

# STEEL CONSTRUCTION TODAY & TOMORROW

(ฉบับที่ 39 สิงหาคม 2013)

บทความตีพิมพ์ร่วมกันระหว่างสหพันธ์เหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยและสมาคมก่อสร้างโครงสร้าง  
เหล็กแห่งประเทศไทย

วารสารฉบับแปลภาษาอังกฤษของ *Steel Construction Today & Tomorrow* ได้มีการตีพิมพ์ 3 ครั้งต่อปี และมีการจัดส่งทั่วโลกให้แก่ผู้บริหารของบริษัทในทุกภาคอุตสาหกรรมและองค์กรที่เกี่ยวข้อง จุดประสงค์สำคัญในการตีพิมพ์วารสารนี้ก็นำเสนอมาตรฐานและข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างโครงสร้างเหล็ก ตัวอย่างของโครงการก่อสร้างใหม่ ๆ เทคโนโลยีและวัสดุก่อสร้างที่ล้ำหน้า ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างโครงสร้างอาคารและวิศวกรรมโยธา

เพื่อช่วยให้ผู้อ่านชาวไทยสามารถที่จะเข้าใจบทความได้ง่ายขึ้น ได้มีการจัดแปลบทความภาคภาษาไทย และแนบท้ายกับฉบับภาษาอังกฤษ สำหรับรูปภาพ ไดอะแกรมและตารางได้มีการจัดแปลเป็นภาษาไทยเพียงส่วนหัวเรื่อง ผู้อ่านสามารถอ้างอิงกับฉบับภาษาอังกฤษสำหรับเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้ถ้าผู้อ่านต้องการทราบศัพท์บรรยายหรือ รายละเอียดทางด้านเทคนิค โปรดอ้างอิงกับบทความภาษาอังกฤษ เช่นเดียวกัน

ฉบับที่ 39 สิงหาคม 2013: เนื้อหา

การบำรุงรักษาสาธารณูปโภคท่าเรือ	1
การบริหารจัดการตลอดช่วงอายุการใช้งานโครงสร้างเหล็กของท่าเรือ	4
ผลกระทบของต่าหินและสภาพแวดล้อมต่อการเสื่อมสภาพของวัสดุเคลือบผิวเนื่องจากการผูกมัดในเสาเข็มและแผ่นเหล็กในสภาพสัมผัสทะเล	7
การประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่คงเหลืออยู่สำหรับโครงสร้างเหล็กที่เสียหายจากการผูกมัดและการประมาณสมรรถนะของโครงสร้างในอนาคต	10
เทคโนโลยีการประเมินสมรรถนะตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างเหล็กสำหรับท่าเรือ โดยเน้นที่สมรรถนะของโครงสร้างภายหลังการซ่อมแซม	13
วิธีการประเมินกำลังรับน้ำหนักที่คงเหลืออยู่ของโครงสร้างเหล็กของท่าเรือ	16

ฉบับภาษาไทย: ©The Japan Iron and Steel Federation 2013

The Japan Iron and Steel Federation

3-2-10 Nihonbashi-Kayabacho, Chuo-ku, Tokyo 103-0025, Japan

โทรสาร: 81-3-3667-0245

โทรศัพท์ : 81-3-3669-4815

ที่อยู่อีเมล: [sunpou@jjsf.or.jp](mailto:sunpou@jjsf.or.jp)

เว็บไซต์: <http://www.jjsf.or.jp>

(หน้าที 1-3)

### การบำรุงรักษาสาธารณูปโภคท่าเรือ

โดยนาโอิกิ เอนโด สำนักงานบริหารจัดการท่าเรือ ส่วนวางแผนทางวิศวกรรม การท่าเรือ กระทรวงที่ดิน สาธารณูปโภค การคมนาคมและการท่องเที่ยว

### สารบัญ

โครงสร้างสาธารณูปโภคท่าเรือของประเทศญี่ปุ่นส่วนมากได้ถูกสร้างขึ้นหรือมีการปรับปรุงในระหว่างช่วงปี 1970s และ 1980s และได้รับการคาดการณ์ว่าจะถูกเรียกว่าล้าสมัยในอนาคตอันใกล้ เช่นเดียวกับกับสาธารณูปโภคอื่น ๆ ท่าเรือเหล่านี้จำเป็นต้องมีการตรวจสอบอย่างเหมาะสมเพื่อป้องกันปัญหาสภาพการหมดอายุการใช้งาน

ประเทศญี่ปุ่น ต้องเผชิญกับปัญหาเฉพาะหน้าหลายอย่าง: งบประมาณที่จำกัดอย่างยิ่งทั้งของรัฐส่วนกลางและหน่วยงานราชการส่วนท้องถิ่น จำนวนประชากรที่ลดลง อัตราการเกิดของประชากรที่ต่ำลง และสังคมผู้สูงอายุที่มากขึ้น ในสถานการณ์เช่นนี้ จึงเป็นการยากลำบากที่จะนำวิธีการตรวจสอบทั่วไปมาใช้สำหรับการวัดความล้าสมัยของสาธารณูปโภคในประเทศอย่างมีประสิทธิภาพได้ ในการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ กระทรวงที่ดิน สาธารณูปโภค การคมนาคมและการท่องเที่ยว (MLIT) ได้จัดตั้งคณะกรรมการในการบำรุงรักษาสาธารณูปโภคและคณะกรรมการอื่น ๆ เพื่อศึกษาวิธีการป้องกันการล้าหลังของสาธารณูปโภคเหล่านี้ บทความต่อไปนี้จะแสดงให้เห็นถึงหนึ่งในวิธีการป้องกันแผนการบำรุงรักษาสำหรับสาธารณูปโภคท่าเรือต่าง ๆ

### จากการบำรุงรักษาภายหลังจนเป็นการบำรุงรักษาแบบป้องกัน

ท่าเทียบเรือทำหน้าที่ที่สำคัญในโครงสร้างสาธารณูปโภคท่าเรือ ท่าเทียบเรือสาธารณะทั้งหมดที่มีการใช้งานอยู่ในช่วงปลายเดือนมีนาคม 2013 จำนวน 8 % ได้มีการใช้งานมากกว่า 50 ปีแล้วนับจากที่เริ่มก่อสร้าง อย่างไรก็ตาม อัตรานี้จะเพิ่มขึ้นเป็น

58 % หลังจากนั้นอีก 20 ปีในช่วงปลายเดือนมีนาคม 2033 (รูปที่ 1) เพราะว่าโครงสร้างเหล่านี้ได้แสดงการเสื่อมสภาพและความเสียหายตามระยะเวลาที่ผ่านมาเป็นจำนวนมากขึ้นเรื่อย ๆ (รูปที่ 2) จึงมีข้อกังวลไม่เพียงแต่การเสื่อมสภาพและความบกพร่องในการใช้งานแต่ยังรวมถึงการเกิดอุบัติเหตุอีกด้วย

รูปที่ 1 การก่อสร้างท่าเทียบเรือในประเทศญี่ปุ่น

รูปที่ 2 ตัวอย่างของท่าเทียบเรือที่ล้าสมัย

การเสื่อมสภาพตามเวลาของโครงสร้างก่อให้เกิดปัญหาใหญ่ ๆ 2 ปัญหา: ค่าใช้จ่ายตลอดช่วงอายุการใช้งานของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้น (รายจ่ายในการบำรุงรักษาและการปรับปรุงในอนาคต) และความบกพร่องในการใช้งานเนื่องจากอุบัติเหตุและปัจจัยที่เป็นอุปสรรคอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องเนื่องจากการมีอายุของโครงสร้าง ในการเผชิญหน้ากับปัญหาเหล่านี้ เราพิจารณาได้ว่าเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องพัฒนาแนวความคิดใหม่ในการบำรุงรักษา เช่น การเปลี่ยนแปลงจากการบำรุงรักษาภายหลังซึ่งมิได้ให้ความสำคัญในการตรวจวัดสภาพโครงสร้างจนกระทั่งงานบูรณะซ่อมแซมสร้างขึ้นใหม่เป็นสิ่งจำเป็นในการแก้ปัญหา งานบำรุงรักษาแบบป้องกันซึ่งให้ความสำคัญในการยืดระยะเวลาและลดราคาค่าใช้จ่ายตลอดระยะเวลาการใช้งานของโครงสร้าง (อ้างอิงกับรูปที่ 3)

เรายังพิจารณาว่าเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่งานบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่องตลอดการใช้งานของโครงสร้างควรที่จะมีการนำไปใช้โดยองค์กรที่ดูแลบริหารจัดการท่าเรือ และกลไกในการทำงานเหล่านี้ควรที่จะนำมาใช้ในการป้องกันอุบัติเหตุและการเสื่อมสภาพที่อาจเกิดขึ้นในการใช้งานตามสภาพ

รูปที่ 3 รูปภาพของการบำรุงรักษาแบบป้องกันและแบบก่อสร้างภายหลัง

### วิธีการตรวจวัดที่นำมาใช้โดยสำนักงานสาธารณูปโภคท่าเรือ

เพื่อที่จะส่งเสริมแผนการบำรุงรักษาที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการล้าสมัยของโครงสร้างท่าเรือ สำนักงานสาธารณูปโภคท่าเรือ

ได้จัดตั้งกฎหมายและข้อกำหนดและกำหนดวิธีการตรวจวัดต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับเทคโนโลยีและงบประมาณโดยมีเป้าหมายเพื่อจัดเตรียมแผนและดำเนินงานบำรุงรักษาที่เหมาะสมตามแนวทางแผนงานนี้

ในขณะที่แผนงานบำรุงรักษาที่วางไว้นั้นมีเนื้อหาที่ใช้ได้ดีกับสาธารณูปโภคท่าเรือในแต่ละแห่ง แต่ยังมีได้มีการศึกษาเกี่ยวกับโครงการที่ลดค่าใช้จ่ายสำหรับสาธารณูปโภคท่าเรือทั้งหมดโดยรวม หรือระดับค่าใช้จ่ายรายปีของโครงการ เพราะเหตุนี้ ทางสำนักงานจึงได้นำเสนอ “แผนงานบำรุงรักษาเพื่อป้องกัน” ซึ่งส่งเสริมให้มีการศึกษาแผนของท่าเรือแต่ละท่าเรืออย่างละเอียด

### แผนการบำรุงรักษาเพื่อป้องกัน

แผนการบำรุงรักษาเพื่อป้องกันได้เล็งถึงโครงสร้างต่าง ๆ ภายในท่าเรือ และกำหนดวิธีการในการป้องกันการล้าสมัยหรือเสื่อมสภาพของสาธารณูปโภคต่าง ๆ และวงรอบของโครงการไว้เกือบ 5 ปี ตามระบบการป้องกันที่มีการกำหนดไว้ แผนงานได้ถูกพัฒนาขึ้นจากแต่ละท่าเรือ หน่วยงานหลักที่เข้าร่วมในการจัดเตรียมแผนงานนี้คือ รัฐบาลส่วนกลาง (องค์กรของรัฐที่ดูแลในการบริหารจัดการท่าเรือ) และองค์กรที่ทำหน้าที่ดูแลจัดการท่าเรือโดยเฉพาะ แผนงานนี้ได้ผ่านการยอมรับจากทั้งสองหน่วยงานหลักนี้ แผนงานได้กำหนดไว้ใน “คู่มือในการทำงาน” ถึงนโยบายพื้นฐานในการพิจารณาว่าจำเป็นต้องใช้วิธีการในการตรวจวัด การเสื่อมสภาพล้าสมัยในโครงสร้างหรือไม่ (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 แผนงานบำรุงรักษาแบบป้องกัน (แนวความคิด)

การตัดสินใจที่จะใช้ “คู่มือในการทำงาน” เป็นเครื่องมือในการตัดสินใจเป็นสิ่งที่มีความพื้นฐานมาจากภาพรวมที่มีการพิจารณาถึงสภาพทางสังคมที่ล้อมรอบท่าเรือ (สภาพการใช้งานในปัจจุบัน การตรวจสอบแผนงานในการเปลี่ยนแปลงการใช้งาน หรือ ไม่ได้มีการตรวจสอบทางเลือกในการเปลี่ยนแปลงการใช้งาน สมมติฐานของการใช้งานโดยเร่งด่วน หรือการไม่มีสมมติฐาน คำขอจากผู้ใช้ท่าเรือ) และสภาพทางกายภาพ (ระดับของการเสื่อมสภาพล้าสมัย ลักษณะของโครงสร้าง)

นอกจากนี้ ในแนวทางการตัดสินใจที่จะแนะนำโดยการใช้

“คู่มือในการทำงาน” เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องตรวจสอบไม่เพียงแต่สาธารณูปโภคที่ใช้งานอยู่เท่านั้น แต่ยังรวมถึงสาธารณูปโภคที่ควรจะมีการตัดแปลงการใช้งานเพื่อใช้งานอื่น หรือมาตรการที่ไม่ควรนำมาใช้ต่อไป ตัวอย่างเช่น การบำรุงรักษาแบบป้องกันไม่ควรนำมาใช้สำหรับสาธารณูปโภคที่อยู่ในตำแหน่งสถานที่ที่กำหนดไว้ให้มีการฟื้นฟูหรือสาธารณูปโภคที่จะตัดแปลงไปใช้งานประเภทอื่น เพราะถือว่าสถานที่เหล่านั้นไม่ได้ทำหน้าที่เป็นที่จอดเรืออีกต่อไป ดังนั้น จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องใส่ใจกับงานบำรุงรักษาแบบป้องกันเพื่อที่จะพัฒนาแผนงานที่มีการคำนึงถึงราคาตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างทั้งหมดของท่าเรือที่น้อยที่สุด นอกจากนี้ แผนงานที่กำหนดไว้นี้จะต้องสามารถงัดไว้ซึ่งส่วนประกอบต่าง ๆ ของท่าเรือ ในขณะที่เดียวกันกับที่คงไว้ซึ่งการใช้งานที่สำคัญทั้งหลาย เป็นไปตามแผนงานและขั้นตอนที่กำหนดไว้

