บทความวิจัย (Research Article)

การประเมินสภาพและฟื้นฟูโครงสร้างลานคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเล: กรณีศึกษาลานอเนกประสงค์สาธารณะเมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี

Structural Assessment and Rehabilitation of a Coastal Reinforced Concrete Platform: A Case Study of a Public Multipurpose Plaza in Pattaya City, Chonburi

อมรชัย ใจยงค์[1], เพชร์รัตน์ ลิ้มสุปรียารัตน์[1], ภัทรพร พรเทพเกษมสันต์[1],
วรรณวรางค์ รัตนานิคม[1] และ พัทรพงษ์ อาสนจินดา[1*]
Amornchai Jaiyong[1], Petcharat Limsupreeyarat[1], Patraphorn Phornthepkasemsant[1],
Wanwarang Rattananikom[1] and Pattarapong Asnachinda[1*]
[1]ศูนย์พัฒนาและที่ปรึกษาด้านวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
[1]Civil Engineering Development and Solution Center, Faculty of Engineering, Burapha University
[*]Corresponding author; email: pattarapong@eng.buu.ac.th

วันที่รับบทความ (Received)	วันที่ได้รับบทความฉบับแก้ไข (Revised)	วันที่ตอบรับบทความ (Accepted)
15 กันยายน 2569	25 กันยายน 2569	2 ตุลาคม 2569

บทคัดย่อ

การศึกษานี้นำเสนอแนวทางการประเมินสภาพ การซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้างลานอเนกประสงค์คอนกรีตเสริมเหล็ก บริเวณชายฝั่งทะเล เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี ซึ่งมีอายุกว่า 17 ปี โดยทำการสำรวจด้วยการตรวจพินิจด้วยสายตาประกอบกับการทดสอบภาคสนามอาทิ การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตเจาะแกน การวัดความลึกคาร์บอเนชั่น การทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของผิวคอนกรีต โดยพบชิ้นส่วนโครงสร้างเสียหายระดับรุนแรงในหลายตำแหน่ง โดยเฉพาะบริเวณแป้นหัวเสาที่มีจำนวนชิ้นส่วนที่เสียหายรุนแรงถึงร้อยละ 32.5 และคานในโซนน้ำขึ้นน้ำลง ซึ่งมีสาเหตุหลักจากระยะหุ้มคอนกรีตที่ไม่เพียงพอ ผลการสำรวจและการวิเคราะห์แบบจำลองพบว่าเสาที่เสียหายรุนแรงกว่าปกติจากพฤติกรรมเสาสั้นซึ่งเกิดความเค้นภายในเพิ่มขึ้นจากผลการทับถมของทรายที่โคนเสาซึ่งทำให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงเป็น 4 เท่าของกรณีปกติ โดยกำลังอัดคอนกรีตพบว่ายังอยู่ในเกณฑ์ที่สูงกว่าค่าที่ออกแบบเดิม การฟื้นฟูสภาพโครงสร้างประกอบด้วยการซ่อมคอนกรีตหุ้มที่แตกร่อน การเปลี่ยนเหล็กเสริมที่เกิดสนิม และเสริมกำลังด้วยการพันแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) ในเสาตอม่อเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงอัดและโมเมนต์ดัดในเสาจากภาวะการโอบรัด และเปลี่ยนเหล็กเสริมด้านล่างของคานพร้อมทั้งเสริมแผ่น CFRP เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงดัด ขณะที่แป้นหัวเสาที่เสียหายมากซ่อมแซมด้วยการรื้อและเทคอนกรีตใหม่ด้วยระยะหุ้มที่มากขึ้น แผ่นพื้นคอนกรีตสำเร็จรูปแบบกลวงที่ชำรุดถูกเปลี่ยนเป็นระบบพื้นหล่อในที่โดยเพิ่มคานย่อยและปรับพฤติกรรมให้ถ่ายแรงแบบพื้นทางเดียว พร้อมทั้งเคลือบผิวด้วยสารไซเลน (Silane) สำหรับลดการซึมน้ำและคลอไรด์เข้าสู่คอนกรีตในขั้นตอนสุดท้าย

คำสำคัญ: โครงสร้างริมทะเล, ลานคอนกรีตเสริมเหล็ก, ความเสื่อมสภาพของคอนกรีตในทะเล, การเสริมกำลังด้วย CFRP, การฟื้นฟูสภาพโครงสร้าง

Abstract

This study presents an approach to the condition assessment, repair, and strengthening of a reinforced concrete multipurpose platform located along the coast of Pattaya City, Chonburi Province, which has been in service for more than 17 years. The structure was assessed through visual inspection together with field tests, including compressive strength testing of concrete cores, carbonation depth measurement, half-cell potential testing, and pull-off testing of the concrete surface. Severe damage was identified at several locations, particularly at the column caps, of which 32.5% were severely damaged, and beams within the tidal zone, primarily due to insufficient concrete cover. Field observations and structural model analyses further indicated that some columns experienced unusually severe damage associated with short-column behavior, in which sand accumulation around the column bases increased the internal stresses and produced flexural moments approximately four times those under the normal condition. The concrete compressive strength remained higher than the original design value. Structural rehabilitation included repair of deteriorated concrete cover, replacement of corroded reinforcement, and strengthening of the pier columns by wrapping them with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) to enhance axial compressive and flexural capacities through confinement. For the beams, the bottom reinforcement was replaced and supplemented with CFRP laminates to increase flexural capacity. Severely damaged column caps were demolished and recast with increased concrete cover. Damaged precast hollow-core slabs were replaced with a cast-in-place slab system incorporating additional secondary beams to provide one-way load transfer. Finally, the concrete surfaces were treated with silane to reduce water absorption and chloride penetration into the concrete.

Keywords: coastal structure, reinforced concrete platform, marine concrete degradation, CFRP strengthening, structural rehabilitation

บทนำ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลต้องเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่ส่งผลต่อความทนทานของโครงสร้างอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการสัมผัสน้ำทะเล ไอเค็ม และวัฏจักรเปียกสลับแห้ง ซึ่งเอื้อต่อการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีต [1,2] เมื่อปริมาณคลอไรด์บริเวณผิวเหล็กเสริมสูงเกินระดับวิกฤต ชั้นฟิล์มออกไซด์ที่ป้องกันผิวเหล็กจะสูญเสียเสถียรภาพและเกิดการกัดกร่อน [3] ผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อนมีปริมาตรเพิ่มขึ้นและก่อให้เกิดแรงดันภายใน ส่งผลให้คอนกรีตแตกร้าว กะเทาะ และหลุดร่อน โดยเฉพาะบริเวณโซนน้ำขึ้นน้ำลงและโซนละอองคลื่น ซึ่งมีทั้งคลอไรด์และการเปลี่ยนแปลงความชื้นสูง จึงมีแนวโน้มเกิดการเสื่อมสภาพรุนแรงกว่าโซนจมน้ำหรือโซนบรรยากาศชายฝั่ง [4]

นอกจากการแทรกซึมของคลอไรด์แล้ว คาร์บอเนชั่นยังเป็นอีกกลไกหนึ่งที่อาจลดความเป็นด่างของคอนกรีตและเพิ่มความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริม [5] โดยสามารถประเมินความลึกคาร์บอเนชั่นด้วยสารฟีนอล์ฟทาลีนตามมาตรฐาน BS EN 14630 [6] ขณะที่ความเสี่ยงของการกัดกร่อนสามารถประเมินเพิ่มเติมด้วยการทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ตาม ASTM C876 [7] ซึ่งให้ข้อมูลเชิงความน่าจะเป็นเกี่ยวกับการเกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริม [8] สำหรับการประเมินความพร้อมของผิวคอนกรีตก่อนการเสริมกำลัง งานนี้พิจารณาเกณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบ FRP ตาม ACI 440.2R [9] ร่วมกับการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวแบบดึงออกตาม ASTM D4541 [10] การใช้ผลจากการตรวจสอบหลายวิธีร่วมกันช่วยลดข้อจำกัดของการประเมินจากความเสียหายที่มองเห็นได้เพียงอย่างเดียว สอดคล้องกับกรณีศึกษาของ Loreto และคณะ [11] และ Bayuaji และคณะ

[12] ที่แสดงถึงประโยชน์ของการบูรณาการการสำรวจภาคสนามและการทดสอบในการประเมินโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมทางทะเล

เมื่อโครงสร้างเกิดความเสียหาย การเลือกวิธีซ่อมแซมและเสริมกำลังควรพิจารณาทั้งระดับความรุนแรง สมรรถนะคงเหลือขององค์อาคาร และสภาพแวดล้อมที่โครงสร้างต้องเผชิญ [12] ปัจจุบันพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยเฉพาะพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymer: CFRP) ถูกนำมาใช้ในการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักสูง ทนต่อการกัดกร่อน และเพิ่มน้ำหนักให้แก่โครงสร้างเพียงเล็กน้อย [13, 14] มาตรฐาน ACI 440.2R [9] กำหนดแนวทางการออกแบบระบบ FRP แบบติดภายนอก รวมถึงการพิจารณาผลกระทบจากสภาพแวดล้อม ขณะที่ Al Nuaimi และคณะ [15] ศึกษาความคงทนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย CFRP ภายใต้สภาพแวดล้อมรุนแรง ส่วน Sigit Darmawan และคณะ [16] รายงานการประเมินโครงสร้างท่าเรือคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้งานในสภาพแวดล้อมทางทะเลเป็นเวลานาน โดยสนับสนุนแนวทางการประเมินแบบบูรณาการเพื่อใช้ประกอบการกำหนดมาตรการซ่อมแซมและเสริมกำลัง

กรณีศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นลานอเนกประสงค์คอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณสวนสาธารณะตลาดลานโพธิ์ ตำบลนาเกลือ เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี ซึ่งเปิดใช้งานตั้งแต่ประมาณ พ.ศ. 2552 ระบบโครงสร้างประกอบด้วยเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง แป้นหัวเสา คานคอนกรีตเสริมเหล็ก และพื้นสำเร็จรูปแบบกลวง โดยโครงสร้างส่วนหนึ่งยื่นเหนือบริเวณทะเลและได้รับอิทธิพลจากสภาวะน้ำขึ้นน้ำลงโดยตรง หลังจากใช้งานมากกว่าหนึ่งทศวรรษพบความเสียหายหลายลักษณะ ได้แก่ การแตกร้าวและหลุดร่อนของคอนกรีต การกัดกร่อนของเหล็กเสริม และความเสียหายเฉพาะบริเวณขององค์อาคารบางประเภท การประเมินโครงสร้างดังกล่าวจึงจำเป็นต้องพิจารณาร่วมกันทั้งสภาพวัสดุ การกระจายของความเสียหาย สมรรถนะในการรับแรง และข้อจำกัดในการซ่อมแซมและเสริมกำลังภายใต้สภาพพื้นที่จริง เพื่อกำหนดแนวทางฟื้นฟูที่เหมาะสมและรองรับการใช้งานในระยะยาว

แม้งานศึกษาที่ผ่านมาจะแสดงให้เห็นความสำคัญของการประเมินการเสื่อมสภาพของคอนกรีตเสริมเหล็กในสภาพแวดล้อมทางทะเล รวมถึงการใช้ผลสำรวจภาคสนามและการทดสอบประกอบการตัดสินใจซ่อมแซม แต่การเชื่อมโยงสภาพหน้างานเฉพาะที่เปลี่ยนพฤติกรรมการรับแรงของโครงสร้าง กับผลการประเมินวัสดุและการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อกำหนดแนวทางฟื้นฟูยังมีรายงานค่อนข้างจำกัด เช่น ผลของการทับถมของทรายบริเวณโคนเสาตอม่อบางต้นในสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งทำให้เงื่อนไขการยึดรั้งและความยาวประสิทธิผลของเสาเปลี่ยนไปจนเกิดพฤติกรรมคล้ายเสาสั้น, แนวทางการซ่อมแซมหรือเสริมกำลังในแนวทางที่เหมาะสมและมีความคุ้มค่าทางวิศวกรรมตามข้อจำกัดและความสามารถในการปฏิบัติงานในพื้นที่แคบ เป็นต้น จุดเด่นของการศึกษานี้จึงอยู่ที่การบูรณาการการตรวจพินิจ การทดสอบวัสดุและการกัดกร่อนในภาคสนาม ร่วมกับการวิเคราะห์สมรรถนะและแบบจำลองโครงสร้าง เพื่อเชื่อมโยงลักษณะความเสียหายที่ตรวจพบกับสาเหตุทางกายภาพและพฤติกรรมการรับแรง และนำผลดังกล่าวไปกำหนดแนวทางฟื้นฟูที่เหมาะสมกับสภาพใช้งานจริงของโครงสร้างชายฝั่งทะเล

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) สำรวจและจำแนกขอบเขตและระดับความรุนแรงของความเสียหายของชิ้นส่วนโครงสร้าง (2) ประเมินสภาพคอนกรีต ความเสี่ยงต่อการกัดกร่อนของเหล็กเสริม และสมรรถนะของโครงสร้างจากการทดสอบภาคสนาม ห้องปฏิบัติการ และการวิเคราะห์พฤติกรรมและแรงภายในของโครงสร้างจากสภาพความเสียหายและผลของสภาพแวดล้อม และ (3) กำหนดแนวทางการซ่อมแซมและเสริมกำลังที่เหมาะสมกับสภาพความเสียหายและข้อจำกัดในการปฏิบัติงานจริง เพื่อฟื้นฟูความปลอดภัยและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้าง

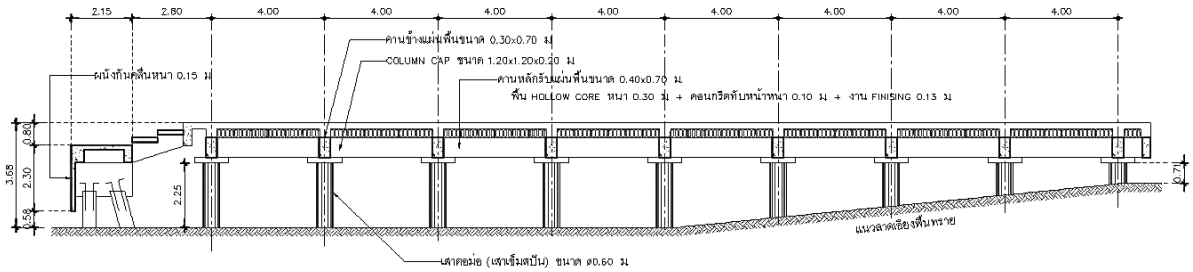
วิธีดำเนินการวิจัย

รายละเอียดโครงการและระบบโครงสร้าง

โครงสร้างที่ศึกษาเป็นลานอเนกประสงค์คอนกรีตเสริมเหล็กตั้งอยู่ในสวนเฉลิมพระเกียรติ ตลาดลานโพธิ์ อำเภอบางละมุง (เมืองพัทยา) จังหวัดชลบุรี มีขนาดพื้นที่ประมาณ 52 × 112 เมตร วางตัวในแนวขนานชายฝั่งทะเล ระบบโครงสร้างหลักประกอบด้วยเสาเข็มสปันคอนกรีตอัดแรง แป้นหัวเสา คานคอนกรีตเสริมเหล็ก และระบบพื้นสำเร็จรูปแบบกลวง (Hollow-core) แสดงดังภาพที่ 1 ทั้งนี้ โดยมีแนวเส้นกริด A ถึง M วางตัวขนานกับแนวชายฝั่งทะเล และแนวเส้นกริดที่ 1 ถึง 29 วางตัวในทิศทางตั้งฉากกับแนวชายฝั่ง ตำแหน่งโครงสร้างส่วนใหญ่อยู่ในสภาวะแวดล้อมทางทะเลระดับรุนแรง โดยตั้งอยู่ในโซนน้ำขึ้นน้ำลงและโซนละอองคลื่น อีกทั้งบริเวณชายฝั่งยังมีลักษณะเป็นชายหาดลาดเอียงดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งทำให้องค์อาคารโครงสร้างสัมผัสกับน้ำทะเล ไอเค็ม และวัฏจักรเปียกสลับแห้งอย่างต่อเนื่อง ประกอบกับสภาพภูมิอากาศแบบมรสุมเขตร้อนที่มีความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิสูงตลอดปี ซึ่งเป็นปัจจัยเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพของคอนกรีตและเหล็กเสริมอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 1 ภาพถ่ายทางอากาศ (ซ้าย) และผังโครงสร้างลานอเนกประสงค์ (ขวา)



ภาพที่ 2 รูปตัดตามแนวตั้งฉากกับชายฝั่งทะเล

การตรวจประเมินสภาพโครงสร้าง

การประเมินสภาพโครงสร้างในภาคสนามสำรวจด้วยการตรวจพินิจด้วยสายตา (Visual Inspection) ครอบคลุมชิ้นส่วนโครงสร้างทั้งหมดที่สามารถเข้าถึงในการสำรวจภาคสนามได้ เพื่อระบุตำแหน่งและบันทึกความเสียหาย การหลุดร่อนของคอนกรีต การโผล่พ้นผิวของเหล็กเสริมและคราบสนิม โดยจำแนกระดับความเสียหายของแต่ละองค์อาคารตามเกณฑ์ที่กำหนดในตารางที่ 1 ซึ่งกำหนดสัญลักษณ์สีเพื่อใช้ในการจัดทำแผนที่ความเสียหาย (Damage Mapping) ซึ่งมีตัวอย่างลักษณะความเสียหายแสดงดังภาพที่ 3

ตารางที่ 1 เกณฑ์การจำแนกระดับความเสียหายจากการตรวจพินิจด้วยสายตา

ความเสียหาย	ลักษณะความเสียหาย	สีแผนผัง
ระดับ 1	ไม่ปรากฏรอยแตกร้าวหรือความเสียหายที่มองเห็นได้ด้วยสายตา	-
ระดับ 2	รอยแตกร้าวเฉพาะจุดและคอนกรีตหลุดร่อนเล็กน้อย ไม่พบการสูญเสียหน้าตัดเหล็กเสริม	สีเหลือง
ระดับ 3	เหล็กเสริมเกิดสนิมและสูญเสียหน้าตัดอย่างมีนัยสำคัญ คอนกรีตแตกร้าวและหลุดร่อนรุนแรง	สีแดง

