การตรวจสอบการเสื่อมสภาพและประเมินสมรรถนะกำลังรับการรับน้ำหนักของโครงสร้างทางยกระดับทางพิเศษ

The Deterioration Inspections and Performance Evaluations of Load Capacity of the Expressway Structure

ธราดล หงส์อติกุล[1,*] นันทวรรณ พิทักษ์พานิช[2] เทพฤทธิ์ รัตนปัญญากร[3] และสราวุธ พรหมาด[4]

[1] วิศวกรระดับปฏิบัติการ 6 แผนกทดสอบ ควบคุมคุณภาพและพัฒนามาตรฐาน กองวิจัยและพัฒนา การทางพิเศษแห่งประเทศไทย
[2] หัวหน้าแผนกทดสอบ ควบคุมคุณภาพและพัฒนามาตรฐาน กองวิจัยและพัฒนา การทางพิเศษแห่งประเทศไทย
[3] ผู้อำนวยการ กองวิจัยและพัฒนา การทางพิเศษแห่งประเทศไทย
[4] วิศวกรระดับปฏิบัติการ 6 รักษาการหัวหน้าแผนกวางแผนบำรุงรักษาทาง กองบำรุงรักษาทาง ฝ่ายบำรุงรักษา การทางพิเศษแห่งประเทศไทย
**Corresponding author; E-mail address: titharadon@gmail.com*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงแนวทางการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของโครงสร้างและการประเมินสมรรถนะกำลังการรับน้ำหนักของโครงสร้างทางยกระดับของทางพิเศษ ในปัจจุบันการทางพิเศษแห่งประเทศไทยได้เปิดให้บริการทางพิเศษแล้วเป็นจำนวนทั้งสิ้น 8 สายทาง รวมระยะทางกว่า 224.60 กิโลเมตร ซึ่งโครงสร้างทางยกระดับทางพิเศษมีอายุการใช้งานตั้งแต่ 7 ปีจนถึง 42 ปี จึงต้องดำเนินการตรวจสอบการเสื่อมสภาพของโครงสร้างคอนกรีต เพื่อพิจารณาลักษณะความเสียหายของการแตกร้าวของโครงสร้างที่เกิดขึ้น และประเมินสมรรนะกำลังของโครงสร้างทางยกระดับทางพิเศษ เพื่อลดความเสียหายที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด สามารถรองรับปริมาณจราจรในสายทางได้อย่างมีประสิทธิภาพและสร้างความปลอดภัยแก่ผู้ใช้ทางเป็นสิ่งสำคัญ นอกจากนี้เพื่อเป็นการเฝ้าระวัง ป้องกันการเกิดการพังถล่มของโครงสร้างทางยกระดับอันเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของโครงสร้างที่อาจส่งผลต่อความเสียหายในชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนอีกด้วย โดยในการศึกษานี้จะดำเนินการตรวจสอบลักษณะความเสียหาย และวิเคราะห์ ประเมินสมรรถนะกำลังของโครงสร้างทางยกระดับทางพิเศษ ในตำแหน่งของชิ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ โดยการทดสอบโครงสร้างด้วยวิธีแบบไม่ทำลายโครงสร้าง (Non-Destructive Testing) และนำผลการทดสอบดังกล่าวมาใช้ประเมินสมรรถนะกำลังของโครงสร้างทางยกระดับในการรับน้ำหนักของปริมาณจราจรที่เกิดขึ้นในสายทาง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนการบำรุงรักษาเพื่อยับยั้งความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง รวมถึงการเสริมกำลังของโครงสร้างให้มีความมั่นคง แข็งแรงและช่วยยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างทางยกระดับทางพิเศษให้สามารถรองรับการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การตรวจสอบการเสื่อมสภาพ, การประเมินสมรรถนะกำลัง, การรับน้ำหนัก, การทดสอบโครงสร้างด้วยวิธีแบบไม่ทำลายโครงสร้าง

Abstract

This research aims to study about the guideline for the deterioration inspections and the performance evaluations of the load capacity elevated structure to resisting the traffic load on expressway. At present, there are 8 routes with 224.60 kilometers under the operated by the Expressway Authority of Thailand (EXAT). The service life time from the past to the present of the expressway structure was in ranges 7 - 42 years that was a significant to inspected deterioration of the concrete structure. In the process was considered the performance evaluations of the elevated structure expressway and the level of damage from the concrete cracking. The inspections and evaluations can be protected and decreased the level of damage on the structure when it was resisting the traffic load efficiently and it made more safely in the service to the road users. In addition, this process guide line can be used for monitoring and preventing the elevated structure collapse from structural deterioration which is the cause of damage that occurred. These causes of damage affect on properties and risk of life. This case study is about to inspect the level of damage concrete cracking and evaluating the performance of the elevated structure in each elements by used the Non-Destructive Testing. In the results will be use for planning the strengthening and repairing the elevated structure of the expressway efficiently service. It will be made the elevated structure to be stable and more long service life time.

Keywords: Deterioration Inspection, Performance Evaluation, Load Capacity, Non-Destructive Testing

1. บทนำ

ปัจจุบันทางพิเศษได้เปิดให้บริการแก่ผู้ใช้ทางแล้วเป็นจำนวนทั้งสิ้น 8 สายทาง รวมระยะทางกว่า 224.60 กิโลเมตร โดยทางพิเศษมีอายุการใช้งานตั้งแต่ 7 ปีจนถึง 42 ปี ส่งผลทำให้ต้องมีการตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก อันเกิดจากการเสื่อมสภาพของวัสดุองค์ประกอบของโครงสร้าง อาทิเช่น การเกิดรอยร้าว การแตกกะเทาะ การหลุดร่อนของคอนกรีต เป็นต้น เพื่อความปลอดภัยในการให้บริการแก่ผู้ใช้ทาง จึงต้องมีการศึกษาตรวจสอบหาสาเหตุของการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง เพื่อนำมาสู่การวางแผนการซ่อมบำรุงรักษาโครงสร้างทางพิเศษเพื่อแก้ไขหรือยับยั้งความเสียหาย และยืดอายุการใช้งานโครงสร้างทางพิเศษ ประกอบกับการทางพิเศษแห่งประเทศไทยมีภารกิจในการดำเนินการพัฒนาและปรับปรุงทางพิเศษให้เป็นไปตามมาตรฐานและปลอดภัย