### บทสรุป

แผนการบำรุงรักษาเพื่อป้องกันโครงสร้างจะเริ่มนำมาใช้ในปี 2013 เพื่อที่จะจัดเตรียมแผนการป้องกันให้ได้ดียิ่งขึ้น เราตั้งใจจะตรวจสอบแผนการป้องกันในปัจจุบันอีกครั้งหนึ่งโดยมีการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแนวโน้มทางสังคม และงานอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง สำนักงานบริหารท่าเรือมีความต้องการอย่างยิ่งที่จะนำมาตราการที่มีประสิทธิภาพมาใช้ในการลดการเสื่อมสภาพ ล้าสมัยของท่าเรือ ความพยายามนี้รวมไปถึง: การนำแผนการบำรุงรักษาแบบป้องกันซึ่งคำนึงถึงการทำงานของคณะกรรมการตรวจสอบว่ามีการเดินทางไปตามแผนงานและมาตรการการบำรุงรักษาในระบบกฎหมายใหม่หรือไม่ และการร่วมมือในการทำงานกับองค์กรจัดการท่าเรือและองค์กรที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ เป้าหมายของเราก็คือการคงไว้ซึ่งการบริการสังคมอย่างมีคุณภาพ



(หน้าที่ 4-6)

## การบริหารจัดการตลอดช่วงอายุการใช้งานโครงสร้างเหล็กของท่าเรือ

โดยอิริชิ โยโกตะ ศาสตราจารย์ ห้องปฏิบัติการ Lifetime Engineeringมหาวิทยาลัยฮอกไกโด

### บทนำ

โครงสร้างท่าเรือมีอายุการใช้งานที่ยาวนานและได้รับการคาดหวังว่าจะคงอยู่ใช้งานได้ตลอดช่วงระยะเวลาแต่ก็ไม่อาจจะตรวจสอบวัดผลในเวลานี้ได้ เหล็กและคอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุหลักในการก่อสร้างมีแนวโน้มที่จะเสื่อมสภาพลงเนื่องจากสภาพแวดล้อมใกล้ทะเลและสารเคมีต่าง ๆ และเป็นเหตุให้โครงสร้างมีสมรรถนะในการใช้งานต่ำลง หรืออาจจะเกิดการวิบัติได้ในเวลาต่อมา ในช่วงเริ่มต้นของการออกแบบ ผู้ออกแบบตั้งสมมติฐานไว้หลายอย่าง ซึ่งมักจะเป็นสภาพที่ต้องออกแบบไว้เผื่อมากที่สุดโดยมีการกำหนดตัวเลขอัตราส่วนความปลอดภัยไว้ เพื่อให้ได้โครงสร้างที่สามารถรองรับสมรรถนะตามที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม การเสื่อมสภาพอย่างรุนแรงของชิ้นส่วนโครงสร้างอาจจะเกิดขึ้นได้เนื่องจากการออกแบบที่มีได้มีการเผื่อความคงทนที่เพียงพอ ซึ่งมีสาเหตุจากการตั้งสมมติฐานที่เผื่อไว้ไม่น้อยเกินไป และ/หรือการขาดงานบำรุงรักษาโครงสร้างที่เหมาะสม ก็เป็นไปได้

ในการที่จะเผชิญปัญหาเหล่านี้ จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องมีการร่วมกันทำงานระหว่างฝ่ายออกแบบและบำรุงรักษา งานบริหารจัดการโครงสร้างให้มีอายุยืนยาวเป็นระบบการจัดการเพื่อรองรับการตัดสินใจทางวิศวกรรมเพื่อให้มั่นใจว่าโครงสร้างมีระดับสมรรถนะเพียงพอและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ทั้งจากการออกแบบ บำรุงรักษา และงานอื่น ๆ ที่เกี่ยวเนื่องในช่วงระยะเวลาการใช้งาน

### การบริหารจัดการโครงสร้างในด้านอายุการใช้งาน

ช่วงระยะเวลาของโครงสร้างขึ้นอยู่กับกิจกรรมต่าง ๆ ทั้งหมดทั้งในการวางแผน การออกแบบทั่วไปและรายละเอียด การดำเนินการต่าง ๆ รวมทั้งการเลือกใช้วัสดุ การผลิตและงาน

ก่อสร้าง การบำรุงรักษาที่รวมไปถึง การเข้าไปตรวจสอบและการปิด ยกเลิกการใช้งาน ดังที่แสดงในรูปที่ 1 งานบริหารจัดการอายุการใช้งานของโครงสร้างเป็นแนวความคิดผสมผสานที่พัฒนาขึ้นเพื่อช่วยเหลือในกระบวนการงานต่าง ๆ ที่ใช้ในการจัดการตลอดช่วงระยะเวลาการใช้งานของโครงสร้างเพื่อให้โครงสร้างที่คงอยู่ได้ตลอด การคงสภาพใช้งานได้เป็นคำสำคัญมากสำหรับโครงสร้างท่าเรือ และยังเป็นคำสำคัญสำหรับโครงสร้างสาธารณูปโภคอื่น ๆ อีกด้วย

ในด้านการบริหารจัดการอายุการใช้งานของโครงสร้าง ดังที่แสดงในรูปที่ 2 งานสำคัญที่สุดก็คือการวางแผนจัดตั้งและอัปเดตขั้นตอนการบริหารจัดการอายุการใช้งานโครงสร้าง (การจัดตั้งแผน LCM) การวางแผนดังกล่าวควรจะมีการจัดโปรแกรมโดยมีการคำนึงถึงสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้:

- ลักษณะของสภาพแวดล้อม
- สมมติฐานที่ใช้ในการออกแบบ
- ผลของการตรวจสอบ
- ข้อกำหนดในการออกแบบ
- การประมาณราคาเบื้องต้น
- แผนงานการบำรุงรักษาและวิธีการในการบริหารจัดการอายุการใช้งานของโครงสร้าง
- ข้อกำหนดของสมรรถนะโครงสร้างที่ต้องการ
- การประเมินอายุใช้งานของโครงสร้าง
- ค่าใช้จ่ายตลอดระยะเวลาอายุของโครงสร้าง
- ค่าใช้จ่ายที่มีผลเกี่ยวเนื่องจากสภาพแวดล้อม และ
- การหมดอายุของโครงสร้าง การทบทวนทำลายนี้อย่างใหม่ และการนำมาใช้ใหม่

รูปที่ 1 ช่วงระยะเวลาอายุของโครงสร้าง

รูปที่ 2 ระบบการบริหารจัดการอายุการใช้งานของโครงสร้าง

ในช่วงต้นของการออกแบบ การออกแบบระยะเวลาการใช้งานของโครงสร้างจะนำมาพิจารณาเพื่อประเมินความทนทานและอัตราการเสื่อมลงของโครงสร้าง ดังที่แสดงในรูปที่ 3(a) ในขณะที่

มีทางเลือกต่าง ๆ มากมาย แนวความคิดพื้นฐานที่ว่าจะต้องมีความมั่นใจในสมรรถนะของโครงสร้างอย่างไรจะต้องได้รับการพิจารณาจากสภาพ อายุการใช้งานตามการออกแบบ ลักษณะของโครงสร้าง คุณสมบัติของวัสดุ ความยากลำบากในการเข้าประเมินตรวจสอบและทำงานแก้ไข ความสำคัญต่อสังคมและเศรษฐกิจ ฯลฯ สำหรับโครงสร้างเหล็กของท่าเรือ การผูกרוןของเหล็กนับเป็นสาเหตุหลักของสมรรถนะของโครงสร้างที่ตกต่ำลงซึ่งมีการพิจารณาในการออกแบบเบื้องต้น เพราะเหตุนี้ การผูกרוןของเหล็ก และ/หรือ การเสื่อมสภาพลงของระบบการป้องกันการผูกרוןนี้ควรที่จะได้รับความสนใจอย่างเต็มที่ โดยหลักการแล้ว เราไม่ต้องคำนึงถึงปัญหาความล้าของเหล็กสำหรับโครงสร้างท่าเรือเหล่านี้

การบำรุงรักษาถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการปกป้องการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง ซึ่งเป็นงานในการตรวจตราสภาพและวัดระดับสมรรถนะของโครงสร้างในปัจจุบันของโครงสร้าง นอกจากนี้ ในการที่สามารถคาดการณ์การเสื่อมสภาพลงของโครงสร้างในอนาคตได้ ยังจะทำให้สามารถคัดเลือกวิธีการเข้าทำงานที่เหมาะสมที่สุดเพื่อลดราคางานบริหารจัดการนี้หรือสามารถที่จะปรับปรุงสมรรถนะของโครงสร้างให้ได้สูงสุดภายใต้งบประมาณที่ตั้งไว้ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3(b) ระหว่างช่วงในการบำรุงรักษา วิศวกรจะทำงานตามขั้นตอนตั้งเป็นสมมติฐานตั้งแต่ช่วงออกแบบ เพื่อให้เป็นไปตามขั้นตอนงานบำรุงรักษาที่กำหนดไว้ ดังที่กล่าวถึงข้างต้น ขั้นตอนงานบำรุงรักษาควรที่จะเป็นไปตามแผน LCM การออกแบบอายุการใช้งานหรือความคงทนของโครงสร้างมีพื้นฐานมาจากหลากหลายสมมติฐานในช่วงเริ่มต้นงานออกแบบ เพราะเหตุนี้ ผลที่ได้จากการออกแบบจะต้องมีการตรวจสอบเทียบกับแผนงานบำรุงรักษาเพราะว่าอัตราการเสื่อมสภาพจริงของโครงสร้างซึ่งรวมไปถึงการผูกרוןมิได้เป็นไปตามสมมติฐานของการออกแบบ สิ่งนี้คือการอัปเดตแผน LCM ขั้นตอนแผนงานควรที่จะมีการอัปเดตซึ่งสะท้อนถึงสถานการณ์ที่แท้จริงของโครงสร้างและการเปลี่ยนแปลงของสภาพต่าง ๆ

รูปที่ 3 แผนงาน LCM

## แผนงาน LCM

ตัวอย่างหนึ่งของการวางแผนงาน LCM ได้ถูกแสดงไว้ ณ ที่นี้ เสาเข็มของท่าเทียบเรือรอบนอกดังที่แสดงในรูปที่ 4 ได้ถูกนำมาศึกษา โครงสร้างรองรับท่าเทียบเรือเป็นโครงสร้างเสาเข็มเหล็กท่อน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาเป็น 1500 มิลลิเมตร และ 19 มิลลิเมตร ตามลำดับ สำหรับส่วนที่อยู่เหนือระดับ DL -18 เมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาเป็น 1500 มิลลิเมตร และ 15 มิลลิเมตรที่ระดับต่ำกว่านั้น ตามอัตราการผูกרוןของเหล็ก กราฟดังที่แสดงในรูปที่ 5 ได้นำมาใช้ซึ่งเป็นผลการวัดค่าที่ตำแหน่งท่าเทียบเรือใกล้เคียงพื้นที่เป็นเวลากว่า 26 ปี อัตราการผูกרוןจะแตกต่างกันที่แต่ละตำแหน่ง ดังนั้น ดังที่แสดงไว้ในกราฟ ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่าต่ำสุด จะนำมาใช้พิจารณาในการจัดหาวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติ

เพื่อแก้ไขปัญหาค่าความเสี่ยงเนื่องจากการผูกרוןนี้ จึงได้มีการกำหนดแผนงาน LCM ขึ้นมา 4 แผนงาน

- S1: ไม่มีการป้องกันการผูกרון
- S2: ทาเคลือบผิว (ระดับ DL +2.5 ~-1.0 เมตร)
- S3: S2 + S4
- S4: การป้องกันวิธีกาโรติก (ระดับ DL -1.0 ~-12 เมตร)

อายุการใช้งานที่ออกแบบไว้ของระบบป้องกันโดยการเคลือบผิวและคาโรติกตั้งไว้ที่ 50 ปี ที่จริงแล้ว แผนงานหลายแผนสามารถจัดตั้งขึ้นมาได้ตามระยะเวลาอายุโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้ ประสิทธิภาพของการป้องกันการผูกרוןสำหรับวิธีกาโรติกได้ตั้งเอาไว้ที่ 90 %

สมรรถนะของโครงสร้างสามารถตรวจสอบได้โดยการใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ push-over analysis และ dynamic response analyses สำหรับระดับ 1 และ ระดับ 2 ของแรงสั่นสะเทือนบนพื้นดินจากแรงแผ่นดินไหว ความน่าจะเป็นของการวิบัติของท่าเทียบเรือจะมีอัตราเพิ่มขึ้นเนื่องจากการผูกרוןของเสาเข็มเหล็ก รูปที่ 6 แสดงความน่าจะเป็นของการวิบัติเทียบกับเวลา ของ (a) แรงสั่นสะเทือนระดับ 1 และ (b) แรงสั่นสะเทือนระดับ 2 ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ของความน่าจะเป็นของการวิบัติได้ตั้งไว้ที่ 0.0038 และ

