณคลอไรด์ในห้องปฏิบัติการ

3.1 การทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตและน้ำ

- นำผงปูนซึ่งน้ำหนักแล้วนำไปแช่ในน้ำปราศจากไอออน 50 มิลลิลิตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองผงปูนในน้ำออกด้วยกระดาษกรอง
- นำน้ำผงปูนที่ผ่านการกรองแล้วจำนวน 10 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไนเตรตจำนวน 10 มิลลิลิตร เพื่อกำจัดตัวขัดขวางการตรวจจับคลอไรด์ไอออนของเครื่องทดสอบและสามารถวัดปริมาณคลอไรด์ไอออนในตัวอย่างได้แม่นยำมากขึ้น
- กระตุ้นการทำงานของเครื่องทดสอบปริมาณคลอไรด์ไอออนในสารละลาย (Metrohm 781 pH/Ion meter) โดยนำอุปกรณ์ตรวจจับแช่ไว้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร ประมาณ 1 ชั่วโมง ก่อนทำการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ไอออน
- ทำการทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ไอออนและบันทึกค่า
- ทำการทดสอบความเป็นกรด-เบสและบันทึกค่า



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

ภาพที่ 32 การทดสอบปริมาณคลอไรด์ในผงปูน (ก) การแช่ผงปูนในน้ำปราศจากไอออน (ข) การกรองผงปูน (ค) สารละลายโพแทสเซียมไนเตรต (ง) สารละลายโซเดียมคลอไรด์กระตุ้น การทำงานของเครื่องทดสอบปริมาณคลอไรด์ไอออน (จ) การทดสอบปริมาณคลอไรด์ไอออน (ฉ) การทดสอบความเป็นกรด-เบส

4. การทำนายอายุโครงสร้างสะพาน

4.1 คำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ปรากฏเฉลี่ย (ชม.²/ปี) จากแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้างทุกระดับความเสียหายที่ตรวจพบ

4.2 ทำนายระยะเวลาในการเสื่อมสภาพระดับต่างๆด้วย 2 วิธี ดังนี้

- นำค่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีตและสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์เฉลี่ยทำนายระยะเวลาที่ทำให้ปริมาณคลอไรด์ที่ระดับเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับ 1.2 กก./ม.³ ซึ่งถือเป็นจุดสิ้นสุดการเสื่อมสภาพระดับ 0 และ 2.0 กก./ม.³ ซึ่งถือเป็นจุดสิ้นสุดระดับการเสื่อมสภาพระดับที่ 2 และคอนกรีตเริ่มเกิดการแตกร้าวจากสนิม ด้วยสมการที่ 10 ตามลำดับ

- นำอายุการใช้งานของสะพาน ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต ระยะหุ้มคอนกรีต และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพื่อหาระยะเวลาสิ้นสุดระดับการเสื่อมสภาพระดับที่ 2 และคอนกรีตเริ่มเกิดการแตกร้าวจากสนิม ด้วยสมการที่ 11

4.3 คำนวณระยะเวลาในการสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมที่ร้อยละ 1 ร้อยละ 5 และร้อยละ 20 ด้วย 2 วิธี ดังนี้

- นำค่าความหนาแน่นของเหล็กเสริม เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมแรกเริ่ม และอายุของโครงสร้างไปทำนายระยะเวลาการสูญเสียปริมาตรหน้าตัดเหล็กเสริมของแต่ละโครงสร้างสะพานด้วยสมการที่ 12 โดยอ้างอิงขนาดเหล็กเสริมจากแบบมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท

- นำค่าอัตราการกัดกร่อนเหล็กเสริม เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมแรกเริ่ม และอายุของโครงสร้างไปทำนายระยะเวลาการสูญเสียปริมาตรหน้าตัดเหล็กเสริมของแต่ละโครงสร้างสะพานด้วยสมการที่ 13 โดยอ้างอิงขนาดเหล็กเสริมจากแบบมาตรฐานของกรมทางหลวงชนบท

5. การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน

5.1 ศึกษาวิธีการซ่อมแซมโครงสร้างสะพานที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ ได้แก่

ในขั้นตอนการศึกษานี้ ประกอบด้วยการค้นหาข้อมูลในอดีตที่เกี่ยวข้องกับการซ่อมแซมสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ด้วยแนวทางต่างๆดังต่อไปนี้

- การซ่อมแซมด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีแบบที่ใช้ระบบกระแสไฟฟ้า
- การซ่อมแซมด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีแบบโลหะกัตกกร่อน

- การซ่อมแซมด้วยวิธีการฉีดพ่นรอยร้าว
- การซ่อมแซมด้วยวิธีการเคลือบผิวคอนกรีต
- การแทนที่ด้วยคอนกรีต

5.2 วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานจากการซ่อมแซมตามแนวทางการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ของ International Committee on Concrete Model Code for Asia (2004) โดยแปลงเป็นค่าใช้จ่ายรายปีและเปรียบเทียบการซ่อมแซมเพื่อเป็นแนวทางในการตัดสินใจ ดังสรุปไว้ในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 สรุปแนวทางในการเลือกวิธีการซ่อมแซมโครงสร้างตามระดับการเสื่อมสภาพ

ระดับการเสื่อมสภาพ	วิธีซ่อมแซม	วัสดุซ่อมแซม	อายุการใช้งาน (ปี)
1-2	- การฉีดอัดรอยร้าว	- เรซินหรือซีเมนต์	4
	- การเคลือบผิวคอนกรีต	- โพลียูรีเทน	10
	- การถ่ายประจุไฟฟ้า	- เครื่องปล่อยกระแสไฟฟ้า	25
3-4	- การลดปริมาณคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าเคมี	- เครื่องปล่อยกระแสไฟฟ้า	35
	- การฉีดอัดรอยร้าว	- เรซินหรือซีเมนต์	4
	- การเคลือบผิวคอนกรีต	- โพลียูรีเทน	10
	- การถ่ายประจุไฟฟ้า	- เครื่องปล่อยกระแสไฟฟ้า	25
	- การเททับด้วยคอนกรีต	- คอนกรีตผสมเถ้าลอยหรือมอร์ต้า	100
5	- การเคลือบผิวคอนกรีต	- โพลียูรีเทน	10
	- การใช้โลหะทดแทน	- โลหะทดแทน	10
	- การถ่ายประจุไฟฟ้า	- เครื่องปล่อยกระแสไฟฟ้า	25

วิธีการคำนวณ

— การหาราคาค่าออกแบบ, ค่าก่อสร้าง (ค่าวัสดุรวมกับค่าแรงงาน), ราคาค่าควบคุมและประกัน, ราคาค่าการตรวจสอบสภาพ, ราคาค่าการบำรุงรักษาและราคาค่าการเสียหายจากการแตกร่อน (C_D , C_C , C_{QA} , C_{IN} , C_M , C_{SF}) ของโครงสร้างสะพานทั้ง 5 แห่งโดยกำหนดให้ราคาค่าออกแบบ (C_D) มีค่าประมาณร้อยละ 3 ของราคาค่าก่อสร้าง นั่นคือ $C_D = 0.03 \times C_C$

— ราคาค่าก่อสร้าง (C_C) คำนวณได้จากค่าวัสดุรวมกับค่าแรง โดยการนำปริมาณวัสดุของโครงสร้างส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินและปริมาณเสาเข็มมาคูณกับราคาวัสดุต่อหน่วย รวมกับค่าแรงงานเท่านั้น ซึ่งอ้างอิงจากราคาต่อหน่วยเมื่อปีที่ก่อสร้าง โดยคิดทั้งราคาโครงสร้างพื้น คาน เสา เสาเข็ม พylon ตับริม และกำแพง ทำเช่นนี้ทั้ง 5 สะพาน

— ค่าควบคุมและประกันราคา (C_{QA}) ได้จากการเปิดตารางดังที่กล่าวมาข้างต้นซึ่งในกรณีที่โครงสร้างมีกำลังอัดคอนกรีต 25 Mpa และมีระยะหุ้มคอนกรีต 7 ซม. จะได้ค่า $C_{QA} = 0.1278 C_C$

— ค่าการตรวจสอบสภาพ (C_{IN}) อ้างอิงมาจากหนังสือพิมพ์ฐานเศรษฐกิจฉบับที่ 2241 วันที่ 05-08 สิงหาคม พ.ศ. 2550 คอลัมน์ อสังหา Real Estate ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10 บาทต่อตารางเมตร

การบำรุงรักษาโครงสร้างสะพานได้แบ่งแนวทางศึกษาในทุกสะพานออกเป็น 41 วิธี ตามระดับการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง ดังนี้

1. วิธีสร้างโครงสร้างใหม่ (ไม่มีการซ่อมแซม) โดยการปล่อยให้สะพานเสื่อมสภาพตามธรรมชาติ แล้วทำการสร้างโครงสร้างใหม่ ซึ่งกำหนดให้โครงสร้างเสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้เมื่อเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดไปร้อยละ 20

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 1

2. วิธีฉัดอัตรอยรั่ว ทำการฉัดอุดซ้ำทุก 4 ปี
3. วิธีเคลือบผิวคอนกรีต ทำการเคลือบผิวซ้ำทุก 10 ปี
4. วิธีการถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 25 ปี

5. วิธีฉีดอัตรอยร้าวและเคลือบผิวคอนกรีต ทำการบำรุงรักษาทุก 14 ปี
6. วิธีฉีดอัตรอยร้าวและถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 29 ปี
7. วิธีเคลือบผิวคอนกรีตและถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 35 ปี
8. วิธีฉีดอัตรอยร้าว, เคลือบผิวคอนกรีตและถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 39 ปี

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 2 ทำการซ่อมแซมครั้งแรกเมื่อปริมาณคลอไรด์ที่เหล็กเสริมมีค่าเท่ากับ 2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

9. วิธีฉีดอัตรอยร้าว ทำการฉีดอัดซ้ำทุก 4 ปี
10. วิธีเคลือบผิวคอนกรีต ทำการเคลือบผิวซ้ำทุก 10 ปี
11. วิธีถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 25 ปี
12. วิธีฉีดอัตรอยร้าวและเคลือบผิวคอนกรีต ทำการบำรุงรักษาทุก 14 ปี
13. วิธีฉีดอัตรอยร้าวและถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 29 ปี
14. วิธีเคลือบผิวคอนกรีตและถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 35 ปี
15. วิธีฉีดอัตรอยร้าว, เคลือบผิวคอนกรีตและถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 39 ปี

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 3 ทำการซ่อมแซมครั้งแรกเมื่อเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดไปร้อยละ 1

16. วิธีฉีดอัตรอยร้าว ทำการฉีดอัดซ้ำทุก 4 ปี
17. วิธีเคลือบผิวคอนกรีต ทำการเคลือบผิวซ้ำทุก 10 ปี
18. วิธีถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 25 ปี
19. วิธีฉีดอัตรอยร้าวและลดปริมาณคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าเคมี ทำการบำรุงรักษาทุก 39 ปี
20. วิธีฉีดอัตรอยร้าวและเคลือบผิวคอนกรีต ทำการบำรุงรักษาทุก 14 ปี
21. วิธีฉีดอัตรอยร้าวและถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 29 ปี
22. วิธีเคลือบผิวคอนกรีตและถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 35 ปี
23. วิธีฉีดอัตรอยร้าว, เคลือบผิวคอนกรีตและถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 39 ปี
24. วิธีฉีดอัตรอยร้าว, ลดปริมาณคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าเคมีและถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 64 ปี
25. วิธีฉีดอัตรอยร้าว, เคลือบผิวคอนกรีต, ลดปริมาณคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าเคมีและถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 74 ปี

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 4 ทำการซ่อมแซมครั้งแรกเมื่อเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดไปร้อยละ 5

ละ 5

26. วิธีฉีดอัดรอยร้าว ทำการฉีดอัดซ้ำทุก 4 ปี
27. วิธีเคลือบผิวคอนกรีต ทำการเคลือบผิวซ้ำทุก 10 ปี
28. วิธีการถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 25 ปี
29. วิธีฉีดอัดรอยร้าวและลดปริมาณคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าเคมี ทำการบำรุงรักษาทุก 39 ปี
30. วิธีฉีดอัดรอยร้าวและเคลือบผิวคอนกรีต ทำการบำรุงรักษาทุก 14 ปี
31. วิธีฉีดอัดรอยร้าวและถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 29 ปี
32. วิธีเคลือบผิวคอนกรีตและถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 35 ปี
33. วิธีฉีดอัดรอยร้าว, เคลือบผิวคอนกรีตและถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 39 ปี
34. วิธีฉีดอัดรอยร้าว, ลดปริมาณคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าเคมีและถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 64 ปี
35. วิธีฉีดอัดรอยร้าว, เคลือบผิวคอนกรีต, ลดปริมาณคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าเคมีและถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 74 ปี

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 5 ทำการซ่อมแซมครั้งแรกเมื่อเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดไปร้อยละ 20

ละ 20

36. วิธีการเททับด้วยคอนกรีต โดยการเปลี่ยนคอนกรีตหุ้ม เหล็กเสริมหลักขนาดเล็กที่สุด และเปลี่ยนเหล็กเสริมรัตรอบ ทำการซ่อมแซมซ้ำทุก 100 ปี
37. วิธีการเททับด้วยคอนกรีตและเคลือบผิวคอนกรีต ทำการบำรุงรักษาทุก 110 ปี
38. วิธีการเททับด้วยคอนกรีตและถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 125 ปี
39. วิธีการเททับด้วยคอนกรีตและโลหะทดแทน ทำการบำรุงรักษาทุก 110 ปี
40. วิธีการเททับด้วยคอนกรีต, เคลือบผิวคอนกรีตและถ่ายประจุไฟฟ้า ทำการบำรุงรักษาทุก 135 ปี
41. วิธีการเททับด้วยคอนกรีต, เคลือบผิวคอนกรีตและโลหะทดแทน ทำการบำรุงรักษาทุก 120 ปี

- หาค่าใช้จ่ายต่อปีของราคาค่าออกแบบ ค่าก่อสร้าง ค่าควบคุมและประกัน ค่าการตรวจสอบสภาพ ค่าการบำรุงรักษาและค่าการเสียหายจากการแตกลอน (C_D , C_C , C_{QA} , C_{IN} , C_M , C_{SF}) เพื่อนำมาแทนในสมการที่ 14 และใช้ค่าอัตราดอกเบี้ยเท่ากับร้อยละ 5.7 อ้างอิงมาจากต้นทุนค่าเสียโอกาส (Opportunity cost) ของธนาคารโลกในเดือนธันวาคมปี 2556 (ธนาคารโลก, 2556)

- เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน (LCC) ในแต่ละวิธี เพื่อเลือกวิธีที่ให้ค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด

5.3 จัดทำคู่มือซ่อมแซมโครงสร้างสะพานที่เสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์ ประกอบด้วยหัวข้อหลักดังนี้

- บทนำ เป็นหัวข้อเกี่ยวกับกระบวนการบำรุงรักษาสะพาน
- การตรวจสอบด้วยสายตา เป็นหัวข้อเกี่ยวกับการตรวจสอบและบันทึกผลการตรวจสอบด้วยสายตา
- ลักษณะความเสียหาย เป็นหัวข้อเกี่ยวกับลักษณะและสาเหตุความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสะพาน
- การประเมินความเสียหาย เป็นหัวข้อเกี่ยวกับการประเมินสภาพความเสียหายและระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วนของสะพาน
- ทางเลือกวิธีแก้ไขและซ่อมแซมสะพาน เป็นหัวข้อเกี่ยวกับทางเลือกในการซ่อมแซมสะพานแต่ละระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนของสะพาน
- วัสดุซ่อมแซมสะพาน เป็นหัวข้อเกี่ยวกับข้อแนะนำในการเลือกใช้วัสดุ
- วิธีการซ่อมแซมสะพาน เป็นหัวข้อเกี่ยวกับขั้นตอนการซ่อมแซมสะพาน อุปกรณ์และเครื่องมือในการซ่อมแซม และข้อควรระวังต่างๆ

ผลและวิจารณ์

รายละเอียดของสะพานได้สรุปไว้ดังแสดงในตารางที่ 11 พบว่าสะพานที่สำรวจในจังหวัดสมุทรสาคร (S1 และ S2) มีอายุการใช้งานมากและอยู่ใกล้ชายฝั่งทะเล ทำให้มีโอกาสได้รับผลกระทบจากเกลือคลอไรด์สูงกว่าสะพานในจังหวัดระยอง (R1, R2 และ R3) ที่อายุการใช้งานสั้นกว่าและอยู่ไกลจากชายฝั่งทะเล

ตารางที่ 11 สรุปรายละเอียดของสะพานที่ทำการตรวจสอบ

จังหวัด	ตำแหน่ง		พื้น			จำนวน	จำนวน	ระยะทาง	อายุ
	N	E	กว้าง (ม.)	ยาว (ม.)	จำนวน พื้น	คน	เสาต่อ คน	จาก ชายฝั่ง (กม.)	สะพาน (ปี)
สมุทรสาคร (S1)	13.52550	100.26254	7	10.1	3	4	5	0.1	26
สมุทรสาคร (S2)	13.51602	100.26800	6	6	3	4	4	0.05	21
ระยอง (R1)	12.73031	101.72089	12.7	8	3	4	7	4.2	11
ระยอง (R2)	12.74287	101.73677	10.2	10	1	2	6	6.3	4
ระยอง (R3)	12.71522	101.76973	9.8	12	1	2	-	3.3	4

สะพานที่ทำการตรวจสอบเป็นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งหมดกำลังอัดคอนกรีตทรงกระบอก 250 กก./ซม.² ตามมาตรฐานกรมโยธาธิการ (มยธ. 101) และสะพาน R3 เป็นสะพานช่วงเดียวไม่มีเสากลาง รายละเอียดของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างแสดงในภาคผนวก ก

1. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

1.1 ผลการตรวจสอบและประเมินโครงสร้างด้วยสายตา

การตรวจสอบประเมินโครงสร้างในภาคสนามเป็นการประเมินความสมบูรณ์ของโครงสร้างเบื้องต้นในการใช้งานของสะพาน วิธีการประเมินสภาพโครงสร้างสะพานคือการบันทึกภาพและลักษณะความเสียหายจากการกัดกร่อนเนื่องจากคลอไรด์ แล้วนำข้อมูลที่ได้จากการสำรวจทั้งหมดมาวิเคราะห์ประเมินระดับความเสียหายต่อไป

จากการตรวจสอบและประเมินโครงสร้างสะพานบริเวณใกล้ชายฝั่งทะเลจำนวน 5 แห่ง ได้แก่ สะพานที่ ตำบลบางหญ้าแพรก อำเภอเมืองสมุทรสาคร จังหวัดสมุทรสาคร จำนวน 2 แห่ง และ สะพานที่ตำบลพังราด อำเภอแกลง จังหวัดระยอง จำนวน 3 แห่ง พบว่าสะพานที่ตรวจสอบจำนวน 4 ใน 5 สะพานโครงสร้างส่วนบนมีการลาดแอสฟัลต์ทำให้ตรวจสอบรอยร้าวไม่ได้ ส่วนอีก 1 สะพานมีความเสียหายในโครงสร้างส่วนบนมีน้อยมาก แต่โครงสร้างส่วนล่างพบความเสียหายทั้งบริเวณพื้น คาน เสา โดยจะพบความเสียหายในระดับที่ 1 มากที่สุดทั้งบริเวณพื้น คาน และเสา ผลการประเมินสภาพโครงสร้างสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 12

ผลการตรวจสอบและประเมินโครงสร้างด้วยสายตาพบว่า ความเสียหายที่พบมากที่สุดในการโครงสร้างคือความเสียหายระดับที่ 1 ซึ่งพบทั้ง 3 ชั้นส่วนหลักในโครงสร้างคือ เสา คาน และพื้น ความเสียหายระดับที่ 5 เป็นระดับที่เกิดความเสียหายรุนแรงมากที่สุดพบในคานและพื้น ระดับที่ 4 และ 3 เป็นระดับความเสียหายที่รุนแรงน้อยลงจะพบได้ในบริเวณพื้น ระดับที่ 2 1 และ 0 พบทั้งใน เสา คาน และพื้น เป็นความเสียหายปานกลางถึงเล็กน้อย ความเสียหายระดับ 1 เกิดขึ้นมากที่สุดทั้ง 3 โครงสร้างหลัก คือ เสา คาน และพื้น คิดเป็นร้อยละ 38.04 ของความเสียหายทั้งหมด ส่วนความเสียหายระดับที่ 5 พบมากในพื้นและเสา ส่วนโครงสร้างอีกร้อยละ 16 ไม่สามารถตรวจสอบได้เนื่องจากพื้นที่บริเวณสะพาน ซึ่งภาพที่ 38 ได้แสดงตัวอย่างความเสียหายที่พบจากการตรวจสอบโครงสร้างด้วยสายตา

ตารางที่ 12 สรุปผลการตรวจสอบและประเมินโครงสร้างสะพานด้วยสายตา

ชิ้นส่วน	สะพาน	ระดับ 0		ระดับ 1		ระดับ 2		ระดับ 3		ระดับ 4		ระดับ 5		ตรวจสอบไม่ได้		จำนวนทั้งหมด	
		จำนวน	%	จำนวน	%	จำนวน	%	จำนวน	%	จำนวน	%	จำนวน	%	จำนวน	%	จำนวน	%
พื้น	S1			1	33.33			1	33.33			1	33.33			3	100.00
	S2			1	16.67	1	16.67					2	33.33	2	33.33	6	100.00
	R1			3	100.00											3	100.00
	R2	1	100.00													1	100.00
	R3	1	100.00													1	100.00
คาน	S1			2	50.00	1	25.00			1	25.00					4	100.00
	S2			1	25.00					1	25.00	1	25.00	1	25.00	4	100.00
	R1			4	100.00											4	100.00
	R2	2	100.00													2	100.00
	R3	2	100.00													2	100.00
เสา	S1			16	100.00											16	100.00
	S2			5	25.00	3	15.00							12	60.00	20	100.00
	R1			2	14.29	3	21.43	3	21.43	3	21.43	3	21.43			14	100.00
	R2	12	100.00													12	100.00
	R3															0	100.00
รวม		18	19.565	35	38.040	8	8.696	4	4.348	5	5.435	7	7.609	15	16.30	92	100.00



การเสื่อมสภาพระดับ 0



การเสื่อมสภาพระดับ 1



การเสื่อมสภาพระดับ 2



การเสื่อมสภาพระดับ 3



การเสื่อมสภาพระดับ 4



การเสื่อมสภาพระดับ 5

ภาพที่ 33 ตัวอย่างภาพความเสียหายในระดับต่างๆ

การเจาะเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตจะทำการเจาะเก็บจาก 3 ชั้นส่วนหลักของโครงสร้าง ได้แก่ พื้น คาน และเสา โดยการเจาะเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตที่พื้นจะทำการเจาะเก็บบริเวณใต้ท้องพื้น การเจาะเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตที่คานจะทำการเจาะเก็บบริเวณด้านข้างของคานใกล้แกนเสา และ การเจาะเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตที่เสาจะทำการเจาะเก็บจากบริเวณส่วนที่เกิดน้ำขึ้น-น้ำลง

1.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์

ตารางที่ 13 ค่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิว (C_0) ของโครงสร้างสะพานที่ทำการทดสอบ

สะพาน (ปี)	ชั้นส่วน	ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (C_0) (มก./ม. ³)					
		ระดับ 0	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 3	ระดับ 4	ระดับ 5
สมุทรสาคร (S1, 26ปี)	คาน	-	74,844	54,297	-	38,5708	-
	เสา	-	181,307	-	-	-	-
	พื้น	-	31,653	-	15,968	-	-
สมุทรสาคร (S2, 21ปี)	คาน	-	131,862	-	-	-	147,361
	เสา	-	331,851	49,245	-	-	-
	พื้น	-	116,814	149,686	-	-	102,851
ระยอง (R1, 11ปี)	คาน	-	7,146	-	-	-	-
	เสา	-	18,115	102,814	251,225	83,680	222,228
	พื้น	-	5,262	-	-	-	-
ระยอง (R2, 4ปี)	คาน	11,583	-	-	-	-	-
	เสา	50,702	-	-	-	-	-
	พื้น	7,236	-	-	-	-	-
ระยอง (R3, 4ปี)	คาน	25,942	-	-	-	-	-
	พื้น	7,699	-	-	-	-	-
ค่าเฉลี่ย	คาน	18,763	53,463	54,297	-	385,708	147,361
	เสา	29,200	132,818	76,030	251,225	83,680	222,228
	พื้น	7,699	38,432	149,686	15,968	-	102,851
ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	คาน	11,462	58,936	24,282	-	172,493	65,902
	เสา	22,067	147,373	45,747	112,351	37,422	99,383
	พื้น	3,618	54,058	74,843	7,984	-	51,425
สัมประสิทธิ์ การ แปรปรวน	คาน	0.611	1.102	0.447	-	0.447	0.447
	เสา	0.756	1.110	0.602	0.447	0.447	0.447
	พื้น	0.470	1.407	0.500	0.500	-	0.500

หลังจากที่มีการสำรวจโครงสร้างสะพานด้วยสายตา เจาะเก็บผงคอนกรีตในทุกระดับความเสียหายที่พบในสะพาน แล้วนำผงคอนกรีตมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าปริมาณคลอไรด์ในโครงสร้างคอนกรีตจากการสำรวจด้วยเครื่องทดสอบปริมาณคลอไรด์ไอออนในสารละลาย (Metrohm 781 pH/Ion meter) จะได้ค่าปริมาณคลอไรด์ในหน่วยเปอร์เซ็นต์คลอไรด์ต่อน้ำหนักคอนกรีต ซึ่งผลการทดสอบได้ค่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต (C_0) และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ไอออน (D) ของโครงสร้างสะพานที่ทำการทดสอบแสดงในตารางที่ 13 และตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ไอออน (D) ของโครงสร้างสะพานที่ทำการทดสอบ

สะพาน	ชิ้นส่วน	สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ไอออน (D) ($\times 10^{-12}$ ม. ² /วินาที)					
		ระดับ 0	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 3	ระดับ 4	ระดับ 5
สมุทรสาคร (S1)	คาน	-	0.335	6.750	-	4.840	-
	เสา	-	1.700	-	-	-	-
	พื้น	-	2.070	-	76.900	-	-
สมุทรสาคร (S2)	คาน	-	1,040.000	-	-	-	1,090.000
	เสา	-	2.630	20.000	-	-	-
	พื้น	-	0.937	11.600	-	-	15.100
ระยอง (R1)	คาน	-	16.000	-	-	-	-
	เสา	-	3.010	12.500	11.100	16.100	41.100
	พื้น	-	59.600	-	-	-	-
ระยอง (R2)	คาน	74.200	-	-	-	-	-
	เสา	7.050	-	-	-	-	-
	พื้น	43.500	-	-	-	-	-
ระยอง (R3)	คาน	716.000	-	-	-	-	-
	พื้น	3.780	-	-	-	-	-
ค่าเฉลี่ย	คาน	395.000	352.000	6.750	-	4.840	1090.000
	เสา	7.050	2.450	16.200	11.100	16.100	41.100
	พื้น	23.700	20.900	11.600	76.900	-	15.100
ส่วน	คาน	37.100	517.000	3.380	-	2.420	544.000
เบี่ยงเบน	เสา	3.530	1.350	9.850	5.560	8.070	20.600
มาตรฐาน	พื้น	19.100	26.400	5.200	3.440	-	6.730
สัมประสิทธิ์การแปรปรวน	คาน	0.094	1.469	0.500	-	0.500	0.500
	เสา	0.500	0.548	0.608	0.500	0.500	0.500
	พื้น	0.808	1.262	0.447	0.447	-	0.447

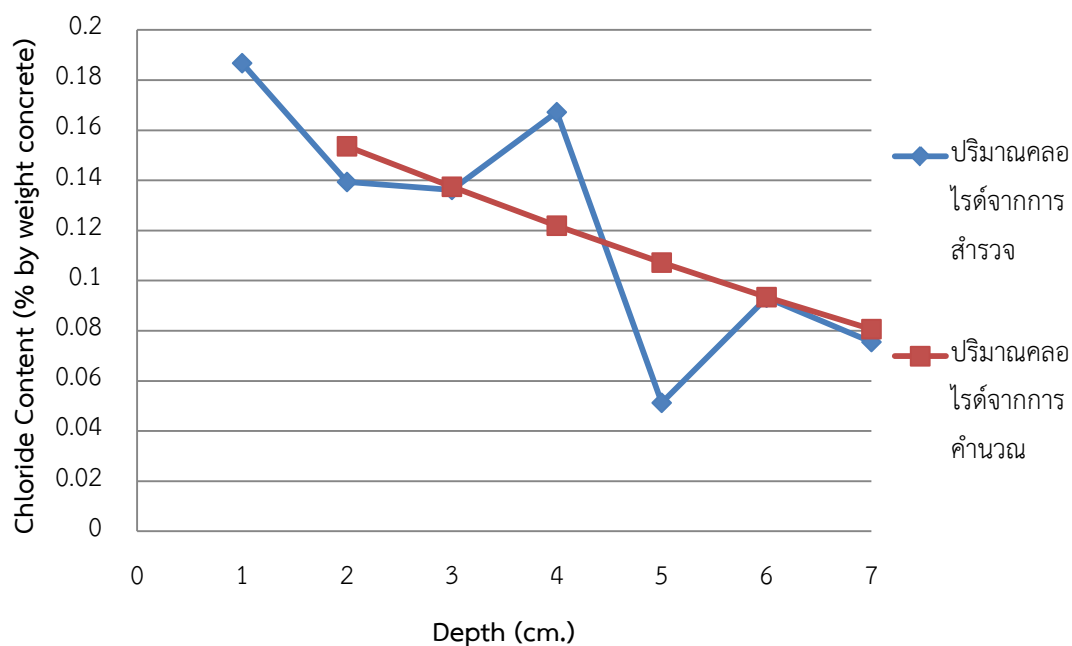
จากการเจาะสำรวจที่ระดับความลึกต่างๆ พบว่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิวมีค่าสูงที่สุดคือคานสะพาน S1 เสื่อมสภาพระดับที่ 4 มีปริมาณคลอไรด์ที่ผิวเท่ากับ 385708.65 มก. / ม.³ และมีแนวโน้มลดต่ำลงเรื่อยๆ ตามระดับการเสื่อมสภาพ โดยที่ปริมาณคลอไรด์ต่ำที่สุดคือพื้นสะพาน R1 เสื่อมสภาพระดับที่ 1 มีปริมาณคลอไรด์ที่ผิวเท่ากับ 5262.64 มก. / ม.³

เนื่องจากจุดที่เจาะสำรวจนั้นเป็นส่วนที่เกิดน้ำขึ้นน้ำลง ดังนั้นการแพร่ของคลอไรด์จากน้ำทะเลเข้าสู่คอนกรีตจึงเกิดได้ทั้งจากการแพร่ (Diffusion) การแพร่ทางไฟฟ้าเคมี (Migration) การพา (Convection) และการซึมผ่าน (Permeability) ส่งผลให้ปริมาณคลอไรด์มีค่าสูงในช่วงความลึกประมาณ 0-2 ซม. จากผิวหน้าคอนกรีต ซึ่งอาจเกิดจากผลของ Capillary suction ในขณะที่จุดสำรวจนี้เป็นบริเวณที่ถูกสาด (Splash zone) ส่วนความลึกตั้งแต่ 2-5 ซม. การแพร่ของคลอไรด์อาจเกิดเฉพาะการแพร่ (Diffusion) การแพร่ทางไฟฟ้าเคมี (Migration) และการซึมผ่าน (Permeability) เท่านั้น

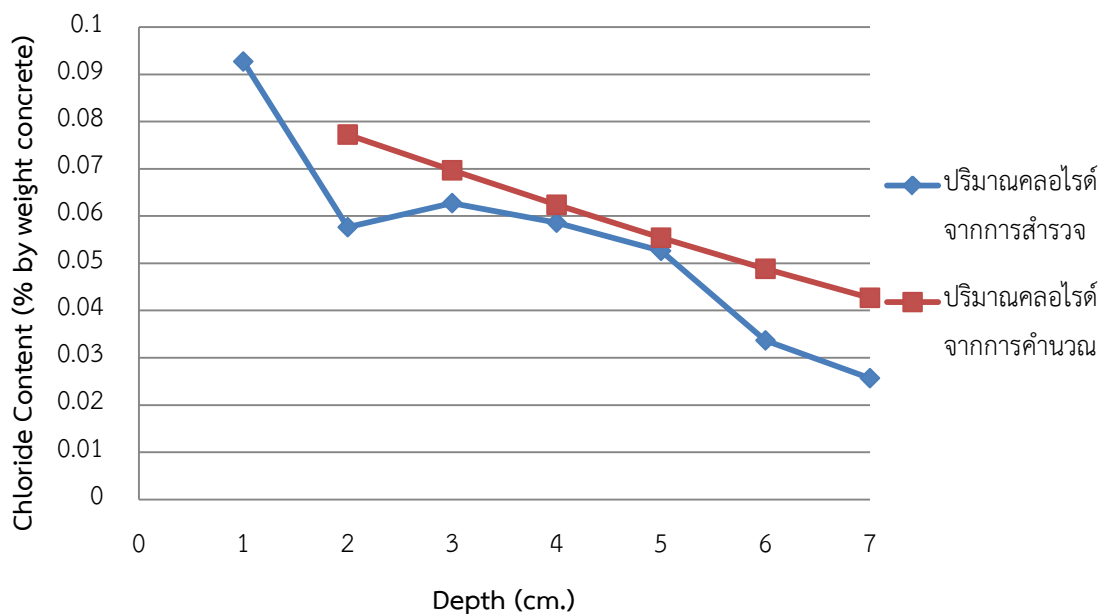
จากตารางที่ 13 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวสัมผัสของคอนกรีต (C_0) มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 7699.26 มก./ม.³ ถึง 385708.07 มก./ม.³ สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (COV) อยู่ในช่วง 0.447 ถึง 1.407 และพบว่าที่ความเสียหายที่ความเสียหายระดับต่ำจะมีแนวโน้มของปริมาณคลอไรด์ที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตต่ำกว่าระดับความเสียหายที่สูงทั้งสามชิ้นส่วนหลักของโครงสร้าง ซึ่งอาจเป็นผลรวมจากอายุการใช้งานของสะพานที่แตกต่างกันด้วย โดยปริมาณคลอไรด์ที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ผ่านมา และอาจมีผลเนื่องมาจากความแตกต่างของสภาพที่ตั้งและบรรยากาศ เช่น ระยะทางจากชายฝั่งทะเล ปริมาณน้ำฝนที่ชะล้างโครงสร้าง เป็นต้น

จากตารางที่ 14 สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ไอออน (D) ของคอนกรีตสะพานมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 2.45×10^{-12} ม.²/วินาที ถึง 1.09×10^{-9} ม.²/วินาที สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (COV) อยู่ในช่วง 0.094 ถึง 1.469 ค่าที่วิเคราะห์หามีความแปรปรวนเนื่องจากปัจจัยหลายๆอย่าง เช่น ระยะเวลาการใช้งานที่แตกต่างกันของแต่ละโครงสร้าง คุณภาพของคอนกรีต และความบกพร่องในการก่อสร้างโครงสร้างที่ทำให้คลอไรด์สามารถแพร่กระจายเข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้มากกว่าปกติ เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของคลอไรด์บริเวณอ่าวโตเกียว Matsushima (1996) พบว่ามีค่าเฉลี่ย 1.73×10^{-12} ม.²/วินาที สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนเท่ากับ 0.919 ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน

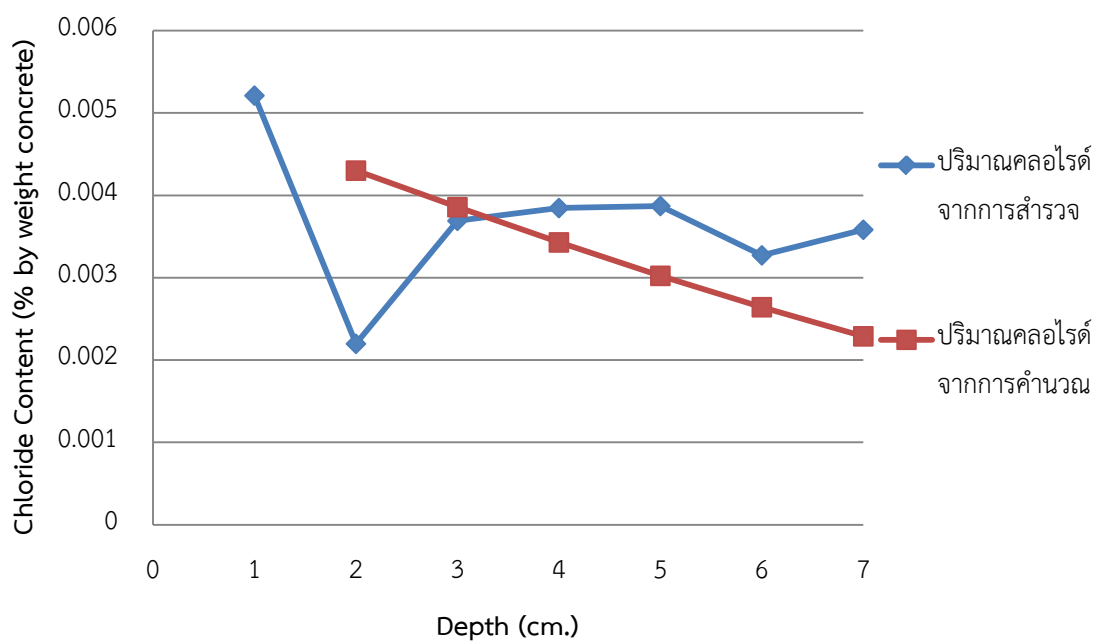
ภาพที่ 34 ถึง ภาพที่ 38 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณคลอไรด์ตามระยะ ความลึกจากการสำรวจในแต่ละสะพาน เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ไอออนและ ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวสัมผัสของคอนกรีตที่ได้จากการคำนวณมาแทนในสมการจากกฎข้อที่สองของฟิค แล้วนำค่าคลอไรด์มาเปรียบเทียบความสัมพันธ์กับความลึกปริมาณคลอไรด์ ของคานสะพานที่ทำการ สำรวจทั้ง 5 สะพาน ส่วนรายละเอียดของโครงสร้างอื่นแสดงไว้ในภาคผนวก ค



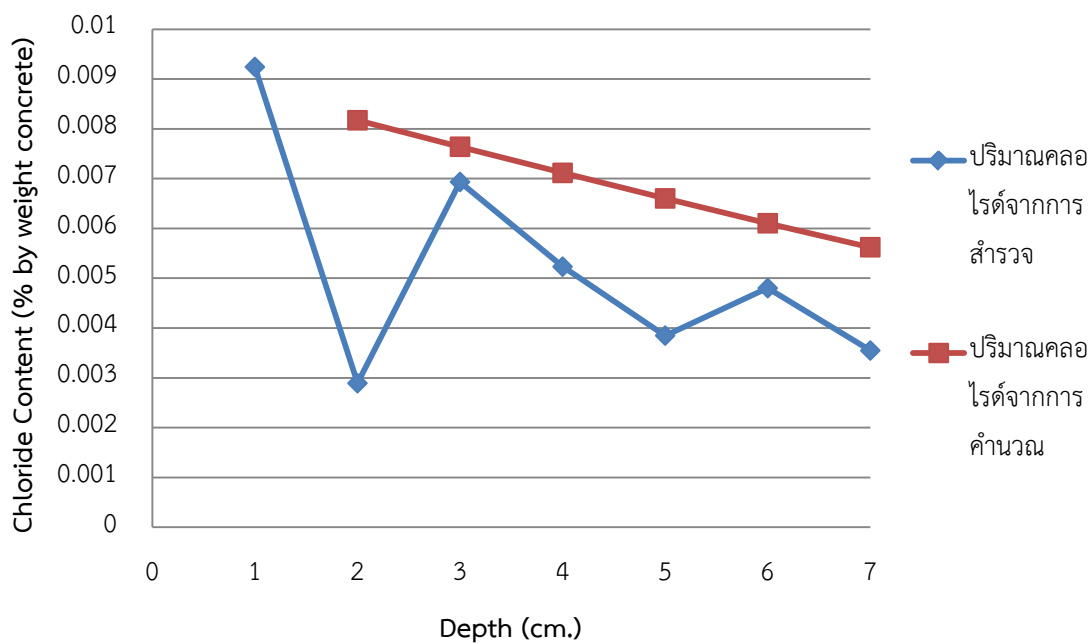
ภาพที่ 34 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในคานคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 4 ของสะพาน S1



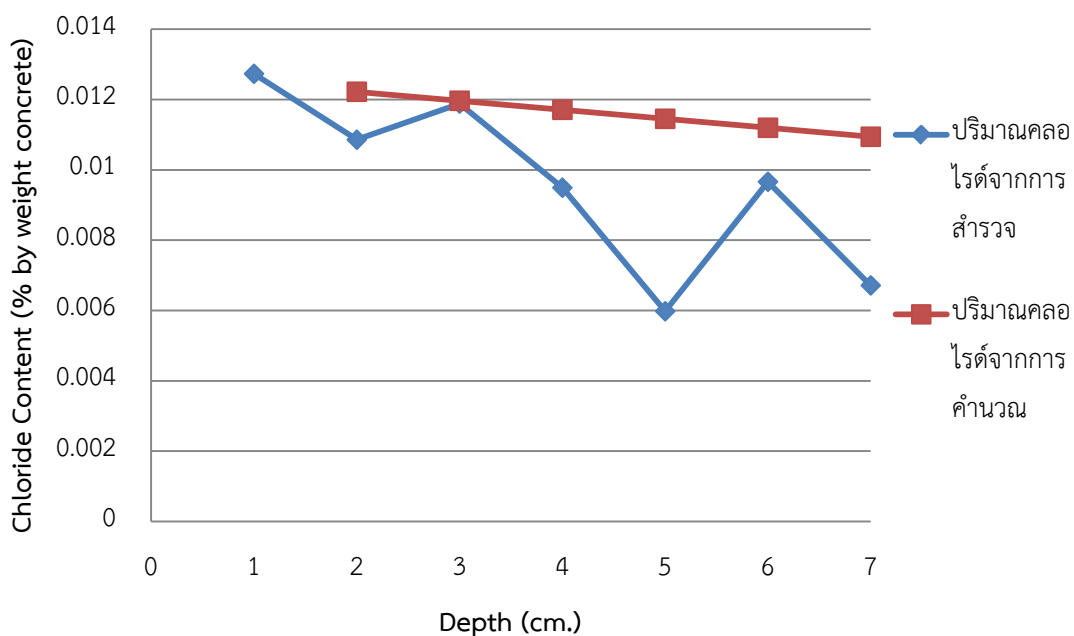
ภาพที่ 35 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในคานคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 5 ของสะพาน S2



ภาพที่ 36 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในคานคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 1 ของสะพาน R1