โดยส่วนใหญ่รูปแบบของทางพิเศษจะอยู่ในรูปแบบของโครงสร้างทางยกระดับ ดังแสดงในรูปที่ 1

รูปที่ 1 รูปแบบของโครงสร้างทางยกระดับของทางพิเศษที่เปิดให้บริการ

ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพ และความแข็งแรงคงทนของโครงสร้างทางยกระดับคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผ่านมา พบว่า มีสาเหตุมาจากปัญหาสภาวะแวดล้อมที่มีเสี่ยงของการเกิดคาร์บอเนชั่น เนื่องจากบริเวณพื้นที่ตั้งของโครงสร้างทางพิเศษนั้นอยู่ในบริเวณพื้นที่เขตเมืองที่มีปริมาณการจราจรที่มีความหนาแน่นสูง ส่งผลทำให้สภาพแวดล้อมมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่สูง จึงส่งผลทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความเสี่ยงที่จะเกิดสนิมเหล็กขึ้นบริเวณเหล็กเสริมจากสภาวะการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น เมื่อเผชิญกับสภาวะแวดล้อมดังกล่าวนำมาสู่ความเสียหายเกิดการแตกร้าวของโครงสร้าง และการสูญเสียสมรรถนะกำลังการรับน้ำหนักของโครงสร้างไป

ดังนั้น เพื่อความปลอดภัยในการเปิดให้บริการทางพิเศษแก่ประชาชนผู้ใช้ทาง การตรวจสอบการเสื่อมสภาพ และประเมินสมรรถนะกำลังในการรับน้ำหนักของโครงสร้างทางยกระดับของทางพิเศษจึงเป็นสิ่งสำคัญ และเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยการเสื่อมสภาพและการประเมินสมรรถนะกำลังในการรับน้ำหนักของโครงสร้างทางพิเศษเฉลิมมหานคร ซึ่งถือเป็นทางพิเศษสายแรกของประเทศไทยมีลักษณะเป็นโครงสร้างทางยกระดับคอนกรีตเสริมเหล็ก มีระยะทางรวม 27.1 กิโลเมตร ประกอบด้วย 3 สายทาง ได้แก่ สายดินแดง-ท่าเรือ ระยะทาง 8.9 กิโลเมตร สายบางนา-ท่าเรือ ระยะทาง 7.9 กิโลเมตร และสายดาวคะนอง-ท่าเรือ ระยะทาง 10.3 กิโลเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 ขนาด 6 ถึง 8 ช่องจราจร มีความยาวช่วงเสาถึงเสาตอม่อประมาณ 20 – 29 เมตร

รูปที่ 2 ลักษณะของโครงสร้างทางยกระดับของทางพิเศษเฉลิมมหานคร

ในการศึกษานี้จะมีแนวทางการตรวจสอบ และทดสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบไม่ทำลายของโครงสร้าง (Non-Destructive Testing) ตามแนวทางการศึกษาของ [1] สำหรับดำเนินการตรวจสอบการเสื่อมสภาพ และทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างทางยกระดับคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อนำข้อมูลมาใช้วิเคราะห์ประเมินระดับความรุนแรงของการเสื่อมสภาพ และสมรรถนะกำลังในการรับน้ำหนักของโครงสร้าง โดยมีแนวทางการสำรวจความเสียหาย ระดับความรุนแรงของการเสื่อมสภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3

นอกจากนี้ในการตรวจสอบการเสื่อมสภาพ และทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างจะต้องคำนึงถึงผลของการเสื่อมสภาพของวัสดุที่อาจส่งผลต่อสมรรถนะการรับน้ำหนักของโครงสร้าง เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการประเมินสมรรถนะของโครงสร้าง สำหรับนำมาใช้ในการวิเคราะห์วางแผนการซ่อมบำรุงโครงสร้าง และการเสริมกำลังของโครงสร้างในกรณีที่โครงสร้างมีการเสื่อมสภาพเกิดความเสียหายในระดับที่รุนแรง กล่าวคือ โครงสร้างไม่สามารถรองรับน้ำหนักที่เกิดขึ้นจากการจราจรในสายทางได้อย่างปลอดภัย

รูปที่ 3 การทดสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing)

2. แนวทางการศึกษาวิจัย

2.1 รูปแบบของความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

สาเหตุของความเสียหายที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ประกอบด้วย 2 สาเหตุ ดังนี้

2.1.1 ความเสียหายที่เกิดจากแรงกระทำ

เป็นรูปแบบของความเสียหายที่เกิดจากแรงกระทำมีสาเหตุจากการออกแบบที่ผิดพลาด การก่อสร้างที่ผิดพลาด หรือน้ำหนักบรรทุกที่กระทำเกินกว่าค่าที่ได้ออกแบบไว้ซึ่ง มยผ.1902-62 [2] ได้อธิบายรูปแบบของความเสียหายที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำต่าง ๆ อาทิเช่น การแตกร้าวจากแรงอัด แรงดัด แรงเฉือน แรงบิด เป็นต้น อีกทั้งรูปแบบการตรวจสอบความเสียหายในรูปแบบต่าง ๆ ดังกล่าว ตัวอย่างของลักษณะของความเสียหายที่เกิดจากแรงกระทำดังแสดงในรูปที่ 4 และการตรวจสอบด้วยวิธีตรวจพินิจ (Visual Inspection Method) ตามมาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างของ มยผ.1501-51 [3] เพื่อวิเคราะห์ถึงสาเหตุของความเสียหายของโครงสร้าง

รูปที่ 4 ตัวอย่างลักษณะของการเกิดรอยแตกร้าวโครงสร้างทางยกระดับ

2.1.2 ความเสียหายที่เกิดจากการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งาน

