

การตรวจสอบและการประเมินสภาพสะพานคอนกรีตในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก Inspection and Assessment of Concrete Bridges in the Eastern Economic Corridor

ธนพล คำทอง^{1,*} พศิน บัวบาน² ณัฐศิวัช บุญมา³ และ วิฑิต ปานสุข⁴

^{1,2,3,4} ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางวิศวกรรมวัสดุก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: Thanaphon.fluk@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาการเสื่อมสภาพของโครงสร้างสะพานที่เป็นโครงสร้างคอนกรีต โดยขอบเขตของงานวิจัยได้ทำการศึกษาสะพานในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (EEC) ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดชลบุรี ระยอง และฉะเชิงเทรา ซึ่งเป็นพื้นที่ที่เผชิญกับปัจจัยเสี่ยงที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง เช่น การเกิดคาร์บอนเนชั่นและการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ซึ่งส่งผลกระทบต่อความมั่นคงและอายุการใช้งานของโครงสร้าง งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์สภาพสะพานโดยการตรวจสอบการเกิดคาร์บอนเนชั่นและการกัดกร่อนของเหล็กเสริมโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องมาวิเคราะห์ผล

กระบวนการศึกษาดำเนินการโดยการรวบรวมข้อมูลจากหน่วยงานราชการ เช่น ชนิดและจำนวนสะพาน จากนั้นนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์โดยใช้สูตรทางวิศวกรรม เพื่อคำนวณพฤติกรรมของโครงสร้างและคาดการณ์แนวโน้มการเสื่อมสภาพ โดยใช้ดัชนีสำคัญ 3 ประเภท ได้แก่ Margin Ratio for Safety, Margin Ratio for Durability และ Deviation Ratio เพื่อประเมินความมั่นคงและความทนทานของสะพานอย่างเป็นระบบ

ผลการประเมินพบว่า มีสะพานจำนวน 86 แห่ง ที่ยังอยู่ในช่วงก่อนการเกิดการกัดกร่อน (Latent period) ซึ่งประกอบด้วยสะพานประเภท Box Beam จำนวน 25 แห่ง และ Plank Girder จำนวน 61 แห่ง ตามเกณฑ์ Margin Ratio for Durability ขณะที่จากดัชนี Deviation Ratio พบว่าสะพานส่วนใหญ่อยู่ในระดับ Degree 2 ซึ่งเป็นช่วงที่เริ่มเกิดรอยแตกร้าวบนผิวคอนกรีต โดยมีสะพานประเภท Slab Type จำนวน 250 แห่ง และ Plank Girder จำนวน 205 แห่งอยู่ในระดับนี้ สะท้อนถึงแนวโน้มของการเสื่อมสภาพที่ควรได้รับการซ่อมแซมอย่างเร่งด่วน

ข้อมูลและผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาแผนป้องกันการเสื่อมสภาพของสะพานคอนกรีตอย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงการบำรุงรักษาและการเสริมกำลังเพื่อให้สะพานมีความปลอดภัยและสามารถยืดอายุการใช้งานในระยะยาวได้อย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: สะพานคอนกรีต, คาร์บอนเนชั่น, การกัดกร่อนของเหล็กเสริม

Abstract

This study focuses on investigating the deterioration of concrete bridge structures within the Eastern Economic Corridor (EEC), covering Chonburi, Rayong, and Chachoengsao provinces. These areas are exposed to critical environmental factors, such as carbonation and reinforcement corrosion, which significantly impact the structural stability and service life of bridges. The primary objective of this research is to assess structural conditions by evaluating carbonation and steel reinforcement corrosion through the application of relevant mathematical models.

The research methodology involved the collection of data from government agencies, including bridge types and quantities. Subsequently, engineering-based formulas were employed to analyze structural behavior and predict deterioration trends. Three key indices Margin Ratio for Safety, Margin Ratio for Durability, and Deviation Ratio were utilized to systematically assess the structural integrity and durability of the bridges.

The evaluation results revealed that 86 bridges remain in the Latent Period, prior to the onset of reinforcement corrosion, consisting of 25 Box Beam bridges and 61 Plank Girder bridges, based on the Margin Ratio for Durability criteria. Furthermore, based on the Deviation Ratio assessment, the majority of bridges were categorized into Degree 2, indicating the appearance of surface cracks due to reinforcement corrosion, with 250 Slab Type bridges and 205 Plank Girder bridges falling into this severity level. These findings reflect a progressive trend of structural deterioration, highlighting the urgent need for repair and rehabilitation interventions.

The collected data and analytical results from this study offer a practical guideline for developing preventive maintenance strategies for concrete bridges. Such measures are essential to ensure structural safety, optimize service life extension, and enhance the sustainability of bridge infrastructure management within the region.

Keywords: Concrete bridges, Carbonation, Reinforcement corrosion

1. บทนำ

เขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (Eastern Economic Corridor: EEC) เป็นพื้นที่ยุทธศาสตร์สำคัญของประเทศไทยที่มีบทบาทในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจ ผ่านการส่งเสริมอุตสาหกรรมเป้าหมายและการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างสะพานคอนกรีต ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบขนส่งและโลจิสติกส์ในพื้นที่ดังกล่าว (กรมทางหลวง)

โครงสร้างสะพานคอนกรีตในเขต EEC ต้องเผชิญกับปัจจัยเสี่ยงที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ เช่น กระบวนการคาร์บอนเนชัน (carbonation) และการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ซึ่งทั้งสองปัจจัยเป็นสาเหตุสำคัญที่ลดความมั่นคงและอายุการใช้งานของโครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญ (JSCE, AU) โดยเฉพาะในบริเวณที่มีลักษณะอากาศร้อนชื้นและมีความชื้นสัมพัทธ์สูงเช่นจังหวัดชลบุรี ระยอง และฉะเชิงเทรา (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2568) ซึ่งสภาพแวดล้อมเช่นนี้ยิ่งส่งผลให้กระบวนการเสื่อมสภาพของสะพานคอนกรีตเกิดขึ้นรวดเร็วยิ่งขึ้น (Mori, 2024)

จากความสำคัญของปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสภาพของโครงสร้างสะพานคอนกรีตในเขต EEC โดยเน้นพื้นที่จังหวัดชลบุรี ระยอง และฉะเชิงเทรา โดยนำวิธีการทางคณิตศาสตร์ร่วมกับข้อมูลจากภาคสนามมาใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อประเมินระดับความเสี่ยงและสภาพปัจจุบันของสะพานคอนกรีตในพื้นที่ศึกษา ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะช่วยเป็นแนวทางในการวางแผนบำรุงรักษาและซ่อมแซมอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อยืดอายุการใช้งานของโครงสร้าง และสนับสนุนการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืนในระยะยาว

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีต

โครงสร้างคอนกรีตสามารถเสื่อมสภาพได้จากหลายปัจจัย เช่น ความล้าของวัสดุ (Fatigue) และการแช่แข็งและละลายน้ำแข็งซ้ำ ๆ (Freezing and Thawing) แต่ปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือการกัดกร่อนของเหล็กเสริมซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการรับแรงของโครงสร้างคอนกรีต Tottori (2003) ได้แบ่งการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทที่รอยร้าวเกิดก่อนการกัดกร่อน (crack-precedence type) และประเภทที่การกัดกร่อนเกิดก่อนรอยร้าว (rebar corrosion-precedence type) สำหรับประเภทที่การกัดกร่อนเกิดก่อนรอยร้าว นั้น สามารถแบ่งย่อยเพิ่มเติมได้อีกเป็น การคาร์บอนเนชัน (Carbonation) และความเสียหายจากเกลือ (Salt Damage) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะสมมติว่าการกัดกร่อน

ของเหล็กเสริมเกิดจากการคาร์บอนเนชันโดยศึกษาผลจากสภาพแวดล้อมบริเวณสะพาน

JSCE (2022) ได้แบ่งกระบวนการเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตซึ่งเกิดจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมออกเป็น 4 ช่วง ดังนี้

1. Latent period คือ ช่วงที่เหล็กเสริมภายในคอนกรีตยังไม่เกิดการกัดกร่อนขึ้น
2. Progressive period คือ ช่วงที่เหล็กเสริมเริ่มเกิดการกัดกร่อน
3. Accelerated period คือ ช่วงที่มีรอยแตกเกิดขึ้นบนคอนกรีตส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนเหล็กเสริมสูงขึ้น
4. Deteriorated period คือ ช่วงที่โครงสร้างรับแรงได้น้อยลงอย่างมีนัยสำคัญซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของการกัดกร่อนเหล็กเสริม

2.2 ดัชนีที่ใช้สำหรับการประเมินสภาพคอนกรีต

JSCE (2022) ได้เสนอดัชนี Margin ratio for safety และ Margin ratio for Durability ที่ใช้สำหรับประเมินสภาพโครงสร้างคอนกรีตที่มีอยู่หรือ โครงสร้างคอนกรีตใหม่ที่เพิ่งก่อสร้างเสร็จ หรือโครงสร้างคอนกรีตที่ได้รับการซ่อมแซมแล้วดังสมการ 2.1 และ 2.2

$$M_s = \frac{R_D - S_D}{S_D} \times 100[\%] \quad 2.1$$

โดยที่ M_s คือ Margin ratio for safety (%)

R_D คือ Cross-sectional force (N)

S_D คือ Strength (N)

$$M_d = \frac{T_{Rd} - T_{Sd}}{T_{Sd}} \times 100[\%] \quad 2.2$$

โดยที่ M_d คือ Margin ratio for Durability (%)

T_{Rd} คือ เวลาที่เริ่มเกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุ (ปี)

T_{Sd} คือ อายุการใช้งานที่คาดหวัง (ปี)

อย่างไรก็ตามดัชนี margin ratio ที่ถูกเสนอโดย (JSCE, 2022) ตามที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ ซึ่งสามารถใช้สำหรับโครงสร้างที่ยังไม่ได้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมเท่านั้น

Mori (2024) จึงได้นำเสนอดัชนี Deviation ratio ดังแสดงในสมการ 2.3 ที่สามารถใช้ในการประเมินสภาพสะพานหลังจากที่เกิดการกัดกร่อนไปแล้ว หรือ อยู่ในช่วง progressive period หรือหลังจากนั้น ซึ่งดัชนีนี้เป็นฟังก์ชันที่มีความสัมพันธ์กับเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.1

$$D_d = \frac{T_{Ni}}{T_{Li}} \times 100 + 100(i-1) \quad 2.3$$

โดยที่ D_d คือ Deviation ratio (%)

T_{Ni} คือ ระยะเวลาของเหตุการณ์เสื่อมสภาพในกระบวนการเสื่อมสภาพ ณ เวลาที่ทำการคำนวณ

$$T_{Ni} = t - t_i \quad 2.4$$

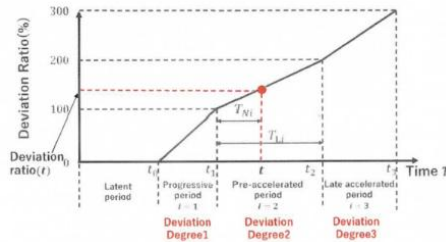
โดยที่ t คือ จำนวนปีที่ใช้งานทั้งหมด

t_i คือ จำนวนปีที่ใช้งานเกิดการเสื่อมสภาพ

$$T_{Li} = t_{i+1} - t_i \quad 2.5$$

โดยที่ T_{Li} คือ จำนวนปีที่ใช้ในการเข้าสู่กระบวนการเสื่อมสภาพ ณ เวลาที่ทำการคำนวณ

t_{i+1} คือ จำนวนปีที่เหลือก่อนจะเสื่อมสภาพในอีกระดับเทียบกับระดับปัจจุบัน



รูปที่ 2 - 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Deviation ratio กับเวลา

Mori (2024) ได้แบ่งช่วงของ Deviation ratio ออกเป็น 3 ระดับโดยสื่อถึงความเสียหายที่เกิดกับโครงสร้างคอนกรีต โดย ค่า Deviation ratio 100%, 200%, และ 300% จะเป็นขอบเขตของ deviation degree 1, 2 และ 3 สามารถสื่อถึงสภาพการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีต ดังแสดงในตาราง 2.1 นอกจากนี้เพื่อจะใช้ deviation ratio ในการประเมินสภาพสะพานในเขต EEC ต้องเลือกใช้สมการที่เหมาะสมในการคาดการณ์อัตราการเกิดการเสื่อมสภาพทั้งในช่วงกระบวนการเกิดคาร์บอนขึ้น และกระบวนการกัดกร่อนของเหล็กเสริมหลังจากที่ Passive film โดนทำลายไปแล้วโดยกระบวนการคาร์บอนขึ้น