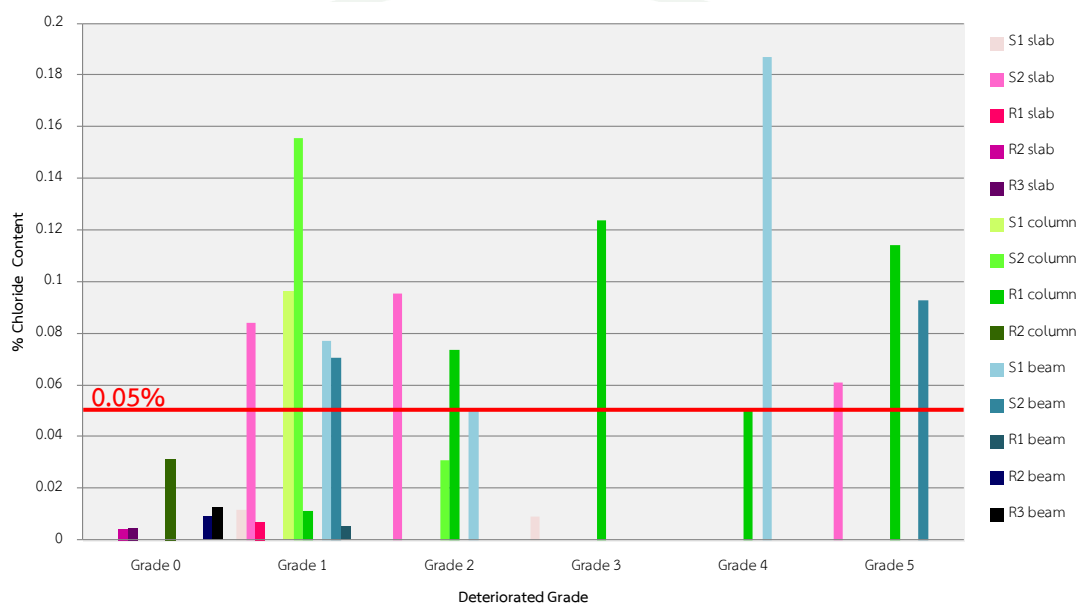


ภาพที่ 37 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในคานคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 0 ของสะพาน R2



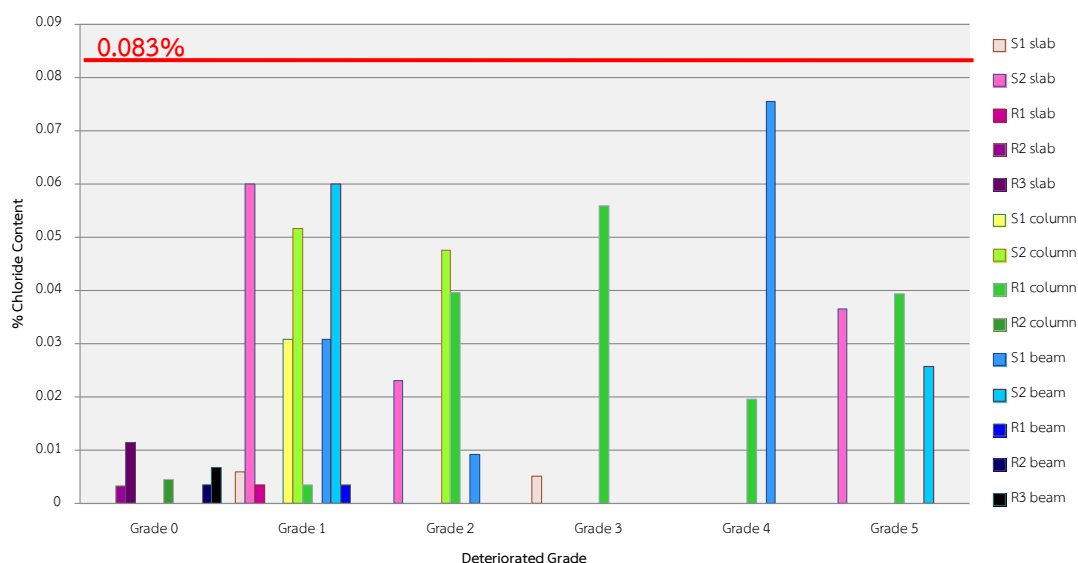
ภาพที่ 38 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในคานคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 0 ของสะพาน R3

จากภาพที่ 39 ถึงภาพที่ 43 พบว่าที่ความลึกตั้งแต่ 3-7 ซม. ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการเจาะสำรวจ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ไอออนเฉลี่ยนี้ไม่เหมาะที่จะใช้คำนวณปริมาณคลอไรด์ที่ความลึกน้อยกว่า 3 ซม. อย่างไรก็ตามการคำนวณปริมาณคลอไรด์ที่ระดับเหล็กเสริมนั้นจะอยู่ที่ความลึกมากกว่า 3 ซม. ในทุกโครงสร้างที่ทำการสำรวจ



ภาพที่ 39 ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีตจากชิ้นส่วนโครงสร้างสะพาน

ภาพที่ 39 แสดงให้เห็นว่าปริมาณคลอไรด์ไอออนที่บริเวณผิวคอนกรีตสูงกว่าร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนักคอนกรีต ซึ่งเป็นปริมาณคลอไรด์ในระดับที่สันนิษฐานว่าส่งผลให้เกิดรอยร้าวบนผิวคอนกรีตได้ ผลของปริมาณคลอไรด์สอดคล้องกับผลการตรวจสอบโครงสร้างด้วยสายตา คือไม่พบรอยแตกร้าวบนผิวคอนกรีตในระดับ 0 แต่พบรอยแตกร้าวตั้งแต่ระดับ 1 ถึงระดับ 5

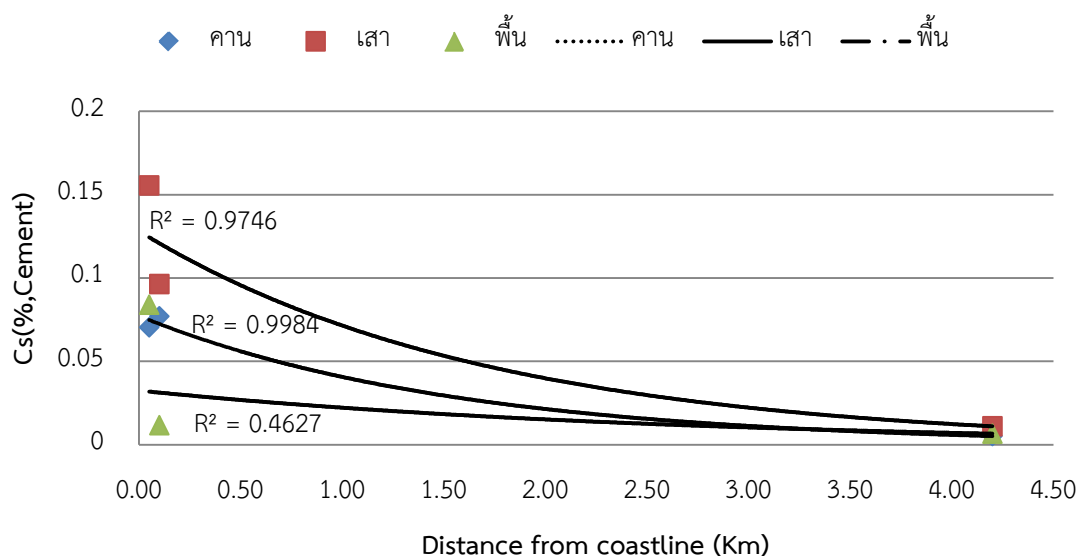


ภาพที่ 40 ปริมาณคลอไรด์ที่ระดับเหล็กเสริมจากชั้นส่วนโครงสร้างสะพาน

ภาพที่ 40 แสดงให้เห็นว่าไม่มีชิ้นส่วนใดในโครงสร้างที่ปริมาณคลอไรด์ไอออนที่ระดับของเหล็กเสริมสูงกว่าร้อยละ 0.083 โดยน้ำหนักคอนกรีต ดังนั้นจึงสามารถสันนิษฐานได้ว่าเหล็กเสริมในสะพานไม่เกิดการสูญเสียหน้าตัด

สาเหตุที่ทำให้ระยะเวลาในการเสื่อมสภาพของโครงสร้างแตกต่างกันมีหลายปัจจัย เช่น อายุการใช้งานของโครงสร้างสะพาน ระยะหุ้มคอนกรีต การแพร่ของคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีต ลักษณะการเผชิญคลอไรด์ของโครงสร้างที่แตกต่างกัน เป็นต้น

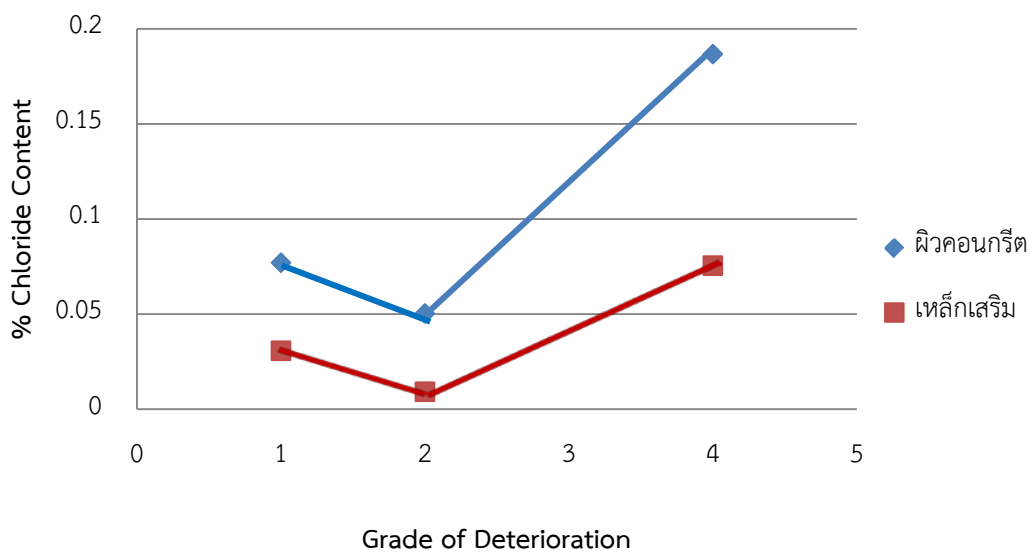
ภาพที่ 41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากชายฝั่งกับปริมาณคลอไรด์ที่ผิวของสะพาน S1 S2 และ R1 ในระดับความเสียหายที่ 1 ของเสาคานและพื้น



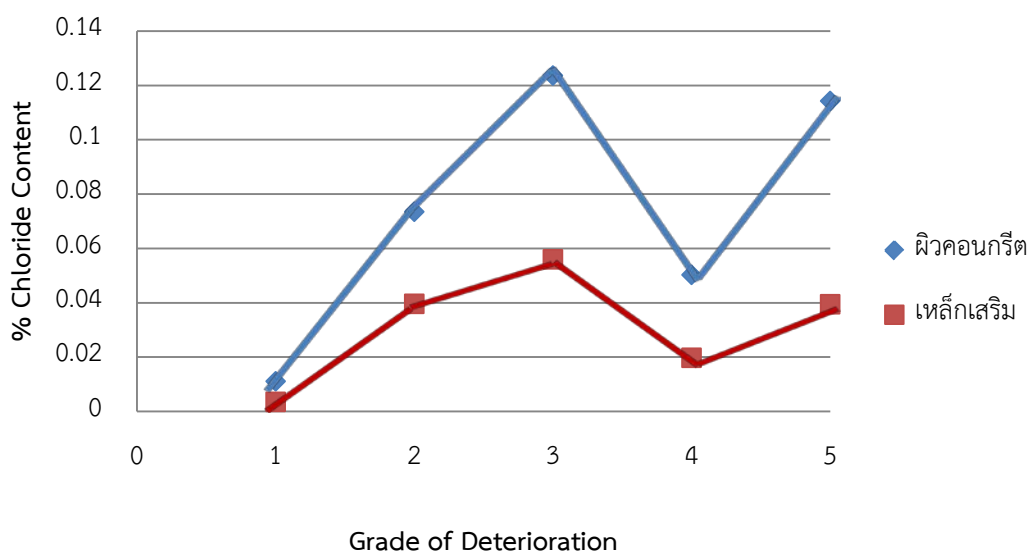
ภาพที่ 41 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากชายฝั่งกับปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีต

จากภาพที่ 44 ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณคลอไรด์ในสะพานที่ไกลจากชายฝั่งต่ำกว่า สะพานที่อยู่ใกล้ชายฝั่ง นั้นหมายถึงสภาพแวดล้อมมีอิทธิพลต่อความคงทนของสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับโครงสร้างที่อยู่ในทะเลจะมีการเสื่อมสภาพเนื่องจากคลอไรด์มากที่สุด ส่วนละอองทะเลที่เกิดตามแนวชายฝั่งเนื่องจากคลื่น จะถูกลมบริเวณผิวทะเลพัดเข้ามายังแผ่นดินก่อให้เกิดคลอไรด์ไอออนในชั้นบรรยากาศ จากนั้นคลอไรด์ไอออนจะไปสะสมบริเวณผิวโครงสร้างคอนกรีตและแพร่เข้าไปในคอนกรีตจนก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพ นอกจากนี้ผลการทดลองพบว่าปริมาณคลอไรด์ในพื้นที่ต่ำกว่า คานและเส้าตามลำดับ

ภาพที่ 42 และ ภาพที่ 43 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีตและปริมาณคลอไรด์ที่ระดับเหล็กเสริมกับระดับความเสียหายที่บริเวณของคานสะพาน S1 และเส้าของสะพาน R1

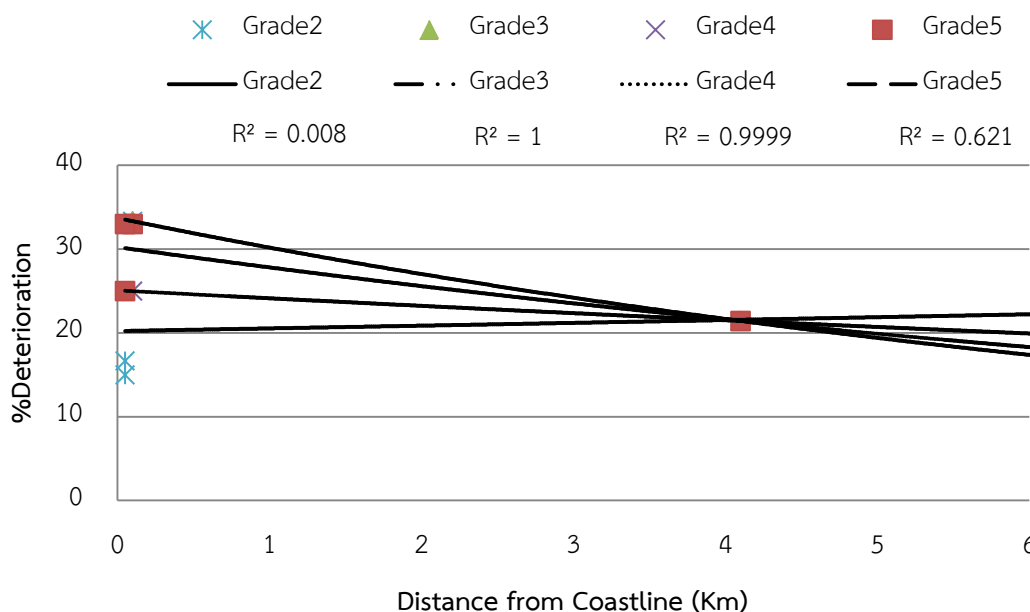


ภาพที่ 42 กราฟเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีตและปริมาณคลอไรด์ที่ระดับเหล็กเสริม
กับระดับความเสียหายที่พบบริเวณคานสะพาน S1



ภาพที่ 43 กราฟเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีตและปริมาณคลอไรด์ที่ระดับเหล็กเสริม
กับระดับความเสียหายที่พบบริเวณเสาสะพาน R1

จากภาพที่ 42 และ ภาพที่ 43 ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีตสูงกว่าปริมาณคลอไรด์ที่เหล็กเสริม โดยปริมาณคลอไรด์ที่เสาและคานสูงขึ้นเมื่อระดับการเสื่อมสภาพสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Song *et.al.* (2008) ที่ทดสอบตัวอย่างและโครงสร้างเผชิญคลอไรด์จากบรรยากาศ และผลที่ได้แสดงว่าระยะห่างจากชายฝั่งมีอิทธิพลอย่างมากต่อปริมาณคลอไรด์ที่ผิว



ภาพที่ 44 กราฟเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีตและปริมาณคลอไรด์ที่ระดับเหล็กเสริมกับระดับความเสียหายที่พบบริเวณเสาสะพาน R1

ภาพที่ 44 แสดงผลที่ได้จากการสำรวจด้วยสายตาของระดับการเสื่อมสภาพตั้งแต่ระดับ 2 ขึ้นไปซึ่งชัดเจนว่าเป็นการเสื่อมสภาพของเนื่องจากสนิม จากเส้นแนวโน้มพบว่าเมื่อระดับการเสื่อมสภาพรุนแรงมากขึ้นความน่าเชื่อถือของเส้นแนวโน้มจะสูงมากขึ้น และพบว่าสะพานที่ตั้งอยู่ห่างจากชายฝั่งระดับการเสื่อมสภาพที่พบจากการสำรวจด้วยสายตาจะอยู่ในระดับต่ำ ในขณะที่สะพานที่อยู่ใกล้ชายฝั่งระดับการเสื่อมสภาพจากการสำรวจด้วยสายตาจะอยู่ในระดับสูง

1.3 ผลการวิเคราะห์อายุการใช้งาน

มาตรฐานของ Japan Society of Civil Engineering (JSCE, 2003) ได้กำหนดปริมาณคลอไรด์ที่เป็นจุดเริ่มต้นการกัดกร่อนจนเกิดสนิมในเหล็กเสริม (the threshold value to initiate corrosion) มีค่าเท่ากับ 1.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หรือมีค่าประมาณร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนักคลอไรด์ต่อคอนกรีต ซึ่งเป็นจุดที่คอนกรีตจะเริ่มแตกร้าวและเกิดการกัดกร่อนอย่างรวดเร็ว และเมื่อปริมาณคลอไรด์มีค่าเท่ากับ 2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หรือมีค่าประมาณร้อยละ 0.083 โดยน้ำหนักคลอไรด์ต่อคอนกรีต ถือเป็นจุดเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมคอนกรีตในโครงสร้าง เมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ได้ออนเฉลี่ยในแต่ละระดับความเสียหายของแต่ละชั้นส่วนโครงสร้างทำนายปริมาณคลอไรด์ที่ผิวเหล็กเสริมโดยวิเคราะห์ที่ระยะเวลา 100 ปี สามารถทำนายอายุใช้งานที่เหลือของสะพานเนื่องจากผลของการซึมผ่านจากคลอไรด์และปริมาณคลอไรด์ที่ผิวจากการสำรวจด้วยกฎข้อที่สองของฟิค พบว่ามีสะพาน 3 แห่ง 4 ชั้นส่วนที่เกิดความเสียหายถึงระดับ 5 จัดเป็นระดับความเสียหายรุนแรงที่สุด มีการเสื่อมสภาพรุนแรงเนื่องจากคลอไรด์ซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตจนถึงระดับปริมาณคลอไรด์วิกฤตในช่วงระยะเวลา 100 ปี ส่งผลให้เกิดการกัดกร่อนที่เหล็กเสริมจนกระทั่งสูญเสียหน้าตัดรวดเร็วกว่าโครงสร้างที่มีการเสื่อมสภาพน้อย และเมื่อทำนายการเสื่อมสภาพโดยใช้สมการของ Pulvis *et.al.* (1994) เพื่อทำนายระยะเวลาที่เหล็กเสริมคอนกรีตเริ่มสูญเสียหน้าตัด 50 μm จากอัตราการกัดกร่อนเหล็กเสริม พบว่าทุกระดับความเสียหายในทุกสะพานเกิดการสูญเสียหน้าตัดในช่วงระยะเวลา 100 ปี ดังแสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ผลการทำนายการเสื่อมสภาพของสะพานด้วยกฎข้อที่สองของฟิคและสมการของ Pulvis

สะพาน	ชั้นส่วน	ระดับ	ระยะหุ้ม (ซม.)	กฎข้อที่ 2 ของฟิค		สมการของ Pulvis อายุที่เหล็กเสริม เริ่มสูญเสียหน้าตัด (ปี)
				อายุที่ระดับคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 0.05 (ปี)	อายุที่ระดับคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 0.083 (ปี)	
				อายุที่ระดับคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 0.05 (ปี)	อายุที่ระดับคลอไรด์เท่ากับร้อยละ 0.083 (ปี)	
S1	คาน	1	7	2	>100	31
	คาน	2	7	>100	>100	34
	คาน	4	7	20	29	26
	เสา	1	7	>100	>100	30
	พื้น	1	5	>100	>100	31
	พื้น	3	5	>100	>100	33

ตารางที่ 15 (ต่อ)

สะพาน	ชิ้นส่วน	ระดับ	ระยะหุ้ม (ชม.)	กฎข้อที่ 2 ของฟิค		สมการของ Pulvis อายุที่เหล็กเสริม เริ่มสูญเสียหน้าตัด (ปี)
				อายุที่ระดับคลอ ไรต์เท่ากับร้อยละ	อายุที่ระดับคลอ ไรต์เท่ากับร้อยละ	
				0.05 (ปี)	0.083 (ปี)	
S2	คาน	1	6	4	>100	26
	คาน	5	7	>100	>100	29
	เสา	1	7	30	75	26
	เสา	2	7	>100	>100	36
	พื้น	1	5	2	>100	20
	พื้น	2	7	17	>100	28
	พื้น	5	5	27	>100	21
R1	คาน	1	7	>100	>100	46
	เสา	1	7	>100	>100	40
	เสา	2	7	37	>100	27
	เสา	3	7	17	63	24
	เสา	4	7	>100	>100	29
	เสา	5	7	11	54	25
	พื้น	1	6	>100	>100	36
R2	คาน	0	7	>100	>100	34
	เสา	0	7	>100	>100	27
	พื้น	0	7	>100	>100	39
R3	คาน	0	7	>100	>100	32
	พื้น	0	6	>100	>100	38

ผลการคำนวณระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมคอนกรีตสะพานด้วยสมการของ JCI (1998) ใช้การพิจารณาจากระยะเวลาที่เหล็กเสริมขนาดเล็กที่สุดสูญเสียหน้าตัดในปริมาณต่างๆ โดยที่เหล็กเสริมที่เล็กที่สุดในคานและพื้น คือเหล็กเสริมขนาด 12 มม. ส่วนเหล็กเสริมที่เล็กที่สุดในเสา คือ 25 มม. เมื่อคำนวณระยะเวลาสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมของเหล็ก 2 ขนาดดังกล่าว ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 16

ผลการคำนวณระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมคอนกรีต สามารถคำนวณได้ในรูปฟังก์ชันของเวลาต่ออัตราการกัดกร่อนของ Markeset (2008) เมื่อคำนวณระยะเวลาสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมในชิ้นส่วนโครงสร้างต่างๆที่มีระยะหุ้มคอนกรีตและขนาดของเหล็กเสริมคอนกรีตต่างกัน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 17

ตารางที่ 16 ระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมคอนกรีตจากการคำนวณด้วยสมการของ JCI

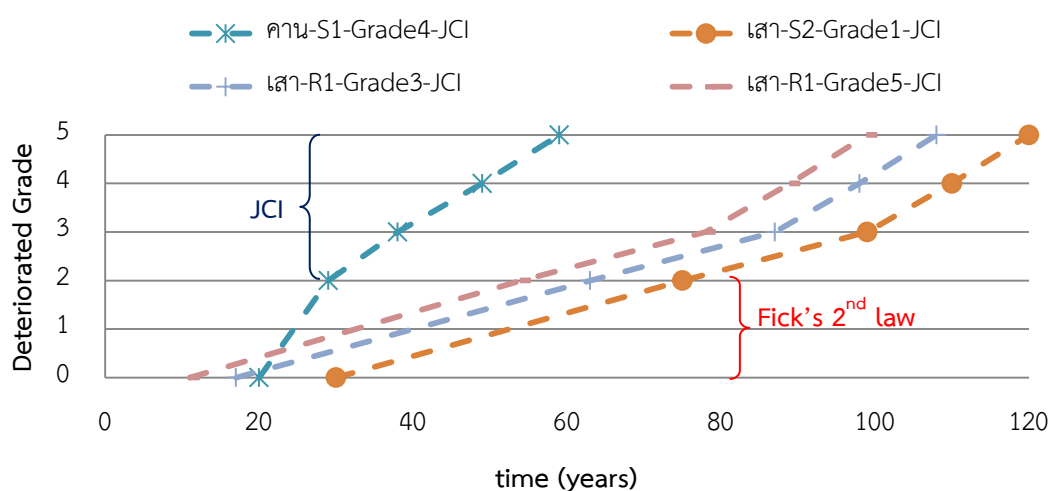
ชิ้นส่วน	เส้นผ่านศูนย์กลาง เหล็กเสริม (ม.ม.)	ระยะเวลาสูญเสียหน้าตัด (ปี)		
		ร้อยละ 1	ร้อยละ 5	ร้อยละ 20
คานและพื้น	12	9	12	30
เสา	25	24	35	45

ตารางที่ 17 ระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมคอนกรีตในรูปฟังก์ชันของเวลาต่ออัตราการกัดกร่อนของ Markeset

ชิ้นส่วน	อัตราส่วนน้ำ ต่อซีเมนต์	ระยะหุ้ม คอนกรีต (ซม.)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง เหล็กเสริม (ม.ม.)	ระยะเวลาสูญเสียหน้าตัด (ปี)		
				ร้อยละ 1	ร้อยละ 5	ร้อยละ 20
คานและพื้น	0.53	5	12	-	1	4
		6		-	1	5
		7		-	1	6
เสา		7	25	1	3	17

ผลจากการวิเคราะห์ร่วมกันระหว่างกฎข้อที่สองของฟิคกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมจนกระทั่งสูญเสียความสามารถในการรับแรงด้วยสมการของ JCI (1998) พบว่าคานสะพาน S1 ระดับการเสื่อมสภาพระดับ 4 เหล็กเสริมเริ่มสูญเสียหน้าเมื่อเวลาผ่านไป 29 ปี จากนั้นเหล็กเสริมจะสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 59 ปี เสาสะพาน S2 ระดับการเสื่อมสภาพระดับที่ 1 เหล็กเสริมเริ่มสูญเสียหน้าตัดภายในระยะเวลา 75 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ในระยะเวลา 120 ปี สะพาน R1 เกิดการเสื่อมสภาพจนกระทั่งเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดบนเสาระดับการเสื่อมสภาพระดับที่ 3 และ 5 โดยเสาสะพาน R1 ระดับการเสื่อมสภาพระดับที่ 3 เหล็กเสริมเริ่ม

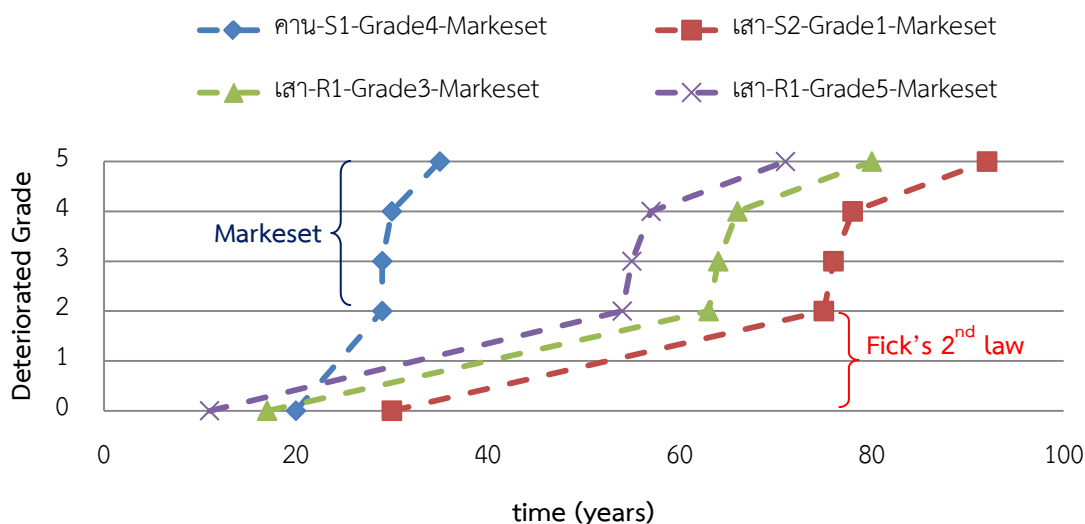
สูญเสียหน้าตัดภายในระยะเวลา 63 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ในระยะเวลา 108 ปี ส่วนเสาระดับการเสื่อมสภาพระดับที่ 5 เหล็กเสริมเริ่มสูญเสียหน้าตัดภายในระยะเวลา 54 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ในระยะเวลา 99 ปี ดังแสดงในภาพที่ 45 ส่วนโครงสร้างอื่นไม่พบการเสื่อมสภาพจนถึงระดับคลอไรด์วิกฤตหรือเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดภายในระยะเวลา 100 ปี สะพาน R2 และ R3 ไม่พบการเสื่อมสภาพจนถึงระดับคลอไรด์วิกฤตหรือเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดภายในระยะเวลา 100 ปี



ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพจากกฎข้อที่สองของฟิคและสมการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมของ JCI

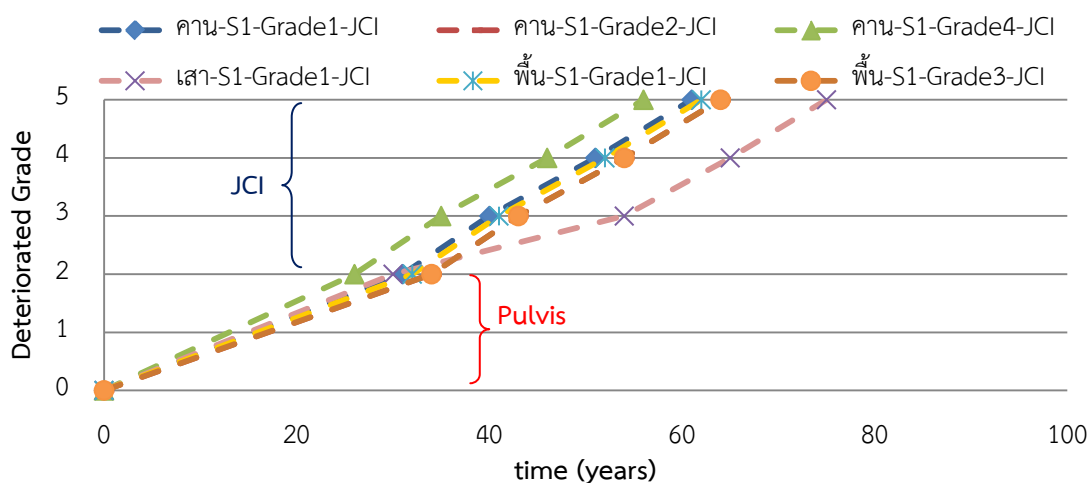
ผลจากการวิเคราะห์ร่วมกันระหว่างกฎข้อที่สองของฟิคกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset (2008) พบว่าสะพาน S1 จะเกิดการเสื่อมสภาพจนกระทั่งเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดบนคานระดับการเสื่อมสภาพระดับ 4 ซึ่งจะเริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 29 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 35 ปี สะพาน S2 ระดับการเสื่อมสภาพระดับที่ 1 เหล็กเสริมเริ่มสูญเสียหน้าตัดที่ภายในระยะเวลา 75 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ในระยะเวลา 92 ปี สะพาน R1 จะเกิดการเสื่อมสภาพจนกระทั่งเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดบนเสาระดับการเสื่อมสภาพระดับที่ 3 และ 5 โดยสะพาน R1 ระดับการเสื่อมสภาพระดับที่ เหล็กเสริมเริ่มสูญเสียหน้าตัดภายในระยะเวลา 63 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ในระยะเวลา 80 ปี ส่วนเสาระดับการเสื่อมสภาพระดับที่ 5 เหล็กเสริมเริ่มสูญเสียหน้าตัดภายในระยะเวลา 54 ปี จากนั้นเหล็กเสริมจะสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ในระยะเวลา 71 ปี ดังแสดงในภาพที่ 46 ส่วนโครงสร้างอื่นไม่พบการเสื่อมสภาพจนถึงระดับคลอไรด์วิกฤตหรือเหล็กเสริม

สูญเสียหน้าตัดภายในระยะเวลา 100 ปี สะพาน R2 และ R3 ไม่พบการเสื่อมสภาพจนถึงระดับคลอไรด์วิกฤตหรือเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดภายในระยะเวลา 100 ปี



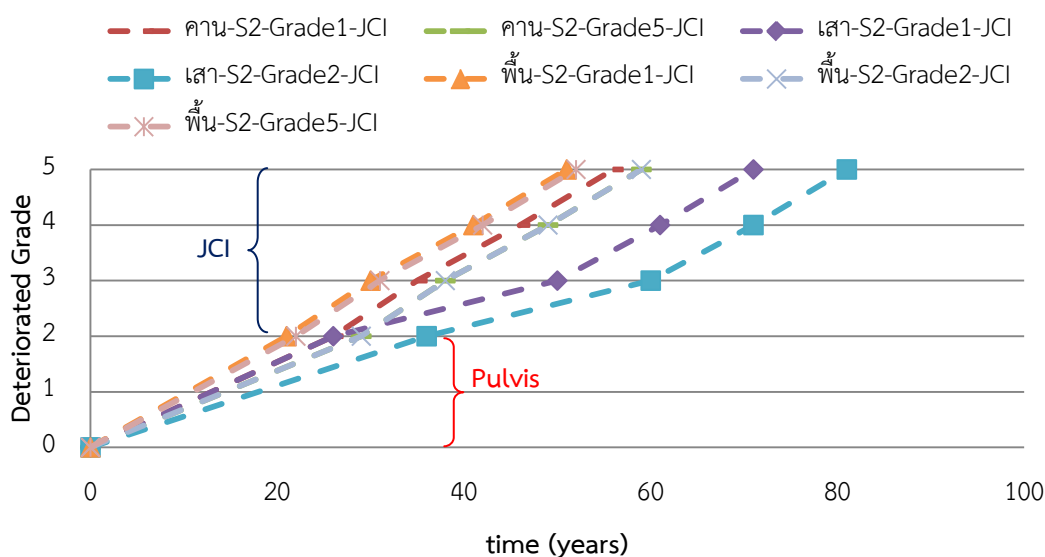
ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพจากกฎข้อที่สองของฟิคและสมการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมของ Markeset

ผลจากการวิเคราะห์ร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis (1994) กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI (1998) แสดงในภาพที่ 49 ถึง ภาพที่ 53 โดยที่สะพาน S1 จะเกิดการเสื่อมสภาพจนกระทั่งเหล็กเสริมสูญเสียความสามารถในการรับแรง ในทุกระดับการเสื่อมสภาพและทุกชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำการสำรวจ ผลการทำนายพบว่าคานระดับการเสื่อมสภาพระดับ 1 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 31 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 61 ปี คานระดับการเสื่อมสภาพระดับ 2 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 34 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 64 ปี คานระดับการเสื่อมสภาพระดับ 4 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 26 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 56 ปี เสาระดับการเสื่อมสภาพระดับ 1 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 30 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 75 ปี พื้นระดับการเสื่อมสภาพระดับ 1 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 32 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 62 ปี และพื้นระดับการเสื่อมสภาพระดับ 3 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 34 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 64 ปี ดังแสดงในภาพที่ 47



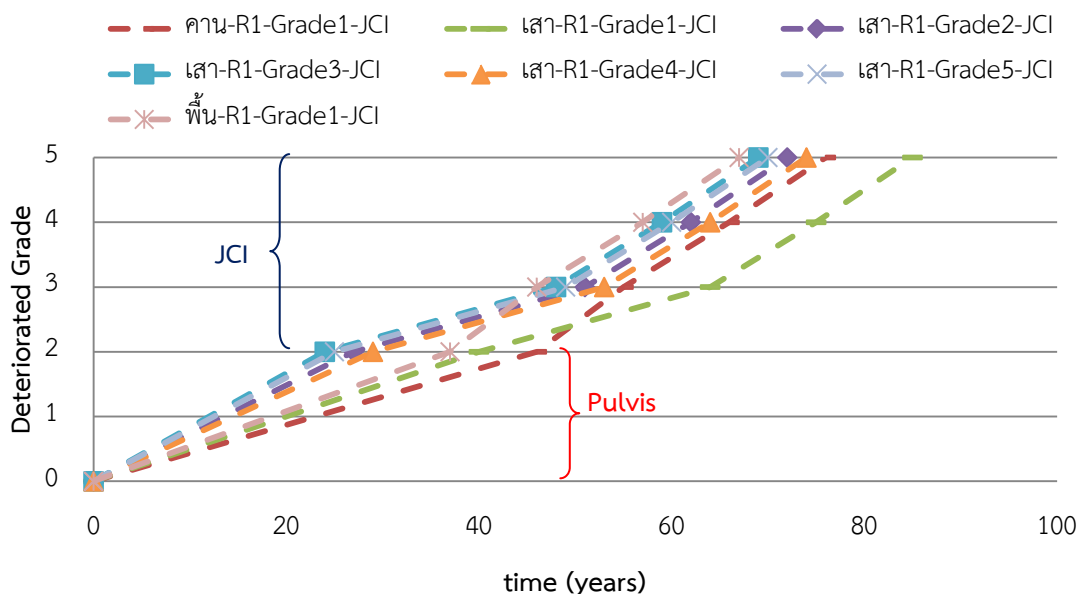
ภาพที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพจากสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน S1

สะพาน S2 เกิดการเสื่อมสภาพจนกระทั่งเหล็กเสริมสูญเสียความสามารถในการรับแรง ในทุกระดับการเสื่อมสภาพและทุกชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำการสำรวจ ผลการทำนายพบว่าคานระดับการเสื่อมสภาพระดับ 1 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 26 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 56 ปี คานระดับการเสื่อมสภาพระดับ 5 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 29 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 59 ปี เสาระดับการเสื่อมสภาพระดับ 1 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 26 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 71 ปี เสาระดับการเสื่อมสภาพระดับ 2 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 36 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 81 ปี พื้นระดับการเสื่อมสภาพระดับ 1 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 21 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 51 ปี พื้นระดับการเสื่อมสภาพระดับ 2 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 29 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 59 ปี และพื้นระดับการเสื่อมสภาพระดับ 5 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 22 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 52 ปี ดังแสดงในภาพที่ 48



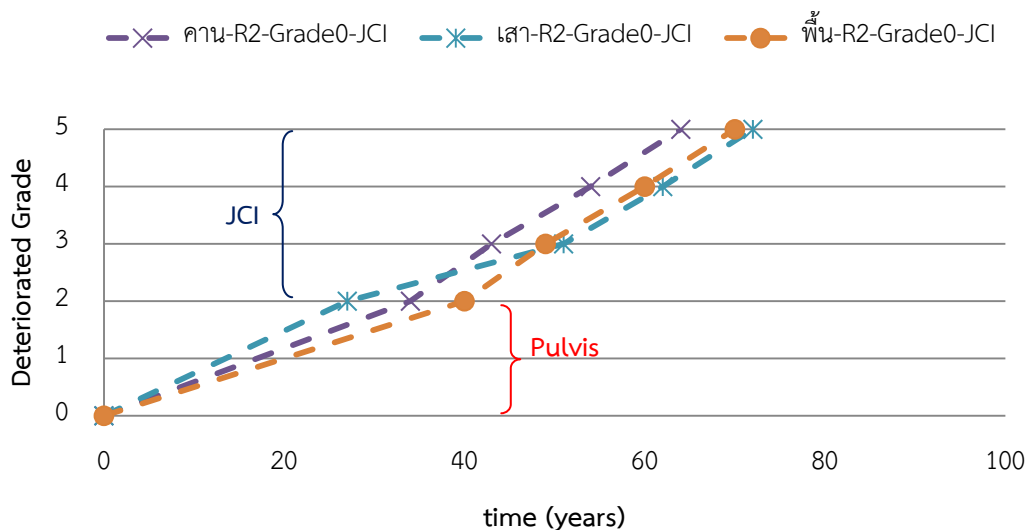
ภาพที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพจากสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน S2

สะพาน R1 เกิดการเสื่อมสภาพจนกระทั่งเหล็กเสริมสูญเสียความสามารถในการรับแรง ในทุกระดับการเสื่อมสภาพและทุกชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำการสำรวจ ผลการทนายพบว่าคานระดับการเสื่อมสภาพระดับ 1 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 46 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 76 ปี เสาระดับการเสื่อมสภาพระดับ 1 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 40 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 85 ปี เสาระดับการเสื่อมสภาพระดับ 2 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 27 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 72 ปี เสาระดับการเสื่อมสภาพระดับ 3 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 24 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 69 ปี เสาระดับการเสื่อมสภาพระดับ 4 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 29 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 74 ปี เสาระดับการเสื่อมสภาพระดับ 5 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 25 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 70 ปี และพื้นระดับการเสื่อมสภาพระดับ 1 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 37 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 67 ปี ดังแสดงในภาพที่ 49



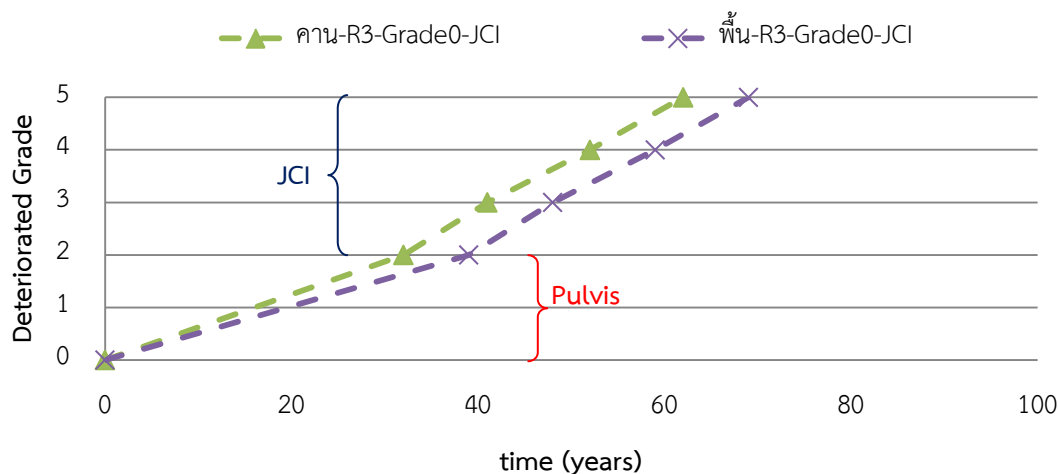
ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพจากสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน R1

สะพาน R2 เกิดการเสื่อมสภาพจนกระทั่งเหล็กเสริมสูญเสียความสามารถในการรับแรง ในทุกระดับการเสื่อมสภาพและทุกชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำการสำรวจ ผลการทนายพบว่าคานระดับการเสื่อมสภาพระดับ 0 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 34 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 64 ปี เสาคานระดับการเสื่อมสภาพระดับ 0 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 27 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 72 ปี และพื้นระดับการเสื่อมสภาพระดับ 0 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 40 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 70 ปี ดังแสดงในภาพที่ 50



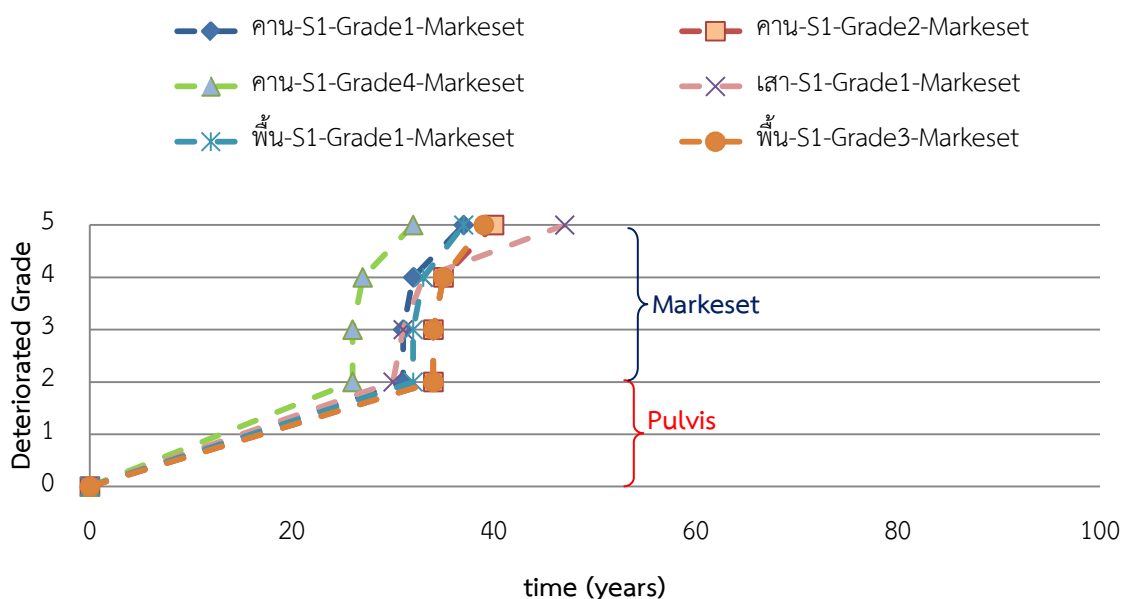
ภาพที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพจากสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน R2

