

# STEEL CONSTRUCTION TODAY & TOMORROW

(ฉบับที่ 36 สิงหาคม 2012)

บทความตีพิมพ์ร่วมกันระหว่างสหพันธ์เหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยและสมาคมก่อสร้างโครงสร้าง  
เหล็กแห่งประเทศไทย

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

เพื่อช่วยให้ผู้อ่านชาวไทยสามารถที่จะเข้าใจบทความได้ง่ายขึ้น ได้มีการจัดแปลบทความภาคภาษาไทย และแนบท้ายกับฉบับภาษาอังกฤษ สำหรับรูปภาพ ไดอะแกรมและตาราง ได้มีการจัดแปลเป็นภาษาไทยเพียงส่วนหัวเรื่อง ผู้อ่านสามารถอ้างอิงกับฉบับภาษาอังกฤษสำหรับเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้ ถ้าผู้อ่านต้องการทราบศัพท์บรรยายหรือ รายละเอียดทางด้านเทคนิค โปรดอ้างอิงกับบทความภาษาอังกฤษ เช่นเดียวกัน

ฉบับที่ 36 สิงหาคม 2012 : เนื้อหา

ฉบับพิเศษ

แผ่นดินไหวครั้งใหญ่ The Great East Japan Earthquake ปี 2011 เราจะสามารถรับมือและเตรียมการกับเหตุการณ์ภัยธรรมชาติได้อย่างไร ? \_\_\_\_\_ 1

โครงสร้างตามแนวชายฝั่ง: สิ่งที่เรียนรู้จากแผ่นดินไหวและคลื่นสึนามิ \_\_\_\_\_ 3

ความเสียหายแก่เขื่อนป้องกันน้ำท่วมและขั้นตอนในการบูรณะซ่อมแซมและก่อสร้างขึ้นใหม่ \_\_\_\_\_ 6

ความเสียหายที่เกิดสืบเนื่องจากดินเหลวต่อที่อยู่อาศัยและสาธารณูปโภคใต้ดิน \_\_\_\_\_ 9

การจัดการเศษวัสดุและขยะจากคลื่นสึนามิและการนำมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อการบูรณะซ่อมแซมและการก่อสร้างขึ้นใหม่ \_\_\_\_\_ 15

**เทคโนโลยีในการก่อสร้างโครงสร้างเหล็ก**

รายละเอียดพื้นฐานเกี่ยวกับการผูกก่อนและ การป้องกันการผูกก่อนของเหล็ก \_\_\_\_\_ 18

การประชุมสัมมนาเกี่ยวกับงานวิจัยโครงสร้างเหล็กในทางวิศวกรรมโยธา \_\_\_\_\_ ปกหลัง

ฉบับภาษาไทย: ©The Japan Iron and Steel Federation 2012

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

เว็บไซต์: <http://www.jjsf.or.jp>

## บทความพิเศษ: แผ่นดินไหวครั้งใหญ่ The Great East Japan Earthquake ปี 2011

(หน้าที่ 1-2)

### เราจะสามารถรับมือและเตรียมการกับเหตุการณ์ภัยธรรมชาติได้อย่างไร ?

โดย โนบูโอะ ชูโต ศาสตราจารย์เกียรติคุณแห่งมหาวิทยาลัยโตโฮกุ

### การปรับปรุงโครงสร้างสาธารณูปโภคของประเทศอย่างต่อเนื่อง

ในประเทศญี่ปุ่น ภายหลังจากปี 1960 ได้เกิดการก่อสร้างโครงสร้างสาธารณูปโภคและโครงสร้างเพื่อป้องกันภัยพิบัติธรรมชาติเพิ่มขึ้นเป็นอันมาก สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความเจริญรุดหน้าทางด้านนี้เนื่องมาจาก แผนการเพิ่มรายได้เป็นสองเท่าของประเทศ และจำนวนเงินลงทุนที่มี เพื่อใช้สำหรับการปรับปรุงและพัฒนาโครงสร้างสาธารณูปโภคของประเทศ

งานก่อสร้างทางด้านวิศวกรรมโยธาก็ได้มีความเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเช่นกัน วัสดุหิน ไม้ และ หินที่ได้นำมาใช้เป็นวัสดุหลักในงานวิศวกรรมโยธามาแต่ก่อน ได้ถูกทดแทนด้วยการใช้เหล็กกล้าและคอนกรีต นังร้านไม้ซุงได้ถูกทดแทนด้วยเหล็กท่อ เครื่องลั่นกวนคอนกรีตได้ถูกนำมาใช้ในการเทคอนกรีต เช่นเดียวกันนั้น การใช้เครื่องจักรในงานก่อสร้างอย่างแพร่หลายทำให้การก่อสร้างมีระยะเวลาทำงานที่รวดเร็วขึ้นและมีความเชื่อถือได้ในคุณภาพมากขึ้น

ก่อนหน้านี้ แม้กระทั่งถนนไฮเวย์หลักของประเทศเช่นถนนหลวงสายที่ 1 ถึง 9 เป็นถนนกรวด แต่ในปัจจุบัน แม้กระทั่งถนนในไร่ที่คั่นระหว่างที่แปลงต่าง ๆ จะมีการบดอัดอย่างดี ทำนบกันน้ำและเขื่อนได้ถูกสร้างขึ้นมาจนทำให้ไม่มีใครเกิดเหตุการณ์น้ำท่วมอีกต่อไป ดังที่แสดงในรูปที่ 1 จำนวนผู้เสียชีวิตจากเหตุการณ์ภัยธรรมชาติได้ลดลงอย่างมากภายหลังจากปี 1960

### การเตรียมการรับมือคลื่นสึนามิ

มาตรการการป้องกันใดได้นำมาใช้เพื่อรับมือคลื่นสึนามิ ? ก่อนคลื่นสึนามิโซวา ซานริกุ ในปี 1933 มาตรการหลักในการป้องกันภัยจากคลื่นสึนามิยกเว้นในบางกรณีเท่านั้น ก็คือให้ประชาชนอาศัยอยู่บนเนินเขา และหาที่หลบภัยเมื่อเกิดคลื่นสึนามิขึ้น แม้กระทั่งหลังจากปี 1933 มาตรการหลักยังคงเป็นการอยู่อาศัยบนเนินเขา แต่ในพื้นที่ ความาชิ ทาโร และพื้นที่ในเมืองอีก 3 จุดในเมืองโตโฮกุที่ซึ่งพื้นที่กว้างใหญ่มหาศาลไม่สามารถที่จะทำให้เกิดความปลอดภัยได้ ทำนบป้องกันคลื่น และผนังกันน้ำทะเลจึงได้ถูกสร้างขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ในช่วงเวลานั้น เครื่องมือที่ใช้สำหรับการเตือนภัยคลื่นสึนามิก็คือวิทยุ ซึ่งเริ่มที่จะมีการใช้อย่างแพร่หลาย ในปี 1941 ระบบเตือนภัยสำหรับคลื่นสึนามิที่โซวาได้ริเริ่มนำมาใช้ในพื้นที่ซานริกุ (ชายฝั่งที่อยู่ในทิศตะวันออกที่สุดในด้านมหาสมุทรแปซิฟิกของประเทศญี่ปุ่น) ในปี 1952 พื้นที่เป้าหมายที่กำหนดใช้ระบบเตือนภัยดังกล่าวได้ขยายไปทั่วทั้งประเทศ และกฎหมายควบคุมของระบบอุตุนิยมวิทยาได้มีการประกาศใช้ ก่อนปี 1952 เพียงเล็กน้อย ระบบเตือนภัยคลื่นสึนามิชั่วคราวได้ทำงานประสบความสำเร็จเป็นอย่างดีในเหตุการณ์คลื่นสึนามิที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหวโตกาชิ - โอกิ

### โครงสร้างที่ออกแบบเพื่อป้องกันคลื่นสึนามิ มีความน่าเชื่อถือหรือไม่ ?

เหตุการณ์คลื่นสึนามิที่เกิดขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหววาเลดีเวียที่ชิลีในปี 1960 ถือว่าเป็นครั้งแรกที่โครงสร้างที่ออกแบบเพื่อป้องกันคลื่นสึนามิได้ถูกทดสอบจริงในสนาม คลื่นสึนามินี้ส่งผลกระทบต่อทั้งประเทศญี่ปุ่นตั้งแต่ทางเหนือสุดในฮอกไกโดจนถึงส่วนปลายทางใต้ในโอกินาวา คลื่นที่เกิดขึ้นมีความสูง 6 เมตรในส่วนที่มีความสูงที่สุด และ 3 - 4 เมตรในพื้นที่อื่น ๆ เป็นส่วนมาก ซึ่งคลื่นสึนามิเหล่านี้สามารถที่จะป้องกันได้ด้วยโครงสร้างที่มีอยู่ในเวลานั้น กฎหมายเกี่ยวกับการเตรียมรับสำหรับคลื่นสึนามิวาเลดีเวียได้

กำหนดอย่างชัดเจนไว้ว่า “เครื่องตรวจวัดเพื่อป้องกันคลื่นสึนามิ จะต้องมีการประกอบติดตั้งขึ้นใหม่และโครงสร้างที่ใช้ป้องกัน คลื่นสึนามิจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงใหม่” เพราะเหตุนี้ จึงได้มีการ ก่อสร้างโครงสร้างทำนบป้องกันคลื่นสึนามิขนาดยักษ์ขึ้นที่โอฟูนา โต และโครงสร้างอื่น ๆ ที่มีขนาดใหญ่คล้ายคลึงกัน นอกจากนี้ ระบบเตือนภัยคลื่นสึนามินานาชาติจึงได้มีการติดตั้งขึ้นมาอีกด้วย

ถึงในช่วงเวลานั้นก็ตาม ผู้คนก็ยังคงมีความสงสัยใน ความสามารถของโครงสร้างป้องกันคลื่นสึนามิ ตัวอย่างที่ชี้ให้เห็น ถึงความสงสัยนี้คือข้อความบรรยายได้รูปภาพใน *รายงานคลื่น สึนามิซานริกุ* ที่มีบทความที่เกี่ยวกับการเกิดคลื่นสึนามิวาเลติเวีย (โดยกรรมการสำรวจพื้นที่ซานริกุ) คำบรรยายได้ภาพบรรยายไว้ ว่า “เราสามารถควบคุมธรรมชาติได้ หรือธรรมชาติหัวเราะเยาะ เรา” อย่างไรก็ตาม ไม่นานนักภายหลังจากที่ได้มีการก่อสร้าง โครงสร้างป้องกันคลื่นสึนามิแล้วเสร็จ คลื่นสึนามิที่เกิดขึ้นจาก แผ่นดินไหวโตคาชิ – โอกิ ได้เข้าซัดพื้นที่ซานริกุ เพราะว่าความสูง ของคลื่นสึนามินี้มีขนาดไม่มากไปกว่าคลื่นสึนามิวาเลติเวีย ผลกระทบของคลื่นนี้จึงถูกป้องกันได้แทบจะสิ้นเชิง

เป็นที่ชัดเจนว่าภัยธรรมชาติที่เกิดขึ้นในระดับความรุนแรงไม่ มากนักสามารถควบคุมได้โดยโครงสร้างฝีมือมนุษย์ดังที่ได้ กล่าวถึง และสนับสนุนแนวความคิดที่ว่าผลกระทบของคลื่นสึนามิ หรือแม้กระทั่งภัยธรรมชาติน้ำท่วมสามารถควบคุมได้โดยโครงสร้างที่ มนุษย์สร้างขึ้น ถึงแม้จะเป็นจริงที่ว่าโครงสร้างสามารถที่จะ ควบคุมภัยธรรมชาติได้ แต่ก็มีขีดจำกัดในด้านกำลังความสามารถ ของโครงสร้างนี้ ผู้คนรุ่นที่ก่อสร้างโครงสร้างเหล่านี้ได้เรียนรู้ ความสามารถของโครงสร้างในการป้องกันคลื่นสึนามิผ่าน เหตุการณ์จริงว่าโครงสร้างสามารถรับแรงได้ แต่อาจจะลืมไปว่า โครงสร้างเหล่านี้ได้ถึงขีดจำกัดในด้านความสามารถเชิงป้องกัน ภัยแล้ว ผู้คนรุ่นต่อไปจึงมีความมั่นใจตั้งแต่แรกเริ่มว่าแรงกระทำ จากธรรมชาตินี้สามารถควบคุมได้โดยโครงสร้างที่มีอยู่ แต่พวกเขา ก็มิได้คำนึงถึงความจำเป็นที่จะต้องเตรียมการรับมือกับ เหตุการณ์ที่เลวร้ายที่สุด ตัวอย่างของแนวความคิดเช่นนี้แสดงไว้ ในรายงานของรัฐบาลเมื่อเร็ว ๆ นี้ที่สรุปไว้ว่า “การสร้างทำนบเพื่อ

ป้องกันโตเกียวจากเหตุการณ์น้ำท่วมซึ่งอาจเกิดครั้งหนึ่งในรอบ 200 ปี เป็นสิ่งที่ไม่จำเป็น”

## แผ่นดินไหว Great East Japan Earthquake ในปี 2011

เมื่อวันที่ 11 มีนาคม 2011 แผ่นดินไหว Great East Japan ได้ เกิดขึ้น นักพยากรณ์อุตุนิยมวิทยาของญี่ปุ่นไม่สามารถที่จะ ประเมินการทำนายการเกิดแผ่นดินไหวอย่างถูกต้องได้ ตาม ทฤษฎีโครงสร้างของแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวในพื้นที่ จาก ข้อมูลการเฝ้าติดตามมาเป็นเวลา 30 ปี บล็อกชั้นดินที่เกี่ยวข้องใน พื้นที่ทั้ง 3 บล็อกจะเคลื่อนตัวเป็นอิสระต่อกัน ในขณะที่สำหรับ แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นครั้งนี้ บล็อกชั้นดินทั้งสามเคลื่อนตัว ต่อเนื่องกัน ถ้าโลกได้กำเนิดเป็นเวลา 5000 ล้านปี และถ้าอายุขัย ของคนได้กำหนดไว้ที่ 50 ปี เวลา 30 ปีของการศึกษาทาง ธรณีวิทยาสามารถเปรียบเทียบได้กับ 10 วินาทีของการตรวจสอบ สุขภาพของมนุษย์ ความผิดพลาดทางทฤษฎีทางโครงสร้างใน พื้นที่รองรับแผ่นดินไหวมีพื้นฐานมาจากสมมติฐานที่ว่า ปฏิกิริยาการเกิดขึ้นทั้งหลายสามารถทำความเข้าใจได้จาก การศึกษาหาข้อมูลเป็นเวลาเพียง 30 ปีเท่านั้น ความผิดพลาดนี้ จะสามารถแก้ไขได้โดยการเฝ้าติดตามศึกษาข้อมูลต่อไปเป็นเวลา กว่า 300 – 400 ปี และการศึกษาในเชิงลึกอย่างละเอียดของ คลื่นสึนามิที่ได้เกิดขึ้นก่อนหน้านี้