0.01 สำหรับแรงสั่นสะเทือนระดับ 1 และ 2 ตามลำดับ เพราะเหตุนี้ ก่อนที่จะถึงระดับตัวเลขเหล่านี้ การเสริมกำลังโครงสร้างจึงจำเป็นเพื่อให้ได้สมรรถนะคืนกลับมา ภายใต้ขั้นตอนดังนี้ แผนงาน S1 ต้องมีการเสริมกำลัง 3 ครั้ง (ปีที่ 16 และ 30 สำหรับแผ่นดินไหวระดับ 1 และ ปีที่ 44 สำหรับแผ่นดินไหวระดับ 2) ระหว่างช่วงเวลาออกแบบเพื่อใช้งาน 50 ปี แผนงาน S2 ต้องมีการเสริมกำลัง 2 ครั้ง ในปีที่ 36 สำหรับแผ่นดินไหวระดับ 1 และ ปีที่ 45 สำหรับแผ่นดินไหวระดับ 2 แผนงาน S4 ต้องมีการเสริมกำลัง 2 ครั้ง ในปีที่ 16 และ 33 สำหรับแผ่นดินไหวระดับ 1 เท่านั้น ตามการคำนวณนี้ ระบบการเชื่อมแผ่นเหล็กได้นำมาใช้ในการเสริมกำลัง โดยเทคนิควิธีการเสริมกำลังนี้ สมรรถนะการรับน้ำหนักสามารถกลับคืนมาได้ทั้งหมด แต่ความเหนียวของโครงสร้างจะลดลงไปประมาณ 40 % ของค่าที่ได้ในตอนแรก เนื่องจากการเชื่อมในสภาวะเปียกได้น้ำ

ผู้ออกแบบควรที่จะเลือกแผนงานที่ดีที่สุด ในทางเลือกเหล่านี้ ในการเลือกใช้แผนงาน ควรที่จะตัดสินใจตามจุดประสงค์ที่กำหนดไว้ ราคาตลอดช่วงเวลาก่อสร้างถือว่าเป็นปัจจัยอันหนึ่งในการตัดสินใจ ซึ่งจะมีการกล่าวถึงต่อไป

รูปที่ 4 เสาเข็มทำเทียบเรือสำหรับการศึกษา

รูปที่ 5 อัตราการผูกมัดที่แตกต่างกัน

รูปที่ 6 การเพิ่มของอัตราความน่าจะเป็นในการวิบัติเนื่องจากการผูกมัดในแผ่นเหล็ก

### การเข้าตรวจสอบและการประเมินผล

เนื่องจากการเสื่อมสภาพของของโครงสร้างทำเรือเป็นสาเหตุหลักมาจากการผูกมัดของโครงสร้างเหล็ก อัตราการเติบโตของการผูกมัดควรที่จะมีการเฝ้าติดตามในช่วงอายุการใช้งานของโครงสร้าง อัตราการเจริญเติบโตของการผูกมัดมีความแตกต่างกันอย่างมากตามตำแหน่งต่าง ๆ เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของวัสดุและความแตกต่างของสภาวะแวดล้อมในจุดต่าง ๆ โดยการใช้อัตราการผูกมัดที่วัดได้จริง แผนงาน LCM จึงได้รับการอัปเดตข้อมูลในการทำงานให้ถูกต้องยิ่งขึ้น

การตรวจพบการเสื่อมสภาพและความเสียหายซึ่งเป็นปัจจัย

เกี่ยวกับอายุการใช้งานของโครงสร้างนับว่าเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง ในการทำความเข้าใจถึงสภาพของโครงสร้าง การเสื่อมสภาพและความเสียหายของวัสดุเคลือบป้องกันและระบบการป้องกันการผุกร่อนอื่น ๆ สามารถตรวจพบได้ในตอนแรกจากความเสียหายที่พื้นผิว ระดับของการตรวจสอบโครงสร้างมีผลต่อวิธีการวิเคราะห์ประเมินสมรรถนะของโครงสร้าง หลักการประเมินนี้สามารถทำได้ทั้งทางด้านแรงพื้นฐานแนวทางของสภาวะแวดล้อมหรือแง่แนวทางด้านสมรรถนะของโครงสร้าง แนวทางวิธีการด้านการตรวจสอบโดยสมรรถนะของโครงสร้างควรที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับการประเมินสมรรถนะโครงสร้าง แต่โดยทั่วไปจะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย เทคนิคการตรวจสอบที่สูง ฯลฯ ดังนั้น ระบบการตรวจสอบจากสภาวะแวดล้อมพอที่จะยอมรับได้และนำมาใช้ทดแทนเพราะว่าความง่ายในการประยุกต์ใช้ ระบบการให้คะแนนก็ได้นำมาใช้ประกอบด้วยบ่อย ๆ ซึ่งสภาวะของการเสื่อมสภาพของโครงสร้างได้ถูกนำมาประเมินและตัดสินใจโดยการให้คะแนนการเสื่อมสภาพของโครงสร้างเป็นเกณฑ์

การตรวจสอบด้วยวิธีพินิจ ได้นำมาใช้มากที่สุดในการให้คะแนนสภาพของโครงสร้างและทำการตัดสินใจว่า ต้องตรวจสอบในรายละเอียดเพิ่มเติมหรือไม่ ในการให้คะแนนอย่างถูกต้อง การตรวจสอบควรเป็นช่วงเวลาที่สม่ำเสมอ ถ้าคะแนนการเสื่อมสภาพมีความเกี่ยวข้องกับสมรรถนะของโครงสร้างแล้ว ก็ถือว่าสมรรถนะของโครงสร้างสามารถที่จะประเมินได้ทางอ้อมโดยวิธีนี้ การตรวจสอบด้วยวิธีพินิจสามารถที่จะให้ข้อมูลว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงในกายภาพที่พินิจได้ในชิ้นส่วนโครงสร้าง แต่สมรรถนะของโครงสร้างจำเป็นต้องมีการประเมินอย่างละเอียดถูกต้องให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ถ้าความสัมพันธ์ระหว่างสมรรถนะของโครงสร้าง (กำลังรับน้ำหนักของโครงสร้าง) และคะแนนของการเสื่อมสภาพเป็นสิ่งที่สามารถตรวจวัดได้ ถึงแม้ว่าจะมีส่วนค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้บ้าง การเข้าไปแก้ไขทำงานสามารถที่จะมีการกำหนดได้โดยใช้คะแนนการเสื่อมสภาพของโครงสร้างเป็นเกณฑ์

ในกรณีที่การตรวจสอบด้วยวิธีพินิจไม่เพียงพอที่จะให้ข้อมูลที่ถูกต้องในการประเมินสภาพ การตรวจสอบในรายละเอียดเป็นสิ่งที่ควรจะทำต่อไป การตรวจสอบในรายละเอียดรวมไปถึงการ

วัดระดับของการเสื่อมสภาพด้วยเทคนิคการตรวจสอบโครงสร้างแบบไม่ทำลาย หรือทำลาย ฯลฯ ในกรณีที่ข้อมูลมีคุณภาพและจำนวนมากพอที่จะทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลข การประเมินข้อมูลโดยตรงก็สามารถจะกระทำได้ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น การเสื่อมสภาพของโครงสร้างมีความแตกต่างและรูปแบบหลายหลายมาก ดังนั้น ความแตกต่างเหล่านั้น จึงจำเป็นที่จะต้องมีการวัดระดับค่าต่าง ๆ อย่างละเอียดถี่ถ้วน

### การอัปเดตขั้นตอนแผนงาน

ทฤษฎีกฎเกณฑ์ โมเดลทางคณิตศาสตร์ สูตรสำเร็จในการตรวจสอบ ฯลฯ ก็ได้นำมาใช้ในการประเมินระดับความเสื่อมสภาพแล้ว อย่างไรก็ตาม แนวโน้มที่พบเห็นในงานบำรุงรักษาทั่วไป ตัวอย่างเช่นอัตราการผู้ร่อนที่ตรวจวัดได้อาจจะนำมาใช้ในการทำนายการเสื่อมสภาพในอนาคต และ/หรือการเสื่อมสภาพของโครงสร้างระหว่างช่วงการบำรุงรักษา จากข้อมูลและผลของการประเมินโครงสร้าง กฎเกณฑ์และขั้นตอนของการเสื่อมสภาพ และ/หรือ การเสื่อมสมรรถนะลงจะต้องมีการแก้ไขและขั้นตอนแผนงานบำรุงรักษาจะต้องมีการอัปเดตขึ้นเพื่อการคาดการณ์ต่อไปภายหน้า

### ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้าง

ถ้าการวิบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างอาจจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อความปลอดภัย การวิบัติที่อาจเกิดขึ้นได้นี้ควรที่จะมีการแยกประเภทตามความเสียหายมีโอกาสเกิดขึ้นตามมา ในการลดระดับความเสี่ยงจากการวิบัติของโครงสร้างที่อาจเกิดขึ้นภายในช่วงระยะเวลาอายุการใช้งานที่มีการออกแบบไว้ เมื่อผลของการวิบัติของโครงสร้างตัดสินใจได้ว่าเป็นเรื่องร้ายแรง อาจจะต้องจำเป็นที่ต้องกำหนดให้อายุการใช้งานมีความยาวนานเป็นพิเศษสำหรับชิ้นส่วนอาคารบางชิ้นหรืออาจจะต้องมีการเพิ่มข้อกำหนดในการตรวจสอบและการบำรุงรักษาให้มากยิ่งขึ้น ในการตรวจสอบขั้นตอนแผนงาน LCM ซึ่งรวมไปถึงเวลาที่เหมาะสมและวิธีในการเตรียมเข้าทำงาน การประเมินราคาช่วงตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างจะเป็นตัวชี้บ่งที่ดีที่สุดตัวหนึ่ง ราคาช่วงอายุการใช้งานของโครงสร้างได้รับการคำนวณจากสมมติฐาน

หลายอย่าง แต่ก็ยังให้ข้อมูลที่สำคัญในการตัดสินใจเกี่ยวกับทิศทางในอนาคตของงานบำรุงรักษา ในการคำนวณนี้ ราคาค่าก่อสร้าง ราคาค่าบำรุงรักษา รวมไปถึงทั้งราคาค่าตรวจสอบโครงสร้าง และราคาที่จะต้องใช้ในการเข้าทำงานต่าง ๆ ได้นำมารวบรวมไว้เป็นราคารวมทั้งหมด

การประเมินราคาตามช่วงวัฏจักรอายุการใช้งานของโครงสร้างยังสามารถให้มีการเปรียบเทียบราคาที่ใช้ทั้งหมดกับระยะเวลาที่พิจารณา ในการที่พิจารณาราคาเหล่านี้ตามแผนงาน LCM ต่าง ๆ กันก็ทำให้สามารถที่จะเลือกใช้แผนงานที่ประหยัดที่สุดได้

การคำนวณราคาตามช่วงระยะเวลาอายุการใช้งานของโครงสร้างสำหรับแผนงาน LCM ทั้ง 4 แผนได้แสดงไว้ในรูปที่ 7 เนื่องจากการเสริมกำลังโครงสร้างก่อนที่จะถึงจุดที่ให้ค่าสูงสุดของค่าความน่าจะเป็นในการวิบัติ ค่าใช้จ่ายจะเพิ่มขึ้น ตัวเลขที่ได้แสดงให้เห็นว่าแผนการบำรุงรักษาเพื่อป้องกันเป็นแผนที่สิ้นเปลืองงบประมาณน้อยที่สุด ซึ่งใช้เงินประมาณ หนึ่งในสามของแผนงานที่สิ้นเปลืองงบประมาณสูงที่สุด ในช่วงระยะเวลา 50 ปี แผนการบำรุงรักษาที่สิ้นเปลืองน้อยที่สุดคือ S3 ตามมาด้วย S4 S2 และ S1 มันหมายความว่าประสิทธิภาพของการป้องกันการผู้ร่อนควรที่จะเป็นแผนงานที่ดีที่สุดต่อราคา อย่างไรก็ตามถ้าอายุการใช้งานที่วางไว้ต่ำกว่า 50 ปี ข้อสรุปที่ดีที่สุดอาจจะเปลี่ยนแปลงไปตามอายุการใช้งานที่กำหนดไว้

รูปที่ 7 การคำนวณราคาตามอายุการใช้งานของโครงสร้าง  
บทสรุป

ระบบการจัดการช่วงระยะเวลาอายุการใช้งานของโครงสร้าง ซึ่งรวมไปถึงการประเมินสมรรถนะของโครงสร้างและการประมาณอัตราการผู้ร่อนเสียหาย เป็นเครื่องมือที่ดีที่สุดอย่างหนึ่งสำหรับงานบำรุงรักษาโครงสร้างอาคาร ผู้แต่งคาดไว้ว่าการบำรุงรักษาที่มีประสิทธิภาพจะได้นำมาใช้เพื่อให้สามารถลดราคาค่าบำรุงรักษาตลอดช่วงระยะเวลาอายุการใช้งานของโครงสร้างและสามารถเพิ่มสมรรถนะของโครงสร้าง ซึ่งอาจจะสามารถมองเห็นถึง การคงสภาพใช้งานของโครงสร้างทำเรือ ในการที่จะพัฒนาระบบนี้ต่อไปงานศึกษาวิจัยเป็นสิ่งจำเป็นในการที่จะตรวจสอบสมรรถนะของ

โครงสร้างอย่างถูกต้องรวมทั้งวิธีการในการตรวจสอบและวิเคราะห์ และประเมินอัตราการเสื่อมสภาพและการเสื่อมสมรรถนะของโครงสร้างอย่างถูกต้องในอนาคต



(หน้าที่ 7-9)

### ผลกระทบของตำหนิและสภาพแวดล้อมต่อการเสื่อมสภาพของวัสดุเคลือบผิวเนื่องจากการผุกร่อนในเสาเข็มและแผ่นเหล็กในสภาพสัมผัสทะเล

โดย โนบุเอกิ ออทซึกิ ศาสตราจารย์ และ ทากาฮิโร นิชิดา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สถาบันเทคโนโลยีแห่งโตเกียว

