

การประเมินสภาพสะพานคอนกรีตของกรมทางหลวงในเขตเศรษฐกิจ EEC

Assessment of Concrete Bridge Conditions of the Department of Highways in the Eastern Economic Corridor (EEC)

พลิน บัวบาน ญัฐศิวัช บุญมา และ วิฑิต ปานสุข

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสภาพสะพานคอนกรีตของกรมทางหลวงในเขตเศรษฐกิจ EEC ซึ่งเป็นพื้นที่เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยที่เผชิญกับปัจจัยเสี่ยงที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง เช่น การเกิดคาร์บอนเนชั่นและการกัดกร่อนของเหล็กเสริมซึ่งส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงและอายุการใช้งานของโครงสร้างเพื่อทำการวิเคราะห์สภาพสะพานโดยการตรวจสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่นและการกัดกร่อนของเหล็กเสริมโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องมาวิเคราะห์ผลกระทบของการศึกษา โดยงานวิจัยนี้ได้รวบรวมข้อมูลจากสำนักสะพานกรมทางหลวง โดยรวบรวมข้อมูล ชนิดสะพาน อายุสะพาน จำนวนสะพาน และความยาวสะพานหลังจากการรวบรวมข้อมูล ได้นำข้อมูลที่เกี่ยวข้องมาวิเคราะห์การเสื่อมสภาพของสะพาน ตามสูตรทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง โดยนำมาใช้เพื่อคำนวณพฤติกรรมของโครงสร้างและคาดการณ์แนวโน้มการเสื่อมสภาพ โดยใช้ค่าดัชนีในการประเมินสภาพคอนกรีต คือ Margin ratio for safety, Margin ratio for durability และ Deviation ratio จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการใช้สมการทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับตัวอย่างผลการทดสอบจริงและหาค่าปรับแก้เพื่อให้ค่าที่ได้จากผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุดสุดท้ายเก็บรวบรวมข้อมูลโครงสร้างสะพานที่ได้จากการเก็บข้อมูล และวิเคราะห์ผล เพื่อสร้างฐานข้อมูลและวิเคราะห์ผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ โดยข้อมูลและผลงานวิจัยที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางการพัฒนาแนวทางป้องกันการเสื่อมสภาพของสะพานคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพการบำรุงรักษา การเสริมกำลังสะพานให้มีความปลอดภัยและยืดอายุการใช้งานในระยะยาว

คำสำคัญ: สะพานคอนกรีต, คาร์บอนเนชั่น, การกัดกร่อนเหล็กเสริม

Abstract

This research aims to assess the condition of concrete bridges under the Department of Highways in the EEC economic zone, a vital economic area of Thailand facing deterioration risk factors such as carbonation and reinforcement corrosion, affecting the load-bearing capacity and service life of the structures. The bridge condition is analyzed by examining carbonation and reinforcement corrosion, using relevant mathematical equations to analyze the results of the study process. This research collects data from the Bureau of Bridge Department of Highways, including bridge type, bridge age, number of bridges, and bridge length. After data collection, the relevant information is analyzed for bridge deterioration using related engineering formulas, which are used to calculate the structural behavior and predict deterioration trends. Indices are used to assess the concrete condition: Margin ratio for safety, Margin ratio for durability, and Deviation ratio. The results obtained from the mathematical equation analysis are compared with actual test results, and correction factors are applied to ensure the analyzed values are accurate and as close to reality as possible. Finally, bridge structure data collected and analyzed is gathered to create a database and analyze the impact of various factors. The data and research results obtained from the analysis can be used as guidelines for developing effective prevention of concrete bridge deterioration, maintenance, and bridge strengthening to ensure safety and extend service life in the long term.

Keywords: Concrete Bridge, Carbonation, Reinforcement Corrosion

1 บทนำ

เขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (Eastern Economic Corridor: EEC) มีบทบาทสำคัญในการขับเคลื่อนการเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยเฉพาะในแง่ของการส่งออก ดังนั้น การประเมินสภาพโครงสร้างพื้นฐานและการบำรุงรักษา เช่น สะพาน จึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อให้โครงสร้างมีความปลอดภัยต่อการใช้งาน และสามารถยืดอายุการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สภาพแวดล้อมในเขต EEC ที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงและปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง ซึ่งจะทำให้กระบวนการคาร์บอนเนชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ค่า pH ในเนื้อคอนกรีตลดลง ทำให้ passive film ของเหล็กเสริมถูกทำลายและทำให้คลอไรด์สามารถเข้าไปทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็ก ทำให้โครงสร้างสะพานมีกำลังลดลง

งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาสภาพของโครงสร้างสะพานคอนกรีตในพื้นที่จังหวัดชลบุรี ระยอง และฉะเชิงเทรา ทั้งในด้าน Safety และ Durability ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเสี่ยงสูงต่อการเสื่อมสภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริม โดยใช้วิธีวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ร่วมกับข้อมูลภาคสนาม เพื่อประเมินระดับความเสี่ยงจากการเสื่อมสภาพ และหาแนวทางบำรุงรักษาที่มีประสิทธิภาพช่วยยืดอายุการใช้งาน

สมมติฐานของงานวิจัยนี้

- การเสื่อมสภาพของสะพานเกิดขึ้นบริเวณ Girder ของสะพาน
- เกิดกระบวนการคาร์บอนเนชันก่อนที่คลอไรด์จะเข้าไปทำให้เกิดสนิมเหล็ก (คลอไรด์ในเนื้อคอนกรีตน้อยกว่า 0.05 % โดยน้ำหนักคอนกรีต) อ้างอิง: NRMCA(2020)
- เกิดการกัดกร่อนก่อนที่จะเกิดรอยแตกบนโครงสร้าง

2 ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การเสถียรภาพโครงสร้างคอนกรีต