ตาราง 2.1 สภาพของโครงสร้างคอนกรีตกับ Deviation degree แต่ละระดับ

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

2.3 การทำนายอัตราการเกิดคาร์บอนขึ้นและขีดจำกัดการเกิด

การทำนายอัตราการเกิดคาร์บอนขึ้นสามารถทำได้โดยการคำนึงถึงปัจจัยต่างๆจากสภาพแวดล้อมภายนอกบริเวณสะพานที่สนใจ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการทำการทดลอง และพัฒนาสมการโดยแต่ละสมการจะมีตัวแปรและรูปแบบสมการที่แตกต่างกัน

Architectural Institute of Japan (2016) ได้เสนอสมการคาดการณ์อัตราการเกิดคาร์บอนขึ้นในมาตรฐาน Durable Design and Construction Guidelines and Commentary for Reinforced Concrete Buildings ดังแสดงในสมการที่ 2.6 และ 2.7

$$X_c = A \sqrt{t} \quad 2.6$$

โดยที่ X_c คือ Carbonation depth (mm)

A คือ ค่าสัมประสิทธิ์อัตราการเกิดคาร์บอนขึ้น (mm/ปี)

t คือ จำนวนปีนับจากก่อสร้างเสร็จ

$$A = k \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \quad 2.7$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ ที่ขึ้นกับอัตราการเกิดคาร์บอนขึ้น, 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 2.8

β_3 คือ ค่าคงที่ ที่ขึ้นกับความเข้มข้นของ CO_2

$$\beta_2 = k_r \cdot H_u \cdot (100 - H_u) \cdot (140 - H_u) / 192000 \quad 2.8$$

โดยที่ k_r คือ ค่าคงที่ที่ขึ้นกับอัตราการเกิดคาร์บอนขึ้น, 1.0 สำหรับสภาพแวดล้อมแบบเปียก, 1.6 สำหรับสภาพแวดล้อมแบบแห้ง

H_u คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%)

2.4 การทำนายอัตราการกัดกร่อน

Kakegawa et al. (2012.2) ได้พัฒนาสมการคำนวณอัตราการกัดกร่อน (ดังแสดงในสมการที่ 2.9 และ 2.10 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.) ตัวอย่างคอนกรีตที่ถูกบ่มในอุณหภูมิและความชื้นที่ควบคุม ก่อนเข้าสู่กระบวนการเร่งคาร์บอนขึ้นด้วยอุณหภูมิ 30°C ความชื้น 60% และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 5% โดยทำการทดลองในเมือง Tsukuba ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ย 13.8°C และความชื้นสัมพัทธ์ 75%

$$w = q \sqrt{t} \quad 2.9$$

โดยที่ q คือ อัตราการกัดกร่อนเหล็ก (mg/cm²/ปี)

w คือ ปริมาณสนิมเหล็ก (mg/cm²)

$$q = \frac{\gamma_1}{C^{\gamma_2}} \cdot (W/C - \gamma_3) \quad 2.10$$

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 (มิลลิเมตร)

ค่า $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ ขึ้นกับความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออนดังแสดงใน ตาราง 2.2

ตาราง 2.2 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

สำหรับการคาดการณ์สภาพปัจจุบันของสะพานสามารถทำได้โดยเปรียบเทียบปริมาณการกัดกร่อนที่ได้จากการสมการกับขีดจำกัดการเกิดปริมาณการกัดกร่อนของความเสียหายในแต่ละระดับ

1. ช่วงก่อนเกิดรอยแตก (Progressive period)

(Yokozeki, 1997) ได้เสนอสมการสำหรับขอบเขตการเกิดการกัดกร่อน (mg/cm²) ก่อนที่คอนกรีตจะเกิดรอยแตกอันเป็นผลมาจากสนิมเหล็ก ดังแสดงในสมการที่ 2.11

$$W_{cr} = -1.841\psi(\psi - 8.661) + 145.1\alpha^{-1.194} + 3809A^{-0.8351} + 10.6X_1 - 72.3 \quad 2.11$$

โดยที่ W_{cr} คือ ปริมาณการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่เริ่มส่งผลให้เกิดรอยแตกบนคอนกรีต (mg/cm²)

ψ คือ Creep coefficient (ปกติอยู่ในช่วง 0.4 – 0.6)

α คือ Coefficient of volume expansion (ปกติประมาณ 3.2)

A คือ Corrosion angle (ปกติอยู่ที่ 360°)

X_1 คือ Shape function , ดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$X_1 = \min \left(\frac{\text{covering}}{\text{rebar diameter}}, \frac{\text{spacing of rebar}}{\text{rebar diameter}/1.75} \right) \quad 2.12$$

(Tottori, 2003) ได้เสนอสมการที่มีรูปแบบง่ายขึ้น โดยอ้างอิงมาจาก (Yokozeki, 1997) โดยทำการแทนค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ในสมการของ Yokozeki ดังแสดงในสมการที่ 2.13

$$W_{cr} = 10 \left(\frac{c}{\phi} \right) \quad 2.13$$

โดยที่ W_{cr} คือ ปริมาณการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่เริ่มส่งผลให้เกิดรอยแตกบนคอนกรีต (mg/cm²)

c คือ ระยะหุ้มคอนกรีต (mm)

ϕ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (mm)

2. ช่วงก่อนเกิดการกะเทาะออกของคอนกรีต (Pre-Accelerated period)

จาก (Mori, 2024) ได้กำหนดให้อัตราการกัดกร่อนหลังจากเกิดรอยแตกมีค่าเท่าเดิมหลังเกิดรอยแตก อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาที่ชี้ให้เห็นว่า อัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นหลังเกิดรอยแตก แต่ไม่ได้มีการจัดทำสมการหรือค่าที่แน่นอนออกมา ในที่นี้เพื่อความเรียบง่ายจึงกำหนดให้อัตราการกัดกร่อนคงที่