### การผุกร่อนของโครงสร้างเหล็ก offshore ในสภาพสัมผัสน้ำทะเล

เนื่องจากโครงสร้างเหล็ก offshore มีการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่เสี่ยงต่อการผุกร่อนอย่างรุนแรง จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องเข้าใจลำดับขั้นตอนความเสียหายของโครงสร้าง เนื่องจากการผุกร่อนในเหล็กที่มีการทาเคลือบผิว และจัดหาวิธีการประเมินการลดลงทางด้านสมรรถนะของโครงสร้าง ในขณะเดียวกัน เพื่อที่จะสามารถวัดอัตราการเสื่อมสภาพของโครงสร้างตลอดระยะเวลาการใช้งานให้ได้ในระยะเวลาสั้น ๆ การทดสอบแบบเร่งระยะเวลาได้ถูกนำเสนอในที่นี้

อย่างไรก็ตาม ปัจจัยของสภาพที่มีการสัมผัสสภาพแวดล้อมและอัตราเร่งที่เกิดขึ้นต่อการเสื่อมสภาพของโครงสร้างยังไม่สามารถกำหนดให้ชัดเจนได้ เพราะเหตุนี้ จึงยังไม่มีนิยาม “ค่าขยายของอัตราเร่ง” ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาที่มีการทดสอบอัตราเร่งและช่วงเวลาที่เกิดการสัมผัสสภาพแวดล้อมตามสภาพการผุกร่อนที่แท้จริง หรือที่จริงแล้ว มีตัวอย่างมากมายในกายวิจยในปัจจุบันที่แสดงให้เห็นถึงการผุกร่อนที่สม่าเสมอ (การผุกร่อนแบบ microcell) ซึ่งเกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์เหล็ก แต่มีเพียงตัวอย่างของวิจยเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่มีการตรวจสอบอัตราการ

เสื่อมสภาพของโครงสร้างที่เป็นการผุกร่อนแบบเฉพาะจุด (การผุกร่อนแบบ macrocell)

เราได้ตรวจสอบสาเหตุเหล่านี้จากแง่มุมของการสูญเสียของวัสดุเคลือบผิวลง ซึ่งผลการศึกษามีดังต่อไปนี้

### การผุกร่อนของผลิตภัณฑ์เหล็กรูปพรรณในสภาพสัมผัสน้ำทะเล

ตัวอย่างของการศึกษาที่มากมายมีหัวข้อเกี่ยวกับการผุกร่อนของผลิตภัณฑ์เหล็กรูปพรรณที่มีได้มีการเคลือบผิวในสภาพแวดล้อมกลางทะเล ตัวอย่างเช่น ผลการศึกษาดังที่แสดงในรูปที่ 1(a) ซึ่งอัตราการผุกร่อนเพิ่มขึ้นในหน้าตัดส่วนบน HWL (โซนเปียกน้ำ) และในโซนใต้ระดับ LWL ด้วยวิธีนี้ การผุกร่อนของผลิตภัณฑ์เหล็กรูปพรรณที่มีได้มีการเคลือบผิวมีการเจริญเติบโตไปเรื่อย ๆ เนื่องจากการผุกร่อนแบบ macrocell ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องมาจากสาเหตุ (1) พื้นที่อะโนดิกซึ่งอัตราการผุกร่อนเพิ่มขึ้น และ (2) พื้นที่คาโทดิกซึ่งอัตราการผุกร่อนลดลง เพื่อที่จะป้องกันการผุกร่อนเช่นนี้มิให้เกิดขึ้น จึงเป็นขั้นตอนการทำงานทั่วไประยะที่จะต้องมีการป้องกันการผุกร่อนเช่นการทาเคลือบผิวสำหรับโครงสร้างเหล็ก offshore

กลไกหลักที่ใช้ในการป้องกันการผุกร่อนที่อาศัยการทาเคลือบผิวคือ การตัดองค์ประกอบที่จะทำให้เกิดการผุกร่อนเช่น  $Cl^-$ ,  $O_2$  และ  $H_2O$  ออกไปและยับยั้งการเกิดพื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยาที่จะนำไปสู่การผุกร่อน เป็นที่คิดกันทั่วไปว่าถ้ามีการเคลือบผิวอย่างถูกต้องแล้ว การเสื่อมสภาพของวัสดุผิวเคลือบจะเกิดขึ้นลำบากและเมื่อความเสียหายเกิดขึ้นจากการชนโดยเรือหรือโครงสร้างอื่น ๆ กับโครงสร้างเหล็ก offshore การผุกร่อน (การผุกร่อนแบบ microcell เป็นหลัก) จะเกิดขึ้นในพื้นที่ที่เกิดความเสียหาย อย่างไรก็ตาม ผลของการทดสอบที่กระทำในสภาพแวดล้อมในการใช้งานจริง (อ่าวซุรุกะ ซึ่งอยู่ในสภาพสัมผัสกับน้ำทะเล 20 ปี) ดังที่แสดงในรูปที่ 1(b) ซึ่งพบอาการบวม การฉีกขาด และการเสื่อมสภาพของวัสดุเคลือบผิวเกิดขึ้นในสภาพการใช้งานจริง และเกิดการขยายตัวของพื้นที่ที่ได้รับความเสียหายเรื่อย ๆ

เราได้ทำการตัดสินใจว่าสาเหตุที่ทำให้เกิดการผุกร่อนเช่นนั้นเกิดจากการผุกร่อนแบบ macrocell และได้ทำการศึกษาโดยใช้



ตัวอย่างทดสอบที่เป็นพิเศษซึ่งสามารถตรวจวัดกระแสไฟฟ้าในตัวอย่างที่มีการผูกมัดแบบ macrocell โดยใช้ผลิตภัณฑ์เหล็กดังที่นำเสนอในหัวข้อต่อไป

รูปที่ 1 การกระจายของการผูกมัดในแผ่นเหล็กในสภาพแวดล้อมกลางแจ้ง

รูปที่ 2 เป็นแผนภาพแสดงขั้นตอนของการผูกมัดแบบ microcell และ macrocell

### ผลของการผูกมัดต่อผลิตภัณฑ์เหล็กรูปพรรณเนื่องจากการเสื่อมสภาพของวัสดุเคลือบผิวและกลไกการเติบโตของการผูกมัด

ดังที่แสดงในรูป สำหรับการผูกมัดแบบ microcell ทั้งปฏิกิริยาแบบอะโนดิกและคาโทดิกได้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ปฏิกิริยาอะโนดิกซึ่งเป็นการย่อยสลายธาตุเหล็กเกิดขึ้นและปฏิกิริยาคาโทดิกซึ่งออกซิเจนและน้ำแตกตัวออกเป็นไฮดรอกไซด์ เพราะเหตุว่าเป็นวิธีการในการที่จะตรวจสอบการผูกมัดแบบ microcell ในกรณีเช่นนี้ วิธีการที่นำมาใช้ในการตรวจสอบขึ้นอยู่กับความต้านทานของขั้วไฟฟ้าที่ได้จากการใช้การหวนนำ AC และวิธีการอื่น ๆ ด้วยเหตุนี้วิธีการที่ใช้ทั่วไปคือวิธีที่เสนอโดย M.Stern และ A.L. Geary เพื่อแปลงจากความต้านทานของขั้วไฟฟ้าให้เป็นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าแบบ microcell

สำหรับการผูกมัดแบบ macrocell ปฏิกิริยาอะโนดิกที่เกิดขึ้นเฉพาะจุดก่อให้เกิดการผูกมัดขึ้น เพื่อที่จะสามารถตรวจวัดการผูกมัดแบบ macrocell นี้ จำเป็นที่จะต้องทำการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลจากขั้วคาโทดไปยังขั้วอะโนด อย่างไรก็ตามมันเป็นการยากที่จะวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลเวียนอยู่ในชั้นเหล็กรูปพรรณโดยตรง เพื่อแก้ไขปัญหา เราได้จัดเตรียมขึ้นทดสอบดังที่แสดงในรูปที่ 3 และเสนอวิธีการเพื่อที่จะสามารถตรวจวัดกระแสไฟฟ้าโดยตรงที่มีการไหลเวียนจากขั้วคาโทดไปยังขั้วอะโนดได้ ซึ่งนำมาใช้ตรวจวัดการผูกมัดแบบ macrocell

รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในตัวอย่างทดสอบ macrocell (a) และในความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในตัวอย่างทดสอบ microcell (b) ซึ่งทั้ง

สองตัวอย่างทดสอบถูกทำเคลือบด้วยวัสดุ phthalic acid (ความหนา 150 ไมโครเมตร) และมีตำหนิ ผลการทดสอบความล้าได้ยืนยันว่า ในขณะที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าใน macrocell ในส่วนของหน้าตัดที่เสียหาย มีค่ามากชัดเจนในช่วงแรกของการสัมผัสกับสภาพแวดล้อม ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าขั้วลบ (ความหนาแน่นไฟฟ้าแบบคาโทด) ในส่วนหน้าตัดแบบที่มีการเคลือบผิวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเมื่อช่วงเวลาที่สัมผัสสภาพแวดล้อมมากขึ้น ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าใน macrocell ในส่วนของหน้าตัดที่เสียหายมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้เมื่อค่า pH ภายในหน้าตัดที่บวมขึ้นได้ถูกตรวจวัด ก็ได้รับการยืนยันว่าสภาพเกลืออัลคาไลน์ที่สูงเป็นค่า pH 10 – 13 ได้เกิดขึ้น ซึ่งเป็นเครื่องชี้บอกว่า OH<sup>-</sup> ได้เกิดขึ้นและมีการสะสมภายใต้ชั้นเคลือบผิวเนื่องจากปฏิกิริยาแบบคาโทดิก เมื่อพิจารณาผลเหล่านี้ จึงสามารถเชื่อได้ว่าการบวม การฉีกขาดและการเสื่อมสภาพของวัสดุเคลือบผิวมีผลมาจากปฏิกิริยาคาโทดิกของการผูกมัดแบบ macrocell

การตรวจสอบพฤติกรรมเช่นนี้หมายความว่า การเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์เหล็กรูปพรรณที่มีการเคลือบผิวมีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง ดังที่แสดงในตารางที่ 1 โดยเฉพาะ เพราะช่วงเวลาที่การบวมได้เกิดขึ้นมีสาเหตุเกี่ยวข้องอย่างมากกับการขยายของพื้นที่ที่เกิดการผูกมัด จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งที่จะกำหนดช่วงระยะเวลาที่เกิดการบวมตัวขึ้น หลักจากนั้น เราพยายามที่จะคำนวณหาตัวคูณอัตราการเร่งจากผลการทดสอบของอัตราการเร่งกับสภาพแวดล้อมที่แท้จริงโดยการตรวจสอบผลการวัดอัตราการเร่งกับผลการทดสอบการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่แท้จริง

รูปที่ 2 ขอบเขตของการผูกมัดแบบ microcell และ macrocell

รูปที่ 3 ขอบเขตของชั้นส่วนทดสอบแผ่นเหล็ก

รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงที่ขึ้นกับระยะเวลาของการผูกมัดแบบ macrocell และ microcell ของตัวอย่างทดสอบเหล็กรูปพรรณที่มีตำหนิ

ตารางที่ 1 การเจริญเติบโตของการผูกมัดรอบ ๆ ตำหนิของผลิตภัณฑ์เหล็กที่มีการเคลือบผิว

## การตรวจสอบแนวทางการปรับแก้จากผลการทดสอบอัตราความเร่งให้เป็นช่วงระยะเวลาที่เกิดการสัมผัสที่แท้จริง

ตารางที่ 2 ได้แสดงให้เห็นช่วงระยะเวลาจนถึงการเกิดการวมขึ้นของหน้าตัดตามการทดสอบอัตราความเร่งที่กระทำในผลิตภัณฑ์เหล็กรูปพรรณที่มีการเคลือบผิวที่มีดำหนิ (50 องศาเซลเซียสและจุ่มอยู่ในน้ำเกลือ) และในชิ้นส่วนโครงสร้างที่เปิดเผยกับสภาวะแวดล้อม ดังที่แสดงในตาราง ค่าเหล่านี้ได้ถูกคำนวณโดยผลการทดสอบความเร่ง มีค่าสม่ำเสมอกับค่าที่ได้จากการทดสอบการสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมของหน้าตัดอย่างแท้จริง เพราะฉะนั้น วิธีที่เรานำเสนอตั้งที่มีการแสดงไว้ข้างต้นถือว่าถูกต้องในการปรับเปลี่ยนจากผลการทดสอบอัตราความเร่งให้เป็นผลการทดสอบการสัมผัสกับสภาวะแวดล้อม

ตารางที่ 2 เป็นค่าตัวคูณของแฟคเตอร์แต่ละตัว และการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ประมาณการและค่าที่แท้จริงของช่วงเวลา Incubation period สำหรับผลิตภัณฑ์เหล็กทาเคลือบผิวที่มีดำหนิ

## การพัฒนางานวิจัยเกี่ยวกับการป้องกันการผุกร่อนของโครงสร้างเหล็ก offshore

ในบทความนี้ เราได้นำเสนอผลล่าสุดจากการตรวจสอบการผุกร่อนของผลิตภัณฑ์เหล็กกล้าภายใต้สภาพสัมผัสกับทะเล โดยเน้นไปที่ผลของดำหนิในผลิตภัณฑ์เหล็กและสภาพผิวสัมผัสกับการเสื่อมสภาพของวัสดุเคลือบผิว แต่เป็นดังที่แฟคเตอร์หลายตัวที่แสดงไว้เกี่ยวกับการผุกร่อน ยังไม่มีความชัดเจน การนำงานวิจัยมาใช้ในผลิตภัณฑ์เหล็กที่มีการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่ใช้งานจริงถือว่าเป็นสิ่งที่สำคัญเวลานี้สำหรับวิศวกร เราจะมีควมยินดีอย่างมากถ้าผลของการศึกษานี้และข้อเสนอที่มีการเสนอไว้เป็นประโยชน์ในการวางรากฐานโครงสร้างของระบบการบำรุงรักษาในอนาคตและการยืดอายุการใช้งานของสาธารณูปโภค