โครงสร้างคอนกรีตสามารถเสื่อมสภาพได้จากหลายปัจจัย เช่น ความล้าของวัสดุ (Fatigue) และการแช่แข็งและละลายน้ำแข็งซ้ำ ๆ (Freezing and Thawing) แต่ปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือการกัดกร่อนของเหล็กเสริมซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการรับแรงของโครงสร้างคอนกรีต Tottori (2003) ได้แบ่งการกัดกร่อนของเหล็กเสริมออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทที่รอยร้าวเกิดก่อนการกัดกร่อน (crack-precedence type) และ ประเภทที่การกัดกร่อนเกิดก่อนรอยร้าว (rebar corrosion-precedence type) สำหรับประเภทที่การกัดกร่อนเกิดก่อนรอยร้าว นั้น สามารถแบ่งย่อยเพิ่มเติมได้อีกเป็น การคาร์บอนเนชัน (Carbonation) และ ความเสียหายจากเกลือ (Salt Damage) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะสมมติว่าปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตมีค่าต่ำกว่า 0.05 % โดยน้ำหนักของคอนกรีต ซึ่งหมายความว่า จะเกิดกระบวนการคาร์บอนเนชันก่อนที่คลอไรด์จะเข้าไปทำให้เกิดสนิมเหล็ก ซึ่งเป็นขอบเขตที่ NRMCA (2020) ได้

กำหนดไว้ ซึ่งหากปริมาณคลอไรด์เกิน 0.05 % โดยน้ำหนักของคอนกรีต สนิมเหล็กก็จะเกิดได้โดยที่ คาร์บอนเนชันยังไม่เข้าไปลดค่า PH ของคอนกรีต

2.1.2 ดัชนีที่ใช้สำหรับการประเมินสภาพคอนกรีต

JSCE (2022) ได้เสนอดัชนีที่ใช้สำหรับประเมินสภาพโครงสร้างคอนกรีตที่มีอยู่ หรือ โครงสร้างคอนกรีตที่เพิ่งสร้างเสร็จ หรือ โครงสร้างคอนกรีตที่ได้รับการซ่อมแซมแล้วดังแสดงในสมการที่ (1) และ (2)

$$M_s = \frac{R_D - S_D}{c} \times 100 [\%] \quad (1)$$

โดยที่ M_s คือ Margin ratio for safety (%)

R_D คือ Cross-sectional force (N)

S_D คือ Strength (N)

$$M_d = \frac{T_{Rd} - T_{Sd}}{c} \times 100 [\%] \quad (2)$$

โดยที่ M_d คือ Durability margin (%)

T_{Rd} คือ เวลาเริ่มเกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุ (ปี)

T_{Sd} คือ อายุการใช้งานที่คาดหวัง (ปี)

อย่างไรก็ตามดัชนี margin ratio ที่ถูกเสนอโดย (JSCE, 2022) ตามที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ ซึ่งสามารถใช้สำหรับโครงสร้างที่ยังไม่ได้เกิดการกัดกร่อนเท่านั้น Mori (2024) จึงได้นำเสนอดัชนี Deviation ratio ดังแสดงในสมการที่ (3) ที่สามารถใช้ในการประเมินสภาพสะพานหลังจากที่เกิดการกัดกร่อนไปแล้ว หรือ อยู่ในช่วง progressive period หรือหลังจากนั้น ซึ่งดัชนีนี้จะเป็นฟังก์ชันที่มีความสัมพันธ์กับเวลาดังแสดงในรูปที่ 1

$$D_d = \frac{T_{Ni}}{T} \times 100 + 100(i - 1) \quad (3)$$

โดยที่ D_d คือ Deviation ratio (%)

T_{Ni} คือ ระยะเวลาของเหตุการณ์เสื่อมสภาพในกระบวนการเสื่อมสภาพ ณ เวลาที่ทำการคำนวณ

$$T_{Ni} = t - t_i \quad (4)$$

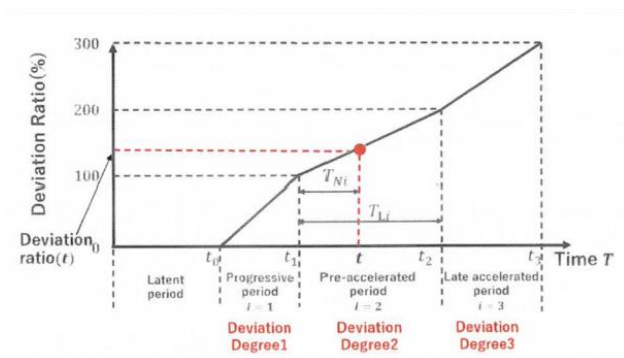
โดยที่ t คือ จำนวนปีที่ใช้งานทั้งหมด

t_i คือ จำนวนปีที่ใช้งานเกิดการเสื่อมสภาพ

$$T_{Li} = t_{i+1} - t_i \quad (5)$$

โดยที่ t_{i+1} คือ จำนวนปีที่เหลือก่อนจะเสื่อมสภาพในอีกระดับเทียบกับระดับปัจจุบัน

T_{Li} คือ จำนวนปีที่ใช้ในการเข้าสู่กระบวนการเสื่อมสภาพ ณ เวลาที่ทำการคำนวณ



รูปที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Deviation ratio กับ เวลา

Mori (2024) ได้แบ่งช่วงของ Deviation ratio ออกเป็น 3 ระดับโดยสื่อถึงความเสียหายที่เกิดกับโครงสร้างคอนกรีต โดย ค่า deviation ratio 100%, 200% และ 300% จะเป็นขอบเขตของ deviation degree 1, 2 และ 3 สามารถสื่อถึงสภาพการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 1 นอกจากนี้เพื่อจะใช้ deviation ratio ในการประเมินสภาพสะพานในเขต EEC ต้องเลือกใช้สมการที่เหมาะสมในการคาดการณ์อัตราการเกิดการเสื่อมสภาพทั้งในช่วงกระบวนการเกิดคาร์บอนเนชั่น และกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กเสริมหลังจากที่ Passive film โดนทำลายไปแล้ว โดยกระบวนการคาร์บอนเนชั่น

Degradation process	Durability Index	Indicator Value	Deviation degree	Degraded condition
Latent period	Margin ratio For durability	-100%~	-	Before steel corrosion
Progressive period	Deviation ratio	0%~100%	1	Steel corrosion occurrence
Pre-accelerated period	Deviation ratio	100%~200%	2	Corrosion cracking occurred
Late accelerated period	Deviation ratio	200%~300%	3	Corrosion spalling occurrence

ตารางที่ 1 สภาพของโครงสร้างคอนกรีตกับ Deviation degree

2.1.3 การทำนายอัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นและขีดจำกัดการเกิด

การทำนายอัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นสามารถทำได้โดยการคำนึงถึงปัจจัยต่างๆจากสภาพแวดล้อมภายนอกบริเวณสะพานที่สนใจ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการทำการทดลอง และพัฒนาสมการ โดยแต่ละสมการจะมีตัวแปรและรูปแบบสมการที่แตกต่างกัน

Architectural Institute of Japan (2016) ได้เสนอสมการคาดการณ์อัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นในมาตรฐาน Durable Design and Commentary for Reinforced Concrete Buildings ดังแสดงในสมการที่

$$X_c = A\sqrt{t} \quad (6)$$

โดยที่ X_c คือ Carbonation depth (mm)

A คือ ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่น (mm/ปี)

t คือ จำนวนปีนับจากก่อสร้างเสร็จ

$$A = k \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \quad (7)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ ที่ขึ้นกับอัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่น, 17.2 สำหรับประเทศไทย (mm/√ปี)

α_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับประเภทของมวลรวมในคอนกรีต, 1.0 สำหรับคอนกรีตธรรมดา

α_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับประเภทของปูนซีเมนต์, 1.0 สำหรับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

α_3 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับ W/C ratio (W/C-0.38)

β_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ, $1.33(0.017T+0.48)$, T คือ อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)

β_2 คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นกับความชื้นบริเวณโครงสร้างคอนกรีต ดังแสดงในสมการที่ (8)

β_3 คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นกับความเข้มข้นของ CO_2 , $\sqrt{CO_2 \text{ concentration} [\%] / 0.05}$

$$\beta_2 = k_r \cdot H_u \cdot (100 - H_u) \cdot (140 - H_u) / 192000 \quad (8)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ ที่ขึ้นกับอัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่น, 1.0 สำหรับสภาพแวดล้อมแบบเปียก, 1.6 สำหรับสภาพแวดล้อมแบบแห้ง

H_u คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%)

2.1.4 การทำนายอัตราการกัดกร่อน

Kakegawa et al. (2012.2) ได้พัฒนาสมการคำนวณอัตราการกัดกร่อน ดังแสดงในสมการที่ (9) และ (10) โดยอ้างอิงจากผลการทดลองในคอนกรีตที่ผ่านการทดสอบสภาพแวดล้อมยาวนาน 20 ปี ซึ่งใช้คอนกรีต 20 ประเภท ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 4 ระดับ (50%, 55%, 60%, และ 65%) และปริมาณคลอไรด์เริ่มต้น 5 ระดับ (0, 0.1, 0.3, 0.5 และ 1%) นอกจากนี้ ยังมีการใช้คอนกรีตที่มีระยะหุ้มคอนกรีตที่แตกต่างกัน (15, 20, 30, และ 40 มม.) ตัวอย่างคอนกรีตถูกบ่มในอุณหภูมิและความชื้นที่ควบคุม ก่อนเข้าสู่กระบวนการเร่งคาร์บอนเนชั่นด้วยอุณหภูมิ 30°C ความชื้น 60% และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 5% โดยทำการทดลองในเมือง Tsukuba ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ย 13.8°C และความชื้นสัมพัทธ์ 75%

$$w = q \cdot \sqrt{t} \quad (9)$$

โดยที่ q คือ อัตราการกัดกร่อนเหล็ก (mg/cm²/ปี)

w คือ ปริมาณสนิมเหล็ก (mg/cm²)

$$q = \frac{\gamma_1}{c_{v_3}} \cdot (W/C - \gamma_3) \quad (10)$$

โดยที่ γ_1 คือ ค่าคงที่

γ_2 คือ ค่าคงที่ที่แสดงถึงการเคลื่อนที่ของสาร เช่น น้ำและออกซิเจน

γ_3 คือ ค่าคงที่ที่แสดงถึงผลกระทบของ W/C ratio

W/C คือ Water cement ratio (%)

C คือ ระยะหุ้มคอนกรีต (มม.)

ค่า $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ ขึ้นกับความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่า $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ ที่ขึ้นกับความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน			
Chloride ion Kg/cm ³	γ_1	γ_2	γ_3
0	23.5	1.9	54.3
0.45 - 0.52	0.583	0.8	18.7
1.36 - 1.55	1.420	0.6	35.7
2.27 - 2.58	1.141	0.2	34.4
4.54 - 4.68	2.155	0	38.8

2.2 เก็บรวบรวมข้อมูลและเตรียมข้อมูล

2.2.1 การรวบรวมข้อมูล

ขอความอนุเคราะห์ข้อมูลหน่วยงานราชการที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมทางหลวงหรือองค์กรท้องถิ่น โดยข้อมูลดังกล่าวได้รวบรวมจำนวนสะพาน ชนิด สะพาน ความยาวสะพาน ปีที่สร้างสะพาน รูปแบบการใช้งานและพิกัดตำแหน่งของสะพาน

2.2.2 เก็บข้อมูลที่มิได้ระบุ

ใช้ฟังก์ชัน Street View ของ Google Maps ในการดูลักษณะสะพานในเชิงโครงสร้างบางตัวที่ไม่ได้ระบุในข้อมูลที่ได้มา เช่น การดูชนิดของคานสะพานเพื่อระบุประเภทของสะพาน การดูรูปแบบของราวสะพานเพื่อประมาณอายุของสะพาน หากไม่สามารถเก็บข้อมูลได้เนื่องจากข้อจำกัดมุมมองของ Google Maps ผู้วิจัยต้องลงพื้นที่เก็บข้อมูล



รูปที่ 2 สะพานข้ามแยกบายพาสพนัสนิคม ทล.361

2.2.3 จัดทำฐานข้อมูลสะพาน

ข้อมูลที่รวบรวมได้จากหน่วยงานราชการ Google Maps และจากการลงพื้นที่ มาจัดเรียงใน Excel เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป

2.3 การประเมินสภาพสะพาน

ดัชนีที่ใช้การวิเคราะห์สภาพสะพานมี 3 ค่าโดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ (Mori, 2024) ได้แก่ Margin Ratio for Durability, Margin Ratio for Safety และ Deviation Ratio นำดัชนีดังกล่าวมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์โดย แกน X: Margin Ratio for Durability & Deviation Ratio แกน Y: Margin Ratio for Safety