การทดสอบภาคสนาม

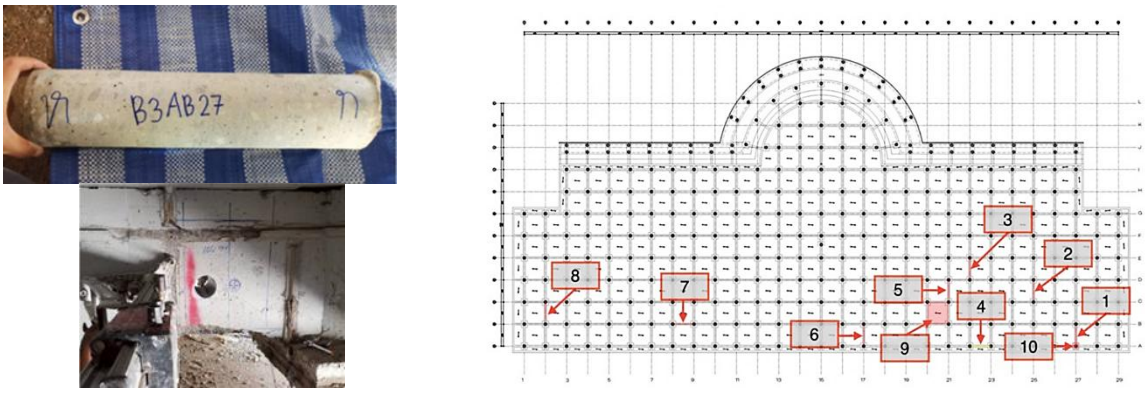
การทดสอบภาคสนามประกอบด้วยการทดสอบ 4 วิธี ได้แก่ 1) การเจาะเก็บแท่งคอนกรีตและการทดสอบกำลังรับแรงอัด 2) การทดสอบความลึกคาร์บอเนชั่น 3) การทดสอบการเกิดสนิมด้วยศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และ 4) การทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีตด้วยวิธีการดึงออก

การเจาะเก็บแท่งคอนกรีต (Concrete Coring) ดำเนินการตาม ASTM C42/C42M-20 [17] และทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยเก็บตัวอย่างทรงกระบอกรวม 10 แท่งจากตำแหน่งที่แตกต่างกัน ครอบคลุมชิ้นส่วนคานและเสา โดยมีตัวอย่างและแผนผังการเจาะสำรวจแสดงดังภาพที่ 4 ตัวอย่างมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) อยู่ในช่วง 1.13-1.93 สำหรับตัวอย่างที่มี L/D ไม่เกิน 1.75 ได้ปรับแก้ค่ากำลังอัดด้วยตัวประกอบตาม ASTM C42/C42M ได้แก่ 0.87, 0.93, 0.96 และ 0.98 สำหรับ L/D เท่ากับ 1.00, 1.25, 1.50 และ 1.75 ตามลำดับ และใช้การประมาณค่าเชิงเส้นสำหรับค่า L/D ระหว่างช่วงดังกล่าว ส่วนตัวอย่างที่มี L/D มากกว่า 1.75 ไม่ได้ปรับแก้ค่าเพิ่มเติม



(ก) (ข)

ภาพที่ 3 ตัวอย่างลักษณะความเสียหายในแต่ละระดับ: (ก) ความเสียหายระดับ 2 (ข) ความเสียหายระดับ 3



(ก) (ข)

ภาพที่ 4 (ก) ตัวอย่างแท่งคอนกรีตที่เจาะเพื่อนำไปทดสอบกำลังอัด (ข) ผังตำแหน่งการเจาะเก็บแท่งคอนกรีต

การทดสอบความลึกคาร์บอเนชั่นได้ทดสอบกับตัวอย่างแท่งคอนกรีตจำนวน 7 แท่ง ซึ่งเจาะเก็บจากตำแหน่งตัวแทนชิ้นส่วนคานรวม 4 ตำแหน่ง การเลือกตำแหน่งเจาะเก็บตัวอย่างยังได้พิจารณาถึงปัจจัยการสัมผัสก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่แตกต่างกัน โดยเปรียบเทียบระหว่างชิ้นส่วนด้านที่หันออกสู่ทะเลกับด้านที่หันเข้าหาชายฝั่งเพื่อประเมินอิทธิพลของทิศทางลมและสภาพแวดล้อมต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชั่น โดยการทดสอบอ้างอิงขั้นตอนตามมาตรฐาน BS EN 14630:2006 [6] โดยพ่นสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein Solution) ลงบนผิวหน้าของแท่งคอนกรีตที่เพิ่งกะเทาะให้แตกใหม่เพื่อสังเกตการเปลี่ยนสีของเนื้อคอนกรีต จากนั้นวัดระยะความลึกคาร์บอเนชั่นตลอดแนวที่เกิดปฏิกิริยาเพื่อคำนวณหาค่าความลึกสูงสุดและค่าความลึกเฉลี่ย

การประเมินแนวโน้มการเกิดสนิมของเหล็กเสริมได้พิจารณาทดสอบในชิ้นส่วนคานซึ่งพบความเสียหายระดับ 3 จำนวน 5 ตำแหน่ง โดยใช้การทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยการวัดศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ (Half-Cell Potential Test) ชนิดขั้วอ้างอิงคอปเปอร์-คอปเปอร์ซัลเฟต ($Cu/CuSO_4$) ตามมาตรฐาน ASTM C876-15 [7] เพื่อประเมินโอกาสความน่าจะเป็นในการเกิดการกัดกร่อนแบบแอคทีฟ ของเหล็กเสริมภายใน

การทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีตด้วยวิธีดึงออก (Pull-off Test) ดำเนินการขึ้นเพื่อประเมินกำลังยึดเหนี่ยวรับแรงดึงที่ผิวหน้าคอนกรีตขององค์อาคารโครงสร้างที่คาดว่าจะเสริมกำลังด้วยวิธีติดตั้งวัสดุ CFRP รวมจำนวน 10 ตำแหน่ง ตามมาตรฐาน ASTM D4541 [10] การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความพร้อมและประสิทธิภาพในการยึดเกาะของผิวหน้าคอนกรีตเดิม ก่อนการติดตั้งระบบเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) โดยต้องมีค่ากำลังยึดเหนี่ยวขั้นต่ำไม่น้อยกว่า 1.4 MPa ตามเกณฑ์ข้อกำหนดของมาตรฐาน ACI 440.2R [9]

การวิเคราะห์ย้อนกลับเพื่อหาน้ำหนักบรรทุกจรออกแบบเดิม

เนื่องจากปัญหาที่ไม่พบเอกสารรายการคำนวณและแบบก่อสร้างเดิม (As-built Drawings) ของโครงสร้างลานอเนกประสงค์ การศึกษานี้จึงใช้วิธีการวิเคราะห์ย้อนกลับ (Back-Calculation) เพื่อประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจรเดิม (Design Live Load) ของโครงสร้าง โดยอาศัยทฤษฎีหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress Design: WSD) ซึ่งเป็นมาตรฐานการออกแบบที่นิยมใช้ในยุคสมัยของการก่อสร้างดังกล่าว การวิเคราะห์ใช้ข้อมูลมิติขนาดหน้าตัดและรายละเอียดการจัดวางเหล็กเสริมที่รวบรวมได้จากการสำรวจภาคสนาม โดยเฉพาะจากบริเวณที่คอนกรีตเกิดการแตกร่อนรุนแรงจนเผยให้เห็นตำแหน่งและขนาดของเหล็กเสริม ร่วมกับผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ได้เจาะสำรวจ เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลในการวิเคราะห์สมรรถนะการรับน้ำหนักของชิ้นส่วนโครงสร้างหลัก ในกรณีที่ผลการสำรวจพบลักษณะความเสียหายหรือสภาพแวดล้อมเฉพาะที่อาจส่งผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้าง จะใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) เพื่อประกอบการประเมินพฤติกรรมและใช้กำหนดแนวทางการฟื้นฟูสภาพที่เหมาะสม

การออกแบบซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้าง

แนวทางการซ่อมแซมและเสริมกำลัง ได้พิจารณาแบ่งเป็น 3 ระดับตามระดับความรุนแรงโดยความเสียหายระดับ 1 กำหนดให้ดำเนินการติดตามตรวจสอบสภาพโครงสร้างอย่างต่อเนื่องตามรอบระยะเวลา ความเสียหายระดับ 2 พิจารณาซ่อมแซมคอนกรีตเฉพาะจุด โดยสกัดคอนกรีตที่เสื่อมสภาพ ทำความสะอาดขจัดสนิม และฉาบซ่อมด้วยมอร์ต้าร์ซีเมนต์ชนิดไม่หดตัว ขณะที่ความเสียหายระดับ 3 พิจารณาสกัดคอนกรีตที่แตกร่อนออก ขจัดสนิมหรือตัดต่อเปลี่ยนเหล็กเสริมใหม่ เทซ่อมแซมเนื้อคอนกรีตและให้มีระยะหุ้มเพียงพอ เสริมกำลังด้วย CFRP ตามมาตรฐาน ACI 440.2R [9] โดยใช้ตัวประกอบลดค่าเนื่องจากสภาพแวดล้อมทางทะเลระดับรุนแรง โดยหากการซ่อมแซมเนื้อคอนกรีตและเสริมเหล็กทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักยังไม่เพียงพอ จะใช้แผ่น CFRP เพื่อเสริมกำลัง โดยพันรอบชิ้นส่วนเสาให้เกิดสภาวะโอบรัด (Confinement) เพื่อเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตและกำลังรับแรงดัด สำหรับคานสามารถหุ้มแผ่น CFRP บริเวณท้องคานเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงดัด และหากพบความเสียหายที่ต้องรื้อถอนอาจพิจารณาเสริมชิ้นส่วนย่อยเพื่อกระจายน้ำหนักบรรทุกให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้