เป็นรูปแบบของความเสียหายที่เกิดจากการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานและความคงทนต่อสภาพแวดล้อมที่ตั้งของโครงสร้าง ซึ่งรูปแบบของความเสียหายจะมีทั้ง การเกิดการแตกร้าว การบวมตัว การกร่อนของผิวหน้า การหลุดร่วง การแอ่นตัวของโครงสร้าง เป็นต้น

2.2 การตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้าง

2.2.1 การตรวจสอบเบื้องต้น

เป็นกระบวนการตรวจสอบสภาพของของโครงสร้างด้วยวิธีตรวจพินิจ (Visual Inspection) และการตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้อง อาทิเช่น ข้อกำหนดการก่อสร้างและมาตรฐานการออกแบบรายละเอียดโครงสร้าง ประวัติการซ่อมบำรุง เป็นต้น เพื่อเป็นการรวบรวมข้อมูลที่จำเป็นในการประเมิน และวิเคราะห์โครงสร้าง ทั้งนี้ ในการตรวจสอบเบื้องต้นต้องมีการคำนึงถึงผลของการเสื่อมสภาพของวัสดุต่อสมรรถนะของโครงสร้าง สำหรับใช้เป็นข้อมูลประเมินสมรรถนะของโครงสร้าง ซึ่งหากในการตรวจสอบเบื้องต้นมีข้อมูลในการประเมินไม่เพียงพอ อาจจำเป็นต้องมีการตรวจสอบโครงสร้างโดยละเอียดในลำดับต่อไป

2.2.2 การตรวจสอบโดยละเอียด

เป็นกระบวนการตรวจสอบโดยละเอียดเกี่ยวกับแรงกระทำ และกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง เพื่อประเมินสมรรถนะของโครงสร้างด้านการรับน้ำหนักบรรทุก และตรวจสอบคุณสมบัติวัสดุของโครงสร้าง อาทิเช่น การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต และกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมของชั้นคุณภาพเหล็กเสริมตาม ASTM A370-03 [4] เป็นต้น ทั้งนี้ ในการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะดำเนินการตรวจสอบตามมาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีแบบไม่ทำลาย มยผ.1502-51 [5] โดยการหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก (Rebound Hammer) ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยอ้างอิงประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีต Japanese Society of Civil Engineering, JSCE 2005 [6] ดังสมการที่ (1) เพื่อนำผลตรวจวัดที่ได้มาใช้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีต และใช้สำหรับประเมินสมรรถนะด้านกำลังรับน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

$$f_c' = -18 + (1.27 \times RN) \quad (1)$$

เมื่อ f_c' คือ ค่ากำลังอัดคอนกรีต (MPa)
RN คือ ค่าการสะท้อนของคอนกรีต

รูปที่ 5 การตรวจสอบหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก (Rebound Hammer)

นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบโดยละเอียดเกี่ยวกับการเสื่อมสภาพอันมีสาเหตุมาจากการหดตัวของคอนกรีต และสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อการขยายตัวของความกว้างของรอยร้าวที่ส่งผลต่อการลดลงของสมรรถนะของโครงสร้าง ทั้งนี้ รอยร้าวจะมีผลต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริม เนื่องจากเป็นช่องทางผ่านของความชื้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และเกลือให้สัมผัสกับเหล็กเสริมโดยตรง ซึ่งอาจต้องมีการตรวจสอบความลึกของรอยร้าวว่ามีความลึกถึงระดับของเหล็กเสริมหรือไม่ และควรตรวจสอบระยะของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมด้วยการใช้เครื่องหาตำแหน่งเหล็กเสริมในคอนกรีตตาม มยผ.1505-51 [7] ด้วยวิธีการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction) เพื่อวัดระยะห่างจากผิวโลหะดังแสดงในรูปที่ 6

รูปที่ 6 การตรวจวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมด้วยวิธีการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction)

และการทดสอบหาค่าความลึกของการเกิดคาร์บอเนชั่นสำหรับการประเมินโอกาสการเกิดสนิมของเหล็กเสริม และคาดการณ์ระยะเวลาที่เหล็กเสริมจะเกิดสนิมในอนาคต ซึ่งตรวจวัดโดยวิธีการเจาะและเก็บฝุ่นจากรูเจาะคอนกรีตที่ความลึกประมาณ 4 ถึง 5 เซนติเมตร แล้วนำมาวิเคราะห์

หาความลึกของการเกิดคาร์บอเนชั่นโดยใช้สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน และวัดระยะความลึกของตำแหน่งการเกิดคาร์บอเนชั่น ดังแสดงในรูปที่ 7

รูปที่ 7 การตรวจวัดหาระยะการเกิดคาร์บอเนชั่นในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

การประเมินความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นในช่วงอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซม (Repair-Free Service Life) ตาม มยผ.1332-55 [8] ได้แนะนำให้ประเมินจากสมการ (2)

$$X_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot k\sqrt{t_r} \quad (2)$$

เมื่อ X_c คือ ความลึกของคาร์บอเนชั่น (มิลลิเมตร) วัดจากผิวคอนกรีตที่เผชิญสภาพแวดล้อม ณ อายุคอนกรีตที่ออกแบบ

α_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเปียกชื้น โดยกรณีผิวคอนกรีตไม่สัมผัสความเปียกชื้นขณะใช้งาน จะเท่ากับ 1.0 และกรณีผิวคอนกรีตสัมผัสกับความเปียกชื้น จะเท่ากับ 0.95

α_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ระดับความรุนแรงของสภาพแวดล้อมของคาร์บอเนชั่น โดยกรณีความรุนแรงของสภาพแวดล้อมเสี่ยงต่อคาร์บอเนชั่นน้อย จะเท่ากับ 0.65 กรณีเสี่ยงต่อคาร์บอเนชั่นปานกลาง จะเท่ากับ 0.85 และกรณีเสี่ยงต่อคาร์บอเนชั่นรุนแรง จะเท่ากับ 1.00