2.3.1 Margin ratio for durability

ใช้ประเมินช่วงที่เกิดคาร์บอนเนชั่นในสะพานคอนกรีต แต่เหล็กเสริมภายในคอนกรีตยังไม่เกิดการกัดกร่อน ซึ่งเหมาะต่อการวิเคราะห์สะพานคอนกรีตที่เพิ่งสร้างเสร็จหรือสะพานคอนกรีตที่ได้รับการซ่อมแซมแล้ว โดยค่าดังกล่าวได้จากการได้ตั้งแสดงในสมการที่ (1) และ (2)

2.3.2 Margin ratio for safety

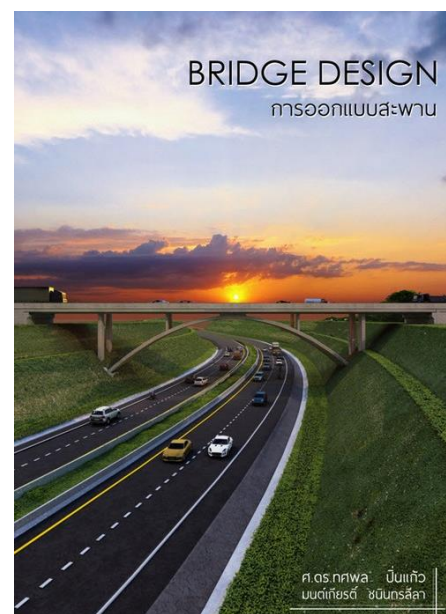
การเปรียบเทียบกำลังของแรงเฉือนและโมเมนต์ระหว่างสภาพการใช้งานจริงและกำลังที่ออกแบบดังแสดงในสมการที่และหากในสภาพการใช้งานจริงข้อมูลไม่ระบุให้ทำการคาดการณ์โดยอ้างอิงมาตรฐาน AASHTO LRFD Bridge Design Specification ค่ากำลังที่ออกแบบวิเคราะห์จากแบบที่ใช้ก่อสร้างของสะพานนั้นๆ หากไม่มีแบบก่อสร้างสะพานจะต้องทำการอ้างอิงหน้าตัดสะพานตามแบบมาตรฐานสำหรับการออกแบบและก่อสร้างทางหลวงซึ่งจากการรวบรวมข้อมูล กรมทางหลวงได้จัดทำมาตรฐานออกมาทั้งหมด 3 เล่ม

(a) Standard Drawings for Highway Design and Construction 2015

(b) Standard Drawings for Highway Construction 1994

(c) Standard Drawings for Highway Construction 1991

ทั้งนี้หน้าตัดที่ใช้สำหรับการหาค่ากำลังต้องเลือกใช้ตามปีที่ก่อสร้างที่ตรงกับมาตรฐานเล่มนั้นๆและค่ากำลังที่ออกแบบวิเคราะห์คาดการณ์โดยอ้างอิงมาตรฐาน AASHTO LRFD Bridge Design Specification จากรูปที่ 3



รูปที่ 3 การออกแบบสะพาน (BRIDGE DESIGN)

2.3.3 Deviation ratio

ใช้ประเมินสภาพสะพานคอนกรีตที่เกิดกระบวนการคาร์บอนเนชั่นถึงระยะที่จะทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต โดยแบ่งระดับความเสียหายเป็น 3 ระดับ (Degree) ระดับที่ 1 เหล็กเสริมเริ่มเกิดการกัดกร่อน ระดับที่ 2 เกิดรอยแตกบนผิวคอนกรีต ระดับที่ 3 คอนกรีตกะเทาะจนเห็นเหล็กเสริม

2.4 การตรวจสอบความแม่นยำของผลการวิเคราะห์

ในการประเมินสภาพโดยใช้ดัชนี Margin Ratio for Durability และ ดัชนี Deviation Ratio จำเป็นอย่างมากที่จะต้องเลือกใช้สมการคาดการณ์ให้เหมาะสม ทั้งอัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นที่ใช้ในการทำนายจำนวนปีที่ใช้ในการเกิดคาร์บอนเนชั่นถึงระยะที่จะทำให้การกัดกร่อนของเหล็กเสริมซึ่งนำไปใช้ในการหาค่า Margin Ratio for Durability และ อัตราการกัดกร่อนเหล็กเสริมเพื่อจะทำการทำนายจำนวนปีที่เกิดความเสียหายรูปแบบต่างๆซึ่งนำไปใช้หาค่า Deviation Ratio ซึ่งในโครงการนี้จะทำการเลือกใช้สมการที่เหมาะสมที่สุดหรือการปรับแก้ค่าที่ได้จากสมการ โดย อ้างอิงตามสภาพสะพานจริงและผลการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตจากสะพาน เพื่อให้การประเมินแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากที่สุด

3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

จากค่าดัชนี Margin Ratio for Safety, Margin ratio for durability และดัชนี Deviation ratio ที่ได้กล่าวไป ซึ่งในบทนี้จะเป็นการนำค่าดัชนีดังกล่าวทั้ง 3 ค่า มาใช้ในการประเมินสภาพสะพานในเขต EEC โดยสรุปจำนวนสะพานและชนิดของสะพานดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อมูลสะพานในเขต EEC

ข้อมูลสะพานในเขต EEC			
จังหวัด Type	ชลบุรี	ฉะเชิงเทรา	ระยอง
PC Box Beam	7	24	1
PC I Girder	45	22	14
PC Multi Beam	3	1	-
PC Plank Girder	102	100	72
RC Slab type	120	64	66
รวมสะพานทุกชนิด	642		

3.1 การคำนวณ safety (Margin Ratio for Safety)

จากสมการที่ (1) ที่ได้ เสนอในบทที่แล้ว จากสูตรจะเห็นได้ว่าการคำนวณหาดัชนี Margin Ratio for Safety ต้องทราบค่า M_u , V_u (Ultimate Load) และ M_n , V_n (Nominal capacity) โดยการคำนวณค่าต่างๆในการประเมินสภาพ จะคำนวณจากชิ้นส่วน Girder ของสะพาน

ชิ้นส่วนสะพานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ Substructures และ Superstructures ซึ่ง Girder ถือว่าเป็นชิ้นส่วน Superstructures โดยสาเหตุที่เลือกชิ้นส่วน Superstructures มาใช้ในการประเมินสภาพสะพาน เพราะเป็น

ชิ้นส่วนที่รับน้ำหนักบรรทุกโดยตรง ซึ่งหากเกิดการเสียหายจะส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของสะพานและผู้ใช้