สะพาน R3 จะเกิดการเสื่อมสภาพจนกระทั่งเหล็กเสริมสูญเสียความสามารถในการรับแรงในทุกๆระดับการเสื่อมสภาพและทุกชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำการสำรวจ ผลการทำนายพบว่าคานระดับการเสื่อมสภาพระดับ 0 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 32 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 62 ปี และพื้นระดับการเสื่อมสภาพระดับ 0 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 39 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 69 ปี ดังแสดงในภาพที่



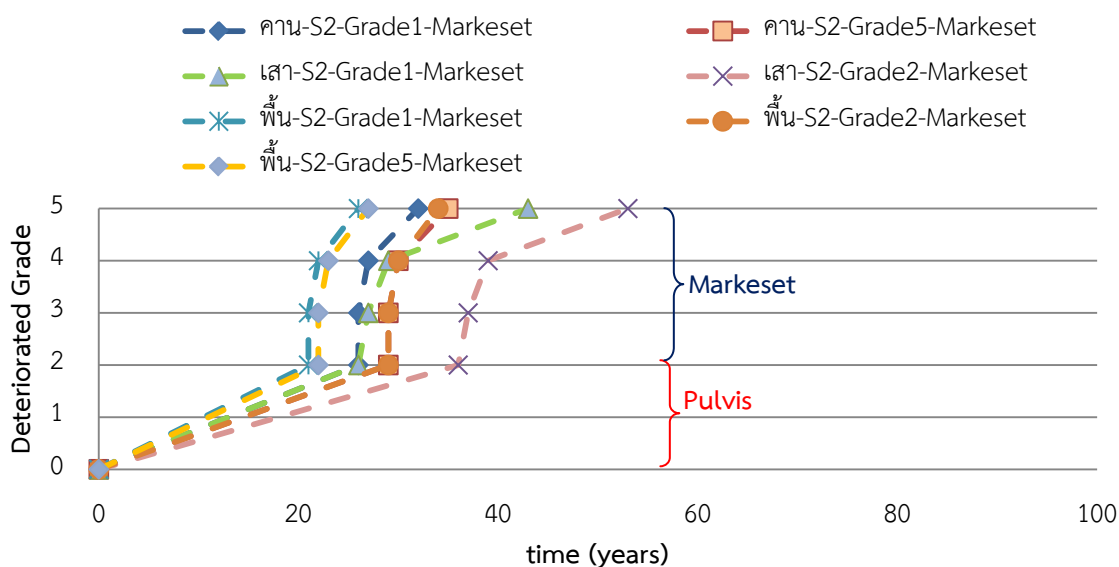
ภาพที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพจากสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน R3

ผลจากการวิเคราะห์ร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis (1994) กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset (2008) แสดงในภาพที่ 54 ถึง ภาพที่ 58 โดยที่สะพาน S1 เกิดการเสื่อมสภาพจนกระทั่งเหล็กเสริมสูญเสียความสามารถในการรับแรง ในทุกระดับการเสื่อมสภาพและทุกชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำการสำรวจ ผลการทำนายพบว่าคานระดับการเสื่อมสภาพระดับ 1 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 31 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 37 ปี คานระดับการเสื่อมสภาพระดับ 2 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 34 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 40 ปี คานระดับการเสื่อมสภาพระดับ 4 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 26 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 32 ปี เสาคัดระดับการเสื่อมสภาพระดับ 1 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 30 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 47 ปี พื้นระดับการเสื่อมสภาพระดับ 1 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 32 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 37 ปี และพื้นระดับการเสื่อมสภาพระดับ 3 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 34 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 39 ปี ดังแสดงในภาพที่ 52



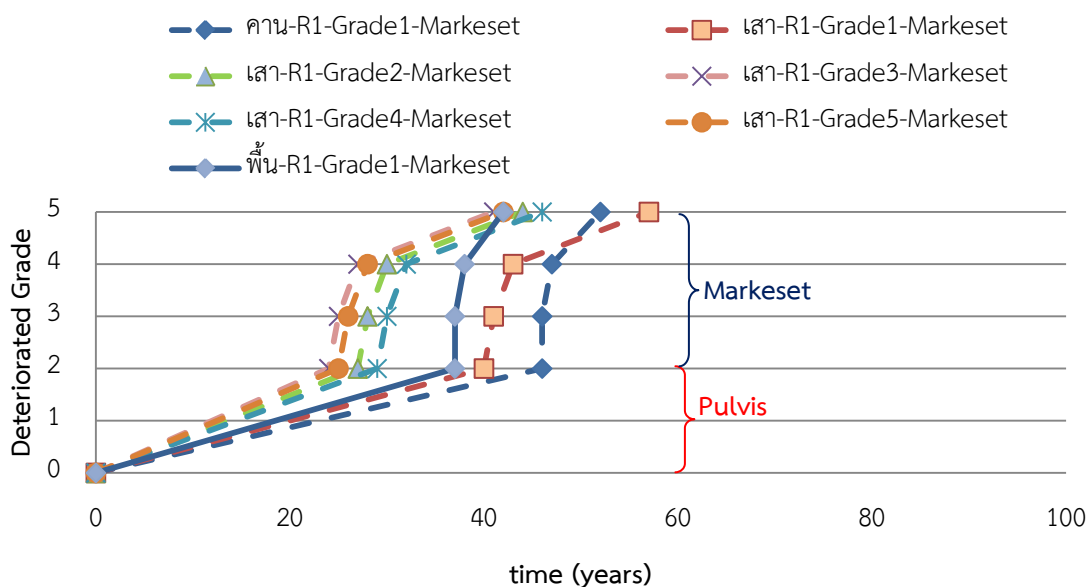
ภาพที่ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพจากสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน S1

สะพาน S2 เกิดการเสื่อมสภาพจนกระทั่งเหล็กเสริมสูญเสียความสามารถในการรับแรง ในทุกระดับการเสื่อมสภาพและทุกชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำการสำรวจ ผลการทำนายพบว่าคานระดับการเสื่อมสภาพระดับ 1 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 26 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 32 ปี คานระดับการเสื่อมสภาพระดับ 5 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 29 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 35 ปี เส้าระดับการเสื่อมสภาพระดับ 1 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 26 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 43 ปี เส้าระดับการเสื่อมสภาพระดับ 2 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 36 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 53 ปี พื้นระดับการเสื่อมสภาพระดับ 1 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 21 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 26 ปี พื้นระดับการเสื่อมสภาพระดับ 2 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 29 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 34 ปี และพื้นระดับการเสื่อมสภาพระดับ 5 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 22 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 27 ปี ดังแสดงในภาพที่ 53



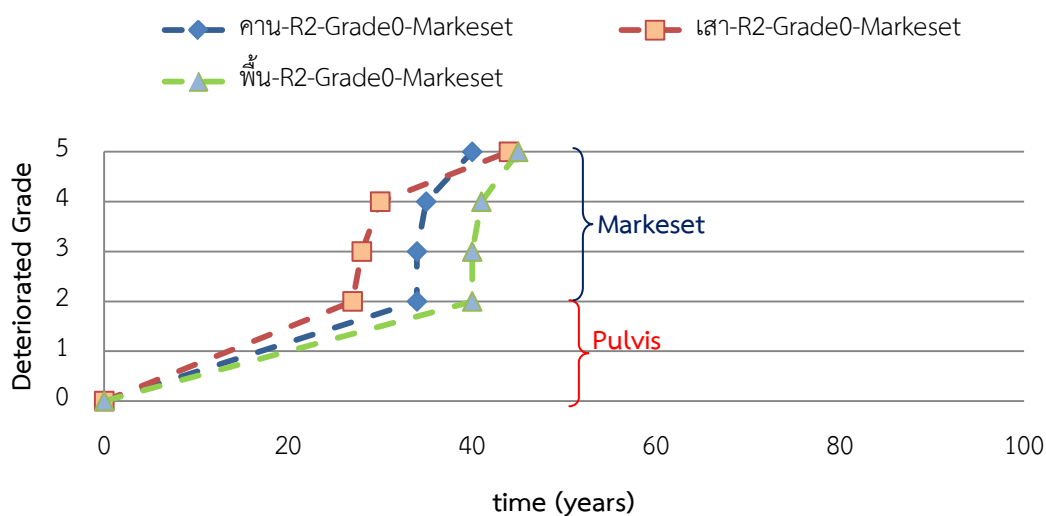
ภาพที่ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพจากสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน S2

สะพาน R1 เกิดการเสื่อมสภาพจนกระทั่งเหล็กเสริมสูญเสียความสามารถในการรับแรง ในทุกระดับการเสื่อมสภาพและทุกชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำการสำรวจ ผลการทำนายพบว่าคานระดับการเสื่อมสภาพระดับ 1 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 46 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 52 ปี เส้าระดับการเสื่อมสภาพระดับ 1 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 40 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 57 ปี เส้าระดับการเสื่อมสภาพระดับ 2 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 27 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 44 ปี เส้าระดับการเสื่อมสภาพระดับ 3 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 24 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 41 ปี เส้าระดับการเสื่อมสภาพระดับ 4 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 29 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 46 ปี เส้าระดับการเสื่อมสภาพระดับ 5 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 25 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 42 ปี และพื้นระดับการเสื่อมสภาพระดับ 1 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 37 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 42 ปี ดังแสดงในภาพที่ 54



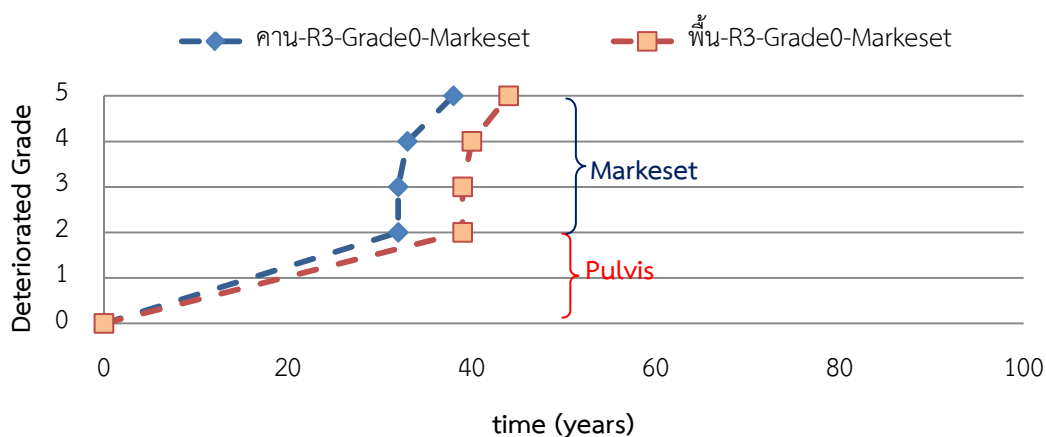
ภาพที่ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพจากสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน R1

สะพาน R2 เกิดการเสื่อมสภาพจนกระทั่งเหล็กเสริมสูญเสียความสามารถในการรับแรง ในทุกระดับการเสื่อมสภาพและทุกชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำการสำรวจ ผลการทำนายพบว่าคานระดับการเสื่อมสภาพระดับ 0 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 34 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 40 ปี เสาระดับการเสื่อมสภาพระดับ 0 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 27 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 44 ปี และพื้นระดับการเสื่อมสภาพระดับ 0 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 40 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 45 ปี ดังแสดงในภาพที่ 55



ภาพที่ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพจากสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน R2

สะพาน R3 เกิดการเสื่อมสภาพจนกระทั่งเหล็กเสริมสูญเสียความสามารถในการรับแรง ในทุกระดับการเสื่อมสภาพและทุกชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำการสำรวจ ผลการทนายพบว่าคานระดับการเสื่อมสภาพระดับ 0 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 32 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 38 ปี และพื้นระดับการเสื่อมสภาพระดับ 0 เริ่มสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริมเมื่อเวลาผ่านไป 39 ปี จากนั้นเหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดร้อยละ 20 ใน 44 ปี ดังแสดงในภาพที่ 56



ภาพที่ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เหล็กเสริมสูญเสียหน้าตัดกับระดับการเสื่อมสภาพจากสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน R3

ตารางที่ 18 ถึงตารางที่ 20 แสดงผลการเปรียบเทียบระดับการเสื่อมสภาพจากการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตา กับผลการทำนายอายุโครงสร้างจากกฎข้อที่สองของพีคร์ร่วมกับ JCI ของสะพาน S1 S2 และ R1 ที่เกิดการเสื่อมสภาพจนถึงระดับที่ 5 ภายในอายุ 100 ปี

ผลการเปรียบเทียบพบว่าระดับการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นจากการทำนายอายุจากกฎข้อที่สองของพีคร์ร่วมกับ JCI มีแนวโน้มต่ำกว่าระดับการเสื่อมสภาพจากการสำรวจด้วยสายตา เมื่อโครงสร้างมีอายุมากขึ้น การตรวจสอบด้วยสายตาจะมีความแม่นยำสูงขึ้นดังเช่นสะพาน S2 ที่มีอายุ 21 ปี ระดับการเสื่อมสภาพที่ได้จากการตรวจสอบด้วยสายตาอยู่ในระดับเดียวกับผลจากแบบจำลอง ขณะที่สะพาน R1 มีอายุ 11 ปี ผลที่ได้จะแตกต่างกันค่อนข้างมาก เช่น เสาจากการตรวจสอบด้วยสายตาอยู่ในระดับ 5 แต่ผลจากการทำนายด้วยแบบจำลองอยู่ในระดับ 1

ตารางที่ 18 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตา กับผลการทำนายอายุโครงสร้างด้วยกฎข้อที่สองของพีคร์ร่วมกับ JCI ของสะพาน S1

โครงสร้าง	คาน
ระดับการเสื่อมสภาพ	0 0 ถึง 20
	1 21 ถึง 24
	2 25 ถึง 29
	3 30 ถึง 38
	4 39 ถึง 49
	5 50 ถึง 59
อายุโครงสร้างจริง	26
ระดับจากการสำรวจด้วยสายตา	ระดับ 4
ผลของการทำนายจากแบบจำลอง	ระดับ 2

ตารางที่ 19 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายอายุโครงสร้างด้วย
กฎข้อที่สองของพีคร์ร่วมกับ JCI ของสะพาน S2

โครงสร้าง	เสา
0	0 ถึง 15
1	16 ถึง 30
2	31 ถึง 75
3	76 ถึง 99
4	100 ถึง 110
5	111 ถึง 120
ระดับการเสื่อมสภาพ	
อายุโครงสร้างจริง	21
ระดับจากการสำรวจด้วยสายตา	ระดับ 1
ผลของการทำนายจากแบบจำลอง	ระดับ 1

ตารางที่ 20 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายอายุโครงสร้างด้วย
กฎข้อที่สองของพีคร์ร่วมกับ JCI ของสะพาน R1

โครงสร้าง	เสา	เสา
0	0 ถึง 9	0 ถึง 5
1	10 ถึง 17	6 ถึง 11
2	18 ถึง 63	12 ถึง 54
3	64 ถึง 87	55 ถึง 78
4	88 ถึง 98	79 ถึง 89
5	99 ถึง 108	90 ถึง 99
ระดับการเสื่อมสภาพ		
อายุโครงสร้างจริง	11	11
ระดับจากการสำรวจด้วยสายตา	ระดับ 3	ระดับ 5
ผลของการทำนายจากแบบจำลอง	ระดับ 1	ระดับ 1

ตารางที่ 21 ถึงตารางที่ 23 แสดงผลการเปรียบเทียบระดับการเสื่อมสภาพจากการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายอายุโครงสร้างจากกฎข้อที่สองของพีคร์ร่วมกับ Markeset ของสะพาน S1 S2 และ R1 ที่เกิดการเสื่อมสภาพจนถึงระดับที่ 5 ภายในอายุ 100 ปี

ผลการทำนายพบว่าระดับการเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นจากการทำนายอายุจากกฎข้อที่สองของพีคร์ร่วมกับ Markeset มีแนวโน้มต่ำกว่าระดับการเสื่อมสภาพจากการสำรวจด้วยสายตา เช่นเดียวกับผลเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายอายุโครงสร้างด้วยกฎข้อที่สองของพีคร์ร่วมกับ JCI และจะแม่นยำมากขึ้นเมื่ออายุของโครงสร้างมากขึ้น

ตารางที่ 21 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายอายุโครงสร้างด้วยกฎข้อที่สองของพีคร์ร่วมกับ Markeset ของสะพาน S1

โครงสร้าง		คาน
ระดับการเสื่อมสภาพ	0	0 ถึง 20
	1	21 ถึง 24
	2	25 ถึง 28
	3	28 ถึง 29
	4	29 ถึง 30
	5	31 ถึง 35
อายุโครงสร้างจริง		26
ระดับจากการสำรวจด้วยสายตา		ระดับ 4
ผลของการทำนายจากแบบจำลอง		ระดับ 2

ตารางที่ 22 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตาับผลการทำนายอายุโครงสร้างด้วย
กฎข้อที่สองของพีคร่วมกับ Markeset ของสะพาน S2

โครงสร้าง	เสา
0	0 ถึง 15
1	16 ถึง 30
2	31 ถึง 75
3	75 ถึง 76
4	77 ถึง 78
5	79 ถึง 92
อายุโครงสร้างจริง	21
ระดับจากการสำรวจด้วยสายตา	ระดับ 1
ผลของการทำนายจากแบบจำลอง	ระดับ 1

ตารางที่ 23 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตาับผลการทำนายอายุโครงสร้างด้วย
กฎข้อที่สองของพีคร่วมกับ Markeset ของสะพาน R1

โครงสร้าง	เสา	เสา
0	0 ถึง 9	0 ถึง 5
1	10 ถึง 17	6 ถึง 11
2	18 ถึง 63	12 ถึง 54
3	63 ถึง 64	54 ถึง 55
4	65 ถึง 66	56 ถึง 57
5	67 ถึง 80	58 ถึง 71
อายุโครงสร้างจริง	11	11
ระดับจากการสำรวจด้วยสายตา	ระดับ 3	ระดับ 5
ผลของการทำนายจากแบบจำลอง	ระดับ 1	ระดับ 1

ตารางที่ 24 ถึงตารางที่ 28 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าที่ของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis ร่วมกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าที่ของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของโครงสร้างสะพานที่ทำการตรวจสอบที่สามารถเกิดการเสื่อมสภาพจนถึงระดับที่ 5 ภายในอายุ 100 ปี

ผลการเปรียบเทียบพบว่าหากระดับการเสื่อมสภาพที่พบด้วยสายตาอยู่ในระดับต่ำผลที่ได้จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทำนายระยะเวลาเริ่มสูญเสียหน้าที่ของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis ร่วมกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าที่ของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI

ตารางที่ 24 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าที่ของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis ร่วมกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าที่ของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน S1

โครงสร้าง	คาน	คาน	คาน	เสา	พื้น	พื้น
ระดับการเสื่อมสภาพ	0	0	0	0	0	0
	1	-	-	-	-	-
	2	31	34	26	30	32
	3	32 ถึง 40	34 ถึง 43	27 ถึง 35	31 ถึง 54	33 ถึง 41
	4	41 ถึง 51	44 ถึง 54	36 ถึง 46	55 ถึง 65	42 ถึง 52
	5	52 ถึง 61	55 ถึง 64	47 ถึง 56	66 ถึง 75	53 ถึง 62
อายุโครงสร้างจริง	26	26	26	26	26	26
ระดับจากการสำรวจด้วยสายตา	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 4	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 3
ผลของการทำนายจากแบบจำลอง	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 1

ตารางที่ 25 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis ร่วมกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน S2

โครงสร้าง	คาน	คาน	เสา	เสา	พื้น	พื้น	พื้น	
ระดับการเสื่อมสภาพ	0	0	0	0	0	0	0	
	1	-	-	-	-	-	-	
	2	26	29	26	36	21	29	22
	3	27 ถึง 35	34 ถึง 43	27 ถึง 50	37 ถึง 60	22 ถึง 30	30 ถึง 38	23 ถึง 31
	4	36 ถึง 46	44 ถึง 54	51 ถึง 61	61 ถึง 71	31 ถึง 41	39 ถึง 49	32 ถึง 42
	5	47 ถึง 56	55 ถึง 64	62 ถึง 71	72 ถึง 81	42 ถึง 51	50 ถึง 59	43 ถึง 52
อายุโครงสร้างจริง	21	21	21	21	21	21	21	
ระดับจากการสำรวจด้วยสายตา	ระดับ 1	ระดับ 5	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 5	
ผลของการทำนายจากแบบจำลอง	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 1	ระดับ 1	

ตารางที่ 26 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis ร่วมกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน R1

โครงสร้าง	คาน	เสา	เสา	เสา	เสา	เสา	พื้น	
ระดับการเสื่อมสภาพ	0	0	0	0	0	0	0	
	1	-	-	-	-	-	-	
	2	46	40	27	24	29	25	37
	3	47 ถึง 55	41 ถึง 64	28 ถึง 51	25 ถึง 48	30 ถึง 53	26 ถึง 49	38 ถึง 46
	4	56 ถึง 66	65 ถึง 75	52 ถึง 62	49 ถึง 59	54 ถึง 64	50 ถึง 60	47 ถึง 57
	5	67 ถึง 76	76 ถึง 85	63 ถึง 72	60 ถึง 69	65 ถึง 74	61 ถึง 70	58 ถึง 67
อายุโครงสร้างจริง	11	11	11	11	11	11	11	
ระดับจากการสำรวจด้วยสายตา	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 3	ระดับ 4	ระดับ 5	ระดับ 1	
ผลของการทำนายจากแบบจำลอง	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 1	

ตารางที่ 27 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis ร่วมกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน R2

โครงสร้าง	คาน	เสา	พื้น
0	0	0	0
1	-	-	-
2	34	27	40
3	35 ถึง 43	28 ถึง 51	41 ถึง 49
4	44 ถึง 54	52 ถึง 62	50 ถึง 60
5	55 ถึง 64	63 ถึง 72	61 ถึง 70
อายุโครงสร้างจริง	4	4	4
ระดับจากการสำรวจด้วยสายตา	ระดับ 0	ระดับ 0	ระดับ 0
ผลของการทำนายจากแบบจำลอง	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 1

ตารางที่ 28 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis ร่วมกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน R3

โครงสร้าง	beam	Slab
0	0	0
1	-	-
2	32	39
3	33 ถึง 41	40 ถึง 48
4	42 ถึง 52	49 ถึง 59
5	53 ถึง 62	60 ถึง 69
อายุโครงสร้างจริง	4	4
ระดับจากการสำรวจด้วยสายตา	ระดับ 0	ระดับ 0
ผลของการทำนายจากแบบจำลอง	ระดับ 1	ระดับ 1

ตารางที่ 29 ถึงตารางที่ 33 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis กับ

ระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของโครงสร้างสะพานที่ทำการตรวจสอบที่สามารถเกิดการเสื่อมสภาพจนถึงระดับที่ 5 ภายในอายุ 100 ปี

ตารางที่ 29 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis ร่วมกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน S1

โครงสร้าง	คาน	คาน	คาน	เสา	พื้น	พื้น
0	0	0	0	0	0	0
1	-	-	-	-	-	-
2	30	33	25	29	30	32
ระดับการเสื่อมสภาพ	30 ถึง 31	33 ถึง 34	25 ถึง 26	30 ถึง 31	31 ถึง 32	33 ถึง 34
3	31 ถึง 32	34 ถึง 35	26 ถึง 27	32 ถึง 33	32 ถึง 33	34 ถึง 35
4	33 ถึง 37	36 ถึง 40	38 ถึง 32	34 ถึง 47	33 ถึง 37	36 ถึง 39
5						
อายุโครงสร้างจริง	26	26	26	26	26	26
ระดับจากการสำรวจด้วยสายตา	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 4	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 3
ผลของการทำนายจากแบบจำลอง	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 3	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 1

ตารางที่ 30 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis ร่วมกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน S2

โครงสร้าง	คาน	คาน	เสา	เสา	พื้น	พื้น	พื้น
0	0	0	0	0	0	0	0
1	-	-	-	-	-	-	-
2	25	28	25	35	19	27	20
ระดับการเสื่อมสภาพ	25 ถึง 26	28 ถึง 29	26 ถึง 27	36 ถึง 37	20 ถึง 21	28 ถึง 29	21 ถึง 22
3	26 ถึง 27	29 ถึง 30	28 ถึง 29	38 ถึง 39	21 ถึง 22	29 ถึง 30	22 ถึง 23
4	28 ถึง 32	31 ถึง 35	30 ถึง 43	40 ถึง 53	23 ถึง 26	31 ถึง 34	24 ถึง 27
5							

ตารางที่ 30 (ต่อ)

โครงสร้าง	คาน	คาน	เสา	เสา	พื้น	พื้น	พื้น
อายุโครงสร้างจริง	21	21	21	21	21	21	21
ระดับจากการ							
สำรวจด้วยสายตา	ระดับ 1	ระดับ 5	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 5
ผลของการทำนาย							
จากแบบจำลอง	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 3	ระดับ 1	ระดับ 2

ตารางที่ 31 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน R1

โครงสร้าง	คาน	เสา	เสา	เสา	เสา	เสา	พื้น
	0	0	0	0	0	0	0
	1	-	-	-	-	-	-
ระดับการเสื่อมสภาพ	2	45	39	26	23	28	35
	3	45 ถึง 46	40 ถึง 41	27 ถึง 28	24 ถึง 25	29 ถึง 30	25 ถึง 26
	4	46 ถึง 47	42 ถึง 43	29 ถึง 30	26 ถึง 27	31 ถึง 32	27 ถึง 28
	5	48 ถึง 52	44 ถึง 57	31 ถึง 44	28 ถึง 41	33 ถึง 46	29 ถึง 42
อายุโครงสร้างจริง	11	11	11	11	11	11	11
ระดับจากการ							
สำรวจด้วยสายตา	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 2	ระดับ 3	ระดับ 4	ระดับ 5	ระดับ 1
ผลของการทำนาย							
จากแบบจำลอง	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 1

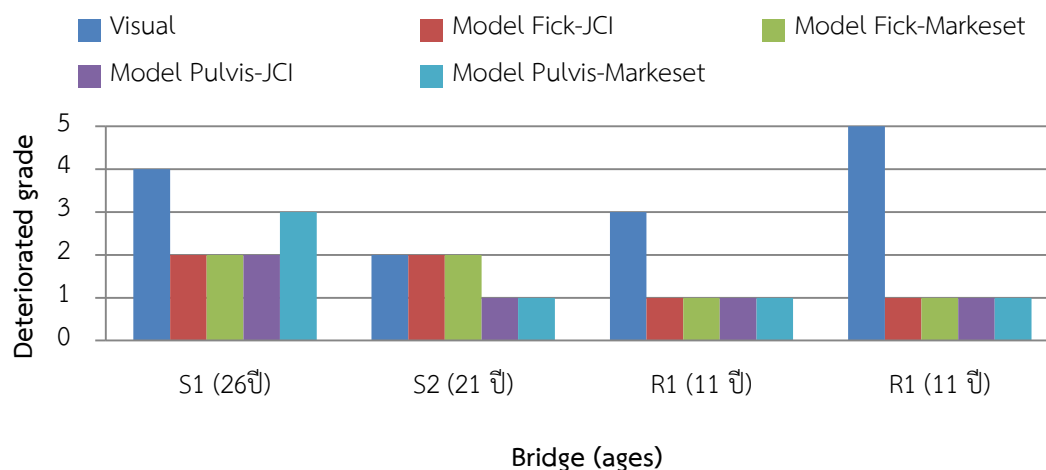
ตารางที่ 32 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าที่ตของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าที่ตของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน R2

โครงสร้าง	คาน	เสา	พื้น
0	0	0	0
1	-	-	-
2	33	26	38
3	33 ถึง 34	27 ถึง 28	39 ถึง 40
4	34 ถึง 35	29 ถึง 30	40 ถึง 41
5	36 ถึง 40	31 ถึง 44	42 ถึง 45
อายุโครงสร้างจริง	4	4	4
ระดับจากการสำรวจ	ระดับ 0	ระดับ 0	ระดับ 0
ผลของการสำรวจโครงสร้าง	ระดับ 1	ระดับ 1	ระดับ 1

ตารางที่ 33 การเปรียบเทียบผลการสำรวจโครงสร้างด้วยสายตากับผลการทำนายระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าที่ตของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าที่ตของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน R3

โครงสร้าง	คาน	พื้น
0	0	0
1	-	-
2	31	39
3	31 ถึง 32	38 ถึง 39
4	32 ถึง 33	39 ถึง 40
5	34 ถึง 38	41 ถึง 44
อายุโครงสร้างจริง	4	4
ระดับจากการสำรวจ	ระดับ 0	ระดับ 0
ผลของการสำรวจโครงสร้าง	ระดับ 1	ระดับ 1

ผลการทำนายพบว่าหากระดับการเสื่อมสภาพที่พบด้วยสายตาอยู่ในระดับต่ำผลที่ได้จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทำนายระยะเวลาเริ่มสูญเสียหน้าที่ตของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis ร่วมกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าที่ตของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI



ภาพที่ 57 กราฟเปรียบเทียบระดับการเสื่อมสภาพที่ตรวจพบด้วยสายตากับระดับการเสื่อมสภาพจากการทำนายด้วยแบบจำลองของสะพาน S1 S2 และ R1

ภาพที่ 57 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างระดับการเสื่อมสภาพที่ตรวจพบด้วยสายตากับระดับการเสื่อมสภาพจากการทำนายด้วยแบบจำลองของสะพาน S1 S2 และ R1 พบว่าผลการทำนายด้วยแบบจำลองทั้ง 4 รูปแบบได้แก่ การทำนายด้วยกฎข้อที่ 2 ของฟิคร่วมกับสมการของ JCI การทำนายด้วยกฎข้อที่ 2 ของฟิคร่วมกับสมการของ Markeset การทำนายด้วยสมการของ Pulvis ร่วมกับสมการของ JCI และการทำนายด้วยสมการของ Pulvis ร่วมกับสมการของ Markeset มีแนวโน้มต่ำกว่าระดับการเสื่อมสภาพที่ตรวจพบด้วยสายตาบนโครงสร้างสะพาน แต่พบว่าผลการทำนายด้วยแบบจำลองใกล้เคียงระดับความจริงมากขึ้นเมื่อสะพานมีอายุมาก โดยที่แบบจำลองที่วิเคราะห์การเสื่อมสภาพของสะพานด้วยสมการของ Pulvis (ระยะเวลาเริ่มต้นการกัดกร่อน) ร่วมกับสมการของ Markeset (ระยะเวลาการสูญเสียหน้าที่ตเหล็กเสริม) ได้ผลการทำนายการเสื่อมสภาพของสะพาน S1 ใกล้เคียงกับการเสื่อมสภาพจากการสำรวจด้วยสายตามากที่สุด

1.4 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน

การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของสะพานที่ทำการสำรวจทั้ง 5 สะพาน ในระยะเวลา 100 ปี ซึ่งค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมแต่ละวิธีแสดงไว้ในภาคผนวก ง

สะพาน S1

ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานในรูปแบบค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ด้วยกฎข้อที่สองของพีคร่วมกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI (1998) พบว่าหากไม่ทำการบำรุงรักษาสะพานจะมีอายุการใช้งานที่ 59 ปี จากนั้นทำการสร้างใหม่ในปีที่ 60 ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี เท่ากับ 459,128.29 บาท/ปี และเมื่อวิเคราะห์ทางเลือกในการซ่อมแซมทั้ง 40 วิธี ที่ใช้กับระดับการเสื่อมสภาพที่ 1 ถึง 5 ซึ่งแตกต่างกันพบว่า การซ่อมแซมด้วยวิธีฉีดอัดรอยร้าวในโครงสร้างที่มีการเสื่อมสภาพระดับที่ 3 และระดับที่ 4 มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี สูงกว่าการที่ไม่บำรุงรักษาสะพานตลอดอายุการใช้งาน โดยที่วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 49 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 13 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานสูงที่สุดเท่ากับ 654,659.05 บาท/ปี และวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 3 ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงรองลงมาจะทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 38 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 16 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 578,286.12 บาท/ปี ส่วนการซ่อมแซมด้วยแนวทางอื่นนั้นให้ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งานที่ต่ำกว่าการไม่บำรุงรักษาสะพาน โดยที่วิธีการเคลือบผิวโครงสร้างด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 1 ซึ่งทำการเคลือบเมื่อโครงสร้างมีอายุ 24 ปี จากนั้นเคลือบซ้ำทุก 10 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 8 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุดเท่ากับ 231,307.75 บาท/ปี ดังแสดงในตารางที่ 34

ตารางที่ 34 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ด้วยกฎข้อที่สองของฟิคกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ
JCI ของสะพาน S1

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ไม่ซ่อมแซม	459,128.29	1
Grade 1-ฉีต	395,207.08	19
Grade 1-เคลือบ	231,307.75	8
Grade 1-impressed	249,062.17	4
Grade 1-ฉีต+เคลือบ	283,180.15	6
Grade 1-ฉีต+impressed	270,341.80	3
Grade 1-เคลือบ+impressed	244,841.51	3
Grade 1-ฉีต+เคลือบ+impressed	257,185.15	2
Grade 2-ฉีต	425,720.25	19
Grade 2-เคลือบ	234,794.97	8
Grade 2-impressed	244,187.65	3
Grade 2-ฉีต+เคลือบ	298,872.64	6
Grade 2-ฉีต+impressed	276,880.34	3
Grade 2-เคลือบ+impressed	245,049.76	3
Grade 2-ฉีต+เคลือบ+impressed	259,149.27	2
Grade 3-ฉีต	578,286.12	16
Grade 3-เคลือบ	240,243.75	7
Grade 3-impressed	244,187.65	3
Grade 3-ฉีต+ECR	385,520.36	2
Grade 3-ฉีต+เคลือบ	346,168.05	5
Grade 3-ฉีต+impressed	309,573.02	3
Grade 3-เคลือบ+impressed	242,364.47	3
Grade 3-ฉีต+เคลือบ+impressed	285,954.73	2
Grade 3-ฉีต+ECR+impressed	312,416.76	1
Grade 3-ฉีต+เคลือบ+ECR+impressed	313,942.41	1
Grade 4-ฉีต	654,569.05	13
Grade 4-เคลือบ	250,487.46	6
Grade 4-impressed	244,187.65	3
Grade 4-ฉีต+ECR	407,315.48	2
Grade 4-ฉีต+เคลือบ	374,283.76	4

ตารางที่ 34 (ต่อ)

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
Grade 4-ฉีต+impressed	304,698.52	3
Grade 4-เคลือบ+impressed	246,287.59	2
Grade 4-ฉีต+เคลือบ+impressed	311,672.96	2
Grade 4-ฉีต+ECR+impressed	323,314.32	1
Grade 4-ฉีต+เคลือบ+ECR+impressed	326,801.54	1
Grade 5-เททับ	240,714.93	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ	247,979.97	1
Grade 5-เททับ+impressed	245,589.43	1
Grade 5-เททับ+Zn Anode	249,744.95	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+impressed	252,854.47	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+Zn Anode	257,009.99	1

ผลจากการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ด้วยกฎข้อที่สองของฟิคกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset (2008) พบว่าหากไม่ทำการบำรุงรักษาสะพานจะมีอายุการใช้งานที่ 35 ปี จากนั้นทำการสร้างใหม่ 2 ครั้งในปีที่ 36 และปีที่ 72 ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี เท่ากับ 688,692.43 บาท/ปี และเมื่อวิเคราะห์ทางเลือกในการซ่อมแซมทั้ง 40 วิธีในระดับการเสื่อมสภาพที่ 1 ถึง 5 ซึ่งแตกต่างกันพบว่า การซ่อมแซมด้วยวิธีฉีดอัดรอยร้าวในโครงสร้างที่มีการเสื่อมสภาพระดับที่ 3 และระดับที่ 4 มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี สูงกว่าการที่ไม่บำรุงรักษาสะพานตลอดอายุการใช้งาน โดยที่วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 29 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 18 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานสูงที่สุดเท่ากับ 818,032.48 บาท/ปี และวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 3 ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงรองลงมาจะทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 30 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 18 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 621,876.37 บาท/ปี ส่วนการซ่อมแซมด้วยแนวทางอื่นนั้นให้ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งานที่ต่ำกว่าการไม่บำรุงรักษาสะพาน โดยที่วิธีการเคลือบผิวโครงสร้างด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 1 ซึ่งทำการเคลือบเมื่อโครงสร้างมีอายุ 24 ปี จากนั้นเคลือบซ้ำทุก 10 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 8 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุดเท่ากับ 231,307.75 บาท/ปี ดังแสดงในตารางที่ 35

ตารางที่ 35 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ด้วยกฎข้อที่สองของฟิคกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ
Markeset ของสะพาน S1

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ไม่ซ่อมแซม	688,692.43	2
Grade 1-ฉีดยา	395,207.08	19
Grade 1-เคลือบ	231,307.75	8
Grade 1-impressed	249,062.17	4
Grade 1-ฉีดยา+เคลือบ	283,180.15	6
Grade 1-ฉีดยา+impressed	270,341.80	3
Grade 1-เคลือบ+impressed	244,841.51	3
Grade 1-ฉีดยา+เคลือบ+impressed	257,185.15	2
Grade 2-ฉีดยา	425,720.25	19
Grade 2-เคลือบ	234,794.97	8
Grade 2-impressed	244,187.65	3
Grade 2-ฉีดยา+เคลือบ	298,872.64	6
Grade 2-ฉีดยา+impressed	276,880.34	3
Grade 2-เคลือบ+impressed	245,049.76	3
Grade 2-ฉีดยา+เคลือบ+impressed	259,149.27	2
Grade 3-ฉีดยา	621,876.37	18
Grade 3-เคลือบ	240,243.75	7
Grade 3-impressed	244,187.65	3
Grade 3-ฉีดยา+ECR	385,520.36	2
Grade 3-ฉีดยา+เคลือบ	346,168.05	5
Grade 3-ฉีดยา+impressed	309,573.02	3
Grade 3-เคลือบ+impressed	242,364.47	3
Grade 3-ฉีดยา+เคลือบ+impressed	285,954.73	2
Grade 3-ฉีดยา+ECR+impressed	312,416.76	1
Grade 3-ฉีดยา+เคลือบ+ECR+impressed	313,942.41	1
Grade 4-ฉีดยา	818,032.48	18
Grade 4-เคลือบ	253,974.68	7
Grade 4-impressed	244,187.65	3
Grade 4-ฉีดยา+ECR	407,315.48	2
Grade 4-ฉีดยา+เคลือบ	410,463.67	5

ตารางที่ 35 (ต่อ)

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
Grade 4-ฉีดยา+impressed	337,391.21	3
Grade 4-เคลือบ+impressed	246,287.59	2
Grade 4-ฉีดยา+เคลือบ+impressed	311,672.96	2
Grade 4-ฉีดยา+ECR+impressed	323,314.32	1
Grade 4-ฉีดยา+เคลือบ+ECR+impressed	326,801.54	1
Grade 5-เททับ	240,714.93	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ	247,979.97	1
Grade 5-เททับ+impressed	245,589.43	1
Grade 5-เททับ+Zn Anode	249,744.95	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+impressed	252,854.47	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+Zn Anode	257,009.99	1

ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ด้วยระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis (1994) กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI (1998) พบว่าหากไม่ทำการบำรุงรักษาสะพานจะมีอายุการใช้งานที่ 56 ปี จากนั้นทำการสร้างใหม่ในปีที่ 57 ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี เท่ากับ 459,128.29 บาท/ปี และเมื่อวิเคราะห์ทางเลือกในการซ่อมแซมทั้ง 33 วิธีในระดับการเสื่อมสภาพที่ 2 ถึง 5 ซึ่งแตกต่างกันพบว่า การซ่อมแซมด้วยวิธีฉีดอัดรอยร้าวในโครงสร้างที่มีการเสื่อมสภาพระดับที่ 3 และระดับที่ 4 มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี สูงกว่าการที่ไม่บำรุงรักษาสะพานตลอดอายุการใช้งาน โดยที่วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 46 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 14 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานสูงที่สุดเท่ากับ 785,339.79 บาท/ปี และวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 3 ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงรองลงมาจะทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 35 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 17 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 621,876.37 บาท/ปี ส่วนการซ่อมแซมด้วยแนวทางอื่นนั้นให้ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งานที่ต่ำกว่าการไม่บำรุงรักษาสะพาน โดยที่วิธีการเคลือบผิวโครงสร้างด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 2 ซึ่งทำการเคลือบเมื่อโครงสร้างมีอายุ 26 ปี จากนั้นเคลือบซ้ำทุก 10 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 8 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุดเท่ากับ 234,794.97 บาท/ปี ดังแสดงในตารางที่ 36

ตารางที่ 36 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ
Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน
S1

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ไม่ซ่อมแซม	459,128.29	1
Grade 2-ฉีต	436,617.82	19
Grade 2-เคลือบ	234,794.97	8
Grade 2-impressed	244,187.65	3
Grade 2-ฉีต+เคลือบ	298,872.64	6
Grade 2-ฉีต+impressed	276,880.34	3
Grade 2-เคลือบ+impressed	246,149.21	3
Grade 2-ฉีต+เคลือบ+impressed	262,415.98	2
Grade 3-ฉีต	600,081.24	17
Grade 3-เคลือบ	240,243.75	7
Grade 3-impressed	244,187.65	3
Grade 3-ฉีต+ECR	385,520.36	2
Grade 3-ฉีต+เคลือบ	346,168.05	5
Grade 3-ฉีต+impressed	309,573.02	3
Grade 3-เคลือบ+impressed	242,364.47	2
Grade 3-ฉีต+เคลือบ+impressed	285,954.71	2
Grade 3-ฉีต+ECR+impressed	312,416.76	1
Grade 3-ฉีต+เคลือบ+ECR+impressed	313,942.41	1
Grade 4-ฉีต	687,261.74	14
Grade 4-เคลือบ	250,487.46	6
Grade 4-impressed	244,187.65	3
Grade 4-ฉีต+ECR	407,315.48	2
Grade 4-ฉีต+เคลือบ	374,283.76	4
Grade 4-ฉีต+impressed	304,698.52	2
Grade 4-เคลือบ+impressed	246,287.59	2
Grade 4-ฉีต+เคลือบ+impressed	311,672.96	2
Grade 4-ฉีต+ECR+impressed	323,314.32	1
Grade 4-ฉีต+เคลือบ+ECR+impressed	326,801.54	1

ตารางที่ 36 (ต่อ)

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
Grade 5-เทหับ	240,714.93	1
Grade 5-เทหับ+เคลือบ	247,979.97	1
Grade 5-เทหับ+impressed	245,589.43	1
Grade 5-เทหับ+Zn Anode	249,744.95	1
Grade 5-เทหับ+เคลือบ+impressed	252,854.47	1
Grade 5-เทหับ+เคลือบ+Zn Anode	257,009.99	1

ผลจากการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซมร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis (1994) กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset (2008) พบว่าหากไม่ทำการบำรุงรักษาสะพานจะมีอายุการใช้งานที่ 32 ปี จากนั้นทำการสร้างใหม่ 3 ครั้งในปีที่ 33 ปีที่ 66 และปีที่ 99 ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี เท่ากับ 918,256.57 บาท/ปี เมื่อวิเคราะห์ทางเลือกในการซ่อมแซมทั้ง 33 วิธีในระดับการเสื่อมสภาพที่ 2 ถึง 5 ซึ่งแตกต่างกันพบว่าทุกวิธีมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าวิธีการสร้างใหม่ทั้งหมด โดยการซ่อมแซมด้วยวิธีฉีดอัดรอยร้าวในโครงสร้างที่มีการเสื่อมสภาพระดับที่ 4 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 29 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 18 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานสูงที่สุดเท่ากับ 818,032.48 บาท/ปี ส่วนวิธีการเคลือบผิวโครงสร้างด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 2 ซึ่งทำการเคลือบเมื่อโครงสร้างมีอายุ 25 ปี จากนั้นเคลือบซ้ำทุก 10 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 8 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุดเท่ากับ 234,794.97 บาท/ปี ดังแสดงในตารางที่ 37

ตารางที่ 37 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ
Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของ
สะพาน S1

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ไม่ซ่อมแซม	918,256.57	3
Grade 2-ฉีต	436,617.82	19
Grade 2-เคลือบ	234,794.97	8
Grade 2-impressed	244,187.65	3
Grade 2-ฉีต+เคลือบ	298,872.64	6
Grade 2-ฉีต+impressed	276,880.34	3
Grade 2-เคลือบ+impressed	246,149.21	3
Grade 2-ฉีต+เคลือบ+impressed	262,415.98	2
Grade 3-ฉีต	621,876.37	18
Grade 3-เคลือบ	241,769.41	8
Grade 3-impressed	244,187.65	3
Grade 3-ฉีต+ECR	385,520.36	2
Grade 3-ฉีต+เคลือบ	369,488.84	7
Grade 3-ฉีต+impressed	309,573.02	3
Grade 3-เคลือบ+impressed	248,764.63	3
Grade 3-ฉีต+เคลือบ+impressed	285,954.71	2
Grade 3-ฉีต+ECR+impressed	312,416.76	1
Grade 3-ฉีต+เคลือบ+ECR+impressed	313,942.41	1
Grade 4-ฉีต	818,032.48	18
Grade 4-เคลือบ	257,461.90	8
Grade 4-impressed	244,187.65	3
Grade 4-ฉีต+ECR	407,315.48	2
Grade 4-ฉีต+เคลือบ	446,643.57	7
Grade 4-ฉีต+impressed	342,265.71	3
Grade 4-เคลือบ+impressed	254,649.31	3
Grade 4-ฉีต+เคลือบ+impressed	311,672.96	2
Grade 4-ฉีต+ECR+impressed	323,314.32	1
Grade 4-ฉีต+เคลือบ+ECR+impressed	326,801.54	1
Grade 5-เทพื้น	240,714.93	1

ตารางที่ 37 (ต่อ)

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
Grade 5-เททัป+เคลือบ	247,979.97	1
Grade 5-เททัป+impressed	245,589.43	1
Grade 5-เททัป+Zn Anode	249,744.95	1
Grade 5-เททัป+เคลือบ+impressed	252,854.47	1
Grade 5-เททัป+เคลือบ+Zn Anode	257,009.99	1

สะพาน S2

ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ด้วยกฎข้อที่สองของฟังก์ชันระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI (1998) พบว่า หากไม่ทำการบำรุงรักษาสะพานจะมีอายุการใช้งานที่ 99 ปี จากนั้นทำการสร้างใหม่ในปีที่ 100 ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี เท่ากับ 325,814.08 บาท/ปี และเมื่อวิเคราะห์ทางเลือกในการซ่อมแซมทั้ง 24 วิธีในระดับการเสื่อมสภาพที่ 1 ถึง 3 ซึ่งแตกต่างกันพบว่า ไม่มีการซ่อมแซมใดที่มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี สูงกว่าการที่ไม่บำรุงรักษาสะพานตลอดอายุการใช้งาน แต่วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 1 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 30 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 18 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานสูงที่สุดเท่ากับ 293,953.19 บาท/ปี ส่วนการซ่อมแซมด้วยวิธีการเคลือบผิวโครงสร้างด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 1 ซึ่งทำการเคลือบเมื่อโครงสร้างมีอายุ 30 ปี จากนั้นเคลือบซ้ำทุก 10 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 7 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุดเท่ากับ 164,181.10 บาท/ปี ดังแสดงในตารางที่ 38

ตารางที่ 38 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ด้วยกฎข้อที่สองของฟิคกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ
JCI ของสะพาน S2

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ไม่ซ่อมแซม	325,814.08	1
Grade 1-ฉีต	293,953.19	18
Grade 1-เคลือบ	164,181.10	7
Grade 1-impressed	182,201.23	3
Grade 1-ฉีต+เคลือบ	200,218.79	5
Grade 1-ฉีต+impressed	204,042.26	3
Grade 1-เคลือบ+impressed	176,133.85	2
Grade 1-ฉีต+เคลือบ+impressed	190,694.53	2
Grade 2-ฉีต	226,610.03	7
Grade 2-เคลือบ	164,545.12	3
Grade 2-impressed	169,338.44	1
Grade 2-ฉีต+เคลือบ	182,199.95	2
Grade 2-ฉีต+impressed	178,438.86	1
Grade 2-เคลือบ+impressed	169,884.46	1
Grade 2-ฉีต+เคลือบ+impressed	178,984.89	1
Grade 3-ฉีต	181,107.89	1
Grade 3-เคลือบ	164,181.10	1
Grade 3-impressed	169,338.44	1
Grade 3-ฉีต+ECR	216,667.94	1
Grade 3-ฉีต+เคลือบ	182,381.95	1
Grade 3-ฉีต+impressed	187,539.29	1
Grade 3-เคลือบ+impressed	170,612.50	1
Grade 3-ฉีต+เคลือบ+impressed	188,813.35	1
Grade 3-ฉีต+ECR+impressed	223,099.34	1
Grade 3-ฉีต+เคลือบ+ECR+impressed	224,373.40	1

ผลจากการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ด้วยกฎข้อที่สองของฟิคกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset (2008) พบว่าหากไม่ทำการบำรุงรักษาสะพานจะมีอายุการใช้งานที่ 92 ปี จากนั้นทำการสร้างใหม่ในปีที่ 93 ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี เท่ากับ 325,814.08 บาท/ปี และเมื่อวิเคราะห์ทางเลือกในการซ่อมแซมทั้ง 40 วิธีในระดับการเสื่อมสภาพที่ 1 ถึง 5 ซึ่งแตกต่างกันพบว่า ไม่มีการซ่อมแซมใดที่มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี สูงกว่าการที่ไม่บำรุงรักษาสะพานตลอดอายุการใช้งาน แต่วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 1 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 30 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 18 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานสูงที่สุดเท่ากับ 293,953.19 บาท/ปี ส่วนการซ่อมแซมด้วยวิธีการเคลือบผิวโครงสร้างด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 1 ซึ่งทำการเคลือบเมื่อโครงสร้างมีอายุ 30 ปี จากนั้นเคลือบซ้ำทุก 10 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 7 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุดเท่ากับ 164,181.10 บาท/ปี ดังแสดงในตารางที่ 39

ตารางที่ 39 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ด้วยกฎข้อที่สองของฟิคกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน S2

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ไม่ซ่อมแซม	325,814.08	1
Grade 1-ฉีด	293,953.19	18
Grade 1-เคลือบ	164,181.10	7
Grade 1-impressed	182,201.23	3
Grade 1-ฉีด+เคลือบ	200,218.79	5
Grade 1-ฉีด+impressed	204,042.26	3
Grade 1-เคลือบ+impressed	176,133.85	2
Grade 1-ฉีด+เคลือบ+impressed	190,694.53	2
Grade 2-ฉีด	226,610.03	7
Grade 2-เคลือบ	164,545.12	3
Grade 2-impressed	169,338.44	1
Grade 2-ฉีด+เคลือบ	182,199.95	2
Grade 2-ฉีด+impressed	178,438.86	1
Grade 2-เคลือบ+impressed	169,884.46	1
Grade 2-ฉีด+เคลือบ+impressed	178,984.89	1

ตารางที่ 39 (ต่อ)

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
Grade 3-ฉีดยา	272,112.16	6
Grade 3-เคลือบ	166,729.22	3
Grade 3-impressed	169,338.44	1
Grade 3-ฉีดยา+ECR	216,667.94	2
Grade 3-ฉีดยา+เคลือบ	201,856.87	1
Grade 3-ฉีดยา+impressed	187,539.29	1
Grade 3-เคลือบ+impressed	170,612.50	1
Grade 3-ฉีดยา+เคลือบ+impressed	188,813.35	1
Grade 3-ฉีดยา+ECR+impressed	223,099.34	1
Grade 3-ฉีดยา+เคลือบ+ECR+impressed	224,373.40	1
Grade 4-ฉีดยา	272,112.16	6
Grade 4-เคลือบ	171,643.45	3
Grade 4-impressed	169,338.44	1
Grade 4-ฉีดยา+ECR	216,667.94	1
Grade 4-ฉีดยา+เคลือบ	205,133.02	2
Grade 4-ฉีดยา+impressed	187,539.29	1
Grade 4-เคลือบ+impressed	172,250.57	1
Grade 4-ฉีดยา+เคลือบ+impressed	190,451.43	1
Grade 4-ฉีดยา+ECR+impressed	223,099.34	1
Grade 4-ฉีดยา+เคลือบ+ECR+impressed	235,111.90	1
Grade 5-เททับ	173,236.36	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ	179,303.31	1
Grade 5-เททับ+impressed	179,667.76	1
Grade 5-เททับ+Zn Anode	183,044.24	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+impressed	185,734.71	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+Zn Anode	189,111.19	1

ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ด้วยระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis (1994) กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI (1998) พบว่าหากไม่ทำการบำรุงรักษาสะพานจะมีอายุการใช้งานที่ 51 ปี จากนั้นทำการสร้างใหม่ในปีที่ 52 ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี เท่ากับ 325,814.08 บาท/ปี และเมื่อวิเคราะห์ทางเลือกในการซ่อมแซมทั้ง 33 วิธีในระดับการเสื่อมสภาพที่ 2 ถึง 5 ซึ่งแตกต่างกันพบว่า การซ่อมแซมด้วยวิธีฉีดอัดรอยร้าวในโครงสร้างที่มีการเสื่อมสภาพระดับที่ 2 ระดับที่ 3 และระดับที่ 4 มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี สูงกว่าการที่ไม่บำรุงรักษาสะพานตลอดอายุการใช้งาน โดยที่วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 41 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 15 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานสูงที่สุดเท่ากับ 572,426.24 บาท/ปี วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 3 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 30 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 18 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานสูงที่สุดเท่ากับ 490,522.40 บาท/ปี และวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 2 ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงรองลงมาจะทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 21 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 20 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 344,915.58 บาท/ปี ส่วนการซ่อมแซมด้วยแนวทางอื่นนั้นให้ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งานที่ต่ำกว่าการไม่บำรุงรักษาสะพาน โดยที่วิธีการเคลือบผิวโครงสร้างด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 2 ซึ่งทำการเคลือบเมื่อโครงสร้างมีอายุ 21 ปี จากนั้นเคลือบซ้ำทุก 10 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 8 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุดเท่ากับ 167,275.25 บาท/ปี ดังแสดงในตารางที่ 40

ตารางที่ 40 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ไม่ซ่อมแซม	325,814.08	1
Grade 2-ฉีด	344,915.58	20
Grade 2-เคลือบ	167,275.25	8
Grade 2-impressed	188,632.65	4
Grade 2-ฉีด+เคลือบ	220,785.75	6
Grade 2-ฉีด+impressed	209,502.51	3

ตารางที่ 40 (ต่อ)

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
Grade 2-เคลือบ+impressed	183,839.31	3
Grade 2-ฉีดยาเคลือบ+impressed	211,140.59	3
Grade 3-ฉีดยา	490,522.40	18
Grade 3-เคลือบ	171,825.46	7
Grade 3-impressed	182,201.23	3
Grade 3-ฉีดยา+ECR	270,428.84	2
Grade 3-ฉีดยาเคลือบ	260,281.61	5
Grade 3-ฉีดยา+impressed	236,803.79	3
Grade 3-เคลือบ+impressed	178,317.95	2
Grade 3-ฉีดยาเคลือบ+impressed	214,719.66	2
Grade 3-ฉีดยา+ECR+impressed	223,099.34	1
Grade 3-ฉีดยาเคลือบ+ECR+impressed	224,373.40	1
Grade 4-ฉีดยา	572,426.24	15
Grade 4-เคลือบ	180,379.86	6
Grade 4-impressed	182,201.23	3
Grade 4-ฉีดยา+ECR	288,629.69	2
Grade 4-ฉีดยาเคลือบ	313,974.12	5
Grade 4-ฉีดยา+impressed	264,105.07	3
Grade 4-เคลือบ+impressed	181,594.11	2
Grade 4-ฉีดยาเคลือบ+impressed	236,196.67	2
Grade 4-ฉีดยา+ECR+impressed	232,199.76	1
Grade 4-ฉีดยาเคลือบ+ECR+impressed	235,111.90	1
Grade 5-เททับ	173,236.36	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ	179,303.31	1
Grade 5-เททับ+impressed	179,667.76	1
Grade 5-เททับ+Zn Anode	183,044.24	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+impressed	185,734.71	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+Zn Anode	189,111.19	1

ผลจากการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซมร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis (1994) กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset (2008) พบว่าหากไม่ทำการบำรุงรักษาสะพานจะมีอายุการใช้งานที่ 26 ปี จากนั้นทำการสร้างใหม่ 3 ครั้งในปีที่ 27 ปีที่ 54 และปีที่ 81 ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี เท่ากับ 651,628.16 บาท/ปี และเมื่อวิเคราะห์ทางเลือกในการซ่อมแซมทั้ง 33 วิธีในระดับการเสื่อมสภาพที่ 2 ถึง 5 ซึ่งแตกต่างกันพบว่าการซ่อมแซมด้วยวิธีฉีดอัดรอยร้าวในโครงสร้างที่มีการเสื่อมสภาพระดับที่ 4 มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี สูงกว่าการที่ไม่บำรุงรักษาสะพานตลอดอายุการใช้งาน โดยที่วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 22 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 20 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานสูงที่สุดเท่ากับ 708,932.64 บาท/ปี ส่วนการซ่อมแซมด้วยแนวทางอื่นนั้นให้ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งานที่ต่ำกว่าการไม่บำรุงรักษาสะพาน โดยที่วิธีการเคลือบผิวโครงสร้างด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 2 ซึ่งทำการเคลือบเมื่อโครงสร้างมีอายุ 19 ปี จากนั้นเคลือบซ้ำทุก 10 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 9 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุดเท่ากับ 167,821.27 บาท/ปี ดังแสดงในตารางที่ 41

ตารางที่ 41 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซมร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน S2

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ไม่ซ่อมแซม	651,628.16	3
Grade 2-ฉีด	354,016.00	21
Grade 2-เคลือบ	167,821.27	9
Grade 2-impressed	188,632.65	4
Grade 2-ฉีด+เคลือบ	220,785.75	6
Grade 2-ฉีด+impressed	209,502.51	3
Grade 2-เคลือบ+impressed	183,839.31	3
Grade 2-ฉีด+เคลือบ+impressed	211,140.59	3
Grade 3-ฉีด	526,924.11	20
Grade 3-เคลือบ	173,099.52	8
Grade 3-impressed	188,632.65	4

ตารางที่ 41 (ต่อ)

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
Grade 3-ฉีดยา+ECR	324,189.73	3
Grade 3-ฉีดยา+เคลือบ	279,756.52	6
Grade 3-ฉีดยา+impressed	236,803.79	3
Grade 3-เคลือบ+impressed	186,023.41	3
Grade 3-ฉีดยา+เคลือบ+impressed	240,625.97	3
Grade 3-ฉีดยา+ECR+impressed	223,099.34	1
Grade 3-ฉีดยา+เคลือบ+ECR+impressed	224,373.40	1
Grade 4-ฉีดยา	708,932.64	20
Grade 4-เคลือบ	186,204.13	8
Grade 4-impressed	188,632.65	4
Grade 4-ฉีดยา+ECR	288,629.69	2
Grade 4-ฉีดยา+เคลือบ	344,187.54	6
Grade 4-ฉีดยา+impressed	264,105.07	3
Grade 4-เคลือบ+impressed	190,937.64	3
Grade 4-ฉีดยา+เคลือบ+impressed	236,196.67	2
Grade 4-ฉีดยา+ECR+impressed	232,199.76	1
Grade 4-ฉีดยา+เคลือบ+ECR+impressed	235,111.90	1
Grade 5-เททับ	173,236.36	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ	179,303.31	1
Grade 5-เททับ+impressed	179,667.76	1
Grade 5-เททับ+Zn Anode	183,044.24	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+impressed	185,734.71	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+Zn Anode	189,111.19	1

สะพาน R1

ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ด้วยกฎข้อที่สองของฟิคกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI (1998) พบว่า หากไม่ทำการบำรุงรักษาสะพานจะมีอายุการใช้งานที่ 99 ปี จากนั้นทำการสร้างใหม่ในปีที่ 100 ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี เท่ากับ 632,285.45 บาท/ปี และเมื่อวิเคราะห์ทางเลือกในการซ่อมแซมทั้ง 40 วิธีในระดับการเสื่อมสภาพที่ 1 ถึง 5 ซึ่งแตกต่างกันพบว่า มีวิธีการซ่อมแซมโครงสร้าง 5 วิธีที่มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี สูงกว่าการที่ไม่บำรุงรักษาสะพานตลอดอายุการใช้งาน ได้แก่วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 1 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 11 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 23 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานสูงสุดเท่ากับ 988,947.70 บาท/ปี วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 2 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 54 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 12 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 754,928.58 บาท/ปี วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 3 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 78 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 6 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 754,928.54 บาท/ปี วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 89 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 3 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 645,232.12 บาท/ปี และวิธีการซ่อมแซมผสมระหว่างวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซิ เคลือบผิวโครงสร้างด้วยโพลียูรีเทน ลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี และการถ่ายประจุไฟฟ้าในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 89 ปี จำนวน 1 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 637,251.35 บาท/ปี ส่วนการซ่อมแซมด้วยแนวทางอื่นนั้นให้ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งานที่ต่ำกว่าการไม่บำรุงรักษาสะพาน โดยที่วิธีการเคลือบผิวโครงสร้างด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 1 ซึ่งทำการเคลือบเมื่อโครงสร้างมีอายุ 11 ปี จากนั้นเคลือบซ้ำทุก 10 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 9 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุดเท่ากับ 322,724.51 บาท/ปี ดังแสดงในตารางที่ 42

ตารางที่ 42 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ด้วยกฎข้อที่สองของฟิคกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ
JCI ของสะพาน R1

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ไม่ซ่อมแซม	632,285.45	1
Grade 1-ฉีต	988,947.70	23
Grade 1-เคลือบ	322,724.51	9
Grade 1-impressed	360,925.96	4
Grade 1-ฉีต+เคลือบ	526,028.63	7
Grade 1-ฉีต+impressed	437,487.30	3
Grade 1-เคลือบ+impressed	351,924.06	3
Grade 1-ฉีต+เคลือบ+impressed	439,681.26	3
Grade 2-ฉีต	754,928.58	12
Grade 2-เคลือบ	327,112.37	5
Grade 2-impressed	338,534.33	2
Grade 2-ฉีต+เคลือบ	471,180.39	4
Grade 2-ฉีต+impressed	411,665.30	2
Grade 2-เคลือบ+impressed	342,922.19	2
Grade 2-ฉีต+เคลือบ+impressed	416,053.16	2
Grade 3-ฉีต	754,928.58	6
Grade 3-เคลือบ	331,500.23	3
Grade 3-impressed	327,338.53	1
Grade 3-ฉีต+ECR	577,789.10	1
Grade 3-ฉีต+เคลือบ	472,643.01	2
Grade 3-ฉีต+impressed	400,469.50	1
Grade 3-เคลือบ+impressed	332,457.70	1
Grade 3-ฉีต+เคลือบ+impressed	405,588.67	1
Grade 3-ฉีต+ECR+impressed	588,984.91	1
Grade 3-ฉีต+เคลือบ+ECR+impressed	594,104.07	1
Grade 4-ฉีต	645,232.12	3
Grade 4-เคลือบ	339,544.64	2
Grade 4-impressed	327,338.53	1
Grade 4-ฉีต+ECR	614,354.59	1
Grade 4-ฉีต+เคลือบ	437,540.15	1

ตารางที่ 42 (ต่อ)

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
Grade 4-ฉีดยา+impressed	437,034.99	1
Grade 4-เคลือบ+impressed	339,039.48	1
Grade 4-ฉีดยา+เคลือบ+impressed	448,735.95	1
Grade 4-ฉีดยา+ECR+impressed	625,550.39	1
Grade 4-ฉีดยา+เคลือบ+ECR+impressed	637,251.35	1
Grade 5-เททับ	350,760.81	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ	375,137.80	1
Grade 5-เททับ+impressed	361,956.61	1
Grade 5-เททับ+Zn Anode	370,306.81	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+impressed	386,333.60	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+Zn Anode	394,683.81	1

ผลจากการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ด้วยกฎข้อที่สองของฟิคกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset (2008) พบว่าหากไม่ทำการบำรุงรักษาสะพานจะมีอายุการใช้งานที่ 71 ปี จากนั้นทำการสร้างใหม่ในปีที่ 72 ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี เท่ากับ 632,285.45 บาท/ปี และเมื่อวิเคราะห์ทางเลือกในการซ่อมแซมทั้ง 40 วิธีในระดับการเสื่อมสภาพที่ 1 ถึง 5 ซึ่งแตกต่างกันพบว่า มีวิธีการซ่อมแซมโครงสร้าง 8 วิธีที่มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี สูงกว่าการที่ไม่บำรุงรักษาสะพานตลอดอายุการใช้งาน ได้แก่วิธีการฉีดยาอุดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 1 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 11 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 23 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 988,947.70 บาท/ปี วิธีการฉีดยาอุดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 2 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 54 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 12 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 754,928.58 บาท/ปี วิธีการฉีดยาอุดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 3 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 55 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 12 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 1,193,714.43 บาท/ปี วิธีการซ่อมแซมผสมระหว่างวิธีการฉีดยาอุดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินและลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมีในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 3 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 55 ปี จากนั้นทำซ้ำทุก 39 ปี เป็นจำนวน 2 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 839,435.48 บาท/ปี วิธีการฉีดยาอุดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 57 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวน

ทั้งสิ้น 11 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานสูงที่สุดเท่ากับ 1,522,803.82 บาท/ปี วิธีการซ่อมแซมผสมระหว่างวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินและลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมีในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 57 ปี จากนั้นทำซ้ำทุก 39 ปี เป็นจำนวน 2 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 912,566.46 บาท/ปี วิธีการซ่อมแซมผสมระหว่างวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินและเคลือบผิวคอนกรีตด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 57 ปี จากนั้นทำซ้ำทุก 14 ปี เป็นจำนวน 4 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 801,732.40 บาท/ปี และวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซิน เคลือบผิวโครงสร้างด้วยโพลียูรีเทน ลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี และการถ่ายประจุไฟฟ้าในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 57 ปี เป็นจำนวน 1 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 637,251.35 บาท/ปี ส่วนการซ่อมแซมด้วยแนวทางอื่นนั้นให้ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งานที่ต่ำกว่าการไม่บำรุงรักษาสะพาน โดยที่วิธีการเคลือบผิวโครงสร้างด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 1 ซึ่งทำการเคลือบเมื่อโครงสร้างมีอายุ 11 ปี จากนั้นเคลือบซ้ำทุก 10 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 9 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุดเท่ากับ 322,724.51 บาท/ปี ดังแสดงในตารางที่ 43

ตารางที่ 43 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซมด้วยกฎข้อที่สองของฟิคกับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน R1

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ไม่ซ่อมแซม	632,285.45	1
Grade 1-ฉีด	988,947.70	23
Grade 1-เคลือบ	322,724.51	9
Grade 1-impressed	360,925.96	4
Grade 1-ฉีด+เคลือบ	526,028.63	7
Grade 1-ฉีด+impressed	437,487.30	3
Grade 1-เคลือบ+impressed	351,924.06	3
Grade 1-ฉีด+เคลือบ+impressed	439,681.26	3
Grade 2-ฉีด	754,928.58	12
Grade 2-เคลือบ	327,112.37	5
Grade 2-impressed	338,534.33	2

ตารางที่ 43 (ต่อ)

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
Grade 2-ฉีดยาเคลือบ	471,180.39	4
Grade 2-ฉีดยา+impressed	411,665.30	2
Grade 2-เคลือบ+impressed	342,922.19	2
Grade 2-ฉีดยาเคลือบ+impressed	416,053.16	2
Grade 3-ฉีดยา	1,193,714.43	12
Grade 3-เคลือบ	341,738.57	5
Grade 3-impressed	338,534.33	2
Grade 3-ฉีดยา+ECR	839,435.48	2
Grade 3-ฉีดยาเคลือบ	550,893.16	3
Grade 3-ฉีดยา+impressed	484,796.31	2
Grade 3-เคลือบ+impressed	348,772.70	2
Grade 3-ฉีดยาเคลือบ+impressed	495,034.65	2
Grade 3-ฉีดยา+ECR+impressed	588,984.91	1
Grade 3-ฉีดยาเคลือบ+ECR+impressed	594,104.07	1
Grade 4-ฉีดยา	1,522,803.82	11
Grade 4-เคลือบ	374,647.51	5
Grade 4-impressed	327,338.53	2
Grade 4-ฉีดยา+ECR	912,566.46	2
Grade 4-ฉีดยาเคลือบ	801,732.40	4
Grade 4-ฉีดยา+impressed	546,731.45	2
Grade 4-เคลือบ+impressed	361,936.24	2
Grade 4-ฉีดยาเคลือบ+impressed	581,329.17	2
Grade 4-ฉีดยา+ECR+impressed	625,550.39	1
Grade 4-ฉีดยาเคลือบ+ECR+impressed	637,251.35	1
Grade 5-เททับ	350,760.81	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ	375,137.80	1
Grade 5-เททับ+impressed	361,956.61	1
Grade 5-เททับ+Zn Anode	370,306.81	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+impressed	386,333.60	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+Zn Anode	394,683.81	1

ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ด้วยระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis (1994) กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI (1998) พบว่าหากไม่ทำการบำรุงรักษาสะพานจะมีอายุการใช้งานที่ 69 ปี จากนั้นทำการสร้างใหม่ในปีที่ 70 ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี เท่ากับ 632,285.45 บาท/ปี และเมื่อวิเคราะห์ทางเลือกในการซ่อมแซมทั้ง 33 วิธีในระดับการเสื่อมสภาพที่ 2 ถึง 5 ซึ่งแตกต่างกันพบว่า มีวิธีการซ่อมแซมโครงสร้าง 7 วิธีที่มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี สูงกว่าการที่ไม่บำรุงรักษาสะพานตลอดอายุการใช้งาน ได้แก่ วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 2 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 24 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 19 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 1,010,886.99 บาท/ปี วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 3 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 48 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 13 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 1,266,845.41 บาท/ปี วิธีการซ่อมแซมผสมระหว่างวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินและลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมีในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 3 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 48 ปี จากนั้นทำซ้ำทุก 39 ปี เป็นจำนวน 4 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 839,435.48 บาท/ปี วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 59 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 11 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานสูงที่สุดเท่ากับ 1,522,803.82 บาท/ปี วิธีการซ่อมแซมผสมระหว่างวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินและลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมีในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 59 ปี จากนั้นทำซ้ำทุก 39 ปี เป็นจำนวน 2 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 912,566.46 บาท/ปี วิธีการซ่อมแซมผสมระหว่างวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินและเคลือบผิวคอนกรีตด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 59 ปี จากนั้นทำซ้ำทุก 14 ปี เป็นจำนวน 3 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 680,334.98 บาท/ปี และวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซิน เคลือบผิวโครงสร้างด้วยโพลียูรีเทน ลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี และการถ่ายประจุไฟฟ้าในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 59 ปี เป็นจำนวน 1 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 637,251.35 บาท/ปี ส่วนการซ่อมแซมด้วยแนวทางอื่นนั้นให้ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งานที่ต่ำกว่าการไม่บำรุงรักษาสะพาน โดยที่วิธีการเคลือบผิวโครงสร้างด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 2 ซึ่งทำการเคลือบเมื่อโครงสร้างมีอายุ 24 ปี จากนั้นเคลือบซ้ำทุก 10 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 8 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุดเท่ากับ 333,694.16 บาท/ปี ดังแสดงในตารางที่ 44

ตารางที่ 44 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ
Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน
R1

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ไม่ซ่อมแซม	632,285.45	2
Grade 2-ฉีต	1,010,886.99	19
Grade 2-เคลือบ	333,694.16	8
Grade 2-impressed	360,925.96	4
Grade 2-ฉีต+เคลือบ	548,699.23	6
Grade 2-ฉีต+impressed	459,426.59	3
Grade 2-เคลือบ+impressed	356,311.92	3
Grade 2-ฉีต+เคลือบ+impressed	416,053.16	2
Grade 3-ฉีต	1,266,845.41	13
Grade 3-เคลือบ	346,857.74	6
Grade 3-impressed	349,730.13	3
Grade 3-ฉีต+ECR	839,435.48	4
Grade 3-ฉีต+เคลือบ	629,143.30	4
Grade 3-ฉีต+impressed	484,796.28	2
Grade 3-เคลือบ+impressed	348,772.67	2
Grade 3-ฉีต+เคลือบ+impressed	495,034.62	2
Grade 3-ฉีต+ECR+impressed	588,984.91	1
Grade 3-ฉีต+เคลือบ+ECR+impressed	594,104.07	1
Grade 4-ฉีต	1,522,803.82	11
Grade 4-เคลือบ	374,647.51	5
Grade 4-impressed	338,534.33	2
Grade 4-ฉีต+ECR	912,566.46	2
Grade 4-ฉีต+เคลือบ	680,334.98	3
Grade 4-ฉีต+impressed	557,927.26	2
Grade 4-เคลือบ+impressed	361,936.24	2
Grade 4-ฉีต+เคลือบ+impressed	581,329.17	2
Grade 4-ฉีต+ECR+impressed	625,550.39	1
Grade 4-ฉีต+เคลือบ+ECR+impressed	637,251.35	1

ตารางที่ 44 (ต่อ)

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
Grade 5-เททับ	350,760.81	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ	375,137.80	1
Grade 5-เททับ+impressed	361,956.61	1
Grade 5-เททับ+Zn Anode	370,306.81	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+impressed	386,333.60	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+Zn Anode	394,683.81	1

ผลจากการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซมร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis (1994) กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset (2008) พบว่าหากไม่ทำการบำรุงรักษาสะพานจะมีอายุการใช้งานที่ 41 ปี จากนั้นทำการสร้างใหม่ 2 ครั้งในปีที่ 42 และปีที่ 84 ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี เท่ากับ 948,428.18 บาท/ปี และเมื่อวิเคราะห์ทางเลือกในการซ่อมแซมทั้ง 33 วิธีในระดับการเสื่อมสภาพที่ 2 ถึง 5 ซึ่งแตกต่างกันพบว่า มีวิธีการซ่อมแซมโครงสร้าง 4 วิธีที่มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี สูงกว่าการที่ไม่บำรุงรักษาสะพานตลอดอายุการใช้งาน ได้แก่ วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 2 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 23 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 20 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 1,047,452.48 บาท/ปี วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 3 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 25 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 20 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 1,705,631.26 บาท/ปี วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 27 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 19 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานสูงที่สุดเท่ากับ 2,400,375.53 บาท/ปี และวิธีการซ่อมแซมผสมระหว่างวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินและเคลือบผิวคอนกรีตด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 27 ปี จากนั้นทำซ้ำทุก 14 ปี เป็นจำนวน 6 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 1,044,527.24 บาท/ปี ส่วนการซ่อมแซมด้วยแนวทางอื่นนั้นให้ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งานที่ต่ำกว่าการไม่บำรุงรักษาสะพาน โดยที่วิธีการเคลือบผิวโครงสร้างด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 2 ซึ่งทำการเคลือบเมื่อโครงสร้างมีอายุ 24 ปี จากนั้นเคลือบซ้ำทุก 10 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 8 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุดเท่ากับ 333,694.16 บาท/ปี ดังแสดงในตารางที่ 45

ตารางที่ 45 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ
Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของ
สะพาน R1

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ไม่ซ่อมแซม	948,428.18	2
Grade 2-ฉีต	1,047,452.48	20
Grade 2-เคลือบ	333,694.16	8
Grade 2-impressed	360,925.96	4
Grade 2-ฉีต+เคลือบ	548,699.23	6
Grade 2-ฉีต+impressed	459,426.59	3
Grade 2-เคลือบ+impressed	356,311.92	3
Grade 2-ฉีต+เคลือบ+impressed	416,053.16	2
Grade 3-ฉีต	1,705,631.26	20
Grade 3-เคลือบ	357,096.07	8
Grade 3-impressed	349,730.13	3
Grade 3-ฉีต+ECR	839,435.48	4
Grade 3-ฉีต+เคลือบ	785,643.59	6
Grade 3-ฉีต+impressed	569,123.06	3
Grade 3-เคลือบ+impressed	365,087.64	3
Grade 3-ฉีต+เคลือบ+impressed	495,034.62	2
Grade 3-ฉีต+ECR+impressed	588,984.91	1
Grade 3-ฉีต+เคลือบ+ECR+impressed	594,104.07	1
Grade 4-ฉีต	2,400,375.53	19
Grade 4-เคลือบ	409,750.37	8
Grade 4-impressed	349,730.13	3
Grade 4-ฉีต+ECR	912,566.46	2
Grade 4-ฉีต+เคลือบ	1,044,527.24	6
Grade 4-ฉีต+impressed	678,819.52	3
Grade 4-เคลือบ+impressed	384,833.00	3
Grade 4-ฉีต+เคลือบ+impressed	581,329.17	2
Grade 4-ฉีต+ECR+impressed	625,550.39	2
Grade 4-ฉีต+เคลือบ+ECR+impressed	637,251.35	1

ตารางที่ 45 (ต่อ)

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
Grade 5-เททับ	350,760.81	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ	375,137.80	1
Grade 5-เททับ+impressed	361,956.61	1
Grade 5-เททับ+Zn Anode	370,306.81	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+impressed	386,333.60	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+Zn Anode	394,683.81	1

สะพาน R2

ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ด้วยระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis (1994) กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI (1998) พบว่าหากไม่ทำการบำรุงรักษาสะพานจะมีอายุการใช้งานที่ 64 ปี จากนั้นทำการสร้างใหม่ในปีที่ 65 ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี เท่ากับ 356,033.03 บาท/ปี และเมื่อวิเคราะห์ทางเลือกในการซ่อมแซมทั้ง 33 วิธีในระดับการเสื่อมสภาพที่ 2 ถึง 5 ซึ่งแตกต่างกันพบว่า มีวิธีการซ่อมแซมโครงสร้าง 9 วิธีที่มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี สูงกว่าการที่ไม่บำรุงรักษาสะพานตลอดอายุการใช้งาน ได้แก่ วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 2 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 27 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 19 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 555,592.30 บาท/ปี วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 3 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 43 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 15 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 777,346.70 บาท/ปี วิธีการซ่อมแซมผสมระหว่างวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินและลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมีในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 3 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 43 ปี จากนั้นทำซ้ำทุก 39 ปี เป็นจำนวน 2 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 463,919.21 บาท/ปี วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 54 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 12 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานสูงที่สุดเท่ากับ 897,212.74 บาท/ปี วิธีการซ่อมแซมผสมระหว่างวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินและลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมีในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 54 ปี จากนั้นทำซ้ำทุก 39 ปี เป็นจำนวน 2 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน

เท่ากับ 503,874.56 บาท/ปี วิธีการซ่อมแซมผสมระหว่างวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินและเคลือบผิวคอนกรีตด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 54 ปี จากนั้นทำซ้ำทุก 14 ปี เป็นจำนวน 4 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 444,320.01 บาท/ปี วิธีการซ่อมแซมผสมระหว่างวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซิน ลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี และการถ่ายประจุไฟฟ้าในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 54 ปี เป็นจำนวน 1 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 357,449.19 บาท/ปี และวิธีการซ่อมแซมผสมระหว่างวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินเคลือบผิวคอนกรีตด้วยโพลียูรีเทน ลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี และการถ่ายประจุไฟฟ้าในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 54 ปี เป็นจำนวน 1 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 363,842.05 บาท/ปี ส่วนการซ่อมแซมด้วยแนวทางอื่นนั้นให้ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งานที่ต่ำกว่าการไม่บำรุงรักษาสะพาน โดยที่วิธีการเคลือบผิวโครงสร้างด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 2 ซึ่งทำการเคลือบเมื่อโครงสร้างมีอายุ 19 ปี จากนั้นเคลือบซ้ำทุก 10 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 8 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุดเท่ากับ 187,605.80 บาท/ปี ดังแสดงในตารางที่ 46

ตารางที่ 46 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซมร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน R2

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ไม่ซ่อมแซม	356,033.03	1
Grade 2-ฉีด	557,592.30	19
Grade 2-เคลือบ	187,605.80	8
Grade 2-impressed	227,527.48	3
Grade 2-ฉีด+เคลือบ	305,074.52	6
Grade 2-ฉีด+impressed	287,460.50	3
Grade 2-เคลือบ+impressed	231,123.46	3
Grade 2-ฉีด+เคลือบ+impressed	253,376.49	2
Grade 3-ฉีด	777,346.70	15
Grade 3-เคลือบ	194,797.76	6
Grade 3-impressed	227,527.48	3
Grade 3-ฉีด+ECR	463,919.21	2

ตารางที่ 46 (ต่อ)

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
Grade 3-ฉีดยาเคลือบ	391,777.62	5
Grade 3-ฉีดยา+impressed	290,934.52	2
Grade 3-เคลือบ+impressed	216,617.57	2
Grade 3-ฉีดยา+เคลือบ+impressed	296,528.26	2
Grade 3-ฉีดยา+ECR+impressed	337,471.52	1
Grade 3-ฉีดยา+เคลือบ+ECR+impressed	340,268.39	1
Grade 4-ฉีดยา	897,212.74	12
Grade 4-เคลือบ	209,980.79	5
Grade 4-impressed	211,023.82	2
Grade 4-ฉีดยา+ECR	503,874.56	2
Grade 4-ฉีดยา+เคลือบ	443,320.01	4
Grade 4-ฉีดยา+impressed	330,889.86	2
Grade 4-เคลือบ+impressed	223,809.53	2
Grade 4-ฉีดยา+เคลือบ+impressed	343,675.57	2
Grade 4-ฉีดยา+ECR+impressed	357,449.19	1
Grade 4-ฉีดยา+เคลือบ+ECR+impressed	363,842.05	1
Grade 5-เททับ	190,626.50	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ	199,661.51	1
Grade 5-เททับ+impressed	201,822.30	1
Grade 5-เททับ+Zn Anode	200,982.61	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+impressed	210,857.31	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+Zn Anode	210,017.62	1

ผลจากการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซมร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis (1994) กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset (2008) พบว่าหากไม่ทำการบำรุงรักษาสะพานจะมีอายุการใช้งานที่ 40 ปี จากนั้นทำการสร้างใหม่ 2 ครั้งในปีที่ 41 และปีที่ 82 ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี เท่ากับ 534,049.55 บาท/ปี และเมื่อวิเคราะห์ทางเลือกในการซ่อมแซมทั้ง 33 วิธีในระดับการเสื่อมสภาพที่ 2 ถึง 5 ซึ่งแตกต่างกันพบว่า มีวิธีการซ่อมแซมโครงสร้าง 2 วิธีที่มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี สูงกว่าการที่ไม่บำรุงรักษาสะพานตลอดอายุการใช้งาน ได้แก่ วิธีการฉีดยาอุดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพ

ระดับที่ 3 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 34 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 17 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 857,257.39 บาท/ปี และวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 35 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 17 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานสูงที่สุดเท่ากับ 1,196,877.83 บาท/ปี ส่วนการซ่อมแซมด้วยแนวทางอื่นนั้นให้ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งานที่ต่ำกว่าการไม่บำรุงรักษาสะพาน โดยที่วิธีการเคลือบผิวโครงสร้างด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 2 ซึ่งทำการเคลือบเมื่อโครงสร้างมีอายุ 33 ปี จากนั้นเคลือบซ้ำทุก 10 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 7 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุดเท่ากับ 186,407.14 บาท/ปี ดังแสดงในตารางที่ 47

ตารางที่ 47 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซมร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน R2

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ไม่ซ่อมแซม	534,049.55	2
Grade 2-ฉีดย	517,636.95	17
Grade 2-เคลือบ	186,407.14	7
Grade 2-impressed	227,527.48	3
Grade 2-ฉีดย+เคลือบ	283,898.18	6
Grade 2-ฉีดย+impressed	287,460.50	3
Grade 2-เคลือบ+impressed	213,421.15	3
Grade 2-ฉีดย+เคลือบ+impressed	253,376.49	2
Grade 3-ฉีดย	857,257.39	17
Grade 3-เคลือบ	197,594.64	7
Grade 3-impressed	227,527.48	3
Grade 3-ฉีดย+ECR	463,919.21	2
Grade 3-ฉีดย+เคลือบ	391,777.62	5
Grade 3-ฉีดย+impressed	347,393.51	3
Grade 3-เคลือบ+impressed	235,918.10	3
Grade 3-ฉีดย+เคลือบ+impressed	296,528.26	2
Grade 3-ฉีดย+ECR+impressed	337,471.52	1
Grade 3-ฉีดย+เคลือบ+ECR+impressed	340,268.39	1

ตารางที่ 47 (ต่อ)

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
Grade 4-ฉีดยา	1,196,877.83	17
Grade 4-เคลือบ	222,766.50	7
Grade 4-impressed	227,527.48	3
Grade 4-ฉีดยา+ECR	503,874.56	2
Grade 4-ฉีดยา+เคลือบ	509,645.88	5
Grade 4-ฉีดยา+impressed	407,326.53	3
Grade 4-เคลือบ+impressed	223,809.53	2
Grade 4-ฉีดยา+เคลือบ+impressed	343,675.57	2
Grade 4-ฉีดยา+ECR+impressed	357,449.19	1
Grade 4-ฉีดยา+เคลือบ+ECR+impressed	363,842.05	1
Grade 5-เทปูน	190,626.50	1
Grade 5-เทปูน+เคลือบ	199,661.51	1
Grade 5-เทปูน+impressed	201,822.30	1
Grade 5-เทปูน+Zn Anode	200,982.61	1
Grade 5-เทปูน+เคลือบ+impressed	210,857.31	1
Grade 5-เทปูน+เคลือบ+Zn Anode	210,017.62	1

สะพาน R3

ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซม ด้วยระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis (1994) กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI (1998) พบว่าหากไม่ทำการบำรุงรักษาสะพานจะมีอายุการใช้งานที่ 62 ปี จากนั้นทำการสร้างใหม่ในปีที่ 63 ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี เท่ากับ 251,748.03 บาท/ปี และเมื่อวิเคราะห์ทางเลือกในการซ่อมแซมทั้ง 33 วิธีใน ระดับการเสื่อมสภาพที่ 2 ถึง 5 ซึ่งแตกต่างกันพบว่า มีวิธีการซ่อมแซมโครงสร้าง 11 วิธีที่มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี สูงกว่าการที่ไม่บำรุงรักษาสะพานตลอดอายุการใช้งาน ได้แก่ วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 2 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 32 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 17 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 373,329.80 บาท/ปี วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 3 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 41 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 15

ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 562,560.69 บาท/ปี วิธีการซ่อมแซมผสมระหว่างวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินและลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมีในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 3 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 41 ปี จากนั้นทำซ้ำทุก 39 ปี เป็นจำนวน 2 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 334,189.73 บาท/ปี วิธีการซ่อมแซมผสมระหว่างวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินและเคลือบผิวคอนกรีตด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 3 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 41 ปี จากนั้นทำซ้ำทุก 14 ปี เป็นจำนวน 3 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 281,625.59 บาท/ปี วิธีการซ่อมแซมผสมระหว่างวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินและถ่ายเทประจุไฟฟ้าในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 3 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 41 ปี จากนั้นทำซ้ำทุก 29 ปี เป็นจำนวน 3 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 262,722.31 บาท/ปี วิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 52 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 12 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานสูงที่สุดเท่ากับ 649,898.02 บาท/ปี วิธีการซ่อมแซมผสมระหว่างวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินและลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมีในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 52 ปี จากนั้นทำซ้ำทุก 39 ปี เป็นจำนวน 2 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 363,302.18 บาท/ปี วิธีการซ่อมแซมผสมระหว่างวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินและเคลือบผิวคอนกรีตด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 52 ปี จากนั้นทำซ้ำทุก 14 ปี เป็นจำนวน 4 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 319,180.65 บาท/ปี วิธีการซ่อมแซมผสมระหว่างวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซิน เคลือบผิวคอนกรีตด้วยโพลียูรีเทน และการถ่ายประจุไฟฟ้าในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 52 ปี จากนั้นทำซ้ำทุก 39 ปี เป็นจำนวน 1 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 255,534.64 บาท/ปี วิธีการซ่อมแซมผสมระหว่างวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซิน ลดปริมาณคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าเคมี และการถ่ายประจุไฟฟ้าในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 52 ปี เป็นจำนวน 1 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 261,091.75 บาท/ปี และวิธีการซ่อมแซมผสมระหว่างวิธีการฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซิน เคลือบผิวคอนกรีตด้วยโพลียูรีเทน ลดปริมาณคลอไรด์ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี และการถ่ายประจุไฟฟ้าในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ซึ่งทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 52 ปี เป็นจำนวน 1 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 265,749.74 บาท/ปี ส่วนการซ่อมแซมด้วยแนวทางอื่นนั้นให้ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งานที่ต่ำกว่าการไม่บำรุงรักษาสะพาน โดยที่วิธีการเคลือบผิวโครงสร้างด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 2 ซึ่งทำการเคลือบเมื่อโครงสร้างมีอายุ 32 ปี จากนั้นเคลือบ

ซ้ำทุก 10 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 7 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุดเท่ากับ 131,987.63 บาท/ปี ดังแสดงในตารางที่ 48

ตารางที่ 48 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซมร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ JCI ของสะพาน R3

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ไม่ซ่อมแซม	251,748.03	1
Grade 2-ฉีดยา	373,329.80	17
Grade 2-เคลือบ	131,987.63	7
Grade 2-impressed	175,384.97	3
Grade 2-ฉีดยา+เคลือบ	203,021.99	5
Grade 2-ฉีดยา+impressed	219,053.64	3
Grade 2-เคลือบ+impressed	160,628.07	2
Grade 2-ฉีดยา+เคลือบ+impressed	189,740.51	2
Grade 3-ฉีดยา	562,560.69	15
Grade 3-เคลือบ	138,101.24	6
Grade 3-impressed	175,384.97	3
Grade 3-ฉีดยา+ECR	334,189.73	2
Grade 3-ฉีดยา+เคลือบ	281,625.59	5
Grade 3-ฉีดยา+impressed	262,722.31	3
Grade 3-เคลือบ+impressed	162,957.06	2
Grade 3-ฉีดยา+เคลือบ+impressed	221,181.95	2
Grade 3-ฉีดยา+ECR+impressed	246,535.53	1
Grade 3-ฉีดยา+เคลือบ+ECR+impressed	248,573.40	1
Grade 4-ฉีดยา	649,898.02	12
Grade 4-เคลือบ	149,163.97	5
Grade 4-impressed	158,881.32	2
Grade 4-ฉีดยา+ECR	363,302.18	2
Grade 4-ฉีดยา+เคลือบ	319,180.65	4
Grade 4-ฉีดยา+impressed	246,218.66	2

ตารางที่ 48 (ต่อ)

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
Grade 4-เคลือบ+impressed	168,197.30	2
Grade 4-ฉีดยา+เคลือบ+impressed	255,534.64	2
Grade 4-ฉีดยา+ECR+impressed	261,091.75	1
Grade 4-ฉีดยา+เคลือบ+ECR+impressed	265,749.74	1
Grade 5-เททับ	134,648.10	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ	141,231.23	1
Grade 5-เททับ+impressed	145,843.90	1
Grade 5-เททับ+Zn Anode	139,313.01	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+impressed	152,427.03	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+Zn Anode	145,896.15	1

ผลจากการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซมร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis (1994) กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset (2008) พบว่าหากไม่ทำการบำรุงรักษาสะพานจะมีอายุการใช้งานที่ 40 ปี จากนั้นทำการสร้างใหม่ 2 ครั้งในปีที่ 41 และปีที่ 82 ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี เท่ากับ 377,622.04 บาท/ปี และเมื่อวิเคราะห์ทางเลือกในการซ่อมแซมทั้ง 33 วิธีในระดับการเสื่อมสภาพที่ 2 ถึง 5 ซึ่งแตกต่างกันพบว่า มีวิธีการซ่อมแซมโครงสร้าง 3 วิธีที่มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี สูงกว่าการที่ไม่บำรุงรักษาสะพานตลอดอายุการใช้งาน ได้แก่ วิธีการฉีดยาด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 2 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 30 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 18 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 387,886.02 บาท/ปี วิธีการฉีดยาด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 3 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 33 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 17 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเท่ากับ 620,785.58 บาท/ปี และวิธีการฉีดยาด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 4 ทำการซ่อมแซมเมื่อโครงสร้างมีอายุ 35 ปี และซ่อมแซมซ้ำทุก 4 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 17 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานสูงที่สุดเท่ากับ 868,241.36 บาท/ปี ส่วนการซ่อมแซมด้วยแนวทางอื่นนั้นให้ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งานที่ต่ำกว่าการไม่บำรุงรักษาสะพาน โดยที่วิธีการเคลือบผิวโครงสร้างด้วยโพลียูรีเทนในโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 2 ซึ่งทำการเคลือบเมื่อโครงสร้างมีอายุ 30 ปี จากนั้นเคลือบซ้ำ

ทุก 10 ปี เป็นจำนวนทั้งสิ้น 7 ครั้ง มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุดเท่ากับ 131,987.63 บาท/ปี ดังแสดงในตารางที่ 49

ตารางที่ 49 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ยต่อปีและจำนวนครั้งในการซ่อมแซมร่วมกันระหว่างระยะเวลาเริ่มต้นการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Pulvis กับระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดของเหล็กเสริมด้วยสมการของ Markeset ของสะพาน R3

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
ไม่ซ่อมแซม	377,622.04	2
Grade 2-ฉีดยา	387,886.02	18
Grade 2-เคลือบ	131,987.63	7
Grade 2-impressed	175,384.97	3
Grade 2-ฉีดยา+เคลือบ	203,021.99	5
Grade 2-ฉีดยา+impressed	219,053.64	3
Grade 2-เคลือบ+impressed	160,628.07	2
Grade 2-ฉีดยา+เคลือบ+impressed	189,740.51	2
Grade 3-ฉีดยา	620,785.58	17
Grade 3-เคลือบ	140,139.11	7
Grade 3-impressed	175,384.97	3
Grade 3-ฉีดยา+ECR	334,189.73	2
Grade 3-ฉีดยา+เคลือบ	281,625.59	5
Grade 3-ฉีดยา+impressed	262,722.31	3
Grade 3-เคลือบ+impressed	162,957.06	2
Grade 3-ฉีดยา+เคลือบ+impressed	221,181.95	2
Grade 3-ฉีดยา+ECR+impressed	246,535.53	1
Grade 3-ฉีดยา+เคลือบ+ECR+impressed	248,573.40	1
Grade 4-ฉีดยา	868,241.36	17
Grade 4-เคลือบ	158,479.95	7
Grade 4-impressed	175,384.97	3
Grade 4-ฉีดยา+ECR	363,302.18	2
Grade 4-ฉีดยา+เคลือบ	367,507.31	5
Grade 4-ฉีดยา+impressed	306,390.98	3
Grade 4-เคลือบ+impressed	168,197.30	2

ตารางที่ 49 (ต่อ)

แนวทางการซ่อมแซม	ค่าซ่อมแซมเฉลี่ยต่อปี (บาท/ปี)	จำนวนครั้งในการซ่อมแซม
Grade 4-ฉีดยาเคลือบ+impressed	255,534.64	2
Grade 4-ฉีดยา+ECR+impressed	261,091.75	1
Grade 4-ฉีดยาเคลือบ+ECR+impressed	265,749.74	1
Grade 5-เททับ	134,648.10	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ	141,231.23	1
Grade 5-เททับ+impressed	145,843.90	1
Grade 5-เททับ+Zn Anode	139,313.01	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+impressed	152,427.03	1
Grade 5-เททับ+เคลือบ+Zn Anode	145,896.15	1

2 ผลการเปรียบเทียบ

ผลจากการเปรียบเทียบการป้องกันและซ่อมแซมโครงสร้างแยกตามระดับการเสื่อมสภาพของชิ้นส่วนหลักของสะพาน ในระยะเวลา 100 ปี พบว่าแนวทางการซ่อมแซมโครงสร้างหลักของสะพานที่ทำการตรวจสอบทั้ง 5 แห่ง จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทั้ง 4 แบบข้างต้น ด้วยวิธีการเคลือบผิวคอนกรีตด้วยโพลียูรีเทนในช่วงอายุที่โครงสร้างมีการเสื่อมสภาพเล็กน้อย เช่น ระดับการเสื่อมสภาพ 1 หรือ 2 ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ย 100 ปี ต่ำที่สุดคือ การป้องกันโครงสร้าง เนื่องจากวัสดุเคลือบผิวโพลียูรีเทนสามารถลดสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของคลอไรด์ได้ร้อยละ 86 และมีอายุการใช้งานยาวนานถึง 10 ปี โดยมีค่าใช้จ่าย 750 บาท/ตร.ม.

ในขณะที่แนวทางการซ่อมแซมโดยฉีดอัดรอยร้าวด้วยอีพ็อกซีเรซินในโครงสร้างที่มีการเสื่อมสภาพค่อนข้างรุนแรง เช่น ระดับการเสื่อมสภาพ 3 หรือ 4 มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานเฉลี่ย 100 ปี สูงที่สุดอีกทั้งสูงกว่าการปล่อยให้โครงสร้างเสื่อมสภาพ ไม่บำรุงรักษาโครงสร้างใดๆ แล้วทำการก่อสร้างใหม่เมื่อสะพานไม่สามารถรับแรงได้ เนื่องจากอีพ็อกซีเรซินมีอายุการใช้งานสั้น ต้องทำการฉีดอัดรอยร้าวซ้ำทุก 4 ปี โดยมีค่าใช้จ่าย 750 บาท/ตร.ม.

เมื่อวิเคราะห์ผลสำรวจสะพานที่ทำการตรวจสอบทั้ง 5 แห่ง สามารถสรุปแนวทางการซ่อมแซมสะพานที่เหมาะสมในแต่ละระดับความเสียหาย เปรียบเทียบจากค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานที่ได้จากการทำนายอายุของโครงสร้างด้วยแบบจำลองทั้ง 4 ประเภท ดังแสดงในตารางที่ 50

ตารางที่ 50 แนวทางการซ่อมแซมสะพานจากการตรวจสอบสะพานทั้ง 5 แห่งในแต่ละระดับความเสียหาย ด้วยการทำนายอายุของโครงสร้างโดยใช้แบบจำลองทั้ง 4 ประเภท

สะพาน	ระดับการเสื่อมสภาพ	แบบจำลอง			
		Fick's + JCI	Flick's + Markeset	Pulvis + JCI	Pulvis + Markeset
S1	1	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต	-	-
	2	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต
	3	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต
	4	ถ่ายประจุไฟฟ้า	ถ่ายประจุไฟฟ้า	ถ่ายประจุไฟฟ้า	ถ่ายประจุไฟฟ้า
	5	เททับด้วยคอนกรีต	เททับด้วยคอนกรีต	เททับด้วยคอนกรีต	เททับด้วยคอนกรีต
	6	ผสมแก้าลอย	ผสมแก้าลอย	ผสมแก้าลอย	ผสมแก้าลอย
S2	1	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต	-	-
	2	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต
	3	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต
	4	-	ถ่ายประจุไฟฟ้า	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต
	5	-	เททับด้วยคอนกรีต	เททับด้วยคอนกรีต	เททับด้วยคอนกรีต
	6	-	ผสมแก้าลอย	ผสมแก้าลอย	ผสมแก้าลอย
R1	1	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต	-	-
	2	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต
	3	ถ่ายประจุไฟฟ้า	ถ่ายประจุไฟฟ้า	เคลือบผิวคอนกรีต	ถ่ายประจุไฟฟ้า
	4	ถ่ายประจุไฟฟ้า	ถ่ายประจุไฟฟ้า	ถ่ายประจุไฟฟ้า	ถ่ายประจุไฟฟ้า
	5	เททับด้วยคอนกรีต	เททับด้วยคอนกรีต	เททับด้วยคอนกรีต	เททับด้วยคอนกรีต
	6	ผสมแก้าลอย	ผสมแก้าลอย	ผสมแก้าลอย	ผสมแก้าลอย
R2	1	-	-	-	-
	2	-	-	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต
	3	-	-	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต
	4	-	-	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต
	5	-	-	เททับด้วยคอนกรีต	เททับด้วยคอนกรีต
	6	-	-	ผสมแก้าลอย	ผสมแก้าลอย

ตารางที่ 50 (ต่อ)

สะพาน	ระดับการเสื่อมสภาพ	แบบจำลอง			
		Fick's + JCI	Flick's + Markeset	Pulvis + JCI	Pulvis + Markeset
R3	1	-	-	-	-
	2	-	-	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต
	3	-	-	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต
	4	-	-	เคลือบผิวคอนกรีต	เคลือบผิวคอนกรีต
	5	-	-	เทพื้นด้วยคอนกรีต	เทพื้นด้วยคอนกรีต
				ผสมเถ้าลอย	ผสมเถ้าลอย

จากตารางที่ 35 พบว่าแนวทางการซ่อมแซมที่ทำให้ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี ที่ต่ำสุดสำหรับซ่อมแซมโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 1 และ 2 คือการเคลือบผิวคอนกรีตด้วยโพลียูรีเทน เพราะสามารถควบคุมกระบวนการดูดน้ำเข้าไปในโพรงคอนกรีต ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับโครงสร้างที่ต้องเผชิญสภาวะแวดล้อมทะเลที่มีน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการพาคลอไรด์ไอออนเข้าไปในเนื้อคอนกรีต ส่งผลให้ชั้นฟิล์มป้องกันเหล็กเสริมสึกกร่อน อีกทั้งค่ายังเป็นวิธีที่แพร่หลาย ช่างมีความคุ้นเคย มีค่าใช้จ่ายในการเคลือบโครงสร้างไม่สูง และโพลียูรีเทนมีอายุการใช้งานยาวนานถึง 10 ปี จึงเหมาะในการซ่อมแซมโครงสร้างที่มีการเสื่อมสภาพไม่มากนัก

โครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับ 3 และ 4 สามารถบำรุงรักษาโดยการเคลือบคอนกรีตด้วยโพลียูรีเทน หรือการยับยั้งการเกิดสนิมด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้า สาเหตุเพราะโครงสร้างเริ่มมีการเสื่อมสภาพมาก การเคลือบคอนกรีตต้องทำเป็นบริเวณกว้าง แต่การปล่อยกระแสไฟฟ้าที่กระทำทุก 25 ปี มีจำนวนการกระทำซ้ำน้อยกว่าการเคลือบผิวคอนกรีต จึงส่งผลให้สองแนวทางนี้มีค่าใช้จ่ายที่ใกล้เคียงกัน

โครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับ 5 ใช้วิธีการสกัดคอนกรีตหุ้มออก เปลี่ยนเหล็กปลอกและเหล็กเสริมหลักขนาดเล็กที่สุด จากนั้นเทพื้นด้วยคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักซีเมนต์ ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์มีค่าเท่ากับ $1.059 \text{ ซม.}^2/\text{ปี}$ ทำให้คลอไรด์ที่ระดับเหล็กเสริมในช่วงระยะเวลา 100 ปี มีค่าน้อยกว่า 0.083 โดยน้ำหนักคอนกรีต อีกทั้งมีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี ต่ำที่สุด จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมในการซ่อมแซมสะพานเสื่อมสภาพระดับ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. ความเสียหายในโครงสร้างสะพานพบที่เสามากกว่าคานและพื้น พบความเสียหายในเสาทั้งสิ้น 62 ชิ้น ส่วนจากชิ้นส่วนทั้งหมด 92 ชิ้นส่วน คิดเป็นร้อยละ 67.4 โดยระดับ 1 (รอยร้าวเล็กๆ หรือเกิดสนิมแบบจุดที่ผิวคอนกรีต) คือระดับการเสื่อมสภาพที่พบมากที่สุด อีกทั้งปริมาณคลอไรด์ที่เสาและคานมีแนวโน้มสูงกว่าปริมาณคลอไรด์ที่พื้นในกรณีที่ผลการตรวจสอบด้วยสายตาอยู่ในระดับการเสื่อมสภาพเดียวกัน

2. ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวคอนกรีตและการเสื่อมสภาพที่ตรวจสอบได้ด้วยสายตามีแนวโน้มที่จะลดน้อยลงเมื่อระยะทางจากชายฝั่งเพิ่มมากขึ้น

3. ผลการเปรียบเทียบระดับการเสื่อมสภาพจากการสำรวจด้วยสายตากับผลการทำนายการเสื่อมสภาพจากแบบจำลองมีแนวโน้มต่ำกว่าระดับการเสื่อมสภาพจากการสำรวจด้วยสายตา แต่ผลที่ได้จากแบบจำลองจะมีความใกล้เคียงกับระดับการเสื่อมสภาพจากการสำรวจด้วยสายตาในกรณีที่สะพานมีอายุมาก และการทำนายการเสื่อมสภาพด้วยสมการของ Pulvis (ระยะเริ่มต้นการกัดกร่อน) ร่วมกับสมการของ Markeset (ระยะเวลาการสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริม) ได้ผลการทำนายระดับการเสื่อมสภาพที่ใกล้เคียงกับระดับการเสื่อมสภาพจากการสำรวจด้วยสายตามากที่สุด

4. จากการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี ด้วยวิธีการบำรุงรักษาโครงสร้างทั้ง 41 วิธี พบว่า

- 4.1 ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี เฉลี่ยต่ำที่สุด ในการบำรุงรักษาโครงสร้างที่เสื่อมสภาพในระดับ 1 และ 2 คือการเคลือบผิวคอนกรีตด้วยโพลียูรีเทน
- 4.2 ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี เฉลี่ยต่ำที่สุด ในการบำรุงรักษาโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับ 3 และ 4 คือการเคลือบผิวคอนกรีตด้วยโพลียูรีเทน หรือการยับยั้งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า
- 4.3 ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน 100 ปี เฉลี่ยต่ำที่สุด ในการบำรุงรักษาโครงสร้างที่เสื่อมสภาพระดับที่ 5 คือการเททับด้วยคอนกรีตผสมเถ้าลอยร้อยละ 15 โดยน้ำหนักคอนกรีต

ข้อเสนอแนะ

1. การเจาะเก็บตัวอย่างผงคอนกรีตจากโครงสร้างจริง ควรมีการควบคุมการปนเปื้อนจากสภาวะแวดล้อมเป็นอย่างดี เช่น มีการทำความสะอาดรูเจาะด้วยลูกยางเป่าลม ที่สำคัญคือควรเจาะคอนกรีตผิวหน้าช่วง 0-2 ซม. แรกทิ้ง เนื่องจากมีการปนเปื้อนจากสภาพแวดล้อมสูง ค่าปริมาณคลอไรด์จึงมีความคลาดเคลื่อนสูง

2. ควรเก็บตัวอย่างคอนกรีตในระดับความเสียหายเดียวกันจากโครงสร้างเดียวกันในปริมาณที่มากยิ่งขึ้น เพื่อนำมาวิเคราะห์หลักทางสถิติและความน่าจะเป็นในการวิเคราะห์คลอไรด์ ทำให้ได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

3. ควรมีการเก็บค่ากำลังอัดของคอนกรีตจริงในแต่ละชั้นส่วนโครงสร้าง เพื่อนำมาใช้ในการทำนายการเสื่อมสภาพและอายุของโครงสร้าง ทำให้ได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

4. ควรมีการศึกษาและพัฒนาสมการในการทำนายการเสื่อมสภาพของโครงสร้างที่เผชิญสภาวะแวดล้อมทะเลในประเทศไทย ให้มีความเหมาะสมและแม่นยำกับการเสื่อมสภาพที่ตรวจพบบนโครงสร้าง

5. แนวทางการบำรุงรักษาโครงสร้างที่นำเสนอเป็นวิธีที่แพร่หลายทั้งทั่วโลกและบางวิธีก็เป็นแนวทางบำรุงรักษาชนิดใหม่สำหรับประเทศไทย ดังนั้นการทดลองในสภาวะแวดล้อมจริงจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับทดสอบประสิทธิภาพของแนวทางแต่ละวิธี

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กรมทางหลวง. 2549. **คู่มือการซ่อมแซมและบำรุงรักษาสะพาน (Bridge Repair and Maintenance Manual)**. สำนักก่อสร้างสะพาน, กรมทางหลวง, กรุงเทพมหานคร.
- คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุภายใต้คณะกรรมการวิชาการ สาขาวิศวกรรมโยธา ว.ส.ท., 2543. **การเกิดสนิมของเหล็กเสริมโดยคลอไรด์**. กรุงเทพฯ.
- ณัฐพล ทองขาว และวันชัย ยอดสุดใจ. 2548. การซ่อมแซมคอนกรีตที่เสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากคลอไรด์ด้วยการถ่ายประจุไฟฟ้า (Cathodic Protection). **โยธาสาร** 17 (4): 49-51.
- ทวีชัย สำราญวานิช. 2552. **คอนกรีตสำหรับสิ่งแวดล้อมทะเล**. แหล่งที่มา:
http://www.thaitca.or.th/index.php?option=com_content&view=article&id=88:-marine-concrete&catid=45:journal04&Itemid=55, 19 ธันวาคม 2555
- ทวีชัย สำราญวานิช. 2553. การเกิดสนิมของเหล็กเสริมในคอนกรีตเนื่องจากคลอไรด์. **โยธาสาร** 22 (3): 79-85.
- ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. 2551. **คู่มือปฏิบัติงานซ่อมบำรุงสะพาน (สำหรับสะพานในสายทางโครงข่ายทางหลวงชนบท)**. สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนา, กรมทางหลวงชนบท.
- รักติพงษ์ สหมิตรมงคล และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล. 2553. **การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีตเนื่องจากการปนเปื้อนคลอไรด์ในส่วนผสม**. แหล่งที่มา:
http://www.thaitca.or.th/index.php?option=com_content&view=article&id=101:2010-11-13-20-06-19&catid=47:journal06&Itemid=55, 19 ธันวาคม 2555
- ราชกิจจานุเบกษา. 2555. พระราชบัญญัติงบประมาณรายจ่ายประจำปีงบประมาณ 2555 เล่ม 129 ตอนที่ 15 ก.

วัชรกร วงศ์คำจันทร์, วันชัย ยอดสุดใจ และสุวิมล สัจจาณชัย. 2553. เงื่อนไขและข้อจำกัดของการทดสอบทางไฟฟ้าเคมีเพื่อตรวจวัดการเกิดสนิมในเหล็กเสริมคอนกรีต. **โยธาสาร** 22 (4): 35-40.

วันชัย ยอดสุดใจ. 2548. การลดปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Chloride Removal). **โยธาสาร** 17 (6): 49-51.

_____. 2552. ความสำคัญของค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานใน (Life Cycle Cost Analysis) ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก. **โยธาสาร** 21 (5): 32-35

_____. 2552. ความสำคัญและหลักการเบื้องต้นในการบำรุงรักษา บูรณะซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก. **โยธาสาร** 21 (2): 47-52.

ACI Committee 201. 2008. **Guide to Durable Concrete**. 53.

ACI Committee 222. 2001. **Protection of Metals in Concrete Against Corrosion**. 41.

ACI Committee 318. 2002. **BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR STRUCTURAL CONCRETE AND COMMENTARY**. 445.

ACI Committee 357. 1997. **Guide for the Design and Construction of Fixed Offshore Concrete Structures**. 23.

ACI Committee E 706. 2007. **Vertical and Overhead Spall Repair by Hand Application**. 7.

Almusallam, A.A., F.M. Khan, S.U. Dulaijan and O.S.B. Al-Amoudi. 2003. Effectiveness of surface coatings in improving concrete durability. **Cement & Concrete Composites** 25 (4): 473-481.

- Al-Zahrani, M.M., S.U. Al-Dulaijan, M. Ibrahim, H. Saricimen and F.M. Sharif. 2002. Effect of waterproofing coatings on steel reinforcement corrosion and physical properties of concrete. **Cement & Concrete Composites** 24 (1): 127-137.
- Boga, A.R. and I.B. Topcu. 2012. Influence on fly ash on corrosion resistance and chloride ion permeability of concrete. **Construction and Building Material** 31: 258-264.
- British Standard 8110: Part 1. 1985. Structural use of concrete – code of practice for design and construction. 124.
- Building Research Establishment Ltd. 2003. **Residual life Models for Concrete Repair -Assessment of the Concrete Repair Process**. 63.
- El-HaWary, M., H. Al-Khaiat and S. Fereig. 2000. Performance of epoxy-repaired in a marine environment. **Cement and Concrete Research** 30 (2): 259-266.
- Erdogdu, S., T.W. Bremner and I.L. Kondratova. 2001. Accelerated testing of plain and epoxy-coated reinforcement in simulated seawater and chloride solutions. **Cement and Concrete Research** 31 (6): 861-867.
- Garces, P., L.G. Andion, E. Zornoza, M. Bonilla and J. Paya. 2010. The effect of processed fly ashes on the durability and the corrosion of steel rebars embedded in cement-modified fly ash mortars. **Cement & Concrete Composites** 32 (3): 204-210.
- Greenberg, A.E., L.S. Clesceri and A.D. Eaton. 1998. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20th Edition. American Public Health Association, Washington, DC.

International Committee on Concrete Model Code for Asia. 2004. Maintenance for Chloride Attack: Guidelines for maintenance and rehabilitation of concrete structures against chloride induced deterioration, **Asia Concrete Model Code 2001**. Japan Concrete Institute, Japan.

Japan Society of Civil Engineers. 2003. **Standard Specifications for Concrete Structures 2002, Structural Performance Verification**. No.3. Tokyo, Japan.

John Broomfield. 1997. **Corrosion of steel in Concrete Understanding, investigate and repair**. United Kingdom.

Jumaat, M.Z., M.H. kabir and M. Obaydullah. 2006. A Review of the Repair of Reinforced Concrete Beams. **Journal of Applied Science Research** 2 (6): 317-326.

Kim, G.T., K.T. Kim., D.H. Lee., C.H. Han., H.B. Kim. and J.T. Jun. 2010. Development of a life cycle cost estimate system for structures of light rail transit infrastructure. **Automation in Construction** 19 (3): 308-325.

Kouloumbi, N., and G. Batis. 1992. Chloride corrosion of steel rebars in mortars with fly ash admixtures. **Cement and Concrete Composites** 14 (3): 199–207.

Manabu Matsushima. 1997. Evaluatetion of parameters effecting chloride induced deterioration based on actual data in situ. **Concrete Library of JSCE** 30.

Markeset, G., and R. Myrdal. 2008. **Modelling of reinforcement corrosion in concrete-State of the art**. COIN Project report 7. 48.

McGee, R. 1999. Modelling of durability performance of Tasmanian bridges. **ICASP8 applications of statistics and probability in civil engineering** 1: 297-306.

- Medeiros, M.H.F. and P. Helene. 2009. Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride coefficient and capillary water absorption, **Construction and Building Materials** 23 (3): 1476-1484.
- Moriwake, A. 1996. **Structure on Durability and Maintenance of Reinforced Concrete Jetty Deck against Chloride Induced Deteriorated**, PhD Thesis, Tokyo Institute of Technology.
- Neville, A. M. 2002. **Properties of Concrete**. Pearson Education Limited, England.
- Pedefferri, P. 1996. Cathodic Protection and Cathodic Prevention. **Construction and Building Materials** 10 (5): 391-402.
- Poursaei, Amir. 2010. Corrosion of steel bars in saturated Ca(OH)_2 and concrete pore solution. **Concrete Research Letters** 1 (3): 90-97
- Pullar-Strecker, P. 1987. **Corrosion Damaged Concrete: assessment and repair**, CIRIA (Construction Industry Research and Information Association), Butterworths.
- Purvis, R.L., Babaei, K., Clear, K.C., & Markow, M.J. 1994. **Life-cycle cost analysis for protection and rehabilitation of concrete bridges relative to reinforcement corrosion**. Strategic Highway Research Highway, Washington.
- Port and Harbor Research Institute. 1999. **Manual on Maintenance and Rehabilitation of Port and Harbor Structures**. Coastal Development Institute of Technology, Japan.
- Song, H.W., C.H. Lee and K.Y. Ann. 2008. Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments. **Cement and Concrete Composites** 30 (2): 113-121.

- Thanoon, W.A., M.S. Jaafar, M.R. A Kadir and J. Noorzaei. 2005. Repair and structural performance of initially cracked reinforced concrete slabs. **Construction and Building Materials** 19 (8): 595-603.
- Val, Dimitri V. and M.G. Stewart. 2003. Life-cycle cost analysis of reinforced Concrete structures in marine environments. **structural safety** 25 (4): 346-462.
- Vu, Kim Anh T. and M.G. Stewart. 2000. Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models. **Structural Safety** 22 (4): 313-333
- Weyers, R. E., B. D. Prowell, M.M. Sprinkell and M. Vorster. 1993. **Concrete Bridge Protection, Repair, and Rehabilitation Relative to Reinforcement Corrosion: A Methods Application Manual**. Strategic Highway Research Program, Washington, DC.
- Wilson, K., M. Jawed and V. Ngala. 2013. The Selection and Use of Cathodic Protection Systems for the Repair of Reinforced Concrete Structures. **Construction and Building Materials** 39: 19-25.
- Yodsudjai, W. and W. Saelim. 2013. Influences of Electric Potential and Electrolyte on Electrochemical Chloride Removal in Reinforced Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering** 26 (1): 83-89.
- Yokota, H.T., Fukute, H. Hamada and A. Mikami. 1999. Structural Assessment of Deteriorated Reinforced Concrete Beams under Marine Environments for More than 20 Years, pp.251-257. *In Concrete Durability and Repair Technology: Proceedings of the International Conference Held at the University of Dundee*, 8-10 September 1999, Scotland, UK.

Yokota, H.T., T. Tanabe and M. Iwanami. 2002. Life-cycle management of existing ports and harbor structures, pp 197-212. *In* **Maintaining the safety of deteriorating civil infrastructures**, Proceedings of the 2nd International Workshop on Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure System, Japan.

_____, M. Iwanami and F. Sato. 2003. Quantitative Evaluation of structural Performance of Reinforced Concrete Beams Damaged by Corrosion of Reinforcing Bars, **ACI Special Publication**. 212.





รายการและข้อกำหนดงานโครงสร้าง

ในรายงานฉบับนี้จะแสดงเฉพาะรายการและข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณเท่านั้น โดยอ้างอิงจากมาตรฐานงานก่อสร้างของกรมโยธาธิการ (มยธ.) ซึ่งได้กำหนดรายละเอียดของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างไว้ดังนี้

1. คอนกรีต

ตารางผนวกที่ ก1 ข้อกำหนดของคอนกรีตตามมาตรฐานของกรมโยธาธิการ

แรงอัดประลัยต่ำสุดของแท่งคอนกรีตมาตรฐาน อายุ 28 วัน (กก./ตร.ซม.)		ปูนซีเมนต์ (กก.) (ไม่น้อยกว่า) ต่อ คอนกรีต 1 ลบ.ม. ในกรณีที่ไม่ได้ใช้ คอนกรีตผสมเสร็จ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท
ทรงกระบอก	ลูกบาศก์		
Ø15x30 ซม.	15x15x15 ซม.		
250	300	350	1 หรือ 5

2. เหล็ก

2.1 เหล็กกลมเรียบสัญลักษณ์ RB ใช้คุณภาพ SR-24 ตามมอก.20

เหล็กข้ออ้อยสัญลักษณ์ DB ใช้คุณภาพ SD-40 ตามมอก.24

2.2 ระยะคอนกรีตหุ้มถึงผิวเหล็กเสริมในโครงสร้าง

เสาคอนกรีตหนา 5 ซม.

คานคอนกรีต 7.5 ซม.

พื้นสะพานคอนกรีตด้านล่าง 2.5 ซม.

พื้นสะพานคอนกรีตด้านบน 3.5 ซม.

ตารางผนวกที่ ก2 ปริมาณส่วนผสมของคอนกรีตต่อลูกบาศก์เมตรของคอนกรีตทรงกระบอกกำลัง
อัด 250 กก./ตร.ซม.

ชนิดวัสดุ	ปริมาณ	หน่วย
ซีเมนต์	350.943	กก.
มวลรวมละเอียด	536.822	กก.
มวลรวมหยาบขนาด 20 มม.	746.855	กก.
มวลรวมหยาบขนาด 10 มม.	497.904	กก.
น้ำ	211.028	ลิตร
ค่าการยุบตัว	75 - 100	มม.
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	0.53	



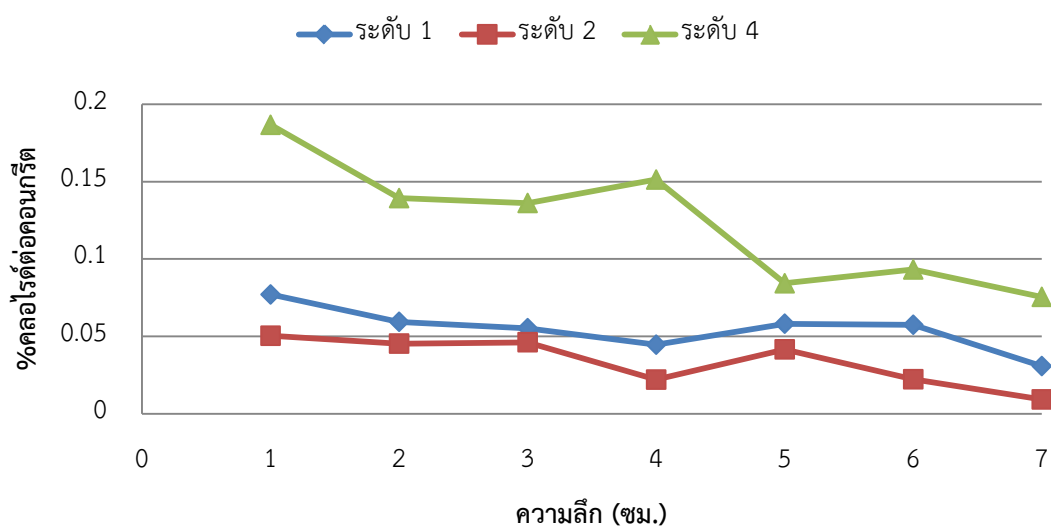
ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบปริมาณคลอไรต์ในคอนกรีต

ตารางผนวกที่ ข1 ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในสะพาน S1

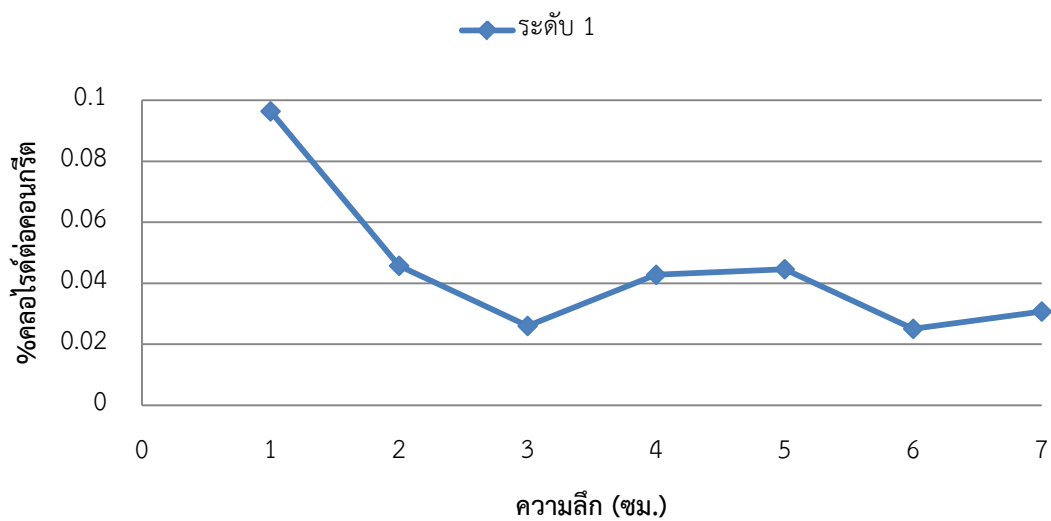
ระดับการเสื่อมสภาพ	ชั้นส่วน	ความลึก	ความเข้มข้นที่อ่าน จากเครื่อง ISE (PPM)	ปริมาณคลอไรด์ (%โดยน้ำหนัก คอนกรีต)
1	คาน	0 ซม.-1 ซม.	153	0.0770
1	คาน	1 ซม.-2 ซม.	121	0.0594
1	คาน	2 ซม.-3 ซม.	80	0.0552
1	คาน	3 ซม.-4 ซม.	60	0.0446
1	คาน	4 ซม.-5 ซม.	81	0.0581
1	คาน	5 ซม.-6 ซม.	66.3	0.0575
1	คาน	6 ซม.-7 ซม.	42	0.0307
2	คาน	0 ซม.-1 ซม.	86	0.0504
2	คาน	1 ซม.-2 ซม.	66.3	0.0453
2	คาน	2 ซม.-3 ซม.	50.7	0.0462
2	คาน	3 ซม.-4 ซม.	28	0.0220
2	คาน	4 ซม.-5 ซม.	54.6	0.0416
2	คาน	5 ซม.-6 ซม.	36.2	0.0222
2	คาน	6 ซม.-7 ซม.	13.6	0.0092
4	คาน	0 ซม.-1 ซม.	217	0.1867
4	คาน	1 ซม.-2 ซม.	176	0.1394
4	คาน	2 ซม.-3 ซม.	222	0.1362
4	คาน	3 ซม.-4 ซม.	191	0.1513
4	คาน	4 ซม.-5 ซม.	127.6	0.0843
4	คาน	5 ซม.-6 ซม.	137	0.0932
4	คาน	6 ซม.-7 ซม.	135	0.0755
1	เสา	0 ซม.-1 ซม.	123	0.0964
1	เสา	1 ซม.-2 ซม.	80.7	0.0457
1	เสา	2 ซม.-3 ซม.	32.1	0.0260
1	เสา	3 ซม.-4 ซม.	73	0.0428
1	เสา	4 ซม.-5 ซม.	60.6	0.0446
1	เสา	5 ซม.-6 ซม.	29.7	0.0250
1	เสา	6 ซม.-7 ซม.	48.6	0.0307
1	พื้น	0 ซม.-1 ซม.	10.4	0.0117
1	พื้น	1 ซม.-2 ซม.	10.2	0.0048

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

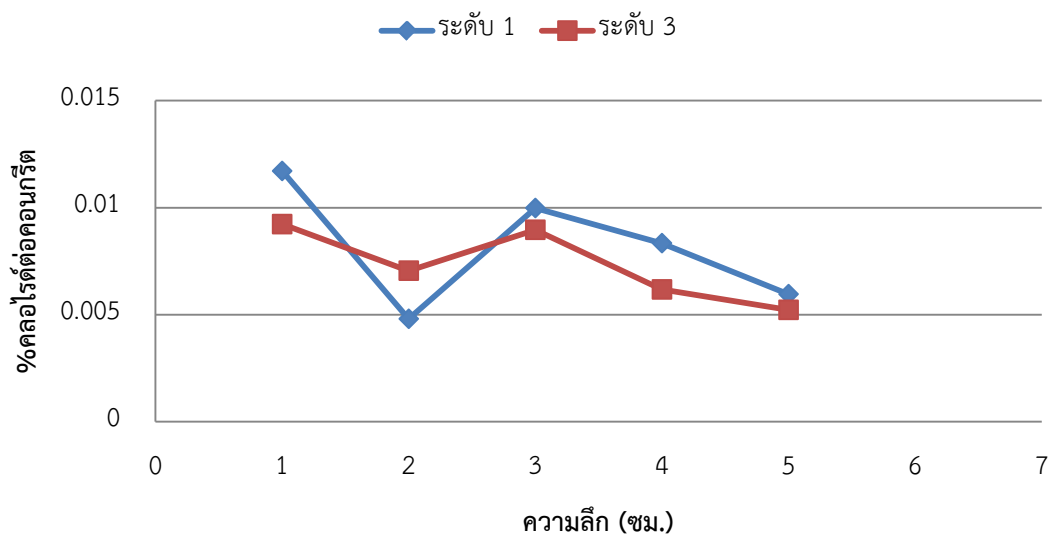
ระดับการเสื่อมสภาพ	ชิ้นส่วน	ความลึก	ความเข้มข้นที่อ่าน จากเครื่อง ISE (PPM)	ปริมาณคลอไรด์ (%โดยน้ำหนัก คอนกรีต)
1	พื้น	2 ซม.-3 ซม.	10.5	0.0100
1	พื้น	3 ซม.-4 ซม.	10.3	0.0083
1	พื้น	4 ซม.-5 ซม.	7.41	0.0060
3	พื้น	0 ซม.-1 ซม.	12.8	0.0092
3	พื้น	1 ซม.-2 ซม.	10.7	0.0071
3	พื้น	2 ซม.-3 ซม.	9.6	0.0090
3	พื้น	3 ซม.-4 ซม.	6.85	0.0062
3	พื้น	4 ซม.-5 ซม.	6.22	0.0052



ภาพผนวกที่ ข1 ปริมาณคลอไรด์ตามความลึกของคานสะพาน S1



ภาพผนวกที่ ข2 ปริมาณคลอโรฟิลล์ตามความลึกของเสาสะพาน S1



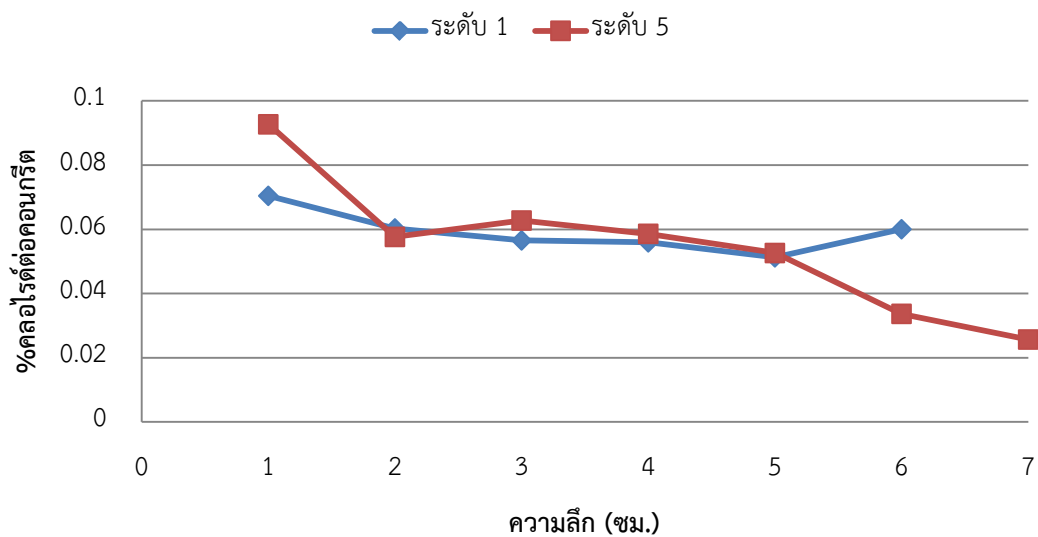
ภาพผนวกที่ ข3 ปริมาณคลอโรฟิลล์ตามความลึกของพื้นสะพาน S1

