STEEL CONSTRUCTION TODAY & TOMORROW

(ฉบับที่ 33 เดือนกรกฎาคม 2011)

งานเผยแพร่ร่วมกันของ สมาพันธ์เหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศญี่ปุ่น

และสมาคมโครงสร้างเหล็กแห่งประเทศญี่ปุ่น

ฉบับภาษาไทย

หนังสือ Steel Construction Today & Tomorrow ฉบับภาษา อังกฤษได้รับการตีพิมพ์ปีละสามครั้ง และเผยแพร่ไปทั่วโลกให้แก่ผู้บริหารและองค์กรอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องหรือสนใจ วัตถุประสงค์หลักของการเผยแพร่คือการนำเสนอมาตรฐานและข้อกำหนดที่เกี่ยวเนื่องกับงานโครงสร้างเหล็ก ยกตัวอย่างเช่น โครงการก่อสร้างในรูปแบบใหม่ ๆ เทคโนโลยีขั้นสูง สำหรับการก่อสร้างและการเลือกใช้วัสดุ รวมไปถึงข่าวสารในแวดวงงานก่อสร้างอาคารและงานวิศวกรรมโยธา

เพื่อให้ผู้อ่านชาวไทยเข้าใจบทความในนิตยสารฉบับนี้ได้ง่ายขึ้น เราจึงได้จัดทำฉบับภาษาไทยที่มีเฉพาะส่วนของตัวหนังสือ แนบเอาไว้กับฉบับภาษาอังกฤษ ส่วนภาพถ่าย ภาพตัวอย่างประกอบและตาราง จะถูกนำมาแสดงไว้ในฉบับภาษาไทยเฉพาะที่เป็นชื่อหรือคำบรรยาย เพราะฉะนั้นในการอ่านควรอ้างอิงถึงเนื้อหาของหนังสือฉบับภาษาอังกฤษควบคู่กันไป นอกจากนี้เมื่อต้องการข้อความหรือคำศัพท์ทางเทคนิคที่ถูกต้อง หรือต้องการรายละเอียดทางเทคนิคเพิ่มเติม กรุณาอ้างอิงถึงหนังสือฉบับภาษาอังกฤษ ด้วยเช่นกัน

ฉบับที่ 33 เดือนกรกฎาคม 2011: สารบัญ

หัวข้อพิเศษ:

เสาเข็มเหล็กแบบท่อและเสาเข็มแผ่นพืด

เสาเข็มแผ่นพืดและเสาเข็มท่อเหล็กสำหรับโครงสร้างท่าเรือ:

เทคโนโลยีการป้องกันการกัดกร่อน_____1

เสาเข็มท่อและเสาเข็มแผ่นพืดเหล็ก: เทคโนโลยีการซ่อมแซมและการเสริมกำลัง_____6

สะพานนาธทาน(Nhat Tan)ในเวียตนาม: การออกแบบสะพานและการก่อสร้างโครงสร้างส่วนใต้ดิน_____10

สะพานโตเกียวเกท(Tokyo Gate): การออกแบบและก่อสร้างบ่อของฐานรากด้วยเสาเข็มพืดเหล็กแบบท่อ_____14

แผ่นดินไหวขนาดใหญ่ที่ภาคตะวันออกของญี่ปุ่นและการก่อสร้างโครงสร้างเหล็ก_____ปกหลัง

(หน้า1-5)

เสาเข็มแผ่นพืด (sheet pile) และ เสาเข็มท่อเหล็ก (pipe pile) สำหรับโครงสร้างท่าเรือ

– เทคโนโลยีการป้องกันการกัดกร่อน: ในปัจจุบันและอนาคต

โดย ฮิเดโนริ ฮามาดะ (ดร., ศาสตราจารย์จากมหาวิทยาลัยกิวชู)

โทรุ ยามาจิ (ดร., หัวหน้ากลุ่มจากสถาบันวิจัยท่าเรือและสนามบิน)

โยชิกาซู อะกิรา (ดร., นักวิจัยจากสถาบันวิจัยท่าเรือและสนามบิน)

ประวัติของเทคโนโลยีการป้องกันการกัดกร่อนสำหรับเหล็กในประเทศญี่ปุ่นได้มีมานานกว่า 50 ปีแล้ว จึงทำให้เทคโนโลยีเหล่านี้ได้มีการพัฒนาจนถึงระดับดีเยี่ยม ซึ่งการป้องกันการกัดกร่อนของชิ้นส่วนเหล็กในโครงสร้างท่าเรือต่าง ๆ แทบจะสมบูรณ์แล้วทั้งสิ้น ทั้งนี้ทั้งนั้นความแตกต่างของสภาพแวดล้อมก็มีผลต่อการนำเทคโนโลยีของการป้องกันการกัดกร่อนไปใช้แตกต่างกันในแต่ละประเทศ ดังนั้นวิธีการป้องกันที่ใช้ก็จะแตกต่างกันด้วย อย่างไรก็ตามประสบการณ์ต่าง ๆ ที่ได้รวบรวมมาจากการทำงานทางด้านนี้ในประเทศญี่ปุ่นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำงานในประเทศอื่น ๆ ได้ บทความนี้กล่าวถึงเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับการป้องกันการกัดกร่อนในชิ้นส่วนเหล็กสำหรับโครงสร้างท่าเรือในประเทศญี่ปุ่น เรามีความเชื่อว่าบทความนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีการป้องกันการกัดกร่อนที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างเหล็กที่ใช้ในประเทศต่าง ๆ ได้

โครงสร้างท่าเรือที่สร้างจากโครงสร้างเหล็กในประเทศญี่ปุ่น

- **ประวัติความเป็นมา**

โครงสร้างท่าเรือที่สร้างจากโครงสร้างเหล็กในประเทศญี่ปุ่นซึ่งเก่าแก่ที่สุดเป็นโครงสร้างท่าเรือที่ยื่นออกไปในทะเล (pier) ได้ก่อสร้างโดยใช้เสาเข็มปีกเกลียว (screw pile) เหล็ก อยู่ที่ท่าเรือเมืองโกเบเมื่อปี 1876 และต่อมาได้มีการก่อสร้างที่ท่าเรือเมืองโยโกฮามา นาโกยา โอซากา และ ทสึรูกา ตามลำดับ ในช่วงสุดท้ายของราชวงศ์ไทโจ (ปี 1912 – 1926) ได้เริ่มมีการนำเสาเข็มแผ่นพืดเหล็กเข้ามาเพื่อซ่อมแซมความเสียหายที่เกิดเนื่องจากแผ่นดินไหวใหญ่ในย่านคันโตะ ท่าเรือแห่งแรกที่ใช้เสาเข็มแผ่นพืดเหล็กได้เริ่มก่อสร้างในปี 1926 ที่ท่าเรือโอซากา

ในช่วงยุคราชวงศ์โชวา (ปี 1926 – 1989) การนำเสาเข็มแผ่นพืดเหล็กเข้ามาใช้ในประเทศมีจำนวนเพิ่มขึ้น ในเบื้องต้นมีจำนวน 25,000 – 35,000 ตันต่อปี ภายหลังเมื่อปี 1929 ได้เริ่มต้นทดลองผลิตเสาเข็มแผ่นพืดเหล็กในโรงงานผลิตเหล็กยาวาตะซึ่งเป็นของรัฐบาล ได้มีการผลิตอย่างเต็มรูปแบบเมื่อปี 1930 โดยในปี 1931 ที่ท่าเรือมิยาโกะ ได้มีการนำเสาเข็มแผ่นพืดเหล็กที่เป็นชิ้นส่วนที่ผลิตในประเทศญี่ปุ่นเข้ามาใช้ในโครงสร้างท่าเรือเป็นครั้งแรก พร้อมกันนี้ ได้มีการก่อสร้างท่าเรือที่ใช้เสาเข็มแผ่นพืดเหล็กอีกหลายแห่งตั้งแต่ช่วงต้นของราชวงศ์โชวา เช่นที่เมืองโอซากา นาโกยา ฟูชิกิ ฮาโกดาเตะ และรูโมอิ

ภายหลังสงครามโลก เสาเข็มแบบท่อเหล็กได้เป็นที่นิยมใช้สำหรับโครงสร้างท่าเรือ เพิ่มมากขึ้น การใช้เสาเข็มเพื่อเป็นโครงสร้างฐานรากของสะพานท่าเรือได้แพร่หลาย ภายหลังจากได้มีการก่อสร้างท่าเรือชิโอกามาในปี 1954 ท่าจอดเรือแห่งแรกที่เป็นลักษณะเซลล์(cell-type)โดยใช้เสาเข็มแผ่นพืดแบบแบนคือท่าเรือชิโอกามา (1954 – 1959) ตามมา

ด้วยท่าเรือ โตบาตะ นาโกยา นาโอเอทสึ เอโอโมริ และ โยโกฮามา ตามลำดับ

ในยุคทศวรรษที่ 1960 ได้มีการพัฒนารูปแบบการใช้เสาเข็มท่อเหล็กกันอย่างแพร่หลายเพื่อสร้างท่าเรือที่มีขนาดใหญ่หลายแห่ง สะพานยามาชิตะที่ท่าเรือในโยโกฮามาและสะพานมายะที่ท่าเรือโกเบถือเป็นโครงสร้างที่เป็นแบบฉบับสำหรับโครงสร้างประเภทนี้

เมื่อเร็ว ๆ นี้ ได้มีการนำโครงสร้างเหล็กแบบ jacket มาใช้กันมากขึ้นสำหรับเป็นโครงสร้างของท่าเรือต่าง ๆ ท่าจอดเรือคอนเทนเนอร์โออิและรันเวย์ดีอันใหม่ของท่าอากาศยานโตเกียวถือเป็นโครงสร้างที่เป็นแบบฉบับสำหรับโครงสร้างประเภทนี้

- **รูปแบบของโครงสร้างเหล็กสำหรับท่าเรือ**

ในปัจจุบัน เกือบครึ่งหนึ่งของท่าเรือในประเทศญี่ปุ่นได้มีการก่อสร้างด้วยโครงสร้างเหล็ก ซึ่งถือได้ว่าเป็นลักษณะเฉพาะอันหนึ่งของท่าเรือในประเทศญี่ปุ่น เหตุผลสำคัญที่การใช้ผลิตภัณฑ์เหล็กในประเทศญี่ปุ่นมีมากขึ้นก็คือการพัฒนาอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าซึ่งถือว่าเป็นส่วนประกอบสำคัญในการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศอย่างรวดเร็วในทศวรรษที่1960 เพราะว่าการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศอย่างรวดเร็วในช่วงนี้มีความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาปรับปรุงท่าเรือและสิ่งก่อสร้างสนับสนุนท่าเรือต่าง ๆ อย่างรวดเร็ว การก่อสร้างโครงสร้างต้องให้แล้วเสร็จรวดเร็ว จึงเป็นสาเหตุสำคัญในการเพิ่มแรงจูงใจที่จะนำโครงสร้างเหล็กเข้ามาใช้ในงานเหล่านี้ โดยความยาวทั้งสิ้นของท่าเรือแบบโครงสร้างเหล็กมีประมาณ 490 กิโลเมตร ที่ท่าเรือโตเกียว อัตราส่วนการใช้โครงสร้างเหล็กเทียบกับวัสดุก่อสร้างอื่นที่ใช้ในโครงสร้างท่าเรือทั้งหมด (รวมทั้งเขื่อนกันคลื่นทะเล) ได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในโครงสร้างท่าเรือส่วนต่อเติมทั้งหมดที่มีความยาวมากกว่า 200 กิโลเมตรนั้น คิดเป็นส่วนที่ใช้โครงสร้างเหล็กรวมความยาวได้กว่า 150 กิโลเมตร

- **โครงสร้างเหล็กสำหรับท่าเรือแบบทั่วไป – ท่าเรือแบบใช้เสาเข็มแผ่นพืดเหล็ก**

วิธีการก่อสร้างท่าเรือที่ใช้เสาเข็มแผ่นพืดเหล็กทำได้โดยการตอกเสาเข็มแผ่นพืดเหล็กลึกจมลงไปในพื้นดินเพื่อใช้เป็นโครงสร้างกำแพงป้องกันดิน (รูปที่ 1) ท่าเรือที่ใช้เสาเข็มแผ่นเหล็กพืดชนิดที่ใช้ทั่วไปก็คือการใช้แท่งเหล็กยึด (tie rod) เชื่อมต่อผนังเสาเข็มแผ่นพืดเหล็กไปยังโครงสร้างเหล็กค้ำยัน (strut) (ท่อเหล็กกลม, เสาเข็มแผ่นพืดเหล็ก เหล็กรูปพรรณฯลฯ) ที่ได้ติดตั้งอยู่ด้านหลังกำแพง เสาเข็มที่ใช้เป็นกำแพงป้องกันดินสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดขึ้นอยู่กับขนาดของน้ำหนักบรรทุกที่กำแพงต้องรองรับ – เสาเข็มแผ่นพืดที่ใช้กันทั่วไปแบบรูปตัวยู และเสาเข็มแบบท่อเหล็กที่มีการเชื่อมต่อโดยใช้รอยต่อโครงสร้าง ในกรณีที่น้ำหนักบรรทุกน้อย ๆ ดังเช่นท่าเรือที่มีระดับน้ำตื้น ๆ สามารถใช้เพียงโครงสร้างกำแพงที่สามารถรับน้ำหนักนี้ได้ด้วยตัวเอง โดยมิต้องอาศัยโครงสร้างเหล็กค้ำยันและแท่งเหล็กยึดมาใช้ ในกรณีของการใช้เสาเข็มแผ่นพืดเหล็กหรือเสาเข็มท่อเหล็กนี้ ส่วนด้านหน้าของกำแพงเสาเข็มเหล่านี้จะต้องมีการสัมผัสกับทะเลที่เอื้อต่อการกัดกร่อนของเหล็กอย่างสูง

รูปที่ 1 โครงสร้างแบบทั่วไปของท่าเรือแบบใช้เสาเข็มแผ่นพืดเหล็ก

- **ท่าเรือแบบยื่นออกทะเล**

ท่าเรือแบบยื่นออกทะเลมีวิธีการก่อสร้างโดยการวางโครงสร้างส่วนบนลงบนเสา (รูปที่ 2) ท่าเรือประเภทนี้ประกอบไปด้วยสะพานตอม่อที่ยื่นออกทะเลด้านหน้าของท่าจอดเรือ และโครงสร้างป้องกันดินในด้านหลัง โดยจะมีการใช้เหล็กโครงสร้างกันอย่างแพร่หลายสำหรับโครงสร้างสะพานตอม่อด้านหน้านี้ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กหรือชิ้นส่วน

ประกอบสำเร็จของคานและพื้นคอนกรีตจะใช้เป็นโครงสร้างส่วนบน เท่าที่พบส่วนใหญ่สำหรับโครงสร้างท่าเรือโครงสร้างส่วนบนที่เป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนี้มักจะเป็นส่วนที่ตรวจพบสภาพที่ถูกกัดกร่อนหรือเสียหายเนื่องจากการสัมผัสกับไอทะเล (ซึ่งมีความเป็นเกลือสูง)