3.1.1 การคำนวณ Ultimate Load (AASHTO LRFD Bridge Design Specification)

(a) การหาค่า Moment และ Shear จาก Dead load ค่า Bending moment จะมีค่าสูงที่สุดบริเวณกึ่งกลางของสะพาน สามารถคำนวณ จากสมการ (11) และ (12) โดยสะพานทั้ง 5 ชนิด RC Slab type, PC Box Beam , PC Plank Girder PC Multi Beam และ PC I Girder ใช้หลักการเดียวกันในการคำนวณ

$$M_{DC} = \frac{W_{DC} \cdot L^2}{8} \quad (11)$$

โดยที่ M_{DC} คือ Bending moment ที่เกิดจาก w_{DC} (kip.ft)

L คือ ความยาว Span (ft²)

w_{DC} คือ Dead load บนโครงสร้างสะพาน(kip/ft)

$$M_{DW} = \frac{W_{DW} \cdot L^2}{8} \quad (12)$$

โดยที่ M_{DW} คือ Bending moment ที่เกิดจาก w_{DW} (kip.ft)

w_{DW} คือ Dead load นอกจากโครงสร้างสะพาน เช่น ผิวจราจร (kip/ft)

shear force จะมีค่ามากที่สุดบริเวณปลายของสะพาน โดยสามารถหาดังกล่าวได้ดังแสดงในสมการที่ (13) และ (14)

$$V_{DC} = \frac{W_{DC} \cdot L}{2} \quad (13)$$

โดยที่ V_{DC} คือ Shear force ที่เกิดจาก w_{DC} (kip)

$$V_{DW} = \frac{W_{DW} \cdot L}{2} \quad (14)$$

โดยที่ V_{DW} คือ Shear force ที่เกิดจาก w_{DW} (kip)

(b) การหาค่า Moment และ Shear จาก Live load ชนิด RC Slab type พิจารณา น้ำหนักบรรทุกทุก Lane loads , Tandem loads , Truck loads

$$M_{lane} = \frac{W_{lane} \cdot L^2}{8} \quad (15)$$

โดยที่ M_{lane} คือ Bending moment ที่เกิดจาก Lane loads (kip.ft)

L คือ ความยาว Span (ft)

$$M_{truck} = 18L - 280 + \frac{392}{L} \quad (16)$$

โดยที่ M_{truck} คือ Bending moment ที่เกิดจาก Truck loads (kip.ft)

$$M_{tandem} = 12.5L - 50 + \frac{50}{l} \quad (17)$$

โดยที่ M_{tandem} คือ Bending moment ที่เกิดจาก Tandem loads (kip.ft)

$$V_{lane} = \frac{W_{lane} \cdot L}{l} \quad (18)$$

โดยที่ V_{lane} คือ Shear force ที่เกิดจาก Lane loads (kip)

$$V_{truck} = \frac{l}{2} (L - x - 9.33) \quad (19)$$

โดยที่ V_{truck} คือ Shear force ที่เกิดจาก Truck loads (kip)

x คือ Verification (ft)

$$V_{tandem} = \frac{25(2L - x)}{l} \quad (20)$$

โดยที่ V_{tandem} คือ Shear force ที่เกิดจาก Tandem loads (kip)

ค่าที่ได้จากสมการที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้เป็นค่า Live load ต่อ 1 ช่องทางจราจรซึ่งในมาตรฐานของ AASHTO ได้กำหนดตัวแปรที่ใช้สำหรับการแปลง Live load เป็นหน่วย ต่อ 1 ฟุต ดังแสดงในสมการที่ (21) และ (22)

$$E_{1design lane} = 250 + 0.42\sqrt{L_1 W_1} \quad (21)$$

$$E_{1+design lane} = 2100 + 0.12\sqrt{L_1 W_1} \leq \frac{W}{N} \quad (22)$$

โดยที่ E คือ Equivalent width (mm)

L_1 คือ ช่วงความยาวของสะพานหรือ 18,000 mm แล้วแต่ค่าใดมีค่าน้อยกว่า(mm)

W_1 คือ ความกว้างสะพานหรือ 18,000 mm (มากกว่า 1 lane), 9,000 mm (1 lane) แล้วแต่อย่างใดมีค่าน้อยกว่า (mm)

W คือ ความกว้างสะพาน (mm)

N_L คือ จำนวนช่องทางเดินรถบนสะพาน

$$M_{LL} = \frac{M_{lane} + \max(M_{truck}, M_{tandem})}{N} \quad (23)$$

$$V_{LL} = \frac{V_{lane} + \max(V_{truck}, V_{tandem})}{N} \quad (24)$$

โดยที่ M_{LL} คือ Bending moment ที่เกิดจาก Live load ต่อ 1 ft (kip.ft)

V_{LL} คือ Shear force ที่เกิดจาก Live load ต่อ 1 ft (kip.ft)

ชนิด PC Box Beam, PC Plank Girder PC Multi Beam และ PC I girder

$$g_{m1} = k \left(\frac{b}{22.2l} \right)^{0.5} \left(\frac{l}{l} \right)^{0.5} \quad (25)$$

$$g_{m2} = k \left(\frac{b}{20.5} \right)^{0.5} \left(\frac{b}{17.7l} \right)^{0.5} \left(\frac{l}{l} \right) \quad (26)$$

โดยที่ g_{m1} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของโหลด เมื่อมีช่องจราจรเพียงหนึ่งช่อง

g_{m2} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของโหลด เมื่อมีช่องจราจรสองช่องหรือมากกว่า

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของโหลดของคาน

$$k = 2.5(N_b)^{-0.2} \geq 1.5 \quad (27)$$

โดยที่ N_b คือ จำนวนของคาน

b คือ ความกว้างของคาน

I คือ Moment of inertia (in⁴)

J คือ Torsional inertia coefficient (in⁴)

$$g_{v1} = \left(\frac{b}{12.0l} \right)^{0.5} \left(\frac{l}{l} \right)^{0.5} \quad (28)$$

$$g_{v2} = \left(\frac{b}{15.5} \right)^{0.5} \left(\frac{b}{17.7l} \right)^{0.5} \left(\frac{l}{l} \right) \left(\frac{b}{12.0} \right) \quad (29)$$