ตารางผนวกที่ ข2 ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในสะพาน S2

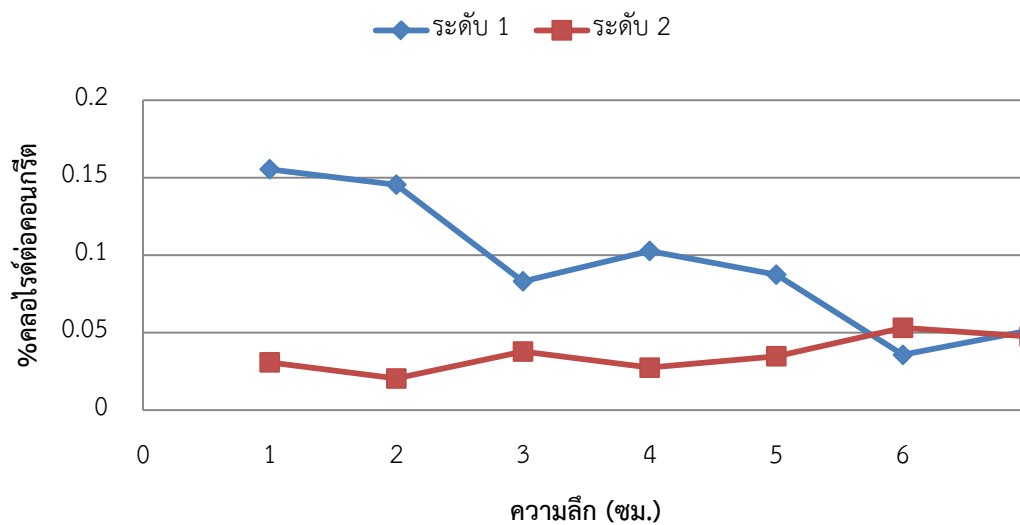
ระดับการ เสื่อมสภาพ	ชั้นส่วน	ความลึก	ความเข้มข้นที่อ่าน จากเครื่อง ISE (PPM)	ปริมาณคลอไรด์ (%โดยน้ำหนัก คอนกรีต)
1	คาน	0 ซม.-1 ซม.	90.3	0.0704
1	คาน	1 ซม.-2 ซม.	67.7	0.0603
1	คาน	2 ซม.-3 ซม.	64.3	0.0566
1	คาน	3 ซม.-4 ซม.	71.9	0.0560
1	คาน	4 ซม.-5 ซม.	75.9	0.0513
1	คาน	5 ซม.-6 ซม.	34.7	0.0600
5	คาน	0 ซม.-1 ซม.	140	0.0927
5	คาน	1 ซม.-2 ซม.	105.2	0.0576
5	คาน	2 ซม.-3 ซม.	75.8	0.0627
5	คาน	3 ซม.-4 ซม.	51.1	0.0586
5	คาน	4 ซม.-5 ซม.	68.1	0.0526
5	คาน	5 ซม.-6 ซม.	58.6	0.0337
5	คาน	6 ซม.-7 ซม.	38.4	0.0257
1	เสา	0 ซม.-1 ซม.	175	0.1556
1	เสา	1 ซม.-2 ซม.	189	0.1456
1	เสา	2 ซม.-3 ซม.	128.5	0.0832
1	เสา	3 ซม.-4 ซม.	148	0.1028
1	เสา	4 ซม.-5 ซม.	127	0.0875
1	เสา	5 ซม.-6 ซม.	71.9	0.0358
1	เสา	6 ซม.-7 ซม.	79.5	0.0516
2	เสา	0 ซม.-1 ซม.	46.6	0.0309
2	เสา	1 ซม.-2 ซม.	26	0.0205
2	เสา	2 ซม.-3 ซม.	60.4	0.0379
2	เสา	3 ซม.-4 ซม.	43.1	0.0275
2	เสา	4 ซม.-5 ซม.	53.5	0.0349
2	เสา	5 ซม.-6 ซม.	73.1	0.0532
2	เสา	6 ซม.-7 ซม.	92.7	0.0476
1	พื้น	0 ซม.-1 ซม.	145	0.0840
1	พื้น	1 ซม.-2 ซม.	90.9	0.0631
1	พื้น	2 ซม.-3 ซม.	72.8	0.0431

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

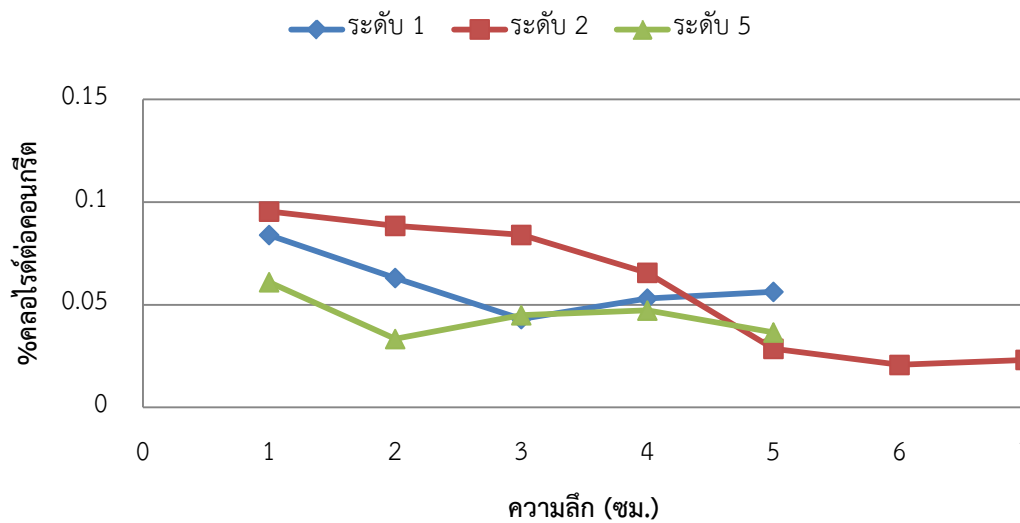
ระดับการเสื่อมสภาพ	ชิ้นส่วน	ความลึก	ความเข้มข้นที่อ่านจาก เครื่อง ISE (PPM)	ปริมาณคลอไรด์ (%โดยน้ำหนักคอนกรีต)
1	พื้น	3 ซม.-4 ซม.	61	0.0530
1	พื้น	4 ซม.-5 ซม.	58.3	0.0563
2	พื้น	0 ซม.-1 ซม.	146	0.0954
2	พื้น	1 ซม.-2 ซม.	135	0.0885
2	พื้น	2 ซม.-3 ซม.	108	0.0840
2	พื้น	3 ซม.-4 ซม.	41	0.0656
2	พื้น	4 ซม.-5 ซม.	33.3	0.0286
2	พื้น	5 ซม.-6 ซม.	25.5	0.0207
2	พื้น	6 ซม.-7 ซม.	31.5	0.0232
5	พื้น	0 ซม.-1 ซม.	86.9	0.0610
5	พื้น	1 ซม.-2 ซม.	71.1	0.0333
5	พื้น	2 ซม.-3 ซม.	64.5	0.0449
5	พื้น	3 ซม.-4 ซม.	59.4	0.0472
5	พื้น	4 ซม.-5 ซม.	59.5	0.0365



ภาพผนวกที่ ข4 ปริมาณคลอไรด์ตามความลึกของคานสะพาน S2



ภาพผนวกที่ ข5 ปริมาณคลอโรไฟต์ตามความลึกของเสาสะพาน S2



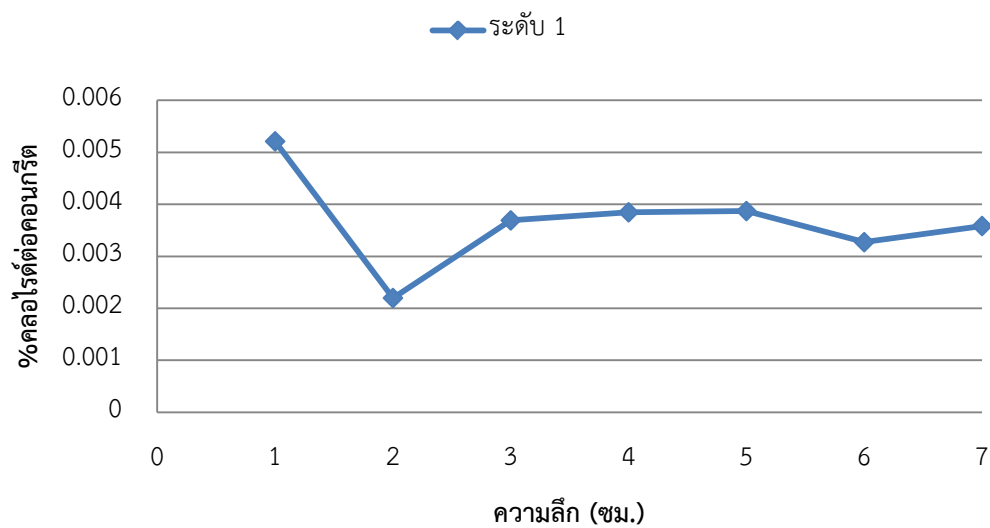
ภาพผนวกที่ ข6 ปริมาณคลอโรไฟต์ตามความลึกของพื้นสะพาน S2

ตารางผนวกที่ ข3 ผลการทดสอบปริมาณคลอรีนในสะพาน R1

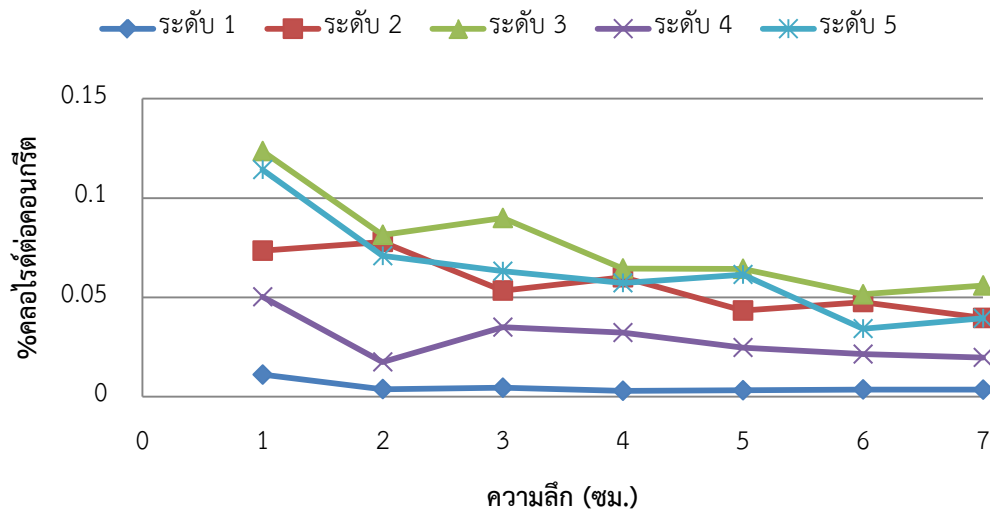
ระดับการ เสื่อมสภาพ	ชั้นส่วน	ความลึก	ความเข้มข้นที่อ่าน จากเครื่อง ISE (PPM)	ปริมาณคลอรีน (%โดยน้ำหนัก คอนกรีต)
1	คาน	0 ซม.-1 ซม.	6.16	0.0052
1	คาน	1 ซม.-2 ซม.	5.27	0.0022
1	คาน	2 ซม.-3 ซม.	5.78	0.0037
1	คาน	3 ซม.-4 ซม.	5.1	0.0038
1	คาน	4 ซม.-5 ซม.	5.02	0.0039
1	คาน	5 ซม.-6 ซม.	6.21	0.0033
1	คาน	6 ซม.-7 ซม.	6.8	0.0036
1	เส้า	0 ซม.-1 ซม.	16.2	0.0111
1	เส้า	1 ซม.-2 ซม.	6.16	0.0038
1	เส้า	2 ซม.-3 ซม.	6.62	0.0045
1	เส้า	3 ซม.-4 ซม.	4.83	0.0029
1	เส้า	4 ซม.-5 ซม.	5.81	0.0032
1	เส้า	5 ซม.-6 ซม.	5.65	0.0036
1	เส้า	6 ซม.-7 ซม.	5.27	0.0035
2	เส้า	0 ซม.-1 ซม.	126	0.0735
2	เส้า	1 ซม.-2 ซม.	142	0.0779
2	เส้า	2 ซม.-3 ซม.	86.7	0.0534
2	เส้า	3 ซม.-4 ซม.	82.2	0.0601
2	เส้า	4 ซม.-5 ซม.	80.5	0.0433
2	เส้า	5 ซม.-6 ซม.	45	0.0476
2	เส้า	6 ซม.-7 ซม.	80.1	0.0396
3	เส้า	0 ซม.-1 ซม.	146	0.1236
3	เส้า	1 ซม.-2 ซม.	168	0.0815
3	เส้า	2 ซม.-3 ซม.	108	0.0899
3	เส้า	3 ซม.-4 ซม.	67.4	0.0645
3	เส้า	4 ซม.-5 ซม.	93.7	0.0644
3	เส้า	5 ซม.-6 ซม.	54.8	0.0515
3	เส้า	6 ซม.-7 ซม.	88.3	0.0560
4	เส้า	0 ซม.-1 ซม.	72.4	0.0502
4	เส้า	1 ซม.-2 ซม.	27.1	0.0175

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

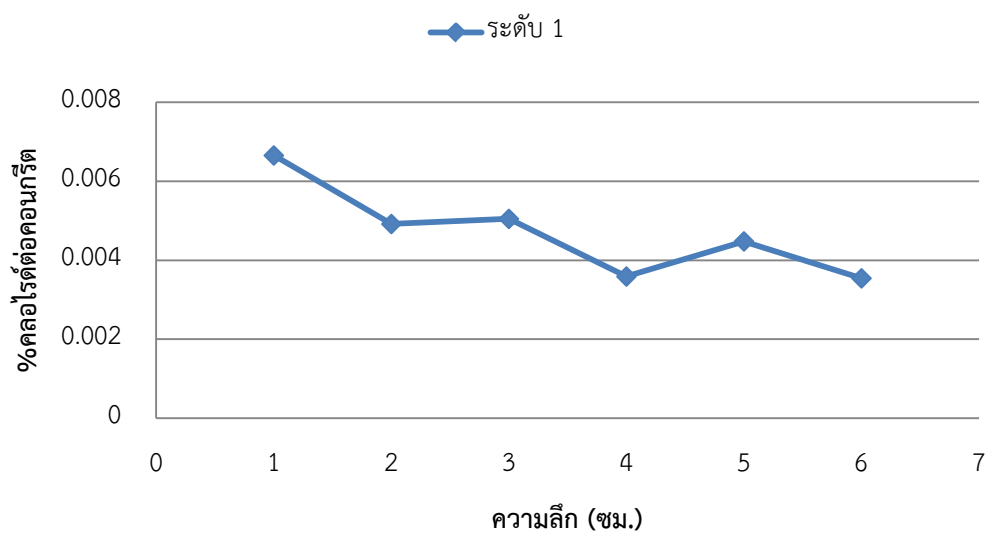
ระดับการ เสื่อมสภาพ	ชิ้นส่วน	ความลึก	ความเข้มข้นที่อ่าน จากเครื่อง ISE (PPM)	ปริมาณคลอไรด์ (%โดยน้ำหนัก คอนกรีต)
4	เสา	2 ซม.-3 ซม.	41.7	0.0350
4	เสา	3 ซม.-4 ซม.	37.5	0.0322
4	เสา	4 ซม.-5 ซม.	33	0.0247
4	เสา	5 ซม.-6 ซม.	26.5	0.0214
4	เสา	6 ซม.-7 ซม.	27.5	0.0197
5	เสา	0 ซม.-1 ซม.	141	0.1143
5	เสา	1 ซม.-2 ซม.	92.7	0.0709
5	เสา	2 ซม.-3 ซม.	85	0.0632
5	เสา	3 ซม.-4 ซม.	63.3	0.0572
5	เสา	4 ซม.-5 ซม.	51.7	0.0615
5	เสา	5 ซม.-6 ซม.	55.4	0.0342
5	เสา	6 ซม.-7 ซม.	58.7	0.0394
1	พื้น	0 ซม.-1 ซม.	14.7	0.0067
1	พื้น	1 ซม.-2 ซม.	5.16	0.0049
1	พื้น	2 ซม.-3 ซม.	4.68	0.0050
1	พื้น	3 ซม.-4 ซม.	5.75	0.0036
1	พื้น	4 ซม.-5 ซม.	2.96	0.0045
1	พื้น	5 ซม.-6 ซม.	2.14	0.0035



ภาพผนวกที่ ข7 ปริมาณคลอรีนตามความลึกของคานสะพาน R1



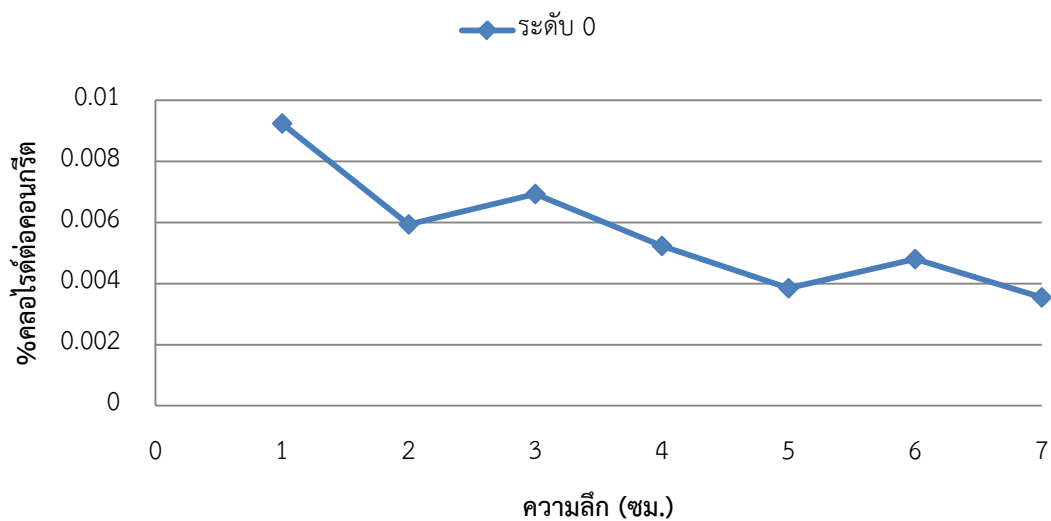
ภาพผนวกที่ ข8 ปริมาณคลอรีนตามความลึกของเสาสะพาน R1



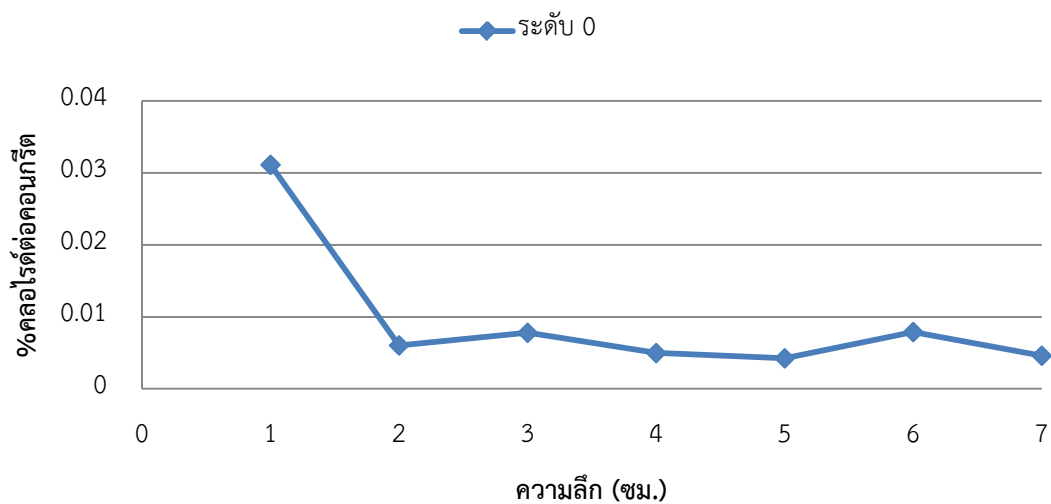
ภาพผนวกที่ ข9 ปริมาณคลอไรด์ตามความลึกของพื้นสะพาน R1

ตารางผนวกที่ ข4 ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในสะพาน R2

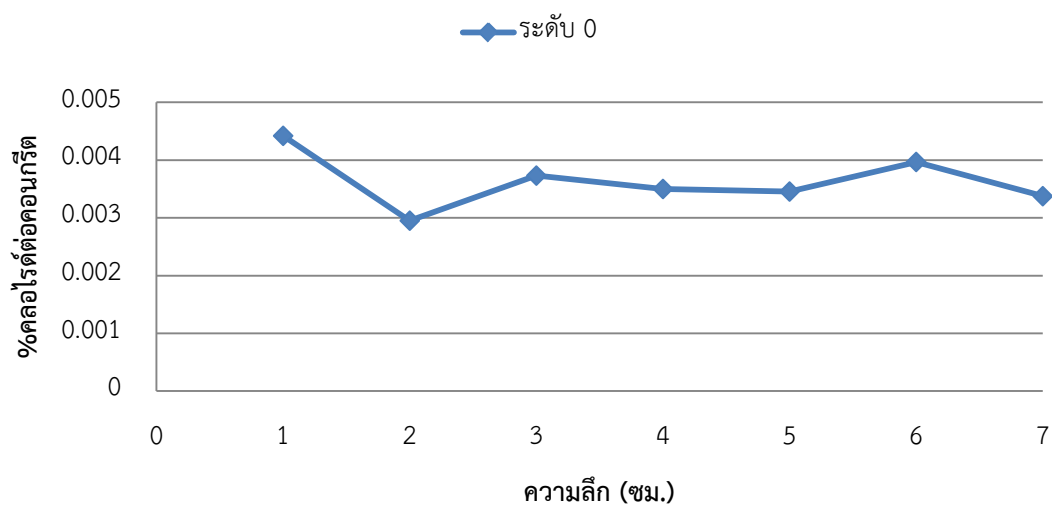
ระดับการ เสื่อมสภาพ	ชั้นส่วน	ความลึก	ความเข้มข้นที่อ่าน จากเครื่อง ISE (PPM)	ปริมาณคลอไรด์ (%โดยน้ำหนัก คอนกรีต)
0	คาน	0 ซม.-1 ซม.	17.7	0.0092
0	คาน	1 ซม.-2 ซม.	9.75	0.0059
0	คาน	2 ซม.-3 ซม.	8.05	0.0069
0	คาน	3 ซม.-4 ซม.	6.75	0.0052
0	คาน	4 ซม.-5 ซม.	5.85	0.0038
0	คาน	5 ซม.-6 ซม.	6.3	0.0048
0	คาน	6 ซม.-7 ซม.	5.54	0.0035
0	เสาคาน	0 ซม.-1 ซม.	45.9	0.0311
0	เสาคาน	1 ซม.-2 ซม.	9.11	0.0060
0	เสาคาน	2 ซม.-3 ซม.	10.3	0.0078
0	เสาคาน	3 ซม.-4 ซม.	8.65	0.0050
0	เสาคาน	4 ซม.-5 ซม.	6.3	0.0042
0	เสาคาน	5 ซม.-6 ซม.	7.1	0.0079
0	เสาคาน	6 ซม.-7 ซม.	6.6	0.0046
0	พื้น	0 ซม.-1 ซม.	6.48	0.0044
0	พื้น	1 ซม.-2 ซม.	5.17	0.0030
0	พื้น	2 ซม.-3 ซม.	5.53	0.0037
0	พื้น	3 ซม.-4 ซม.	2.45	0.0035
0	พื้น	4 ซม.-5 ซม.	3.3	0.0035
0	พื้น	5 ซม.-6 ซม.	3.19	0.0040
0	พื้น	6 ซม.-7 ซม.	3.5	0.0034
0	คาน	0 ซม.-1 ซม.	17.7	0.0092



ภาพผนวกที่ ข10 ปริมาณคลอโรฟิลล์ตามความลึกของคานสะพาน R2



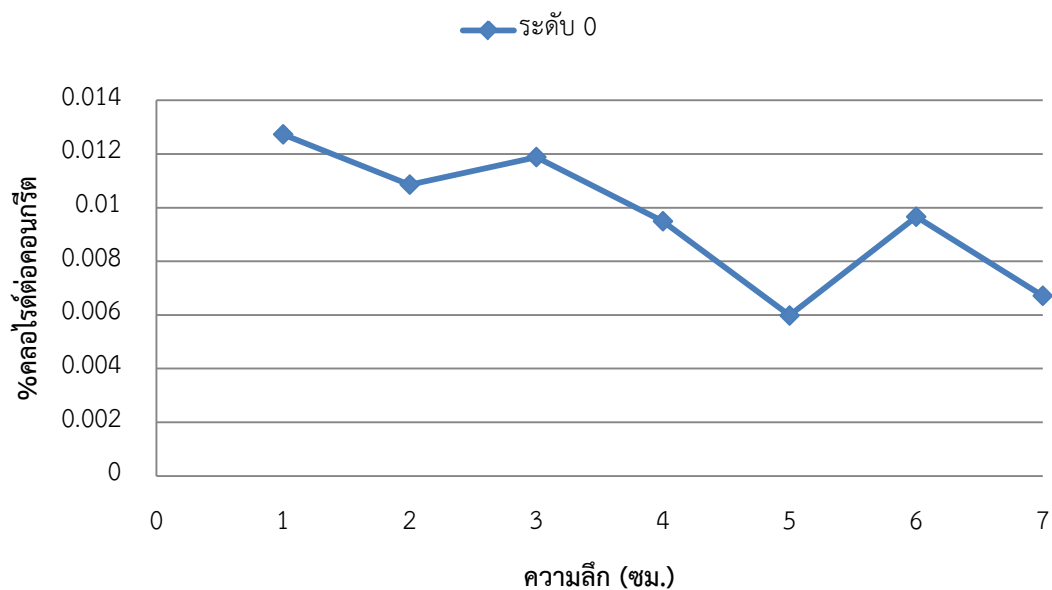
ภาพผนวกที่ ข11 ปริมาณคลอโรฟิลล์ตามความลึกของเสาสะพาน R2



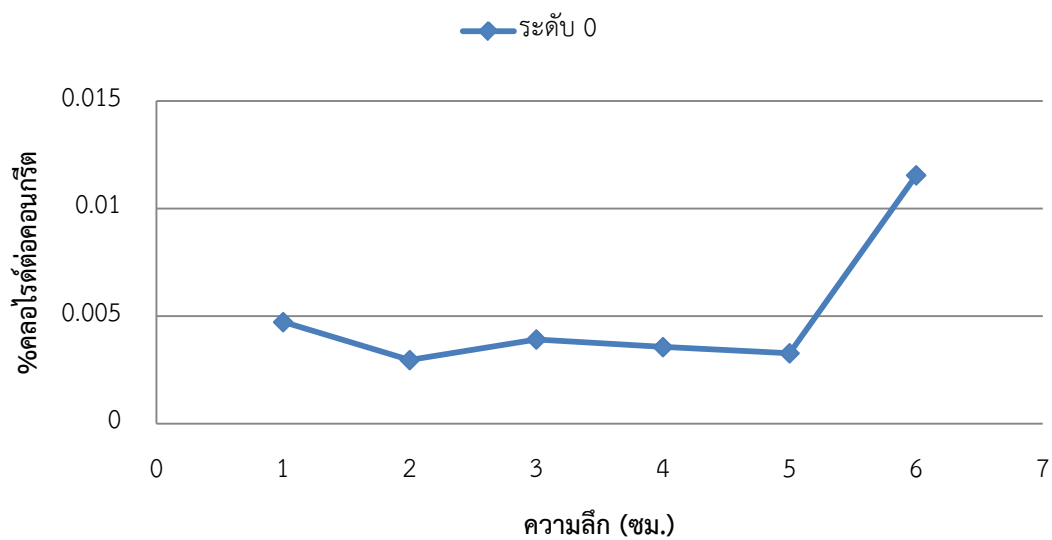
ภาพผนวกที่ ข12 ปริมาณคลอไรด์ตามความลึกของพื้นสะพาน R2

ตารางผนวกที่ ข5 ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ในสะพาน R3

ระดับการเสื่อมสภาพ	ชิ้นส่วน	ความลึก	ความเข้มข้นที่อ่านจากเครื่อง ISE (PPM)	ปริมาณคลอไรด์ (%โดยน้ำหนักคอนกรีต)
0	คาน	0 ซม.-1 ซม.	15	0.0127
0	คาน	1 ซม.-2 ซม.	13.9	0.0109
0	คาน	2 ซม.-3 ซม.	13.8	0.0119
0	คาน	3 ซม.-4 ซม.	13.7	0.0095
0	คาน	4 ซม.-5 ซม.	10.5	0.0060
0	คาน	5 ซม.-6 ซม.	9.16	0.0097
0	คาน	6 ซม.-7 ซม.	8.3	0.0067
0	พื้น	0 ซม.-1 ซม.	6.97	0.0047
0	พื้น	1 ซม.-2 ซม.	4.96	0.0030
0	พื้น	2 ซม.-3 ซม.	4.64	0.0039
0	พื้น	3 ซม.-4 ซม.	4.3	0.0036
0	พื้น	4 ซม.-5 ซม.	3.77	0.0033
0	พื้น	5 ซม.-6 ซม.	3.12	0.0116

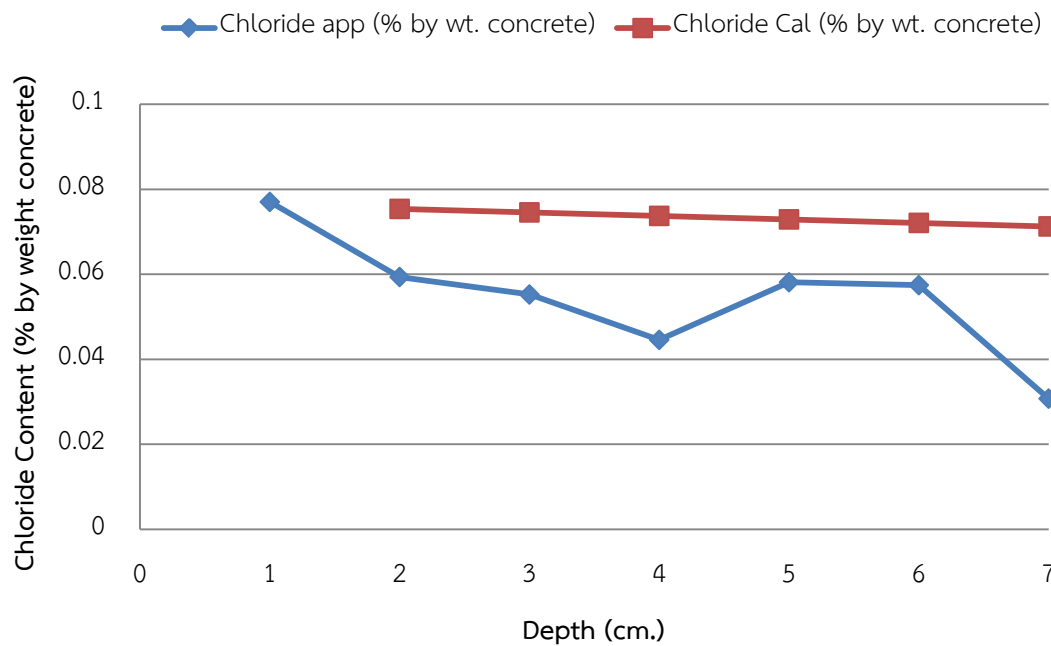


ภาพผนวกที่ ข13 ปริมาณคลอรีนตามความลึกของคานสะพาน R3

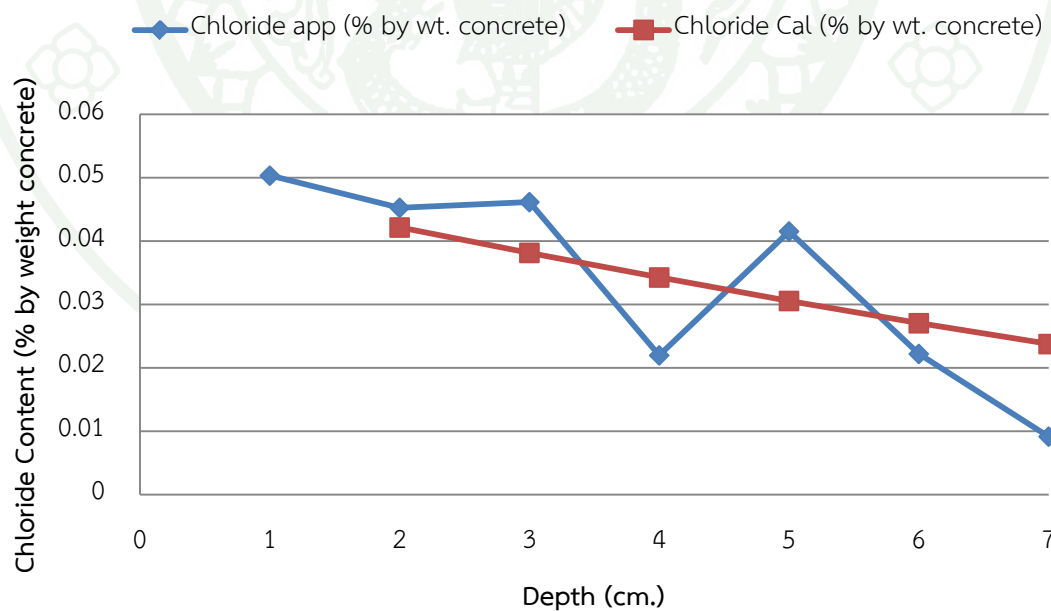


ภาพผนวกที่ ข14 ปริมาณคลอรีนตามความลึกของพื้นสะพาน R3

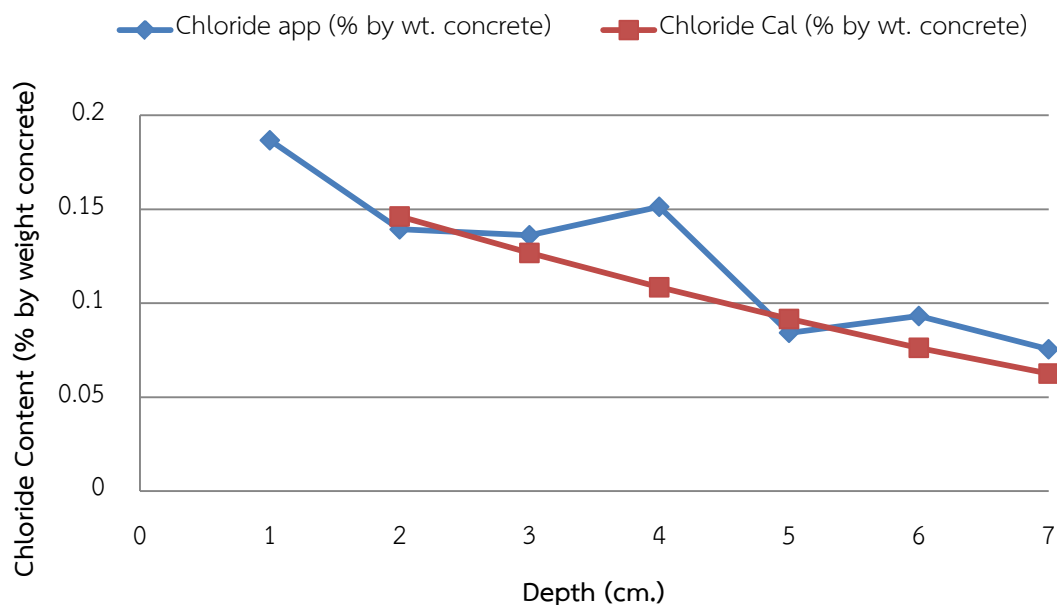




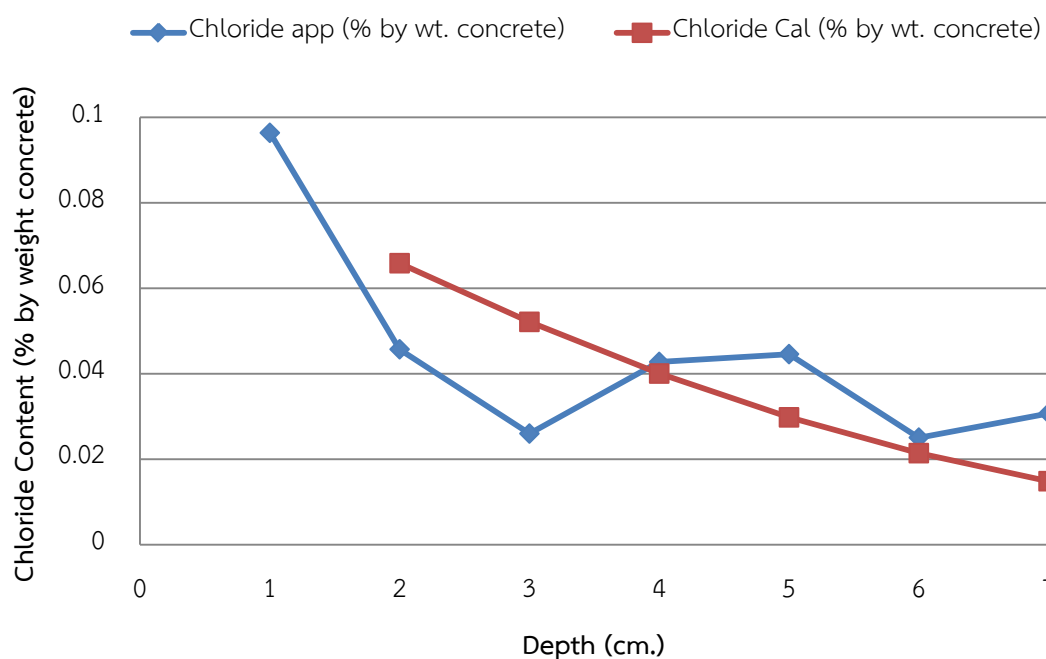
ภาพผนวกที่ ค1 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในคานคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 1 ของสะพาน S1



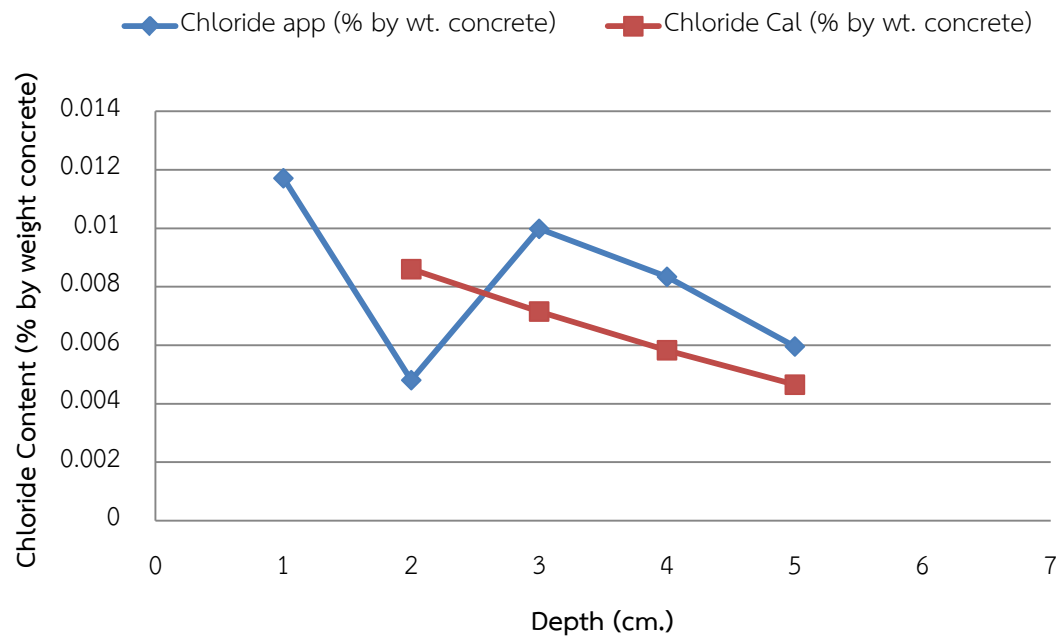
ภาพผนวกที่ ค2 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในคานคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 2 ของสะพาน S1



ภาพผนวกที่ ค3 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในคานคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 4 ของสะพาน S1

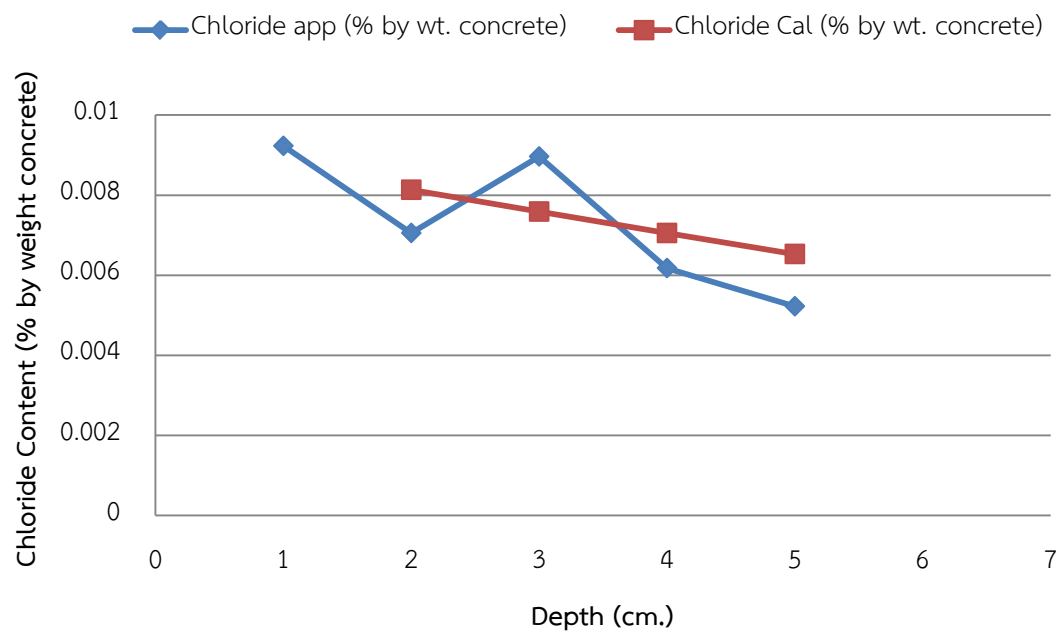


ภาพผนวกที่ ค4 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในเสาคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 1 ของสะพาน S1