(หน้า ที่ 10-12)

## การประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่คงเหลืออยู่สำหรับโครงสร้างเหล็กที่เสียหายจากการผุกร่อนและการประมาณสมรรถนะของโครงสร้างในอนาคต

โดย ศาสตราจารย์ พูจีอิ ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอิโรซิม่า

เพราะว่าโครงสร้างเหล็กชายฝั่งและ offshore เป็นประเภทที่มีการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่เกิดการผุกร่อนอย่างรุนแรง การสูญเสียกำลังรับน้ำหนักเนื่องจากความหนาของแผ่นเหล็กที่ลดลงจากการผุกร่อนนี้ ก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับความปลอดภัยของโครงสร้างเหลบทความต่อไปนีกล่าวถึงวิธีการรักษาระดับความปลอดภัยของโครงสร้างเหล็กที่มีการผุกร่อนในสภาพสัมผัสกับน้ำทะเลโดยใช้การศึกษาวิจัยในการประเมินระดับความสามารถในการรับน้ำหนักของเสาเข็มต่อเหล็กที่ผุกร่อน และการประมาณระดับสมรรถนะของโครงสร้างในอนาคต

## การศึกษาสภาพการผุกร่อน

เพื่อที่จะประเมินหรือคำนวณหาระดับความสามารถในการรับน้ำหนักที่คงเหลืออยู่ของโครงสร้างอย่างถูกต้อง เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องทราบสภาพของการผุกร่อนในปัจจุบันเช่นความหนาของแผ่นเหล็กผนังและโคออดิเนทใน 3 มิติ ของหน้าตัดที่ไม่สม่ำเสมอที่มีสาเหตุจากการผุกร่อน ในการให้คะแนนกำลังที่คงเหลืออยู่สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้าง ค่าในเชิงสถิติของแผ่นเหล็กที่ผุกร่อนเช่นความหนาโดยเฉลี่ยและ standard deviation ได้นำมาใช้เป็นดัชนีตัวแทน และเมื่อการวัดสภาพการผุกร่อนได้มีความละเอียดและถูกต้องขึ้น ค่าทางสถิติที่ได้เหล่านี้จะมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น ถึงแม้ว่าโคออดิเนทหน้าตัดที่ไม่สม่ำเสมอนี้อาจจะหามาได้อย่างถูกต้องละเอียดโดยวิธีการตรวจสอบโดยเลเซอร์ใน 3 มิติ (รูปภาพที่ 1) การตรวจวัดความหนาของผนังโดยใช้เกจอุลตราโซนิก อย่างไรก็ตาม การใช้เกจวัดเหล่านี้เป็นการยากที่จะทำการตรวจวัดความหนาของผนังหลาย ๆ จุดได้

ในกรณีที่มีการประเมินความหนาเฉลี่ยของหน้าตัดต่อเหล็ก

เมื่อมีการวัดทั้งสิ้น 20 จุด (4 ตำแหน่ง x 5 จุด, รูปที่ 1) ต่อแต่ละหน้าตัดและเมื่อความหนาเฉลี่ย  $t_r$  ภายในหน้าตัดสามารถใช้  $t_r = t_{avg} - S$  การประเมินที่ได้จะมีอัตราส่วนปลอดภัยที่สูงพออยู่เสมอที่จุดนี้  $t_{avg}$  และ  $S$  เป็นค่าเฉลี่ยและ standard deviation ในแต่ละจุดของการวัดความหนาผนังจำนวน 20 จุด

รูปภาพที่ 1 โคออดิเนทของพื้นผิวที่วัดมาจากเครื่องมือเลเซอร์แบบ 3 มิติ

รูปที่ 1 จุดที่วัดความหนาผนังที่หน้าตัดของเสาเข็มต่อเหล็ก

### การประเมินกำลังรับน้ำหนักที่คงเหลือของโครงสร้าง

อาจจะกล่าวได้ว่าวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพที่สุดและเชื่อถือได้มากที่สุดในการประเมินกำลังรับน้ำหนักที่คงเหลืออยู่สำหรับโครงสร้างเหล็กที่มีการผูกมัด รูปที่ 2 และ 3 เปรียบเทียบผลการคำนวณและผลการทดสอบของกำลังรับแรงอัดที่คงเหลืออยู่สำหรับเสาเข็มต่อเหล็กจำนวน 6 ต้นที่สัมผัสกับสภาพน้ำทะเลเป็นเวลา 19 ปี ผลการคำนวณที่ได้มาจากการใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ที่มีการคิดโดยแนวความคิดของ elasto-plastic แบบ large deformation ในการวิเคราะห์นี้ ข้อมูลที่ได้จากการวัดตามระยะทุก ๆ 1 มิลลิเมตร ได้นำมาใช้เป็นข้อมูลของหน้าตัดที่มีการผูกมัด ซึ่งสามารถตรวจสอบจากตัวเลขเหล่านี้ได้ทั้งกำลังที่คงเหลืออยู่ของโครงสร้างและลักษณะของการวิบัติที่สามารถที่จะประเมินได้ถ้าการวิเคราะห์ดังกล่าวได้รับข้อมูลการวัดหน้าตัดที่สูญหายไปจากการผูกมัดที่ถูกต้อง

รูปที่ 2 เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดที่คงเหลือในเสาเข็มต่อเหล็ก ระหว่างผลจากการวิเคราะห์และค่าที่ได้จากการทดสอบ

รูปที่ 3 สภาพการวิบัติแบบโก่งเดาะของเสาเข็มต่อเหล็กที่มีการผูกมัด (โซนที่มีการเปียกน้ำ)

นอกจากนี้ กำลังรับแรงอัดที่คงเหลืออยู่สามารถที่จะประเมินได้อย่างง่าย ๆ โดยใช้กราฟรับกำลังโก่งเดาะของเสาในกรณีที่ไม่มีการผูกมัด ในกรณีเช่นนี้ กำลังรับน้ำหนักที่คงเหลือสามารถหาได้จากการนำค่าทางสถิติของความหนา เข้าไปเทียบในกราฟกำลัง

โก่งเดาะของเสาในกรณีที่มีการผูกมัด ซึ่งความหนาที่เลือกใช้นี้เป็นค่าที่เลือกจากความหนาเฉลี่ยและ standard deviation ที่ได้จากการวัด รูปที่ 5 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดที่คงเหลือสำหรับเสาเข็มต่อเหล็กที่มีการผูกมัด ซึ่งได้จากวิธีการข้างต้น ความหนาที่ใช้มีการประเมินจาก (ค่าความหนาเฉลี่ย - 0.8 x standard deviation ของความหนาผนังที่วัดได้) และนำมาแทนค่าในอัตราส่วนของความกว้างต่อความหนา  $R_t$  ค่าหน่วยแรงอัดในแนวแกน  $\sigma_c$  สามารถหาได้จากกราฟกำลังโก่งเดาะของเสาที่ไม่มีการผูกมัด

อย่างไรก็ตาม ควรที่จะมีการพิจารณาส่วนน้อยอย่างละเอียดก็คือ การวิเคราะห์แบบไฟไนท์อิลิเมนต์ที่สามารถที่จะประเมินกำลังรับน้ำหนักที่คงเหลืออยู่ได้โดยพิจารณาถึงโหมดการวิบัติทุก ๆ โหมดได้ แต่พอนำสมการทั่ว ๆ ไปมาประเมินกำลังที่คงเหลือแล้วกำลังรับน้ำหนักที่ได้จะเป็นตัวเลขของโหมดการวิบัติเพียงโหมดหนึ่งเท่านั้น ดังที่แสดงในรูปที่ 4 มีเพียงกำลังโก่งเดาะเฉพาะจุดของเสาเข็มต่อเหล็กที่แสดงไว้เท่านั้น ส่วนกำลังโก่งเดาะโดยรวมของเสาไม่สามารถที่จะประเมินได้

รูปที่ 4 การประเมินกำลังรับแรงอัดที่คงเหลือโดยใช้กราฟเสาโก่งเดาะที่ไม่มีการผูกมัด

### การประเมินกำลังที่คงเหลืออยู่ของโครงสร้าง

เพื่อที่จะประมาณการค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุดตามอายุการใช้งานของโครงสร้างเหล็ก เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาใช้งานสำหรับกำลังรับน้ำหนักที่คงเหลือและเพื่อวางแผนการบำรุงรักษาในอนาคต ถ้าโมเดลทั่วไปสามารถนำมาใช้เพื่อคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาใช้งานของหน้าตัดที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอในแผ่นเหล็กซึ่งมีสาเหตุมาจากการเสื่อมสภาพของระบบป้องกันการผูกมัดและการผูกมัดต่อมาได้ ก็จะเป็นไปได้ที่จะสามารถคำนวณการลดกำลังลงของโครงสร้างในอนาคตได้

ในโมเดลที่มีการสร้างหน้าตัดที่มีการผูกมัด (รูปที่ 5) หน้าตัดของแผ่นเหล็กได้ถูกแบ่งออกเป็นเส้นกริด และหน้าตัดที่ผูกมัดได้แสดงไว้โดยใช้ความลึกของการผูกมัดแต่ละรอยต่อในกริด ใน

โมเดลนี้ ปัจจัยทั้ง 4 อย่างได้มีการตั้งสมมติฐานไว้คือ 1) แพลคเตอร์ 2 ชนิดคือ แพลคเตอร์ของการเสื่อมสภาพ และแพลคเตอร์ของการถูกร่อนที่มีกำลังรับน้ำหนักอันหนึ่งและมีส่วนที่ได้รับผลกระทบบนหน้าตัด 2) ปัจจัยในการเสื่อมสภาพลดหน้าที่การทำงานป้องกันเคลือบผิวการถูกร่อนลง 3) เมื่อการป้องกันการถูกร่อนมีค่าลดลงกว่าระดับการป้องกันการถูกร่อนระดับน้อยที่สุดที่ต้องการ จะเกิดการถูกร่อนขึ้นที่หน้าตัดผิวเหล็ก และ 4) ต่อมาหน้าตัดจะถูกกินเข้าไปโดยผลของการถูกร่อน ดังที่แสดงในรูปที่ 6 ตัวแปรสำหรับค่าแพลคเตอร์การเสื่อมสภาพและการถูกร่อน (กำลัง ระยะเวลาที่มีผล จำนวนของน้ำขึ้นน้ำลงแต่ละปี) สามารถที่จะวัดได้ตามสภาพการถูกร่อนที่แท้จริง จึงเป็นไปได้ในปัจจุบันที่จะใช้โมเดลนี้เพื่อประมาณการการถูกร่อนของหน้าตัด และเมื่อไรที่กำลังของโครงสร้างสามารถที่จะประเมินได้โดยการวิเคราะห์แบบไฟไนท์อีลิเมนต์โดยมีการพิจารณาถึงรูปร่างหน้าตัดที่มีการถูกร่อนตามที่ประมาณไว้ จะทำให้สามารถประเมินการรับน้ำหนักของโครงสร้างได้ด้วย ในขณะเดียวกัน กรณีที่มีการทาเคลือบผิวใหม่ ค่าต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการป้องกันการถูกร่อนจะต้องมีการกำหนดขึ้นใหม่ด้วย

รูปภาพที่ 3 แสดงสภาพของหน้าตัดเมื่อเวลาผ่านไปตั้งแต่มีการเคลือบผิวในช่วงแรกและมีการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมของชั้นโลหะ และรูปภาพที่ 4 แสดงให้เห็นถึงเส้นบอกระดับซึ่งหมายถึงระดับความหนาของแผ่นเหล็กผนังที่เหลืออยู่ที่ได้จากการวิเคราะห์คำนวณ รูปที่ 6 แสดงถึงผลของการวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดในเสาเข็มท่อเหล็กโดยใช้ผลของการประเมินหน้าตัดที่ถูกร่อนไป ดังที่แสดงในรูปที่ 9 เป็นสิ่งที่เป็นไปได้ที่จะประเมินกำลังรับน้ำหนักที่คงเหลือในโครงสร้างเหล็กได้อย่างถูกต้องโดยใช้วิธีการที่ได้อธิบายแล้วข้างต้น

ในขณะที่มีการออกแบบโครงสร้างในช่วงแรก ความน่าเชื่อถือของการประเมินเช่นนี้อาจจะเรียกได้ว่าต่ำมากเพราะว่าการประเมินอัตราการเจริญเติบโตของการถูกร่อนใช้ตัวแปรที่เป็นการสมมติทั้งหมด อย่างไรก็ตามหลังจากที่ตัวแปรเหล่านี้ได้ถูกแก้ไขให้เหมาะสมกับสภาพการถูกร่อนที่แท้จริงตามที่วัดได้ในแต่ละขั้นตอนของการตรวจวัด จะสามารถประเมินกำลังของโครงสร้างได้ถูกต้องยิ่งขึ้นและค่าที่ได้มีความน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น เราสามารถ

สรุปได้ว่า เมื่อแผนการบำรุงรักษาได้กำหนดขึ้นจากวิธีการในการประเมินข้างต้น จะทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างเหล็กให้น้อยที่สุดได้

รูปที่ 5 การโมเดลรูปแบบตามความลึกของการถูกร่อน  
รูปภาพที่ 2 ตัวอย่างของการวิเคราะห์สภาพการเสื่อมสภาพลงของการเคลือบผิว (พื้นที่สีดํา: แผ่นโลหะพื้นฐานที่สัมผัสกับสภาพแวดล้อม)