ในบางบริเวณที่อาจมีข้อจำกัดในการทำงานด้วยพื้นที่แคบ แนวทางการซ่อมแซมและเสริมกำลังจึงต้องพิจารณาปัจจัยความคุ้มค่าในการจัดการทางวิศวกรรมด้วยเช่นกัน และฉีดพ่นสารเคลือบผิวคอนกรีตทั้งหมดในขั้นตอนสุดท้าย เพื่อป้องกันการดูดซึมน้ำและการแทรกซึมของคลอไรด์ในระยะยาว

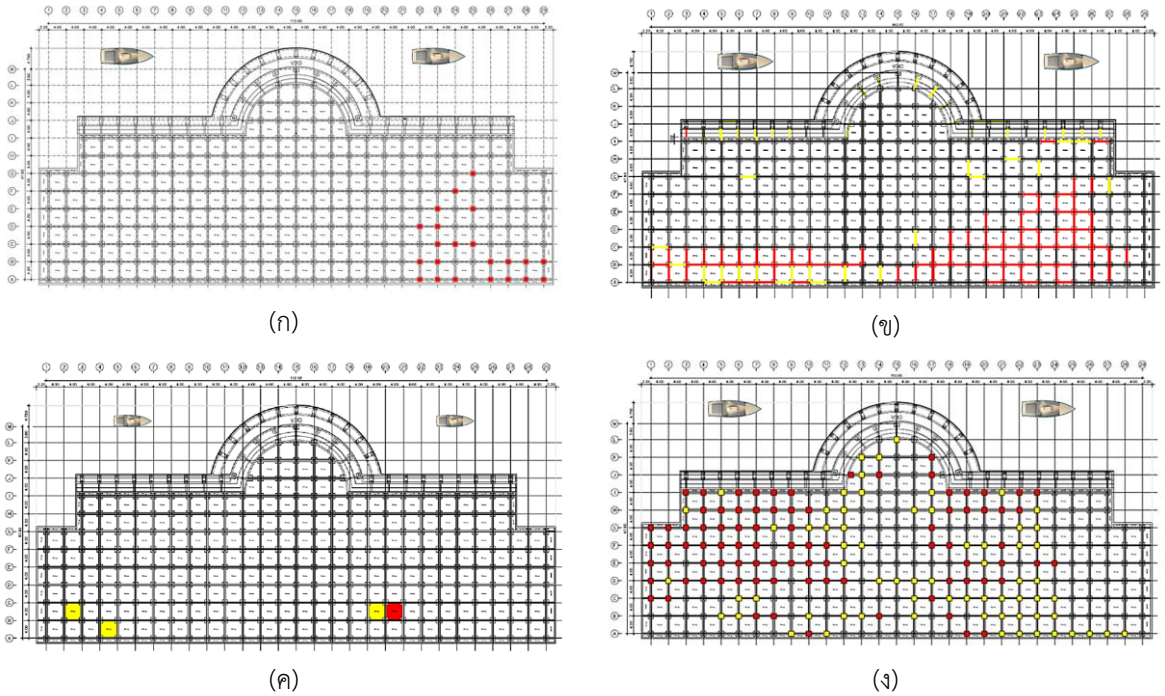
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการสำรวจความเสียหายด้วยการตรวจพินิจด้วยสายตา

ผลการตรวจพินิจพบความเสียหายกระจายตัวทั่วโครงสร้าง โดยมีการกระจุกตัวของความเสียหายระดับ 3 บริเวณแนวริมทะเลและโซนน้ำขึ้นน้ำลง จำนวนและสัดส่วนที่ตรวจพบความเสียหายแสดงดังตารางที่ 2 โดยมีแผนผังแสดงความเสียหายของเสา คาน พื้น และแป้นหัวเสา ดังภาพที่ 5 โดยพบว่าแป้นหัวเสามีสัดส่วนความเสียหายระดับ 3 สูงสุดในสัดส่วน 32.5% รองลงมาคือคานในสัดส่วน 15.1% และเสาในสัดส่วน 8.2% กระจุกตัวบริเวณใกล้ชายหาด และพื้นพบเพียง 1 ส่วนเท่านั้น

ตารางที่ 2 ผลการสำรวจความเสียหายด้วยการตรวจพินิจด้วยสายตา

องค์อาคาร	จำนวนทั้งหมด	ความเสียหายระดับ 1		ความเสียหายระดับ 2		ความเสียหายระดับ 3	
		จำนวน	สัดส่วน	จำนวน	สัดส่วน	จำนวน	สัดส่วน
เสา	268 ต้น	246	91.8%	-	-	22	8.2%
คาน	569 ช่วง	441	77.5%	42	7.4%	86	15.1%
พื้น	226 ส่วน	222	98.2%	3	1.3%	1	0.5%
แป้นหัวเสา	268 ชิ้น	114	42.5%	67	25.0%	87	32.5%



ภาพที่ 5 แผนผังความเสียหายของชิ้นส่วนโครงสร้าง (ก) เสา (ข) คาน (ค) พื้น และ (ง) แป้นหัวเสา

ผลการทดสอบภาคสนาม

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างแท่งคอนกรีตจากการเจาะสำรวจจำนวน 10 ตัวอย่างดังตารางที่ 3 ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดที่ปรับแก้ผลจากสัดส่วน L/D แล้ว พบว่าคอนกรีตทั้งในคานและในเสาทุกตำแหน่งมีกำลังรับแรงอัดสูงกว่ากำลังอัดออกแบบที่ประเมินไว้ที่ 280 ksc และมีสภาพที่สมบูรณ์ และการเสื่อมสภาพจำกัดที่บริเวณระยะหุ้มคอนกรีตและเหล็กเสริมเท่านั้น ซึ่งสนับสนุนแนวทางการซ่อมแซมที่มุ่งเน้นการฟื้นฟูสภาพคอนกรีตหุ้มและเหล็กเสริม ร่วมกับการเสริมกำลังด้วย CFRP แทนการรื้อถอนและหล่อชิ้นส่วนใหม่

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างแท่งคอนกรีตที่เจาะสำรวจ

ตำแหน่งที่	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
แนวกริดตามแผนผัง	27/A-B	25/C-D	22/D-E	22-23/A1	22-23/A2	21/C-D	17/A-B	8-9/B1	2/C-B	A/27
ชิ้นส่วนโครงสร้าง	คาน	คาน	คาน	คาน	คาน	คาน	คาน	คาน	คาน	เสา
สัดส่วน L/D	1.92	1.92	1.93	1.45	1.41	1.92	1.91	1.13	1.13	1.88
กำลังอัด (ksc)	418	336	434	358	338	391	424	374	422	324

ผลการทดสอบความลึกคาร์บอเนชั่นในตารางที่ 4 สะท้อนความแตกต่างตามสภาพการรับสัมผัสสภาวะแวดล้อมอย่างชัดเจน โดยผิวคอนกรีตคานด้านที่หันเข้าชายฝั่งพบความลึกคาร์บอเนชั่นที่สูงกว่าที่ผิวด้านข้างขนานชายฝั่งหรือผิวด้านบน ขณะที่ไม่พบความลึกคาร์บอเนชั่นในด้านที่หันออกทะเลในทุกตัวอย่าง

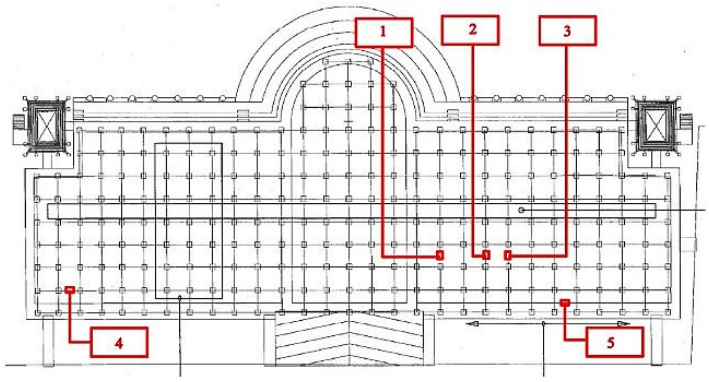
ตารางที่ 4 ผลการทดสอบความลึกคาร์บอเนชั่นของชิ้นส่วนคาน

ลำดับ	**แนวกริดแผนผัง**	**การเกิดคาร์บอเนชั่น**	**ความลึกคาร์บอเนชั่น (มม.)**		**หมายเหตุ**
			ความลึกสูงสุด	**ความลึกเฉลี่ย**	
1	22-23/A1.1	ไม่พบ	–	–	ด้านหันออกทะเล
2	22-23/A2.2	พบ	14.1	12.6	ด้านหันเข้าชายฝั่ง
3	17/A-B	พบ	9.4	6.9	ด้านข้างขนานชายฝั่ง
4	8-9/B1.1	ไม่พบ	–	–	ด้านหันออกทะเล
5	8-9/B1.3	พบ	14.6	10.9	ด้านหันเข้าชายฝั่ง
6	8-9/B2.1	ไม่พบ	–	–	ด้านหันออกทะเล
7	20-21/B-C	พบ	5.6	4.7	ผิวด้านบน

การทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์บริเวณชิ้นส่วนคานที่พบความเสียหายทางกายภาพระดับ 3 จำนวน 5 ตำแหน่งแสดงดังภาพที่ 6 โดยมีผลทดสอบดังตารางที่ 5 จากผลการประเมินพบว่า ตัวอย่างส่วนใหญ่มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ไม่ต่ำกว่า -200 mV ($CuSO_4$) ซึ่งแปลผลตามมาตรฐานได้ว่า มีความน่าจะเป็นมากกว่า 90% ที่ไม่เกิดการกัดกร่อนของเหล็กเสริมแบบแอคทีฟ (Active Corrosion) ณ ขณะทดสอบ มีเพียงตำแหน่ง HC4 เท่านั้นที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าต่ำสุดเท่ากับ -289 mV ซึ่งบ่งชี้ว่าไม่สามารถสรุปความน่าจะเป็นของการกัดกร่อนได้อย่างชัดเจน ซึ่งอาจมีความเสี่ยงพบความเสียหายจากการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้

จากผลการทดสอบพบว่าความแตกต่างระหว่างระดับความเสียหายทางกายภาพภายนอกระดับ 3 กับผลศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ส่วนใหญ่ยังอยู่ในช่วงที่บ่งชี้ถึงความน่าจะเป็นต่ำของการเกิดการกัดกร่อนแบบแอคทีฟ โดยพบว่าการเกิดสนิมและการแตกร่อนของคอนกรีตกระจุกตัวอยู่เฉพาะบริเวณเหล็กเสริมล่าง ณ ปลายคานที่เชื่อมต่อกับแป้นหัวเสา ซึ่งเป็นผลจากการชำรุดของแป้นหัวเสาในระดับรุนแรงหลายตำแหน่งจนเกิดการสูญเสียกำลังและเกิดการขยับตัวบริเวณรอยต่อการเทคอนกรีต (Cold Joint) ระหว่างปลายคานและแป้นหัวเสา ซึ่งก่อให้เกิดรอยแตกร้าวเฉพาะจุด ทำให้ความชื้นและคลอไรด์สามารถแทรก

ซึมเข้าถึงเหล็กเสริมล่างบริเวณปลายคานได้ง่าย ในขณะที่คอนกรีตบริเวณกลางคานและส่วนครึ่งบนของหน้าตัดยังคงมีสภาพสมบูรณ์และไม่ปรากฏรอยแตกร้าว โดยพบการกัดกร่อนเฉพาะในตำแหน่งที่ใกล้กับรอยต่อที่เสียหายซ้ำซ้อนเท่านั้น (HC4) ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Otieno และคณะ [8] ที่ชี้ว่ารอยร้าวและคุณภาพคอนกรีตมีผลต่อการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมทางทะเล และสอดคล้องกับแนวทางการประเมินแบบบูรณาการของ Loreto และคณะ [11] และ Bayuaji และคณะ [12] ทั้งนี้การทดสอบ Half-cell Potential แสดงความน่าจะเป็นของกิจกรรมการกัดกร่อน ณ ขณะและบริเวณที่ทดสอบ แต่ไม่ได้วัดอัตราการกัดกร่อนหรือการสูญเสียหน้าตัดที่สะสมในอดีตโดยตรง ดังนั้นความเสียหายที่เกิดขึ้นแล้วบริเวณ Cold Joint อาจยังปรากฏทางกายภาพแม้ค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงเวลาทดสอบจะไม่แสดงความน่าจะเป็นสูงของ Active Corrosion การแปลผลจึงควรพิจารณาร่วมกับการตรวจพินิจ สภาพรอยแตกร้าว และผลการทดสอบอื่นประกอบกัน



ภาพที่ 6 ผังตำแหน่งคานที่ทำการทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ของชิ้นส่วนคาน

รหัสตัวอย่าง	ช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า (mV vs $Cu/CuSO_4$)	การแปลผลทดสอบ
HC1	-106 ถึง -85	ความน่าจะเป็นมากกว่า 90% ที่ไม่มีการกัดกร่อน
HC2	-80 ถึง -70	ความน่าจะเป็นมากกว่า 90% ที่ไม่มีการกัดกร่อน
HC3	-69 ถึง -63	ความน่าจะเป็นมากกว่า 90% ที่ไม่มีการกัดกร่อน
HC4	-289 ถึง -61	ไม่สามารถสรุปความน่าจะเป็นของการกัดกร่อนได้อย่างชัดเจน
HC5	-112 ถึง -80	ความน่าจะเป็นมากกว่า 90% ที่ไม่มีการกัดกร่อน

สำหรับผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวรับแรงดึงที่ผิวหน้าคอนกรีต (Pull-off Strength Test) ตามมาตรฐาน ASTM D4541 [10] ของชิ้นส่วนโครงสร้างลานอเนกประสงค์รวม 10 ตำแหน่งทดสอบ แสดงดังตารางที่ 6 จากผลการทดสอบพบว่าค่าความแข็งแรงในการยึดเกาะของผิวหน้าคอนกรีตเดิมมีค่าอยู่ในช่วง 1.5 ถึง 3.0 MPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์กำลังยึดเหนี่ยวขั้นต่ำที่กำหนดไว้ 1.4 MPa ตามมาตรฐาน ACI 440.2R [9] ในทุกตำแหน่งการทดสอบ ผลลัพธ์นี้ยืนยันว่าผิวหน้าคอนกรีตเดิมของชิ้นส่วนคาน เสาและท้องพื้นมีสมรรถนะความแข็งแรงรับแรงดึงเพียงพอต่อการถ่ายโอนหน่วยแรงและรองรับการติดตั้งระบบเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP โดยไม่ก่อให้เกิดการวิบัติจากการร่อนหลุดของชั้นผิวคอนกรีตเดิม

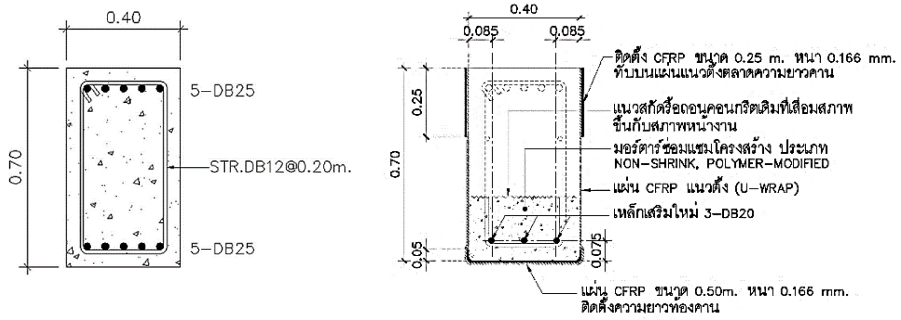
ตารางที่ 6 ผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของผิวคอนกรีตด้วยการดึงออก

ตำแหน่งที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ชิ้นส่วนโครงสร้าง	คาน	คาน	เสา	คาน	บันได	คาน	ท้องพื้น	เสา	คาน	คาน
ค่าออกแบบ (MPa)	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
ค่าจริง (MPa)	3.0	2.0	1.5	3.0	2.0	3.0	2.5	2.0	2.0	1.5
ผลการประเมิน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน	ผ่าน

ผลการวิเคราะห์ความสามารถรับน้ำหนักบรรทุก การซ่อมแซมและเสริมกำลัง

จากการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีหน่วยแรงใช้งาน (Working Stress Design, WSD) จากข้อมูลรายละเอียดหน้าตัดคานเดิมดังแสดงในภาพที่ 7 (ก) โดยกำหนดคุณสมบัติวัสดุประกอบด้วย กำลังอัดคอนกรีต 280 ksc ตามค่ากำลังอัดออกแบบเดิมที่ประเมินไว้ และกำลังครากของเหล็กเสริมหลักและเหล็กปลอก 4,000 ksc พบว่าโครงสร้างคานเดิมมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจรออกแบบปลอดภัยสูงสุดประมาณ 1,750 กก./ตร.ม. โดยมีความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดเป็นตัวควบคุม อย่างไรก็ดีลานเอนกประสงค์นี้เคยผ่านการปรับปรุงพื้นผิวโดยการเทพอกเพิ่มความหนา 8 ซม. เพื่อทำเป็นผิวคอนกรีตพิมพ์ลาย ซึ่งส่งผลให้เกิดน้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติมประมาณ 192 กก./ตร.ม. ดังนั้นความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจรจึงคงเหลือประมาณ 1,500 กก./ตร.ม.