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชั่น (มิลลิเมตร/ปี$^{1/2}$)

t_r คือ ค่าแนะนำอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมขั้นต่ำของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทต่าง ๆ ซึ่งในกรณีประเภทโครงสร้างทางด้านคมนาคมขนาดใหญ่ จะมีค่าแนะนำอายุการใช้งานปลอดการซ่อมแซมขั้นต่ำ 40 ปี

2.3 แนวทางการบำรุงรักษาโครงสร้าง

การบำรุงรักษาโครงสร้างเพื่อให้มีสมรรถนะกำลังของโครงสร้างอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ การพิจารณาเลือกวิธีบำรุงรักษาที่เหมาะสมจะต้องคำนึงถึงความสำคัญของโครงสร้าง ผลการตรวจสอบ สาเหตุของความเสียหาย ผลการประเมินระดับความเสียหาย ซึ่งตามมาตรฐาน มยผ. 1902-62 [2] มีแนวทางการพิจารณาตรวจสอบและบำรุงรักษา ดังนี้

1) การตรวจสอบ (Inspection) สมรรถนะของโครงสร้าง เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดกับผู้ใช้งาน ซึ่งอาจมีความเป็นไปได้ที่อายุการใช้งานของโครงสร้างจะลดลง แต่ยังอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถยอมรับได้

2) การตรวจติดตาม (Monitor) สมรรถนะของโครงสร้างเป็นระยะเพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดกับผู้ใช้งาน อันเนื่องจากการเสื่อมสภาพของโครงสร้างตามอายุการใช้งาน

3) การซ่อมแซม (Repair) เพื่อแก้ไขความแข็งแรงของชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีการเสื่อมสภาพหรือที่มีความเสียหายเกิดขึ้นให้มีสภาพดีและมั่นคงแข็งแรงเพียงพอและปลอดภัยต่อการใช้งาน เพื่อป้องกันหรือลดอัตราการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง

4) การเพิ่มสมรรถนะเฉพาะด้าน (Performance Enhancement) เพื่อแก้ไขชิ้นส่วนของโครงสร้างที่มีการเสื่อมสภาพให้มีสมรรถนะที่สูงขึ้น

5) การเสริมกำลัง (Strengthening) เป็นการแก้ไขชิ้นส่วนของโครงสร้างที่มีการเสื่อมสภาพให้มีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างที่สูงขึ้น

นอกจากนี้ในการพิจารณาบำรุงรักษาต้องพิจารณาส่วนของโครงสร้างเดิม และวัสดุซ่อมแซมให้เป็นระบบเดียวกัน ความเข้ากันได้ของคุณสมบัติระหว่างส่วนของโครงสร้างเดิม และวัสดุที่ซ่อมแซม เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาเพื่อให้การบำรุงรักษามีความสมบูรณ์ และคงทน เหมาะสมต่อสภาพแวดล้อมของโครงสร้างและตรงตามวัตถุประสงค์ อาทิเช่น วัสดุสำหรับซ่อมแซมเคลือบผิวป้องกันการซึมผ่าน วัสดุสำหรับอุดปิดรอยร้าวที่เน้นการถ่ายแรงและป้องกันการซึมผ่าน วัสดุการซ่อมแซมแบบ Patching และวัสดุสำหรับซ่อมแซมแบบ Shotcrete เป็นต้น

3. การตรวจสอบการเสื่อมสภาพและประเมินสมรรถนะของการรับน้ำหนักของโครงสร้างทางยกระดับ

ในการศึกษาการเสื่อมสภาพและการประเมินสมรรถนะการรับน้ำหนักของโครงสร้างทางพิเศษเฉลิมมหานคร แบ่งได้เป็น 3 สายทาง ประกอบด้วย สายทางดินแดง-ท่าเรือ สายทางบางนา-ท่าเรือ และสายทางดาวคะนอง-ท่าเรือ ซึ่งในดำเนินการจะตรวจสอบความเสียหายโครงสร้างจะเริ่มต้นด้วยวิธีตรวจพินิจ (Visual Inspection Method) ด้วยตาเปล่า และวิธีตรวจสอบโดยละเอียด เพื่อวิเคราะห์สภาพความเสียหายของโครงสร้างทางพิเศษ ซึ่งในการตรวจสอบโครงสร้างทางพิเศษ จะอ้างอิงตามมาตรฐานการตรวจสอบสะพานตามกำหนดเวลา ของ Ministry of Land Infrastructure and Transport ประเทศญี่ปุ่น (2014) [9] ที่ได้กำหนดให้มีระยะเวลาการตรวจสอบโครงสร้างครั้งแรกภายใน 2 ปี นับจากการเริ่มเปิดใช้งานและตรวจติดตามทุกระยะ 5 ปี ภายหลังตรวจสอบครั้งที่ 1 เพื่อบันทึกข้อมูลความเสียหาย และวางแผนการซ่อมบำรุง ซึ่งข้อมูลตรวจสอบที่ได้จะถูกนำมาใช้ในการวางแผนการบำรุงรักษาโครงสร้างต่อไป จากมาตรฐานการตรวจสอบสะพานตามกำหนดเวลา ของ Ministry of Land Infrastructure and Transport ประเทศญี่ปุ่น (2014) [9] สามารถจำแนกสภาพของโครงสร้างดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การจำแนกสภาพของโครงสร้าง