(Tottori, 2003) ได้เสนอสมการที่ได้มาจากการทดลองสำหรับบ่งบอกขอบเขตการเกิดสนิมเหล็กก่อนที่คอนกรีตจะกะเทาะออก

$$W_{sp} = 44 \left(\frac{c}{\phi} \right) \quad 2.14$$

โดยที่ W_{sp} คือ ปริมาณการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่เริ่มส่งผลให้เกิด

การกะเทาะออกบนคอนกรีต (mg/cm²)

c คือ ระยะหุ้มคอนกรีต (mm)

ϕ คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (mm)

ในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้สมการของ Tottori (2003) สำหรับการประเมินปริมาณการกัดกร่อนของเหล็กเสริมทั้งในช่วงก่อนเกิดรอยแตกเร็ว (Progressive period) และช่วงก่อนเกิดการกะเทาะของคอนกรีต (Pre-accelerated period) เนื่องจากสมการดังกล่าวมีรูปแบบที่เรียบง่าย ชัดเจน และสามารถประยุกต์ใช้กับข้อมูลภาคสนามได้สะดวกมากกว่าสมการอื่นที่ต้องการพารามิเตอร์จำนวนมากและมีความซับซ้อนสูง เช่น สมการของ Yokozeki (1997) ซึ่งต้องกำหนดค่าคงที่หลายตัวแปร เช่น Creep coefficient, Corrosion angle และ Shape function

นอกจากนี้ สมการของ Tottori ยังถูกพัฒนาโดยอ้างอิงจากผลการทดลองจริงที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของเหล็กเสริมภายใต้สภาวะการเกิดคาร์บอนขึ้น ทำให้สามารถใช้อธิบายลักษณะการเริ่มต้นของการแตกเร็ว และการกะเทาะของคอนกรีตจากการกัดกร่อนได้อย่างเหมาะสม และสอดคล้องกับขอบเขตและวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ที่ต้องการประเมินแนวโน้มการเสื่อมสภาพของสะพานในระดับที่ใช้งานได้จริงในประเทศไทย

3. วิธีการดำเนินการ

การประเมินความเสียหายที่เกิดจากคาร์บอนขึ้นของสะพานในเขต EEC (ชลบุรี ระยอง ฉะเชิงเทรา) โดยใช้สมการเพื่อทำนายอายุการใช้งานของสะพาน อ้างอิงตามมาตรฐานแบบมาตรฐานสำหรับการออกแบบและก่อสร้างทางหลวง และมาตรฐาน AASHTO LRFD Bridge Design Specification

3.1 เก็บรวบรวมข้อมูลและเตรียมข้อมูล

3.1.1 การรวบรวมข้อมูล

ขอความอนุเคราะห์ข้อมูลหน่วยงานราชการที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมทางหลวงหรือองค์กรท้องถิ่น โดยข้อมูลดังกล่าวได้รวบรวม จำนวนสะพาน ชนิดสะพาน ความยาวสะพาน ปีที่สร้างสะพาน รูปแบบการใช้งาน และพิกัดตำแหน่งของสะพาน

3.1.2 เก็บข้อมูลเพิ่มเติมจากอินเทอร์เน็ต

ใช้ฟังก์ชัน Street View ของ Google Maps ในการดูลักษณะสะพาน ในเชิงโครงสร้างบางตัวที่ไม่ได้ระบุในข้อมูลที่นำมา เช่น การดูชนิดของคาน สะพานเพื่อระบุประเภทของสะพาน การดูรูปแบบของราวสะพานเพื่อประมาณอายุของสะพาน หากไม่สามารถเก็บข้อมูลได้เนื่องจากข้อจำกัดมุมมองของ Google Maps ผู้วิจัยต้องลงพื้นที่เก็บข้อมูล



รูปที่ 3 - 1 ตัวอย่างสะพานข้ามแยกบายพาสพนัสนิคม ทล.361

3.1.3 จัดทำฐานข้อมูลสะพาน

นำข้อมูลที่รวบรวมได้จากหน่วยงานราชการ, Google Maps และจากการลงพื้นที่ และนำมาจัดเรียงใน Excel เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ข้อมูล

3.2 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 และแกน Y: Margin Ratio for Safety

3.2.1 Margin ratio for durability

ใช้ประเมินช่วงที่เกิดคาร์บอนขึ้นในสะพานคอนกรีต แต่เหล็กเสริมภายในคอนกรีตยังไม่เกิดการกัดกร่อน ซึ่งเหมาะสำหรับการวิเคราะห์สะพานคอนกรีตที่เพิ่งสร้างเสร็จหรือสะพานคอนกรีตที่ได้รับการซ่อมแซมแล้ว โดยค่าดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

ทั้งนี้การใช้ดัชนี Margin Ratio for Durability จะต้องเลือกใช้สมการคาดการณ์อัตราการเกิดคาร์บอนขึ้นที่เหมาะสมเพื่อให้ค่าที่ได้ถูกต้องและเหมาะสมมากที่สุด

3.2.2 Margin ratio for safety

การเปรียบเทียบกำลังของแรงเฉือนและโมเมนต์ ระหว่างสภาพการใช้งานจริงและกำลังที่ออกแบบดังแสดงในสมการ 2.1 และ 2.2 หากในสภาพการใช้งานจริงข้อมูลไม่ระบุให้ทำการคาดการณ์โดยอ้างอิงมาตรฐาน AASHTO LRFD Bridge Design Specification ค่ากำลังที่ออกแบบวิเคราะห์จากแบบที่ใช้ก่อสร้างของสะพานนั้นๆ หากไม่มีแบบก่อสร้างสะพานจะต้องทำการอ้างอิงหน้าตัดสะพานตามแบบมาตรฐานสำหรับการออกแบบและก่อสร้างทางหลวง ซึ่งจากการรวบรวมข้อมูล กรมทางหลวงได้จัดทำมาตรฐานออกมาทั้งหมด 4 เล่ม

1. Standard Drawings for Highway Design and Construction 2015
2. Standard Drawings for Highway Construction 1994
3. Standard Drawings for Highway Construction 1991
4. Standard Drawings for Highway Construction 1972

ทั้งนี้หน้าตัดที่ใช้สำหรับการหาลำตัวของโครงสร้างต้องเลือกใช้ตามมาตรฐานเล่มนั้นๆ ในการหาลำตัวโดยระบุจากปีที่ทำการก่อสร้าง