## เราจะสามารถป้องกันหรือบรรเทาความเสียหายจากคลื่น สึนามิอย่างไร

ในปี 1983 “คู่มือสำหรับมาตรการป้องกันภัยพิบัติในพื้นที่ที่มี ความเสี่ยงสูงต่อคลื่นสึนามิ” (ฉบับร่าง) ได้ถูกจัดเตรียมขึ้นร่วมกัน โดยหน่วยงานจัดการด้านแม่น้ำ กระทรวงก่อสร้าง และ หน่วยงาน การประมง ในปี 1998 “คู่มือในการปรับปรุงระบบเตือนภัยคลื่น สึนามิตามแผนงานป้องกันภัยพิบัติท้องถิ่น” ได้ถูกจัดเตรียมขึ้นโดย ความเห็นชอบของหน่วยงานรัฐที่เกี่ยวข้องกับคลื่นสึนามิจำนวน 7 แห่ง คู่มือทั้งสองได้กล่าวไว้อย่างชัดเจนว่าคลื่นสึนามิขนาดใหญ่ ไม่สามารถป้องกันได้โดยโครงสร้างที่มนุษย์สร้างขึ้น แต่ควรใช้

ระบบป้องกันภัยพิบัติเพื่อป้องกันชีวิตผู้คน และควรจะควบคุมป้องกันภัยพิบัติโดยการสร้างเมืองที่มีความต้านทานต่อคลื่นสึนามิ เป็นอย่างสูง ดังนั้น ตามแนวความคิดนี้ จึงเป็นที่คาดเดาได้ว่า สำหรับคลื่นสึนามิขนาดใหญ่ที่เกิดจากแผ่นดินไหว ที่มีโอกาสเกิดหนึ่งครั้งในรอบพันปีดังเช่น Great East Japan จะสามารถไหลทะลักเข้ามาและทำลายโครงสร้างที่ใช้ป้องกันคลื่นสึนามิเหล่านี้

สำหรับเหตุการณ์สึนามิในครั้งนี้ ได้พบเห็นตัวอย่างเป็นจำนวนมากที่การพึ่งพาโครงสร้างเพื่อป้องกันภัยพิบัติ และการพึ่งพาข้อมูลเหล่านี้ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหาย ตัวอย่างเช่น ถึงแม้ว่าพื้นที่ศิริชิของเมืองโอซุชิในเขตอิวาเตะ อยู่นอกพื้นที่น้ำท่วมจากคลื่นสึนามิตามที่กำหนดไว้โดยทางเขต และได้มีการย้ายชุมชนไปยังเนินเขาด้านบนในปี 1933 แต่อัตราการเสียชีวิตได้พบว่าเป็นจำนวนสูงสุดในบรรดาเขตที่ได้รับผลกระทบจากคลื่นสึนามิ ในโตอุนิ-ฮองโก ในเมืองคามาอิชิ เขตอิวาเตะ คุณย่าคนหนึ่งที่เคยผ่านประสบการณ์เหตุการณ์คลื่นสึนามิโซวาซานริกุในปี 1933 ซึ่งมีที่อยู่อาศัยอยู่บนเนินเขา มองหาที่หลบภัยบนเนินเขาที่มีระดับสูงกว่าภายหลังจากที่เกิดแผ่นดินไหว ลูกสาวของเธอผู้ซึ่งอาศัยอยู่บนเนินเขาเช่นเดียวกัน ก็รีบหาที่หลบภัยทันทีเพราะว่าพวกเขาได้มีการตกลงกันไว้ว่าจะต้องหาสถานที่ปลอดภัยเมื่อไรก็ตามที่เกิดแผ่นดินไหวขึ้น หลานชายอายุ 40 ปี ผู้ซึ่งอาศัยอยู่พื้นที่ที่มีระดับต่ำกว่า ไม่สามารถหลบภัยคลื่นสึนามิได้ทันเพราะว่าเขาเชื่อว่าทำนบป้องกันคลื่นระดับสูงสามารถปกป้องเขาได้ หลังจากที่เขาเห็นว่าคลื่นสึนามิได้ทะลักผ่านทำนบ เขาได้พยายามวิ่งหนีขึ้นรถ แต่ไม่สามารถหลบหนีจากคลื่นได้

ระบบโครงสร้างป้องกันคลื่นสึนามิที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีความสามารถในการป้องกันคลื่นสึนามิที่อาจจะเกิดขึ้นครั้งหนึ่งในรอบหลายสิบปี หรือ กว่าหนึ่งร้อยปี แต่ยังคงมีการศึกษากันอยู่เกี่ยวกับความจำเป็นของโครงสร้างที่เชื่อถือได้ว่าสามารถควบคุมความเสียหายและรับมือคลื่นสึนามิที่มีขนาดความรุนแรงมากยิ่งขึ้นได้

อย่างไรก็ตาม ชีวิตผู้คนก็ไม่สามารถป้องกันอย่างสมบูรณ์ได้

โดยการใช้โครงสร้างที่มนุษย์สร้างขึ้น สิ่งที่สำคัญก็คือว่า “ในการที่จะอาศัยอยู่บนเนินเขา ตัดสินเหตุการณ์ด้วยสายตาของเราเอง และแสวงหาที่ปลอดภัยตามสัญชาตญาณของเราเอง” เป็นสิ่งที่เราสามารถจะบรรเทาผลกระทบจากเหตุการณ์ภัยธรรมชาติ และพื้นฐานความคิดเหล่านี้ไม่เคยเปลี่ยนแปลง

## รูปที่ 1 แนวโน้มสำหรับผู้เสียชีวิตและสูญหายจากเหตุการณ์ภัยพิบัติธรรมชาติในประเทศญี่ปุ่น



(หน้าที่ 3-5)

## โครงสร้างตามแนวชายฝั่ง: สิ่งที่เราเรียนรู้จากแผ่นดินไหวและคลื่นสึนามิ

โดย ทากาอิโร ชูคาโน สถาบันวิจัยท่าเรือและท่าอากาศยาน

### บทนำ

เมื่อวันที่ 11 มีนาคม 2011 แผ่นดินไหวขนาดใหญ่ที่สุดเท่าที่เคยบันทึกไว้ในญี่ปุ่นได้เกิดขึ้นที่นอกชายฝั่งย่านโตโฮกุ ซึ่งได้รับการตั้งชื่อว่า “แผ่นดินไหวปี 2011 นอกชายฝั่งแปซิฟิกในโตโฮกุ” โดยสถาบันอุตุนิยมิวิทยาของญี่ปุ่น แผ่นดินไหวขนาด  $M_w = 9.0$  ได้ก่อให้เกิดการสั่นไหวอย่างรุนแรงของพื้นดินส่งผลกระทบต่อเกาะฮอนชูตั้งแต่อาวโตเกียวไปจนถึงด้านเหนือของเกาะ และก่อให้เกิดกลุ่มคลื่นสึนามิซึ่งทำความเสียหายแก่บ้านเรือนที่ตั้งอยู่ตามชายฝั่งอย่างต่อเนื่องตลอดพื้นที่ อาฟเตอร์ช็อคขนาดใหญ่ ( $M_w > 7$ ) ได้เกิดขึ้นหลังจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว ซึ่งเพิ่มความเสียหายที่เกิดขึ้นในพื้นที่รอบชายฝั่งโตโฮกุระหว่างภาวะฉุกเฉินและการช่วยเหลือผู้ประสบภัย

รายงานนี้รวบรวมสิ่งที่ได้พบเห็นตามข้อสรุปของทีมนักวิจัยจากหน่วยงานวิจัยท่าเรือและท่าอากาศยาน ที่ได้ทำการศึกษาโครงสร้างชายฝั่งเป็นระยะทางประมาณ 600 กิโลเมตรตามชายฝั่งรวมทั้งงานทดสอบและงานวิเคราะห์หลังจากเหตุการณ์ สิ่งที่น่าประทับใจสำหรับการสันตะเพือนของพื้นดินจากแผ่นดินไหวครั้งนี้ก็คือช่วง

ระยะเวลาการสั้นที่ยาว และความถี่ของการสั้นที่สูง เพราะเหตุนี้ระดับความเสียหายของโครงสร้างเนื่องจากการสั้นสะเทือนค่อนข้างน้อย การที่ได้ศึกษาถึงปัญหานี้ไว้พื้นที่เป็นวงกว้างจึงสามารถให้เข้าใจถึงรูปแบบของความเสียหายตลอดทั่วพื้นที่ทั้งหมดที่มีผลกระทบเนื่องจากแผ่นดินไหว โดยการแยกแยะความเสียหายของโครงสร้างเนื่องจากการสั้นไหวของพื้นดินอย่างรุนแรงและผลกระทบทางอ้อมอื่น ๆ (เช่น ภาวะดินเหลว การวิบัติของดินดินทรุดตัว) ซึ่งเกิดจากการท่วมพื้นที่ของคลื่นสึนามิในเวลาต่อมา

### ความเสียหายต่อโครงสร้างรอบชายฝั่ง

ในหลายกรณี สภาพของโครงสร้างที่ได้ตรวจพบในเวลาทำการสำรวจเป็นผลกระทบร่วมกันเนื่องจากแผ่นดินไหวและคลื่นสึนามิ และการที่พยายามจะพิจารณาถึงลำดับการเกิดความเสียหายและผลกระทบเนื่องจากแรงสั้นสะเทือนและคลื่นสึนามิไม่สามารถจะแยกแยะได้ในสนาม สัมมตีสฐานเหล่านี้ขึ้นอยู่กับความเห็นทางวิศวกรรม โดยประสบการณ์ด้านวิศวกรรมโครงสร้างชายฝั่งและแผ่นดินไหว และความพยายามในการทำงานวิเคราะห์กรณีศึกษา (ดังเช่นในการวิเคราะห์ศึกษา “หลักฐานทางอาชญากรรม”) ของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกัน การตีความของกลไกการวิบัติหลาย ๆ กรณีที่ได้แสดงไว้ในรายงานเป็นความเห็น ซึ่งจะต้องปรับเปลี่ยนภายหลังเมื่อได้รับข้อมูลมากขึ้นในจุดตำแหน่งที่สำคัญต่าง ๆ สิ่งที่พบและคำแนะนำที่ได้ให้ไว้ในรายงานเบื้องต้นมีจุดประสงค์เพื่อนำไปสู่การพูดคุยแลกเปลี่ยนความคิดเห็นภายในแวดวงวิศวกรรมท่าเรือ สนับสนุนความพยายามในด้านการศึกษาวิจัย และสุดท้ายเพื่อเพิ่มพูนองค์ความรู้และให้ได้หลักการปฏิบัติที่ดีที่สุด

ในรายงานฉบับนี้ ผมอยากจะขอกล่าวถึงความเสียหายทั่วไปที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลกระทบร่วมกันจากการสั้นสะเทือนเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวและคลื่นสึนามิ และขอแสดงความคิดเห็นเกี่ยวกับแนวความคิดในการออกแบบในอนาคตโดยให้พิจารณาทั้งผลของแรงแผ่นดินไหวและคลื่นสึนามิ

ส่วนที่สังเกตเห็นได้ชัดสำหรับความเสียหายที่เกิดขึ้นจากแรงสั้นสะเทือนคือการที่โครงสร้างกำแพงเขื่อนเอียงตัวลงไปด้านทะเลและการจมลงของดินที่อยู่ด้านหลังกำแพงเขื่อน การเอียงตัวของกำแพงเขื่อนลงไปทางทะเล ซึ่งมีขนาดน้อยเมื่อเทียบกับส่วนกลางของขนาดการเอียงตัวที่ปลายเขื่อน มักจะแสดงให้เห็นเป็นส่วนโค้งเล็กน้อยดังแสดงในรูปภาพที่ 1 จำนวนของการจมลงของพื้นดินด้านหลังกำแพงเขื่อนมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นสอดคล้องกันกับขนาดของการเอียงตัวด้านทะเล เพราะเหตุนี้ โครงสร้างที่จอดเรือทั้งหมดไม่อยู่ในสภาพใช้งานได้

### รูปภาพที่ 1 ความเสียหายกับเขื่อนเข็มเหล็กพืดในท่าเรือฮอกไกโด ในปี 1993 จากเหตุการณ์แผ่นดินไหว ฮอกไกโด – นานเซอิ – โอกิ

เมื่อมีการวิเคราะห์พิจารณาถึงความเสียหายแก่โครงสร้างกำแพงเขื่อนเข็มเหล็กพืดในท่าเรือโซมาระหว่างแผ่นดินไหวนอกชายฝั่งแปซิฟิกในโตโฮกุ ปี 2011 ดังที่แสดงไว้ในรูปภาพที่ 2 ซึ่งพอที่จะสรุปได้อย่างสมเหตุสมผลว่าความเสียหายในกำแพงเขื่อนสืบเนื่องมาจากการสั้นสะเทือนของพื้นดินและต่อเนื่องด้วยคลื่นสึนามิ อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาสำรวจพื้นที่ภายหลังจากเหตุการณ์ภัยพิบัติ ได้พบร่องรอยเป็นจำนวนมากถึงความเสียหายที่มีสาเหตุเนื่องมาจากการสั้นสะเทือนของพื้นดินซึ่งไม่สามารถแยกออกได้ว่าเป็นสาเหตุเนื่องจากคลื่นสึนามิ เพราะเหตุนี้เนื่องจากความแตกต่างของความเสียหายเนื่องจากการสั้นสะเทือนของพื้นดิน และคลื่นสึนามิ สาเหตุของความเสียหายจึงได้รับการศึกษาอย่างละเอียดต่อไป ความแตกต่างระหว่างรูปภาพที่ 1 และ 2 ก็คือว่า ในขณะที่ความเสียหายแทบจะอยู่ในระดับเดียวกันสำหรับกำแพงเขื่อนทั้งสอง ความเสียหายทั้งหมดเกิดที่กำแพงเขื่อนตามรูปภาพที่ 1 ในทางตรงกันข้ามกัน สำหรับท่าเรือโซมา ความเสียหายเกิดขึ้นที่ส่วนปลายและส่วนความยาวประมาณ 30 เมตรของกำแพงเขื่อนทั้งหมด ในขณะที่ส่วนอื่น ๆ ยังอยู่ในสภาพใช้งานได้ รายละเอียดของลำดับขั้นตอนการวิบัติในปัจจุบันยังไม่เป็นที่ทราบดี ผมได้วางแผนในการที่จะศึกษาให้