รูปที่ 2 โครงสร้างแบบทั่วไปของท่าเรือแบบใช้เสาเข็มท่อเหล็ก

ลักษณะการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมแบบชายฝั่งทะเล

สภาพแวดล้อมที่ซึ่งโครงสร้างเหล็กสำหรับท่าเรือต้องสัมผัสสามารถแบ่งออกเป็น 5 โซนใหญ่ ๆ คือ โซนที่สัมผัสอากาศ โซนที่มีการเปียกน้ำ โซนที่น้ำทะเลขึ้นลง โซนที่อยู่ใต้น้ำ และโซนที่จมอยู่ในโคลน ในกรณีที่มีการใช้ผลิตภัณฑ์เหล็กที่มีความยาวเช่นเสาเข็มแผ่นพืดและเสาเข็มท่อเหล็กวิ่งผ่านหลาย ๆ โซน (โซนที่คลื่นทะเลซัดถึง โซนที่อยู่ใต้น้ำ และโซนที่จมอยู่ในโคลน) มีโอกาสเกิดการกัดกร่อนแบบ macro-cell เนื่องจากความแตกต่างของสภาพแวดล้อมพื้นที่ซึ่งเกิดปัญหามากที่สุดในแง่การกัดกร่อนของเหล็กจะเกิดในบริเวณด้านใต้โซนที่มีการเปียกน้ำ(splash zone)และบริเวณที่ระดับน้ำทะเลเฉลี่ยต่ำสุด (mean low water level) รูปที่ 3 แสดงความน่าจะเป็นของอัตราการกัดกร่อนเทียบกับสภาพแวดล้อม

- **โซนที่สัมผัสอากาศ** (Atmospheric zone)

ในกรณีส่วนใหญ่ อัตราการกัดกร่อน (ความเสียหายจากการกัดกร่อน) สำหรับโครงสร้างในโซนนี้อยู่ที่ประมาณ 0.1 มิลลิเมตรต่อปี

- **โซนที่มีการเปียกน้ำ** (splash zone)

ในโซนพื้นที่ซึ่งมีการเปียกน้ำ โครงสร้างจะสัมผัสน้ำทะเลอยู่เป็นประจำ ซึ่งเป็นเหตุให้น้ำทะเลและออกซิเจนจำนวนมากมีการสัมผัสกับพื้นที่ผิวของชิ้นส่วนเหล็ก เพราะเหตุนี้ โซนที่มีการเปียกน้ำถือว่าเป็นพื้นที่ซึ่งมีสภาพการกัดกร่อนมากที่สุด โดยทั่วไปอัตราส่วนการกัดกร่อนในโซนนี้วัดได้ที่ระดับ 0.3 มิลลิเมตรต่อปี จากผลการตรวจสอบผลในพื้นที่โอกินาวา ได้พบว่าบางส่วนมีอัตราการกัดกร่อนถึง 0.5 – 0.6 มิลลิเมตรต่อปีเนื่องจากผลของอุณหภูมิและความชื้นที่สูงในพื้นที่นี้

รูปที่ 3 ตัวอย่างแสดงอัตราการกัดกร่อนในแนวดิ่งสำหรับเสาเข็มท่อและเสาเข็มแผ่นพืดเหล็ก

- **โซนที่น้ำทะเลขึ้นลง** (tidal zone)

โซนที่น้ำทะเลขึ้นลงซัดถึงเป็นพื้นที่ซึ่งโครงสร้างมีการจมน้ำทะเลเป็นครั้งคราวและ มีการสัมผัสกับอากาศในบางครั้งเนื่องจากการเคลื่อนตัวขึ้นลงของระดับน้ำทะเล ในพื้นที่ส่วนนี้แบ่งได้เป็น อัตราการกัดกร่อนในพื้นที่ระดับใกล้กับระดับน้ำทะเลปานกลาง(mean seawater level) จะมีค่าต่ำ ในขณะที่อัตราการกัดกร่อนในพื้นที่ส่วนที่อยู่ใต้ระดับน้ำทะเลต่ำสุดจะมีค่าสูงมาก เพราะเหตุว่าได้เกิดการสร้างตัวของ macro-cell โดยมีพื้นที่ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าต่ำ (ขั้วลบ) cathode ในบริเวณระดับน้ำทะเลปานกลาง (ค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่สูง) (high dissolved oxygen concentration) และพื้นที่ซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าสูง (ขั้วบวก) anode ในพื้นที่ใต้ระดับน้ำทะเลต่ำสุด (ค่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำที่ต่ำ) (low dissolved oxygen concentration) ในบางกรณีพบว่าอัตราการกัดกร่อนในพื้นที่ใต้ระดับน้ำทะเลต่ำสุดมีค่าสูงกว่าโซนที่มีการเปียกน้ำ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าการกัดกร่อนแบบ concentrated การกัดกร่อนแบบนี้มีผลให้เกิดการวิบัติของโครงสร้างเหล็กรองรับท่าเรือมาแล้วดังตัวอย่างในอดีต

- **โซนที่อยู่ใต้น้ำและโซนที่จมอยู่ในโคลน**

การกัดกร่อนในพื้นที่ซึ่งอยู่ใต้น้ำของผิวเหล็กค่อนข้างจะคงที่ อัตราการกัดกร่อนที่ระดับ 1 เมตรจากผิวน้ำมีค่าประมาณ 0.1 – 0.2 มิลลิเมตรต่อปี ในพื้นที่ซึ่งจมอยู่ในโคลนนั้นเนื่องจากระดับออกซิเจนที่ลดลงเมื่อเทียบกับส่วนที่อยู่จมน้ำ อัตราการกัดกร่อนจะมีค่าลดลงที่ประมาณ 0.03 – 0.05 มิลลิเมตรต่อปี

เทคโนโลยีการป้องกันการกัดกร่อนสำหรับโครงสร้างเหล็กรองรับท่าเรือ

- **ประวัติของเทคโนโลยีการป้องกันการกัดกร่อน**

พื้นฐานทางแนวความคิดซึ่งเป็นที่รู้จักกันสำหรับวิธีป้องกันการกัดกร่อนในอดีตคือใช้หลักการเผื่อการกัดกร่อนในชิ้นเหล็ก (corrosion allowance) หลักการนี้ใช้การเผื่อความหนาของผลิตภัณฑ์เหล็กโครงสร้างให้เพียงพอเพื่อชดเชยการสูญเสียเนื่องจากการกัดกร่อนตั้งแต่แรกจนกระทั่งในปี 1953 ที่วิธีการป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิค (cathodic protection) ได้ถูกนำมาใช้เป็นครั้งแรกสำหรับโครงสร้างเหล็กสำหรับท่าเรือ ท่าเรือที่ใช้ก็คือท่าเรืออัมกาซากิ ซึ่งมีการใช้ระบบอะโนดิค (anodic system) ซึ่งมีการใช้ขั้วบวกของวัสดุโลหะผสมแมกนีเซียม (magnesium alloy anode) มาใช้ โดยระบบการป้องกันนี้ใช้ระบบกระแสไฟฟ้าจากภายนอก

ในยุคช่วงทศวรรษ 1960 ได้มีความพยายามในการใช้วิธีการป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิคโดยใช้ระบบกระแสไฟฟ้าจากภายนอก ได้ทดลองใช้กับโครงสร้างท่าเรือหลาย ๆ ที่ และในระหว่างปี 1960 – 1970 สีน้ำมัน (oil paint) และสีน้ำมันดินอิพอกซีเรซิน (tar epoxy resin paint) ได้รับการพัฒนาขึ้นและได้นำมาใช้มากขึ้นสำหรับป้องกันการกัดกร่อนในโซนที่อยู่เหนือส่วนที่จมอยู่ใต้น้ำ ในการเคลือบหรือดาดผิวหน้าวัสดุเพื่อป้องกันการกัดกร่อน สีสังกะสีประกอบ (zinc-rich) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นชั้นรองพื้นก่อนการทาสีน้ำมันดินอิพอกซีเรซิน ในภายหลังได้มีความพยายามที่จะป้องกันส่วนบนของเสาเข็มท่อเหล็กโดยการใช้คอนกรีตเพื่อป้องกันการกัดกร่อนสำหรับโครงสร้างที่อยู่เหนือระดับน้ำทะเลซึ่งการป้องกันการกัดกร่อนวิธีแบบแคโทดิคใช้ได้ไม่ดีนักในโซนนี้ ในปีประมาณ 1970 ได้มีการพัฒนาสียางผสมคลอรีน (chlorinated rubber paint) ขึ้นมา และตามมาด้วยการพัฒนาของสียูริเทน (urethane)ในปี 1972 สำหรับวิธีการป้องกันการกัดกร่อนแบบ แคโทดิคนั้นได้มีการพัฒนาขั้วอะโนดโดยใช้วัสดุโลหะผสมอลูมินัม (aluminum alloy) แบบ high-performance ขึ้นมาใช้ และริเริ่มวิธีป้องกันการกัดกร่อนแบบอะโนดิค (anodic corrosion protection) อย่างจริงจัง ประมาณปี 1970 ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการเชื่อมใต้น้ำขึ้นมาเพื่อลดเวลาการทำงานและเพื่อความปลอดภัยในการทำงานสำหรับขั้นตอนการติดตั้งขั้วอะโนดแบบโลหะผสมอลูมินัม

ภายหลังจากปี 1980 ได้มีการพัฒนาวิธีการป้องกันการกัดกร่อนโดยใช้การเคลือบ/ดาดผิวด้วยวัสดุที่มีความทนทานสูงหลายประเภท รวมถึงการใช้ ปูนทราย/แผ่นไฟเบอร์โพลีเมอร์ (cement-mortar/FRP) วิธีการดาดผิวด้วยสารขี้ผึ้ง (petrolatum lining) และวิธีการดาดผิววัสดุที่แข็งตัวใต้น้ำ (underwater hardening-type lining method) ประมาณในปี 1982 การดาดผิวโดยใช้พลาสติคสังเคราะห์โพลีเอททิลีน (polyethylene lining) และพลาสติคสังเคราะห์โพลียูริเทน (polyurethane lining) (หรือที่เรียกว่าการป้องกันการกัดกร่อนแบบทนทาน (heavy-duty corrosion protection method)) ได้มีการพัฒนาขึ้นมา และในระบบการป้องกันโดยใช้การเคลือบ/ดาดผิวด้วยวัสดุอิพอกซีเรซินที่มีความทนทานเป็นพิเศษ (ultra heavy/thick type epoxy resin paint) และวัสดุฟลูออรีนเรซิน (fluorine resin paint) ที่มีความต้านทานต่อสภาวะอากาศได้ดีก็ได้มีการพัฒนาขึ้นมา

อย่างไรก็ตาม ถึงจะเป็นในขณะนั้น ระบบการป้องกันการกัดกร่อนก็ไม่ได้มีการนำมาใช้ในทุก ๆ ท่าเรือ แต่ระบบการป้องกันแบบ “การเผื่อการกัดกร่อนในชิ้นเหล็ก” ก็ยังใช้กันอยู่ เพราะเหตุนี้ ในปี 1983 เกิดอุบัติเหตุขึ้นที่ท่าเรือโยโกฮามาทำให้โครงสร้างท่าเรือเสียหายและจมลง และจากเหตุการณ์นี้ ต่อมาในปี 1984 วิธีการป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิคได้ถูกกำหนดขึ้นให้เป็นวิธีมาตรฐานสำหรับป้องกันการกัดกร่อนของโครงสร้างเหล็กที่สร้างขึ้นแล้วในโซนที่จมน้ำและจมอยู่ในโคลน และให้วิธีป้องกันโดยการเคลือบ/ดาดผิววัสดุ เป็นวิธีมาตรฐานสำหรับป้องกันการกัดกร่อนในโครงสร้างเหล็กที่สร้างขึ้นแล้วในโซนที่น้ำทะเลขึ้นลง โซนที่มีการเปียกน้ำ และโซนที่สัมผัสอากาศ

ในระหว่างช่วงเดียวกันนั้น ได้ริเริ่มการใช้วัสดุไทเทเนียมเป็นวัสดุป้องกันการกัดกร่อนในรูปแบบของแผ่นปิดไทเทเนียมสำหรับแผ่นเหล็ก เช่นเดียวกันกับการใช้การดาดผิวเหล็กเสตนเลส วัสดุไทเทเนียมได้นำมาใช้แล้วในโครงสร้างเช่น สะพานของทางไฮเวย์ทราน-อ่าวโตเกียว (trans-tokyo bay highway) (สำหรับความสูงของน้ำทะเลระหว่าง -2 เมตรและ +3 เมตร) และสะพานยูเมมาอิ (ประเภทลอยน้ำ หมุนตัวได้) การดาดผิวเหล็กเสตนเลสเพื่อต้านทานการกัดกร่อนของน้ำทะเลได้ถูกนำมาใช้เป็นวิธีป้องกันการกัดกร่อนสำหรับ jacket ของท่าเรือ เพื่อปรับปรุงท่าเรือโออิ (สำหรับระดับความลึกน้ำ 1 เมตรหรือมากกว่า)

ภายหลังใน “มาตรฐานทางเทคนิคสำหรับโครงสร้างท่าเรือและโครงสร้างประกอบท่าเรือ (Technical Standards for Port and Harbor Facilities)” ตามที่แก้ไขเมื่อเดือนเมษายน 1999 วิธีป้องกันการกัดกร่อนแบบการเผื่อการกัดกร่อนในชิ้นเหล็กได้ถูกยกเลิกไปและได้มีการกำหนดกฎเกณฑ์ขึ้นใหม่โดยให้ใช้วิธีการป้องกันแบบแคโทดิคสำหรับโซนที่อยู่ใต้ระดับคลื่นเฉลี่ยและให้ใช้วิธีการป้องกันแบบเคลือบ/ดาดผิวสำหรับทุกโซนที่มีระดับความลึก 1 เมตรใต้ระดับน้ำลงไป

- **แนวความคิดสำหรับวิธีการป้องกันการกัดกร่อนแบบมาตรฐาน**

สำหรับการกัดกร่อนแบบ concentrated ที่เกิดขึ้นในบริเวณใต้ระดับน้ำทะเลเฉลี่ยต่ำสุด ซึ่งยากแก่วิธีการตรวจสอบโดยใช้ตาเปล่า โดยพื้นที่ส่วนใดส่วนหนึ่งอาจจะต้องทำการซ่อมแซมโดยการเคลือบผิวหน้า จึงจำเป็นต้องนำวิธีการตรวจวัดอื่น ๆ มาใช้ โดยระบบมาตรฐาน 3 แบบได้ถูกนำมาใช้เพื่อป้องกันการกัดกร่อนแบบ concentrated นี้ (รูปที่ 4)

(a) วิธีการนี้นำมาใช้สำหรับป้องกันการกัดกร่อนแบบเคลือบ/ดาดผิว กับพื้นที่ระดับเหนือกว่าระดับน้ำทะเลต่ำสุด -1 เมตรและการป้องกันแบบแคโทดิคสำหรับพื้นที่ใต้ระดับน้ำทะเลเฉลี่ยต่ำสุด วิธีการนี้เป็นวิธีที่มีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายที่สุด

(b) วิธีนี้ใช้วิธีการป้องกันการกัดกร่อนแบบวิธี (a) ซึ่งใช้การเคลือบ/ดาดผิวสำหรับพื้นที่ซึ่งมีความลึกมากกว่าไปยังด้านก้นทะเล วิธีการนี้เป็นวิธีที่ประหยัดที่สุดและมีประสิทธิภาพในกรณีที่ต้องมีการป้องกันการกัดกร่อนในพื้นที่ขนาดใหญ่แน่นโดยวิธีการป้องกันแบบแคโทดิคเป็นสิ่งที่จำเป็นในทะเลและในพื้นที่ซึ่งมีคลื่นซัดตลอด มีตัวอย่างของการใช้วิธีการนี้มากมายในโครงสร้างสะพานช่วงยาวและประตูน้ำ