รูปที่ 3 - 2 ตัวอย่างแบบมาตรฐานของกรมทางหลวง ปี 1991

3.2.3 Deviation ratio

ใช้ประเมินสภาพสะพานคอนกรีตที่เกิดกระบวนการคาร์บอนขึ้นถึงระยะที่จะทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมในคอนกรีต โดยแบ่งระดับความเสียหายเป็น 3 ระดับ (Degree) ระดับที่ 1 เหล็กเสริมเริ่มเกิดการกัด

กร่อน ระดับที่ 2 เกิดรอยแตกบนผิวคอนกรีต ระดับที่ 3 คอนกรีตกะเทาะจนเห็นเหล็กเสริม โดยสามารถใช้สมการ 2.3 ในการคำนวณค่า Deviation ratio

3.3 การตรวจสอบความแม่นยำของผลการวิเคราะห์

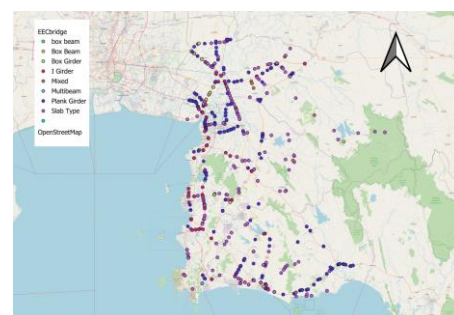
ในการประเมินสภาพโดยใช้ดัชนี Margin Ratio for Durability และดัชนี Deviation Ratio จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเลือกใช้สมการคาดการณ์ให้เหมาะสม ทั้งอัตราการเกิดคาร์บอนขึ้นที่ใช้ในการทำนายจำนวนปีที่ใช้ในการเกิดคาร์บอนขึ้นถึงระยะที่จะทำให้เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมซึ่งนำไปใช้ในการหาค่า Margin Ratio for Durability และอัตราการกัดกร่อนเหล็กเสริมเพื่อจะทำนายจำนวนปีที่เกิดความเสียหายรูปแบบต่างๆซึ่งนำไปใช้หาค่า Deviation Ratio ซึ่งในโครงการนี้จะทำการเลือกใช้สมการที่เหมาะสมที่สุดหรือการปรับแก้ค่าที่ได้จากสมการ โดยอ้างอิงตามสภาพสะพานจริงและผลการเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตจากสะพาน เพื่อให้การประเมินแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากที่สุด

4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

จากค่าดัชนี Margin Ratio for Safety, Margin ratio for durability และดัชนี Deviation ratio ที่ได้กล่าวไป ซึ่งในบทนี้จะเป็นการนำค่าดัชนีดังกล่าวทั้ง 3 ค่า มาใช้ในการประเมินสภาพสะพานใน เขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก โดยสรุปจำนวนสะพานและชนิดของสะพานดังตาราง 4.1

ตาราง 4. 1 ข้อมูลสะพานในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก

ข้อมูลสะพานในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก			
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		



รูปที่ 4 - 1 แผนที่ของตำแหน่งสะพานที่ทำการศึกษา

4.1 การคำนวณหาค่า Margin Ratio for Safety

จากสมการที่ 3.2 และ 3.3 ที่ได้ เสนอในบทที่ 3 จากสูตรจะเห็นได้ว่าการคำนวณหาค่าดัชนี 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 เพราะเป็นชิ้นส่วนที่รับน้ำหนักบรรทุกโดยตรง ซึ่งหากเกิดการเสียหายจะส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของสะพานและผู้ใช้

4.1.1 การคำนวณ Ultimate Load (AASHTO LRFD Bridge Design Specification)

1) การหาค่า Moment และ Shear จาก Dead load

ค่า Bending moment จะมีค่าสูงที่สุดบริเวณกึ่งกลางของสะพาน สามารถคำนวณ จากสมการ 4.1 และ 4.2 โดยสะพานทั้ง 5 ชนิด RC Slab type PC Box Beam , PC Plank Girder PC Multi Beam และ PC I girder ใช้หลักการเดียวกันในการคำนวณ

$$M_{DC} = \frac{W_{DC} \cdot L^2}{8} \quad 4.1$$

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

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

L คือ ความยาว Span (ft)

$$M_{DW} = \frac{W_{DW} \cdot L^2}{8} \quad 4.2$$

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

W_{DW} คือ Dead load นอกจากโครงสร้างสะพานเช่น ผิวจราจร (kip/ft)

shear force จะมีค่ามากที่สุดบริเวณปลายของสะพาน โดยสามารถหาค่าดังกล่าวได้ดังแสดงในสมการที่ 4.3 ถึง 4.4

$$V_{DC} = \frac{W_{DC} \cdot L}{2} \quad 4.3$$

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

$$V_{DW} = \frac{W_{DW} \cdot L}{2} \quad 4.4$$

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

2) การหาค่า Moment และ Shear จาก Live load

ชนิด RC Slab type

$$M_{LL} = \frac{M_{lane} + \max(M_{truck}, M_{tandem})}{\min(E_{1+design lanes}, E_{1design lane})} \quad 4.5$$

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

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

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

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

E คือ Equivalent width (mm)

$$V_{LL} = \frac{V_{lane} + \max(V_{truck}, V_{tandem})}{\min(E_{1+design lanes}, E_{1design lane})} \quad 4.6$$

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

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

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

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

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

$$M_{LL} = M_{lane} + \max(g_{m1}, g_{m2}) \cdot \max(M_{truck}, M_{tandem}) \quad 4.7$$

โดยที่ g_{m1} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของโหลดเมื่อมีช่องจราจรเพียงหนึ่งช่อง

g_{m2} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของโหลดเมื่อมีช่องจราจรสองช่องหรือมากกว่า

$$V_{LL} = V_{lane} + \max(g_{v1}, g_{v2}) \cdot \max(V_{truck}, V_{tandem}) \quad 4.8$$

โดยที่ g_{v1} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของโหลดเมื่อมีช่องจราจรเพียงหนึ่งช่อง

g_{v2} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของโหลดเมื่อมีช่องจราจรสองช่องหรือมากกว่า

3) รวม Loads ทั้งหมดที่กระทำบนโครงสร้างสะพาน RC Slab type

$$M_u = M_{DC} + M_{DW} + M_{LL} \quad 4.9$$

$$V_u = V_{DC} + V_{DW} + V_{LL} \quad 4.10$$

4) การคำนวณหา Capacity ของสะพานคอนกรีต

คำนวณหาค่าโมเมนต์แรง (Moment)