จากผลการประเมินข้างต้น ได้กำหนดเป้าหมายการซ่อมแซมและเสริมกำลังออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักประกอบด้วย ขั้นตอนที่ 1: การฟื้นฟูกำลังขั้นต่ำของโครงสร้างคานกรณีตัดชิ้นส่วนเหล็กเสริมเดิมที่เกิดสนิมออกแล้วทำการเข้าแบบเทคอนกรีตโครงสร้างใหม่พร้อมติดตั้งเหล็กเสริมล่างใหม่ขนาด 3-DB20 เกรด SD40 ซึ่งจะส่งผลให้คานมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจรพื้นฐานเท่ากับ 500 กก./ตร.ม. ซึ่งสอดคล้องตามข้อกำหนดกฎกระทรวงกำหนดการออกแบบโครงสร้างอาคารและลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร พ.ศ. 2566 [18] สำหรับประเภทการใช้อาคารสนามนันทนาการ และขั้นตอนที่ 2: การเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP บริเวณใต้ท้องคานตามมาตรฐาน ACI 440.2R [9] เพื่อยกระดับและฟื้นฟูความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกจรให้กลับมาสมบูรณ์เต็มประสิทธิภาพที่ระดับ 1,500 กก./ตร.ม. โดยในขั้นตอนนี้ คานได้รับการออกแบบให้สามารถต้านทานแรงเฉือนออกแบบสูงสุด (Vu) เท่ากับ 42,730 กก. และโมเมนต์ดัดออกแบบสูงสุด (Mu) เท่ากับ 20,861 กก.ม. โดยหน้าตัดคานที่ได้รับการออกแบบเสริมกำลังได้แสดงไว้ดังภาพที่ 7 (ข)

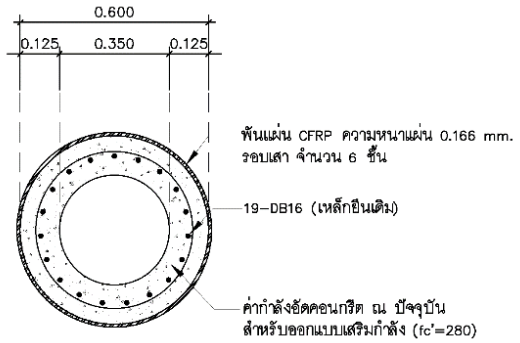


(ก) (ข)

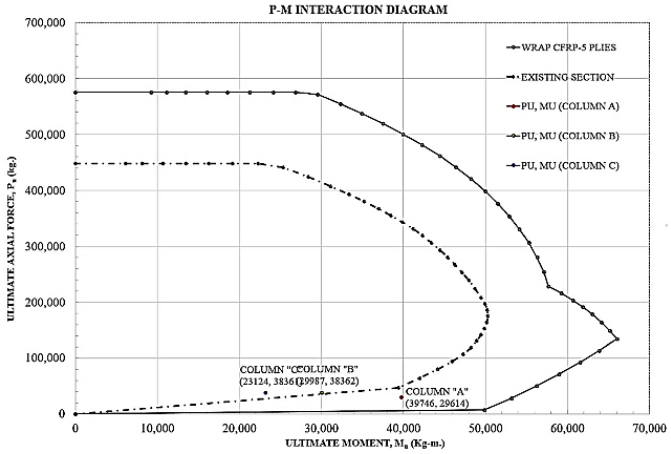
ภาพที่ 7 (ก) รายละเอียดหน้าตัดคานโครงสร้างเดิมและ (ข) รายละเอียดหน้าตัดคานภายหลังซ่อมแซมและเสริมกำลัง

สำหรับชิ้นส่วนเสาตอม่อที่เสียหายระดับ 3 มีสาเหตุจากสภาพแวดล้อมริมทะเลที่มีทรายทับถมบริเวณเสา ทำให้ความยาวประสิทธิผลสั้นลงและเกิดพฤติกรรมคล้ายเสาสั้น ประกอบกับแรงดันด้านข้างจากมวลทรายตะกอนที่ทับถม ซึ่งเมื่อ

วิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกประลัยตามมาตรฐาน ASCE/SEI 7-22 [19] จะได้แรงอัดประลัยตามแนวแกนออกแบบ Pu เท่ากับ 29,614 กก. และโมเมนต์ดัดประลัยออกแบบ Mu เท่ากับ 39,746 กก.ม. การฟื้นฟูสภาพและเสริมกำลังเสาจึงดำเนินการโดยการสกัดคอนกรีตเสาและเปลี่ยนเหล็กที่เป็นสนิมด้วยเหล็กเสริมใหม่และทำการซ่อมผิวคอนกรีตแล้วจึงพันโอบรัดด้วยแผ่น CFRP หนา 0.166 มม. จำนวน 6 ชั้น รอบเสาตอม่อทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 ซม. ดังแสดงในภาพที่ 8 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการโอบรัด (Confinement) ซึ่งจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดและแรงดัดของเสาเพิ่มสูงขึ้นถึงระดับเกณฑ์ความปลอดภัย โดยแผนภาพแรงอัดในแนวแกนและโมเมนต์ดัด (P-M Diagram) สำหรับหน้าตัดเสาก่อนและหลังการเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP แสดงดังภาพที่ 9



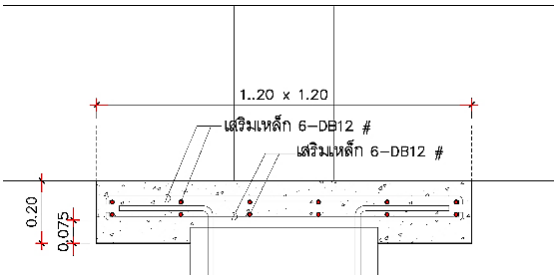
ภาพที่ 8 รูปแบบการพันแผ่น CFRP เพื่อเพิ่มสภาวะโอบรัดสำหรับชิ้นส่วนเสาตอม่อ



ภาพที่ 9 P-M Interaction Diagram ของหน้าตัดเสาที่พันด้วย CFRP เปรียบเทียบกับหน้าตัดเดิม

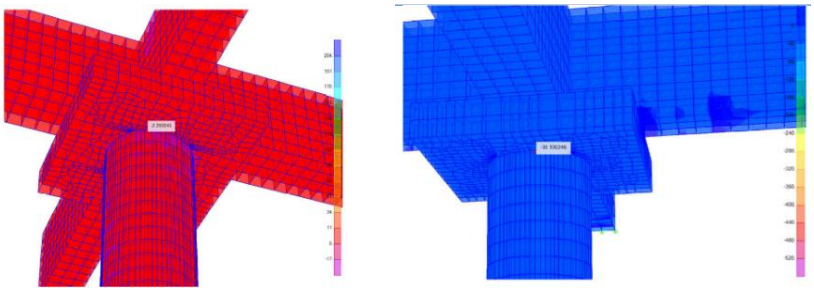
สำหรับแป้นหัวเสาที่ผิวคอนกรีตแตกร่อนอย่างรุนแรงได้รื้อถอนและหล่อใหม่ด้วยขนาดเดิม 1.20 x 1.20 เมตร หนา 0.20 เมตร และเสริมด้วยเหล็กตะแกรงด้วยเหล็กข้ออ้อยขนาด 12 มม. 6 เส้น (6-DB12) จำนวน 2 ชั้น ดังแสดงในภาพที่ 10 เพื่อคงหน้าที่กระจายน้ำหนักบรรทุกจากคานลงสู่เสาและลดการกระจุกตัวของความเค้นบริเวณขอบคานกับพื้นที่หน้าตัดเสา

จากการสำรวจซึ่งพบว่าแป้นหัวเสามีอัตราการเสื่อมสภาพระดับรุนแรงสูงถึง 32.5% และข้อจำกัดในการรื้อถอนแป้นหัวเสาออกโดยไม่หล่อสร้างใหม่ภายใต้การทำงานในพื้นที่แคบ การศึกษาจึงได้จำลองและวิเคราะห์พฤติกรรมด้วย FEM เพื่อประเมินพฤติกรรมเชิงกลของแป้นหัวเสาในการกระจายแรงและลดการกระจุกตัวของความเค้นบริเวณรอยต่อระหว่างเสาตอม่อและคาน โดยเปรียบเทียบระหว่างกรณีมีแป้นหัวเสาและไม่มีแป้นหัวเสา



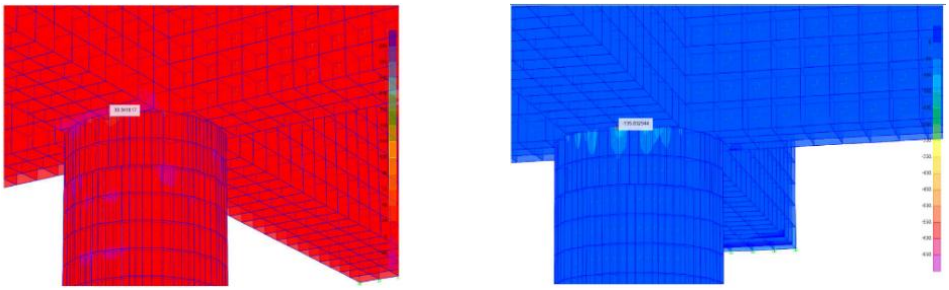
ภาพที่ 10 การฝังเหล็กเสริมในแป้นหัวเสาสำหรับการก่อสร้างใหม่