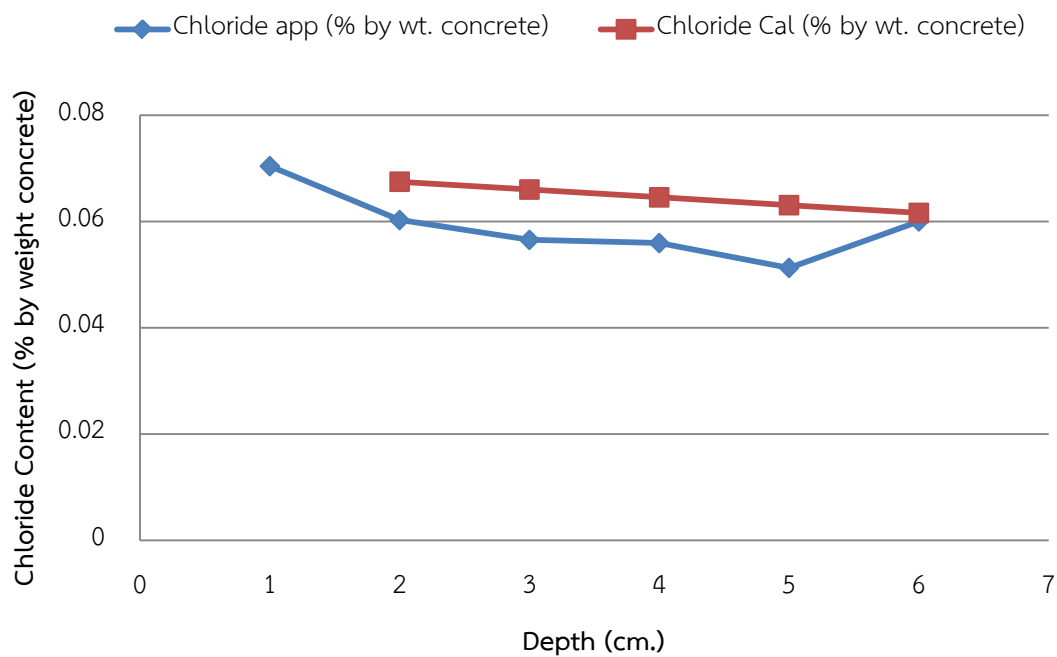
ภาพผนวกที่ ค5 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในพื้นที่คอนกรีตความเสียหายระดับที่ 1 ของสะพาน

S1

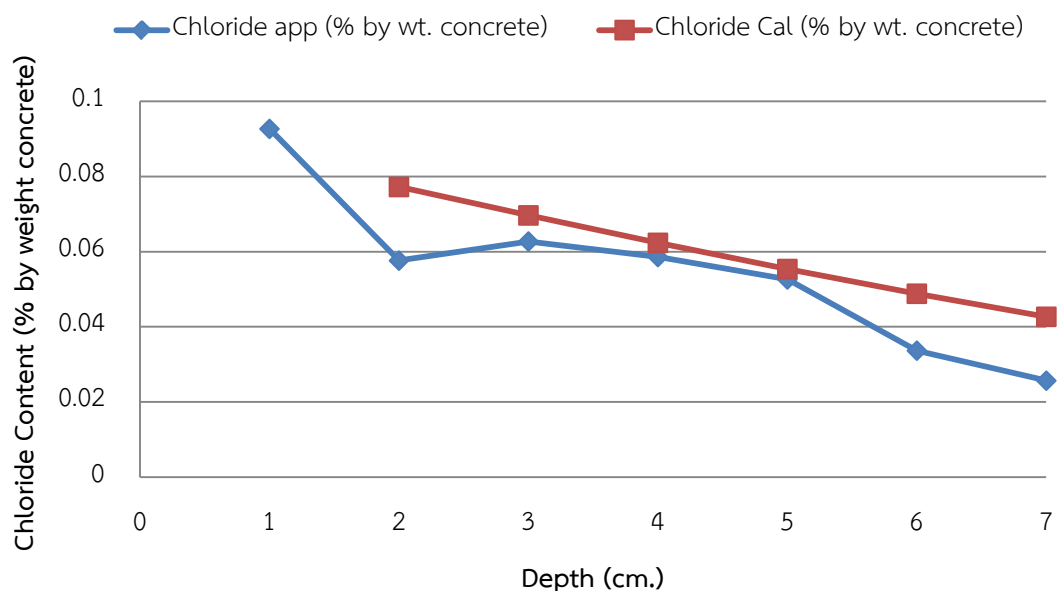


ภาพผนวกที่ ค6 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในพื้นที่คอนกรีตความเสียหายระดับที่ 3 ของสะพาน

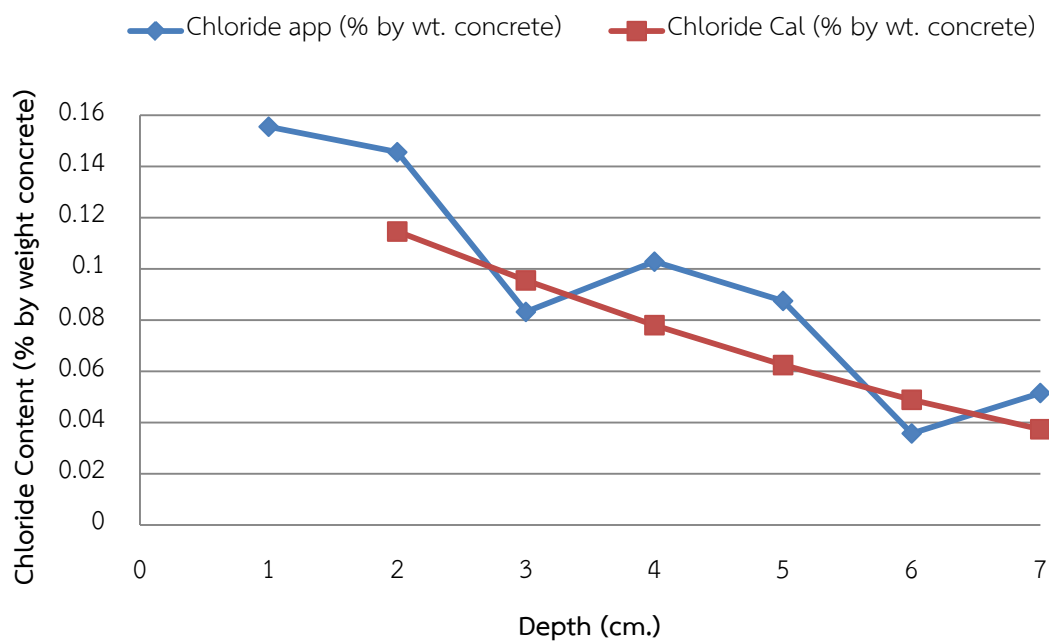
S1



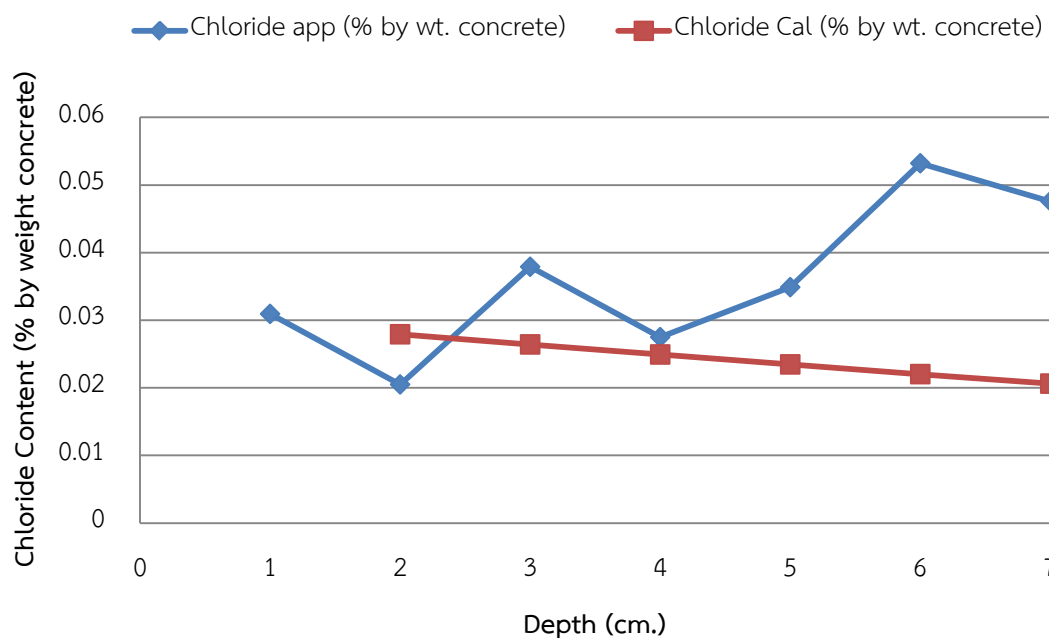
ภาพผนวกที่ ค7 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในคานคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 1 ของสะพาน S2



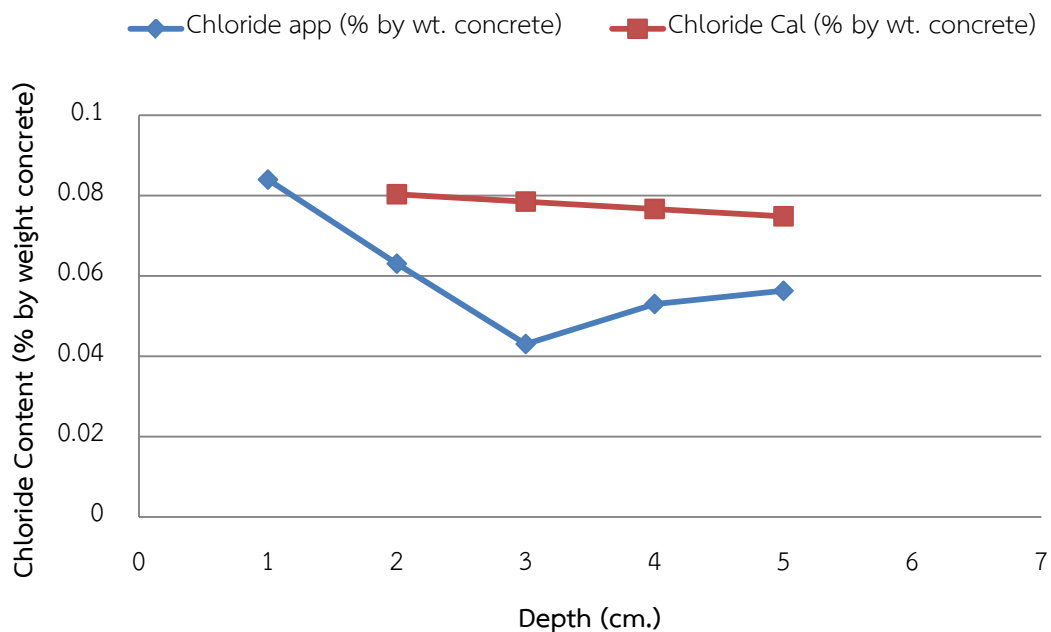
ภาพผนวกที่ ค8 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในคานคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 5 ของสะพาน S2



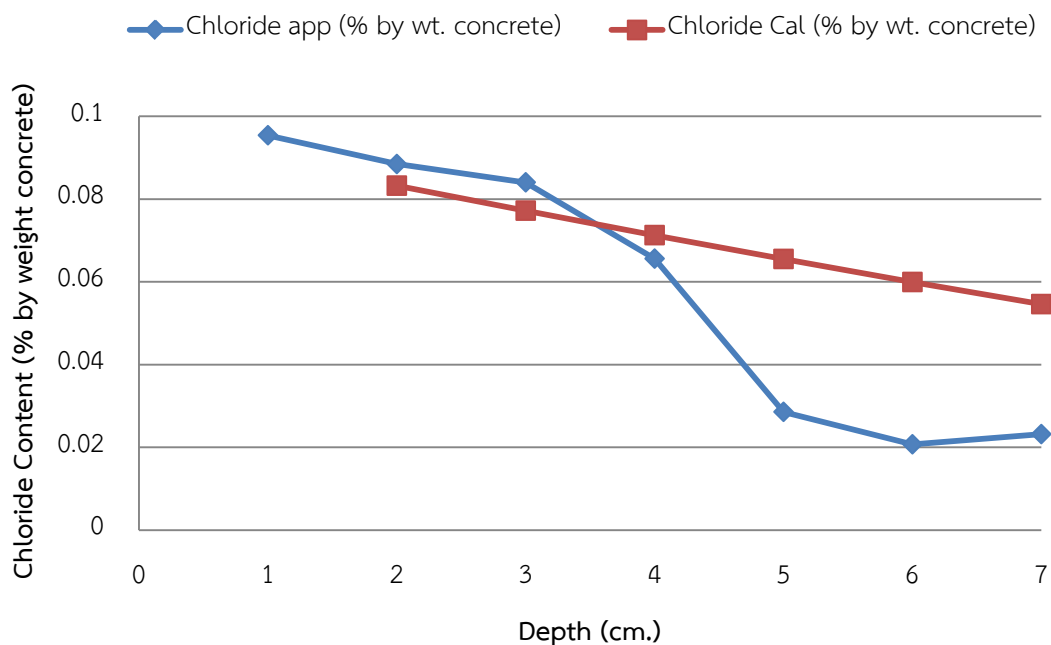
ภาพผนวกที่ ค9 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในเสาคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 1 ของสะพาน S2



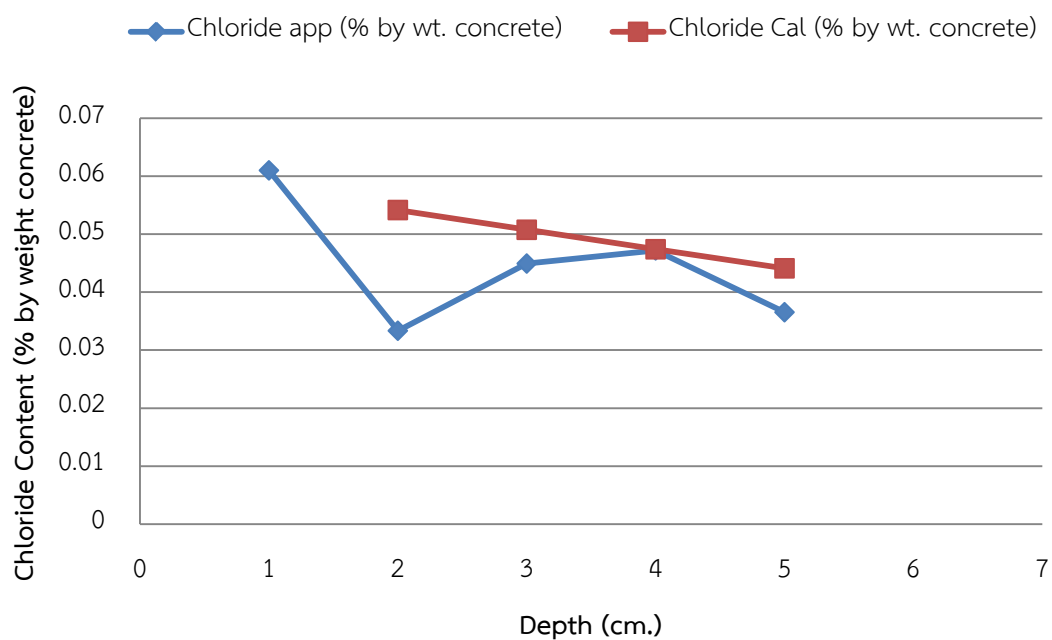
ภาพผนวกที่ ค10 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในเสาคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 2 ของสะพาน S2



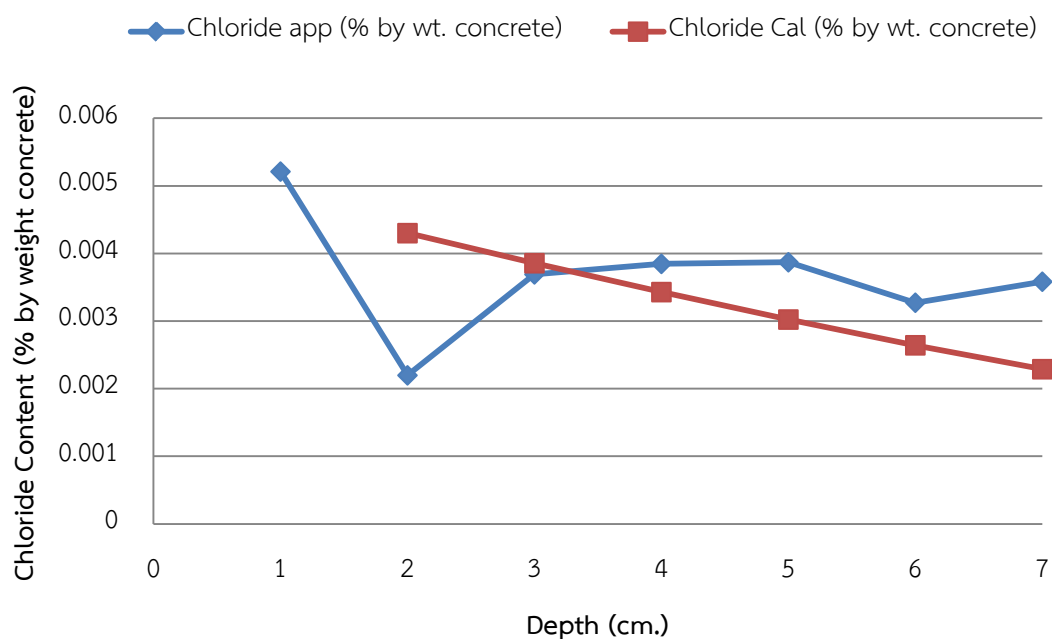
ภาพผนวกที่ ค11 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในพื้นที่คอนกรีตความเสียหายระดับที่ 1 ของสะพาน S2



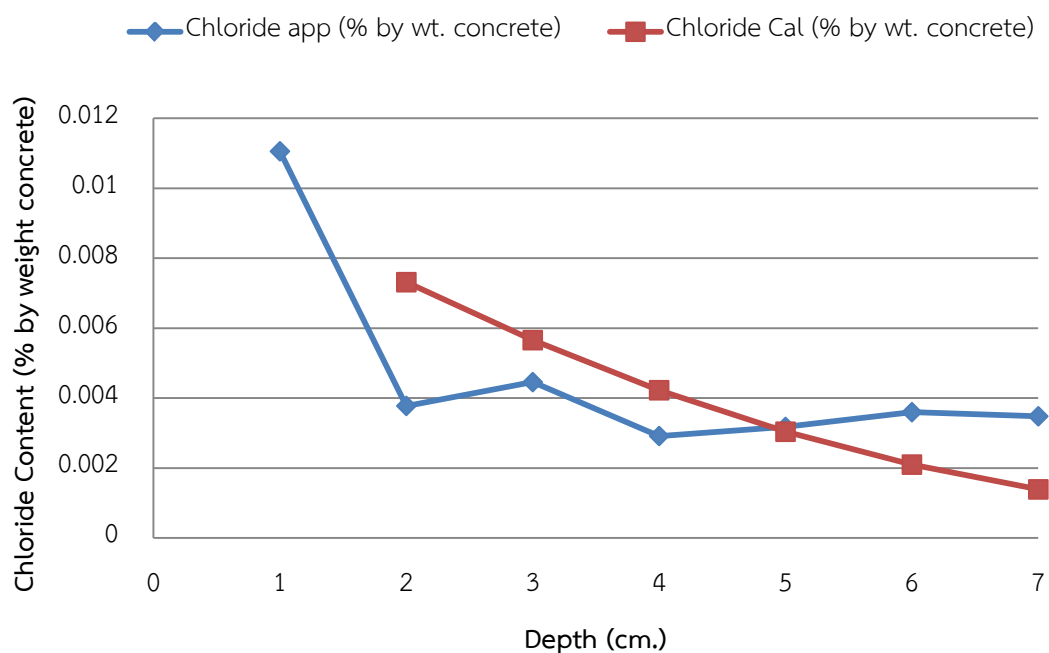
ภาพผนวกที่ ค12 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในพื้นที่คอนกรีตความเสียหายระดับที่ 2 ของสะพาน S2



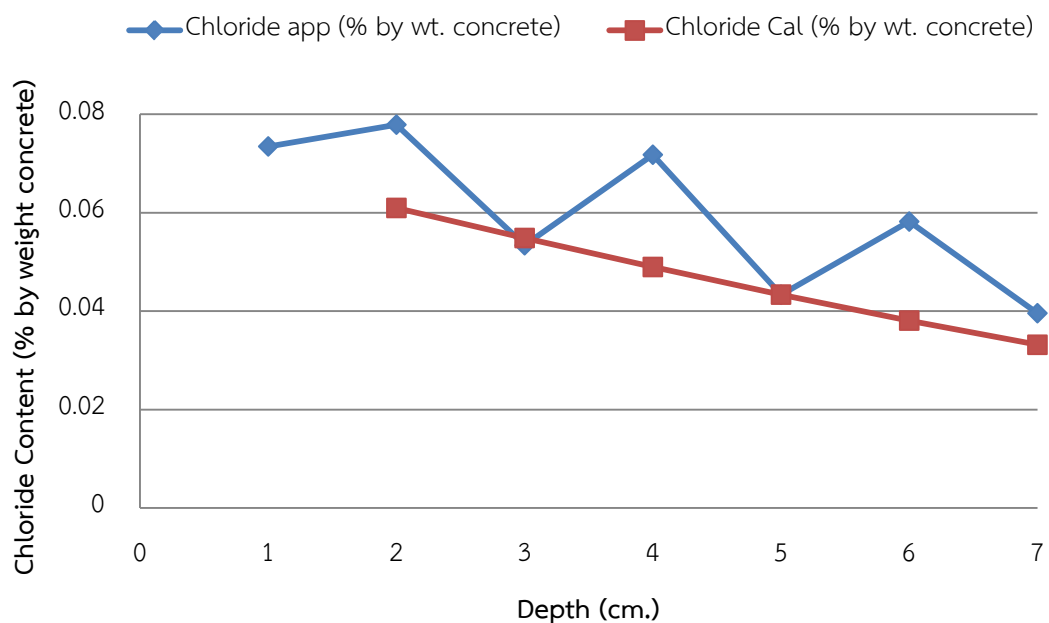
ภาพผนวกที่ ค13 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในพื้นที่คอนกรีตความเสียหายระดับที่ 5 ของสะพาน S2



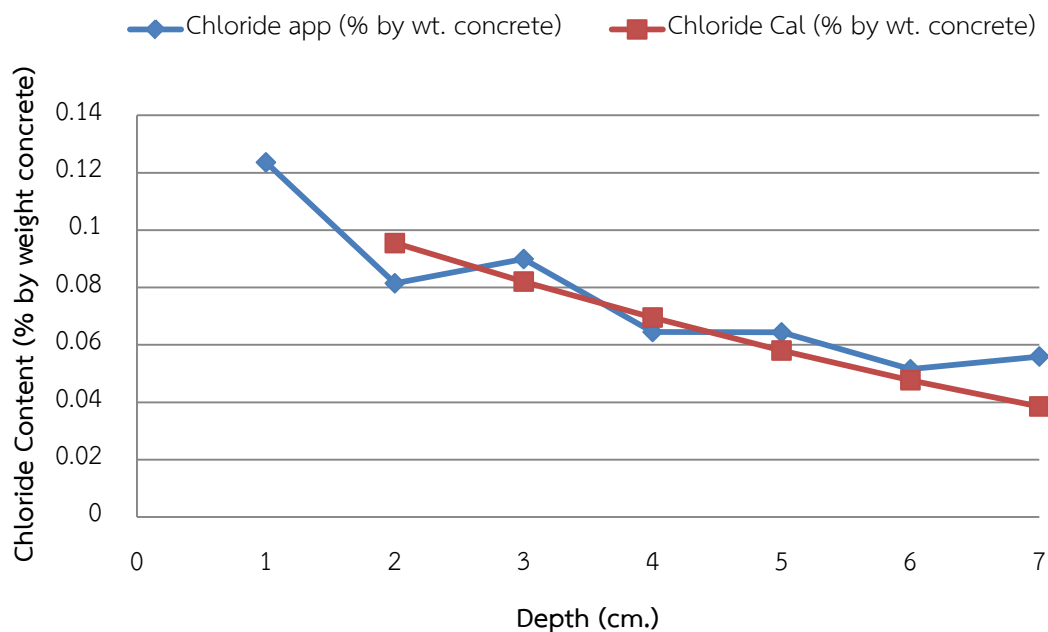
ภาพผนวกที่ ค14 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในคานคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 1 ของสะพาน R1



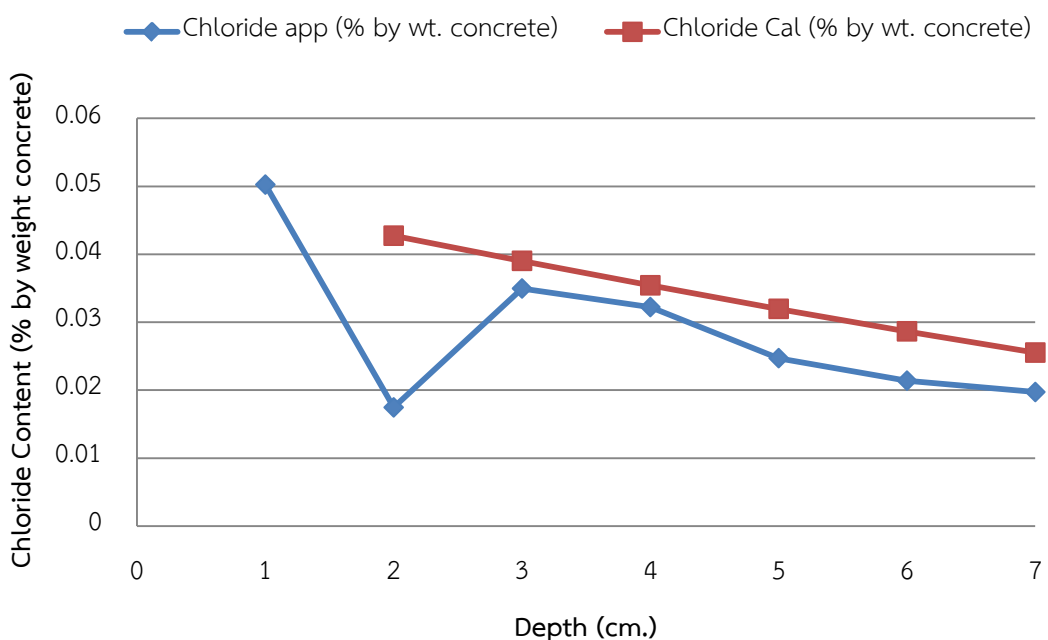
ภาพผนวกที่ ค15 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในเสาคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 1 ของสะพาน R1



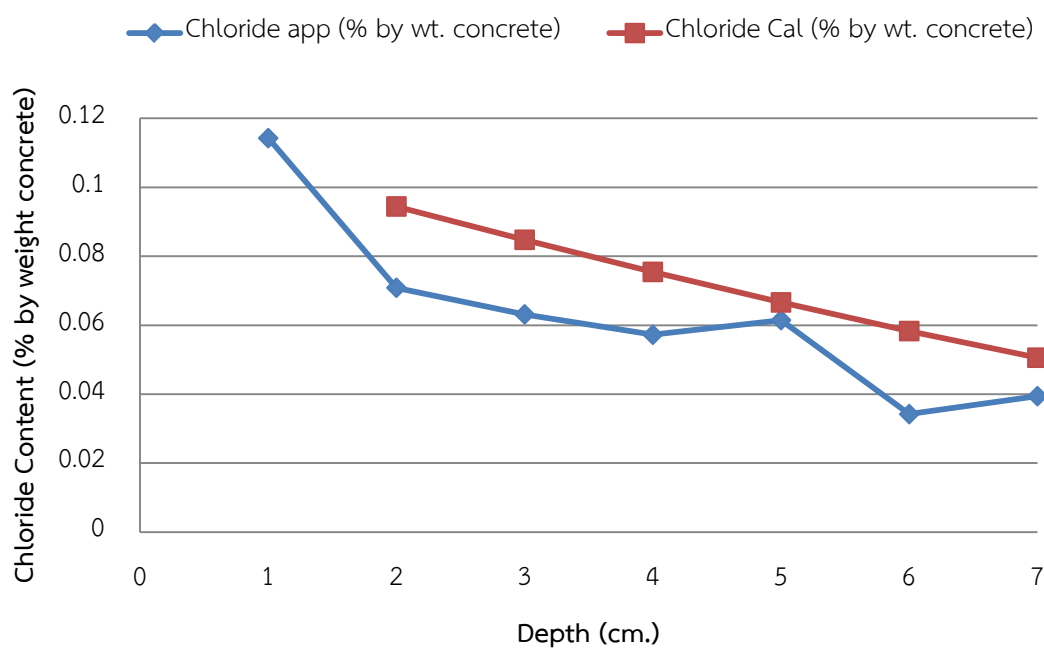
ภาพผนวกที่ ค16 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในเสาคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 2 ของสะพาน R1



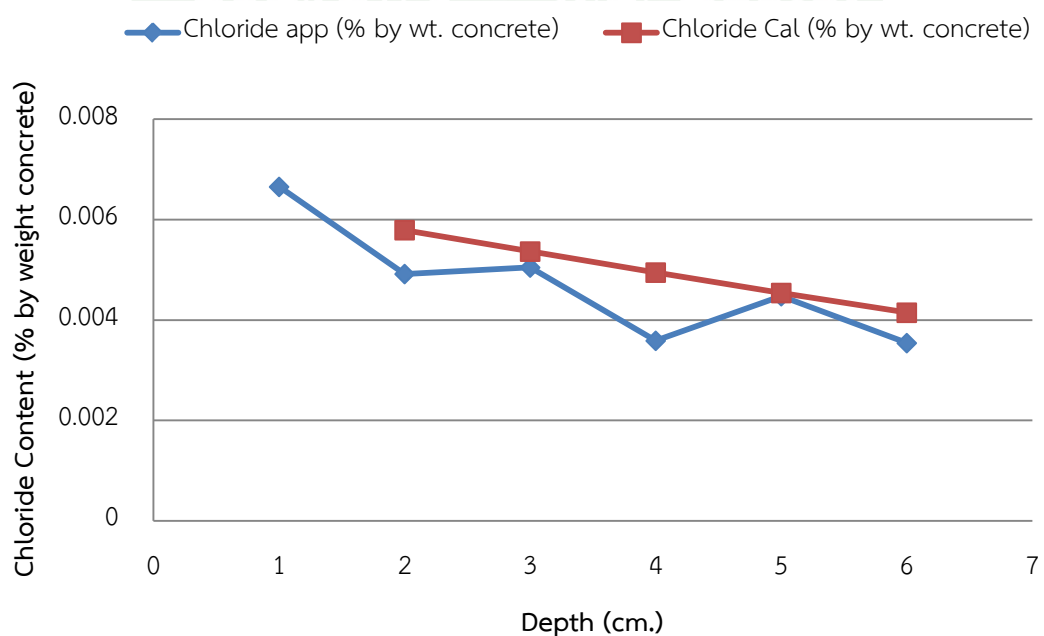
ภาพผนวกที่ ค17 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในเสาคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 3 ของสะพาน R1



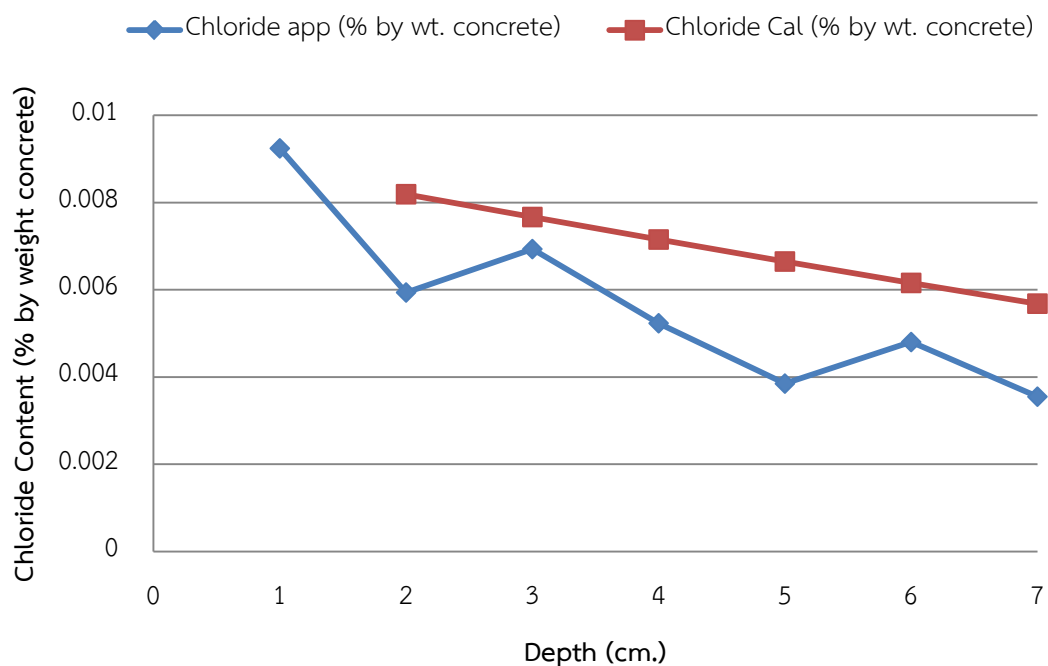
ภาพผนวกที่ ค18 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในเสาคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 4 ของสะพาน R1



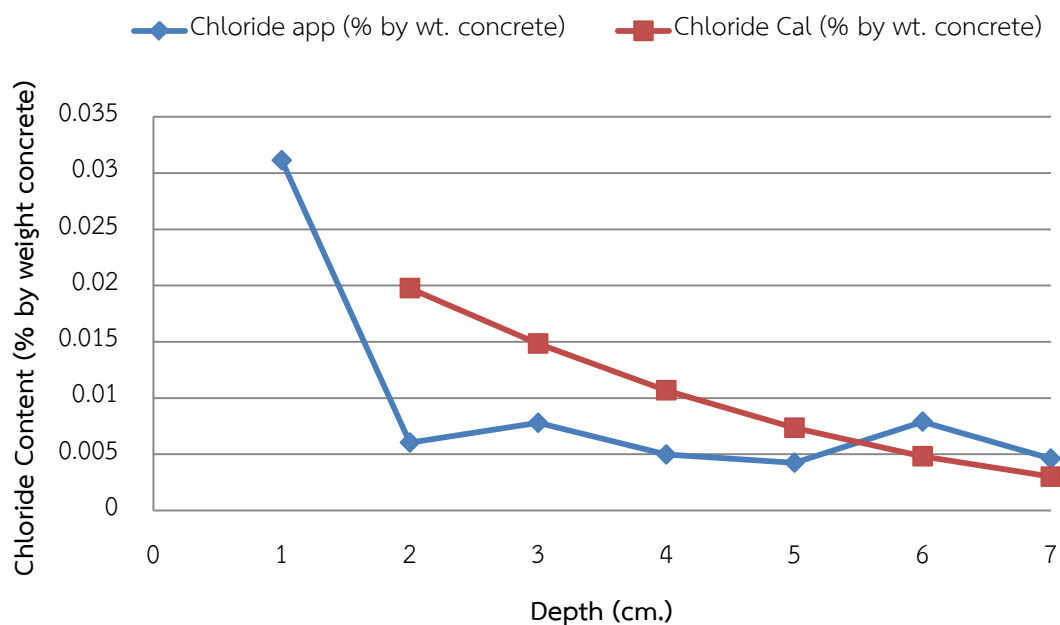
ภาพผนวกที่ ค19 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในเสาคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 5 ของสะพาน R1



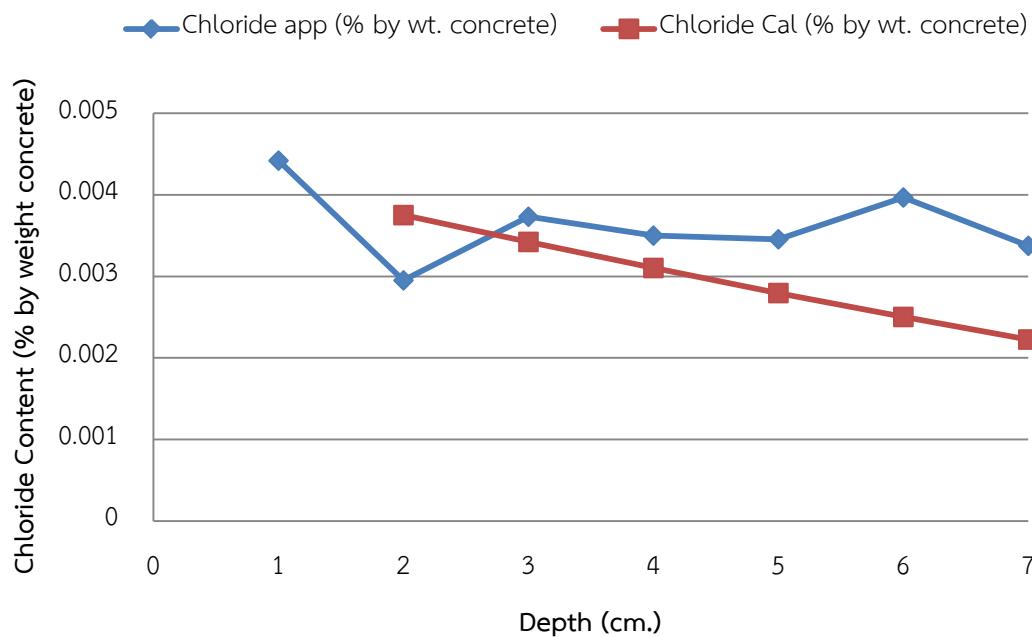
ภาพผนวกที่ ค20 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในพื้นที่คอนกรีตความเสียหายระดับที่ 1 ของสะพาน R1



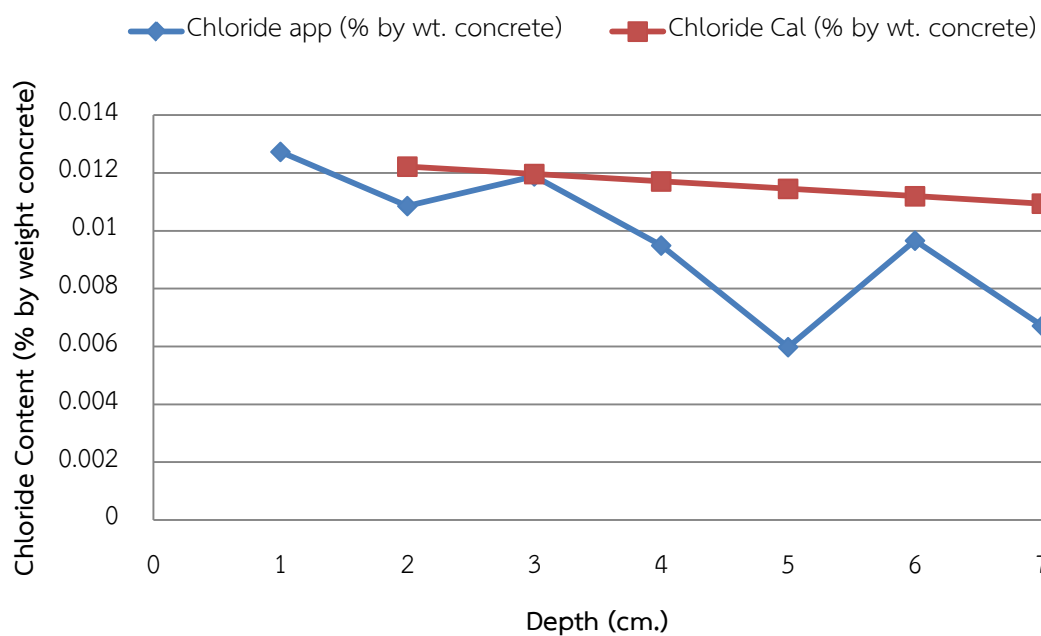
ภาพผนวกที่ ค21 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในคานคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 0 ของสะพาน R2



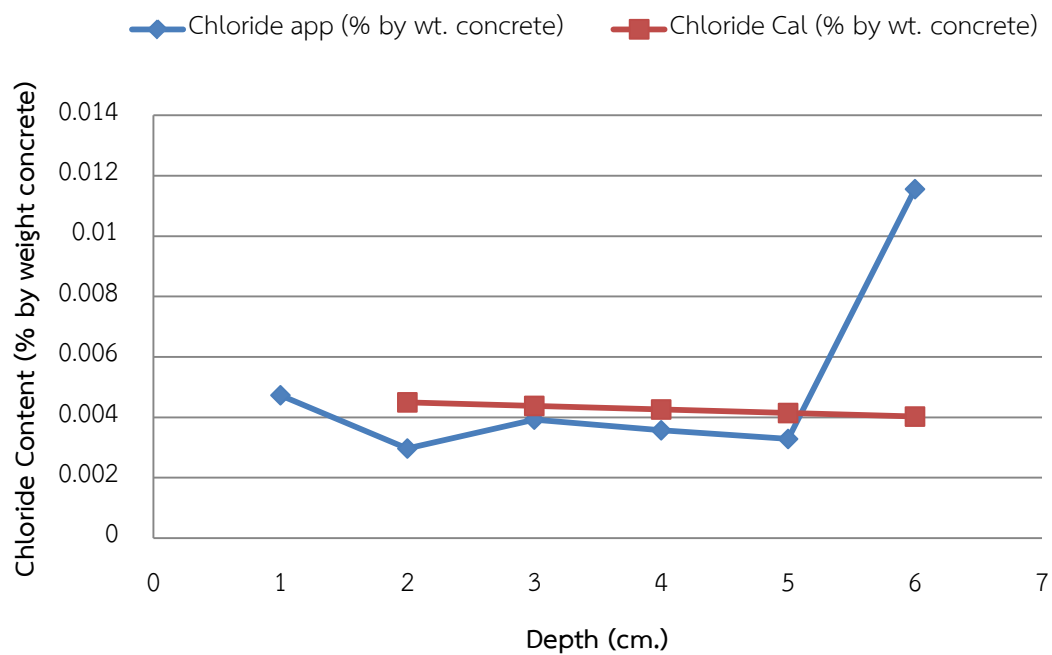
ภาพผนวกที่ ค22 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในเสาคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 0 ของสะพาน R2



ภาพผนวกที่ ค23 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในพื้นที่คอนกรีตความเสียหายระดับที่ 0 ของสะพาน R2



ภาพผนวกที่ ค24 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในคานคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 0 ของสะพาน R3



ภาพผนวกที่ ค25 เส้นแนวโน้มปริมาณคลอไรด์ในพื้นคอนกรีตความเสียหายระดับที่ 0 ของสะพาน R3

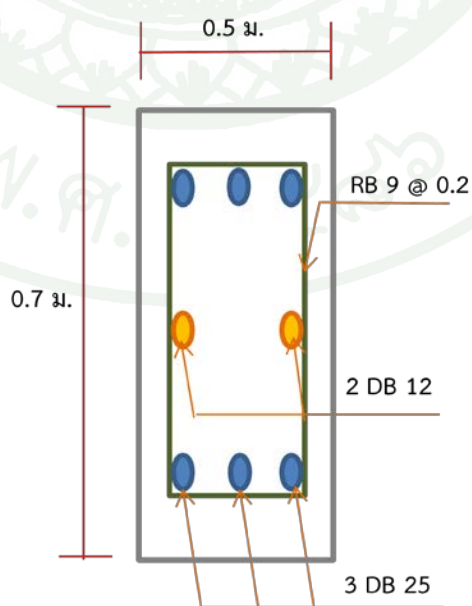


ตัวอย่างการคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานโดยใช้อัตราดอกเบี้ยร้อยละ 5.7

ถอดแบบสะพาน

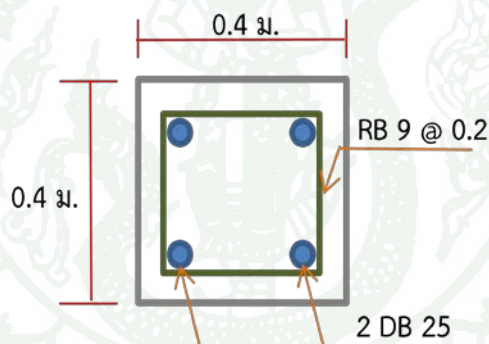
คาน

	กว้าง (ม.)	ลึก (ม.)	พื้นที่ (ตร.ม.)			
พื้นที่คอนกรีต	0.5	0.7	0.35			
	Ø (ม.ม.)	จำนวน (เส้น)	พื้นที่ (ตร.ม.)			
เหล็กเสริม	25	6	0.002945			
	12	2	0.000226			
	Ø (ม.ม.)	จำนวน (เส้น)	ระยะหุ้ม (ซ.ม.)	พื้นที่ (ตร.ม.)		
เหล็กปลอก	12	1	7	0.00024		
ต่อความยาวคาน 1 เมตร						
คอนกรีต	0.35	ลบ.ม.				
เหล็กเสริม	25	6	ม.			
	12	2	ม.			
เหล็กปลอก	9	11.04	ม.	spacing	20	ซ.ม.
ไม้แบบ	1.9	ตร.ม.				