ประเภท RC Slab type

$$M_n = A_s f_s \left(d_s - \frac{c \beta_1}{2} \right) - A'_s f'_s \left(d'_s - \frac{c \beta_1}{2} \right) \quad 4.11$$

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)

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

$$M_n = A_{ps} f_{ps} \left(d_p - \frac{c \beta_1}{2} \right) + A_s f_s \left(d_s - \frac{c \beta_1}{2} \right) - A'_s f'_s \left(d'_s - \frac{c \beta_1}{2} \right) \quad 4.12$$

โดยที่ f_{ps} คือ กำลังรับแรงดึงเฉลี่ยของเหล็กเสริมแรงดึงแบบอัดแรง (ksi)

$$V_n = V_c + V_s + V_p \quad 4.13$$

โดยที่ V_n คือ กำลังรับแรงเฉือนรวม (kip)

V_c คือ กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต (kip)

V_s คือ กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริมแรงเฉือน (kip)

V_p คือ กำลังรับแรงเฉือนที่เกิดจากแรงล่วงหน้า ในทิศทางแรงเฉือน (kip)

คำนวณหาค่าแรงเฉือน (Shear)

$$V_c = 0.0316 \beta \lambda \sqrt{f'_c} b_v d_v \quad 4.14$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d_v (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha}{s} \lambda_{duct} \quad 4.15$$

โดยที่ β คือสัมประสิทธิ์สำหรับแรงเฉือนและแรงดึงที่ส่งผ่านในคอนกรีตที่แตกกว้างเป็นแนวทแยง

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)

5) คำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัย

อัตราส่วนความปลอดภัยหาจากแรงภาคตัดขวางและความแข็งแรงของโครงสร้างที่คำนวณ จากสมการที่ 4.16 และ 4.17 อัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับโมเมนต์คดคำนวณได้ดังนี้

$$M_s = \frac{M_n - M_u}{M_u} \times 100 \quad 4.16$$

$$M_s = \frac{V_n - V_u}{V_u} \times 100 \quad 4.17$$

ค่าที่มากที่สุดที่ได้จากสมการดังกล่าวจะถูกนำมาใช้ ดังแสดงในสมการ 2.2

4.2 การคำนวณหาค่า Margin ratio for durability

จากที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ ดัชนี Margin Ratio for Durability จะถูกใช้สำหรับสะพานที่ยังไม่ถึงขีดจำกัดของการเกิด Carbonation (10 mm) โดย จะสามารถทราบว่าจะพบตัวใดว่าถึงขีดจำกัดหรือไม่ทำได้โดยเทียบกับจำนวนปีที่ จะ Carbonation ถึงขีดจำกัด ซึ่งได้จากสมการที่ 2.6 และ 2.7

ประเภทของค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ จากสมการที่ 2.7 ถูกกำหนดโดยสภาพแวดล้อมภายในพื้นที่เขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก ดังตาราง 4.2 ตาราง 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์ที่กำหนดสำหรับสมการที่ 2.7

ชนิดค่าสัมประสิทธิ์	ค่าสัมประสิทธิ์	หน่วย
k , ค่าคงที่ที่ขึ้นกับอัตราการเกิดคาร์บอนเนชัน	17.2	mm/ $\sqrt{\text{ปี}}$
α_1 , ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับประเภทของมวลรวมในคอนกรีต	1.0	-
α_2 , ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับประเภทของปูนซีเมนต์	1.0	-
อุณหภูมิเฉลี่ย 30 ปี	28	องศาเซลเซียส
k_r , ค่าคงที่ที่ขึ้นกับอัตราการเกิดคาร์บอนเนชัน (Wet environments)	1.0	-
H_u , ค่าความชื้นสัมพัทธ์	80	%
CO ₂ Concentration	0.11	%

หลังจากนั้นทำการคำนวณเพื่อหาจำนวนปีที่ จะ Carbonation ถึงขีดจำกัด และนำไปคิดหาค่า Margin ratio for durability ดังแสดงในสมการที่ 2.2

4.3 การคำนวณหาค่า ดัชนี Deviation ratio

คำนวณ Deviation ratio ในสมการของ Yokozeki เพื่อหาปริมาณการกัดกร่อนของเหล็กเสริมที่เริ่มส่งผลให้เกิดรอยแตก

$$W_{cr} = 10 \left(\frac{c}{\phi} \right) \quad 4.18$$

$$q = \alpha \cdot \frac{\gamma_1}{C^{1/2}} \cdot (W/C - \gamma_3) \quad 4.19$$

ทำการคำนวณหา ระยะเวลาก่อนที่จะเกิดรอยแตกบนคอนกรีต เพื่อที่จะนำค่าที่คิดได้ไปคำนวณ หาค่าดัชนี Deviation ratio ในสมการที่ 2.3

4.4 นำดัชนีมาใช้ในการประเมินสภาพสะพานในเขต EEC

จาก ค่า ดัชนี Margin Ratio for Safety, Margin Ratio for Durability และ Deviation ratio ที่ได้จากในหัวข้อ 4.1 ถึง 4.3 สามารถนำมา plot เพื่อจะได้ทราบว่าสะพานแต่ละสะพานในพื้นที่ที่ อยู่ใน Deviation degree ไหน ตั้งแต่ 1 ถึง 3 ตามที่ (Mori, 2024) ได้จำแนกเอาไว้ ดังแสดงในตาราง 2.1

เมื่อนำค่าดัชนีของสะพานทุกตัวในเขต EEC มา Plot จะสามารถเห็นการกระจายตัวของสภาพสะพานทั้งหมด โดยฝั่งขวาของกราฟจะเป็นสะพานที่ยังไม่มีการกัดกร่อนขึ้นบนเนื้อเหล็กเสริม ส่วนทางซ้ายจะเป็นสะพานที่เริ่มมีการกัดกร่อนของเหล็กเสริมและส่งผลต่อโครงสร้างคอนกรีตในระดับต่างๆกัน ดังแสดงในรูปภาพที่ 4.1