(c) วิธีการนี้นำไปใช้สำหรับการเคลือบ/ดาดผิว สำหรับส่วนที่อยู่ในโซนที่เปียกน้ำที่ซึ่งมีการกัดกร่อนอย่างรุนแรง โซนที่น้ำทะเลขึ้นลง โซนที่จมอยู่ใต้น้ำ และโซนที่จมอยู่ใต้โคลน โดยทั่วไปวิธีการนี้ได้นำไปใช้กับเขื่อนเสาเข็มแผ่นพืดที่ใช้ในพื้นที่ซึ่งเป็นน้ำตื้น ในสภาพการใช้งานนี้ วิธีการที่ใช้เคลือบ/ดาดผิวควรจะต้องมีความสามารถป้องกันการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยมและทนทานเป็นพิเศษ ในกรณีทั่วไปแล้ว วัสดุ

โพลีเอททิลีนและ ยูริเทน-อิลาสโตเมอร์ (urethane-elastomer) จะนำมาใช้กับโครงสร้างใหม่ ส่วนสารขี้ผึ้งและปูนทรายจะใช้สำหรับโครงสร้างเก่า ในกรณีส่วนใหญ่ ความลึกมากที่สุดสำหรับวิธีการเคลือบ/ดาดผิว นี้คือ G.L.-1 เมตร วิธีป้องกันการกัดกร่อนแบบนี้จะไม่ครอบคลุมถึงโซนที่จมอยู่ใต้โคลนที่ระดับต่ำกว่า G.L.-1 เมตร ในกรณีเช่นนี้จำเป็นที่จะต้องใช้ผลิตภัณฑ์เหล็กที่มีการเผื่อความหนาเพียงพอสำหรับการสูญเสียหน้าตัดจากการกัดกร่อนที่คาดไว้ในพื้นที่ทะเลนั้น ๆ

รูปที่ 4 วิธีมาตรฐานสำหรับป้องกันการกัดกร่อนในโครงสร้างเหล็กของท่าเรือ

- **วัสดุสำหรับการเคลือบ/ดาดผิว เพื่อการป้องกันการกัดกร่อน**

วิธีป้องกันการกัดกร่อนแบบใช้การเคลือบ/ดาดผิว 5 วิธี ได้นำมาใช้สำหรับโครงสร้างเหล็กของท่าเรือดังนี้ – การเคลือบผิว (coating) การดาดผิวด้วยวัสดุสังเคราะห์ (organic) การดาดผิวด้วยสารขี้ผึ้ง (petrolatum) การดาดผิวด้วยปูนทราย (mortar) การดาดผิวด้วยโลหะ (metallic)

ระบบการเคลือบผิวที่เป็นแบบทั่วไปเป็นการทาแผ่นฟิล์มขนาดหนา/บาง ของวัสดุผสมสังกะสีร่วมกับอิพอกซีเรซิน ในขณะที่การดาดผิวด้วยวัสดุสังเคราะห์มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีกว่า วัสดุสังเคราะห์ที่ใช้สำหรับโครงสร้างท่าเรือเป็นแบบ โพลิเอททิลีน ยูริเทนอิลาสโตเมอร์ แผ่นฟิล์มแบบหนา/บาง สำหรับวัดสุที่ใช้ใต้น้ำ การดาดผิวจะสามารถใช้วัสดุได้ 2 ประเภท – ประเภทปูนอุดรอยรั่ว (putty) โดยนำวัสดุไปติดตั้งโดยใช้แผ่นปิดติดกับโครงสร้าง และประเภทที่ใช้ทา โดยทาวัสดุดาดผิวโครงสร้างด้วยลูกกลิ้งและแปรง ข้อดีสำหรับระบบการดาดผิวใต้น้ำก็คือการดาดผิวสามารถกระทำบนโครงสร้างที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดังเช่นหน้าตัดที่มีการเชื่อมต่อของเสาเข็มพืดเหล็ก

การดาดผิวแบบใช้สารขี้ผึ้งได้มีประวัติการใช้งานอยู่มากมาย และถือว่าเป็นวิธีป้องกันการกัดกร่อนสำหรับโครงสร้างเหล็กในท่าเรือที่มีประสิทธิภาพ ในระบบการป้องกันนี้ ผิวของสารขี้ผึ้งจะมีการยึดเหนี่ยวกับพื้นผิวเหล็กอย่างเหนียวแน่น โดยมีการป้องกันผิวหน้าโดยใช้พลาสติคพลาสติคเสริมกำลัง หรือโลหะแบบป้องกันการกัดกร่อน ในบางครั้งมีการเสริมวัสดุระหว่างกลางชั้นของวัสดุสารขี้ผึ้งและวัสดุปกคลุมผิว ระบบที่มีการพัฒนาขึ้นมานี้ทำให้สามารถใช้ในงานใต้น้ำได้ มีความง่ายในการทำการกลึงแต่งผิว และไม่จำเป็นจะต้องรอเวลาใช้งานหลังจากที่มีการดาดผิวเรียบร้อยแล้ว

วิธีการดาดผิวแบบปูนทรายเป็นการป้องกันการกัดกร่อนที่ทำได้โดยการสร้างแผ่นฟิล์มที่เป็นแบบ passive ซึ่งมีความหนาแน่นบนพื้นผิวเหล็ก โดยการใช้เกลืออัลคาไลน์ (alkaline) ที่อยู่ในซีเมนต์ช่วยเมื่อมีการดาดผิวด้วยคอนกรีต วิธีการนี้มักจะเรียกว่าการดาดผิวด้วยปูนทราย การดาดผิวด้วยปูนทรายได้มีการนำมาใช้สำหรับป้องกันการกัดกร่อนในโครงสร้างท่าเรือเป็นเวลานานมาแล้ว วิธีการนี้เมื่อมีการเสื่อมสภาพในรูปของรอยแตก การหลุดออกเป็นแผ่น การกลับสู่สภาพเป็นกลางของวัสดุปูนทราย เกิดขึ้น ความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนของผิวจะสูญเสียไป เพื่อที่จะแก้ไขสิ่งนี้ ได้มีการทดลองนำหลายวิธีมาใช้ – เพิ่มความหนาของการดาดวัสดุ การผสมโพลิเมอร์สังเคราะห์และไฟเบอร์เหล็ก การเคลือบผิว และการใช้วัสดุป้องกันซึ่งรวมไปถึงการใช้ไฟเบอร์เสริมกำลังโพลิเมอร์ และการหล่อแบบโลหะ

การดาดผิวด้วยโลหะจะมีข้อที่ได้เปรียบกว่าในด้านความต้านทานต่อแรงกระแทกและความต้านทานต่อการขูดขีด และวัสดุประเภทนี้มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนสูง โดยเหล็กเสตนเลสและไทเทเนียมจะเป็นวัสดุที่ใช้ในการดาดผิวด้วยวิธีนี้

การป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิค

- **หลักการ**

ในระบบป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิค กระแสไฟฟ้าตรง ซึ่งมีค่ามากกว่ากระแสจากการกัดกร่อนที่จะทำให้อิออนวิ่งออกจากเนื้อเหล็กไปยังอิโลคโตรไลสิส (electrolysis) (น้ำทะเล) ได้กำหนดให้มีการไหลอย่างต่อเนื่องจากแหล่งกำเนิดภายนอกไปยังเนื้อเหล็กเพื่อเป็นการป้องกันการเคลื่อนตัวของอิออน (ionization) (การกัดกร่อน) ในเหล็ก (รูปที่ 5) วิธีการป้องกันแบบแคโทดิคมี 2 วิธี – ระบบกระแสไฟฟ้าจากภายนอก (external current source system) และระบบการถ่ายขั้ว anodic จากวัสดุที่ยอมให้สูญเสีย (sacrificial anodic system) ในระบบการถ่ายขั้วจากวัสดุที่ยอมให้สูญเสียนั้น จะยอมให้เกิดการเคลื่อนตัวของอิออนออกจากวัสดุโลหะ วัสดุโลหะเช่น อลูมินัม สังกะสี แมกนีเซียม ฯลฯ จะเชื่อมต่อกับเหล็ก และมีการสูญเสียโดยการเคลื่อนย้ายอิออนแทนที่เหล็กโครงสร้างเพื่อที่จะเป็นการป้องกันเหล็กจากการกัดกร่อน

รูปที่ 5 หลักการของระบบป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิค

- **การนำไปใช้งาน**

ข้อกำหนดของการใช้งานด้วยวิธีป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิคก็คือช่วงพื้นที่ซึ่งอยู่ต่ำกว่าระดับเฉลี่ยของน้ำทะเลต่ำสุด วิธีแคโทดิคนี้จะมีประสิทธิภาพมากในการป้องกันการกัดกร่อนแบบ concentrated มิให้เกิดขึ้นในเหล็กที่อยู่ตำแหน่งต่ำกว่าระดับเฉลี่ยของน้ำทะเลต่ำสุด ในวิธีแคโทดิคที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ วิธีการถ่ายขั้ว anodic จากวัสดุที่ยอมให้สูญเสียโดยใช้โลหะผสมอลูมินัมแทบจะเป็นแบบเดียวที่ใช้กันอยู่ เหตุผลหลักก็คือวิธีนี้มีข้อดีมากมาย – การที่ไม่ต้องอาศัยแหล่งกระแสไฟฟ้าหลังจากที่มีการติดตั้งระบบนี้ (ในทางตรงกันข้ามกับระบบกระแสไฟฟ้าจากภายนอก) ไม่จำเป็นต้องใช้พลังงาน และความสะดวกในการตรวจสอบงานและความสามารถในการบำรุงรักษาเป็นระยะโดยใช้วิธีการวัดระดับศักย์ไฟฟ้า

หัวข้อใหม่สำหรับเทคโนโลยีการป้องกันการกัดกร่อน

- **สนามบินระหว่างประเทศโตเกียว (สนามบินฮาเนดะ)**

รูปที่ 6 แสดงสนามบินฮาเนดะและรันเวย์ที่ 4 (ในปี 2009 ระหว่างการก่อสร้าง) รันเวย์นี้ประกอบไปด้วยส่วนที่ถมทะเล (ความยาว 2,020 เมตร) และส่วนท่าเรือ (ความยาว 1,100 เมตร) ตามหัวข้อ “โครงสร้างเหล็กสำหรับท่าเรือ” ที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น เทคโนโลยีการป้องกันการกัดกร่อนที่ได้รับการยอมรับเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการออกแบบโครงสร้างท่าเรือให้มีระยะเวลาใช้งานที่ยาวนานโดยเฉพาะอายุการใช้งานกว่า 100 ปีของรันเวย์ใหม่แห่งที่ 4 โครงสร้างที่สำคัญเช่นนี้ เสาเข็มเหล็กของ jacket จะได้รับการป้องกันทั้งหมดโดยแผ่นเหล็กเสตนเลสที่มีความหนา 0.4 มิลลิเมตรในส่วนที่เป็นโซนที่คลื่นซัดถึงและโซนที่เปียกน้ำ (รูปที่ 7) คานเหล็กที่ประกอบกับโครงสร้างส่วนบนจะมีการป้องกันด้วยการเคลือบอิพอกซีเรซิน ระยะเวลาการใช้งานของโครงสร้างที่ออกแบบไว้ 100 ปีถือว่าเป็นงานที่ค่อนข้างท้าทายสำหรับโครงสร้างที่อยู่ติดทะเล ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น ดังนั้นเทคโนโลยีป้องกันการกัดกร่อนที่ดีที่สุดจึงถูกนำมาใช้สำหรับโครงสร้างประเภท jacketนี้ อย่างไรก็ตาม โครงสร้างนี้ก็มิได้มีการคิดถึงกำหนดการบำรุงรักษาสภาพโครงสร้างให้สามารถใช้งานได้ 100 ปี เพราะยังไม่คิดถึงความจำเป็นในข้อนี้

รูปที่ 6 สนามบินใหม่ ฮาเนดะและรันเวย์แห่งที่ 4

รูปที่ 7 โครงสร้างส่วนล่างของรันเวย์ที่อยู่บนสะพานในทะเล

อนาคตของการออกแบบและการบำรุงรักษาสำหรับเทคโนโลยีการป้องกันการกัดกร่อน

ถ้าจะกล่าวกันอย่างคร่าว ๆ แล้ว ตามประวัติเทคโนโลยีการป้องกันการกัดกร่อนในประเทศญี่ปุ่น ในช่วงทศวรรษ 1980 “ทฤษฎีการเผื่อการกัดกร่อนที่ยอมให้” ได้มีการลดบทบาทลง และ “วิธีการป้องกันการกัดกร่อน” เช่นวิธีการป้องกันแบบแคโทดิค และ การเคลือบ/ดาดผิวได้ถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐานแทน ในทศวรรษ 2000 งานสำคัญของการจัดการโครงสร้างสาธารณูปโภคได้เปลี่ยนไปจากการก่อสร้างโครงสร้างใหม่เป็นการบำรุงรักษาโครงสร้างเก่า และในระบบการออกแบบได้มีการเปลี่ยนแนวคิดจาก “ข้อกำหนด” เป็น “ระดับความสามารถ” ของโครงสร้าง นอกจากนี้ การออกแบบระบบป้องกันการกัดกร่อนได้มีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นวิธีการที่มีพื้นฐานตามระดับความสามารถของโครงสร้าง ด้วย คำนิยามของระดับความสามารถของระบบป้องกันการกัดกร่อนคือ “ภายในอายุการใช้งานตามที่มีการออกแบบเพื่อป้องกันเหล็กจากการกัดกร่อน (สนิม)”

ระยะเวลาการใช้งานตามที่ออกแบบสำหรับโครงสร้างเหล็กทั่วไปอย่างมากคือ 50 ปี ยกเว้นสำหรับรันเวย์แห่งใหม่ของสนามบินฮาเนดะ (100 ปี) ตารางที่ 1 แสดงวิธีการดาดผิวหรือเคลือบผิววัสดุและอายุการใช้งานที่คาดหวังไว้ ตามเทคโนโลยีในปัจจุบัน ระยะเวลา 50 ปีถือว่าเป็นความคงทนที่สูงสุดแล้ว โดยทั่วไปเพียง 20 ปีและ 30 ปีเท่านั้นที่อยู่ในระดับที่ได้มีการคาดหวังไว้ สิ่งนี้หมายความว่าระบบการบำรุงรักษาโครงสร้างที่ถูกต้องเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อที่จะทำให้โครงสร้างมีอายุตามที่คาดหวังไว้หรือมีอายุกว่า 50 ปี ในทศวรรษล่าสุดภายหลังปี 2000 การเสวนาส่วนใหญ่ได้เน้นทางด้านระบบการบำรุงรักษาโครงสร้างท่าเรือ ทั้งโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (คอนกรีตเสริมเหล็ก คอนกรีตอัดแรง คอนกรีต-เหล็กแบบประกอบ) และโครงสร้างเหล็ก (เสาเข็มพืดเหล็ก เสาเข็มท่อเหล็ก และชนิด jacket)