ชัดเจนถึงกลไกการวิบัตินี้โดยการทดลองและวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์

## รูปภาพที่ 2 ความเสียหายกับเขื่อนเข็มเหล็กพิดในท่าเรือโซมา จากเหตุการณ์แผ่นดินไหว 2011 Great East Japan

### แนวความคิดใหม่ในการออกแบบที่พิจารณาถึงผลกระทบของทั้งแผ่นดินไหวและสึนามิ

มาตรฐานการออกแบบสำหรับโครงสร้างท่าเรือในประเทศญี่ปุ่นได้มีการปรับปรุงแก้ไขครั้งใหญ่ในปี 2007 สิ่งที่เป็นจุดเด่นที่สุดสำหรับมาตรฐานการออกแบบอันใหม่นี้ก็คือการอ้างอิงแนวความคิด “วิธีการออกแบบโดยขึ้นกับสมรรถนะ” ในขณะเดียวกัน มาตรฐานการออกแบบอันใหม่นี้ได้กำหนดให้สอดคล้องกันกับสิ่งที่ได้ค้นพบและองค์ความรู้ใหม่ในด้านเกี่ยวกับวิศวกรรมแผ่นดินไหว ตามมาตรฐานการออกแบบนี้ ควรที่จะศึกษาและประเมินความเสียหายโดยพิจารณาถึงแรงกระทำจากการสั่นไหวของแผ่นดินไหวและคลื่นสึนามิจากแผ่นดินไหว 2011 นอกชายฝั่งแปซิฟิกของโตโฮกุ เพื่อที่จะนำมาปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบต่อไป

แนวความคิดของ “วิธีการออกแบบโดยขึ้นกับสมรรถนะ” เป็นหลักพื้นฐานของมาตรฐานการออกแบบชนิดใหม่ “จุดประสงค์การใช้งานของโครงสร้าง” เป็นเป้าหมายสูงสุดของระบบการออกแบบ ดังนั้น “ข้อกำหนดของระดับสมรรถนะของโครงสร้าง” ได้ระบุอยู่ใน “กฎกระทรวง” เพื่อที่จะให้ได้สอดคล้องตามจุดประสงค์ของโครงสร้าง ในลักษณะภาษาทั่วไป สามารถเข้าใจง่ายได้แก่บุคคลทั่วไป นอกจากนี้ “เกณฑ์ระดับสมรรถนะของโครงสร้าง” ได้ระบุไว้เพื่อให้สามารถได้ตามข้อกำหนดของระดับสมรรถนะของโครงสร้างโดยการใช้คำศัพท์ในทางเทคนิค เพื่อที่จะให้เกณฑ์เหล่านี้สามารถที่จะเข้าใจได้อย่างถูกต้อง ชัดแจ้งโดยวิศวกร ในท้ายที่สุด ระดับสมรรถนะของโครงสร้างสามารถวัดผลได้ด้วยการใช้ “วิธีการวัดสมรรถนะของโครงสร้าง”

ในแง่ของเทคนิคปฏิบัติศาสตร์ ถ้าเราสรุปความเสียหายของโครงสร้างตามขั้นตอน ระยะเวลาที่เกิดเนื่องจากแผ่นดินไหวและสึนามิ ความเสียหายเหล่านี้สามารถสรุปได้ดังนี้

- ความเร่งตอบสนองมีค่าสูง ค่าการเคลื่อนตัวสูง วัสดุเชื่อมสภาพลง เช่นการเกิดดินเหลว และการเติบโตของรอยแตก
- แรงกระทำจากคลื่นสึนามิ แรงดันจากการไหลของน้ำเช่น แรงดึง แรงลอยตัว แรงกระทำของวัสดุที่ลอยน้ำระหว่างที่คลื่นสึนามิกระทบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งระหว่างที่คลื่นสึนามิซัดเข้ามาจากทะเล ภาวะการสูญเสียเสถียรภาพของแรงดันน้ำในพื้นที่อาจจะเกิดขึ้นได้ เช่นเดียวกันกับปรากฏการณ์ drawdown ดังที่แสดงในรูปที่ 1 (ด้านล่าง)

### รูปที่ 1 กลไกการพังทลายลงของคั่นกันคลื่น

ในปัจจุบันนี้ สาเหตุของความเสียหายและกลไกที่ทำให้เกิดความเสียหายที่แท้จริงจากคลื่นสึนามิยังไม่สามารถแยกแยะออกมาให้กระจ่างได้ เรากำลังส่งเสริมการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการทดลองและการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์เพื่อที่จะศึกษากลไกของความเสียหายที่มีผลร่วมมาจากแผ่นดินไหวและสึนามิ ในการที่จะกำหนดแนวความคิดในการออกแบบขึ้นใหม่สำหรับโครงสร้างตามชายฝั่งให้เป็นแบบ “การออกแบบให้โครงสร้างมีความเหนียวต่อการพังทลาย” ต่อแรงกระทำร่วมกันระหว่างแผ่นดินไหวและคลื่นสึนามิ จะต้องมีการกำหนดสภาพน้ำหนักรรทุก ระดับสมรรถนะของโครงสร้างที่ต้องการ ข้อกำหนดของโครงสร้าง และวิธีการในการตรวจสอบ ข้อกำหนดน้ำหนักรรทุกได้แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งได้มีการกำหนดให้มีการผสมผสานของน้ำหนักรรทุกไว้ให้เหมาะสม สำหรับคั่นป้องกันคลื่นที่ต้องการออกแบบให้มีความเหนียวพังทลายยาก จะมีการอ้างอิงกับข้อกำหนดในตารางที่ 1 เช่นกัน ในกรณีที่เกิดคลื่นสึนามิขนาดใหญ่ ๆ การตีความข้อกำหนดที่ต้องการของโครงสร้างจะค่อนข้างยากเช่น “สามารถใช้งานได้” และ “ซ่อมแซมได้” ให้เป็นเกณฑ์สมรรถนะของโครงสร้าง และในสภาวะปัจจุบัน ยังเป็นการยากที่จะสามารถวัดตรวจสอบการออกแบบให้ถูกต้องอีกด้วย

ในปัจจุบัน เราสามารถ “ออกแบบ” ในกรณีของคลื่นสึนามิกรณีที่เกิดขึ้นบ่อยครั้งที่สุดในทางตรงกันข้าม ในกรณีของคลื่นสึนามิที่ใหญ่ที่สุด เราเสนอเพียงแต่ “แนวความคิดในการออกแบบ”

หลังจากที่ได้เรียนรู้จากบทเรียนที่เกิดขึ้นในปี 1995 สำหรับแผ่นดินไหว เฮียงโกเคน – นามบุ แนวความคิดที่ใช้การสั่นไหวของแผ่นดินไหวระดับ 1 และ ระดับ 2 ได้มีการริเริ่มนำมาใช้ และกว่าจะมีการยอมรับในแนวความคิดในเชิงการออกแบบป้องกันแรงแผ่นดินไหวโดยการให้ระดับการสั่นไหวของพื้นดินเป็น 2 ระดับ ต้องใช้เวลาหลายปีทีเดียว เช่นเดียวกัน อาจจะต้องใช้เวลาหลายปีเพื่อที่จะตกลงใช้แนวความคิดใหม่เพื่อต้านทานแรงคู่ควบจากแผ่นดินไหวและสึนามิ กว่าจะได้รับการยอมรับจากผู้เกี่ยวข้อง เช่น ผู้ออกแบบ เจ้าหน้าที่ด้านการก่อสร้าง ผู้ออกกฎระเบียบ และอื่น ๆ



(หน้าที่ 6-8)

### **ความเสียหายแก่เขื่อนป้องกันน้ำท่วม และขั้นตอนในการบูรณะซ่อมแซมและก่อสร้างขึ้นใหม่**

โดย อิกูโอะ ไทวาทตะ, ศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยโตเกียว

#### **บทนำ**

ปรัชญาทั่วไปสำหรับการออกแบบป้องกันแผ่นดินไหวสำหรับโครงสร้างเขื่อนป้องกันน้ำท่วมในประเทศญี่ปุ่นได้ขึ้นอยู่กับแนวความคิดของอัตราส่วนความปลอดภัยมากกว่า 1 เช่นเดียวกันกับการออกแบบโครงสร้างอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม มีปัจจัยสำคัญ 2 ประการที่ต้องนำมาพิจารณาสำหรับเขื่อนป้องกันน้ำท่วม ปัจจัยแรกก็คือปัจจัยในทางการเงิน ซึ่งงบประมาณที่ตั้งไว้สำหรับการบูรณะซ่อมแซมเพื่อป้องกันแรงแผ่นดินไหวต่อหน่วยความยาวของเขื่อนป้องกันน้ำท่วมมีจำกัดเพราะว่าความยาวทั้งสิ้นของเขื่อนป้องกันน้ำท่วมที่มีความเสี่ยงจากแรงแผ่นดินไหวมีระยะความยาวมาก ประการที่สองก็คือการที่เกิดอัตราส่วนความปลอดภัยของโครงสร้างน้อยกว่า 1 มิได้หมายความว่าจำเป็นต้องมีความเสียหายอย่างทันทีทันใดหรือการเกิดน้ำทะลักผ่านเขื่อนเข้ามา เพราะว่าการที่น่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ร้ายแรงติดต่อกันทันทีของ

แผ่นดินไหวขนาดใหญ่และน้ำท่วมจำนวนมากค่อนข้างจะน้อยมาก ดังนั้น อัตราส่วนความปลอดภัยสำหรับแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวเกินกว่า 1 จึงไม่ถือว่าเป็นข้อกำหนดบังคับ

ข้อกำหนดอีกข้อหนึ่ง ก็คือได้มีการกำหนดเป้าหมายที่จะซ่อมแซมบูรณะความเสียหายของเขื่อนป้องกันน้ำให้แล้วเสร็จภายในระยะเวลาอันสั้น โดยทั่วไปภายใน 14 วัน ในการที่จะทำงานให้ได้ตามเป้าหมายนี้ จำเป็นที่จะต้องนำหลักการออกแบบป้องกันแผ่นดินไหวตามสมรรถนะ ซึ่งจะต้องมีการตรวจสอบการเสียรูปของเขื่อนป้องกันน้ำท่วมที่เป็นไปได้ภายใต้สภาพแรงแผ่นดินไหวที่ออกแบบไว้ แล้วเปรียบเทียบกับระดับการเสียรูปหรือ เคลื่อนตัวของเขื่อนที่ยอมรับได้ ถ้าค่าที่ได้เกินกว่าขีดจำกัดที่ยอมรับให้ ตรวจสอบผลที่จะต้องมีการบรรเทาความเสียหายที่เกิดขึ้น ตามกรอบแนวความคิดนี้ ในบทความนี้จะแสดงให้เห็นว่าเกิดอะไรขึ้นกับเขื่อนป้องกันน้ำท่วมระหว่างเหตุการณ์แผ่นดินไหว Great East Japan ในปี 2011 และกรณีความสำเร็จในการบรรเทาความเสียหายที่เกิดขึ้น

### **ความเสียหายเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวแก่เขื่อนป้องกันน้ำท่วมในปี 2011**

รูปที่ 1 แสดงตำแหน่งของแม่น้ำและเขื่อนป้องกันน้ำท่วมที่จะได้กล่าวถึงในบทความนี้ สิ่งแรกก็คือ เขื่อนป้องกันน้ำท่วมของแม่น้ำโตเนะที่ซาวารา (รูปภาพที่ 1) แสดงให้เห็นถึงความเสียหายทั่วไปที่เกิดขึ้นสำหรับเขื่อนที่ตั้งอยู่บนดินเหนียวด้านล่าง: การจมตัวของดินด้านบนและรอยแยกตามทางยาวที่เกิดจากการแผ่ออกไปด้านข้างของดิน เช่นเดียวกันกรณีทั่วไปอื่น ๆ ที่พบตำแหน่งของเขื่อนนี้เคยเป็นส่วนหนึ่งของร่องน้ำ และมีการทับถมด้วยดินทรายตามธรรมชาติหรือกระบวนการก่อสร้าง ก่อให้เกิดสภาพพื้นดินที่เสี่ยงต่อการเกิดดินเหลว

กรณีศึกษาที่น่าสนใจก็คือดังที่แสดงไว้ในรูปภาพที่ 2 ซึ่งเกิดการเสียรูป เคลื่อนตัวออกตัวอย่างหนักได้เกิดขึ้น ถึงแม้ว่าจะเป็นดินเหนียว ซึ่งเป็นดินไม่ละลายออกไปได้ เพราะว่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นในเขื่อนป้องกันน้ำท่วมเป็นการจมตัวลงที่ส่วนบนและเกิดการแผ่ตัวออกด้านข้าง ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของการเคลื่อนตัวสืบ

เนื่องมาจากดินเหลวในตลิ่ง ทำนบป้องกันน้ำ ความเสียหายที่แสดงในรูปภาพที่ 2 ซึ่งให้เห็นว่าเกิดจากภาวะดินเหลวภายในตัวเขื่อนป้องกันน้ำท่วมเอง กลไกการวิบัติตามแนวความคิดนี้ถือว่าสิ่งที่ได้ศึกษามาก่อนโดย ซาซากิ และคณะ (1994) คาเนโกะ และคณะ (1996) สำหรับกรณีที่เกิดกับแม่น้ำทาคาชิ และคูชิโรในปี 1993 (รูปที่ 3):

- 1) เขื่อนป้องกันน้ำท่วมจมลงไปในดินด้านล่างที่เป็นดินเหนียวอ่อน เพราะว่าการเกิดยุบตัวของดิน
- 2) ส่วนที่จมลงมีสภาพการระบายน้ำออกที่ไม่ดี จากการซึมลงใต้ดินของน้ำฝนและการซึมขึ้นมาของน้ำใต้ดิน เพราะวาระดับของดินที่อยู่ต่ำกว่าผิวหน้าดิน และดินด้านข้างเป็นดินเหนียวที่น้ำซึมผ่านได้ไม่ดีเท่า
- 3) กระบวนการของการจมลงของและ ในต่อมากการขยายตัวออกด้านข้างของดินเกิดขึ้นเนื่องจากการที่ดินด้านล่างสูญเสียความคงตัว และ สูญเสียกำลังต้านทานการเกิดดินเหลว

ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการเกิดดินเหลวภายในโครงสร้างทำให้เกิดความยากลำบากในการตรวจสอบเขื่อนป้องกันน้ำท่วม และระบบการระบายน้ำออกสำหรับโครงสร้างชนิดนี้

รูปที่ 1 ตำแหน่งของความเสียหายในเขื่อนป้องกันน้ำท่วม

รูปภาพที่ 1 การเสียรูป และเคลื่อนตัวอย่างหนักของเขื่อนป้องกันน้ำท่วมที่แม่น้ำโตเนะ