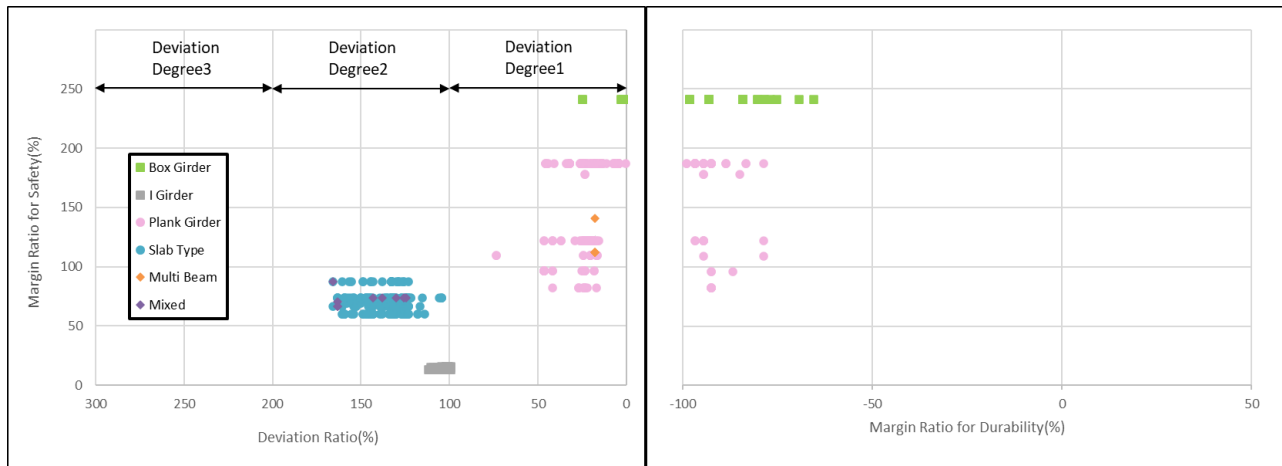
4.5 การทดสอบความลึกคาร์บอนเนชันจากภาคสนาม

จากผลการตรวจสอบความลึกของคาร์บอนเนชันของคอนกรีตในภาคสนามที่ได้จากการเก็บตัวอย่างสะพาน 3 แห่ง ได้แก่ สะพานข้ามแยกบายพาสบ้านบึง สะพานคลองไผ่พระ และสะพานข้ามทางรถไฟ ได้ผลการทดสอบ ดังตารางที่ 4.3

จากผลการตรวจสอบความลึกของคาร์บอนเนชันของคอนกรีตในภาคสนามที่ได้จากการเก็บตัวอย่างสะพาน 3 แห่ง ได้แก่ สะพานข้ามแยกบายพาสบ้านบึง สะพานคลองไผ่พระ และสะพานข้ามทางรถไฟ พบว่า ค่าความลึกจากการทดลองมีแนวโน้ม น้อยกว่าค่าที่ได้จากสมการทฤษฎี ที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มประเมิณค่าในเชิงอนุรักษ์นิยม (conservative)

โดยค่าความแตกต่างเฉลี่ยระหว่างค่าจากสมการและค่าจากตัวอย่างอยู่ในช่วง 12.79%–17.70% ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ในทางวิศวกรรม เนื่องจากไม่ได้มีความคลาดเคลื่อนมากเกินไป และสามารถนำไปใช้ประเมินแนวโน้มการเสื่อมสภาพของโครงสร้างได้อย่างเหมาะสมในระดับเบื้องต้น

ทั้งนี้ ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงความสอดคล้องในเชิงพฤติกรรมของโครงสร้าง และสามารถใช้ในการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองที่นำมาใช้งานวิจัย เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือก่อนการประยุกต์ใช้กับสะพานอื่น ๆ ในพื้นที่ศึกษา



รูปที่ 4 - 2 ความสัมพันธ์ของดัชนี Margin Ratio for Safety,
Margin Ratio for Durability และ Deviation ratio

ตารางที่ 4.3 ความลึกคาร์บอนเนชันจากตัวอย่าง 3 สะพาน

ชื่อสะพาน	อัตราCarbonation (mm/ปี)	ค่าจากสมการ (cm)	ค่าจากตัวอย่าง (cm)	ผลต่าง (%)
สะพานข้ามแยกบายพาสบ้านบึง	7.5	4.04	3.50	13.37
สะพานคลองไผ่พระ	7.5	4.86	4.00	17.70
สะพานข้ามทางรถไฟ	7.5	3.44	3.00	12.79



รูปที่ 4 - 2 การทดสอบหาความลึกคาร์บอนเนชัน ของสะพานข้ามแยกบายพาสบ้านบึง

5. บทสรุป และอภิปรายผล

5.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสภาพสะพานคอนกรีตในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก (EEC) โดยเน้นการตรวจสอบกระบวนการเสื่อมสภาพจาก คาร์บอนชั่น และการกัดกร่อนของเหล็กเสริม ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความมั่นคงและอายุการใช้งานของโครงสร้างสะพาน

การประเมินสภาพสะพานดำเนินการโดยใช้ดัชนี 3 ประเภท ได้แก่

- Margin Ratio for Safety
- Margin Ratio for Durability
- Deviation Ratio

จากการวิเคราะห์ข้อมูลสะพานคอนกรีตในเขตพัฒนาพิเศษภาคตะวันออก โดยใช้ดัชนี Margin Ratio for Safety ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าสะพานจำนวนหนึ่งมีค่าดัชนีดังกล่าว อยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งหมายถึงกำลังรับแรงของโครงสร้างเริ่มมีความเสี่ยงเมื่อเปรียบเทียบกับแรงที่กระทำจริง โดยเฉพาะในส่วนโครงสร้าง Superstructure ที่รับน้ำหนักบรรทุกโดยตรง หากไม่มีการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังในช่วงเวลาอันเหมาะสม อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อการใช้งานสะพานในระยะยาว

ในส่วนของ Margin Ratio for Durability นั้น ซึ่งใช้ประเมินสะพานที่ยังอยู่ในช่วงก่อนการกัดกร่อน (Latent period) พบว่าสะพานประเภท Box Beam และ Plank Girder ยังมีจำนวนสะพานที่อยู่ในช่วงนี้ ได้แก่ Box Beam จำนวน 25 แห่ง และ Plank Girder จำนวน 61 แห่ง สะท้อนว่ายังสามารถวางแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อชะลอกระบวนการเสื่อมสภาพในอนาคต