รูปภาพที่ 3 ช่วงเวลาการเคลือบผิวใหม่และผลของการวิเคราะห์สำหรับความหนาของแผ่นเหล็กผนังที่เหลืออยู่หลังจาก 100 ปี (โซนที่จมน้ำ)

รูปที่ 6 ผลการประเมินการสูญเสียของกำลังที่มีผลมาจากช่วงระยะเวลาการเคลือบผิวใหม่ (โซนที่จมน้ำ)

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสมาคมเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยและเป็นโครงการร่วมกันกับคณะทำงานในการประเมินสภาพการป้องกันการถูกร่อนและความทนทานในโครงสร้างเหล็กภายใต้สภาวะน้ำทะเล (ประธานคือ E. Watanabe) กับคณะทำงานโครงสร้างเหล็กสมาคมวิศวกรรมโยธาของประเทศไทย เราขอขอบคุณคณะทำงานและองค์กรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมา ณ ที่นี้ สำหรับการสนับสนุนและความร่วมมืออย่างดีของท่าน



(หน้าที่ 13-15)

**เทคโนโลยีการประเมินสมรรถนะตลอดอายุการใช้งานของโครงสร้างเหล็กสำหรับท่าเรือ โดยเน้นที่สมรรถนะของโครงสร้างภายหลังการซ่อมแซม**

โดยโยชิโตะ อิโต ศาสตราจารย์ ยาซุโอบุ คิตาเน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ และ มิชิฮิโตะ อิโรฮาทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนAGOYA

## การยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างเหล็กสำหรับโครงสร้างทำเรือที่มีอายุ

เพื่อที่จะยืดอายุการใช้งานสำหรับโครงสร้างเหล็กสำหรับทำเรือที่มีอายุโดยการบำรุงรักษาที่ดี เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องมีการวัดระดับสมรรถนะก่อนและหลังการบำรุงซ่อมแซมได้ เพื่อที่จะประเมินสมรรถนะในช่วงระหว่างอายุการใช้งาน และสามารถจัดการตรวจสอบและบำรุงรักษาได้อย่างถูกต้อง ในการวางแผนไปที่เสาะซ่อมเหล็กที่มีการเสื่อมสภาพเนื่องจากการผุกร่อน เราได้ศึกษากำลักรับน้ำหนักภายหลังการซ่อมแซมและความคงทนของเสาะซ่อมเหล่านี้ที่มีการซ่อมแซมโดยการเชื่อมแผ่นเหล็กเป็นสำคัญ ขอบเขตของงานศึกษาได้แสดงดังต่อไปนี้

## กำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างเสาะซ่อมท่อเหล็กหลังจากที่ได้รับการซ่อมแซมโดยการเชื่อมแผ่นเหล็ก

รูปที่ 1 แสดงวิธีการในการซ่อมแซมโดยการเชื่อมแผ่นเหล็ก – วิธีการทั่วไปที่ใช้ในการซ่อมแซมและเสริมกำลังท่อเหล็กและเชื่อมพีดที่มีการผุกร่อน ในวิธีการนี้ หน้าตัดที่มีการเสียหายเนื่องจากการผุกร่อนได้ถูกปิดคลุมไว้ด้วยแผ่นเหล็กปะเสริม ซึ่งมีการเชื่อมกับโครงสร้างเหล็กโดยรอยเชื่อมแบบ fillet ในกรณีที่ยื่นส่วนที่มีการผุกร่อนอยู่ใต้น้ำทะเล จะใช้วิธีการเชื่อมใต้น้ำ สภาพแวดล้อมสำหรับการเชื่อม ทั้งสภาวะแห้งหรือเปียก มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติการเชื่อม มีการรายงานว่าตำหนิของรอยเชื่อมเกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมใต้น้ำและในขณะที่ความแข็งของรอยเชื่อมในการเชื่อมใต้น้ำมีค่าสูงขึ้น แต่ความเหนียวของการเชื่อมใต้น้ำลดลงเมื่อเทียบกับการเชื่อมในสภาวะปกติ ผลที่ได้รับจากการทดสอบกำลังของรอยเชื่อมแบบ fillet โดยใช้ท่อเหล็กและแผ่นเชื่อมพีดเป็นเช่นเดียวกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 2 รอยต่อจากการเชื่อมแบบ fillet ภายใต้น้ำทะเลมีกำลังรับน้ำหนักที่มากกว่าแต่มีความเหนียวที่น้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับการเชื่อมในสภาวะปกติ และยังได้พบว่าผลที่ได้เหล่านี้มีค่ามากกว่าในเสาะซ่อมเหล็กพีดกว่าในท่อเหล็ก

รูปที่ 1 เสาะซ่อมเหล็กท่อที่ได้รับการซ่อมแซม

รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของกำลังและความเหนียวจากการเชื่อม

ในสภาวะปกติกับการเชื่อมใต้น้ำ

การทดสอบได้กระทำขึ้นเมื่อการซ่อมแซมแผ่นเหล็กโดยการเชื่อมตามวิธีการออกแบบในปัจจุบันได้นำมาใช้กับท่อเหล็กซึ่งความหนาของผนังได้ถูกสมมติให้ลดลงและสมรรถนะของโครงสร้างภายหลังการซ่อมแซมได้ถูกประเมินภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบแรงอัดและแรงดัด การทดสอบเหล่านี้แสดงได้อย่างชัดเจนว่า ในขณะที่ สติฟเนสส์และความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของท่อเหล็กที่ได้รับการซ่อมแซม ภายใต้น้ำอัดและแรงดัดสามารถคืนกำลังจนเกือบถึงระดับเดิมที่ ก่อนที่จะมีความเสียหายจากการผุกร่อน ความเหนียวจะลดลงจากระดับก่อนมีการผุกร่อนขึ้น รูปที่ 3 แสดงกราฟ Load – displacement ที่ได้จากการทดสอบแรงดัด

ดังที่ไดกล่าวข้างต้น กำลังรับน้ำหนักของเสาะซ่อมเหล็กหลังจากการซ่อมแซมสามารถที่จะคืนตัวไปถึงระดับก่อนเกิดการผุกร่อนได้ แต่โครงสร้างที่ได้รับการซ่อมแซมนี้จะอยู่ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบวัฏจักรในกรณีการเกิดแผ่นดินไหว จึงมีคำถามที่สำคัญว่าโครงสร้างเสาะซ่อมที่ได้รับการซ่อมแซมนี้สามารถที่จะรองรับพลังงานทั้งหมดที่กระทำต่อโครงสร้างได้หรือไม่

รูปที่ 4 แสดงกราฟ load-displacement สำหรับเสาะซ่อมทั้ง 4 ประเภทที่รองรับน้ำหนักบรรทุกแบบแรงดัดตามการวิเคราะห์ไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ non-linear (a) ท่อที่สมบูรณ์ (216.3 มิลลิเมตร สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก และ 12.7 มิลลิเมตรสำหรับความหนาผนัง (b) ท่อเหล็กมีความหนาผนังที่มีการลดลง 6 มิลลิเมตรสำหรับชิ้นส่วนที่มีความยาว 150 มิลลิเมตร (c) ท่อเหล็กมีความหนาผนังซึ่งลดลง 6 มิลลิเมตรและมีการซ่อมแซมโดยการเชื่อมโดยใช้แผ่นเหล็กหนา 6 มิลลิเมตร และ (d) ท่อเหล็กมีความหนาผนังซึ่งมีความหนาผนังลดลง 6 มิลลิเมตร และซ่อมแซมโดยการเชื่อมใช้แผ่นเหล็กหนา 9 มิลลิเมตร

จากตัวเลขเหล่านี้พบว่า ในการที่จะคงสภาพคืนความสามารถในการรองรับพลังงานของท่อเหล็กที่มีความเสียหายเนื่องจากการผุกร่อนให้ได้เช่นเดียวกันกับก่อนเกิดความเสียหาย เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องใช้แผ่นเหล็กปะที่มีการเสริมความหนามากกว่าส่วนความหนาผนังที่ลดลงเนื่องจากการผุกร่อน

รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง load-displacement ของท่อเหล็ก ภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบแรงดัด

รูปที่ 4 กราฟระหว่าง load-displacement ของท่อเหล็กภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบแรงดัดแบบวัฏจักร

### การตรวจสอบลักษณะการผุกร่อนของรอยเชื่อมโดยใช้การทดสอบแบบ seawater bubbling test

เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะอายุการใช้งานทั้งหมด เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องเข้าใจถึงความต้านทานการผุกร่อนภายหลังการซ่อมแซม โดยทั่วไปแล้ว การเคลือบผิวป้องกันการผุกร่อนต่อเสาะเชื่อมท่อจะใช้การซ่อมแซมโดยวิธีการเชื่อมแผ่นเหล็กปะ รูปภาพที่ 1 แสดงตัวอย่างของท่อเหล็กที่มีการเคลือบผิว petrolatum และปกคลุมด้วย FRP เหนือชั้นที่มีการเคลือบผิว วิธีการป้องกันการผุกร่อนเช่นนี้ถือว่ามีประสิทธิภาพได้ประมาณ 20 ปี อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ชั้น FRP ถูกทำให้เสียหายโดยวัสดุลอยน้ำต่าง ๆ และส่วนของผิวเคลือบ petrolatum มีการหลุดออกไป ส่วนที่ได้รับ การซ่อมแซมแล้วจะมีการสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการผุกร่อนอีกครั้งหนึ่ง ในขณะที่มีผลงานวิจัยจำนวนมากเกี่ยวกับลักษณะการผุกร่อนของชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กในสภาวะน้ำทะเล แต่มีงานวิจัยจำนวนน้อยที่มีการเปรียบเทียบหน้าตัดทั่วไปของ ชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กที่มีรอยต่อจากการเชื่อมเพื่อที่จะแสดงความแตกต่างที่เกิดขึ้นต่อลักษณะการผุกร่อนที่เกิดขึ้นต่าง ๆ

เนื่องจากการขาดข้อมูลด้านนี้ เราจึงใช้การทดสอบอัตราเร่งของการเกิด bubbling corrosion (3 % NaCl, 50 องศาเซลเซียส, 28 วัน) เพื่อที่จะตรวจสอบลักษณะการผุกร่อนของรอยต่อแบบ การเชื่อม รูปที่ 5 แสดงการจัดเตรียมเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ แผ่นเหล็ก 2 ชนิดนำมาใช้เป็นตัวอย่างทดสอบ SY295 และ SYW295 ในขณะที่ SM490 นำมาใช้สำหรับเป็นแผ่นเหล็กปะ แผ่นเหล็กที่ใช้ปะและแผ่นเหล็กพื้นฐานได้ถูกเชื่อมติดกันโดยวิธีการเชื่อมแบบ fillet โดยใช้ลวดเชื่อม E4319

ในการทดสอบ ระดับผิวหน้าก่อนและหลังทำการทดสอบได้ถูก วัดและเปรียบเทียบกันโดยใช้เซนเซอร์แบบเลเซอร์เพื่อตรวจสอบ การสูญเสียหน้าตัดเนื่องจากการผุกร่อนในรอยเชื่อม รูปที่ 6 แสดง การสูญเสียหน้าตัดเนื่องจากการผุกร่อนในรอยเชื่อมของตัวอย่าง

ทดสอบหนึ่ง ดังที่แสดงในรูป รอยต่อแบบเชื่อมโดย fillet แสดงการ ผุกร่อนที่สม่ำเสมอ และไม่พบการผุกร่อนอย่างรุนแรงเป็นจุด ๆ หน้าตัดสัมผัสหรือส่วนปลายของรอยเชื่อม นอกจากนี้ยังไม่พบ ปัจจัยการสูญเสียหน้าตัดเนื่องจากการผุกร่อนในทิศทางของการ เชื่อมอย่างมากมายพอ (รอยเชื่อมแบบ fillet ในทางยาวและ ทางขวาง) ชนิดของเหล็กสำหรับวัสดุโลหะพื้นฐาน หรือ สภาพแวดล้อมของการเชื่อม (เชื่อมปกติหรือใต้น้ำ) นอกจากนี้ ยัง พบว่า การสูญเสียหน้าตัดจากการผุกร่อนในรอยต่อแบบรอยเชื่อม มีลักษณะเช่นเดียวกันกับในแผ่นเหล็ก

รูปภาพที่ 1 เสาะเชื่อมท่อเหล็กที่ซ่อมแซมโดยแผ่นเหล็กปะที่มีการ เคลือบผิวด้วย petrolatum และ FRP

รูปที่ 5 ระบบการทดสอบสำหรับการผุกร่อนใต้น้ำ

รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวในรอยเชื่อมเนื่องจากการ ผุกร่อน

### การประเมินสมรรถนะตลอดอายุการใช้งานสำหรับ โครงสร้างท่าเรือเหล็ก

โดยที่มีเป้าหมายในการปรับปรุงการบริหารจัดการอายุการ ใช้ งานของโครงสร้างท่าเรือให้ดีขึ้น เราได้ตรวจสอบความสามารถใน การรับน้ำหนักบรรทุกของเสาะเชื่อมท่อเหล็กที่มีความเสียหาย เนื่องจากการผุกร่อนและได้รับการซ่อมแซมโดยวิธีการเชื่อมแผ่น เหล็ก โดยมีเป้าหมายเพื่อทำความเข้าใจถึงสมรรถนะตลอดอายุ การใช้งานของเสาะเชื่อมท่อเหล็กให้ดียิ่งขึ้น เป้าหมายต่อไปใน อนาคตก็คือการประเมินถึงความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก ภายหลังจากการซ่อมแซมของโครงสร้างท่าเรือทั้งระบบ เพิ่มเติมขึ้น จากเสาะเชื่อมท่อเหล็กเพียงอย่างเดียว



## วิธีการประเมินกำลังรับน้ำหนักที่คงเหลืออยู่ของโครงสร้างเหล็กของท่าเรือ

โดย คุณิโตโม ชูกิอุระ ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและ  
ปฐพีศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกียวโต

### บทนำ

สำหรับประเทศญี่ปุ่นที่ล้อมรอบทุกด้านด้วยทะเลแล้ว ท่าเรือมีหน้าที่สำคัญในการช่วยพัฒนาให้เกิดความต่อเนื่องทางด้านเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ ในการทำหน้าที่เป็นหน่วยโลจิสติกส์ ท่าเรือประกอบไปด้วยสะพานและท่าเทียบเรือ ทางน้ำและอ่างน้ำเช่น fairways และ anchorages เชื่อมกันคลื่นและโครงสร้างป้องกันภัยอื่น ๆ ร่วมกันในการที่จะทำให้พื้นที่ท่าเรือมีความปลอดภัย ในขณะที่ท่าเรือสามารถทำงานได้อย่างเต็มที่โดยใช้งานของส่วนประกอบอื่น ๆ ที่มีการทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพ แต่เวลา 30 – 50 ปีได้ผ่านไปแล้วตั้งแต่เริ่มงานก่อสร้างท่าเรือเหล่านี้ ในสถานการณ์เช่นนี้ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาจะสูงขึ้นในอนาคต และการที่จะบำรุงรักษาท่าเรือนี้ได้อย่างไร ถือเป็นงานที่สำคัญทีเดียว

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศญี่ปุ่น สาธารณูปโภคเช่นไฮเวย์ ท่าเรือต่าง ๆ ได้ถูกก่อสร้างขึ้นอย่างมากในช่วงที่มีการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็ว ในกรณีนี้ กระทรวงสาธารณูปโภคที่ดิน การคมนาคมและการท่องเที่ยว (MILT) ได้ประมาณการค่าใช้จ่ายที่จำเป็นเพื่อการบำรุงรักษาในอนาคตและการสร้างขึ้นมาใหม่โดยพิจารณาจากค่าที่ได้กลับจากการลงทุนในอดีต โดยมองไปที่สาธารณูปโภคของ MILT (ไฮเวย์ ท่าเรือ ท่าอากาศยาน บ้านเช่าของรัฐ ระบบระบายน้ำ ส่วนสาธารณะ ประตูน้ำ ชายฝั่ง) การคำนวณอย่างหยาบแสดงให้เห็นว่าค่าใช้จ่ายที่จำเป็นในการบำรุงรักษา/ สร้างขึ้นมาใหม่จะมีค่ามากกว่าเงินลงทุนในปี 2037 และค่าใช้จ่ายในการสร้างขึ้นมาใหม่ที่ต้องกระทำเป็นเวลา 50 ปี ตั้งแต่ปี 2011 จนถึง 2060 (มากกว่า 190 ล้านล้านเยน) เงินลงทุนในการสร้างขึ้นมาใหม่ประมาณ 30 ล้านล้านเยน (16 % ของค่าใช้จ่ายทั้งหมด) จะไม่สามารถตอบสนองความต้องการนี้ได้ทั้งหมด ความ

จริงข้อนี้บ่งให้เห็นถึงความจำเป็นที่จะต้องวางแผนการบำรุงรักษาเพื่อให้ใช้เงินให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และเพราะเหตุนี้จะต้องมีการจัดเตรียมเทคโนโลยีการบริหารจัดการ/ ออกแบบอายุการใช้งานของโครงสร้างในทันที เพื่อเป็นเครื่องมือวิธีการที่จะนำโครงสร้างสาธารณูปโภคที่มีอยู่ให้มีการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานของโครงสร้างโดยวิธีการซ่อมแซมที่เหมาะสม

เป็นความจำเป็นไม่เพียงแต่การออกแบบ ก่อสร้าง และจัดการให้สาธารณูปโภคง่ายต่อการตรวจสอบและตรวจตราเท่านั้น แต่ยังคงต้องมีการนำระบบ “บำรุงรักษาแบบป้องกัน” เข้ามาใช้เพื่อยืดระยะเวลาการใช้งานของสาธารณูปโภคทั้งหมดโดยวิธีการที่สามารถตรวจพบความเสียหายแต่เนิ่น ๆ และทำการซ่อมแซมอย่างทันท่วงที และจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องใช้วัสดุและโครงสร้างที่มีความคงทนสูง เพื่อให้ได้อายุการใช้งานที่ยืนยาวขึ้นและยืดระยะเวลาการใช้งานโดยรวมของสาธารณูปโภค เป้าหมายสุดท้ายของงานเหล่านี้ก็เพื่อลดราคาที่ใช้จ่ายทั้งหมด (อ้างอิงกับรูปที่ 1)

รูปที่ 1 การวัดค่าที่ใช้เพื่อยืดอายุการใช้งานของสาธารณูปโภค

ในประเทศญี่ปุ่น การนำเสาเข็มพืดเหล็กในการก่อสร้างท่าเรือและสาธารณูปโภคอื่น ๆ เริ่มขึ้นในปี 1926 และเสาเข็มพืดเหล็กในช่วงปลายปี 1950s เพราะว่าเป็นเวลานั้นได้เกิดการก่อสร้างอย่างรวดเร็วในพื้นที่ชายฝั่ง จึงทำให้ผลิตภัณฑ์เหล็กเหล่านี้มีการใช้อย่างแพร่หลาย ส่วนของโครงสร้างเหล็กในท่าเรือนี้มีการสัมผัสกับน้ำทะเลและสภาวะแวดล้อมที่รุนแรงเช่น การเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำทะเล การเป็ยกน้ำจากคลื่นกระทบ จึงมีการแสดงพฤติกรรมการผุกร่อนที่แตกต่างกับโครงสร้างเหล็กที่อยู่บนพื้นดินควบคู่กันไปกับการนำผลิตภัณฑ์เหล็กมาใช้ที่มากขึ้นเรื่อย ๆ สำหรับโครงสร้างท่าเรือ จึงได้มีการตรวจสอบในกลไกของการเกิดการผุกร่อน วิธีการในการป้องกันการผุกร่อนที่หลากหลายและการซ่อมแซมรวมทั้งการเสริมกำลัง ก่อนที่จะมีเทคโนโลยีการป้องกันการผุกร่อน โครงสร้างที่มีได้มีการป้องกันการผุกร่อนแต่ออกแบบโดยการเผื่อระดับการผุกร่อนแทน (ไม่เป็นการยับยั้งการผุกร่อนแต่ใช้วิธีเพิ่มความหนาของเหล็ก) ได้ถูกก่อสร้างไว้อยู่ทั่วไป แต่

ระบบการป้องกันการผูกอ่อนตามวิถีทางในปัจจุบันเช่นวิธีการป้องกันการแบบคาโรติด หรือเคลือบผิว/ ทาผิว ได้นำมาใช้มากขึ้นเรื่อยๆ ในการก่อสร้างโครงสร้างเหล็กใหม่ ๆ ในขณะที่โครงสร้างเหล่านี้สามารถทำหน้าที่ป้องกันการผูกอ่อนได้ในช่วงระยะเวลาที่กำหนด แต่ก็ยังเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องมีการตรวจสอบเป็นระยะและทำความเข้าใจสมรรถนะที่คงเหลืออยู่เพื่อที่จะให้ได้สมรรถนะที่ต้องการสำหรับโครงสร้างไม่สูญเสียลงเนื่องจากการผูกอ่อนในโครงสร้างเหล็ก

เป็นที่ทราบดีว่าความหนาของแผ่นเหล็กในโครงสร้างเหล็กที่นำมาใช้ในโครงสร้างเหล็กของท่าเรือได้มีการลดลงเนื่องจากการผูกอ่อนซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการลดลงในความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกไม่เพียงแต่ชิ้นส่วนโครงสร้างเท่านั้น แต่ยังรวมไปถึงโครงสร้างทั้งหมด เพราะเหตุนี้ จึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งในแง่ของการบำรุงรักษาที่จะต้องมีการประเมินสมรรถนะของโครงสร้างที่คงเหลืออย่างถูกต้องสำหรับโครงสร้างเหล็กที่มีการผูกอ่อน ในการประเมินกำลังที่คงเหลือของโครงสร้างท่าเรือ ตัวแปรหลายตัวแปรจากวิธีการทั้งทางด้านวิเคราะห์และการทดสอบได้นำมาใช้เพื่อประเมินค่ากำลังรับน้ำหนักของชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็ก อย่างไรก็ตาม วิธีการส่วนใหญ่ของทั้งทางด้านวิเคราะห์และการวิเคราะห์หมีเป้าหมายไว้ที่ส่วนขององค์อาคารเท่านั้น ดังนั้นการประเมินกำลังที่ได้จะไม่สามารถนำไปใช้กับโครงสร้างโดยรวมทั้งหมดได้อย่างถูกต้อง

ดังนั้น ในตัวอย่างต่อไปนี้ได้กำหนดเป้าหมายไปที่สะพานตอม่อที่ประกอบไปด้วยเสาเข็มท่อนเหล็ก และพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก (โมเดลมีเสาเข็ม 3 ต้นและจัดเตรียมเป็น plane frame รูปที่ 2) ผลของการตรวจสอบได้แสดงไว้ในผลของเสาเข็มที่มีการเสื่อมสภาพลงเนื่องจากการผูกอ่อน (รูปที่ 3) สำหรับระดับความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกด้านข้าง ในการทดสอบนี้ตัวอย่างทดสอบเสาเข็มเหล็กได้ถูกจัดเตรียมโดยเลือกมาจากเสาเข็มที่มีการผูกอ่อนที่อยู่ในสภาพน้ำทะเลมาเป็นเวลา 19 ปี ผิวของการผูกอ่อนได้ถูกตรวจวัดโดยการใช้อุปกรณ์วัดเลเซอร์และข้อมูลที่ได้นี้ได้นำมาใช้เป็นค่าบ่งบอกลักษณะของการผูกอ่อนในเสาเข็มเหล็กท่อน

รูปที่ 2 ตัวอย่างของสะพานเสาเข็มตอม่อ

รูปที่ 3 แนวโน้มสำหรับการผูกอ่อนในทิศทางตั้งในโครงสร้าง offshore

### การวิเคราะห์ FEM สำหรับสะพานตอม่อที่ใช้เสาเข็มตอม่อโดยที่เสาเข็มท่อนมีการเสื่อมสภาพลงเนื่องจากการผูกอ่อน

โครงสร้างแบบ plane frame (10.2 เมตรสำหรับความสูง 6.5 เมตรสำหรับช่วงเสาเข็ม) ซึ่งมีเสาเข็มแบบท่อน 3 เสา (เส้นผ่านศูนย์กลาง 800 มิลลิเมตร ความหนาผนัง 16 มิลลิเมตร) จัดเตรียมไว้ในทิศทางขนานและมีระยะห่างเท่ากัน ได้นำมาใช้เป็นโมเดลของสะพานตอม่อทั้งหมดโดยที่เสาเข็มท่อนเหล็กมีการเสื่อมสภาพลงเนื่องจากการผูกอ่อน และผลของ plane frame ที่มีเสาเข็มท่อนเหล็กสำหรับความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกในทางแนวราบ มีการวิเคราะห์โดยการเปลี่ยนรูปแบบการเสื่อมสภาพจากการผูกอ่อน ในขณะเดียวกัน การวิเคราะห์ที่ใช้โปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ ABAQUS (เวอร์ชัน 6.10) รูปที่ 4 แสดงโมเดล plane frame ที่นำมาใช้เป็นโมเดลสะพานตอม่อที่อยู่บนเสาเข็ม ในการวิเคราะห์ FEM ตอม่อเสาเข็มท่อนเหล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 2.75 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเสาเข็มและส่วนบนของเสาเข็มท่อนเหล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 2.25 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกได้ถูกโมเดลโดยใช้ element แบบ shell element (4 node reduced integration shell element) และหน้าตัดที่อยู่ระหว่างนั้นได้ถูกโมเดลโดยใช้ beam element ในขณะเดียวกัน shell element และ beam element ได้ถูกทำให้ต่อเนื่องกันแบบ rigid ที่ node และส่วนที่เป็น participation function ของ shell element ในทิศทางรอบนอกของเสาเข็มเหล็กได้กำหนดไว้ที่ 150 และการแบ่ง mesh ในทิศทางแนวแกนขององค์อาคารได้กระทำไว้ในขนาดมิติเช่นเดียวกัน พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กกำหนดให้เป็น อีลาสติกและมีการเชื่อมต่อแบบ rigid โดยเป็นพื้นที่ shell ในส่วนบนของเสาเข็ม ส่วนที่เป็นปลายต่อกับฐานของเสาเข็มเหล็กได้กำหนดให้มีการยึดแน่นตาม boundary condition และการเคลื่อนตัวทางด้านข้างมากที่สุด ได้กำหนดไว้ที่ 1,000 มิลลิเมตรสำหรับพื้น เหล็กเกรด SKK 490 ได้นำมาใช้สำหรับเสาเข็มท่อนเหล็ก ความหนาของผนังท่อนได้ถูกป้อนข้อมูล



สำหรับทุก node ใน shell element และสำหรับ beam element หน้าตัดที่ใช้เป็นหน้าตัดกลมกลวงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน ตลอดความหนาเฉลี่ยสำหรับทุก element

รูปที่ 4 การจัดเตรียม element สำหรับโครงสร้าง plane frame สำหรับโครงสร้างต่อม่อสะพาน