รูปภาพที่ 2 การเสียรูป และเคลื่อนตัวอย่างหนักของเขื่อนป้องกันน้ำท่วมที่แม่น้ำฮิโนะ

รูปที่ 2 ภาพแสดงกลไกการเกิดดินเหลวภายในของเขื่อนป้องกันน้ำท่วม

### กระบวนการบรรเทาสาธารณภัยที่ประสบผลสำเร็จสำหรับความเสียหายที่เกี่ยวข้องกับดินเหลวในเขื่อนป้องกันน้ำท่วม

เพราะว่ามีการตระหนักถึงความปลอดภัยต่อแรงแผ่นดินไหวสำหรับเขื่อนป้องกันน้ำท่วมในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา จึงมีการจัดตั้งกระบวนการบรรเทาความเสียหายขึ้น แผ่นดินไหว Great

East Japan ในปี 2011ถือว่าเป็นโอกาสที่จะทดสอบระบบกระบวนการนี้ แต่กระบวนการบรรเทาความเสียหายที่ตั้งไว้ได้ออกแบบไว้เมื่อแผ่นดินไหวระดับ 1 ซึ่งเกิด 1 ครั้งทุก ๆ 50 ถึง 70 ปี ถึงแม้ว่าได้มีการใช้กรวดเพื่อระบายน้ำแล้วเสร็จที่โอมิกาวาสำหรับแม่น้ำโทเนะ ในขณะที่เสาเข็มทรายบดอัดได้นำมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพที่ชิโม- นากาโนะเมะ ในแม่น้ำนารุเซะ (รูปที่ 1) แต่เนื่องจากรายละเอียดที่ได้มีจำนวนมากไม่สามารถที่จะแสดงได้ในบทความนี้ทั้งหมด; จึงขอให้อ้างอิงกับ ไทวาทะ (2012)

ที่ซาเกอิในอิบารากิ เขื่อนกันแม่น้ำโตเนะได้มีการเสริมกำลังโดยการใส่กำแพงเข็มพืดเหล็กใต้ดิน (เพื่อลดการซึมไหลผ่านของน้ำ) ร่วมกันกับคันกันน้ำด้านแม่น้ำ ระหว่างที่เกิดแผ่นดินไหว ไม่เกิดการเสียรูป เคลื่อนตัวของดินในด้านที่อยู่ติดแม่น้ำ (รูปภาพที่ 3) ในทางตรงกันข้าม ด้านพื้นดินของเขื่อนป้องกันน้ำท่วมเสียรูปเคลื่อนตัวออกเนื่องจากการเกิดดินเหลวในดินฐานราก ซึ่งระดับน้ำใต้ดินอยู่ภายใน 50 เซนติเมตรใต้ระดับผิวดิน (จากการสำรวจของผู้แต่งบทความเมื่อเดือนเมษายน 2012) ส่วนโครงสร้างที่เสียหายได้ทำการแก้ไขโดยการตอกเข็มพืดลึก 8 เมตรตามแนวปลายของส่วนแนวลาดของคัน (รูปภาพที่ 4) รูที่อยู่เข็มพืดยอมให้เกิดการไหลออกของน้ำใต้ดินเพื่อให้ระดับน้ำในเขื่อนป้องกันน้ำท่วมมีระดับต่ำลงระหว่างที่ระดับน้ำอยู่สูงในแม่น้ำ

รูปภาพที่ 3 ด้านติดกับแม่น้ำของเขื่อนป้องกันน้ำท่วมของแม่น้ำโตเนะที่ซาเกอิ ที่ไม่เกิดความเสียหาย (การสร้างเขื่อนป้องกันน้ำท่วมขึ้นใหม่ได้เริ่มเมื่อเดือนเมษายน 2012)

รูปภาพที่ 4 การก่อสร้างขึ้นใหม่ในด้านพื้นดินของเขื่อนป้องกันน้ำท่วมที่แม่น้ำโตเนะในซาเกอิโดยการติดตั้งกำแพงเข็มพืดแบบมีรู

### การวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์

ผู้แต่งบทความขอเสนอการทำโมเดลของทรายเหลวเพื่อที่จะหาระดับสมรรถนะ (การเคลื่อนตัว) ของโครงสร้างภายใต้การสั่นไหวอย่างรุนแรง (โตวาฮาตะ และคณะ 1999 และ 2010) และสร้างโปรแกรมในการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ขึ้น รูปที่ 3 เป็นตัวอย่างโมเดลของเขื่อนป้องกันน้ำท่วมที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่ง



ระดับสมรรถนะ (การยุบตัวที่ส่วนบนสุด) ได้มีการทำให้ดีขึ้นโดยการใช้กำแพงเสาเข็มพืดที่ฝังลงไปใต้ดิน คันดินที่ใช้น้ำหนักถ่วงหรือทั้งสองอย่าง (รูปที่ 4) ผลของการวิเคราะห์การไหลดังที่แสดงในรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าการผสมผสานระหว่างกำแพงเข็มพืดและคันดินที่ใช้น้ำหนักถ่วงสามารถลดการยุบตัวที่ส่วนบนสุดได้ให้ต่ำกว่า 50 % หลังจากการสั่นไหวอย่างรุนแรงและดินไหลเป็นเวลา 20 วินาที

รูปที่ 3 โมเดลของเขื่อนป้องกันน้ำท่วมที่เกิดดินเหลวในฐานรากสำหรับการวิเคราะห์ระดับสมรรถนะของโครงสร้าง

รูปที่ 4 กำแพงเสาเข็มพืดและคันดินแบบถ่วงน้ำหนักเพื่อการบรรเทาความเสียหาย

## บทสรุป

บทความนี้มีเนื้อหาเกี่ยวกับความเสียหายเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวของเขื่อนป้องกันน้ำท่วมที่เกิดขึ้นระหว่างเหตุการณ์แผ่นดินไหว 2011 Great East Japan ในบรรดาความเสียหายที่เกิดขึ้น โอกาสของการเกิดดินเหลวภายในแกนเขื่อนป้องกันน้ำท่วมถือว่าเป็นเรื่องใหม่ที่สำคัญ ในทางตรงกันข้าม การปรับปรุงแก้ไขหลายวิธีสามารถใช้งานได้ดีและ กำแพงเข็มเหล็กแบบฝังก็เป็นสิ่งหนึ่งที่ได้นำมาใช้ ท้ายที่สุด การวิเคราะห์ระดับความสามารถของเขื่อนป้องกันน้ำท่วมต่อภาวะดินเหลวสามารถทำได้โดยใช้โมเดล viscous liquid



(หน้าที่ 9 – 14)

## ความเสียหายที่เกิดสลิปเนื่องจากดินเหลวต่อที่อยู่อาศัยและสาธารณูปโภคใต้ดิน

โดย ชูชุมุ ยาสุตะ ศาสตราจารย์ และ คาอิซูเกะ อิซากาวา ผู้ช่วยคณบดีวิศวกรรมศาสตร์โยธา มหาวิทยาลัยโตเกียว เดนกิ

แผ่นดินไหว Great East Japan ในปี 2011 ซึ่งมีขนาด Mw = 9.0 เกิดขึ้นในมหาสมุทรแปซิฟิก ที่ระยะห่างประมาณ 130 กิโลเมตร นอกชายฝั่งตะวันออกเฉียงเหนือจากเกาะเมื่อวันที่ 11

มีนาคม 2011 ปรากฏการณ์ดินเหลวได้เกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้างบนพื้นที่ถมทะเลตามรอบอ่าวโตเกียว ถึงแม้ว่าระยะทางของศูนย์กลางแผ่นดินไหวมีระยะทางกว้างใหญ่ ประมาณ 380 ถึง 400 กิโลเมตร แผ่นดินส่วนมากได้มีการถมขึ้นในพื้นที่อ่าวโตเกียวตั้งแต่ในทศวรรษที่สิบเจ็ด ดินเหลวได้เกิดขึ้นในแผ่นดินไหวครั้งก่อน ๆ เช่นแผ่นดินไหวคันโตในปี 1923 และแผ่นดินไหวชิบาเคน-โตโฮ- โอกิเมื่อปี 1987 อย่างไรก็ตามแผ่นดินไหว Great East Japan เป็นครั้งแรกที่ปรากฏว่าเกิดดินเหลวสำหรับพื้นที่บริเวณกว้างใหญ่ และทำความเสียหายแก่บ้านเรือน สาธารณูปโภค และถนนอย่างรุนแรงเช่นนี้

## การสำรวจสถานที่เกิดดินเหลว

ผู้แต่งบทความได้เริ่มศึกษาสำรวจพื้นที่อ่าวโตเกียวในวันรุ่งขึ้นหลังจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวเพราะว่ารถไฟทั้งหมดในพื้นที่อ่าวโตเกียวได้หยุดเดินทันทีหลังจากเกิดแผ่นดินไหวขึ้น จนกระทั่งเที่ยงคืน ในการตรวจสอบนี้ ถนนที่มีการตรวจสอบพบ การปะทุของทราย และไม่ได้ตรวจสอบพบนั้น ได้มีการทำตำแหน่งไว้บนแผนที่ (รูปที่ 1) พื้นที่ที่ล้อมรอบด้วยเส้นสีแดงคือพื้นที่ที่เกิดดินเหลว แต่พื้นที่เล็ก ๆ ในพื้นที่บางส่วนไม่เกิดดินเหลวเพราะว่าพื้นดินได้มีการปรับปรุงโดยวิธีการบดอัดทรายหรือวิธีการอื่น ๆ ที่จะแสดงภายหลัง ซึ่งต้องใช้เวลาประมาณ 10 วันเพื่อใช้ในการตรวจสอบพื้นที่ทั้งหมดตั้งแต่โอดาอิบา ในโตเกียวไปจนถึงเมืองชิบะ ผ่านไปทางเมืองอุรายาซุ อิซากาวา และ นาราชิโน แผนที่ของพื้นที่ดินเหลวได้แสดงไว้โดยมีพื้นฐานมาจากการสำรวจในขั้นแรก (ยาสุตะและฮาราดะ, ปี 2011)

เนื่องจากความเสียหายเนื่องมาจากภาวะดินเหลวต่อบ้านเรือน คันป้องกันน้ำ ถนน ท่อต่าง ๆ และ ท่าเรือ เป็นภัยที่ร้ายแรง ส่วนพัฒนาพื้นที่เมืองคันโตของกระทรวงที่ดิน สาธารณูปโภค การขนส่งและการท่องเที่ยวต้องการที่จะทำการศึกษาร่วมกันกับ JGS เพื่อกำหนดสถานที่เกิดดินเหลวรูปที่ 2 เป็นแผนที่ของพื้นที่ดินเหลวจากการประมาณ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจากแผนที่ที่กำหนดไว้เบื้องต้น

รูปที่ 1 วิธีในการตรวจสอบพื้นที่ดินเหลวหรือพื้นที่ที่ไม่เกิดดินเหลว

รูปที่ 2 พื้นที่ที่เกิดดินเหลวจากโอดาอิบาโนโตเกียวไปจนถึงเมืองชิบะ

### สภาพดินในพื้นที่ที่เกิดดินเหลว

ดังที่แสดงในรูปที่ 2 พื้นที่ที่เกิดความเสียหายจากดินเหลวอย่างหนักคือ ชินกิบาโนโตเกียว ไปจนถึงเมืองชิบะ ผ่านไปทางเมือง อูรายาสึ อิชิกาว่า ฟุนาบาชิ และ นาราชิโน ในเขตชิบะ พื้นที่ที่มีการถมที่ดินขึ้นมาในพื้นที่นี้ได้มีการก่อสร้างขึ้นภายหลังปี 1966 ในขั้นตอนการถมทะเล ดินที่ถูกลอกออกมาได้นำมาถมตั้งแต่พื้นที่ท้องทะเลไปจนถึงความสูงประมาณระดับน้ำทะเล แล้วพื้นดินด้านผิวนั้นจึงใช้ทรายถม รูปที่ 3 แสดงขั้นตอนในการทำงานลอกดินออก ดินจากท้องทะเลถูกขุดขึ้นมาโดยหัวตัด แล้วดูดขึ้นพร้อมกับน้ำโดยใช้เครื่องปั๊ม ส่งถ่ายเคลื่อนย้ายโดยท่อส่งแล้วปล่อยวัสดุออกที่ปลายท่อ เนื่องจากดินที่ลอกออกมาประกอบไปด้วยน้ำ ดินเหนียว และดินละเอียดจำนวนมาก ดินเหล่านี้มักจะกองกันไว้อยู่ใกล้ตำแหน่งปลายท่อส่งมากกว่าจุดที่อยู่ไกลกว่าอื่น ๆ นอกจากนี้ ตำแหน่งของท่อส่งนี้มีการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ส่งผลให้หน้าตัดโปรไฟล์ของดินไม่มีความสม่ำเสมอ หลังจากรวมการถมดินและถมทรายที่ผิวน้ำแล้ว ก็ไม่จำเป็นต้องมีงานปรับปรุงคุณภาพดินยกเว้นพื้นที่พิเศษ ที่ซึ่งเข็มทรายบดอัด หรือ เข็มกรวด และวิธีการอื่น ๆ ที่ได้นำมาใช้เพื่อป้องกันดินเหลว

เนื่องจากได้มีข้อมูลถึง 3 ชุดเผยแพร่โดย JGS เขตชิบะ และเทศบาลมหานครโตเกียว สำหรับพื้นที่ที่เกิดดินเหลว ผู้แต่งบทความได้ประมาณหน้าตัดของดินไว้ 11 เส้นซึ่งตั้งฉากกับแนวชายฝั่งตามข้อมูลเหล่านี้ รูปที่ 4 แสดงหน้าตัดของชั้นดินตัดตามเส้นในอุรายาสึ 3-3' ร่วมกันกับพื้นที่ที่สังเกตเห็นทรายเป็นรูปร่างขึ้นมาจากพื้นที่ที่ทรายเป็นรูปร่างขึ้นเป็นพื้นที่เดียวกันกับพื้นที่ที่มีการถมทะเลขึ้นมาซึ่งอยู่ด้านทะเลจากแนวกำแพงกันน้ำทะเลเก่าที่มีอยู่ในพื้นที่ดินถมทะเลนี้ ชั้นที่เติมดินถมขึ้นมาเป็นทราย (B) และชั้นของดินทรายที่ทำการลอกออกมา (F) มีค่า SPT ที่ต่ำระหว่าง 2 ถึง 8 ได้มีการนำมาถมอยู่ที่ช่วงความหนา 6 ถึง 9 เมตร ชั้นทรายดินตะกอน ( $A_s$ ) ที่มีค่า SPT ระหว่าง 10 ถึง 20 มีความหนาประมาณ 4 ถึง 8 เมตร ชั้นดินเหนียวดินตะกอน ( $A_c$ ) ที่อ่อนนุ่มวางทับถมอยู่