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในภาพที่ 11 พบว่า ในกรณีมีแป้นหัวเสา โครงสร้างสามารถกระจายแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีความเค้นดึงสูงสุด (Maximum Tensile Stress) บริเวณจุดเชื่อมต่อเพียง 2.30 ksc ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนเพียง 6.35% ของกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่ 36.22 ksc และมีความเค้นอัดสูงสุด (Maximum Compressive Stress) เท่ากับ 38.10 ksc คิดเป็นสัดส่วนเพียง 11.6% ของกำลังอัดคอนกรีตที่ประเมินได้ของแป้นหัวเสา ซึ่งมีค่าเท่ากับ 328 ksc ขณะที่ในกรณีตัดแป้นหัวเสาออกโดยไม่มีการหล่อสร้างใหม่ทดแทน จากผลการวิเคราะห์ดังภาพที่ 12 พบว่า ความเค้นดึงสูงสุดบริเวณรอยต่อคานและหัวเสาจะเพิ่มขึ้นอย่างมากถึง 38.04 ksc หรือมากกว่า 16 เท่า ซึ่งเกินกว่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีต ซึ่งนำไปสู่ความเสียหายเนื่องจากแรงดึงบริเวณจุดต่อ ขณะที่ความเค้นอัดสูงสุดปรับตัวเพิ่มขึ้นเป็น 135.03 ksc ผลการวิเคราะห์นี้จึงยืนยันว่าแป้นหัวเสาทำหน้าที่สำคัญในการลดความเค้นกระจุกตัวและสนับสนุนถึงความจำเป็นในการหล่อสร้างแป้นหัวเสาใหม่สำหรับตำแหน่งที่เสื่อมสภาพรุนแรง



(ก) (ข)

ภาพที่ 11 การวิเคราะห์ความเค้นด้วยวิธี FEM กรณีมีแป้นหัวเสา (ก) ความเค้นอัดสูงสุด และ (ข) ความเค้นดึงสูงสุด



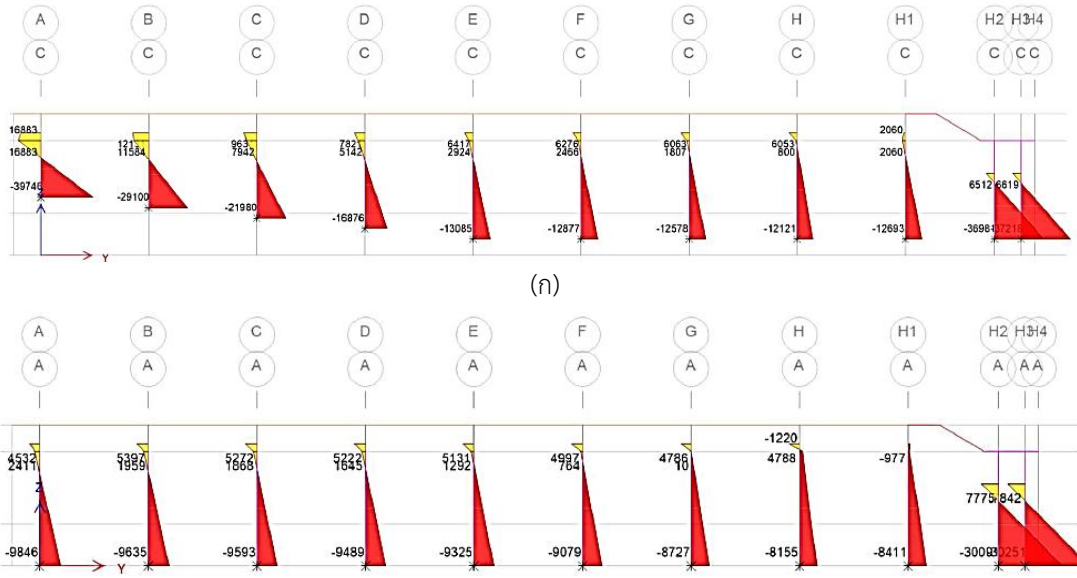
(ก) (ข)

ภาพที่ 12 การวิเคราะห์ความเค้นด้วยวิธี FEM กรณีไม่มีแป้นหัวเสา (ก) ความเค้นอัดสูงสุด และ (ข) ความเค้นดึงสูงสุด

จากการสำรวจซึ่งสังเกตพบความเสียหายระดับรุนแรงของเสาตอม่อกระจุกตัวบริเวณชายฝั่งที่มีการสะสมตัวของทรายชายหาดสูงตามแนวลาดชันดังภาพที่ 13 ขณะที่เสาในพื้นที่ทรายราบเรียบหรือมีความสูงปกติกลับไม่ปรากฏความเสียหายที่ส่งผลต่อเสถียรภาพอย่างเด่นชัด ทำให้เสากลุ่มที่ถูกทรายทับถมเกิดความยาวประสิทธิผลที่สั้นลง ทำให้พฤติกรรมของเสามีกลไกเสมือนเป็นเสาสั้นที่มีสติฟเนสหรือความแข็งเกร็งด้านข้าง (Lateral Stiffness) สูงขึ้น ส่งผลให้เสาบริเวณดังกล่าวรับแรงด้านข้างและเกิดโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนสูงกว่าเสาข้างเคียงเมื่อได้รับแรงกระทำในแนวราบจาก กระแสน้ำคลื่นทะเล และการหดและขยายตัวจากผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยเมื่อพิจารณาสาเหตุจากผลการวิเคราะห์โครงสร้างโดยพิจารณาปรับความยาวประสิทธิผลของเสาให้สอดคล้องกับระดับการทับถมของทราย พบว่าโมเมนต์ดัดของเสาที่ถูกทรายทับถมในระดับสูงจะมีค่ามากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความยาวประสิทธิผลที่ลดลงทำให้ค่าความแข็งเกร็งด้านข้างเพิ่มขึ้นและรับแรงภายในสูงขึ้น โดยมีค่าโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1.23 เท่าจนถึง 4.03 เท่าเมื่อเทียบกับกรณีที่วิเคราะห์ด้วยพื้นทรายราบเรียบ โดยค่าโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้นมากที่สุดในเสาตามแนวกริด A ซึ่งมีการทับถมสูงสุดและมีการทับถมน้อยลงจนถึงแนวกริด H โดยเสาในแนวกริด A เกิดโมเมนต์ดัดในเสาที่ถูกทรายทับถมเท่ากับ 39,746 กก.ม. และกรณีพื้นทรายราบเรียบเท่ากับ 9,846 กก.ม. คิดเป็นสัดส่วนสูงถึง 4.03 เท่า โดยผลการวิเคราะห์ไดอะแกรมโมเมนต์ดัดของเสาที่มีการทับถมของทรายที่สูงขึ้นตามสภาพแวดล้อมจริงและกรณีที่พื้นทรายราบเรียบสม่ำเสมอกันในภาพที่ 14 ก และ (ข) ตามลำดับ



ภาพที่ 13 ลักษณะการเสื่อมสภาพรุนแรงของเสาตอม่อด้วยพฤติกรรมเสาสั้นจากการทับถมของทรายชายหาด



(ก)

(ข)

ภาพที่ 14 ไดอะแกรมโมเมนต์ดัดของเสา (ก) วิเคราะห์ผลการทับถมของทราย (ข) วิเคราะห์ด้วยสมมติฐานพื้นทรายราบเรียบ

การซ่อมแซมชิ้นส่วนโครงสร้างแป้นหัวเสาที่เสียหายรุนแรงและพบรอยต่อการเทคอนกรีต (Cold Joint) ให้รื้อถอนและเทใหม่โดยเพิ่มระยะหุ้มคอนกรีตเป็นไม่น้อยกว่า 7.5 ซม. สำหรับแผ่นพื้นสำเร็จรูป Hollow-core ที่เสื่อมสภาพรุนแรงให้เปลี่ยนเป็นระบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กแบบหล่อในที่ และออกแบบเพิ่มคานย่อยเพื่อปรับการถ่ายน้ำหนักให้เป็นพื้นทางเดียว (One-way Slab) ถ่ายแรงลงสู่คานหลักเดิม ฉีดพ่นสาร Silane เคลือบผิวคอนกรีตทั้งหมดในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อป้องกันน้ำและไอออนคลอไรด์ โดยแนวทางการซ่อมแซมและเสริมกำลังของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ตรวจพบความเสียหายระดับรุนแรง (ระดับ 3) สรุปได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แนวทางการซ่อมแซมและเสริมกำลังชิ้นส่วนโครงสร้างที่เสียหายรุนแรง

ชิ้นส่วน	แนวทางการซ่อมแซมและเสริมกำลังที่ความเสียหายรุนแรง (ระดับ 3)
เสา	สกัดคอนกรีตที่เสื่อมสภาพ ขจัดสนิมบนเหล็กเสริม ทาน้ำยาประสานคอนกรีต หล่อซ่อมด้วย Structural Repair Mortar และเสริมกำลังด้วยการพันแผ่น CFRP จำนวน 6 ชั้น
คาน	สกัดคอนกรีตที่เสียหาย ตัดต่อเปลี่ยนเหล็กเสริมด้านล่างใหม่ ทาน้ำยาประสาน หล่อซ่อมด้วย Structural Repair Mortar และเสริมกำลังด้วยแผ่น CFRP เพื่อฟื้นฟูกำลังรับน้ำหนักบรรทุกจร
แป้นหัวเสา	รื้อถอนและก่อสร้างใหม่ทั้งหมดด้วยคอนกรีตเทในที่พร้อมการจัดวางเหล็กเสริมใหม่ด้วยเหล็กตะแกรงเพื่อรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนทะลุจากการถ่ายน้ำหนักจากคานสู่หัวเสา
พื้น	ฉีดน้ำยา Epoxy และซ่อมแซมผิวคอนกรีต (กรณีชำรุดเฉพาะจุด) รื้อถอนแผ่นพื้น Hollow core เดิม ดำเนินการติดตั้งคานย่อยและเทหล่อพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กในที่พร้อมฉีดพ่นสารเคมีป้องกันการดูดซึมน้ำและการแทรกซึมของคลอไรด์ (กรณีเสียหายบริเวณกว้าง)