การวิเคราะห์โครงสร้างแบ่งออกเป็น 3 กรณี: โมเดล A มีเสาเข็ม 1 ต้น: frame ของโมเดล B-1 ที่มีรูปแบบการผูกมัดในเสาเข็มทั้ง 3 ต้นและมีการผูกมัดลักษณะเช่นเดียวกัน และ frame โมเดล B-2 ซึ่งมีเพียงแค่เสาเข็ม 1 ต้นเท่านั้นที่มีการผูกมัดอย่างมาก สำหรับโมเดล A แล้วมีการจัดเตรียมรูปแบบเสาเข็มดังที่ใช้ใน plane model ซึ่งด้านบนสุดของเสาเข็มถูกกำหนดไว้ให้เป็นขอบเขตที่ rigid และมี rigid element เชื่อมต่อกับส่วนขอบบนสุดนี้ การจำกัดการหมุนได้กำหนดไว้สำหรับ rigid element นี้ จนกระทั่งการเคลื่อนตัวในแนวราบมีค่าถึง 1,000 มิลลิเมตร ในการวิเคราะห์นี้ การสูญเสียหน้าตัดเนื่องจากการผูกมัดในแต่ละโมเดลได้กำหนดว่ามีการเปลี่ยนแปลง 0 เท่า, 1.0 เท่า, 1.2 เท่า, 1.4 เท่า, 1.6 เท่า, และ 1.8 เท่า, ของค่าที่กำหนดของการผูกมัดที่ได้จากการวัดจริงในความหนาแผ่นเหล็กผนังและระดับการผูกมัดเหล่านี้ถูกตั้งชื่อให้เป็น a, b, c, d, e, f ตามลำดับ และกรณีศึกษาในการวิเคราะห์โมเดลได้กำหนดโดย B-[○]-[△]-[□] (○: เสาเข็มด้านซ้าย; △: เสาเข็มตรงกลาง; □: เสาเข็มด้านขวา และรูปแบบของการผูกมัดสำหรับเสาเข็มทั้งสามนี้ได้แสดงโดยใช้สัญลักษณ์ a~f) นอกจากนี้ เพราะว่าสภาพการผูกมัดมีความแตกต่างกันเนื่องจากทิศทางการวางตัวของเสาเข็ม กำลังรับน้ำหนักทางด้านข้างของโมเดล A ได้ถูกแก้ไขโดยมีการเปลี่ยนทิศทางของน้ำหนักบรรทุกทางด้านข้างเป็น 45 องศา และด้วยเหตุนี้กำลังต้านทานด้านข้างมีค่าเป็น 548 กิโลนิวตัน โดยเฉลี่ย (559 กิโลนิวตัน ค่ามากที่สุด และ 537 กิโลนิวตัน ค่าน้อยที่สุด) และค่าที่แตกต่างกันอยู่ในช่วงระหว่าง 4 % ของค่าเฉลี่ย

รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างของค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนตัวในแนวราบ (โมเดล B-1) ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกได้ถูกลดลงประมาณ 14.2 % จากระดับ

ตั้งต้นที่ยอมรับได้ (B-a-a-a) เป็นระดับที่มีการผูกมัด (B-b-b-b) เนื่องจากการใช้งานในสภาพน้ำทะเลเป็นเวลา 19 ปี ภายหลังจากความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลง 18.3% และ 25.7% ตามลำดับ จากระดับตั้งต้นเดิม เป็นการผูกมัดที่สูญเสีย 1.2 เท่า (B-c-c-c) และ 1.4 เท่า (B-d-d-d) นอกจากนี้ ค่าการเคลื่อนตัวในขณะที่น้ำหนักบรรทุกกระทำสูงสุดมีค่าลดลงจากค่าระดับตั้งต้นเดิมและการผูกมัดมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ที่การผูกมัดมีค่ามากขึ้นแล้ว ยังมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากภายในน้ำหนักแบกทานในแต่ละเสาเข็ม และเกิดค่าความแตกต่างอย่างมากในพฤติกรรมรับภาระโค้งเดาะและความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก ซึ่งเป็นที่สรุปได้ว่าการประเมินสมรรถนะของโครงสร้างสำหรับโครงสร้างทั้งหมดเป็นสิ่งจำเป็น

ในขณะเดียวกัน เนื่องมาจากผลการคัดเลือกเสาเข็มท่อเหล็กที่มีความเสียหายเนื่องจากการผูกมัดใน โมเดล B-1 แม้แต่ในกรณีที่มีการผูกมัดมีเพียงในเสาเข็มต้นเดียวเท่านั้น น้ำหนักบรรทุกสามารถแบกทานได้โดยเสาเข็มที่เหลือ และดังนั้น จึงพบว่าความสามารถในการแบกทานน้ำหนักบรรทุกของทั้งโครงสร้างขึ้นอยู่กับ การผูกมัดทั้งหมดโดยรวมของโครงสร้างทั้งหมด

รูปที่ 5 ตัวอย่างของความสัมพันธ์ระหว่าง Load-Displacement

### การประเมินสมรรถนะโครงสร้างต่อม่อที่เกิดการผูกมัดตามข้อมูลตรวจวัดในสถานที่ก่อสร้าง

สมมติว่าในการบริหารจัดการในสถานที่ก่อสร้างได้มีขึ้นสำหรับความหนาของผนังแผ่นเหล็กตามแนวทาง “การป้องกันการผูกมัดของโครงสร้างเหล็กสำหรับท่าเรือ: คู่มือในการปรับปรุง” ความหนาของผนังที่จะนำมาใช้สำหรับเสาเข็มท่อเหล็กที่มีการผูกมัดสำหรับโมเดลของต่อม่อในการศึกษาปัจจุบันจะถูกกำหนดขึ้นมา ในขั้นตอนการวัดความหนาผนัง พื้นที่ที่มีความหนาน้อยที่สุดจะนำมาใช้ โดยเลือกมาจากพื้นที่ที่อยู่ในโซนเปียกน้ำ โซนน้ำขึ้นน้ำลง และโซนที่จมอยู่ในน้ำ และจุดกลางของจุดที่มีการวัด 4 จุดและ 8 จุดได้ถูกเลือกนำมาใช้โดยที่จุดที่มีความหนาต่ำที่สุดจะนำมาเป็นจุดเริ่มต้น (รูปที่ 6) ภายหลังจากนี้ ภายในพื้นที่จัตุรัส 10 เซนติเมตร จุด 5 จุดที่มีจุด 4 จุดระยะห่างกันประมาณ 3.2

เซนติเมตรในทางยาวและด้านข้างจากจุดเริ่มต้นจะนำมาใช้ และ ความหนาเฉลี่ยที่ได้จะกำหนดว่าเป็นความหนาที่วัดได้จาก สถานที่ก่อสร้างเพื่อนำไปประเมินโครงสร้างต่อไป (รูปที่ 7)

### รูปที่ 6 ตัวอย่างของตำแหน่งการวัดในทางตั้งและรอบทรงกลม

### รูปที่ 7 ทิศทางการวัดความหนาผนังภายในพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัส 10 เซนติเมตรของแต่ละด้าน

การวิเคราะห์หมีเป้าหมายสำหรับเสาเข็ม 1 ตัว (เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 406.4 มิลลิเมตร ความยาว 10.5 เมตร ความหนาเดิม 9 มิลลิเมตร เหล็กเกรด SKK490) สำหรับโมเดลในการคำนวณทั้งหมด Ave-[ ] ในรูปที่ 8 หมายถึงโมเดลที่ได้นำความหนาเฉลี่ยสำหรับแต่ละหน้าตัดดังที่แสดงในรูป; 4d หมายถึงโมเดลซึ่งมีการวัดความหนา 4 จุดในทิศทางรอบทรงกลมในขณะที่มีการเลือกจุดศูนย์กลางในการวัดที่มีความหนาต่ำที่สุดที่จุดเริ่มต้น และ 8d หมายถึงโมเดลที่มีการเลือก 8 จุด นอกจากนี้ B-[ ]-[ ]-[ ] (ตัวอย่างเช่น B-4-4-4 ในรูป) หมายถึงโมเดลที่ไม่ได้ใช้ความหนาเฉลี่ย แต่แบ่งหน้าตัดในทางยาวออกไปตามทิศทางในการวัดความหนา ความหนาของผนังที่ใช้คำนวณเป็นค่าที่วัดได้จากแต่ละหน้าตัดได้ถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณ [ ] แสดงจำนวนของทิศทางการวัดความหนาในโซนเปียกน้ำ น้ำขึ้นน้ำลง และโซนจมอยู่ในน้ำ (จากด้านซ้ายไปด้านขวา) ในขณะเดียวกัน s-Det แสดงโมเดลซึ่งโปรไฟล์ของการผูกก่อนได้ถูกนำมาสร้างขึ้นใหม่ในรายละเอียดและ ในขณะที่ความหนาเฉลี่ย แนวการคำนวณ linear interpolation และสมมติฐานอื่น ๆ ได้นำมาใช้และรวมอยู่ในหน้าตัดซึ่งข้อมูลการวัดความหนาไม่ได้รวมไว้ก็ตามกรณีการวิเคราะห์นี้ถือได้ว่าเป็นการวิเคราะห์ที่มีการวัดความหนาที่มีรายละเอียดที่สุด และความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกในแนวราบของเสาเข็มต่อเหล็กได้รับการประเมินอย่างมีความถูกต้องสูงสุดแล้ว

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง load-displacement สำหรับแต่ละโมเดล ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับในกรณีของความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกในแนวราบที่ได้จากการ

เปรียบเทียบ s-Det มีค่าเท่ากับ 16.8 % สำหรับ Ave-4d และ 13.1% สำหรับโมเดล B-4-4-4 ขณะที่จุด 4 จุดต่อพื้นที่หน้าตัดได้ถูกกำหนดไว้สำหรับการบริหารจัดการที่สถานที่ก่อสร้างตามคู่มือการทำงาน แต่ก็สามารถจะเห็นได้ว่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโมเดลได้กำหนดไว้ในด้านที่ปลอดภัย (ในระดับต่ำ) เมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกที่แท้จริง เพราะว่าความหนาของพื้นที่หน้าตัดที่มีความหนาต่ำสุดได้นำมาใช้แทนที่ค่าความหนาผนังของเสาเข็มในโซนเปียกน้ำทั้งหมด และความหนาที่น้อยกว่าความหนาที่แท้จริงได้นำมาใช้ในทุกโซน เพื่อที่จะประเมินความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกอย่างถูกต้อง จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องมีการกำหนดกำลังเฉพาะจุดในโซนเปียกน้ำที่มีผลของแรงดัดที่เกิดขึ้น ซึ่งมีความแตกต่างของความหนาค่อนข้างมาก

### รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Load-Displacement ในโมเดลเสาเข็มต่อเหล็กตามค่าที่วัดได้จริงที่สถานที่ก่อสร้าง

นอกจากนี้ เมื่อทำการตรวจสอบผลที่ได้ซึ่งพื้นที่ทำการตรวจวัดในโซนเปียกน้ำและโซนน้ำขึ้นน้ำลงเพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 3 และเมื่อผลการตรวจวัดได้นำมาเปรียบเทียบกับ s-Det กราฟ Load-Displacement ที่มีค่าใกล้เคียงกับ s-Det สามารถวัดได้โดยการเพิ่มพื้นที่ทำการตรวจวัด ซึ่งเป็นที่มาจากค่าความหนาเฉลี่ยต่อหน้าตัดที่มีความเที่ยงตรงของข้อมูลในระดับหนึ่ง สามารถคำนวณได้โดยการเพิ่มจำนวนของพื้นที่หน้าตัดในการตรวจวัด ในขณะที่การจัดการ ณ สถานที่ก่อสร้างมีความยากลำบากเช่นกัน แต่เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องวัดความหนาในพื้นที่หน้าตัดหลายตำแหน่ง ซึ่งลักษณะของการผูกก่อนคล้ายกัน และในลักษณะงานของการวัดความหนาแล้ว การใช้ 4 จุด ที่ทำมุม 90 องศากันถือว่าเพียงพอ

### บทสรุป

จากผลของการวิเคราะห์ plane frame ของตอม่อเสาเข็มเหล็กต่อแบบตรง ได้ข้อสรุปว่าผลของตำแหน่งเสาเข็มต่อที่มีความเสียหายเนื่องจากการผูกก่อนต่อความสามารถในการรับน้ำหนัก

บรรทุกมีค่าน้อย และกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างทั้งระบบขึ้นอยู่กับความเสียหายจากการผูกมัดของโครงสร้างทั้งระบบ นอกจากนี้ จากผลของการประเมินกำลังรับน้ำหนักที่คงเหลืออยู่ โดยวิธีการตรวจวัดความหนาของผนังแผ่นเหล็กเสาะเข็มท้อ ณ สถานที่ก่อสร้างตามคู่มือการทำงานในปัจจุบัน พบความคลาดเคลื่อน 13 % หรือมากกว่านั้น เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างในกรณีที่มีการทำโมเดลอย่างละเอียด และได้ตัวเลขกำลังรับน้ำหนักที่ค่อนข้างปลอดภัย

นอกจากนี้ ในขณะที่การวัดความหนาของผนังแผ่นเหล็กที่ 4 จุดภายในพื้นที่หนึ่งถือว่าการเพียงพอ โดยเฉพาะในโซนที่เปียกน้ำ ซึ่งเป็นส่วนที่ความหนาผนังที่คงเหลืออยู่มีความแตกต่างกันอย่างมาก การแก้ไขความหนาที่วัดได้โดยใช้ standard deviation ก็ถือว่ามีประสิทธิภาพดี และควรที่จะมีการวัดความหนาในพื้นที่หน้าตัดหลาย ๆ พื้นที่ การตรวจสอบในรายละเอียดจะนำมาใช้สำหรับกระบวนการตรวจวัด ณ สถานที่ก่อสร้างซึ่งความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างต่อม่อสามารถประเมินได้อย่างถูกต้องในทางวิศวกรรมที่ใช้ผลของการตรวจวัด ณ สถานที่ก่อสร้างอย่างจำกัด