ภายใต้ชั้น  $A_s$  มีความหนาประมาณ 10 ถึง 40 เมตร โดยที่ชั้นดินมีความหนาเพิ่มขึ้นในด้านทะเล ชั้นทรายแน่น ( $D_s$ ) ที่มีค่า SPT มากกว่า 50 วางอยู่ที่ชั้นนี้ ระดับน้ำอยู่ที่ระดับ GL -0.5 เมตร จนถึง -3 เมตร โดยที่ลดค่าระดับลงในทิศทางไปยังด้านทะเลในทางตรงกันข้าม สำหรับพื้นที่ที่ไม่ได้สังเกตเห็นการปะทุของทรายเป็นรูปร่างขึ้น ชั้นดิน  $A_s$  ได้มีการทับถมตั้งแต่ระดับผิวดิน ดังนั้นสามารถที่จะทำการสรุปได้ว่า ชั้นของ  $A_s$  ไม่เกิดการเหลวโดยแผ่นดินไหว Great East Japan ในปี 2011 ถึงแม้ว่าบางส่วนที่เกิดการหลวมหลุดออกมาบ้างอาจจะเกิดการเหลวในพื้นที่ดินถม และบางส่วนของดินทรายที่ลอกออกมาได้ระดับน้ำอาจจะเกิดการเหลวได้ ลักษณะส่วนประกอบของชั้นดินเป็นเช่นเดียวกันกับหน้าตัดดิน 10 หน้าตัดอื่น ๆ ถึงแม้ว่าความหนาของชั้นดินแต่ละชั้นจะมีความแตกต่างกัน

คณะกรรมการทางด้านเทคนิคที่ตั้งขึ้นมาโดยเมืองอุรายาสึ และมีประธานกรรมการคือศาสตราจารย์ อิชิฮาระได้ทำการตรวจสอบชั้นดินอย่างละเอียดโดยการเจาะดิน ค่าทดสอบ SPT, CPT, ค่าลึกลงของ PS ตัวอย่างดินที่คงสภาพเดิมไว้ การทดสอบแรงอัดสามแกนแบบ cyclic และอื่น ๆ รวมทั้งข้อมูลที่สำคัญต่าง ๆ เมื่อเดือนธันวาคม 2011 ค่าความถี่ที่กระจายออกไปในกราฟสำหรับค่า SPT,  $N_1$  และมวลรวมละเอียด และค่า  $F_c$  ของชั้นดิน F และชั้นดิน  $A_s$  ได้ถูกเปรียบเทียบไว้ในรูปที่ 5 (1) ถึง (4) มวลรวมละเอียดของชั้นดิน F มีการกระจายกระจายมากและมีค่ามากกว่ามวลรวมละเอียดของชั้นดิน  $A_s$  ถึงแม้ว่าชั้นดิน F จะแทบนำมาจากชั้นดิน  $A_s$  ความแตกต่างนี้น่าจะสืบเนื่องมาจากการขาดดินทรายตะกอนสำหรับงานถมทะเล เนื่องจากพื้นที่ที่มีการลอกดินนี้มีตำแหน่งอยู่เหนือสามเหลี่ยมปากแม่น้ำอิโด ดินทรายมีจำนวนมากพอสำหรับการถม จึงต้องมีการขุดดินเหนียวตะกอนขึ้นมาและผสมกับดินทรายตะกอน ค่าเฉลี่ยมวลรวมละเอียด ในชั้นดิน F มีค่าสูงมากถึง 43.8 % อย่างไรก็ตาม ค่าดัชนีพลาสติก,  $I_p$  มีค่าไม่สูงนักถึงแม้ว่ามวลรวมละเอียดจะเป็นจำนวนมาก ค่า  $N_1$  ของชั้น F จะมีค่าต่ำกว่าชั้น  $A_s$  ตัวอย่างที่อยู่ในสภาพเดิมได้ถูกเก็บขึ้นมาจาก 9 จุดเพื่อนำมาทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบ cyclic และค่าโมดูลัสแรงเฉือน การกระจายค่าของอัตราส่วนแรงเฉือนที่ทำให้เกิดภาวะดินเหลวในรอบการทดสอบ 20 รอบได้รับการ

ทดสอบโดยวิธีทดสอบแรงอัดสามด้านแบบ cyclic  $R_L$  ( $N_L=20$ ,  $DA=5\%$ ) สำหรับชั้นดิน F และ As ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6 ค่า  $R_L$  สำหรับชั้นดิน F และ As มักจะอยู่ระหว่าง 0.25 ถึง 0.30 และ 0.30 ถึง 0.40 ตามลำดับ ถึงแม้ว่าค่าที่ได้จะกระจายกระจายมากในชั้นดิน F ดังนั้นสามารถจะสรุปได้ว่าดินในชั้นดิน F สามารถละลายตัวออกได้ง่ายกว่าดินชั้น As

รูปที่ 3 ขั้นตอนในงานลอกดินออก

รูปที่ 4 หน้าตัดของชั้นดินจากการประมาณ

รูปที่ 5 การกระจายค่าของ  $N_L$  และ  $F_c$  สำหรับดินลอกและทรายตะกอน

รูปที่ 6 การกระจายค่าของอัตราส่วนความเค้นแรงเฉือนที่ก่อให้เกิดภาวะดินเหลว

### ขั้นตอนการเสียวกำลังเป็นดินเหลว

เนื่องจากแผ่นดินไหวเกิดขึ้นเมื่อเวลา 14:46 ในช่วงบ่ายของวันศุกร์ ภาพถ่ายและภาพยนตร์ที่สำคัญเป็นจำนวนมากจึงได้รับการบันทึกไว้ที่หลายจุดตามอ่าวโตเกียวเพื่อนำมาเรียนรู้ถึงขั้นตอนและกลไกการเกิดดินเหลว ในจำนวนรูปภาพเหล่านี้เป็นภาพถ่ายที่บันทึกโดย นายคัตสึโนริ โอกาว่า ในช่วงทันทีหลังจากเกิดแผ่นดินไหวที่มาอิฮามา 3-chome ในเมืองอุรายาซุ ที่แสดงให้เห็นไว้ในรูปภาพที่ 1 (A-D):

<<< การสั่นสะเทือนเนื่องจากแผ่นดินไหวเริ่มเมื่อ 14:47 ในอุรายาซุ >>>

A <14:56>: เกิดการพ่นน้ำโคลนออกมา เริ่มที่ด้านตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งใช้เวลาหลายนาทีกว่าที่จะเกิดการปะทุของดินหลังจากแผ่นดินไหวได้สงบลง

B <15:01>: น้ำโคลนที่ปะทุขึ้นได้แผ่ออกและทับถมบนถนนที่ล้นน้อย

<<< อาฟเตอร์ช็อคขนาดรุนแรงเกิดที่ อุรายาซุ ในเวลา 15:16 >>>

C <15:21>: ถนนทางด้านตะวันตกเฉียงใต้ปกคลุมไปด้วยน้ำโคลน ท่อน้ำกำลังจะแตก

D <15:22>: บ้านจำนวนมากทรุดตัวและเสียหาย และรถยนต์จม

ลงในน้ำโคลนที่ปะทุขึ้นมา

ผู้แต่งบทความได้ส่งแบบสอบถามไปยังผู้อยู่อาศัยประมาณ 30 คนในพื้นที่ อิริฟูเนะ ซึ่งตั้งอยู่ในเมืองอุรายาซุเพื่อถามถึงเวลาที่เกิดเหตุการณ์ปะทุและความสูงของน้ำโคลนที่ปะทุขึ้นมา คำตอบได้รวบรวมไว้ในรูปที่ 7 ประมาณ 1 ใน 3 ของผู้ตอบได้สังเกตเห็นน้ำโคลนปะทุขึ้นทันทีที่เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว อย่างไรก็ตามอีก 1 ใน 3 ได้สังเกตเห็นน้ำโคลนกระจายกระจายขึ้นมา 5 ถึง 9 นาทีหลังจากเหตุการณ์ คนอื่น ๆ สังเกตเห็นน้ำโคลนที่เวลาอื่น ความสูงของน้ำโคลนไม่สูงมากนักคือน้อยกว่า 9 เซนติเมตรเป็นส่วนใหญ่ภายหลังเหตุการณ์แผ่นดินไหว ประมาณ 2 ใน 3 ของผู้ตอบคำถามตอบว่าน้ำโคลนยังคงปะทุขึ้นมาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งอาฟเตอร์ช็อค และประมาณ 3 ใน 4 ได้ตรวจพบน้ำโคลนที่ทางตรงกันข้าม ประมาณ 3 ใน 4 ได้พบเห็นการพ่นน้ำโคลนออกมาภายหลังจากอาฟเตอร์ช็อค และความสูงของน้ำดูเหมือนจะมากกว่าความสูงหลังจากแผ่นดินไหว ซึ่งหมายความว่า การปะทุของดินเร็วขึ้นเนื่องจากแรงอาฟเตอร์ช็อคที่บางจุด คำถามเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการทรุดตัวของบ้าน อาจจะเป็นการลำบากในการตอบคำถามต่อผู้อยู่อาศัย อย่างไรก็ตาม ผู้อยู่อาศัยจำนวน 1/3 และ อีก 1/3 ตอบว่าการทรุดตัวของบ้านของเขาเป็นศูนย์ และ 10 และ 19 เซนติเมตรตามลำดับ ภายหลังการเกิดแผ่นดินไหว และผู้อยู่อาศัยจำนวนมากยังคงจำการทรุดตัวนี้ได้ในวันต่อมา

ตามข้อมูลที่ได้รับจากเขตอิมากาว่า ผู้อยู่อาศัยบางท่านได้ให้การว่าไม่พบการปะทุของดินระหว่างเหตุการณ์แผ่นดินไหว แต่พบในระหว่างอาฟเตอร์ช็อค

รูปภาพที่ 1 รูปภาพการเกิดเหตุการณ์ตามลำดับ

รูปที่ 7 แบบสอบถามผู้อยู่อาศัยในอิริฟูเนะ

### ผลของการสั่นไหวที่ยาวนานต่อภาวะดินเหลว

รูปที่ 8 แสดงความเร่งของพื้นดินที่ผิวหน้าระหว่างที่เกิดแผ่นดินไหวและอาฟเตอร์ช็อค ค่าความเร่งที่ผิวหน้าไม่สูงนัก ประมาณ  $160 \text{ cm/s}^2$  จนถึง  $230 \text{ cm/s}^2$  ถึงแม้ว่าจะเกิดดินเหลว

อย่างรุนแรง เครื่องตรวจสอบค่าความเร่ง ที่วัดได้ที่ K-NET Inage ในขณะที่ยังพบเห็นทรายปะทุ มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพราะช่วงเวลาของการเกิดดินเหลวสามารถตรวจสอบได้จากข้อมูลคลื่นที่ได้มีการบันทึกไว้ รูปที่ 9 แสดงกราฟค่าความเร่งที่อินาจิร่วมกับที่ K-NET อูรายาซุ ซึ่งได้ทำการบันทึกไว้ที่พื้นดิน ซึ่งไม่เกิดดินเหลว ข้อมูลที่ได้บันทึกไว้ทั้งสองเริ่มที่แทบจะเวลาเดียวกัน; 14:46:16 ที่อินาจิ และ 14:46:15 ที่อูรายาซุ สำหรับคลื่นที่เกิดในอูรายาซุ ค่าความถี่มีได้เปลี่ยนมากมายนักหลังจากที่เกิดค่าความเร่งสูงสุดซึ่งพบอยู่ที่ประมาณ 118 วินาที (14:48:13) ในทางตรงกันข้าม ค่าความถี่เปลี่ยนไปยังค่าที่ต่ำหลังจากที่เกิดได้จุดสูงสุด 2 ครั้งในเวลา 120 วินาที (14:48:16) และ 126 วินาที (14:48:22) ดังนั้น จึงอาจตัดสินได้ว่าการเกิดดินเหลวอยู่ที่ประมาณช่วงเวลา 14:48:16 ไปจนถึง 14:48:22 ที่ K-NET อินาจิ ซึ่งหมายความว่าเกิดการเกิดความเค้นเฉือนหลายรอบ ประมาณ 20 รอบจากเวลา 110 วินาที อาจก่อให้เกิดดินเหลวที่สถานที่ K-NET อินาจิ และการสั่นไหวยังคงมีอยู่ต่อไปเป็นเวลานาน ภายหลังจากเกิดดินไหลขึ้นมา โดยการอ้างอิงถึงกราฟค่าความเร่งที่ K-NET อูรายาซุ การสั่นไหวของพื้นดินที่อินาจิได้เกิดต่อเนื่องต่อไปเป็นเวลาประมาณ 3 นาทีหลังจากดินเหลว

สิ่งหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อพื้นดินก็คือการสั่นไหวของพื้นดินระหว่างอาฟเตอร์ช็อค ค่าความเร่งสูงสุดระหว่างอาฟเตอร์ช็อคเกือบจะเท่ากับครั้งหนึ่งที่ยังพบระหว่างเหตุการณ์แผ่นดินไหวในพื้นที่อ่าวโตเกียวดังที่แสดงในรูปที่ 8 ถึงแม้ว่า ดังที่ได้แสดงไว้ข้างต้น การปะทุของดินเกิดขึ้นหลังอาฟเตอร์ช็อคในบางพื้นที่ ดังนั้นเหตุผลหลักของการเกิดดินเหลวอย่างรุนแรงคือผลของระยะเวลาการสั่นไหวที่ยาวนานระหว่างเหตุแผ่นดินไหว ผู้แต่งบทความพยายามที่จะดำเนินการทดสอบแรงเฉือนบิดแบบ cyclic และการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของผลกระทบจากการสั่นสะเทือนเป็นเวลานานสำหรับการเกิดดินเหลว ลักษณะของคลื่นแรงเฉือนได้นำมากระทำต่อตัวอย่างทดสอบคลื่นรูปชายนีครีฟเป็นจำนวน 20 รอบ และคลื่นแรงแผ่นดินไหวซึ่งบันทึกไว้ระหว่างแผ่นดินไหวและอาฟเตอร์ช็อคที่อูรายาซุ K-NET ในกรณีของคลื่นแผ่นดินไหว ความดันน้ำเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เช่นเดียวกันความเค้นเฉือนดังแสดงไว้