ในด้านการประเมินด้วยดัชนี Deviation Ratio ซึ่งแบ่งระดับความเสียหายเป็น 3 ระดับตามแนวทางของ Mori (2024) พบว่าสะพานส่วนใหญ่มีค่าดัชนีอยู่ในระดับที่ 2 (Pre-accelerated period) หมายถึงมีรอยแตกร้าวปรากฏบนผิวคอนกรีต อันเป็นผลจากการขยายตัวของสมิเหล็ก ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงและความปลอดภัยในการใช้งาน โดยเฉพาะสะพานประเภท Slab Type มีจำนวนสะพานที่อยู่ในระดับ Degree 2 ถึง 250 แห่ง และ Plank Girder จำนวน 205 แห่ง ซึ่งสะท้อนถึงแนวโน้มการเสื่อมสภาพที่เพิ่มขึ้น และความจำเป็นเร่งด่วนในการวางแผนซ่อมบำรุงและฟื้นฟูโครงสร้าง

ยังพบว่าสะพานบางส่วนในกลุ่ม Box Beam (8 แห่ง) และ Multi Beam (4 แห่ง) อยู่ในระดับ Degree 1 (Progressive period) ซึ่งหมายถึงเหล็กเสริมเริ่มเกิดการกัดกร่อน แต่ยังไม่มียอยแตกร้าวคอนกรีต การดำเนินการซ่อมแซมในช่วงนี้สามารถลดความเสียหายระยะยาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการประเมินด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เช่น สมการจาก AIJ (2016) และ JSCE (2022) จะช่วยให้สามารถคาดการณ์แนวโน้มการเสื่อมสภาพได้อย่างเป็นระบบและสอดคล้องกับมาตรฐานสากล แต่อย่างไรก็ดี แบบจำลองเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดสำคัญ โดยเฉพาะความไม่แน่นอนของข้อมูลปัจจัยแวดล้อมที่ใช้เป็นพารามิเตอร์ในสมการ เช่น ค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเข้มข้นของ CO₂ ซึ่งมี

แนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลหรือแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ ทำให้ผลการคำนวณอาจไม่สามารถสะท้อนสภาพจริงของพื้นที่ศึกษาได้อย่างแม่นยำ

การเปรียบเทียบค่าความสึกของคาร์บอนชั่นจากสมการกับค่าที่ได้จากการเจาะตัวอย่างภาคสนามในงานวิจัยนี้ สะท้อนถึงข้อจำกัดดังกล่าวอย่างชัดเจน โดยพบว่าค่าที่วัดได้จริงมีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากสมการในระดับ 12.79%–17.70% ซึ่งแม้อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ในเชิงวิศวกรรม แต่ยังคงแสดงให้เห็นถึงความจำเป็นในการปรับเทียบแบบจำลองให้เหมาะสมกับบริบทเฉพาะถิ่นของไทย

ดังนั้น เพื่อให้การประเมินมีความแม่นยำและประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ควรมีการจัดทำฐานข้อมูลสิ่งแวดล้อมรายพื้นที่อย่างต่อเนื่อง เช่น การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดค่าอุณหภูมิ ความชื้น และ CO₂ บริเวณสะพานเป้าหมาย และควรใช้ข้อมูลภาคสนามจริงจากการทดสอบคอนกรีต เช่น ค่าความสึกของคาร์บอนชั่น มาใช้ในการปรับเทียบและยืนยันความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อพัฒนาแบบจำลองที่มีความเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศวัสดุก่อสร้าง และเงื่อนไขการใช้งานในประเทศไทยได้ดียิ่งขึ้น

6. ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้งานวิจัยนี้สามารถพัฒนาและต่อยอดได้อย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอเสนอแนวทางการปรับปรุงและขยายองค์ความรู้ในด้านต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

งานวิจัยสามารถพัฒนาให้มีความละเอียดในเชิงกายภาพมากขึ้น โดยการเก็บข้อมูลจากการเจาะตัวอย่างคอนกรีตในภาคสนามอย่างละเอียด รวมถึงการทดสอบความสึกของคาร์บอนชั่นหรือการวัดค่าคลอไรด์ในเนื้อคอนกรีตจริง เพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการที่ใช้ ในขณะเดียวกัน แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้อาจมีข้อจำกัด เนื่องจากอ้างอิงค่าพารามิเตอร์จากต่างประเทศ จึงควรมีการปรับค่าหรือพัฒนาแบบจำลองใหม่โดยใช้ข้อมูลจากการทดลองภายในประเทศเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประเมินและรองรับการใช้งานในเชิงปฏิบัติได้ดียิ่งขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำ อำนวยความสะดวก และสนับสนุนด้านวิชาการอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการดำเนินงาน ทำให้ข้าพเจ้าสามารถดำเนินโครงการนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ นายพศิน บัวบาน และ นายณัฐศิวัช บุญมา ผู้ช่วยเขียนและให้ความร่วมมือในการรวบรวม วิเคราะห์ข้อมูล และจัดทำเนื้อหาอย่างรอบคอบและทุ่มเท ซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อความสมบูรณ์ของผลงานชิ้นนี้

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องในกระบวนการจัดทำผลงานครั้งนี้ ไม่ว่าจะเป็นโดยทางตรงหรือทางอ้อม

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมอุตุนิยมวิทยา. (2568). สถิติภูมิอากาศ 30 ปีของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (พ.ศ. 2534–2563). from <http://climate.tmd.go.th/statistic/stat30y>
- [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] Department of Public Work and Town. (2012). Durability Design guideline for corrosion resistance. In.
- [5] Iijima, T., Kudo, T., & Tamai, Y. (n.d.). Effect of Temperature on Corrosion Rate of Steel.
- [6] JSCE. (2022). Standard Specification for Concrete [Design]. In.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Mori, K. (2024). Development of performance Assessment Method for Concrete (Publication Number 1X20D074) Waseda]. Tokyo.
- [10] Tottori, S. (2003). *Prediction of Deterioration of Concrete Structures Based on Exposure Tests on Corrosion of Steel Bars* Kyoto University]
- [11] Yang, K.-H., Seo, E.-A., & Tae, S.-H. (2014). Carbonation and CO₂ uptake of concrete. *Environmental Impact Assessment Review*, 46, 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2013.12.003>
- [12] 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