โดยที่ g_{v1} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของโหลด เมื่อมีช่องจราจรเพียงหนึ่งช่อง

g_{v2} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของโหลด เมื่อมีช่องจราจรสองช่องหรือมากกว่า

$$M_{LL} = M_{lane} + \max(g_{m1}, g_{m2}) \cdot \max(M_{truck}, M_{tandem}) \quad (30)$$

$$V_{LL} = V_{lane} + \max(g_{v1}, g_{v2}) \cdot \max(V_{truck}, V_{tandem}) \quad (31)$$

(c) รวม Loads ทั้งหมดที่กระทำบนโครงสร้างคานของสะพาน

$$M_u = M_{DC} + M_{DW} + M_{LL} \quad (32)$$

$$V_u = V_{DC} + V_{DW} + V_{LL} \quad (33)$$

3.1.2 การคำนวณ capacity ของสะพาน

ชนิด RC Slab type

$$M_n = A_s f_s \left(d_s - \frac{c \beta_1}{\gamma} \right) - A'_s f'_s \left(d'_s - \frac{c \beta_1}{\gamma} \right) \quad (34)$$

โดยที่ M_n คือ กำลังดัด (kip.in)
 d_s คือ ระยะจากขอบการบีบอัดถึงเหล็กเสริมแรงดึง (in)
 d'_s คือ ระยะจากขอบการบีบอัดถึงเหล็กเสริมแรงดัน (in)
 c คือ ระยะจากขอบเขตการบีบอัดถึงแกนกลาง (in)
 A_s คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมแรงดึง (in²)
 f_s คือ กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมแรงดึง (ksi)
 b คือ ความกว้างของหน้าตัด (in)

ชนิด PC Box Beam, PC Plank Girder PC Multi Beam และ PC I girder

$$M_n = A_{ps}f_{ps}\left(d_p - \frac{c\beta_1}{2}\right) + A_s f_s \left(\frac{d_s}{2} - \frac{c\beta_1}{2}\right) - A'_s f'_s \left(d'_s - \frac{c\beta_1}{2}\right) \quad (35)$$

$$V_n = V_c + V_s + V_p \quad (36)$$

โดยที่ V_n คือ กำลังรับแรงเฉือนรวม (kip)
 V_c คือ กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต (kip)
 V_s คือ กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริมแรงเฉือน (kip)
 V_p คือ กำลังรับแรงเฉือนที่เกิดจากแรงล่งหน้าในทิศทางแรงเฉือน (kip)

$$V_c = 0.0316\beta\lambda\sqrt{f'_c}b_v d_v \quad (37)$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d_v (\cot\theta + \cot\alpha) \sin\alpha}{\lambda_{duct}} \quad (38)$$

โดยที่ β คือ สัมประสิทธิ์สำหรับแรงเฉือนและแรงดึงที่ส่งผ่านในคอนกรีตที่แตกร้าวแนวทแยง
 λ คือ สัมประสิทธิ์ของวัสดุ (โดยทั่วไปใช้ค่า 1.0)
 b_v คือ ความกว้างที่มีผล (in)
 d_v คือ ความสูงที่มีผลของแรงเฉือน (in)
 A_v คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมแรงเฉือน (in²)
 f_y คือ กำลังยึดตัวของเหล็กเสริมแรงเฉือน (ksi)
 θ คือ มุมการดึงของคอนกรีต (rad)
 α คือ มุมของการวางเหล็กเสริมแรงเฉือน (rad)
 s คือ ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมแรงเฉือน (in)
 λ_{duct} คือ ตัวลดแรงเนื่องจากแรงล่งหน้า (ในกรณีนี้ใช้ค่า 1 เนื่องจากสะพานถูกออกแบบแบบแรงล่งหน้า)

3.1.3 คำนวณหาอัตราความปลอดภัย

อัตราส่วนความปลอดภัยหาจากแรงภาคตัดขวางและความแข็งแรงของโครงสร้างที่คำนวณ จากสมการที่ (39) และ (40) อัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับโมเมนต์ดัดคำนวณได้ดังนี้

$$M_s = \frac{M_n - M_u}{V} \times 100 \quad (39)$$

$$M_s = \frac{V_n - V_u}{V} \times 100 \quad (40)$$

ค่าที่น้อยที่สุดที่ได้จากสมการดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ ดังแสดงในสมการ (39) และ (40)

3.2 การคำนวณหาค่า Margin ratio for durability

จากที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ ดัชนี Margin Ratio for Durability จะถูกใช้สำหรับสะพานที่ยังไม่ถึงขีดจำกัดของการเกิด Carbonation (10 mm) โดยจะสามารถทราบว่าจะพบตัวใด ๆ ว่าถึงขีดจำกัดหรือไม่ทำได้โดยเทียบกับจำนวนปีที่ Carbonation ถึงขีดจำกัดซึ่งได้จากสมการที่ (6) และ (7) ประเภทของค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆถูกกำหนดโดยสภาพแวดล้อมภายในพื้นที่เขต EEC ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ที่กำหนดสำหรับสมการที่ (7)

ชนิดค่าสัมประสิทธิ์	ค่าสัมประสิทธิ์	หน่วย
k, ค่าคงที่ที่ขึ้นกับอัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่น	17.2	mm/√ปี
α_1 , ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับประเภทของมวลรวมในคอนกรีต	1.0	-
α_2 , ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับประเภทของปูนซีเมนต์	1.0	-
อุณหภูมิเฉลี่ย 30 ปี	28	องศาเซลเซียส
k_p , ค่าคงที่ที่ขึ้นกับอัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่น (Wet environments)	1.0	-
H_u , ค่าความชื้นสัมพัทธ์	80	%
CO ₂ Concentration	0.11	%

หลังจากนั้นทำการคำนวณเพื่อหาจำนวนปีที่ Carbonation ถึงขีดจำกัด และนำไปคิดหาค่า Margin ratio for durability ดังแสดงในสมการที่ (2)

3.3 การคำนวณหาค่า ดัชนี Deviation ratio

คำนวณ Deviation ratio ในสมการของ Yokozeki เพื่อหาปริมาณการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่เริ่มส่งผลให้เกิดรอยแตก

$$W_{cr} = 10 \left(\frac{C}{\alpha} \right) \quad (41)$$

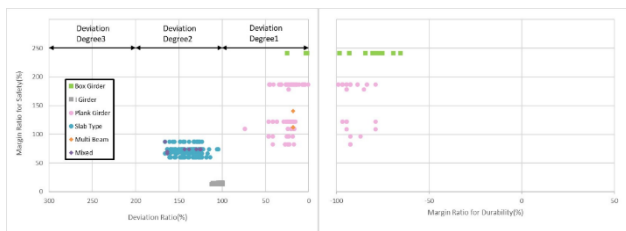
$$q = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \cdot (W/C - \gamma_3) \quad (42)$$