ในรูปที่ 10 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้น  $R(\tau_c/\sigma')$  สำหรับคลื่นรูปชายนีครีฟ หรือ  $R_{max}(\tau_{max}/\sigma')$  สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว และ ความดันน้ำที่เหลืออยู่  $u/\sigma'_c$  ได้ถูกพล็อตในรูปที่ 11 เมื่อ  $R=0.27$  สำหรับ  $u/\sigma'_c=1.0$  และ  $R_{max}=0.31$  สำหรับ  $u/\sigma'_c=1.0$ , ค่าการปรับแก้  $C_w$  ตามมาตรฐาน JRA (2002) มีค่าเท่ากับ 0.82. แล้วค่าอัตราส่วนความปลอดภัยต่อดินเหลว  $F_L$  และความน่าจะเป็นเกิดดิน  $P_L$  ได้มีการวิเคราะห์สำหรับข้อมูลหลุมเจาะทุกหลุมที่ใช้ในการประมาณหน้าตัดพื้นดิน 11 หน้าตัดภายใต้เงื่อนไขที่ว่า  $C_w=0.82$  และ 1.0. ในการประมาณค่าเหล่านี้  $R_L$  คิดมาจากค่า SPT และ  $F_c$  โดยการใช้สูตรที่ได้เสนอโดยคณะกรรมการเทคนิคของเมืองอูรายาซุ รูปที่ 12 แสดงค่า  $F_L$  ที่ได้ประเมินไว้สำหรับข้อมูลดินที่เจาะได้ในเมืองอูรายาซุที่เกิดดินเหลว ถ้า  $C_w$  ได้ถูกสมมติเท่ากับ 1.0 ค่า  $F_L$  ทั้งหมดได้ถูกประมาณไว้ว่ามากกว่า 1.0 ในขณะที่ค่า  $F_L$  จะน้อยกว่าถ้า  $C_w$  มีค่าเท่ากับ 0.82 รูปที่ 13 เป็นการเปรียบเทียบ  $P_L$  สำหรับข้อมูลการเจาะดินทั้งหมดโดยมีสมมติฐานของค่า  $C_w=0.82$  และ  $C_w=1.0$  ถ้า  $C_w=0.82$  ค่า  $P_L$  จากจุดที่เกิดดินเหลวจะคำนวณได้ว่ามีค่ามากกว่า 10 และระดับความรุนแรงของดินเหลวสามารถแสดงให้เห็นชัดได้

รูปที่ 8 การเปรียบเทียบระดับค่าความเร่งระหว่างที่เกิดแผ่นดินไหวและอาฟเตอร์ช็อค โดย K-NET

รูปที่ 9 การเปรียบเทียบระดับค่าความเร่งที่บันทึกไว้ที่ K-NET Inage และ อูรายาซุ

รูปที่ 10 ความเค้นเฉือน ความเครียดเฉือน และค่าเปลี่ยนแปลงความดันน้ำในดิน

รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเค้นเฉือนและ ค่าเปลี่ยนแปลงความดันน้ำในดิน

รูปที่ 12 การวิเคราะห์ค่า  $F_L$  ที่มากกว่า 1 ใน เมืองอูรายาซุ

รูปที่ 13 ผลของ  $C_w$  กับ  $P_L$

### การยุบตัวและเอียงตัวของบ้านที่อยู่อาศัย

ตามข้อมูลการทำลายหรือถอนสิ่งปลูกสร้างโดยกระทรวงที่ดิน สาธารณูปโภค การขนส่ง และการท่องเที่ยว ที่อยู่

อาศัยประมาณ 27,000 หลังได้เกิดความเสียหายเนื่องมาจากการเกิดดินเหลว (ตารางที่ 1) รูปภาพที่ 2 (1-2) แสดงบ้านที่เสียหายจากภาพที่ถ่ายจากภายในและภายนอก ตามลำดับ บ้านเกิดการยุบตัวและเอียงไปในอัตราส่วนประมาณ 40/1,000 ในบ้านที่เกิดการเอียงตัวอย่างมาก ผู้อยู่อาศัยรู้สึกกังวลและไม่สามารถอาศัยอยู่ภายในบ้านได้หลังจากแผ่นดินไหว อย่างไรก็ตามบ้านที่เสียหายเนื่องจากดินเหลวสามารถตัดสินได้ว่าเป็นความเสียหายบางส่วนหรือต้องซ่อมแซมสำหรับช่วงแผ่นดินไหว เพราะว่าไม่มีความเสียหายกับกำแพงและหน้าต่าง ถึงควรจะต้องพิจารณาทั้งการทรุดตัวและการเอียงตัวของโครงสร้างบ้าน

ในเดือนพฤษภาคม คณะรัฐมนตรีของญี่ปุ่นได้ประกาศมาตรฐานใหม่สำหรับการประเมินความเสียหายของบ้านที่อยู่อาศัยโดยใช้ปัจจัย 2 ประการ การทรุดตัวและการเอียงตัว ดังที่แสดงในตารางที่ 2 จำนวนของที่อยู่อาศัยที่ได้รับความเสียหายในเมืองอุรยาซุตามมาตรฐานใหม่ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3 ร่วมกับกับจำนวนที่นับไว้ตามมาตรฐานเก่า (เมืองอุรยาซุ ในปี 2011) จำนวนของที่อยู่อาศัยที่ถูกทำลายทั้งสิ้นและบางส่วนมีจำนวนมากขึ้นอย่างมาก และจำนวนของบ้านที่เสียหายเกินกว่าที่ถือว่าถูกทำลายบางส่วนเพิ่มขึ้นเป็น 3,680 หลัง

ดังที่ได้แสดงไว้ข้างต้น การเกิดดินเหลวมีผลเกี่ยวเนื่องมาจากอาฟเตอร์ช็อค ไม่เพียงแต่ปรากฏการณ์ดินเหลวเท่านั้นแต่ยังรวมไปถึงการทรุดตัวและเอียงตัวเช่นกันที่มีผลเนื่องมาจากอาฟเตอร์ช็อค ระดับน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นหลังจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวและน้ำโคลนที่ปะทุขึ้นมาจากด้านล่างปกคลุมพื้นดินจนกระทั่งอาฟเตอร์ช็อคในหลาย ๆ จุด หลังจากนั้นการทรุดตัวของบ้านจะถูกกระตุ้นระหว่างอาฟเตอร์ช็อคโดยที่ระดับขนาดการสั่นสะเทือนน้อยกว่าที่เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวดังที่แสดงในรูปที่ 14

ผู้อยู่อาศัยจำนวนมากตามแนวอ่าวโตเกียวจะต้องพบกับปัญหาที่ใหญ่หลวงว่าจะสามารถซ่อมแซมบ้านที่เสียหายให้ใช้งานได้หรือไม่ ปัญหาที่มีความซับซ้อนก็คือการที่จะเกิดดินเหลวอีกครั้งหรือใหม่สำหรับอาฟเตอร์ช็อคหรือแผ่นดินไหวในอนาคตไม่เพียงแต่การที่จะบูรณะซ่อมแซมขึ้นใหม่แต่ยังมีมาตรการป้องกันเหตุการณ์ดินเหลวขึ้นใหม่ แต่ปัญหาที่จะเกิดขึ้นคือเรื่องราคาและเทคนิคในการซ่อมแซมพื้นที่ที่อยู่ภายใต้โครงสร้างที่มีอยู่

การพัฒนาและมาตรการต่าง ๆ สำหรับการปรับปรุงพื้นที่เพื่อป้องกันดินเหลวสำหรับที่อยู่อาศัยที่ไม่มีอยู่ในปัจจุบันได้มีการจัดเตรียมไว้โดยหลายองค์กรแล้ว ยิ่งไปกว่านั้นในการขั้นตอนมาตรการพิเศษในการปรับปรุงพื้นที่โดยการลดระดับน้ำใต้ดินก็ได้มีการศึกษาอยู่เช่นกัน

ตารางที่ 1 จำนวนของบ้านที่ได้รับความเสียหายเนื่องจากดินเหลว  
รูปภาพที่ 2 บ้านที่เกิดการทรุดตัวและเอียงตัวอย่างหนักในเมืองอุรยาซุ

ตารางที่ 2 มาตรฐานกระประเมินความเสียหายของบ้านที่พักอาศัยอันใหม่

ตารางที่ 3 จำนวนของบ้านที่ได้รับความเสียหายในเมืองอุรยาซุ โดยมาตรฐานเก่าและมาตรฐานใหม่

รูปที่ 14 ผลที่อาจเกิดขึ้นจากอาฟเตอร์ช็อคสำหรับการทรุดตัวของบ้านที่อยู่อาศัย

### ความเสียหายแก่ทางระบายน้ำและแมนโฮลเนื่องจากการกระฉอกออกของดินเหลว

ปรากฏการณ์แปลก ๆ การปูดขึ้นของดิน การโก่งเดาะ หรือ การดันกันของดิน ได้ถูกบันทึกไว้ที่หลาย ๆ จุดทางเดินดังที่แสดงไว้ในรูปภาพที่ 3 ในหลายจุดในพื้นที่อ่าวโตเกียว แรงดันอาจเกิดขึ้นที่เส้นรอบรูปเนื่องจากการเกิดการกระฉอกขึ้นมาของดินเหลวดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 15(1) เพราะว่าคาร์บอนไดออกไซด์มีความต่อเนื่องเป็นเวลานานภายหลังจากการเกิดดินเหลว รูปที่ 16 แสดงทางเดินที่เกิดการปูดขึ้นมาของดินในเมืองอุรยาซุร่วมกับเส้นบอกระดับความสูงของความหนาชั้นดิน F ที่อยู่ภายใต้ระดับน้ำใต้ดินสามารถกล่าวได้ว่าการปูดขึ้นของดินเกิดขึ้นเมื่อส่วนล่างสุดของดินชั้น F หรือชั้นที่เกิดการละลายออกของดิน มีแนวลาดเอียง ข้อมูลนี้แสดงว่าการโก่งเดาะในแนวราบของชั้นผิวดินอาจจะเกิดขึ้นได้เนื่องจากความเค้นอัดที่สูงเฉพาะจุดดังที่แสดงในรูปที่ 15(2) อย่างไรก็ตาม การศึกษาที่มากขึ้นเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับกลไกของการโก่งเดาะนี้

สำหรับโครงสร้างระบายน้ำ ท่อฝังใต้ดินมีการเบี่ยงเบนหรือ

แตกหัก รอยต่อถูกแยกออก และท่อถูกเติมไปด้วยน้ำโคลน แมนโฮลจำนวนมากถูกเขื่อนออกในแนวราบ และเติมไปด้วยน้ำโคลนใน ขณะที่แมนโฮลจำนวนหนึ่งลอยขึ้น ถึงแม้ว่ากลไกของความเสียหายเช่นนี้ได้เป็นที่ศึกษากันอยู่ แนวความคิดหนึ่งของผู้แต่งบทความก็ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 17 ดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น การกระโดดออกของพื้นดินที่เกิดดินเหลวอาจจะเกิดขึ้นได้เนื่องจาก ช่วงระยะเวลาที่ยาวนานของการสั่นสะเทือนและส่งผลให้เกิดแรงดันของถนน โดยการที่เกิดการเคลื่อนตัวเช่นเดียวกันกับพื้นดิน ท่อใต้ดินอาจจะเกิดการเคลื่อนตัวคดไปคดมาอย่างรุนแรงในแนวนอน ส่งผลให้เกิดการตึงกันหรือการแตกหักของรอยต่อ และในที่สุดน้ำโคลนเข้ามาอยู่ในท่อ แมนโฮลอาจจะถูกตัดขาดเนื่องจากแรงในแนวนอนและน้ำโคลนเข้ามากรอกอยู่ข้างใน อย่างไรก็ตาม น้ำโคลนที่เข้ามาอยู่ในท่อระบายน้ำและแมนโฮลอาจจะทำให้ไม่เกิดการลอยของโครงสร้าง

รูปภาพที่ 3 การปูดขึ้นของทางเดินที่ทากาฮามา เมืองอิซิกาวา

รูปที่ 15 กระบวนการปูดขึ้นของดินที่เป็นไปได้ทั้งสอง

รูปที่ 16 ทางเดินที่ปูดขึ้นในเมืองอุรายาซุแสดงร่วมกับเส้นบอกระดับความสูงของความหนาชั้นดิน F ที่อยู่ภายใต้ระดับน้ำใต้ดิน

รูปที่ 17 ความเสียหายชนิดหนึ่งในแมนโฮลและท่อใต้ดิน

### ปัญหาการจราจรเนื่องมาจากทรายปะทุและการยุบตัวของดิน

การเกิดการปะทุขึ้นมาของทรายและการยุบตัวของพื้นดินขนาดใหญ่เกิดขึ้นในพื้นที่ที่เกิดดินเหลว ความหนามากที่สุดของทรายปะทุและการยุบตัวของพื้นที่ที่มากที่สุดสามารถสังเกตได้โดยผู้แต่งบทความอยู่ที่ประมาณ 30 เซนติเมตร และ 50 เซนติเมตรตามลำดับ ครั้งนี้ถือว่าเป็นเหตุการณ์แรกสำหรับผู้แต่งบทความที่ได้เห็นทรายปะทุขนาดหนาเท่านี้ในญี่ปุ่น อย่างไรก็ตาม ผู้แต่งผู้หนึ่งได้เห็นการปะทุและการยุบตัวเช่นเดียวกันนี้ในเมืองโครส์เซิร์ทระหว่างแผ่นดินไหวในเดือนกันยายน 2010 และอาฟเตอร์ช็อคในเดือนกุมภาพันธ์ 2011 รูปที่ 18 เปรียบเทียบเส้นกราฟการคละขนาดของวัสดุทรายปะทุที่เกิดในเมืองโครส์เซิร์ทระหว่างที่เกิดแผ่นดินไหว กับแผ่นดินไหวในอ่าวโตเกียว วัสดุขนาดเล็กที่เมือง

โครส์เซิร์ทและอ่าวโตเกียวมีลักษณะเหมือนกัน ได้มีการประมาณการไว้ว่าในชั้นทรายละเอียดมาก ๆ น้ำมีการซึมออกมาอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานเนื่องมาจากระดับการซึมผ่านที่ต่ำของดินเหลวในพื้นที่ทั้งสอง ยิ่งไปกว่านั้น วัสดุดินขนาดเล็กยังง่ายต่อการลอยตัวเหนือพื้นดินโดยน้ำที่ลอยตัวขึ้นมา และการกำจัดดินทับถมนั้นเป็นการเร่งการทรุดตัวของพื้นผิวดิน

รูปภาพที่ 4 แสดงทางเดินที่ปกคลุมไปด้วยทรายปะทุ มันเป็นการยากที่จะวิ่งอยู่บนชั้นทรายเปียกที่มีความหนาโดยการไ้รถยนต์และจักรยาน นอกจากนี้การยุบตัวขนาดใหญ่ของพื้นดินรอบอาคารกรณีไปจากพื้นที่จอตระก