เสา

	กว้าง (ม.)	ลึก (ม.)	พื้นที่ (ตร.ม.)	
พื้นที่คอนกรีต	0.4	0.4	0.16	
	Ø (ม.ม.)	จำนวน (เส้น)	พื้นที่ (ตร.ม.)	
เหล็กเสริม	25	4	0.001963	
	Ø (ม.ม.)	จำนวน (เส้น)	ระยะหุ้ม (ซ.ม.)	พื้นที่ (ตร.ม.)
เหล็กปลอก	9	1	7	0.000135
ปริมาตรต่อความสูงเสา 1 เมตร				
คอนกรีต	0.16	ลบ.ม.		
เหล็กเสริม	25	4	ม.	
เหล็กปลอก	9	6.24	ม.	spacing 20 ซม.
ไม้แบบ	1.6	ตร.ม.		

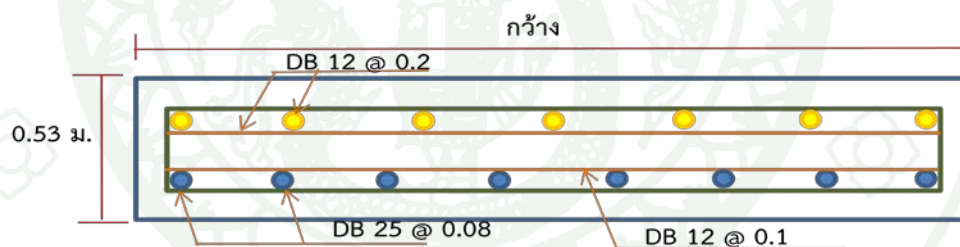


พื้น

	กว้าง (ม.)	ลึก (ม.)	พื้นที่ (ตร.ม.)
พื้นที่คอนกรีต	10	0.53	5.3
	Ø (ม.ม.)	จำนวน (เส้น)	พื้นที่ (ตร.ม.)
เหล็กเสริมตามขวาง	12	2	0.000226
เหล็กเสริมตามยาว	12	51	0.005768
	25	126	0.06185

ปริมาตรต่อความยาวพื้น 1 เมตร

คอนกรีต		5.3	ลบ.ม.			
เหล็กเสริมตามขวาง	12	60	ม.	spacing	20	ซ.ม. (บน)
	12	110	ม.	spacing	10	ซ.ม. (ล่าง)
เหล็กเสริมตามยาว	12	51	ม.			
	25	126	ม.			
ไม้แบบ		21.66	ตร.ม.			



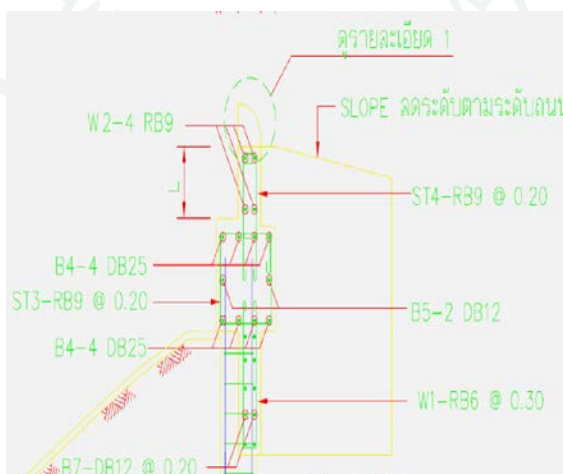
ผนังตบริม

	กว้าง (ม.)	ลึก (ม.)	พื้นที่ (ตร.ม.)
พื้นที่คอนกรีตผนัง	0.25	1.2	0.3
พื้นที่คอนกรีตคาน	0.7	0.7	0.49

	Ø (ม.ม.)	จำนวน (เส้น)	พื้นที่ (ตร.ม.)
เหล็กตั้งผนัง	9	1	6.36×10^{-5}
	6	1	2.83×10^{-5}
เหล็กนอนผนัง	9	4	0.000254
	12	10	0.001131
เหล็กเสริมคาน	25	8	0.003927
	12	2	0.000226
เหล็กปลอกคาน	9	1	6.36×10^{-5}

ปริมาตรต่อความยาวผนัง 1 เมตร

คอนกรีต	0.79	ลบ.ม.			
เหล็กตั้งผนัง	9	12.9	ม.	spacing	20 ซม.
	6	9.316667	ม.	spacing	30 ซม.
เหล็กนอนผนัง	9	4	ม.		
	12	10	ม.		
เหล็กเสริมคาน	25	8	ม.		
	12	2	ม.		
เหล็กปลอกคาน	9	14.4	ม.	spacing	20 ซม.
ไม้แบบ		4.95	ตร.ม.		



กำแพง (สูง 1.65 ม.)

	กว้าง (ม.)	ลึก (ม.)	พื้นที่ (ตร.ม.)
พื้นที่คอนกรีต	0.2	1.65	0.33
	Ø (ม.ม.)	จำนวน (เส้น)	พื้นที่ (ตร.ม.)
เหล็กนอน	12	24	0.002714
เหล็กปลอก	9	2	0.000127

spacing 15 ซม.

ปริมาตรต่อความยาวกำแพง

1 เมตร

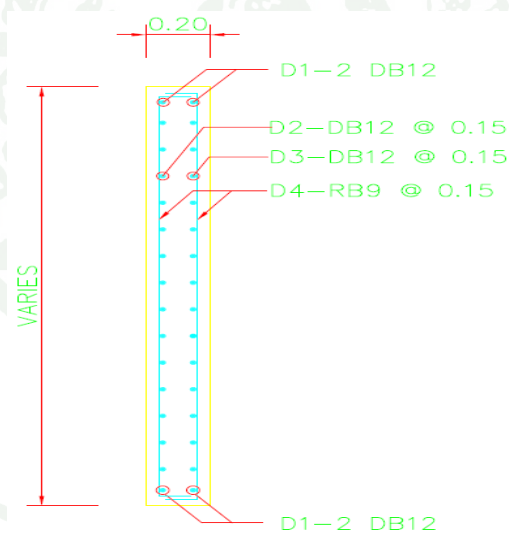
คอนกรีต 0.33 ลบ.ม.

เหล็กนอน 12 24 ม.

เหล็กปลอก 9 25.3 ม.

spacing 15 ซม.

ไม้แบบ 3.5 ตร.ม.



ตารางผนวกที่ ง1 ราคาวัสดุและค่าแรงในปีที่ก่อสร้างสะพาน

ประเภทวัสดุ	2530		2535		2545		2552	
	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง	ค่าวัสดุ	ค่าแรง
	(บาท)	(บาท)	(บาท)	(บาท)	(บาท)	(บาท)	(บาท)	(บาท)
คอนกรีต (ลบ.ม.)	855	110	1332	200	2080	264	2510	274
เข็ม 40x40 (ต้น)	13400	850	15395	1250	12660	1678	17740	1712
เหล็กเส้นกลม 6 ม.ม.								
(กก.)	13	1	11.93	1.2	14.33	2	19.56	2
เหล็กเส้นกลม 9 ม.ม.								
(กก.)	13	1	11.62	1.2	13.31	2	18.7	2
เหล็กข้ออ้อย 12 ม.ม.								
(กก.)	13	1	11.20	1.2	12.97	2.5	17.94	2.5
เหล็กข้ออ้อย 25 ม.ม.								
(กก.)	13	1	10.85	1.2	12.88	2.5	17.74	2.5
ไม้แบบ ไม้อัดแข็ง								
(ตร.ม.)	185	45	120	45	160	99	240	103
ลวดผูกเหล็ก (กก.)	18	-	16	-	30	-	35	-
ตะปู (กก.)	18	-	21	-	20.75	-	25.25	-

ตารางผนวกที่ ง2 ตัวอย่างการประมาณราคาก่อสร้างสะพาน S2 ในปี 2530

Item	Description	Q'ty	Unit	Material Cost		Labor Cost		Total Cost
				Unit Rate	Total	Unit Rate	Total	
คาน	คานยาว	6	ม.					
	งานคอนกรีต							
	คอนกรีตผสมเสร็จ	2.1	ลบ.ม.	1332.00	2797.20	200.00	420.00	3217.20
	งานเหล็กเสริมคอนกรีต							
	เหล็กข้ออ้อย 12 มม.	10.656	กก.	11.20	119.35	1.20	12.79	132.13
	เหล็กข้ออ้อย 25 มม.	138.708	กก.	10.85	1504.98	1.20	166.45	1671.43
	เหล็กเส้นกลม 9 มม.	33.05376	กก.	11.62	384.08	1.20	39.66	423.75
	งานไม้แบบ	11.4	ตร.ม.	120.00	1368.00	45.00	513.00	1881.00
	ลวดผูกเหล็ก	3.648355	กก.	16.00	58.37			
	ตะปู	2.85	กก.	21.00	59.85			
	รวมราคาคาน 1 ตัว				6291.84		1151.90	7443.74
	มีคานทั้งสิ้น	4	ตัว					29774.95

ตารางผนวกที่ ง2 (ต่อ)

Item	Description	Q'ty	Unit	Material Cost		Labor Cost		Total Cost
				Unit Rate	Total	Unit Rate	Total	
เสา	เสายาว	7	ม.					
	งานคอนกรีต							
	คอนกรีตผสมเสร็จ	1.12	ลบ.ม.	1332.00	1491.84	200.00	224.00	1715.84
	งานเหล็กเสริมคอนกรีต							
	เหล็กข้ออ้อย 25 มม.	107.884	กก.	10.85	1170.54	1.20	129.46	1300.00
	เหล็กเส้นกลม 9 มม.	21.79632	กก.	18.70	407.59	2.00	43.59	451.18
	งานไม้แบบ	11.2	ตร.ม.	120.00	1344.00	45.00	504.00	1848.00
	ลวดผูกเหล็ก	2.593606	กก.	16.00	41.50			
	ตะปู	2.8	กก.	21.00	58.80			
	รวมราคาเสา 1 ต้น				4514.27		901.05	5415.32
	มีเสาทั้งสิ้น	16	ต้น					86645.18

ตารางผนวกที่ ง2 (ต่อ)

Item	Description	Q'ty	Unit	Material Cost		Labor Cost		Total Cost
				Unit Rate	Total	Unit Rate	Total	
พื้น	พื้นยาว	6	ม.					
	งานคอนกรีต							
	คอนกรีตผสมเสร็จ	31.8	ลบ.ม.	1332.00	42357.60	200.00	6360.00	48717.60
	งานเหล็กเสริมคอนกรีต							
	เหล็กข้ออ้อย 12 มม.	1177.488	กก.	11.20	13187.87	1.20	1412.99	14600.85
	เหล็กข้ออ้อย 25 มม.	2912.868	กก.	10.85	31604.62	1.20	3495.44	35100.06
	งานไม้แบบ	129.96	ตร.ม.	120.00	15595.20	45.00	5848.20	21443.40
	ลวดผูกเหล็ก	81.80712	กก.	16.00	1308.91			
	ตะปู	32.49	กก.	21.00	682.29			
	รวมราคาพื้น 1 ตัว				104736.49		17116.63	121853.11
	มีพื้นที่ทั้งสิ้น	3	แผ่น					365559.34

ตารางผนวกที่ ง2 (ต่อ)

Item	Description	Q'ty	Unit	Material Cost		Labor Cost		Total Cost
				Unit Rate	Total	Unit Rate	Total	
ผนังทับริม	ผนังยาว	6	ม.					
	งานคอนกรีต							
	คอนกรีตผสมเสร็จ	4.74	ลบ.ม.	1332.00	6313.68	200.00	948.00	7261.68
	งานเหล็กเสริมคอนกรีต							
	เหล็กเส้นกลม 6 มม.	12.4098	กก.	11.93	148.05	1.2	14.89	162.94
	เหล็กเส้นกลม 9 มม.	93.7122	กก.	18.70	1752.42	2.00	187.42	1939.84
	เหล็กข้ออ้อย 12 มม.	63.936	กก.	11.20	716.08	1.20	76.72	792.81
	เหล็กข้ออ้อย 25 มม.	184.944	กก.	10.85	2006.64	1.20	221.93	2228.58
	งานไม้แบบ	29.7	ตร.ม.	120.00	3564.00	45.00	1336.50	4900.50
	ลวดผูกเหล็ก	7.10004	กก.	16.00	113.60			
	ตะปู	7.425	กก.	21.00	155.93			
	รวมราคาผนัง 1 ผนัง				14770.40		2785.47	17555.87
	มีผนังทั้งสิ้น	2	ผนัง					35111.74

ตารางผนวกที่ ง2 (ต่อ)

Item	Description	Q'ty	Unit	Material Cost		Labor Cost		Total Cost
				Unit Rate	Total	Unit Rate	Total	
กำแพง	กำแพงยาว	18	ม.					
	งานคอนกรีต							
	คอนกรีตผสมเสร็จ	5.94	ลบ.ม.	1332.00	7912.08	200.00	1188.00	9100.08
	งานเหล็กเสริมคอนกรีต							
	เหล็กเส้นกลม 9 มม.	227.2446	กก.	18.70	4249.47	2.00	454.49	4703.96
	เหล็กข้ออ้อย 12 มม.	383.616	กก.	11.20	4296.50	1.20	460.34	4756.84
	งานไม้แบบ	63	ตร.ม.	120.00	7560.00	45.00	2835.00	10395.00
	ลวดผูกเหล็ก	12.21721	กก.	16.00	195.48			
	ตะปู	15.75	กก.	21.00	330.75			
	รวมราคาผนัง 1 ผนัง				24544.28		4937.83	29482.11
	มีกำแพงทั้งสิ้น	2	ผนัง					58964.21
เสาเข็ม	จำนวนเสาเข็มทั้งหมด	16	ต้น					
	ราคาเสาเข็ม			15395.00	246320.00	1250.00	20000.00	266320.00

รวมค่าวัสดุและค่าแรงของโครงสร้าง S2 ทั้งหมดเป็นเงินทั้งสิ้น 842,375.43 บาท

ตารางผนวกที่ ง3 สรุปราคาค่าก่อสร้างสะพานทั้ง 5 แห่ง

สะพาน	ปีที่ก่อสร้าง	ราคาค่าก่อสร้าง (บาท)
Samut Sakorn (S1)	2530	1,182,939.00
Samut Sakorn (S2)	2535	842,375.00
Rayong (R1)	2545	1,625,890.00
Rayong (R2)	2552	926,218.76
Rayong (R3)	2552	654,478.03

ตารางภาคผนวกที่ ง4 ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม

แนวทางการซ่อมแซม	วัสดุซ่อมแซม	ราคาค่าซ่อมแซม
ฉีดอัดรอยร้าว	อีพ็อกซี	750 บาท/เมตร
เคลือบผิวคอนกรีต	โพลียูรีเทน	750 บาท/ตร.ม.
ปล่อยกระแสไฟฟ้า	เครื่องปล่อยกระแสไฟฟ้า	35,000 บาท
โลหะทดแทน	สังกะสี	1,500 บาท/ชิ้น
ลดปริมาณคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าเคมี	เครื่องปล่อยกระแสไฟฟ้า	5,800 บาท/ตร.ม.
แทนที่ด้วยซีเมนต์ผสมเถ้าลอย	เถ้าลอย	550 บาท/ตัน

ตัวอย่างการคำนวณค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของสะพาน S1 จากการทำนายอายุโครงสร้าง
ด้วยกฎข้อที่สองของพีคร่วมกับสมการของ JCI

วิธีสร้างโครงสร้างใหม่ (ไม่มีการซ่อมแซม)

กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0	A	
Cc	0	1,182,939.00	67,692.40	
Cd	0	35,488.17	2,030.77	
Cqa	0	151,179.60	8,651.09	
Cin	0-100		7,154.00	
Csf	0	2,517,057.60	144,035.88	
Cm	สร้างใหม่	60	1,182,939.00	67,692.40
	ออกแบบ	60	35,488.17	2,030.77
	ประกัน	60	151,179.60	8,651.09
	ตรวจ	60		7,154.00
	แตกก่อน	60	2,517,057.60	144,035.88
รวม			459,128.29	

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 1 : ฉีดอัดรอยร้าว

	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 0.6 ยาว 120	ฉีดอัดรอยร้าว	24	643,860.00	152,349.76	8,718.05
รวมยาว	858.48	28	643,860.00	152,349.76	8,718.05
		32	643,860.00	152,349.76	8,718.05
		36	643,860.00	152,349.76	8,718.05
		40	643,860.00	152,349.76	8,718.05
		44	643,860.00	152,349.76	8,718.05
		48	643,860.00	152,349.76	8,718.05
		52	643,860.00	152,349.76	8,718.05

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 1 : ไม้ดัดรอยร้าว (ต่อ)

Cm	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 0.6 ยาว 120	ไม้ดัดรอยร้าว	56	643,860.00	152,349.76	8,718.05
รวมยาว	858.48	60	643,860.00	152,349.76	8,718.05
		64	643,860.00	152,349.76	8,718.05
		68	643,860.00	152,349.76	8,718.05
		72	643,860.00	152,349.76	8,718.05
		76	643,860.00	152,349.76	8,718.05
		80	643,860.00	152,349.76	8,718.05
		84	643,860.00	152,349.76	8,718.05
		88	643,860.00	152,349.76	8,718.05
		92	643,860.00	152,349.76	8,718.05
		96	643,860.00	152,349.76	8,718.05
				รวม	395,207.08

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 1 : เคลือบผิวคอนกรีต

กิจกรรม		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A	
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40	
Cd		0	35,488.17		2,030.77	
Cqa		0	151,179.60		8,651.09	
Cin		0-100			7,154.00	
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88	
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A	
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 15x20 ซม.		เคลือบผิว	24	16,096.50	3,808.74	217.95
รวมล่อน		21.462	34	16,096.50	3,808.74	217.95
			44	16,096.50	3,808.74	217.95
			54	16,096.50	3,808.74	217.95
			64	16,096.50	3,808.74	217.95
			74	16,096.50	3,808.74	217.95
			84	16,096.50	3,808.74	217.95

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 1 : เคลือบผิวคอนกรีต (ต่อ)

Cm	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 15x20 ซม.	เคลือบผิว	94	16,096.50	3,808.74	217.95
				รวม	231,307.75

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 1 : การยับยั้งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า

	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
impressed current		24	360,000.00	85,182.98	4,874.50
		49	360,000.00	85,182.98	4,874.50
		74	360,000.00	85,182.98	4,874.50

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 1 : ยับยั้งคอนกรีตด้วยกระแสไฟฟ้า (ต่อ)

Cm	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
impressed current		99	360,001.00	85,183.22	4,874.52
				รวม	249,062.17

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 1 : ฉีดอัดรอยร้าวและเคลือบผิวคอนกรีต

	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 0.8 ยาว 150	ฉีดอัดรอยร้าว	24	643,860.00	152,349.76	8,718.05
รวมยาว	858.48	38	643,860.00	152,349.76	8,718.05
		52	643,860.00	152,349.76	8,718.05

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 1 : ไม้ดัดรอยร้าวและเคลือบผิวคอนกรีต (ต่อ)

Cm	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 0.8 ยาว 150	ไม้ดัดรอยร้าว	66	643,860.00	152,349.76	8,718.05
รวมยาว	858.48	80	643,860.00	152,349.76	8,718.05
		94	643,860.00	152,349.76	8,718.05
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 20x45 ซม.	เคลือบผิว	24	16,096.50	3,808.74	217.95
รวมล่อน	21.462	38	16,096.50	3,808.74	217.95
		52	16,096.50	3,808.74	217.95
		66	16,096.50	3,808.74	217.95
		80	16,096.50	3,808.74	217.95
		94	16,096.50	3,808.74	217.95
				รวม	283,180.15

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 1 : ฉีดยาต้านเชื้อราและถ่ายประจุไฟฟ้า

กิจกรรม		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 0.8 ยาว 150	ฉีดยาต้านเชื้อรา	24	643,860.00	152,349.76	8,718.05
รวมยาว	1073.1	53	643,860.00	152,349.76	8,718.05
		82	643,860.00	152,349.76	8,718.05
impressed current		24	360,000.00	85,182.98	4,874.50
		53	360,000.00	85,182.98	4,874.50
		82	360,000.00	85,182.98	4,874.50
รวม					270,341.80

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 1 : เคลือบผิวคอนกรีตและถ่ายประจุไฟฟ้า

กิจกรรม		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 20x45 ซม.	เคลือบผิว	24	16,096.50	3,808.74	217.95
รวมล่อน	64.386	59	16,096.50	3,808.74	217.95
		94	16,096.50	3,808.74	217.95
impressed current		24	360,000.00	85,182.98	4,874.50
		59	360,000.00	85,182.98	4,874.50
		94	360,000.00	85,182.98	4,874.50
รวม					244,841.51

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 1 : ฉีดยาทราย, เคลือบผิวคอนกรีตและถ่ายประจุไฟฟ้า

กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A	
Cc	0	1,182,939.00		67,692.40	
Cd	0	35,488.17		2,030.77	
Cqa	0	151,179.60		8,651.09	
Cin	0-100			7,154.00	
Csf	0	2,517,057.60		144,035.88	
Cm	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A	
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 0.8 ยาว 150	ฉีดอัดทรายร้าว	24	643,860.00	152,349.76	8,718.05
รวมยาว	1073.1	63	643,860.00	152,349.76	8,718.05
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 20x45 ซม.	เคลือบผิว	24	16,096.50	3,808.74	217.95
รวมล่อน	64.386	63	16,096.50	3,808.74	217.95
impressed current		24	360000	85,182.98	4,874.50
		63	360000	85,182.98	4,874.50
				รวม	257,185.15

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 2 : ฉีดอัดรอยร้าว

	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 0.8 ยาว 150	ฉีดอัดรอยร้าว	29	804,825.00	950,443.75	10,897.56
รวมยาว	1073.1	33	804,825.00	1,186,386.97	10,897.56
		37	804,825.00	1,480,902.00	10,897.56
		41	804,825.00	1,848,529.00	10,897.56
		45	804,825.00	2,307,417.69	10,897.56
		49	804,825.00	2,880,223.35	10,897.56
		53	804,825.00	3,595,225.34	10,897.56
		57	804,825.00	4,487,723.23	10,897.56

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 2 : ฉีดย้ำรอยร้าว (ต่อ)

Cm	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 0.8 ยาว 150	ฉีดย้ำรอยร้าว	61	804,825.00	5,601,779.55	10,897.56
รวมยาว	1073.1	65	804,825.00	6,992,395.16	10,897.56
		69	804,825.00	8,728,224.58	10,897.56
		73	804,825.00	10,894,965.56	10,897.56
		77	804,825.00	13,599,589.86	10,897.56
		81	804,825.00	16,975,624.50	10,897.56
		85	804,825.00	21,189,743.98	10,897.56
		89	804,825.00	26,449,998.92	10,897.56
		93	804,825.00	33,016,087.58	10,897.56
		97	804,825.00	41,212,177.07	10,897.56
				รวม	425,720.25

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 2 : เคลือบผิวคอนกรีต

กิจกรรม		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)		มูลค่าในปีที่ 0
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 20x45 ซม.		เคลือบผิว	29	48,289.50	57,026.63
รวมล่อน		64.386	39	48,289.50	99,272.18
			49	48,289.50	172,813.40
			59	48,289.50	300,834.26
			69	48,289.50	523,693.48
			79	48,289.50	911,647.69
			89	48,289.50	1,586,999.94

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 2 : เคลือบผิวคอนกรีต (ต่อ)

Cm	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 20x45 ซม.	เคลือบผิว	99	48,289.50	2,762,655.82	653.85
				รวม	234,794.97

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 2 : การยับยั้งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า

	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
impressed current		29	360,000.00	425,135.59	4,874.50
		54	360,000.00	1,699,816.91	4,874.50

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 2 : การยับยั้งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า (ต่อ)

Cm	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
impressed current		79	360,000.00	6,796,367.09	4,874.50
				รวม	244,187.65

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 2 : ฉีดยาต้านสนิมและเคลือบผิวคอนกรีต

	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 0.8 ยาว 150	ฉีดอัดรอยร้าว	29	804,825.00	950,443.75	10,897.56
รวมยาว	1073.1	43	804,825.00	2,065,267.17	10,897.56
		57	804,825.00	4,487,723.23	10,897.56

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 2 : ฉีดยัตรอยร้าวและเคลือบผิวคอนกรีต (ต่อ)

Cm	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 0.8 ยาว 150	ฉีดอัดรอยร้าว	71	804,825.00	9,751,600.19	10,897.56
		85	804,825.00	21,189,743.98	10,897.56
		99	804,825.00	46,044,263.62	10,897.56
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 20x45 ซม.	เคลือบผิว	29	48,289.50	57,026.63	653.85
รวมล่อน	64.386	43	48,289.50	123,916.03	653.85
		57	48,289.50	269,263.39	653.85
		71	48,289.50	585,096.01	653.85
		85	48,289.50	1,271,384.64	653.85
		99	48,289.50	2,762,655.82	653.85
				รวม	298,872.64

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 2 : ฉีดยาตรอยร้าวและถ่ายประจุไฟฟ้า

กิจกรรม		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 0.8 ยาว 150	ฉีดยาตรอยร้าว	29	804,825.00	950,443.75	10,897.56
รวมยาว	1073.1	58	804,825.00	4,743,523.45	10,897.56
		87	804,825.00	23,674,220.27	10,897.56
impressed current		29	360,000.00	425,135.59	4,874.50
		58	360,000.00	2,121,788.52	4,874.50
		87	360,000.00	10,589,531.01	4,874.50
รวม					276,880.34

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 2 : เคลือบผิวคอนกรีตและถ่ายประจุไฟฟ้า

กิจกรรม		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 20x45 ซม.	เคลือบผิว	29	48,289.50	45,685.43	523.82
รวมก่อน	64.386	64	48,289.50	396,919.31	653.85
		99	48,289.50	2,762,655.82	653.85
impressed current		29	360,000.00	340,586.57	3,905.08
		64	360,000.00	2,959,048.06	4,874.50
		99	360,000.00	20,595,700.81	4,874.50
รวม					245,049.76

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 2 : เคลือบผิวคอนกรีตและถ่ายประจุไฟฟ้า

กิจกรรม		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาต่อช่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 0.8 ยาว 150	ฉีดพ่นรอยร้าว	29	804,825.00	761,423.84	8,730.30
รวมยาว	1073.1	68	804,825.00	8,257,544.55	10,897.56
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 20x45 ซม.	เคลือบผิว	29	48,289.50	45,685.43	523.82
รวมล่อน	64.386	68	48,289.50	495,452.67	653.85
impressed current		29	360000	340,586.57	3,905.08
		68	360000	3,693,617.91	4,874.50
รวม					259,149.27

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 3 : ฉีดอัดรอยร้าว

กิจกรรม		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 1.4 ยาว 300	ฉีดอัดรอยร้าว	38	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
รวมยาว	2146.2	42	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
		46	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
		50	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
		54	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
		58	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
		62	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
		66	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 3 : ฉีดยัดรอยร้าว (ต่อ)

Cm	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 1.4 ยาว 300	ฉีดอัดรอยร้าว	70	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
		74	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
		78	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
		82	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
		86	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
		90	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
		94	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
		98	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
รวม				578,286.12	

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 3 : เคลือบผิวคอนกรีต

กิจกรรม		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A	
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40	
Cd		0	35,488.17		2,030.77	
Cqa		0	151,179.60		8,651.09	
Cin		0-100			7,154.00	
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88	
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A	
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 30x70 ซม.		เคลือบผิว	38	112,675.50	26,661.21	1,525.66
รวมล่อน		150.234	48	112,675.50	26,661.21	1,525.66
			58	112,675.50	26,661.21	1,525.66
			68	112,675.50	26,661.21	1,525.66
			78	112,675.50	26,661.21	1,525.66
			88	112,675.50	26,661.21	1,525.66
			98	112,675.50	26,661.21	1,525.66
รวม					240,243.75	

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 3 : การยับยั้งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า

กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc	0	1,182,939.00		67,692.40
Cd	0	35,488.17		2,030.77
Cqa	0	151,179.60		8,651.09
Cin	0-100			7,154.00
Csf	0	2,517,057.60		144,035.88
Cm	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
impressed current	38	360,000.00	85,182.98	4,874.50
	63	360,000.00	85,182.98	4,874.50
	88	360,000.00	85,182.98	4,874.50
รวม				244,187.65

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 3 : ฉีดอัดรอยร้าวและลดปริมาณคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าเคมี

กิจกรรม		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 1.4 ยาว 300	ฉีดอัดรอยร้าว	38	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
รวมยาว	2146.2	77	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
	ECR	38	4,149,320.00	981,809.57	56,182.98
		77	4,149,320.00	981,809.57	56,182.98
รวม					385,520.36

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 3 : ฉีดยัตรอยร้าวและเคลือบผิวคอนกรีต

กิจกรรม		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 1.4 ยาว 300	ฉีดยัตรอยร้าว	38	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
รวมยาว	2146.2	52	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
		66	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
		80	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
		94	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 30x70 ซม.	เคลือบผิว	38	112,675.50	26,661.21	1,525.66
รวมล่อน	150.234	52	112,675.50	26,661.21	1,525.66
		66	112,675.50	26,661.21	1,525.66

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 3 : ฉีดอัดรอยร้าวและเคลือบผิวคอนกรีต (ต่อ)

Cm	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 30x70 ซม.	เคลือบผิว	80	112,675.50	26,661.21	1,525.66
		94	112,675.50	26,661.21	1,525.66
				รวม	346,168.05

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 3 : ฉีดอัดรอยร้าวและการยับยั้งสนิมด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้า

	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 1.4 ยาว 300	ฉีดพ่นรอยร้าว	38	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
รวมยาว	2146.2	67	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 3 : ฉีดยาต้านการกัดกร่อนและการยับยั้งสนิมด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้า (ต่อ)

Cm	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 1.4 ยาว 300	ฉีดพ่นรอยร้าว	96	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
impressed current		38	360,000.00	85,182.98	4,874.50
		67	360,000.00	85,182.98	4,874.50
		96	360,000.00	85,182.98	4,874.50
				รวม	309,573.02

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 3 : เคลือบผิวคอนกรีตและการยับยั้งสนิมด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้า

	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0	A
Cc		0	1,182,939.00	67,692.40
Cd		0	35,488.17	2,030.77
Cqa		0	151,179.60	8,651.09
Cin		0-100		7,154.00
Csf		0	2,517,057.60	144,035.88

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 3 : เคลือบผิวคอนกรีตและการยับยั้งสนิมด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้า (ต่อ)

Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 30x70 ซม.	เคลือบผิว	38	112,675.50	26,661.21	1,525.66
รวมล่อน	150.234	73	112,675.50	26,661.21	1,525.66
impressed current		38	360,000.00	85,182.98	4,874.50
		73	360,000.00	85,182.98	4,874.50
				รวม	242,364.47

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 3 : ฉีดอัดรอยร้าว, เคลือบผิวคอนกรีตและการยับยั้งสนิมด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้า

	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0	A
Cc		0	1,182,939.00	67,692.40
Cd		0	35,488.17	2,030.77
Cqa		0	151,179.60	8,651.09
Cin		0-100		7,154.00
Csf		0	2,517,057.60	144,035.88

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 3 : ฉีดยาทราย, เคลือบผิวคอนกรีตและการยับยั้งสนิมด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้า (ต่อ)

Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 1.4 ยาว 300	ฉีดพ่นรอยร้าว	38	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
	2146.2	77	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 30x70 ซม.	เคลือบผิว	38	112,675.50	26,661.21	1,525.66
	150.234	77	112,675.50	26,661.21	1,525.66
impressed current		38	360,000.00	85,182.98	4,874.50
		77	360,001.00	85,183.22	4,874.52
				รวม	285,954.73

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 3 : ฉีดยาทราย, เคลือบผิวคอนกรีตและลดปริมาณคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าเคมี

กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0	A
Cc	0	1,182,939.00	67,692.40
Cd	0	35,488.17	2,030.77
Cqa	0	151,179.60	8,651.09
Cin	0-100		7,154.00

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 3 : ฉีดยาทราย, เคลือบผิวคอนกรีตและลดปริมาณคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าเคมี

	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 1.4 ยาว 300	2146.2	38	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
impressed current		38	360,000.00	85,182.98	4,874.50
	ECR	38	4,149,320.00	981,809.57	56,182.98
				รวม	312,416.76

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 3 : ฉีดยาทราย, เคลือบผิวคอนกรีต, ลดปริมาณคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าเคมีและการยับยั้งสนิมด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้า

กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0	A
Cc	0	1,182,939.00	67,692.40
Cd	0	35,488.17	2,030.77
Cqa	0	151,179.60	8,651.09
Cin	0-100		7,154.00
Csf	0	2,517,057.60	144,035.88

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 3 : ฉีดยาตรอยร้าว, เคลือบผิวคอนกรีต, ลดปริมาณคลอรีนด้วยไฟฟ้าเคมีและการยับยั้งสนิมด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้า (ต่อ)

Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 1.4 ยาว 300	2146.2	38	1,609,650.00	380,874.40	21,795.12
ทุก 1 ตร.ม. จะมีความเสียหาย 30x70 ซม.	เคลือบผิว	38	112,675.50	26,661.21	1,525.66
	ECR	38	4,149,320.00	981,809.57	56,182.98
impressed current		38	360,000.00	85,182.98	4,874.50
				รวม	313,942.41

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 4 : ฉีดอัดรอยร้าว

	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีรอยร้าวความเสียหาย 3 ยาว 450	ฉีดอัดรอยร้าว	49	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
รวมยาว	3219.3	53	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
		57	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
		61	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
		65	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
		69	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
		73	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
		77	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 4 : ฉีดอัดรอยร้าว (ต่อ)

Cm	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A	
ทุก 1 ตร.ม. จะมีรอยร้าวความเสียหาย 3 ยาว 450	ฉีดอัดรอยร้าว	81	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
		85	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
		89	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
		93	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
		97	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
รวม				654,569.05	

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 4 : เคลือบผิวคอนกรีต

	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0	A
Cc		0	1,182,939.00	67,692.40
Cd		0	35,488.17	2,030.77
Cqa		0	151,179.60	8,651.09
Cin		0-100		7,154.00
Csf		0	2,517,057.60	144,035.88

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 4 : เคลือบผิวคอนกรีต (ต่อ)

Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีหลุดลอกความเสียหาย 40x120 ซม.	เคลือบผิว	49	257,544.00	60,939.90	3,487.22
รวมล่อน	343.392	59	257,544.00	60,939.90	3,487.22
		69	257,544.00	60,939.90	3,487.22
		79	257,544.00	60,939.90	3,487.22
		89	257,544.00	60,939.90	3,487.22
		99	257,544.00	60,939.90	3,487.22
				รวม	250,487.46

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 4 : การยับยั้งการเกิดสนิมด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้า

	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0	A
Cc		0	1,182,939.00	67,692.40
Cd		0	35,488.17	2,030.77
Cqa		0	151,179.60	8,651.09
Cin		0-100		7,154.00

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 4 : การยับยั้งการเกิดสนิมด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้า

	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
impressed current		49	360,000.00	85,182.98	4,874.50
		74	360,000.00	85,182.98	4,874.50
		99	360,000.00	85,182.98	4,874.50
				รวม	244,187.65

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 4 : ฉีดอัดรอยร้าวและลดปริมาณคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าเคมี

กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0	A
Cc	0	1,182,939.00	67,692.40
Cd	0	35,488.17	2,030.77
Cqa	0	151,179.60	8,651.09
Cin	0-100		7,154.00
Csf	0	2,517,057.60	144,035.88

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 4 : ฉีดยัตรอยร้าวและลดปริมาณคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าเคมี (ต่อ)

Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีรอยร้าวความเสียหาย 3 ยาว 450	ฉีดยัตรอยร้าว	49	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
รวมยาว	3219.3	88	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
	ECR	49	4,149,320.00	981,809.57	56,182.98
		88	4,149,320.00	981,809.57	56,182.98
				รวม	407,315.48

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 4 : ฉีดยัตรอยร้าวและเคลือบผิวคอนกรีต

	กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0	A
Cc		0	1,182,939.00	67,692.40
Cd		0	35,488.17	2,030.77
Cqa		0	151,179.60	8,651.09
Cin		0-100		7,154.00
Csf		0	2,517,057.60	144,035.88

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 4 : ฉีดยาตรอยร้าวและเคลือบผิวคอนกรีต (ต่อ)

Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีรอยร้าวความเสียหาย 3 ยาว 450	ฉีดอัดรอยร้าว	49	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
รวมยาว	3219.3	63	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
		77	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
		91	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
ทุก 1 ตร.ม. จะมีหลุดล่อนความเสียหาย 40x120 ซม.	เคลือบผิว	49	257,544.00	60,939.90	3,487.22
รวมล่อน	343.392	63	257,544.00	60,939.90	3,487.22
		77	257,544.00	60,939.90	3,487.22
		91	257,544.00	60,939.90	3,487.22
				รวม	374,283.76

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 4 : ฉีดยาต้านการกัดกร่อนและการยับยั้งการเกิดสนิมด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้า

กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A	
Cc	0	1,182,939.00		67,692.40	
Cd	0	35,488.17		2,030.77	
Cqa	0	151,179.60		8,651.09	
Cin	0-100			7,154.00	
Csf	0	2,517,057.60		144,035.88	
Cm	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A	
ทุก 1 ตร.ม. จะมีรอยร้าวความเสียหาย 3 ยาว 450	ฉีดยาต้านการกัดกร่อน	49	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
รวมยาว	3219.3	78	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
impressed current		49	360,000.00	85,182.98	4,874.50
		78	360,000.00	85,182.98	4,874.50
				รวม	304,698.52

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 4 : เคลือบผิวคอนกรีตและการยับยั้งการเกิดสนิมด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้า

กิจกรรม		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีหลุดลอกความเสียหาย 40x120 ซม.	เคลือบผิว	49	257,544.00	60,939.90	3,487.22
รวมล่อน	343.392	84	257,544.00	60,939.90	3,487.22
impressed current		49	360,000.00	85,182.98	4,874.50
		84	360,000.00	85,182.98	4,874.50
รวม					246,287.59

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 4 : ฉีดยาต้านรอยร้าว, เคลือบผิวคอนกรีตและการยับยั้งการเกิดสนิมด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้า

กิจกรรม		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีรอยร้าวความเสียหาย 3 ยาว 450	ฉีดยาต้านรอยร้าว	49	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
	2146.2	88	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
ทุก 1 ตร.ม. จะมีหลุดลอกความเสียหาย 40x120 ซม.	เคลือบผิว	49	257,544.00	60,939.90	3,487.22
รวมล่อน	343.392	88	257,544.00	60,939.90	3,487.22
impressed current		49	360,000.00	85,182.98	4,874.50
		88	360,000.00	85,182.98	4,874.50
รวม					311,672.96

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 4 : ฉีดยาต้านการเกิดสนิมด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้าและการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าเคมี

กิจกรรม		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีรอยร้าวความเสียหาย 3 ยาว 450	2146.2	49	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
impressed current		49	360,000.00	85,182.98	4,874.50
ECR		49	4,149,320.00	981,809.57	56,182.98
รวม					323,314.32

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับที่ 4 : ฉีดยาทราย, เคลือบผิวคอนกรีต, การยับยั้งการเกิดสนิมด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้าและการลดปริมาณคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าเคมี

กิจกรรม		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A
ทุก 1 ตร.ม. จะมีรอยร้าวความเสียหาย 3 ยาว 450	2146.2	49	2,414,475.00	571,311.60	32,692.69
ทุก 1 ตร.ม. จะมีหลุดล่อนความเสียหาย 40x120 ซม.	343.392	49	257,544.00	60,939.90	3,487.22
	ECR	49	4,149,320.00	981,809.57	56,182.98
impressed current		49	360,000.00	85,182.98	4,874.50
รวม					326,801.54

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับ 5 : เทห์ด้วยคอนกรีต

กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0			A
Cc	0	1,182,939.00			67,692.40
Cd	0	35,488.17			2,030.77
Cqa	0	151,179.60			8,651.09
Cin	0-100				7,154.00
Csf	0	2,517,057.60			144,035.88
Cm	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)		มูลค่าในปีที่ 0	A
เทห์ด้วยคอนกรีต	59	823,526.58	194,862.36		11,150.79
				รวม	240,714.93

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับ 5 : เทห์ด้วยคอนกรีตและเคลือบผิวคอนกรีต

กิจกรรม		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)		มูลค่าในปีที่ 0 A
เทห์ด้วยคอนกรีต		59	823,526.58	194,862.36	11,150.79
เคลือบผิวทั้งสะพาน	715.4	59	536,550.00	126,958.13	7,265.04
รวม					247,979.97

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับ 5 : เทห์ด้วยคอนกรีตและการยับยั้งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า

กิจกรรม		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
เทห์ด้วยคอนกรีต		59	823,526.58	194,862.36	11,150.79
impress current		59	360000	85,182.98	4,874.50
				รวม	245,589.43

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับ 5 : เทห์ด้วยคอนกรีตและการใช้โลหะทดแทน

กิจกรรม	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0	A		
Cc	0	1,182,939.00			67,692.40
Cd	0	35,488.17			2,030.77
Cqa	0	151,179.60			8,651.09
Cin	0-100				7,154.00
Csf	0	2,517,057.60			144,035.88
Cm	ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาต่อซ่อม (2556)	มูลค่าในปีที่ 0	A	
เทห์ด้วยคอนกรีต	59	823,526.58	194,862.36	11,150.79	
Sacrificed Zn anode	59	666,900.00	157,801.47	9,030.02	
			รวม	249,744.95	

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับ 5 : เทห์ด้วยคอนกรีต, เคลือบผิวคอนกรีตและการยับยั้งการเกิดสนิมด้วยกระแสไฟฟ้า

กิจกรรม		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)		มูลค่าในปีที่ 0 A
เทห์ด้วยคอนกรีต		59	823,526.58	194,862.36	11,150.79
เคลือบผิวทั้งสะพาน	715.4	59	536,550.00	126,958.13	7,265.04
impress current		59	360000	85,182.98	4,874.50
รวม					252,854.47

โครงสร้างเสื่อมสภาพระดับ 5 : เทหับด้วยคอนกรีต, เคลือบผิวคอนกรีตและการใช้โลหะทดแทน

กิจกรรม		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่ 0		A
Cc		0	1,182,939.00		67,692.40
Cd		0	35,488.17		2,030.77
Cqa		0	151,179.60		8,651.09
Cin		0-100			7,154.00
Csf		0	2,517,057.60		144,035.88
Cm		ปีที่ดำเนินการ	มูลค่าในปีที่คำนวณราคาค่าซ่อม (2556)		มูลค่าในปีที่ 0
เทหับด้วยคอนกรีต		59	823,526.58	194,862.36	11,150.79
เคลือบผิวทั้งสะพาน		715.4	536,550.00	126,958.13	7,265.04
Sacrificed Zn anode		59	666,900.00	157,801.47	9,030.02
รวม					257,009.99

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ -นามสกุล	นายสิทธิรินทร์ รัชมุสิกพัทธ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันพุธ ที่ 22 มกราคม พ.ศ. 2529
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2551
ประวัติการทำงาน	1. บริษัท ตรีทัช เอ็นจิเนียริง จำกัด