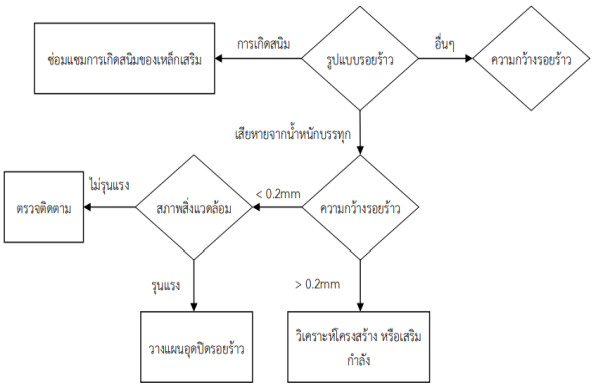
สภาพของโครงสร้าง	รายละเอียด	ประเภทความเสียหาย
1 (ดี)	สมรรถนะของโครงสร้างมีความสมบูรณ์	A, B
2 (วางแผนดำเนินการปีงบประมาณหน้า)	สมรรถนะของโครงสร้างมีความสมบูรณ์ จำเป็นต้องได้รับการซ่อมแซมก่อนการดำเนินการตรวจสอบครั้งถัดไป (1 ปี) ในมุมมองของการบำรุงเชิงป้องกัน	C1, M
3 (ต้องดำเนินการภายใน 3 เดือน)	มีความเป็นไปได้ที่สมรรถนะของโครงสร้างลดลงต่ำกว่าเกณฑ์ยอมรับได้ จำเป็นต้องซ่อมแซมทันทีก่อนการตรวจสอบครั้งถัดไป (1 ปี)	C2
4 (ด่วน ดำเนินการภายใน 1 วัน)	สมรรถนะของโครงสร้างลดลงต่ำกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้จำเป็นต้องซ่อมแซมอย่างฉุกเฉิน	E1, E2

ผลการตรวจสอบความเสียหายที่พบส่วนใหญ่ ได้แก่ การรั่วซึมของน้ำ ผิวคอนกรีตหลุดร่วง ไม่มีคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม รอยร้าวที่ผิวของคอนกรีต สามารถจำแนกรูปแบบสภาพความเสียหายได้ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การจำแนกสภาพความเสียหายของโครงสร้าง

รูปแบบความเสียหาย	สภาพความเสียหายที่ตรวจพบ
สภาพการรั่วซึมของน้ำ : เกิดจากการรั่วซึมของน้ำบริเวณระบบระบายน้ำของโครงสร้างทางพิเศษด้านบนไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดการรั่วซึมตามแนวรอยต่อระหว่างช่วงเสาเหนือคานขวางหลัก หรือ คานพื้นยื่น	
สภาพความเสียหายของการหลุดร่วงของผิวคอนกรีต : เกิดจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมของโครงสร้างกรีตเสริมเหล็ก	
สภาพความเสียหายของการแตกร้าวของคอนกรีต : เกิดจากการแตกร้าวของผิวคอนกรีตจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมจากระยะหุ้มคอนกรีตที่น้อย และจากน้ำหนักบรรทุก	

การพิจารณาซ่อมรอยร้าว จะต้องคำนึงถึงผลกระทบของรอยร้าวต่อสมรรถนะของโครงสร้าง ได้แก่ กำลังรับน้ำหนักของโครงสร้าง ความสามารถในการใช้งานได้ และอายุการใช้งานของโครงสร้าง โดยการซ่อมแซมรอยร้าวจะสามารถแบ่งได้เป็น 3 กรณี ได้แก่ การซ่อมแซมเพื่อฟื้นฟูกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้าง การซ่อมแซมเพื่อฟื้นฟูความสามารถในการใช้งานได้ และการซ่อมแซมเพื่อลดผลกระทบที่ส่งผลต่อความคงทนต่อโครงสร้าง โดยมีเกณฑ์การพิจารณาระดับความรุนแรงของรอยร้าวดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 เกณฑ์การพิจารณาระดับความรุนแรงของรอยร้าว

การพิจารณาระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมตามข้อกำหนดของโครงการทางพิเศษเฉลิมมหานครได้กำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างได้กำหนดไว้ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อกำหนดของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กของโครงการทางพิเศษเฉลิมมหานคร

ประเภท	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมต่ำสุด (มม.)
ผิวด้านในหรือวัสดุเคลือบผิวป้องกันน้ำซึม	25
เหล็กบนของพื้นสะพาน หรือผิวด้านนอกของโครงสร้างที่เผชิญกับสภาพแวดล้อม	40
ส่วนของโครงสร้างที่สัมผัสดิน	50
ผิวล่างของฐานราก	75
ผิวด้านปลายของเหล็กเสริม	2 เท่าของขนาดเหล็กเสริม และไม่น้อยกว่า 50 มม.

ในการตรวจสอบการเสื่อมสภาพและทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างทางยกระดับของทางพิเศษที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนโครงสร้าง เสา คาน พื้น โดยจะมีแนวทางดำเนินการตรวจสอบดังนี้

1. การทดสอบหาค่าระยะหุ้มของคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้าง (เสา คาน พื้น)
2. การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตโดยวิธีค้อนกระแทก (Rebound Hammer Test) สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้าง(เสา คาน พื้น)
3. การหาค่าความลึกในการเกิดคาร์บอเนชั่นของ สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้าง (เสา คาน พื้น)

ผลจากการตรวจสอบค่าการสะท้อนของคอนกรีตตามข้อกำหนดกำลังอัดคอนกรีตของโครงการทางพิเศษเฉลิมมหานคร โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่จะมีค่ากำลังอัดออกแบบขั้นต่ำเพียง 240 ksc. และตามข้อกำหนดกำลังอัดคอนกรีตออกแบบสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างโครงการทางพิเศษเฉลิมมหานครกำหนดค่ากำลังอัดคอนกรีตขั้นต่ำที่จะต้องไม่น้อยกว่า 350 กก./ซม.^{2} ทั้งนี้จากผลการตรวจสอบค่ากำลังอัดคอนกรีตของโครงสร้างพิเศษฯ ด้วยวิธีหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก (Rebound Hammer) และนำค่าที่ตรวจวัดได้มาแทนค่าในสมการของ Japanese Society of Civil Engineering, JSCE 2005 [6] จะเห็นได้ว่า ค่ากำลังอัดของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตแต่ละชิ้นส่วนของทั้ง 3 สายทางนั้น มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 400 กก./ซม.^{2} ถึง 500 กก./ซม.^{2} โดยมากกว่าข้อกำหนดค่ากำลังอัดคอนกรีตขั้นต่ำที่จะต้องไม่น้อยกว่า 350 กก./ซม.^{2} ซึ่งถือว่าโครงสร้างมีสมรรถนะความแข็งแรงที่เพียงพอสามารถรับแรงกระทำจากการจราจรได้อย่างมีประสิทธิภาพดังแสดงในตารางที่ 4 – 7

ผลจากการตรวจวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม พบว่า ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของชิ้นส่วนโครงสร้างทางพิเศษสายเฉลิมมหานคร ทั้ง 3 สายทาง มีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 27 มม. ถึง 39 มม. ซึ่งต่ำกว่าข้อกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเป็นผลมาจากกระบวนการก่อสร้างของโครงการ ณ ขณะนั้น ดังแสดงในตารางที่ 4 – 7

ตารางที่ 4 ผลการตรวจสอบการเสื่อมสภาพและการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างเสา

สายทางของ (ทางพิเศษเฉลิมมหานคร)	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก (มม.)	กำลังอัดประลัยจากการทดสอบ (Rebound Hammer) (กก./ซม.^{2})	ระยะความลึกคาร์บอเนชั่น (มม.)	ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชั่น (มม.ปี$^{1/2}$)
สายดินแดง-ท่าเรือ	36.75	414.33	4.03	0.67
สายบางนา-ท่าเรือ	39.89	502.82	7.04	1.17
สายดาวคะนอง-ท่าเรือ	38.17	463.97	4.94	0.82

ตารางที่ 5 ผลการตรวจสอบการเสื่อมสภาพและการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างคานขวาง

สายทางของ (ทางพิเศษเฉลิมมหานคร)	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก (มม.)	กำลังอัดประลัยจากการทดสอบ (Rebound Hammer) (กก./ซม.^{2})	ระยะความลึกคาร์บอเนชั่น (มม.)	ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชั่น (มม.ปี$^{1/2}$)
สายดินแดง-ท่าเรือ	31.00	399.94	4.38	0.73
สายบางนา-ท่าเรือ	31.56	460.38	8.37	1.39
สายดาวคะนอง-ท่าเรือ	32.28	468.29	5.10	0.85

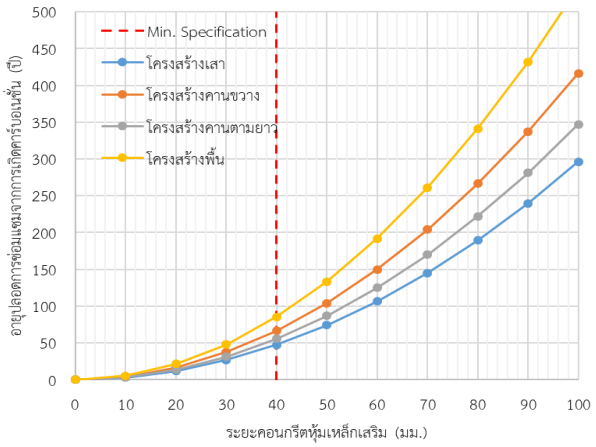
ตารางที่ 6 ผลการตรวจสอบการเสื่อมสภาพและการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างคานตามยาว

สายทางของ (ทางพิเศษเฉลิมมหานคร)	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก (มม.)	กำลังอัดประลัยจากการทดสอบ (Rebound Hammer) (กก./ซม.^{2})	ระยะความลึกคาร์บอเนชั่น (มม.)	ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชั่น (มม.ปี$^{1/2}$)
สายดินแดง-ท่าเรือ	33.94	419.37	5.08	0.85
สายบางนา-ท่าเรือ	35.17	488.43	5.75	0.96
สายดาวคะนอง-ท่าเรือ	34.78	489.15	6.08	1.01

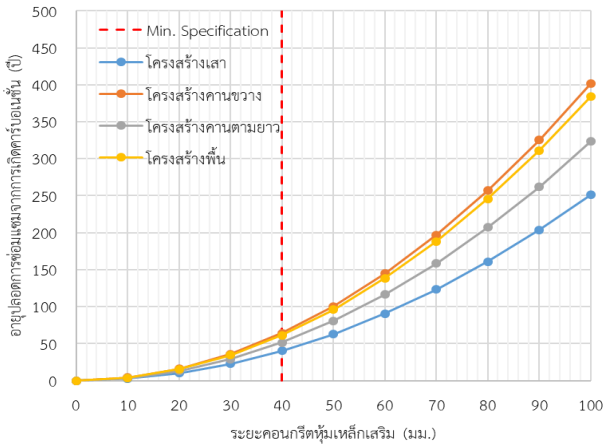
ตารางที่ 7 ผลการตรวจสอบการเสื่อมสภาพและการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างพื้น

สายทางของ (ทางพิเศษเฉลิมมหานคร)	ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็ก (มม.)	กำลังอัดประลัยจากการทดสอบ (Rebound Hammer) (กก./ซม.^{2})	ระยะความลึกคาร์บอเนชั่น (มม.)	ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชั่น (มม.ปี$^{1/2}$)
สายดินแดง-ท่าเรือ	27.39	462.53	5.00	0.83
สายบางนา-ท่าเรือ	32.28	485.56	5.50	0.92
สายดาวคะนอง-ท่าเรือ	32.89	509.30	3.75	0.62