รูปที่ 18 การเปรียบเทียบของเส้นกราฟของอัตราการคละขนาดของวัสดุทรายปะทุที่เกิดขึ้นในโตเกียวและเมืองโครส์เซิร์ท

### บทสรุป

ภาวะดินเหลวแบบรุนแรงได้เกิดขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหว 2011 Great East Japan ในพื้นที่อ่าวโตเกียว ระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนจากแรงแผ่นดินไหวในพื้นที่ที่เกิดดินเหลวไม่สูงมาก ถึงแม้ว่าพื้นดินที่เกิดดินเหลวจะปกคลุมไปด้วยทรายปะทุ ช่วงระยะที่ยาวมาก ๆ ของแรงแผ่นดินไหวหลัก และอาฟเตอร์ช็อค อีก 29 นาทีภายหลังจากนั้น คงจะทำให้เกิดภาวะดินเหลวอย่างรุนแรง บ้านเรือนจำนวนมากทรุดตัวทันทีและเกิดการเอียงตัวอย่างมากเนื่องจากดินเหลว ท่อใต้ดินเกิดการคดหรือแตกหัก รอยต่อยื่นออกมาจากพื้นดิน และภายในท่อเติมไปด้วยน้ำโคลน แมนโฮลเป็นจำนวนมากได้ถูกตัดขาดตามแนวนอนและเติมไปด้วยน้ำโคลน ในขณะที่แมนโฮลจำนวนหนึ่งลอยขึ้นมา ความเสียหายอย่างมหาศาลนี้กับท่อที่ฝังอยู่ และแมนโฮลอาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากการดันไปมาของดินเหลว

### กิตติกรรมประกาศ

ผลทดสอบที่ได้ที่อ้างอิงไว้ในบทความนี้ได้นำมาจากรายงานโดยคณะกรรมการเทคนิคด้านการป้องกันดินเหลวที่มี

ประธานคือศ.อิชิฮารุ และจัดเตรียมขึ้นโดยเทศบาลเมืองอุรายาฮุ คุณโอกาวาได้ให้รูปภาพที่สำคัญแก่เรา ผู้แต่งบทความที่ต้องการที่จะแสดงความขอบคุณมา ณ ที่นี้



(หน้าที่ 15 – 17)

### **การจัดการเศษวัสดุและขยะจากคลื่นสึนามิ และการนำมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อการบูรณะซ่อมแซมและการก่อสร้างขึ้นใหม่**

โดย ทาเคชิ คัตสุมิ ศาสตราจารย์ มหาวิทยาลัยเกียวโต บัณฑิต ศาสตร์ภาคการศึกษาภาวะสิ่งแวดล้อม

แผ่นดินไหว Great East Japan เมื่อเดือนมีนาคม 2011 ก่อให้เกิดคลื่นสึนามิที่ทำให้เกิดเศษวัสดุและขยะเป็นจำนวนมากที่จะต้องจัดการอย่างเหมาะสมซึ่งถือว่าเป็นงานสำคัญในการที่จะบูรณะซ่อมแซมและก่อสร้างขึ้นใหม่สำหรับพื้นที่ที่เกิดภัยพิบัติขึ้นในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบ อิวาเตะ มียากิ และ ฟูกูชิมะ กองวัสดุเหล่านี้มีน้ำหนักมากกว่า 22 ล้านตัน ตัวอย่างเช่น ในเขตอิวาเตะ ได้กล่าวกันว่าขยะที่เกิดขึ้นในช่วงแผ่นดินไหวครั้งนี้มีค่าเท่ากับจำนวนขยะกองเก็บปกติใน 11 ปีทีเดียว รูปภาพที่ 1-3 แสดงกองขยะจากคลื่นสึนามิที่กองอยู่บนนาข้าว ซึ่งนอกจากใช้เป็นสถานที่กองเก็บเศษวัสดุจากคลื่นสึนามิชั่วคราว และยังใช้เป็นที่เก็บขยะ อีกด้วย

รูปภาพที่ 1 เศษวัสดุจากคลื่นสึนามิ (ภาพโดย: ยาซุทาภา)

รูปภาพที่ 2 สถานที่กองเก็บเศษวัสดุจากคลื่นสึนามิชั่วคราว

รูปภาพที่ 3 สถานที่กองเก็บขยะชั่วคราว

### **คู่มือในการจัดการและการนำวัสดุมาใช้ใหม่สำหรับเศษวัสดุจากคลื่นสึนามิ**

เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องวิเคราะห์การจัดการเศษวัสดุขยะ จากคลื่นสึนามิจากมุมมองทั้ง 2 ด้าน: ความสามารถรองรับเศษวัสดุของพื้นที่ที่เกิดภัยพิบัติ และ โครงสร้างของวัฏจักรการ

นำมาวัสดุมาใช้ใหม่ที่ได้มีการส่งเสริมขึ้นในประเทศญี่ปุ่น เพราะเหตุนี้วิธีการจัดการ 2 วิธีจึงได้นำมาใช้: อย่างแรกคือการแยกแยะวัสดุและชั้นตอนต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อที่จะนำเศษวัสดุมาใช้ใหม่และนำเศษวัสดุและขยะที่เกี่ยวข้องมาใช้ให้เกิดประโยชน์ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ในขณะที่อีกวิธีหนึ่งการจัดการที่ถูกต้องสำหรับการกำจัดเศษขยะ วัสดุที่ไม่สามารถนำมาใช้ใหม่ได้อีก วิธีการทั้งสองนี้ได้มีการอ้างอิงให้เป็นนโยบายของชาติไม่นานภายหลังจากที่เกิดแผ่นดินไหว บทบาทของหน่วยงานส่วนที่เกี่ยวข้องกับการก่อสร้างจะมีความสำคัญในการทำให้การจัดการ และการนำขยะเศษวัสดุมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุด

เพราะเหตุนี้ คู่มือ 2 ฉบับได้มีการจัดทำออกมาโดยกระทรวงที่ดิน สาธารณูปโภค การขนส่ง และการท่องเที่ยว โดยที่ผู้แต่งได้มีส่วนร่วมด้วยคือ “ คู่มือทางด้านเทคนิคเกี่ยวกับการปรับปรุงสวนสาธารณะและพื้นที่สีเขียวในการก่อสร้างขึ้นใหม่สำหรับพื้นที่ที่เกิดความเสียหายเนื่องจากแผ่นดินไหว Great East Japan” และ “แนวความคิดพื้นฐานสำหรับการใช้วัสดุหมุนเวียนในการสะสมวัสดุเพื่อการพัฒนาปรับปรุงอาคาร: วัสดุที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการก่อสร้างใหม่และปรับปรุงอาคารอย่างรวดเร็ว (คู่มือสำหรับการสะสมวัสดุที่นำกลับมาใช้สำหรับการปรับปรุงพัฒนาโครงสร้างอาคาร)” คู่มือทั้งสองนี้แสดงให้เห็นถึงสิ่งที่มีขายอมรับทั่วไป แนวความคิดพื้นฐานสำหรับการปรับปรุงสวนสาธารณะพื้นที่ทั่วไป และการยกระดับพื้นดินโดยการนำวัสดุต่าง ๆ มาใช้ใหม่จากเศษวัสดุ ขยะ จากเหตุการณ์ภัยพิบัติ

### **กองวัสดุทับถมจากคลื่นสึนามิ**

ในบรรดาท่ามกลางเศษขยะและวัสดุหลาย ๆ ชนิดที่เกิดขึ้นในเหตุการณ์ภัยพิบัติ ยังมีกองดินและทรายเป็นจำนวนมากซึ่งรวมกันเรียกว่ากองวัสดุทับถมจากคลื่นสึนามิ ในกรณีที่จะใช้วัสดุเหล่านี้ในการก่อสร้าง มีความจำเป็นที่จะต้องมีการแยกแยะดินทราย และเศษวัสดุอื่น ๆ ออกจากกัน กองวัสดุทับถมจากคลื่นสึนามินี้มีวัสดุหลายประเภทซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น กองวัสดุถมที่อยู่บนนาข้าวมีส่วนประกอบของตะกอนเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้อัตราส่วนของขนาดคละของกองวัสดุทับ

ถมนี้อยู่นอกเหนือจากขนาดอัตราส่วนของขนาดคละที่เหมาะสมตามที่กำหนดไว้ใน คู่มือสำหรับงานดินในแม่น้ำ แต่ขนาดคละของดินและทรายที่อยู่ในกองวัสดุทับถมตั้งอยู่ที่สถานที่กองเก็บชั่วคราวถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ (รูปที่ 1)

สิ่งที่เป็นข้อกังวลหนึ่งในการนำกองวัสดุทับถมมาใช้ก็คือระดับความเป็นเกลือของวัสดุ รูปที่ 2 แสดงผลการวัดระดับคลอไรด์ในกองวัสดุทับถมอยู่ที่นาข้าว ในพื้นที่ชายฝั่งแห่งหนึ่งในเขตพุกูชิม่า การทดลองวัดระดับโดยการสุ่มตัวอย่าง 38 ตัวอย่างเมื่อเดือนธันวาคม 2011 ระดับคลอไรด์ในตัวอย่งจำนวน 2 ใน 3 ของทั้ง 38 ตัวอย่างมีจำนวน 2 มิลลิกรัมต่อกรัม หรือต่ำกว่า ในขณะที่จำนวนตัวอย่างที่มีระดับคลอไรด์ต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมต่อกรัมหรือต่ำกว่าอยู่ที่ 1 ใน 3 หรือ 13 ตัวอย่าง โดยทั่วไป ระดับคลอไรด์สำหรับวัสดุงานดินได้กำหนดให้มีระดับต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมต่อเมตร เพื่อที่จะป้องกันการผุกร่อนของเสาเข็มเหล็กท่อและผลิตภัณฑ์เหล็กกล้าอื่น ๆ ที่ต้องฝังลงไปในพื้นที่ดิน คู่มือสำหรับการสะสมวัสดุที่นำกลับมาใช้สำหรับการปรับปรุงพัฒนาโครงสร้างอาคาร ก็ได้ใช้ตามข้อกำหนดนี้ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการที่จะต้องนำวัสดุกองดินถมจากคลื่นสึนามิมาใช้เพื่อยกระดับพื้นดินตามแนวชายฝั่ง จึงมีความเหตุผลที่จะยอมให้ใช้ดินและทรายที่มีระดับคลอไรด์สูงกว่าตามที่กำหนดเพราะว่าระดับเกลือในน้ำใต้ดินของพื้นที่ที่มีระดับสูงอยู่แล้ว คู่มือได้มีการแนะนำการใช้งานของวัสดุดมนี้

รูปที่ 1 กองวัสดุทับถมจากคลื่นสึนามิที่อยู่นาข้าว (ด้านบน) และ กองวัสดุทับถมจากคลื่นสึนามิและดินที่เคลื่อนย้ายและกองทับในสถานที่กองชั่วคราว (ด้านล่าง)

รูปที่ 2 ความเป็นเกลือของกองวัสดุทับถมจากคลื่นสึนามิ

### เศษวัสดุและขยะ

ดังที่แสดงในรูปที่ 3 เศษวัสดุและขยะได้รับการแบ่งแยกเบื้องต้นอย่างหยาบ ๆ แล้วในขั้นตอนที่สอง จึงต้องผ่านการบดอัด การร่อนแยกขนาด การแยกวัสดุเปียกและแห้ง และการแบ่งแยกด้วยกำลังคน ได้มีการทดสอบในตัวอย่งพื้นดินและทราย

ในตำแหน่งสถานที่แบ่งแยกขยะชั่วคราวหลายแห่ง ผลของการทดสอบแสดงว่าความสามารถด้านทานการบดอัดที่สูงนี้สามารถกระทำได้อัจฉนวนของเศษไม้และวัสดุเจือปนอย่างอื่นมีจำนวนที่น้อย (รูปที่ 4) ผลการทดสอบนี้กำหนดให้ระดับของวัสดุอินทรีย์ต้องถูกกำหนดให้ไม่เกินกว่าขีดจำกัดที่ยอมรับได้ เมื่อคำนึงถึงความเป็นไปได้ที่จะเกิดปัญหาการทรุดตัวภายหลังที่เกิดจากการเน่าเปื่อยของสารอินทรีย์ และจำเป็นจะต้องมีการจัดการบำรุงรักษาต่อไปในอนาคต

เพราะว่าการนำวิธีการในการจัดการกองวัสดุที่รุดหน้าสามารถเพิ่มคุณภาพของโครงสร้างได้ จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นที่จะต้องระดับการจัดการวัสดุที่เหมาะสมเพื่อที่จะให้ได้ระดับคุณภาพของวัสดุตามที่ต้องการ ในสภาวะจำนวนที่มีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้ เราได้นำเสนอวิธีการในการจัดการวัสดุตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 5

รูปที่ 3 ขั้นตอนการจัดเตรียมวัสดุโดยทั่วไปสำหรับขยะที่เกิดขึ้นจากภัยพิบัติ

รูปที่ 4 ลักษณะทั่วไปของการบดอัดสำหรับดินชั้นต่าง ๆ

รูปที่ 5 รูปภาพสำหรับแผนการจัดการวัสดุโดยพิจารณาถึงระดับคุณภาพที่ต้องการเพื่อการใช้งานและเป็นจำนวนที่เหมาะสม

### การนำวัสดุขยะจากเหตุการณ์ภัยพิบัติมาใช้ อย่างมีประสิทธิภาพ

ในพื้นที่โตโฮกุ ที่เกิดแผ่นดินไหวครั้งนี้ ได้มีการพูดคุยถึงประเด็นของโลหะหนักที่มีอยู่ในสถานที่ ในการทำการสำรวจ ขยะจากคลื่นสึนามิพบว่าอาร์เซนิกและฟลูออรีนถูกชะล้างออกไปในอัตราที่เกินกว่ามาตรฐานสิ่งแวดล้อมที่ยอมรับได้ (ตารางที่ 1) บนพื้นฐานความจริงที่ว่ากองวัสดุทับถมนี้ประกอบไปด้วยดินและทรายที่เป็นภัยต่อพื้นที่ มาตรฐานที่เหมาะสมที่คำนึงถึงระดับความเสี่ยงที่ยอมรับได้จะเป็นสิ่งจำเป็นในการนำกองวัสดุดมจากคลื่นสึนามินี้ไปใช้งาน งานสำคัญอีกชนิดหนึ่งคือการจัดการที่เหมาะสมสำหรับวัสดุแร่ใยหิน และวัสดุที่เป็นอันตรายอย่างอื่นที่ผสมอยู่โครงสร้างที่พังทลายและคลื่นกัมมภาพรังสี อีกด้วย