รูปที่ 8 แสดงเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสามารถที่ลดลงของโครงสร้างและผลของการบำรุงรักษา ในรูปนี้ได้มีการแสดง ระดับการบำรุงรักษาโครงสร้างไว้ 3 ระดับ โดยระดับการบำรุงรักษามีการกำหนดให้ “ระดับ I“ เป็นระดับสูงสุด “ระดับ II” เป็นระดับปานกลาง และ “ระดับ III “ เป็นระดับต่ำสุด ระดับการบำรุงรักษานี้จะมีการกำหนดไว้สำหรับโครงสร้างแต่ละโครงสร้างโดยพิจารณาจากปัจจัยที่สำคัญหลายอย่างเช่น “ระดับความสำคัญของโครงสร้าง” “สภาพแวดล้อม” และ “ความยากของการตรวจสอบ/สำรวจ” งานบำรุงรักษาควรจะมีพื้นฐานมาจากแนวความคิดทางด้านการบริหารอายุการใช้งาน (LCM) ของแต่ละโครงสร้าง ระดับของการบำรุงรักษาประกอบไปด้วย “การตรวจสอบเป็นครั้งคราว” “การตรวจสอบอย่างละเอียดในจุดที่ต้องการ” และ “ การประเมินความเสียหายหรือการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง” และถ้าจำเป็นต้องมีเช่น “การซ่อมแซมและการเสริมกำลัง” และ “ฐานข้อมูลการก่อสร้างสำหรับระบบการบำรุงรักษาทั้งราคาสูงและต่ำ”

ในปัจจุบันปี 2011 เทคโนโลยีป้องกันการกัดกร่อนได้ถือว่ามีการพัฒนาอยู่ในระดับที่ดี อย่างไรก็ตามในอนาคต สิ่งที่ควรปรับปรุงคือ 1) ระบบการออกแบบที่พิจารณาพื้นฐานจากระดับความสามารถที่ต้องการสำหรับระบบป้องกันการกัดกร่อน และ 2) ระบบการบำรุงรักษาโครงสร้างที่ดียิ่งขึ้นก็ยังคงเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องศึกษาและพัฒนาต่อไป

ตารางที่ 1 วิธีการดาดผิวหรือเคลือบผิววัสดุและอายุการใช้งานที่คาดหวัง

รูปที่ 8 ระดับความสามารถของโครงสร้างที่ลดลงและผลของการบำรุงรักษาโครงสร้าง

ข้อสรุปและกิตติกรรมประกาศ

สำหรับบทความนี้ สถาบันวิจัยเกี่ยวกับท่าเรือและท่าอาศยานได้ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์มากมาย ซึ่งเราขอแสดงความขอบคุณมาไว้ ณ ที่นี้ ถึงแม้จะเป็นที่ชัดเจนแล้วว่า

เทคโนโลยีป้องกันการกัดกร่อนในโครงสร้างเหล็กได้มีความรุดหน้าไปมาก แต่ก็มิได้หมายความว่าเทคโนโลยีเหล่านี้จะปราศจากสิ่งที่สามารถปรับปรุงได้ต่อไป ในประเทศญี่ปุ่น ยังมีการศึกษาและพัฒนาในองค์ความรู้ด้านนี้อย่างต่อเนื่อง และผู้แต่งหวังที่จะได้ช่วยสนับสนุนงานเหล่านี้ไม่ว่าทางใดทางหนึ่ง เพราะเหตุนี้ เราขอขอบคุณสำหรับโอกาสที่ได้ทำงานร่วมกับวิศวกรและนักวิจัยทั่วโลกในการพัฒนาระบบป้องกันการกัดกร่อนสำหรับโครงสร้างเหล็กของท่าเรือไว้ณ. โอกาสนี้.

■ ■ ■ ■ ■

(หน้า6-9)

เสาเข็มท่อเหล็กและเสาเข็มแผ่นพืดเหล็กสำหรับโครงสร้างท่าเรือ

– เทคโนโลยีการซ่อมแซมและเสริมกำลัง

โดย คาซูฮิโร มาสุดะ (บ.โยซิกาวา-ไกจิ จำกัด)

กลุ่มวิจัยหัวข้อวิธีการป้องกันการกัดกร่อนและซ่อมแซมสำหรับโครงสร้างเหล็กที่ใช้ในทะเล

ฮิโรชิ ชิราอิชิ (บ.นากาโบเทค คอร์โรชั่นโปรเทคติ้ง จำกัด)

อัตสึโอะ โมริวาเกะ (บ.โตเอะ)

กลุ่มวิจัยหัวข้อวิธีการป้องกันการกัดกร่อนและซ่อมแซมสำหรับโครงสร้างเหล็กที่ใช้ในทะเล

ข้อควรระวังเกี่ยวกับการกัดกร่อนแบบ concentrated

เพราะว่าโครงสร้างสำหรับท่าเรือจะมีการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรง การใช้วิธีการป้องกันการกัดกร่อนและการบำรุงรักษาโครงสร้างที่ไม่เหมาะสมกับสภาพจะมีโอกาสก่อให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างอย่างร้างแรงได้ เช่น การลดความสามารถในการรองรับน้ำหนักบรรทุกอย่างมากของโครงสร้าง ระหว่างช่วงเวลาที่มีการเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วในญี่ปุ่น ตั้งแต่ช่วงปลายทศวรรษ 1950 จนถึงทศวรรษ 1960 ได้มีการก่อสร้างโครงสร้างท่าเรือเป็นจำนวนมาก เช่นเดียวกันกับโครงสร้างเหล็กอื่น ๆ ในเวลานั้นเทคโนโลยีการป้องกันการกัดกร่อนสำหรับโครงสร้างเหล่านั้นยังมิได้มีการกำหนดให้เหมาะสม ตรงกันข้ามกับการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีในปัจจุบัน ด้วยเหตุนี้ ท่ามกลางโครงสร้างที่ได้มีการก่อสร้างในสมัยนั้น มีโครงสร้างบางแห่งที่มีการเสื่อมสภาพอย่างรุนแรงเนื่องจากการกัดกร่อนแบบ concentrated

รูปภาพที่ 1 แสดงตัวอย่างของการกัดกร่อนแบบ concentrated ที่เกิดขึ้นในเหล็กซึ่งติดตั้งอยู่ใต้น้ำ รูปภาพที่ 2 แสดงตัวอย่างของการกัดกร่อนแบบเป็นหลุม (pitting) ในชั้นเคลือบป้องกันการกัดกร่อน บริเวณโซนที่มีการเปียกน้ำสำหรับเหล็กโครงสร้างภายใต้สภาพที่ใช้งานของตัวอย่างที่ได้แสดงนี้ ถ้ามิได้มีการควบคุมการบำรุงรักษาที่เพียงพอและทันเวลา การเสื่อมสภาพของโครงสร้างจะมีเพิ่มมากขึ้น และมีความเสี่ยงต่อความเสียหายที่จะเกิดกับโครงสร้างในระดับที่รุนแรงได้

รูปภาพที่ 1ตัวอย่างของการกัดกร่อนแบบ concentrated ที่เกิดขึ้นในเหล็กที่ติดตั้งอยู่ใต้น้ำ

รูปภาพที่ 2 แสดงตัวอย่างของการกัดกร่อนแบบเป็นหลุมในชั้นเคลือบป้องกันการกัดกร่อน

พัฒนาการของเทคโนโลยีป้องกันการกัดกร่อนสำหรับโครงสร้างเหล็กของท่าเรือในประเทศญี่ปุ่นสามารถจัดประเภทได้ดังที่แสดงในรูปที่ 1 ตั้งแต่ช่วงปลายทศวรรษที่ 1950 จนถึง 1960 ในช่วงที่มีการก่อสร้างโครงสร้างท่าเรือเป็นจำนวนมาก วิธีป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิคซึ่งอาศัยกำลังไฟฟ้าจากภายนอกได้นำมาใช้กับโครงสร้างที่จม

อยู่ในน้ำ และวิธีการออกแบบที่มีการเผื่อการกัดกร่อนในชิ้นเหล็กในระดับที่ยอมให้ก็นำมาใช้เช่นกันสำหรับโครงสร้างที่อยู่เหนือระดับน้ำทะเลขึ้นลง

รูปที่ 1 พัฒนาการของเทคโนโลยีการป้องกันการกัดกร่อนสำหรับโครงสร้างเหล็กของท่าเรือในประเทศญี่ปุ่น

ในช่วงนั้น เพราะว่าความสำคัญของการบำรุงรักษาโครงสร้างยังไม่เป็นที่ตระหนักกันมากดังเช่นทุกวันนี้ จึงมีกรณีมากมายที่โครงสร้างเหล็กเกิดการเสื่อมสภาพแบบร้ายแรงเนื่องจากเกิดการกัดกร่อนแบบ concentrated และการกัดกร่อนแบบหลุมดังที่ได้แสดงข้างต้น ตัวอย่างทั่วไปสำหรับการเสื่อมสภาพของโครงสร้างอย่างร้ายแรงเกิดขึ้นในปี 1981 เมื่อการกัดกร่อนแบบ concentrated ได้ก่อให้เกิดการโก่งเดาะของเสาเข็มท่อเหล็กและต่อมาทำให้เกิดการพังทลายของโครงสร้างส่วนบนของท่ายามาชิตะในท่าเรือโยโกฮามา

สืบเนื่องจากเหตุการณ์นี้ ความสำคัญของเทคโนโลยีป้องกันการกัดกร่อนจึงเป็นที่ตระหนักถึง และการพัฒนาเทคโนโลยีในด้านนี้จึงได้รับการดูแลเอาใจใส่เพิ่มขึ้น และในขณะเดียวกัน คู่มือการป้องกันการกัดกร่อนและซ่อมแซมสำหรับโครงสร้างเหล็กของท่าเรือ จึงได้รับการจัดทำขึ้น ในปัจจุบัน เนื่องจากผลของอุบัติเหตุเช่นนั้น จึงมีบทบัญญัติสำหรับป้องกันการกัดกร่อนของโครงสร้างเหล็กที่ก่อสร้างขึ้นให้เป็นวิธีมาตรฐานทั่วไปที่ต้องปฏิบัติ และยิ่งไปกว่านั้นยังได้มีการกำหนดการบำรุงรักษาโครงสร้างให้เป็นกฎข้อบังคับอีกด้วย

อย่างไรก็ตาม ยังมีโครงสร้างเหล็กเป็นจำนวนมากที่ออกแบบโดยใช้ข้อกำหนดให้มีการเผื่อการกัดกร่อนที่ยอมให้ที่ยังคงใช้งานอยู่ และการกัดกร่อนในเหล็กโครงสร้างเหล่านี้ยังเกิดขึ้นเนื่องจากมิได้มีการบำรุงรักษาอย่างเพียงพอ ดังนั้นก็ยังมีโอกาสที่โครงสร้างเหล็กเหล่านี้จะเกิดการเสื่อมสภาพอย่างรุนแรง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้างเหล่านี้โดยการอาศัย คู่มือป้องกันการกัดกร่อนและซ่อมแซมนี้

บทความนี้ได้นำเสนอเทคโนโลยีล่าสุดสำหรับการซ่อมแซมและการเสริมกำลังโครงสร้างเหล็กที่เกิดการกัดกร่อนในชิ้นเหล็กไว้แล้ว

การซ่อมแซมและเสริมกำลังโดยใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก

- **วิธีปฏิบัติทั่วไปในการออกแบบ**

การปฏิบัติทั่วไปสำหรับวิธีนี้ก็คือใช้องค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในการซ่อมแซมและเสริมกำลังหน้าตัดโครงสร้างเหล็กที่มีกำลังความสามารถในการรับแรงลดลงเนื่องจากการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นอย่างรุนแรงและทำให้ไม่สามารถรับแรงกระทำในองค์อาคารตามที่ออกแบบไว้ได้ (อ้างอิงกับส่วนเส้นประในรูปที่ 2) ในกรณีนี้ การซ่อมแซมและการเสริมกำลังโครงสร้างจะสามารถหาได้จากสมการที่ (1) ดังนี้

$$\gamma_i S_d / R_d \le 1.0 \quad (1)$$

เมื่อ

S_d: แรงในองค์อาคารที่ออกแบบไว้

R_d: ความสามารถในการรับแรงของหน้าตัดตามที่ออกแบบไว้

γ_i: ค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้าง (ในกรณีที่มีการนำคอนกรีตเสริมเหล็กเข้ามาใช้)

รูปที่ 2 ภาพแสดงการลดลงอย่างมากของความสามารถในการรับแรงบนหน้าตัดเนื่องจากการกัดกร่อน

โดยแท้จริงแล้ว คอนกรีตเสริมเหล็กจะต้องมีการติดตั้งอย่าแน่นหนาโดยการใช้ underwater stud กับส่วนหน้าตัดของเสาเข็มท่อเหล็กหรือเสาเข็มแผ่นพืดเหล็ก ที่เป็นองค์อาคารที่ต้องการจะซ่อมแซมหรือเสริมกำลัง เพื่อที่จะทำให้ผสมผสานการทำงานของทั้งส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กและเสาเข็มเข้าด้วยกัน ซึ่งจะทำให้คอนกรีตเสริมเหล็กส่วนองค์อาคารที่ซ่อมแซมและเสริมกำลังนี้สามารถที่จะรักษากำลังต้านทานของทั้งหน้าตัดไว้ได้

รูปที่ 3 แสดงรูปวาดของวิธีการซ่อมแซมและเสริมกำลังโดยใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก underwater stud ซึ่งจะถูกเชื่อมติดทั้งสองด้านเข้ากับองค์อาคารที่ต้องการจะซ่อมแซมและเสริมกำลัง ที่ซึ่งโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่อยู่ใต้น้ำมีการจัดเรียงเหล็กเสริมกำลังให้ได้ตามที่ต้องการตามสมการ (1) ได้ยึดติดอยู่

กำลังความสามารถในการรับแรงของหน้าตัดที่ได้มีการฟื้นฟูไว้โดยวิธีการนี้ได้แสดงในเส้นประตามรูปที่ 4

- **รูปแบบในการทำงาน**

ในการที่จะทำให้วิธีการซ่อมแซมและเสริมกำลังนี้ลุล่วงไปได้นั้น สิ่งมีชีวิตใต้ทะเลและสนิมที่เกาะติดอยู่กับโครงสร้างจะถูกกำจัดออกโดยการใช้แท่งเหล็กขูด (scraping bar) เครื่องสกัดออก (air chipper) ฯลฯ และนอกจากนี้ ยังมีการจัดเตรียมพื้นผิวสำหรับ stud bolt ที่เชื่อมต่อบริเวณผิวหน้าตัดจนกระทั่งผิวหน้าตัดมีความเหมาะสมสำหรับการเชื่อม (รูปภาพที่ 3)

เพราะว่า underwater stud ถือว่าเป็นองค์อาคารที่สำคัญสำหรับการทำให้เสาเข็มท่อเหล็กหรือเสาเข็มแผ่นพืดเหล็กทำหน้าที่ร่วมกันกับคอนกรีตเสริมเหล็กได้ วิธีการเชื่อม stud ในน้ำทะเลที่จะทำให้รอยเชื่อมใต้ทะเลมีความปลอดภัยจึงได้มีการนำมาใช้ (รูปภาพที่ 4) เพื่อให้แน่ใจถึงการควบคุมคุณภาพของการเชื่อมใต้น้ำของ stud ดังนั้นวิธีการที่นำมาใช้เพื่อเป็นการยืนยันถึงคุณภาพของรอยเชื่อมจึงถูกนำมาใช้โดยการตรวจสอบรูปร่างลักษณะคลื่นการไหลของกระแสไฟระหว่างการเชื่อม

หลังจากนั้น เหล็กเสริมกำลังจะถูกติดตั้งบนเสาเข็มตามความจำเป็น และกรณีที่ต้องมีการติดตั้งเหล็กเสริมกำลังบนเสาเข็มแผ่นพืด วิธีการที่ใช้บ่อย ๆ ก็คือการประกอบเหล็กเสริมกำลังไว้ก่อนบนพื้นดิน