ทำการคำนวณหา ระยะเวลาก่อนที่จะเกิดรอยแตกบนคอนกรีต เพื่อที่จะนำค่าที่คิดได้ไปคำนวณหาดัชนี Deviation ratio ในสมการที่ (3)

3.4 นำดัชนีมาใช้ในการประเมินสภาพสะพานในเขต EEC

จากค่าดัชนี Margin Ratio for Durability และ Deviation ratio ที่ได้สามารถนำมา plot เพื่อจะได้ทราบว่าสะพานแต่ละตัวในเขต EEC อยู่ใน Deviation degree ไหน ตั้งแต่ 1 ถึง 3 ตามที่ (Mori, 2024) ได้จำแนกเอาไว้ ดังแสดงในรูปที่ 1

นำค่าดัชนีของสะพานทุกตัวในเขต EEC มา plot จะสามารถเห็นการกระจายตัวของสภาพสะพานทั้งหมด โดยฝั่งขวาของกราฟจะเป็นสะพานที่ยังไม่มีการกัดกร่อนขึ้นบนเนื้อเหล็กเสริม ส่วนทางซ้ายจะเป็นสะพานที่เริ่มมีการกัดกร่อนของเหล็กเสริมและส่งผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตในระดับต่างๆกัน ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ Margin Ratio for Safety & Deviation Ratio

3.5 เปรียบเทียบผลการประเมินกับสะพานจริง

จากสมการของ (Architectural Institute of Japan, 2016) ที่ใช้คำนวณอัตราการเกิดคาร์บอนเนชั่นในโครงสร้างคอนกรีต และทำนายจำนวนปีที่กระบวนการคาร์บอนเนชั่นเริ่มส่งผลให้เหล็กเกิดสนิม เพื่อความแม่นยำในการประเมินสภาพสะพานโดยใช้สมการจึงจำเป็นต้องทำการสอบเทียบสมการกับค่า ความลึกคาร์บอนเนชั่นที่เกิดขึ้นกับสะพานจริง ซึ่งทำได้โดยการเจาะเก็บตัวอย่าง และ นำไปฉีดพ่นสารละลาย Phenolphthalein (1%) โดยส่วนที่ยังไม่เกิดคาร์บอนเนชั่นบนแท่งตัวอย่างซึ่งจะมีความเป็นเบส สารละลายจะเปลี่ยนสีเป็นสีชมพู (PH>9) ในทางกลับกันหากส่วนใดของแท่งตัวอย่างเกิดคาร์บอนเนชั่นไปแล้วจะถูกทำให้มีความเป็นกลาง (Passive film ได้ถูกทำลายไปแล้ว) สารละลายจะไม่เปลี่ยนสี (สีใส)



รูปที่ 5 การทดสอบหา Carbonation depth โดยใช้สารละลาย Phenolphthalein(1%) สะพานข้ามแยกบายพาสบ้านบึง (LT)

จากผลการตรวจสอบสะพานในโครงการตรวจสอบและประเมินสภาพสะพานบนโครงข่ายทางหลวงเพื่อเพิ่มศักยภาพในการบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน ซึ่งได้ทำการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตจากสะพานในประเทศไทย ซึ่งมีทั้งหมด 5 ตัว ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่า Carbonation depth ที่ได้จากสมการเทียบกับสะพานจริง

รหัสสะพาน	ชื่อสะพาน	อายุ	อัตรา Carbonation (mm/ปี)	ค่าจากสมการ(cm)	ค่าจากตัวอย่าง (cm)	ผลต่าง(cm)
144220093	สะพานข้ามแยกบายพาสบ้านบึง(LT)	29	7.5	4.04	3.50	0.54
134130166	สะพานคลองไผ่พระ	42	7.5	4.86	4.00	0.86
076210127	สะพานข้ามทางรถไฟ	21	7.5	3.44	3.00	0.44
015270022	สะพานข้ามแม่น้ำปิง	82	9.5	8.60	4.50	-4.1
163250117	สะพานจุลจอมเกล้า 2(LT)	22	7.5	3.52	6.00	-2.48

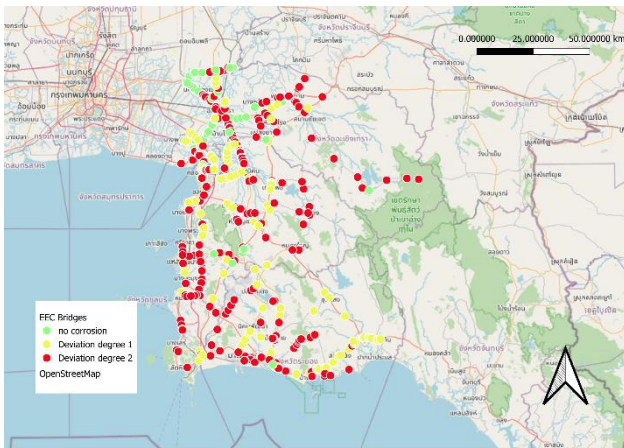
3.6 สรุปผลการศึกษา

จากการประเมินสภาพสะพานในเขตพื้นที่เศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก (EEC) จำนวน 642 ตัว โดยใช้ดัชนี Margin ratio และ Deviation ratio เป็นการประเมินทั้งในด้าน Safety และ Durability ของสะพานซึ่งมุ่งเน้นไปที่ความเสียหายที่เกิดจากกระบวนการคาร์บอนเนชั่น