ในขณะเดียวกัน เทคโนโลยีการติดตามผล โดยใช้ระบบการ



เก็บเงินอิเล็กทรอนิกส์ (ETC) และศูนย์เก็บข้อมูลระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ได้ถูกนำมาใช้ในการควบคุมเศษขยะเพื่อที่จะให้ผู้ใช้เศษขยะอย่างมีประสิทธิภาพ เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องนำวัสดุนี้มาใช้ในสถานที่ก่อสร้าง ในขณะที่ต้องมีการเผยแพร่การจัดเตรียมวัสดุและการใช้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่ได้คำนึงถึงการประเมินความเสี่ยงอย่างระมัดระวังแล้ว ร่วมกันกับความเห็นของสังคมโดยรวม ความคาดหวังมีอยู่มากที่วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสามารถนำมาใช้อย่างสมเหตุสมผลในการการระแวดระวังตามสภาพภูมิอากาศ และสามารถนำมาสู่การเลือกใช้ทรัพยากรจำกัดอย่างมีประสิทธิภาพและชาญฉลาด

## ตารางที่ 1 ตัวอย่างของคุณสมบัติของเศษขยะจากคลื่นสึนามิ



(หน้าที่ 18)

### เทคโนโลยีในการก่อสร้างโครงสร้างเหล็ก

### รายละเอียดพื้นฐานเกี่ยวกับการผูกมัดและการป้องกันการผูกมัดของเหล็ก

โดย ฮิเดโนริ ฮามาตะ ศาสตราจารย์คณะวิศวกรรมโยธาและโครงสร้าง, มหาวิทยาลัยกิวชู

### การผูกมัด

การเกิดการผูกมัดของวัสดุโลหะเป็นปรากฏการณ์ซึ่งวัสดุโลหะ ในสภาพแวดล้อมและสภาพการใช้งานเกิดความเปลี่ยนแปลงที่ผิวหน้าวัสดุเนื่องจากแรงปฏิกิริยาทางเคมีหรือทางไฟฟ้า-เคมี

การผูกมัดจำแนกได้เป็น 2 ประเภท: การเกิดการผูกมัดแบบแห้ง และการผูกมัดแบบเปียก การผูกมัดแบบแห้งเกิดขึ้นเมื่อวัสดุโลหะอยู่ใต้สภาพอุณหภูมิสูง ความชื้นต่ำ และการผูกมัดพัฒนาขึ้นจากปฏิกิริยาของแก๊ซ การผูกมัดแบบเปียกมีผลสืบเนื่องจากการแตกตัวของอิออนในโลหะภายใต้สภาพที่มี

ความชื้น นอกจากการผูกมัดที่เกิดขึ้นโดยกระบวนการแตกตัวของอิออนตามธรรมชาติแล้ว การผูกมัดแบบเปียกยังรวมถึงการผูกมัดที่เกิดขึ้นโดยกระแสไฟฟ้า

นอกจากนี้ การผูกมัดยังจำแนกได้เป็นการผูกมัดแบบทั่วไปหรือการผูกมัดเฉพาะที่ การผูกมัดโดยทั่วไปคือกรณีที่วัสดุโลหะมีการผูกมัดอย่างสม่ำเสมอ และจะเกิดขึ้นในกรณีที่สภาวะแวดล้อมแทบจะเป็นสภาพเดียวกันสำหรับพื้นที่สัมผัสทั้งหมดของโลหะ ในทางตรงกันข้าม การผูกมัดเฉพาะที่เป็นกรณีที่ชั้นตอนการผูกมัดไม่สม่ำเสมอ หรือมีการผูกมัดอย่างลึกเป็นบางส่วนหรือการผูกมัดในร่องลึก และสาเหตุของการผูกมัดเป็นการแผ่ขยายที่ไม่เท่ากันของปัจจัยทางด้านสภาวะแวดล้อม คุณสมบัติที่ไม่สม่ำเสมอของวัสดุ หรือปฏิกิริยากัลวานิก (การสัมผัสของพื้นผิวโลหะต่างชนิด)

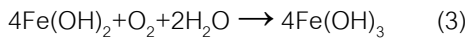
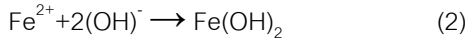
รูปภาพที่ 1 แสดงการผูกมัดเฉพาะที่เกิดขึ้นในเข็มพืดเหล็กและเข็มท่อเหล็กที่ใช้ในโครงสร้างท่าเรือ โครงสร้างที่เกิดการผูกมัดเฉพาะที่ในสภาพที่มีความอันตรายอย่างสูง

รูปภาพที่ 1 การผูกมัดเฉพาะที่ซึ่งเกิดขึ้นในโครงสร้างท่าเรือ: เข็มพืดเหล็ก (ซ้าย) และเข็มท่อเหล็ก (ขวา)

### กลไกการเกิดการผูกมัด

การตรวจสอบในระดับไมโครสำหรับผิวหน้าของเหล็กแสดงให้เห็นว่าในผลิตภัณฑ์เหล็กโครงสร้างเอง มีความไม่สม่ำเสมอในด้านคุณสมบัติ เช่นความไม่สม่ำเสมอของชั้นเคลือบคลุมผิวหน้า และความขรุขระของผิวหน้า นอกจากนี้การนำไฟฟ้าของผิวหน้าในผลิตภัณฑ์เหล็กอาจจะไม่สม่ำเสมอเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมที่ไม่สม่ำเสมอ เช่นความแตกต่างทางด้านสภาพความชื้น (การแห้งตัวและความเปียกชื้น) บนหน้าตัด เพราะเหตุนี้ พื้นที่อะโนดิกและคาโทดิกจึงก่อตัวขึ้นบนหน้าตัดของเหล็ก (รูปที่ 1) สูตรทางด้านเคมีของแรงปฏิกิริยาการผูกมัดของเหล็กสามารถแสดงได้ในรูปดังต่อไปนี้

- แรงปฏิกิริยาอะโนดิก



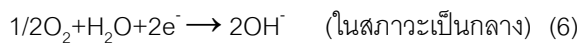
- แรงปฏิกิริยาคาโทดิก



(4)



(5)



ภายใต้สภาวะที่น้ำและออกซิเจนเกิดอยู่ร่วมกัน อิออนของเหล็ก ( $\text{Fe}^{++}$ ) แยกตัวออกไปเนื่องจากแรงปฏิกิริยาอะโนดิก (สูตรที่

1) ในขณะที่อิออนไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^-$ ) เกิดขึ้นเนื่องมาจากแรงปฏิกิริยาคาโทดิก (สูตรที่ 4-6) สิ่งนี้ถือว่าเป็นช่วงแรกของการก่อตัวของการผุกร่อน ในขั้นต่อไป  $\text{Fe}^{++}$  และ  $\text{OH}^-$  เกิดการจับตัวกัน (สูตรที่ 2) เป็น  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  ซึ่งมีการออกซิไดซ์โดยออกซิเจนที่แยกตัวทำให้เกิดสนิม (การผุกร่อน) (สูตรที่ 3)

เพื่อแสดงให้เห็นสิ่งที่เกิดขึ้นในส่วนการทดสอบของเหล็ก (A1, B1, A2, B2 และ C) ได้นำมาทดสอบในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน 2 ชนิด: ดินเหนียวและทราย (รูปที่ 2) เมื่อขึ้นส่วนทดสอบ A1 และ B1 ถูกฝังไว้ตามที่แสดงไว้ในรูป พื้นที่อะโนดิกและคาโทดิกเล็ก ๆ จนไม่สามารถสังเกตเห็นได้จะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัส และก่อตัวเป็นส่วนที่เกิดการผุกร่อนในระดับไมโคร ในกรณีนี้ พื้นที่อะโนดิกและคาโทดิกเล็ก ๆ ที่ก่อตัวเป็นส่วนผุกร่อนในระดับไมโครนี้ จะมีการเปลี่ยนตำแหน่งอยู่ตลอดเวลาไปตามอัตราการเกิดปฏิกิริยาการผุกร่อน ซึ่งส่งผลให้เกิดการผุกร่อนแบบทั่วไปของผลิตภัณฑ์เหล็กกล้า ในทางตรงกันข้าม เมื่อขึ้นส่วนทดสอบได้ถูกฝังลงไป ในสภาวะที่แตกต่างกัน (ทรายและดินเหนียว) ดังเช่นขึ้นส่วน C หรือที่ซึ่งขึ้นส่วน 2 ขึ้นในสภาวะแวดล้อมที่ต่างกันมีการเชื่อมต่อกันในทางไฟฟ้า (ขึ้นส่วน A2 และ B2 ในรูป) การผุกร่อนแบบไมโครได้เกิดขึ้น ในกรณีที่เกิดการก่อตัวของการผุกร่อนจากสภาวะ

แวดล้อมที่แตกต่างกัน สภาวะที่มีระดับของออกซิเจนที่แตกตัวสูง เช่น สภาวะของทราย (ขึ้นที่ B1 และ C) จะมีโอกาสที่จะกลายเป็นส่วนของคาโทดิก ในขณะที่สภาวะแวดล้อมที่มีระดับของออกซิเจนที่แตกตัวต่ำ เช่นสภาวะของดินเหนียว (A2 และ C) มีโอกาสที่จะกลายเป็นส่วนของอะโนดิก

การเกิดการผุกร่อนมิใช่เกิดเพียงแต่เหล็กกล้า แต่ยังสามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุโลหะอื่น ๆ ได้อีกด้วย เป็นการเปลี่ยนแปลงสถานะที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในสภาพแวดล้อมแบบธรรมชาติ การควบคุมหรือตรวจสอบอัตราการเปลี่ยนแปลงสถานะถือว่าเป็นเป้าหมายหลักในการป้องกันการผุกร่อน แนวคิดในการศึกษาที่แตกต่างกันอย่างมากขึ้นอยู่กับความต้องการที่จะศึกษาปรากฏการณ์ผุกร่อนนี้อย่างไร ในแง่มุมการศึกษาในระดับ แมคโครหรือระดับไมโคร

ในแง่ของโครงสร้างระดับไมโคร การเกิดขึ้นของพื้นที่อะโนดิกและแคโทดิกสามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีทางด้านเคมี – ไฟฟ้าและอัตราการเกิดการผุกร่อนได้ถูกตรวจสอบด้วยการใช้กระแสไฟฟ้า ในทางตรงกันข้าม ในแง่ของโครงสร้างระดับแมคโคร โครงสร้างและองค์อาคารได้นำศึกษา และอัตราการผุกร่อนได้ตรวจสอบโดยศึกษาการสูญเสียจากการผุกร่อนหรือพื้นที่ที่เกิดการผุกร่อน ในกรณีทั้งสอง งานที่สำคัญที่สุดในทางวิศวกรรมโยธา ก็คือการตรวจสอบระดับความสามารถของโครงสร้างหรือ ถ้าพูดในทางตรงกันข้าม ก็คือระดับการเสื่อมสภาพของโครงสร้าง

รูปที่ 1 โครงสร้างของส่วนที่เกิดการผุกร่อน

รูปที่ 2 การทดสอบโมเดลสำหรับการก่อตัวของการผุกร่อน



(หน้าที่ 19: ปกหลัง)

## การประชุมสัมมนาของ JISF

### การประชุมสัมมนาเกี่ยวกับงานวิจัยโครงสร้างเหล็กในทางวิศวกรรมโยธา

สหพันธ์เหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย (JISF) ได้จัดงานประชุมสัมมนาประจำปีในหัวข้อเกี่ยวกับงานวิจัยโครงสร้างเหล็กในงานวิศวกรรมโยธาเมื่อวันที่ 13 มีนาคม 2012 ที่โตเกียว งานประชุมสัมมนานี้มีผู้เข้าร่วมมากกว่า 300 ท่านจากสาขาต่าง ๆ เช่นตัวแทนจากส่วนรัฐบาล มหาวิทยาลัย บริษัททำงานทางด้านถนนไฮเวย์และทางรถไฟ ผู้รับเหมาก่อสร้างและบริษัทวิศวกรที่ปรึกษา ซึ่งผลที่ได้นับว่าประสบความสำเร็จเป็นอย่างดี

การประชุมสัมมนานี้ได้ถูกจัดขึ้นทุก ๆ ปีตั้งแต่ปี 2005 โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะเผยแพร่ผลงานวิจัยที่จัดทำในโครงการ "โปรแกรม subsidy งานวิจัย/ งานศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างเหล็ก" โดย JISF แก่สาธารณชน งานประชุมสัมมนาปัจจุบันซึ่งเป็นครั้งที่ 16 นี้มีเนื้อหาเน้นไปที่ "ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินไหว Great East Japan Earthquake และความพยายามในการที่จะบูรณะซ่อมแซมและก่อสร้างขึ้นใหม่" โดยผู้บรรยายที่มีชื่อเสียงในแวดวงวิศวกรรมโยธาของประเทศญี่ปุ่น และประธานในงานประชุมสัมมนาคือศาสตราจารย์ โยชิโสะ ฟุจิโน บัณฑิตวิทยาลัยแห่งมหาวิทยาลัยโตเกียว

งานบรรยายในครั้งนี้แสดงผลรายงานทางวิศวกรรมโยธาต่าง ๆ ที่เกี่ยวเนื่องกับความเสียหาย และงานปรับปรุงซ่อมแซมแก้ไขที่ต้องกระทำ ของโครงสร้างท่าเรือ ทางรถไฟ เชื้อเพลิงน้ำ ถนนไฮเวย์ เศษชิ้นส่วนและขยะจากเหตุสึนามิ และแผ่นดินไหว (สำหรับรายละเอียด ให้ศึกษาโปรแกรมการบรรยาย)

ศาสตราจารย์เกียติคุณโนบุโอะ ซูโต แห่งมหาวิทยาลัยโตโฮกุ นักวิจัยชั้นนำในด้านคลื่นสึนามิในประเทศญี่ปุ่น ได้ทำการบรรยายพิเศษประจำปีในหัวข้อเรื่อง "การอยู่ร่วมกันกับคลื่นสึนามิ

ใน 50 ปีที่ผ่านมา" รายละเอียดในการบรรยายแสดงให้เห็นถึงความรู้ที่เป็นประโยชน์ที่ได้รวบรวมมาเป็นเวลากว่า 50 ปีในงานศึกษาวิจัยทางด้านคลื่นสึนามิ และครอบคลุมถึงความเสียหายชนิดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากคลื่นสึนามิ ความสำคัญของโครงสร้างและสิ่งป้องกันคลื่นสึนามิ และการเตรียมการสำหรับเหตุการณ์ภัยธรรมชาติรวมไปถึงการนำใช้ระบบซอฟต์แวร์เข้ามาใช้ให้เป็นประโยชน์ในการป้องกันภัย