สรุปผล

การประเมินสภาพลานอเนกประสงค์คอนกรีตเสริมเหล็กบริเวณชายฝั่งทะเลเมืองพัทยาซึ่งมีอายุกว่า 17 ปี พบความเสียหายรุนแรงกระจุกตัวในบริเวณริมทะเลและโซนน้ำขึ้นน้ำลง โดยแป้นหัวเสาเป็นชิ้นส่วนที่มีสัดส่วนความเสียหายระดับรุนแรงสูงที่สุด รองลงมาคือชิ้นส่วนคาน โดยผลการทดสอบตัวอย่างแท่งคอนกรีตที่เจาะสำรวจพบค่ากำลังอัดที่ยังสูงกว่าค่ากำลังอัดออกแบบเดิมที่ประเมินไว้ ซึ่งแสดงถึงเนื้อคอนกรีตโดยรวมยังคงมีกำลังเพียงพอ ขณะที่ผลการทดสอบคาร์บอเนชั่น ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ และกำลังยึดเหนี่ยวของผิวคอนกรีต สนับสนุนการเลือกใช้แนวทางซ่อมแซมและเสริมกำลังเฉพาะบริเวณมากกว่าการรื้อถอนโครงสร้างทั้งหมด การศึกษาใช้การวิเคราะห์ย้อนกลับเพื่อประเมินความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกประกอบกับการวิเคราะห์ด้วย FEM เพื่อประเมินพฤติกรรมและแรงภายในที่เปลี่ยนไปในแป้นหัวเสาและเสาตอม่อ เพื่อประกอบการกำหนดแนวทางการฟื้นฟูสภาพ พบว่าแป้นหัวเสามีส่วนสำคัญในการกระจายแรงและต้องซ่อมแซมด้วยการรื้อและหล่อคอนกรีตใหม่ เสาตอม่อพบการเสียหายรุนแรงในบางตำแหน่ง โดยเฉพาะในเสาที่ถูกทรายทับถมสูง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ความยาวประสิทธิผลของเสาตอม่อลดลงและเกิดพฤติกรรมในลักษณะเสาสั้น ทำให้มีค่าความแข็งเกร็งด้านข้างหรือ lateral stiffness เพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดแรงภายในที่เพิ่มขึ้น โดยการวิเคราะห์ผลของการทับถมของทรายที่ไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดโมเมนต์ดัดภายในเสาเพิ่มขึ้นอย่างมากในเสาที่ถูกทรายทับถมสูงและลดลงตามระดับการทับถมของทราย โดยพบว่ามีค่าโมเมนต์ดัดในเสามีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1.23 เท่าไปจนถึงสัดส่วนมากที่สุดถึง 4.03 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีผิวทรายราบเรียบ แนวทางการฟื้นฟูสภาพจึงประกอบด้วยการซ่อมคอนกรีตและเหล็กเสริมและเสริมกำลังของเสาด้วยการพัน CFRP และเสริมกำลังคานด้วยการหุ้มแผ่น CFRP บริเวณท้องคาน รวมไปถึงการเปลี่ยนพื้นสำเร็จรูปที่เสียหายมากเป็นพื้นคอนกรีตหล่อในที่ร่วมกับการเสริมคานย่อย พร้อมป้องกันผิวคอนกรีตจากการดูดซึมน้ำและการแทรกซึมของคลอไรด์ด้วยสาร Silane กรอบการประเมินที่ผสานการตรวจสภาพ การทดสอบวัสดุ และการวิเคราะห์โครงสร้างในงานนี้ สามารถประยุกต์ใช้กับโครงสร้างชายฝั่ง

ประเภทอื่นที่มีการสัมผัสคลอไรด์และมีเงื่อนไขหน้างานเฉพาะ เพื่อแยกกลไกความเสียหายและเลือกมาตรการฟื้นฟูให้เหมาะสมกับแต่ละตำแหน่งได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเทศบาลเมืองพัทยา อำเภอบางละมุง จังหวัดชลบุรี และบริษัท วิกเกอร์ เมเจอร์ จำกัด เป็นอย่างยิ่ง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนการดำเนินงานสำรวจภาคสนาม การทดสอบในห้องปฏิบัติการ ตลอดจนการประเมินโครงสร้าง ขอขอบคุณ นางสาวศิรดา ศิริวัฒน์, นางสาวธัญลักษณ์ ช่วยสัตว์, นายเอกวีร์ เผือกสีสุข, นายภูมิพันธ์ จันเติบ, นางสาวเจนจิรา อาจดวงดี และนายอดิเทพ เอกตาแสง นิสิตระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และ ดร.ธิดาพร เชื้อสวัสดิ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการเก็บสำรวจข้อมูลภาคสนาม

เอกสารอ้างอิง

1. Tian, Y., Zhang, G., Ye, H., Zeng, Q., Zhang, Z., Tian, Z., Jin, X., Jin, N., Chen, Z., Wang, J. Corrosion of steel rebar in concrete induced by chloride ions under natural environments. Construction and Building Materials. 2023; 369: 130504. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130504
2. Ali, M., Shams, M. A., Bheel, N., Almaliki, A. H., Mahmoud, A. S., Dodo, Y. A., Benjeddou, O. A review on chloride induced corrosion in reinforced concrete structures: Lab and in situ investigation. RSC Advances. 2024; 14(50): 37252–37271. https://doi.org/10.1039/d4ra05506c
3. Bolzoni, F., Brenna, A., Ormellese, M. Recent advances in the use of inhibitors to prevent chloride-induced corrosion in reinforced concrete. Cement and Concrete Research. 2022; 154: 106719. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106719
4. Das, C. S., Zheng, H., Dai, J.-G. A review of chloride-induced steel corrosion in coastal reinforced concrete structures: Influence of micro-climate. Ocean Engineering. 2025; 325: 120794. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120794
5. Marques, P. F., Costa, A. Service life of RC structures: Carbonation induced corrosion. Prescriptive vs. performance-based methodologies. Construction and Building Materials. 2010; 24(3): 258–265. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.039
6. British Standards Institution. BS EN 14630:2006. Products and systems for the protection and repair of concrete structures—Test methods—Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method. British Standards Institution; 2006. https://landingpage.bsigroup.com/LandingPage/Standard?UPI=000000000030091526
7. ASTM International. ASTM C876-15. Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2015. https://store.astm.org/c0876-15.html
8. Otieno, M., Beushausen, H., Alexander, M. Chloride-induced corrosion of steel in cracked concrete—Part I: Experimental studies under accelerated and natural marine environments. Cement and Concrete Research. 2016; 79: 373-385. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.08.009

9. American Concrete Institute. ACI 440.2R-17: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute; 2017. https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?id=51700867&m=details
10. ASTM International. ASTM D4541-17. Standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testers. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2017. https://store.astm.org/d4541-17.html
11. Loreto, G., Di Benedetti, M., De Luca, A., Nanni, A. Assessment of reinforced concrete structures in marine environment: A case study. Corrosion Reviews. 2019; 37(1): 57-69. https://doi.org/10.1515/corrrev-2018-0046
12. Bayuaji, R., Darmawan, M. S., Husin, N. A., Anugraha, R. B., Budipriyanto, A., Stewart, M. G. Corrosion damage assessment of a reinforced concrete canal structure of power plant after 20 years of exposure in a marine environment: A case study. Engineering Failure Analysis. 2018; 84: 287-299. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.11.014
13. Bakar, M. B. C., Muhammad Rashid, R. S., Amran, M., Saleh Jaafar, M., Vatin, N. I., Fediuk, R. Flexural strength of concrete beam reinforced with CFRP bars: A review. Materials. 2022; 15(3): 1144. https://doi.org/10.3390/ma15031144
14. Naser, M. Z., Hawileh, R. A., Abdalla, J. A. Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review. Engineering Structures. 2019; 198: 109542. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109542
15. Al Nuaimi, N., Sohail, M. G., Hawileh, R., Abdalla, J. A., Douier, K. Durability of reinforced concrete beams externally strengthened with CFRP laminates under harsh climatic conditions. Journal of Composites for Construction. 2021; 25(2): 04021005. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001113
16. Sigit Darmawan, M., Bayuaji, R., Anugraha, R. B., Saputra, D. A., Victoriawan, M. A. Case study of performance of a jetty structure after 25 years of exposure in a marine environment considering earthquake load. Engineering Failure Analysis. 2024; 156: 107831. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107831
17. ASTM International. ASTM C42/C42M-20. Standard test method for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2020.
18. กระทรวงมหาดไทย. กฎกระทรวงกำหนดการออกแบบโครงสร้างอาคารและลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานโครงสร้างอาคาร พ.ศ. 2566. ราชกิจจานุเบกษา. 2566; 140(54 ก): 4-20. https://ratchakitcha.soc.go.th/documents/140A054N0000000000400.pdf
19. American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 7-22: Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. Reston (VA). American Society of Civil Engineers; 2022. https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784415788