สำหรับคอนกรีตที่นำมาใช้คือประเภทที่ใช้ในน้ำทะเลแบบทั่วไป แต่ในกรณีที่มีข้อกังวลถึงคุณภาพของน้ำทะเลบริเวณนั้นเป็นพิเศษ คอนกรีตที่ใช้ใต้น้ำแบบป้องกันการกัดเซาะ (antiwashout) ที่มีความสามารถในการต้านทานการแยกตัวสูงจะถูกนำมาใช้แทน

รูปภาพที่ 5 แสดงสภาพหลังจากที่มีการถอดแบบ ดังที่เห็นในรูปภาพ งานที่ทำในการซ่อมแซมและเสริมกำลังสามารถกระทำได้โดยมิได้ทำความเสียหายแก่รูปทรงของเสาเข็มท่อเหล็กหรือเสาเข็มแผ่นพืด และยังสอดคล้องกับเมื่อมีการบำรุงรักษาในภายหลัง การตรวจสอบโดยตาเปล่าสามารถกระทำได้โดยวิธีเดียวกันสำหรับเสาเข็มอื่น ๆ

รูปภาพที่ 3 การทำตำแหน่งที่มีการเชื่อม stud และการจัดเตรียมพื้นผิว
รูปภาพที่ 4 การเชื่อม stud ใต้ทะเล
รูปภาพที่ 5 คอนกรีตเสริมเหล็กหลังจากเสร็จสิ้นแล้ว

การซ่อมแซมและเสริมกำลังโดยใช้แผ่นเหล็ก

- **วิธีการปฏิบัติทั่วไปในการออกแบบ**

ในวิธีการนี้ แผ่นเหล็กได้นำมาใช้แทนที่คอนกรีต ซึ่งก็คือแผ่นเหล็กที่มีความหนาดังที่กำหนดได้ถูกนำไปติดกับผิวหน้าตัดของเสาเข็มท่อเหล็กหรือเสาเข็มแผ่นพืดเหล็ก ซึ่งการกัดกร่อนในผิวหน้าตัดทำให้เกิดการลดลงของกำลังที่ต่ำกว่าที่ได้

ออกแบบไว้ แผ่นเหล็กจะถูกยึดติดกับโครงสร้างด้วยการเชื่อมในน้ำกับผิวหน้าตัดที่ปลายทั้งสองด้านของเสาเข็มท่อเหล็กหรือเสาเข็มแผ่นพืดเหล็กที่ต้องการการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนใหม่

สภาพทั่วไปสำหรับหน้าตัดที่มีกำลังต่ำลงและการฟื้นฟูความสามารถของหน้าตัดโดยการใช้แผ่นเหล็กเป็นลักษณะเดียวกันกับคอนกรีตเสริมเหล็ก อย่างไรก็ตามสิ่งที่สำคัญของวิธีการใช้แผ่นเหล็กก็คือ ความหนาของแผ่นเหล็กที่ใช้น้อยกว่าความหนาแผ่นคอนกรีต ความเค้นที่เกิดขึ้นในเสาเข็มเหล็กหลังจากการซ่อมแซมและการเสริมกำลังจึงมีขนาดเป็นเช่นเดียวกันกับความเค้นที่เกิดก่อนการซ่อมแซมและการเสริมกำลัง ดังนั้นผลกระทบกับโครงสร้างเสาเข็มนี้จึงมีน้อยกว่าในแง่การซ่อมแซมและเสริมกำลัง

- **รูปแบบในการทำงาน**

หลังจากใช้เครื่องสกัดออก (air chipper) ฯลฯ เพื่อที่จะขจัดสิ่งมีชีวิตและสนิมที่ติดอยู่กับชิ้นเหล็กออก แผ่นเหล็กแบบประกอบเสร็จที่ใช้สำหรับการซ่อมแซมและการเสริมกำลัง จะถูกติดตั้งในตำแหน่งที่กำหนดเอาไว้ แผ่นเหล็กเสริมกำลังที่จะติดตั้งกับเสาเข็มท่อเหล็กนี้มักจะมีการประกอบเป็นชิ้นส่วน 2 ชิ้นไว้ก่อน (รูปภาพที่ 6)

หลังจากนั้น แผ่นเหล็กที่มีการจัดเตรียมประกอบไว้ก่อนจะนำมายึดติดกับเสาเข็มท่อเหล็กหรือเสาเข็มแผ่นพืดเหล็กโดยวิธีการเชื่อมใต้น้ำ (รูปภาพที่ 7) ในการเชื่อมรอยต่อนั้นเนื่องจากคุณภาพของรอยเชื่อมขึ้นอยู่กับความสามารถของช่างเชื่อมและสภาพทางทะเล (hydrographic condition) จึงจำเป็นที่จะต้องให้มีความยาวของรอยเชื่อมที่มากพอและปลอดภัย เพราะเหตุนี้ ค่าความเค้นคราก(yield stress)ของรอยเชื่อมใต้น้ำได้ตั้งไว้ที่ 70 % ของค่าที่จะได้จากการเชื่อมในโรงงานที่ใช้วิธีการเชื่อมแบบเดียวกัน อย่างไรก็ตามในกรณีที่สภาพแวดล้อมค่อนข้างยากลำบากเช่นมีคลื่นทะเลหรือเมื่อเสาเข็มท่อเหล็กหรือเสาเข็มแผ่นพืดเหล็กอยู่ในภาวะความเค้นที่มีค่าซ้ำๆไปมา(repeated stress) ค่าที่ใช้ 70 % ในบางครั้งก็ไม่เพียงพอ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องให้ความสนใจกับขั้นตอนการเชื่อมด้วย

ในขณะเดียวกัน วิธีการดังกล่าวถูกกำหนดไว้ในวิธีป้องกันการกัดกร่อน จึงจำเป็นที่ต้องทำการป้องกันการกัดกร่อนแบบแคโทดิคให้กับเสาเข็มเหล็กที่อยู่ในน้ำ และแบบเคลือบป้องกันการกัดกร่อนกับเสาเข็มเหล็กที่ติดตั้งอยู่ในโซนที่น้ำทะเลขึ้นลงและโซนสัมผัสอากาศ โดยให้อ้างอิงถึงคู่มือการป้องกันการกัดกร่อนและซ่อมแซม

รูปภาพที่ 6 การติดตั้งแผ่นเหล็กสำหรับการซ่อมแซมและเสริมกำลังโครงสร้าง

รูปภาพที่ 7 การซ่อมแซม/เสริมกำลังแผ่นเหล็กและเสาเข็มเหล็ก

คู่มือการป้องกันการกัดกร่อนและการซ่อมแซมโครงสร้างสำหรับโครงสร้างท่าเรือ

ในปัจจุบัน ยังมีเสาเข็มท่อเหล็กและเสาเข็มแผ่นพืดเหล็กเป็นจำนวนมากที่ยังใช้งานอยู่ ซึ่งต้องการการซ่อมแซมและการเสริมกำลัง อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงสภาพเศรษฐกิจที่ฝืดเคืองในช่วงนี้ จึงเป็นการยากที่จะสามารถทำการซ่อมแซมและเสริมกำลังให้กับเสาเข็มเหล่านี้ในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ

เพราะเหตุนี้ คู่มือสำหรับการป้องกันการกัดกร่อนและการซ่อมแซมสำหรับโครงสร้างเหล็กท่าเรือ (2009) ที่ได้ตีพิมพ์ในเดือนพฤศจิกายน 2009 มิได้ให้ความสำคัญแค่ในการบำรุงรักษาโครงสร้างเหล็กท่าเรือเท่านั้น แต่ยังให้ข้อมูลเกี่ยวกับวิธีการที่เหมาะสมและเป็นไปได้สำหรับการบำรุงรักษา ซึ่งคู่มือได้มีการแนะนำในส่วนการซ่อมแซมและการบำรุงรักษาตามเงื่อนไขของราคาตามระยะเวลาใช้งานโครงสร้างเหล็กซึ่งไม่ได้มีการบำรุงรักษาอย่างเพียงพอ ซึ่งน่าจะทำให้เกิดความปลอดภัยสำหรับโครงสร้าง

สาธารณูปโภค เราหวังว่าบทความนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงระบบการบำรุงรักษาโครงสร้างได้

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดเตรียมบทความนี้ ได้อ้างอิงข้อมูลจากคู่มือป้องกันการกัดกร่อนและการซ่อมแซมโครงสร้างเหล็กท่าเรือ (2009) ซึ่งเป็นผลจากความร่วมมือโดยกลุ่มวิจัยสำหรับวิธีการป้องกันการกัดกร่อนและซ่อมแซมโครงสร้างเหล็กในน้ำทะเลและสถาบันเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาชายฝั่ง และคู่มือสำหรับการป้องกันการกัดกร่อนและการบำรุงรักษา (ซึ่งจะตีพิมพ์ในช่วงฤดูใบไม้ร่วง ปี 2011 โดยกลุ่มวิจัยสำหรับวิธีการป้องกันการกัดกร่อนและการซ่อมแซมสำหรับโครงสร้างเหล็กในน้ำทะเล) เราขอแสดงความขอบคุณอย่างสูงสำหรับทุกๆท่านในองค์กรเหล่านี้สำหรับความอนุเคราะห์และความร่วมมือเป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

1 Masami Abe: “Development of Corrosion-protection Technologies for Port/Harbor Steel Structure,” Materials and the Environment, No. 60, pp. 3-8, 2011
2 Coastal Development Institute of Technology: Corrosion-protection and Repair Manual for Port/Harbor Steel Structures (2009), Nov. 2009
3 Research Group on Corrosion Protection and Repair Methods for Marine Steel Structures: Handbook on Practical Diagnosis, Corrosion-protection and Maintenance for Port/Harbor Steel Structures

■ ■ ■ ■ ■

(หน้า10-13)

สะพานนาทธาน (Nhat Tan Bridge)ในประเทศเวียตนาม

– การออกแบบสะพานและการก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน

(ฮิโรกิ อิเคดะ , ชิเกโยชิ เอนโดะ , ทสุกาสะ อะคิบะและฮารุกาสุ โอฮาชิ บริษัท วิศวกรที่ปรึกษานิปปอน จำกัด)

ลักษณะของโครงการ

โครงการสะพานนาทธานเป็นโครงการก่อสร้างทางไฮเวย์ที่มีความยาว 8.5 กิโลเมตรเพื่อข้ามแม่น้ำแดงและเชื่อมต่อทิศใต้ไปยังทิศเหนือในเมืองฮานอย เมืองหลวงของประเทศเวียตนาม โครงการนี้ถือเป็นการฉลองครบรอบ 1,000 ปี (เดือนตุลาคม 2010) ที่ฮานอยเป็นเมืองหลวงของประเทศ สะพานใหม่นี้เป็นลักษณะโครงสร้างสะพานขึงสายเคเบิล (cable-stayed structure) โดยมีหอสะพานหลัก (main tower) จำนวน 5 หอ และถูกสร้างขึ้นเป็นตัวแทนสัญลักษณ์แห่งมิตรภาพระหว่างประเทศเวียตนามและญี่ปุ่น

ในด้านการออกแบบและการควบคุมโครงการได้มีการร่วมมือกันระหว่างบริษัทโชได จำกัด และบริษัทวิศวกรที่ปรึกษานิปปอน จำกัด งานก่อสร้างตามในส่วนที่ 1 ซึ่งเป็นการก่อสร้างสะพานช่วงหลัก รับผิดชอบโดยบริษัทร่วมค้าระหว่าง บริษัทไอเอชไอและบริษัทซูมิโตโม มิตซุย จำกัดโดยได้รับการสนับสนุนทางด้านการเงินโดย STEP (special term for economic partnership) ซึ่งเป็น ODA loan แบบพิเศษของรัฐบาล งานก่อสร้างได้เริ่มขึ้นเมื่อ ตุลาคม 2009

รายละเอียดที่แสดงนี้คือรายละเอียดส่วนใหญ่ของการออกแบบและการก่อสร้างของฐานรากบ่อที่ใช้เสาเข็มพืดแบบท่อเหล็กมาใช้เป็นฐานรากของส่วนหอสะพานหลัก

แบบแปลนและการออกแบบสะพานนาธทาน

- **รูปแบบของสะพาน**
- เจ้าของงาน : กระทรวงการขนส่งของประเทศเวียตนาม ทีมบริหารโครงการที่ 85
- ความยาวสะพาน: 1,500 เมตร
- ความยาวช่วงสะพาน: 150 เมตร + 4 x 300 เมตร + 150 เมตร
- ชนิดโครงสร้าง

  โครงสร้างส่วนบน : สะพานขึงสายเคเบิล คานประกอบรูปตัวไอ แบบต่อเนื่อง 6 ช่วง

  พื้น : พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป

  หอสะพานหลัก : หอสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กรูปตัว A

  ฐานราก : ฐานรากบ่อเสาเข็มพืดแบบท่อ (อ้างอิงกับรูปที่ 1 – 2)

รูปที่ 1 รูปตัดของโครงสร้างส่วนบน

รูปที่ 2 รูปของหอสะพานหลักที่ P12

- **การคัดเลือกชนิดของสะพาน**

แม่น้ำแดงไหลจากทิศตะวันตกไปยังทิศตะวันออก และในบริเวณสถานที่ก่อสร้างสะพานมีการไหลแยกออกเป็นทางน้ำ 2 ทาง ซึ่งไหลขนานกันรอบ ๆ สันทราย จากข้อมูลทางประวัติศาสตร์ ท้องแม่น้ำมีการเปลี่ยนไปตามกาลเวลา รวมทั้งตำแหน่งของทางแม่น้ำไหลและสันทราย เพราะเหตุนี้การเคลื่อนตัวของตำแหน่งทางน้ำไหลและสันทรายในอนาคตจึงควรนำมาพิจารณาเพื่อการจัดวางแปลนสะพานขึงสายเคเบิลที่มีช่วงต่อเนื่อง 6 ช่วงและช่วงคานที่มีความยาวเท่ากัน (รูปที่ 3, 4)

รูปที่ 3 รูปด้านของสะพานตลอดความยาว

รูปที่ 4 รูป 3 มิติของสะพานนาธทานภายหลังจากเสร็จสิ้น (ภาพสร้างจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์)

- **มาตรฐานที่นำมาใช้**

การออกแบบสะพานสอดคล้องกับข้อกำหนดสำหรับการออกแบบสะพาน 22TCN-272-05 ของประเทศเวียตนาม ซึ่งมีที่มาจากมาตรฐาน AASHTO-LRFD ของสหรัฐอเมริกา นอกจากนี้ รายการอื่น ๆ เช่นฐานรากบ่อเสาเข็มพืดแบบท่อเหล็กและฐานรากส่วนรับแรงแบกทานที่แยกออก ซึ่งไม่ได้มีการอธิบายไว้ในข้อกำหนด ให้ใช้ตามข้อกำหนดในการออกแบบตามมาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น

- **วัสดุโครงสร้างที่สำคัญ**

วัสดุโครงสร้างที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

- ผลิตภัณฑ์เหล็กโครงสร้าง:SS400, SM400, SM490, SM490Y, SM520, SM570
- สายเคเบิล : สายเคเบิลประกอบไปด้วยกลุ่มของเส้นลวดเหล็กชุบกันสนิมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 มิลลิเมตร (กำลังรับแรงดึง 1,770 เมกกะปาสคาล)
- เสาเข็มพืดแบบท่อเหล็ก: SKY400, SKY490
- กำลังคอนกรีตตามมาตรฐานการออกแบบ:

  40 เมกกะปาสคาล (หอคอยหลัก, พื้น) 30 เมกกะปาสคาล (ส่วนปลายสะพาน เสาเข็มหล่อกับที่) 25 เมกกะปาสคาล (ส่วนบนของพื้นในฐานรากเสาเข็มเหล็ก)

- เหล็กเสริมกำลังคอนกรีต: SD390
- ลวดอัดแรง: SWPR7BL

- **ถนน**

ถนนวัดจากศูนย์กลางออกไป: เลนสำหรับรถยนต์จำนวน 2 เลน (กว้าง 3.75 เมตร) เลนรถบัส (กว้าง 3.75 เมตร) เลนที่ใช้ร่วมกันสำหรับมอเตอร์ไซค์และจักรยาน (กว้าง 3.3 เมตร) และทางเดิน (0.75 เมตร) ตามริมทางด้านนอก

- **โครงสร้างส่วนบน**

โครงสร้างส่วนบนเป็นโครงสร้างที่ต่อเนื่องมีความยาวทั้งสิ้น 1,500 เมตร โครงสร้างหลักประกอบไปด้วยคานตัวไอหลักจำนวน 2 ตัวอยู่ในตำแหน่งตามส่วนปลายแต่ละข้างของทางเดินรถที่ซึ่งคานขวางเพื่อรองรับพื้นได้ตั้งอยู่ทุก ๆ ช่วง 4 เมตร สายเคเบิลได้ยึดปลายไว้กับหน้าตัดด้านนอกของแผ่นเอวของคานหลัก คานหลักและคานขวางประกอบกันเป็นโครงสร้างแบบประกอบที่ซึ่งแผ่นพื้นสำเร็จได้เชื่อมต่อกันโดยใช้เหล็กเดือย Fairing ซึ่งถูกติดตั้งที่ส่วนปลายนอกสุดของแผ่นพื้นเพื่อป้องกันการสั่นจากแรงลม

สายเคเบิลประกอบไปด้วยเส้นลวดที่วางขนานกัน อยู่ในรูปแบบพัด และคานถูกขึงอยู่ในลักษณะ 2 ระนาบจากหอสะพานหลัก

- **หอสะพานหลัก**

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กของหอสะพานหลักเป็นโครงสร้างรูปตัว A เพื่อที่จะให้ได้ความแข็งตั้งฉากกับแกนของสะพาน ภายใต้ระดับคานขวางซึ่งรองรับโครงสร้างส่วนบน เสารองรับสำหรับแต่ละหอคอยงุ้มเข้ามาแคบลง ซึ่งเป็นการลดช่องว่างระหว่างเสาเพื่อที่จะลดขนาดของฐานราก

เพราะว่าแรงดึงในแนวแกนกระทำกับคานขวางโครงสร้างคอนกรีตอัดแรงจึงถูกนำมาใช้ โดยกล่องฝังสมอที่ใช้แผ่นเหล็กฝังไว้นั้นจะอยู่ใกล้กับส่วนบนสุดของหอสะพานและสายเคเบิลได้ฝังติดอยู่กับที่รองรับภายในกล่อง

- **ฐานรากบ่อเสาเข็มท่อเหล็ก**

เพื่อเป้าหมายในการปรับปรุงคุณภาพของการก่อสร้างของเสาเข็มแบบหล่อกับที่ ซึ่งพบอาจปัญหาในการใช้งานในบางกรณี ดังนั้นฐานรากบ่อแบบเสาเข็มท่อได้นำมาใช้เป็นครั้งแรกในเวียตนาม และเนื่องจากเสาเข็มประเภทนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาในญี่ปุ่น ข้อกำหนดของญี่ปุ่น 2 อย่างจึงได้นำมาใช้สำหรับการออกแบบและการก่อสร้าง – ข้อกำหนดสำหรับสะพานไฮเวย์ IV (/2002) และ คู่มือการออกแบบและก่อสร้างสำหรับฐานรากเสาเข็มท่อ (1997)

ความลึกที่ขุดและนำมาใช้ในการออกแบบได้มีการประมาณ อย่างมากที่สุด ให้มีความลึก 15 เมตรจากพื้นท้องแม่น้ำ วิธีการตอกเสาเข็มได้มีการพิจารณาโดยมีเป้าหมายเพื่อให้ได้กำลังแบกทานที่ต้องการ เสาเข็มได้ถูกตอกลงในชั้นรับแรงแบกทาน (ซึ่งเป็นชั้นหินกรวดที่มีค่า N มากกว่า 50) ไปยังความลึกมากกว่า 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม ผิวหน้าส่วนบนของพื้นด้านบนได้ถูกวางไว้ที่ความสูงเท่ากับ -3 เมตร โดยพิจารณาการเปลี่ยนระดับของท้องพื้นทะเลแล้ว

เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มที่นำมาใช้คือ 1,200 มิลลิเมตรและความหนาของผนังเสาเข็มคือ 16 – 21 มิลลิเมตร ฐานรากบ่อเป็นรูปไข่มีขนาดมิติ 48.7 x 16.9 เมตร ความยาวที่สุดของฐานรากบ่อเสาเข็มพืดรวมทั้งเขื่อนกั้นบ่อชั่วคราวคือ 50 เมตร จำนวนของเสาเข็มท่อที่ใช้รวมทั้งส่วน bulkhead และเสาเข็มภายในมีจำนวน 632 ต้น ซึ่งวิธี reinforcing bar stud ได้นำมาใช้สำหรับการเชื่อมต่อพื้นส่วนบน (อ้างอิงกับรูปที่ 5)

รูปที่ 5 ไดอะแกรมแสดงฐานรากที่ P13

ความคืบหน้าของการก่อสร้าง

เมื่อสิ้นเดือนพฤษภาคม ปี2011 การก่อสร้างฐานรากของหอคอยหลัก ได้ก่อสร้างอยู่ที่ตำแหน่ง P13 – P15 และการตอกเสาเข็มท่อได้เสร็จสมบูรณ์แล้ว ส่วนการขุดดินใต้น้ำทะเล การติดตั้งพื้นที่ระดับล่างและพื้นส่วนบน ฯลฯ กำลังอยู่ระหว่างการก่อสร้าง อยู่ที่ตำแหน่ง P12 และ P16 (รูปภาพที่ 1,2)

รูปภาพที่ 1 รูปภาพแสดงสถานที่ก่อสร้างทั้งหมด

รูปภาพที่ 2 การก่อสร้างบนฝั่งที่สันทราย

- **พื้นที่ว่างจัดเตรียมการก่อสร้างและเครื่องมือการก่อสร้าง**

สันทรายในแม่น้ำแดงที่ซึ่งฐาน P14 กำลังอยู่ในระหว่างก่อสร้างเพื่อใช้เป็นลานเก็บวัสดุ เป็นพื้นที่ทำการผูกเหล็กและพื้นที่สำหรับอพยพฉุกเฉิน ที่ตำแหน่ง P12 P13 และ P15 ซึ่งมีตำแหน่งอยู่ในแม่น้ำ การก่อสร้างใต้น้ำกระทำได้โดยใช้เรือยกเครน เรือขนวัสดุและเรือขนของอื่น ๆ (รูปภาพที่ 3)

รูปภาพที่ 3 เรือบรรทุกวัสดุสำหรับการก่อสร้างใต้น้ำ

- **การตอกเสาเข็มท่อเหล็ก**

เพื่อที่จะก่อสร้างฐานรากขนาดใหญ่และเพื่อที่จะตอกเสาเข็มที่มีความลึกสูงสุด 50 เมตรนั้น สิ่งสำคัญที่จะต้องมีคือการตอกเข็มตามแนวดิ่งได้อย่างถูกต้อง ซึ่งในสถานที่ก่อสร้างนั้น เสาเข็มท่อได้ถูกตอกลงโดยใช้ตุ้มไฮโดรลิคแบบสั่นร่วมกันกับ วิธีการแบบ water jet method ซึ่งวิธีการตอกแบบนี้ได้นำมาใช้กับการตอกเสาเข็มที่มีความลึกจนถึง 6D (D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม) เหนือระดับปลายเข็ม ในขณะที่การตอกเข็มช่วงสุดท้ายเข้าไปในชั้นวางปลายเข็มใช้ตุ้มดีเซล (อ้างอิงกับรูปภาพที่ 4 และ 5)

เสาเข็มทดสอบจะถูกตอกลงไปสำหรับแต่ละฐานราก และกำลังรับน้ำหนักจะมีการตรวจสอบโดยใช้วิธีการ PDA (การวิเคราะห์การตอกเข็ม)

รูปภาพที่ 4 หัวฉีดน้ำ

รูปภาพที่ 5 การตอกเข็มท่อเหล็กช่วงสุดท้ายโดยใช้ตุ้มดีเซล

- **เขื่อนกั้นลำน้ำชั่วคราว**

ในขั้นตอนการออกแบบนั้น ข้อมูลระดับน้ำที่มีอยู่สำหรับแม่น้ำแดง(Red River) ได้ถูกนำมาใช้อ้างอิงเพื่อปรับตั้งระดับน้ำทะเลในช่วงเวลาการก่อสร้างไว้ที่ +9.5 เมตร ยกเว้นช่วงเวลา 2 เดือนในฤดูร้อนซึ่งน้ำขึ้นถึงระดับสูงสุด เพราะว่าค่าที่แตกต่างกันมากของระดับน้ำนี้ จะมีการวัดค่าหลายวิธีเพื่อที่จะลดระดับความเค้นที่สะสม (residual stress) ในเสาเข็มตอก สิ่งนี้รวมไปถึงการศึกษาและการปรับปรุงสำหรับ multi-step timbering กฎเกณฑ์สำหรับการกำหนดระดับน้ำและการจัดเตรียมช่วงเวลาการวางพื้นชั้นล่างและเครื่องมืออื่น ๆ

ระหว่างงานก่อสร้างที่แท้จริง ระดับน้ำทะเลได้เพิ่มสูงขึ้นประมาณ 7 เมตรเนื่องจากความแห้งแล้งในปี 2010 เพราะเหตุนี้งานก่อสร้างได้มีความต่อเนื่องโดยไม่มีการล่าช้าถึงแม้จะอยู่ระหว่างฤดูร้อน ยิ่งไปกว่านั้น มันก็เป็นไปได้ที่จะลดความสูงของเขื่อนกั้นลำน่ำ 1 เมตรต่ำกว่าระดับที่มีการออกแบบ

- **การขุดดินที่อยู่ใต้น้ำ**

วิธีที่นำมาใช้เพื่อทำการขุดดินที่อยู่ใต้ระดับน้ำออกสำหรับดินอยู่ภายในบ่อที่ล้อมรอบด้วยเสาเข็มพืดแบบท่อเหล็กนั้น ได้ใช้ปั๊มเพื่อที่จะดูดทั้งน้ำและทรายที่ระดับท้องแม่น้ำออกมา (รูปภาพที่ 6 และ 7)

รูปภาพที่ 6 ด้านในของฐานรากบ่อ

รูปภาพที่ 7 รูระบายน้ำสำหรับปั๊มน้ำออกจากบ่อที่มีการขุด

- **ขั้นตอนการทำงานต่อมา**

หลังจากขุดดินออก จะเป็นขั้นตอนของการทำการเทคอนกรีตใต้น้ำของโครงสร้างพื้นด้านล่าง การเชื่อมหัว stud การจัดวางเหล็กเสริมคอนกรีต และการเทคอนกรีตของโครงสร้างพื้นส่วนบน ตามลำดับ หลังจากนี้ จะเป็นการก่อสร้างส่วนของหอสะพานหลัก ขั้นตอนการทำงานที่ต่อเนื่องนี้จะมีการนำเสนอในโอกาสต่อไป (อ้างอิงกับรูปภาพที่ 8)

รูปภาพที่ 8 โครงสร้างที่มีการตรวจสอบการติดตั้งเหล็กเสริมกำลังสำหรับส่วนหน้าตัดหอสะพานหลักด้านล่าง

ความคาดหวังอย่างสูงสำหรับเทคโนโลยีของญี่ปุ่น

ในช่วงเวลา 2 ปีครึ่งนับจากนี้ เป็นที่คาดหวังว่าเราจะสามารถสังเกตได้ถึงงานก่อสร้างที่มีความต่อเนื่อง ความเที่ยงตรงในการทำงาน ดังเช่นงานก่อสร้างของหอสะพานหลัก การติดตั้งของกล่องสลักสมอที่ส่วนบนสุดของหอคอย และงานประกอบติดตั้งส่วนยื่นออกของคานหลัก เราได้ทำการคาดหวังว่า ภายใต้การนำความสามารถทางเทคโนโลยีของญี่ปุ่นมาใช้ สะพานนาธทานจะสามารถก่อสร้างเสร็จสมบูรณ์อย่างปลอดภัยและเปิดใช้สำหรับการจราจร นอกจากนี้ยังคาดหวังว่าสะพานจะส่งผลให้เกิดการพัฒนาและเจริญเติบโตแก่เศรษฐกิจของประเทศเวียตนาม

กิตติกรรมประกาศ

เราขอแสดงความขอบคุณ คุณยามาจิ ผู้จัดการโครงการ และคุณมิมูระ ผู้จัดการส่วนออกแบบ ที่สำนักงานสถานที่ก่อสร้างสะพานนาธทานของบริษัทซูมิโตโม มิตซุย จำกัด สำหรับความอนุเคราะห์ระหว่างการเข้าเยี่ยมชมงานก่อสร้างฐานรากเสาเข็มเหล็กท่อ ที่สถานที่ก่อสร้าง

■ ■ ■ ■ ■

(หน้า 14-18)

สะพานโตเกียวเกท

-การออกแบบและการก่อสร้างฐานรากเสาเข็มพืดแบบท่อเหล็ก-

โดย ดร. โอซามุ คิโยมิยะ

ศาตราจารย์แห่งมหาวิทยาลัย วาเซดะ

ข้อมูลโครงการ

ณ ท่าเรือโตเกียว โครงการก่อสร้างได้เริ่มขึ้นในส่วนของไฮเวย์เลียบชายฝั่งของท่าเรือโตเกียวที่ยาว 8 กิโลเมตร เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการส่งสินค้าระหว่างท่าเรือโตเกียวและเมืองอื่น ๆ ตามชายฝั่ง สะพานโตเกียวเกทซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของไฮเวย์นี้ เป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ซึ่งประกอบไปด้วยสะพานหลัก (ลักษณะต่อเนื่องแบบ 3 ช่วง โดยเป็นสะพานประกอบเหล็ก-คอนกรีตแบบกล่องโครงถัก) ซึ่งมีช่วงครอบคลุมท่าเดินเรือหมายเลข 3 ของท่าเรือโตเกียวรวมถึงสะพานทางเข้าจากทะเลไปยังชายฝั่ง 2 สะพาน (สะพานแบบพื้น-คานรูปกล่องต่อเนื่องหลายช่วง) ที่ด้านปลายทั้งสองของสะพานหลัก สะพานมีความยาวช่วงทั้งสิ้น 2.9 กิโลเมตรและมีกำหนดการแล้วเสร็จในปี 2011

เพราะว่าพื้นที่ก่อสร้างของสะพานโตเกียวเกทอยู่ในชั้นที่เป็นโคลนดินเหนียว (ค่า N = 0) ซึ่งมีความหนามากกว่า 30 เมตร ฐานรากของสะพานได้วางอยู่บนชั้นดินที่รับแรงแบกทานที่เป็นทรายและดินกรวดที่อยู่ในตำแหน่งที่ลึกที่สุดของ stratum หมายเลข 7 และเนื่องจากฐานรากได้ถูกกำหนดระดับอยู่ที่อย่างน้อย 65 เมตร ใต้ระดับโคลนทะเล จึงถือว่าได้เป็นโครงสร้างที่อยู่ระดับลึก (great-depth structure)