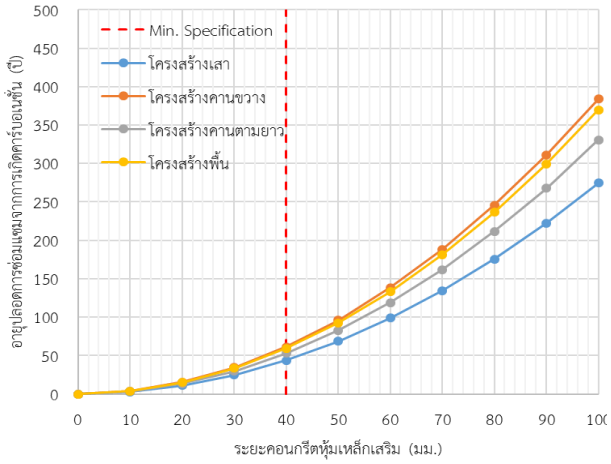
นอกจากนี้การตรวจวัดความลึกการเกิดคาร์บอเนชั่นของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กประกอบด้วยโครงสร้างเสา คานขวาง คานตามยาว และพื้นทาง จะมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 4 มม. ถึง 8 มม. ซึ่งถือว่าเป็นความลึกการเกิดคาร์บอร์เนชั่นที่ต่ำมาก เมื่อเทียบกับอายุการใช้งานของโครงสร้างอยู่ที่ 42 ปี โดยโครงสร้างส่วนใหญ่ยังไม่มีการแตกร้าวจากการเกิดสนิมเหล็กเสริมขึ้นเนื่องจากผลของคาร์บอเนชั่น และประกอบกับผลจากการตรวจวัดระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงระหว่าง 27 มม. ถึง 39 มม. แสดงให้เห็นได้ว่าผลการตรวจวัดความลึกการเกิดคาร์บอเนชั่นของชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 4 ถึง 8 มม. โครงสร้างส่วนใหญ่ยังปลอดภัยจากการแตกร้าวจากการเกิดสนิมในเหล็กเสริมจากผลของคาร์บอเนชั่น เมื่อพิจารณาเทียบกับช่วงระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมตามข้อกำหนดที่จะต้องไม่น้อยกว่า 40 มม. จะเห็นได้ว่าอายุเฉลี่ยที่ปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชั่นของชิ้นส่วนโครงสร้างเสาจะเท่ากับ 43.84 ปี กรณีของโครงสร้างคานขวางจะเท่ากับ 64.10 ปี กรณีของโครงสร้างคานตามยาวจะเท่ากับ 53.40 ปี และกรณีของโครงสร้างพื้นจะเท่ากับ 68.64 ปี ดังกราฟแสดงในรูปที่ 9 – 11 จากกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวชิ้นส่วนของโครงสร้างทางยกระดับทางพิเศษเฉลิมมหานครที่จะต้องคอยตรวจเฝ้าระวังการเกิดการแตกร้าวของโครงสร้างเนื่องจากการเกิดคาร์บอเนชั่นคือชิ้นส่วนโครงสร้างเสา และคานขวางตามยาวของทั้ง 3 สายทางที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดการเสื่อมสภาพเกิดการแตกร้าวขึ้นจากการเผชิญกับสภาวะของคาร์บอเนชั่นที่จะส่งผลต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริมในอนาคตข้างหน้า



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกับอายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชั่น (สายทางดินแดง-ท่าเรือ)

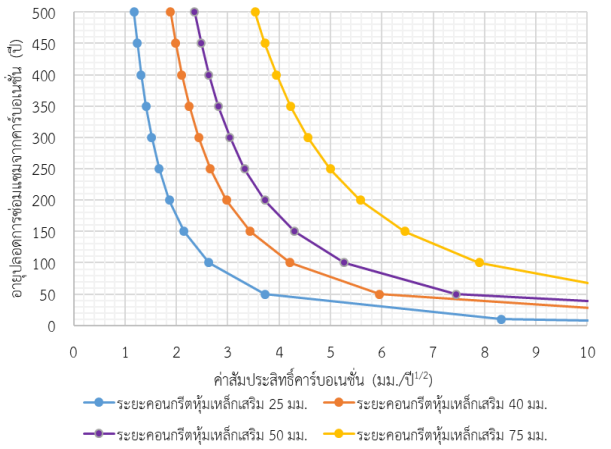


รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกับอายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชั่น (สายทางบางนา-ท่าเรือ)



รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมกับอายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชั่น (สายทางดาวคะนอง-ท่าเรือ)

จากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชั่นของทางพิเศษเฉลิมมหานครแต่ละสายทางตามแนวทางของการประเมินความคงทนต่อการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่นในช่วงอายุการใช้งานที่ปลอดการซ่อมแซม (Repair-Free Service Life) ตาม มยผ.1332-55 [8] จะพบว่า ชิ้นส่วนโครงสร้างทางยกระดับได้มีอายุการใช้งานของโครงสร้างถึง ณ ปัจจุบันเท่ากับ 42 ปี มีค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชั่นอยู่ที่ประมาณ 0.70 มิลลิเมตร/ปี$^{1/2}$ ถึง 1.40 มิลลิเมตร/ปี$^{1/2}$ ซึ่งอยู่ในช่วงเกณฑ์ที่การเสื่อมสภาพจากผลของการเกิดสภาวะคาร์บอเนชั่นที่ต่ำและไม่สร้างความเสียหายอันเนื่องจากการแตกร้าวแก่โครงสร้างจากการเกิดสนิมเหล็กเสริม เมื่อพิจารณาคาดการณ์อายุการใช้งานจากค่าสัมประสิทธิ์การเกิดคาร์บอเนชั่นเทียบกับค่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้างทางยกระดับดังแสดงในรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างทางพิเศษเฉลิมมหานครจะต้องเตรียมตรวจติดตาม วางแผนการซ่อมบำรุง เพื่อป้องกันความเสียหายของชิ้นส่วนโครงสร้างทางยกระดับที่ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงอายุตั้งแต่ 50 ปี ที่ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชั่นอยู่ที่ประมาณ 5.95 มิลลิเมตร/ปี$^{1/2}$ เนื่องจากมีโอกาสที่จะเกิดการเสื่อมสภาพเกิดการแตกร้าวขึ้นจากการเผชิญกับสภาวะของคาร์บอเนชั่นที่จะส่งผลต่อการเกิดสนิมในเหล็กเสริมในอนาคตข้างหน้า



รูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์คาร์บอเนชั่นเทียบกับอายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชั่นที่แต่ละระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของโครงสร้าง (ทางพิเศษเฉลิมมหานคร)

4. บทสรุป

ผลจากการศึกษาการเสื่อมสภาพและประเมินสมรรถนะการรับน้ำหนักของโครงสร้างทางพิเศษเฉลิมมหานครด้วยวิธีแบบไม่ทำลายโครงสร้าง (Non-Destructive Testing) ของชิ้นส่วนโครงสร้างเสา คานขวาง คานตามยาว และพื้น ที่ได้ดำเนินการตรวจประเมินทั้ง 3 สายทาง สรุปได้ดังนี้

1. ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมของชิ้นส่วนโครงสร้างเสา คานขวาง คานตามยาว และพื้น มีระยะที่ต่ำกว่าเกณฑ์ข้อกำหนดที่เกิดจากการก่อสร้างในอดีตที่ไม่ได้คุณภาพ ซึ่งอาจส่งผลต่อการเสื่อมสภาพ และอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในอนาคต

2. การประเมินสมรรถนะกำลังของชิ้นส่วนโครงสร้างทางยกระดับทางพิเศษด้วยการทดสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตด้วยวิธีหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก (Rebound Hammer) เห็นได้ว่าค่ากำลังอัดเฉลี่ยของโครงสร้างแต่ละส่วนนั้นมีค่ามากกว่าค่ากำลังอัดคอนกรีตขั้นต่ำตามข้อกำหนด จึงถือว่าโครงสร้างมีสมรรถนะกำลังความแข็งแรงที่เพียงพอสามารถรองรับแรงกระทำจากการจราจรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3. ผลจากการตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้างทางพิเศษที่มีอายุการใช้งานโครงสร้าง 42 ปี พบว่า มีความเสียหายมาจากการเกิดสนิมของเหล็กเสริมที่มีสาเหตุมาจากการเกิดคาร์บอเนชั่น และการซึมผ่านของน้ำ การศึกษานี้จึงได้ตรวจสอบความลึกของการเกิดคาร์บอเนชั่นของชิ้นส่วนโครงสร้างเสา คานขวาง คานตามยาว และพื้นทาง ซึ่งมีค่าระดับความลึกการเกิดคาร์บอร์เนชั่นที่ต่ำมาก และจากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชั่นของชิ้นส่วนโครงสร้างในแต่ละสายทาง พบว่า มีค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชั่นอยู่ที่ประมาณ 0.70 - 1.40 มิลลิเมตร/ปี$^{1/2}$ โดยเมื่อพิจารณาคาดการณ์อายุปลอดการซ่อมแซมจากการเกิดคาร์บอเนชั่นของโครงสร้างแต่ละชิ้นส่วนตามแนวทางของมาตรฐาน มยผ. พบว่า ชิ้นส่วนโครงสร้างเสาเท่ากับ 43.84 ปี โครงสร้างคานขวางเท่ากับ 64.10 ปี โครงสร้างคานตามยาวเท่ากับ 53.40 ปี และโครงสร้างพื้นเท่ากับ 68.64 ปี ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์จะเห็นว่าการเสื่อมสภาพของโครงสร้างทางพิเศษเฉลิมมหานครอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ มีสมรรถนะกำลังสามารถรองรับน้ำหนักได้ตามข้อกำหนด และจากการคาดการณ์อายุปลอดการซ่อมแซมของโครงสร้างแต่ละชิ้นส่วนจะเห็นได้ว่าการทางพิเศษแห่งประเทศไทยจะต้องเตรียมดำเนินการวางแผนการซ่อมบำรุง ป้องกันความเสียหายของชิ้นส่วนโครงสร้างทางยกระดับที่ช่วงอายุ 50 ปี ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกคาร์บอเนชั่นอยู่ที่ 5.95 มิลลิเมตร/ปี$^{1/2}$ ในขณะที่ชิ้นส่วนโครงสร้างเสาต้องดำเนินการเฝ้าตรวจติดตาม วางแผนเตรียมการซ่อมบำรุงเป็นลำดับแรก เนื่องจากจะเกิดการเสื่อมสภาพจากสภาวะคาร์บอเนชั่นที่อาจส่งผลทำให้เกิดการแตกร้าวจากการเกิดสนิมเหล็กเสริมในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่พนักงานกองวิจัยและพัฒนา และเจ้าหน้าที่กองบำรุงรักษาทางการทางพิเศษแห่งประเทศไทย และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือในการค้นคว้าข้อมูลวิจัยจนการศึกษาวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้

เอกสารอ้างอิง

[1] สุพจน์ ธรรมนิทา, ปิติศานต์ กร้ำมาตร (2563). การสำรวจอัตราการเกิดคาร์บอเนชันของโครงสร้างสะพานลอยคนเดินข้ามในเขตชุมชนจังหวัดชลบุรี. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25*, ชลบุรี, 15-17 กรกฎาคม 2563, หน้า STR43-1 - STR43-7.

[2] มาตรฐาน มยผ.1902-62. *มาตรฐานการตรวจสอบ ประเมิน การซ่อมแซม และการเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างอาคารเก่าและโครงสร้างอาคารที่เสียหาย*. กรมโยธาธิการและผังเมือง.

[3] มาตรฐาน มยผ.1501-51. *มาตรฐานการตรวจสอบโครสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีด้วยวิธีตรวจพินิจ (Visual Inspection Method)*. กรมโยธาธิการและผังเมือง.

[4] ASTM. (2003). *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, A370/A370-03. American Society for Testing and Materials (ASTM). Philadelphia, PA.

[5] มาตรฐาน มยผ.1502-51, มาตรฐานการตรวจสอบโครสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายวิธีหาค่าความแข็งแรงคอนกรีตด้วยวิธีค้อนกระแทก (Rebound Hammer), กรมโยธาธิการและผังเมือง.

[6] JSCE, (2005), *Standard Specifications for Concrete Structures-2001 "Maintenance"*, Japan Society of Civil Engineers (JSCE).

[7] มาตรฐาน มยผ.1505-51, มาตรฐานการตรวจสอบโครสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายวิธีตรวจสอบหาตำแหน่งเหล็กเสริมในคอนกรีต (Cover Meter), กรมโยธาธิการและผังเมือง.

[8] มาตรฐาน มยผ.1332-55, มาตรฐานงานคอนกรีตเมื่อพิจารณาความคงทนและอายุการใช้งาน, กรมโยธาธิการและผังเมือง.

[9] MLIT, (2014), *Bridge Inspection Manual*, Ministry of Land Infrastructure Transport and Tourism (MLIT), Japan.