ดัชนี Deviation ratio ได้ถูกนำมาประเมินสภาพสะพานที่เกิดสนิมเหล็กไปแล้วโดยได้แบ่งความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างออกเป็น 3 ระดับตามโมเดลของ (Mori, 2024) ซึ่งจากการนำไปใช้ประเมินสะพานในเขตพื้นที่เศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก EEC พบว่ามีสะพานจำนวน 557 แห่ง ที่การกัดกร่อนของเหล็กได้เริ่มขึ้นแล้ว ซึ่งในจำนวนนี้มีสะพาน 337 แห่ง ที่อยู่ในระดับ 2 ซึ่งเป็นระดับที่คอนกรีตมีรอยแตกแล้ว โดยจะส่งผลต่ออัตราการกัดกร่อนเหล็กในอนาคตให้สูงขึ้นและส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของสะพาน เช่น คอนกรีตกะเทาะออกส่งผลให้หน้าตัดคานสะพานลดลงโดยจากการนำค่าที่ได้จากสมการมาพล็อตลงแผนที่จะสามารถเห็นการกระจายตัวของสะพานและความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ โดยสะพาน ประเภท Slab type มีความเสียหายสูงที่สุดเมื่อเทียบกับประเภทอื่นๆ

จากการลงพื้นที่สำรวจสภาพสะพานในสายทาง ทล.361 พบว่า มีสะพานที่มีความเสียหายมากกว่าที่คำนวณไว้โดยใช้สมการอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ สะพานข้ามแยกบายพาสบ้านบึง(LT) พบว่าคานสะพานมีคอนกรีตกะเทาะออกมาจนเห็นเหล็กเป็นสนิม แต่ผลที่ได้จากสมการพบว่าสะพานดังกล่าวอยู่ใน Deviation degree 2 ซึ่งเป็นระดับที่สะพานมีรอยแตกเท่านั้น อย่างไรก็ตามพบว่าคานสะพานในส่วนอื่นยังไม่ได้มีคอนกรีตกะเทาะออก และยังมีแค่รอยแตก

จากการเทียบค่า Carbonation depth ของสะพานจริงที่ได้จากการเจาะเก็บตัวอย่าง กับค่าที่ได้จากสมการพบว่า มีสะพาน 3 แห่ง ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 1 cm และ อีก 2 แห่ง มีความคลาดเคลื่อนสูง



รูปที่ 6 แผนที่ความเสียหายของสะพานในเขต EEC ของกรมทางหลวง

3.7 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้งานวิจัยนี้สามารถพัฒนาและต่อยอดได้อย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นผู้วิจัยขอเสนอแนวทางการปรับปรุงและขยายองค์ความรู้ในด้านต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

งานวิจัยสามารถพัฒนาให้มีความละเอียดในเชิงกายภาพมากขึ้น โดยการเก็บข้อมูลจากการเจาะตัวอย่างคอนกรีตในภาคสนาม รวมถึงการทดสอบความลึกของคาร์บอนชั้นหรือการวัดค่าคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีตจริง เพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการที่ใช้ในขณะเดียวกันแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้อาจมีข้อจำกัด เนื่องจากอ้างอิงค่าพารามิเตอร์จากต่างประเทศ จึงควรมีการปรับค่าหรือพัฒนาแบบจำลองใหม่โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองภายในประเทศเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประเมินและรองรับการใช้งานในเชิงปฏิบัติได้ดียิ่งขึ้น

3.8 กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ในระดับบัณฑิตศึกษาสำเร็จ ล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาจาก รศ.ดร. วิฑิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่มีความกรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกตลอดจนปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ ตลอดระยะเวลาที่ดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณกรมทางหลวงที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับสะพานในเขต EEC และอำนวยความสะดวกในการลงพื้นที่ทำงาน และนายันทวุฒิ บุญรินทร์ ผู้อำนวยการตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ที่ให้ความช่วยเหลือในการประสานงานกับกรมทางหลวงและให้คำแนะนำแนวทางในการวิเคราะห์ข้อมูลสะพาน

เอกสารอ้างอิง

[1] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2007). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (4th ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials.

[2] Architectural Institute of Japan. (2016) *Durable Design and Construction Guidelines and Commentary for Reinforced Concrete Buildings*. In: Architectural Institute of Japan.

[3] Department of Highways. (1991). *Standard Drawings for Highway Design and Construction*. In: Bangkok, Thailand: Ministry of Transport, Kingdom of Thailand.

[4] Iijima, T., Kudo, T., & Tamai, Y. (n.d.). Effect of Temperature on Corrosion Rate of Steel. JSCE. (2022). *Standard Specification for Concrete [Design]*. In.

[5] Kakegawa, M., Masuda, Y., Matsubayashi, Y., & Kage, T. (2012.2). Long-term outdoor exposure experiment on the effects of various factors on corrosion rate of steel bars in concrete. p.143-151.

[6] Kakegawa, M., Masuda, Y., Matsubayashi, Y., & Kage, T. (2012.12). Corrosion Acceleration Experiment on Effect of Temperature and Carbonation on Corrosion Rate of Steel Bars in Concrete. No.68.

[7] Michel, A., Otieno, M., Stang, H., & Geiker, M. R. (2016). Propagation of steel corrosion in concrete: Experimental and numerical investigations. *Cement and Concrete Composites*, 70, 171-182.

[8] Mori, K. (2024). *Development of performance Assessment Method for Concrete* (Publication Number 1X20D074) Waseda]. Tokyo.

[9] NRMCA. (2020). *TIP 13 – Chloride limits in concrete* (Technology in Practice Series, Issue. NRMCA. <https://www.nrmca.org/wpcontent/uploads/2020/04/Tip13w.pdf>

[10] Tottori, S. (2003). *Prediction of Deterioration of Concrete Structures Based on Exposure Tests on Corrosion of Steel Bars* Kyoto University].

[11] Yokozeki, O., Motohashi, Tsutsumi. (1997). *A Rational Model to Predict Service Life of RC Structures in Marine Environment* Forth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete

[12] กรมอุตุนิยมวิทยา. (2568). สถิติภูมิอากาศ 30 ปีของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (พ.ศ. 2534–2563). Retrieved 26/02/2568 from <http://climate.tmd.go.th/statistic/stat30y>

[13] สถาบันวิจัยและให้คำปรึกษาแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. (2567). *โครงการตรวจสอบและประเมินสภาพสะพานบนโครงข่ายทางหลวง เพื่อเพิ่มศักยภาพในการบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน*.

[14] ปิ่นแก้ว, ท., & ชนินทรลีลา, ม. (2560). *การออกแบบสะพาน = Bridge Design* (พิมพ์ครั้งที่ 2, ฉบับปรับปรุง ed.). บริษัท เอ็นจิเนียริง แอ็กซีเพอร์ อินเทอร์เน็ตซันแนล จำกัด.