และเนื่องจากฐานรากจำเป็นที่จะต้องมีความสามารถรองรับการเคลื่อนตัวเนื่องจากแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวได้ สำหรับค่าการสั่นไหวที่คาดไว้ระหว่า 534.7 Gal และ -434.2 Gal รวมถึงความต้องการให้โครงสร้างมีความประหยัด ฐานรากเขื่อนเสาเข็มพืดแบบท่อเหล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 1,500 มิลลิเมตร แผ่นเหล็กลาย (checkered plate) + รอยต่อโครงสร้างแบบล็อคติดกันแบบที่ใช้ปูนทรายกำลังสูง) จึงถูกนำมาใช้

ในบทความนี้ จะกล่าวถึงการใช้งาน ฐานรากบ่อเสาเข็มพืดแบบท่อเหล็กซึ่งในโครงการก่อสร้างสะพานโตเกียวเกทน รวมถึงจะได้มีการศึกษาและหารือถึงวิธีการก่อสร้างต่อไป

สิ่งที่ควรจะมีการกล่าวถึงเกี่ยวกับการก่อสร้างสะพานโตเกียวเกท 2 ข้อ ข้อที่หนึ่งก็คือสะพานที่คร่อมทางวิ่ง fairway หมายเลข 3 ของท่าเรือโตเกียว (ความกว้างของช่วงประมาณ 310 เมตร; ระยะเคลียร์ใต้ระดับคาน: A.P. 54.6 เมตร) และอีกข้อหนึ่งก็คืองานก่อสร้างจะต้องทำภายใต้อุปสรรคที่เกิดเนื่องจากพื้นที่ที่จำกัดรอบ ๆ ท่าอากาศยานระหว่างประเทศของโตเกียว (A.P. +98.1 เมตร) ดังนั้นเพื่อที่จะให้สามารถทำตามข้อจำกัดเหล่านี้ทั้งในช่วงการออกแบบและการก่อสร้างและเพื่อที่จะก่อสร้างสะพานที่ทั้งปลอดภัยและมีคุณภาพสูงโดยการใช้แนวความคิดที่เป็นหลักเหตุผลทั้งทางด้านโครงสร้างและความคุ้มค่าทางการลงทุน จึงเป็นสิ่งจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีสำหรับโครงสร้างสะพานล่าสุด: พื้นเหล็กแบบตงขนาดใหญ่ และรอยเชื่อมโครงถักที่ไม่มีการใช้แผ่นเหล็กดาม BHS (เหล็ก high-performance สำหรับสะพาน) รวมถึงการใช้ที่รองรับแบบแยกฐานราก (base isolation) ขนาดใหญ่ ฯลฯ

การออกแบบสำหรับฐานรากบ่อโดยใช้ท่อเหล็กใช้ตามมาตรฐาน ข้อกำหนดสำหรับสะพานไฮเวย์ (สมาคมทางหลวงญี่ปุ่น) และการออกแบบและก่อสร้างเสาเข็มท่อเหล็ก (สมาคมเสาเข็มท่อเหล็กของญี่ปุ่น) ซึ่งข้อกำหนดทั้งสองนี้กำหนดให้ฐานรากต้องมีความสามารถในการรองรับแรงแบกทานและการพลิกคว่ำของโครงสร้าง และในระดับการสั่นสะเทือนเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวระดับ 1 โดยวัสดุโครงสร้างยังอยู่ในระดับความเค้นที่ยอมให้ (allowable stress) และการเคลื่อนตัวในแนวขวางมีค่าต่ำกว่า 50 มิลลิเมตร สำหรับสำหรับแรงแผ่นดินไหวในระดับ 2 วัสดุโครงสร้างอยู่ภายในค่ากำลังครากและการครากของดินรองรับฐานรากอยู่ในอัตราไม่เกิน 40 %

โครงสร้างฐานราก

โครงสร้างส่วนใต้ดินของสะพานโตเกียวเกท (ความยาวทั้งสิ้น 2.9 กิโลเมตร) ประกอบไปด้วยฐาน abutment 2 ฐาน และฐานตอม่อ (pier) จำนวน 21 ฐาน (รูปที่ 1) ซึ่งมีตอม่อจำนวน 9 ฐานที่มีตำแหน่งอยู่กลางทะเล (ส่วนยื่นออกไปประมาณ 1.6 กิโลเมตร) สำหรับตอม่อที่อยู่นอกชายฝั่งนั้นตอม่อหลัก (MP2, 3) เป็นชนิดกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก (รูปภาพที่ 1) ส่วนตอม่อที่อยู่ด้านข้างช่วงคาน (side-span) (MP1, 4) เป็นแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีช่องกลวง (RC-hollow type)

รูปที่ 1 รูปวาดของสะพานโตเกียวเกท

รูปภาพที่ 1 การตอกเสาเข็มท่อเหล็กที่ตำแหน่ง MP2

ชั้นของโคลนดินเหนียวอ่อนดังที่แสดงในรูปที่ 2 (ชั้น AC2, ค่า N = 0) ได้ทับถมอย่างแน่นหนาเหนือชั้นดินฐานในบริเวณที่มีการก่อสร้างฐานรากบ่อแบบท่อเหล็ก ชั้นดินที่ทำ

หน้าที่รับน้ำหนักแบบทานของสะพานตอม่อเหล่านี้จะอยู่ที่ระดับลึก: ชั้นหินกรวด (Dg1) สำหรับตอม่อ CP9-MP2 อยู่ในตำแหน่งที่ A.P.-75 เมตรหรือมากกว่า และชั้นทราย (Ds2) สำหรับตอม่อ MP3-WP6 ที่ระดับA.P.-50 เมตรหรือมากกว่า ชั้นหินกรวด ที่ระดับ A.P.-75.5 เมตร ซึ่งส่วนมากจะทำหน้าที่เป็นชั้นที่รับแรงแบกทานของตอม่อ CP9-MP2 และชั้นทรายในบริเวณของ A.P. -54 เมตร – -50.5 เมตร ซึ่งตื้นกว่าอีกจุดหนึ่ง ทำหน้าที่เป็นชั้นที่รับแรงแบกทานของตอม่อ MP3 – WP6

รูปภาพที่ 2 แสดงการตอกเข็มท่อเหล็ก โดยเสาเข็มแต่ละต้นได้ถูกตอกลงไปที่ระดับรับแรงแบกทานโดยการใช้ตุ้มแบบสั่น (vibratory hammer) และ ตุ้มไฮดรอลิค (hydraulic hammer) ตุ้มเหล็กที่ใช้คือ IHC-S280 และ IHC-S200 ความยาวที่ต้องการฝังลงไปในชั้นรับแรงแบกทานตามที่วางแผนไว้คือ 3.0D – 3.2D เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของเสาเข็มเหล็กท่อคือ 1,500 มิลลิเมตร และความหนากำแพงของส่วนปลายเข็มเท่ากับ 17 มิลลิเมตร รูปภาพที่ 3 แสดงการก่อสร้างฐานรากบ่อเสาเข็มพืดแบบท่อเหล็ก

รูปที่ 2 โครงสร้างฐานรากและคุณสมบัติของดิน

รูปภาพที่ 2 การตอกเสาเข็มท่อเหล็ก

รูปภาพที่ 3 การก่อสร้างฐานรากบ่อเสาเข็มพืดแบบท่อเหล็ก

การทดสอบการรับน้ำหนักสำหรับแรงแบกทานในแนวดิ่ง

ในการนำเสาเข็มพืดแบบท่อ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 1,500 มิลลิเมตร) เข้ามาใช้ในการก่อสร้างสะพานโตเกียวเกท ได้มีการทำการทดสอบการรับน้ำหนักที่หน่วยงานก่อสร้างในปี 2003 ก่อนที่จะมีการเริ่มการก่อสร้างสะพานนี้ จุดมุ่งหมายของการทดสอบก็เพื่อศึกษาการทำงานกลไกการรับแรงน้ำหนักของเสาเข็มพืดแบบท่อเหล็กที่เคยมีปัญหาในลักษณะงานประเภทเดียวกันที่อ่าวโตเกียว และเพื่อที่จะสามารถออกแบบและบริหารการก่อสร้างของฐานรากได้อย่างสมเหตุสมผล

ได้มีการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุก 3 ประเภทในโครงการนี้: การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกแบบพลศาสตร์ (DLT) การทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกแบบสถิต (SLT) (horizontal and pressing-in) และการทดสอบการรับน้ำหนักแบบระยะสั้น (rapid loading test, STN) ซึ่งนำไปสู่ผลการสรุปดังนี้:

- กำลังต้านทานการรับน้ำหนักของเสาเข็มที่ปลายโดยวิธีการวิเคราะห์คลื่นสะท้อน (wave matching analysis) จากการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกแบบพลศาสตร์
- กำลังต้านทานแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มจากการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกแบบสถิต
- อัตราส่วน set-up (อัตราส่วนของกำลังต้านทานแบบสถิตที่ปลายเข็มระหว่างช่วงการทำงานและกำลังต้านทานหลังจาก ground recovery) ของกำลังต้านทานที่ปลายเข็มจากผลการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกแบบพลศาสตร์และแบบสถิต
- ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มและค่า N จากการทดสอบกำลังต้านทานแบบระยะสั้น

(อ้างอิงกับตารางที่ 1, 2 และรูปที่ 3)

ตารางที่ 1 เสาเข็มทดสอบและประเภทของการทดสอบ

ตารางที่ 2 ประเภทและจุดประสงค์ของการทดสอบ

รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นรับแรงแบกทานและค่า N ที่จุดทำการทดสอบ

ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบฐานรากบ่อเสาเข็มพืดแบบท่อเหล็ก จะต้องมีการกำหนด ความยาวที่ฝังลงไปในชั้นของฐานรากสำหรับเสาเข็มพืดแบบท่อและอัตราส่วนการหุ้มปิด (enclosure)ของปลายเสาเข็ม นอกจากนี้สำหรับสัมประสิทธิ์แรงต้านทานของดิน แรงปฏิกิริยาของดินในแนวดิ่งและค่าตัวคูณอื่น ๆ ที่กำหนดไว้ในข้อกำหนดสำหรับสะพานไฮเวย์ (specifications for highway bridges) นั้นมีการตรวจสอบค่าเหล่านี้เพื่อนำมาใช้ รูปภาพที่ 4 แสดงการทดสอบการรับน้ำหนักแบบสถิต โดยการใช้เสาเข็มท่อ 4 ต้นเป็นเสาเข็มหลักในการทดสอบ เข็มเหล่านี้จะถูกกดลงไปในชั้นระดับดินที่รองรับน้ำหนักเป็นความลึกที่ 3 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มโดยวิธี multi-cycle system โดยการใช้หัวกดระบบไฮดรอลิค กำลังของหัวกดระบบไฮดรอลิคเท่ากับ 48,000 กิโลนิวตันสำหรับเสาเข็มหมายเลข 4 และ 56,000 กิโลนิวตันสำหรับเสาเข็มหมายเลข 5

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกที่กระทำและการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งของเสาเข็มหมายเลข 5 น้ำหนักบรรทุกที่มากที่สุดคือ 36,000 กิโลนิวตัน และการเคลื่อนตัวมากที่สุดที่วัดได้คือ 280 มิลลิเมตร ค่าการเคลื่อนตัวที่ยังอยู่ในช่วงอิลาสติกคือ 60 มิลลิเมตร และน้ำหนักบรรทุกที่ทำให้เกิดการครากที่ 2,000 กิโลนิวตัน ได้มีการทำการวัดความเครียดที่หน้าตัด 13 หน้าตัดตามความยาวเสาเข็ม และทำการคำนวณการกระจายแรงในแนวแกนและกำลังต้านทานแรงเสียดทานที่ผิวเสาเข็มกลับไปจากค่าความเครียดที่วัดได้นี้ รูปที่ 5 แสดงการกระจายของแรงในแนวแกนตามความยาวของเสาเข็ม แรงในแนวแกนนี้มีการคำนวณจากระดับความเครียดที่วัดจากเครื่องวัดที่อยู่ในท่อเสาเข็ม ค่าที่แตกต่างกันของแรงในแนวแกนที่หน้าตัดต่าง ๆ ตามความยาวเสาเข็มสามารถแปลงกลับมาเป็นความต้านทานแรงเสียดทานที่ผิวได้ แรงเสียดทานที่ผิวมีค่าค่อนข้างต่ำในดินเหนียวชั้นบน แต่มีค่าเพิ่มขึ้นในชั้นล่าง ๆ รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงแบกทานที่ปลายเสาเข็มและค่าการเคลื่อนตัวจากน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด ซึ่งหามาได้จากการแยกค่าออกมาจากแรงกระทำทั้งหมด จากรูปสามารถสังเกตได้ว่ากำลังต้านทานแรงเสียดทานที่ผิวมีค่าสูงกว่ากำลังรับแรงแบกทานของเสาเข็มสำหรับเสาเข็มหมายเลข 5 โดยค่ากำลังต้านทานแรงเสียดทานสำหรับผิวหน้าด้านในและด้านนอกของเสาเข็มสามารถแยกออกมาจากกำลังต้านทานแรงเสียดทานที่ปลายเสาเข็ม ผลที่ได้จากกรทดสอบแสดงว่าค่ากำลังต้านทานแรงเสียดทานที่ผิวด้านในมีค่าสูงกว่าที่ผิวด้านนอกมาก และได้พบว่าทรายและหินกรวดภายในเสาเข็มมีสภาพการแน่นตัวอยู่

รูปภาพที่ 4 การทดสอบการรับน้ำหนักแบบสถิต

รูปที่ 4 ผลของการทดสอบการรับน้ำหนักแบบสถิต

รูปที่ 5 การกระจายของแรงในแนวแกนตามแนวดิ่ง

รูปที่ 6 กำลังรับแรงแบกทานที่ปลายและกำลังรับแรงแบกทานทั้งหมด

รูปที่ 7 แสดงการทดสอบการรับน้ำหนักระยะสั้น ซึ่งมวลขนาด 160 ตันที่ติดอยู่กับหัวเสาเข็มจะถูกยกขึ้นโดยมีความเร่งอยู่ที่ 20g สำหรับแรงจุดระเบิด และน้ำหนักบรรทุกเสมือนแบบพลศาสตร์จะกระทำบนหัวเสาเข็มโดยใช้แรงปฏิกิริยาซึ่งเกิดจากการแรงยกมวลนี้เป็นเวลา 0.1 วินาที การทดสอบแบบนี้มีข้อดีคือการทดสอบการรับน้ำหนักภายในเวลาที่สั้นที่สุด และไม่จำเป็นต้องจัดเตรียมเสาเข็มเพื่อรับแรงสำหรับการทดสอบ โดยรูปที่ 5 แสดงเครื่องมือในการทดสอบการรับน้ำหนักนี้ การกระจายของแรงในแนวแกนและค่าความเร่งจะคำนวณจากการใช้ load cell, เครื่องวัดความเครียด (strain meter) และ เครื่องวัดความเร่ง (accelerometer) ที่มีการติดตั้งไว้บนเสาเข็ม รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักบรรทุกที่วัดได้และค่าการเคลื่อนตัว รูปที่ 9 แสดงโมเดลที่ใช้ในการคำนวณค่าความสามารถในการรับแรงแบกทานที่ปลายเข็มและกำลังต้านทานแรงเสียดทานที่ผิว ซึ่งการคำนวณสามารถกระทำได้โดยการกำหนดให้เสาเข็มท่อนี้เป็นเสมือน elastic body และมีการเชื่อมต่อกับดินรอบ ๆ บริเวณspring and dashpot ในขณะเดียวกันนั้นเปลี่ยนค่าคงที่ของดินโดยการใช้ pile head input load เพื่อที่จะให้รูปแบบของรูปคลื่นจากทั้งการวัดค่าและการคำนวณสอดคล้องกัน รูปที่ 8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของทั้งน้ำหนักบรรทุกและค่าการเคลื่อนตัวที่คำนวณไว้ด้วยกันเทียบกับผลการทดสอบที่วัดได้ ค่าคลื่นที่ส่งไป (จากน้ำหนักตุ้ม) และคลื่นสะท้อน (การต้านทานของชั้นดิน) สามารถคำนวณได้จากแรงกระทำในแนวแกนและค่าความเร่ง ค่าเหล่านี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 10

รูปภาพที่ 5 เครื่องมือในการให้น้ำหนักบรรทุก

รูปที่ 7 โครงสร้างสำหรับเครื่องมือการทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกระยะสั้น

รูปที่ 8 สภาพที่สอดคล้องกันของรูปร่างของคลื่นสะท้อน

รูปที่ 9 โมเดลในการคำนวณสำหรับความสามารถในการรับน้ำหนักที่ปลายเข็มและแรงเสียดทานที่ผิว

รูปที่ 10 ข้อมูลคลื่นที่กระทำ Fd และรูปแบบคลื่นสะท้อนต้านทาน Fu

รูปที่ 11 แสดงค่ากำลังรับน้ำหนักตามแนวแกนและค่าแรงเสียดทานที่ผิวของเสาเข็มที่ได้มาจากการวิเคราะห์รูปแบบคลื่น ในขณะที่การออกแบบฐานรากเขื่อนโดยเสาเข็มพืดแบบท่อเหล็กได้เป็นไปตามมาตรฐานข้อกำหนดสำหรับสะพานไฮเวย์ ค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบได้มีการแก้ไขให้สอดคล้องกับผลการทดสอบ การแก้ไขหลัก ๆ มีในส่วนต่อไปนี้

- ความลึกของการตอกเข็มที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1,500 มิลลิเมตร ได้กำหนดไว้ที่ 3D (3 เท่าเส้นผ่านศูนย์กลาง) ค่าอัตราส่วนการหุ้มปิดเท่ากับ 53 % สำหรับชั้นทราย และ 74 % สำหรับชั้นหินกรวด และเมื่อมีการติดตั้งชิ้นตงขวาง ที่ส่วนปลายเข็ม ทำให้ค่าความต้านทานที่ปลายเข็มเพิ่มขึ้นประมาณ 30 %
- ค่าความต้านทานแรงเสียดทานที่ผิวได้นำมาบวกเพิ่มเข้ากับค่าความต้านทานภายในของเสาเข็ม และค่าที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 ได้นำมาใช้คำนวณ

- สิ่งที่พบในการทดสอบการรับน้ำหนักในแนวขวางก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนตัวของดินมีค่าสูงกว่าที่กำหนดในข้อกำหนดสำหรับสะพานไฮเวย์อยู่ 2-3 เท่า

รูปที่ 11 ผลของการวิเคราะห์การสอดคล้องกันของรูปแบบคลื่น

ตารางที่ 3 การปรับแก้ของความต้านทานรับแรงเสียดทานที่ผิว

การทดสอบกำลังรับน้ำหนักสำหรับรอยต่อเสาเข็มพืดแบบท่อเหล็กกำลังสูง

โดยทั่วไปกำลังต้านทานของเสาเข็มพืดแบบท่อเหล็กในโครงสร้างบ่อจะหาได้จากกำลังต้านทานแรงดัดของโครงสร้างเสาเข็มพืดแบบท่อเหล็กและกำลังรับแรงเฉือนของรอยต่อที่ล็อคกัน ในกรณีที่มีการใช้รอยต่อที่ใช้กันแบบทั่วไประหว่างท่อกับท่อ เสาเข็มท่อจะมีการล็อคติดกันด้วยการใช้ท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 165.2 มิลลิเมตรและวัสดุมอร์ตาร์ที่มีกำลังรับแรงอัดที่ 20 เมกกะปาสคาล เพื่อใช้ในการเติมรอยต่อของท่อให้เต็ม สำหรับโครงการก่อสร้างสะพานโตเกียวเกทในปัจจุบัน มีความจำเป็นที่จะเพิ่มความแข็งของรอยต่อ เพื่อที่จะให้การเคลื่อนตัวในแนวนอนของฐานรากบ่อเสาเข็มพืดแบบท่ออยู่ในระดับค่าที่ยอมให้ ในระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว

เพื่อที่จะเพิ่มความแข็งแรงของเสาเข็มพืดเหล็ก ปูนทรายกำลังสูงได้นำมาใช้เพื่อเติมช่องเปิดในรอยต่อให้เต็ม (รูปที่ 12) เพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างปูนทรายกับรอยต่อของท่อ โดยในโครงการปัจจุบัน กำลังของปูนทรายที่ใช้ได้เพิ่มขึ้นในระดับมากกว่า 2 เท่า (40 เมกกะปาสคาล) ของระดับกำลังปกติทั่วไป และนอกจากนั้นแผ่นเหล็กลายยังได้นำมาใช้ในรอยต่อเพื่อเพิ่มแรงยึดเหนี่ยว เพราะเหตุนี้สามารถสรุปได้ว่าความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของเสาเข็มนี้มีระดับที่สูงโดยวิธีการที่ใช้ทั้งสองนี้

ผลที่ได้จากการทดสอบการรับน้ำหนักของรอยต่อ แสดงว่ากำลังรับแรงเฉือนสูงสุดอยู่ที่ 1640 กิโลนิวตัน/ เมตร ดังที่แสดงในรูปที่ 13 ค่าที่ได้นี้มีค่าประมาณ 6 เท่าของค่าพิกัดสูงสุด 200 กิโลนิวตัน/ เมตร สำหรับกำลังรับแรงเฉือนที่กำหนดในข้อกำหนดสำหรับการออกแบบทั่วไปในโครงสร้างรอยต่อเสาเข็มพืด (คู่มือสำหรับการออกแบบและก่อสร้างฐานรากเสาเข็มพืดแบบท่อเหล็ก, สมาคมทางหลวงประเทศญี่ปุ่น)

ขนาดของฐานรากบ่อเสาเข็มพืดแบบท่อเหล็กที่ออกแบบไว้ในช่วงแรกได้ถูกลดขนาดลงอย่างมากภายหลังจากการนำผลการทดสอบการรับน้ำหนักและการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์ของดินต่าง ๆ อีกครั้ง ซึ่งส่งผลให้ค่าก่อสร้างลดลง (ตารางที่ 4)

รูปที่ 12 โครงสร้างที่มีล็อคกันและเครื่องมือในการทดสอบการรับน้ำหนัก

รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการเคลื่อนตัว

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบ การออกแบบสำหรับฐานรากบ่อเสาเข็มพืดแบบท่อเหล็ก

ราคาค่าก่อสร้างที่ลดลงและคุณภาพของงานที่ดีขึ้น

ฐานรากเสาเข็มพืดแบบท่อเหล็กของสะพานโตเกียวเกท ได้ก่อสร้างอยู่บนชั้นดินอ่อน ประกอบกับการที่ฐานรากนี้ต้องมีความสามารถในการรองรับแรงกระทำที่สูงและการรองรับการเคลื่อนตัวของโครงสร้างได้ดีภายใต้ภาวะแรงแผ่นดินไหว ดังนั้นในการออกแบบโครงสร้างฐานราก จึงจำเป็นที่จะต้องออกแบบให้โครงสร้างมีขนาดค่อนข้างใหญ่

หลังจากที่มีการทราบถึงข้อมูลจากการทดสอบกำลังรับน้ำหนักสำหรับเสาเข็มพืดท่อเหล็กขนาดใหญ่ ก็ได้มีการพิจารณาถึงการกำหนดปัจจัยในการออกแบบหลายข้อใหม่ จึงสามารถออกแบบรูปแบบของฐานรากที่มีขนาดเล็กลงได้ โดยการใช้เสาเข็มท่อเหล็กขนาดใหญ่ร่วมกันกับรอยต่อที่มีการล็อคกันได้โดยใช้แผ่นเหล็กลาย (checkered plate) ที่มีการเติมด้วยปูนทราย ในทำนองเดียวกันขั้นตอนในการบริหารงานก่อสร้างก็ได้พิจารณามาจากการใช้ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักด้วย จึงทำให้ขนาดของโครงสร้างฐานรากเสาเข็มพืดแบบท่อเหล็กสามารถลดขนาดลงได้ ซึ่งมีผลสืบเนื่องให้เกิดการลดราคาค่าก่อสร้างและปรับปรุงคุณภาพของงานโครงสร้าง

■ ■ ■ ■ ■

(ปกหลัง)

แผ่นดินไหวทางทิศตะวันออกของญี่ปุ่น (Great East Earthquake) **และสึนามิ** (Tsunami)

ทาเคชิ โอกิ

ประธานกรรมการ คณะกรรมการส่งเสริมการตลาดระหว่างประเทศ

สมาพันธ์เหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศญี่ปุ่น

แผ่นดินไหวครั้งใหญ่ทางทิศตะวันออกของประเทศญี่ปุ่น เมื่อเวลา 14:46 วันที่ 11 มีนาคม 2011 ซึ่งวัดขนาดแผ่นดินไหวได้ถึง 9.0 ริกเตอร์ ถือว่าเป็นเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่รุนแรงที่สุดที่เคยเกิดในประเทศญี่ปุ่น ความเสียหายที่เกิดขึ้นรุนแรงอย่างที่ไปไม่เคยปรากฏมาก่อนและกระจายขอบเขตไปยังรอบ ๆ ชายฝั่งด้านมหาสมุทรแปซิฟิคทางด้านทิศตะวันออกของญี่ปุ่น (อิวาเตะ มิยากิ ฟูกูชิมา และอิบารากิ) จำนวนผู้เสียชีวิตและสูญหายมีมากกว่า 27,000 คนและจำนวนอาคารที่ถูกทำลายอย่างสิ้นเชิงมีมากกว่า 65,000 อาคาร

แผ่นดินไหวนี้เป็นชนิดที่เกิดขึ้นภายในแผ่นเปลือกโลก (Interplate Type) โดยมีศูนย์กลาง (epicenter) ที่ระดับความลึก 24 กิโลเมตรใต้ระดับน้ำทะเล นอกชายฝั่งซันริกุในมหาสมุทรแปซิฟิค (ประมาณ 130 กิโลเมตรจากทิศตะวันออก – ตะวันออกเฉียงใต้ของคาบสมุทรโอชิกะ) สเกลการวัดแรงสั่นสะเทือนที่วัดได้มีค่าที่แตกต่างกันจากค่าที่เท่ากับ 7 เมื่อเทียบกับสเกลความเข้มของแรงสั่นสะเทือน (intensity scale) ตามมาตรฐานการวัดระดับแรงสั่นสะเทือน 7 ระดับของประเทศญี่ปุ่น และ 6 สำหรับพื้นที่อื่นซึ่งครอบคลุมพื้นที่กว้าง ๆ จากไอวาเตะจนถึงอิบารากิ จากการเกิดการเคลื่อนตัวในจุดเริ่มต้นของรอยแตก (fault) ที่ศูนย์กลางแผ่นดินไหว นอกชายฝั่งซันริกุ การเคลื่อนไหวของรอยแตกเปลือกโลกได้เกิดขึ้นในพื้นที่ผิว (hyprocentral) ของ

แผ่นดินไหว ครอบคลุมพื้นที่กว้างใหญ่นอกชายฝั่งจากไอวาเตะจนถึงอิบาราคิ และสามารถวัดรอยแยกได้ยาว 500 กิโลเมตรจากทิศใต้ไปยังทิศเหนือ และระยะทาง 200 กิเมตรจากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตก ในระยะเวลาสั้น ๆ หลังจากการเกิดแผ่นดินไหว (main shock) ได้เกิดเหตุการณ์อาฟเตอร์ช็อค (aftershock) ขนาดใหญ่จำนวนมากที่มีขนาดใหญ่กว่า 7.0 ริกเตอร์ ติดต่อกันอย่างรวดเร็วในพื้นที่

สึนามิที่เกิดขึ้นตามมาหลังเหตุการณ์แผ่นดินไหวนั้นก่อให้เกิดความที่รุนแรงมากขึ้นไปอีก ด้วยคลื่นสึนามิที่มีความสูงมากกว่า 3 เมตร เข้ากระทบท่าเรือและท่าเทียบเรือตามชายฝั่งมหาสมุทรแปซิฟิค และก่อให้เกิดความเสียหายอย่างมาก คลื่นสึนามิที่สูง 9.5 เมตรได้ถูกตรวจพบว่ามีการซัดเข้าไปไกลจนถึงด้านในของท่าเรือโอฟุนาโต ตามข้อมูลของแบบแผนผังพื้นที่น้ำท่วมซึ่งจัดเตรียมโดย geospatial information authority ภายใต้กระทรวงที่ดิน สาธารณูปโภค การขนส่งและการท่องเที่ยวของประเทศญี่ปุ่น พบว่าพื้นที่ดินที่อยู่ติดกับชายฝั่งเป็นระยะ 5 กิโลเมตรเกิดน้ำท่วมครอบคลุมถึงพื้นที่กว้างใหญ่จากอิชิโนมากิในจังหวัดมิยากิจนถึงส่วนกลางของจังหวัดฟูกูชิมา

กิตติกรรมประกาศ

เราขอแสดงความเสียใจแก่ทุกท่านและครอบครัวที่ได้รับผลกระทบจากการเกิดแผ่นดินไหวครั้งใหญ่ทางทิศตะวันออกของญี่ปุ่น เราได้รับจดหมายแสดงความเห็นใจและให้กำลังใจเพื่อให้เราผ่านพ้นวิกฤตการณ์นี้จาก ประชาชนชาวญี่ปุ่น และจากทั่วโลก เราจึงอยากที่จะใช้โอกาสนี้ที่จะแสดงความขอบคุณอย่างจริงใจแก่ทุก ๆ ท่าน รวมถึงผู้อ่าน ซึ่งได้ให้การสนับสนุนและการช่วยเหลือเป็นอย่างมาก

สมาพันธ์เหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศญี่ปุ่นได้นำเสนอวิธีการก่อสร้างโครงสร้างเหล็กและเทคโนโลยีในทางวิศวกรรมโยธาและการก่อสร้างอาคารซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับการฟื้นฟูและบูรณะพื้นที่ที่เสียหายในเบื้องต้น และในอนาคตเราจะทำการวิจัยและสำรวจถึงความเสียหายที่เกิดจากแผ่นดินไหวและสึนามิ และจะผลักดันที่จะพัฒนาโครงสร้างเหล็กเป็นหัวข้อหนึ่งท่ามกลางหลาย ๆ หัวข้อเพื่อที่จะให้มีการป้องกันภัยพิบัติที่ดียิ่งขึ้น

(รูปภาพ)

เรือลำใหญ่วิ่งขึ้นอยู่บนโครงสร้างท่าเรือของท่าเรือเซนไดเนื่องจากสึนามิ

รูปของพื้นที่ที่เกิดสึนามิใกล้กับแม่น้ำนาโตริ จังหวัดมิยากิ