

การศึกษาพฤติกรรมผนังก่ออิฐที่อยู่ในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำ  
เนื่องจากสึนามิ โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์  
Study of Masonry Infill Wall Behaviors in RC Frame under Tsunami Loading  
using the Finite Element Method

อภิเดช นาหนองตุม (Aphidet Nanongtum)\* ปิยะวัชร ฝอยทอง (Piyawat Foytong)<sup>1\*\*</sup>  
อภิชาติ จันทร์พิลา (Apichat Janpila)\*\*\* ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิตย์ (Nuttawut Thanasisathit)\*\*\*\*  
ปริญญา จินดาประเสริฐ (Prinya Chindrprasirt)\*\*\*\*\*

(Received: February 13, 2024; Revised: March 10, 2024; Accepted: March 11, 2024)

### บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์พฤติกรรมของผนังก่ออิฐที่อยู่ในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำของสึนามิโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากการทดสอบในอดีตสำหรับการสอบเทียบและการจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงกระทำของสึนามิที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดความลึกน้ำ การวิเคราะห์เน้นการประเมินผลกระทบของระดับความลึกสึนามิต่อความต้านทานแรงกระทำด้านข้างของแบบจำลองโดยใช้แบบจำลองผนังก่ออิฐที่ถูกแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อยแบบสี่เหลี่ยม 25x25 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อระดับความลึกน้ำเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงกระทำด้านข้างของโครงสร้างมีค่าลดลง 2 เท่า โดยค่าความต้านทานที่ระดับความลึกน้ำ 0.250H มีค่าเท่ากับ 780 กิโลนิวตัน และค่าความต้านทานที่ระดับความลึกน้ำ 1.000H มีค่าเท่ากับ 320 กิโลนิวตัน ซึ่งเป็นผลจากลักษณะของแรงกระทำสึนามิที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากที่ระดับความลึกน้ำต่ำ ๆ แรงกระทำสึนามิมิมีการถ่ายโอนไปยังฐานรากโดยตรงในอัตราส่วนที่มากทำให้ต้องใช้แรงผลักที่มากขึ้นจึงเกิดการวิบัติในผนังก่ออิฐ การศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการพิจารณาพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำของสึนามิในการออกแบบโครงสร้างชายฝั่งเพื่อเพิ่มความปลอดภัยและลดความเสี่ยงจากภัยพิบัติธรรมชาติ

<sup>1</sup>Corresponding author: piyaf@kku.ac.th

\*นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
Student, Master of Engineering Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

\*\*รองศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
Associate Professor, Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

\*\*\*นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
Student, Doctoral of Engineering Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

\*\*\*\*ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

\*\*\*\*\*ศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานอย่างยั่งยืน สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น  
Professor, Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

## ABSTRACT

This research aims to analyze the behavior of a masonry-infilled wall (MIW) in a reinforced concrete frame (RC) subjected to tsunami force using the Finite Element Method. This work used experimental data from past research for calibration and model to investigate the response behavior under the tsunami loading, distributed uniformly through the water depth. The analysis evaluated the effects of various tsunami inundation depths on the lateral resistance capacity of RC frames with MIWs. The MIW behaviors were modeled using subsections of 25x25 square elements. The analysis results found that the lateral resistance of the building decreased about 2 times as the inundation depth increased, from 780 kN to 320 kN for the inundation depth of 0.250H and 1.000H, respectively. Because the force is transferred to the foundation directly at shallower tsunami inundation depths, a larger force was required to push the MIW. This study emphasizes the significance of including the analysis of structures' response to tsunami loading in the design of coastal structures, aiming to improve safety and mitigate risks associated with natural disasters.

**คำสำคัญ:** สึนามิ ผนังก่ออิฐที่อยู่ในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

**Keywords:** Tsunami, Masonry-infilled wall in RC frame, Finite element method

## บทนำ

เหตุการณ์สึนามิในมหาสมุทรอินเดียปี พ.ศ. 2547 ซึ่งเกิดจากแผ่นดินไหวขนาด 9.1 ทำให้เกิดสึนามิที่ทำลายล้างตามแนวชายฝั่งมหาสมุทรอินเดีย สร้างความเสียหายต่อสิ่งก่อสร้างอาคารที่พักอาศัย มีผู้เสียชีวิตมากกว่า 280,000 คน [1] และสึนามิโตโฮคุในญี่ปุ่นปี พ.ศ. 2554 มีจุดกำเนิดจากแผ่นดินไหวขนาด 9.0 นอกชายฝั่งของโตโฮคุ ประเทศญี่ปุ่น ก่อให้เกิดความเสียหายอย่างมาก ทำลายโครงสร้างจำนวนมากและมีผู้เสียชีวิตมากกว่า 20,000 คน [2] ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่เป็นโศกนาฏกรรมที่รุนแรงที่สุดของประเทศญี่ปุ่น จากผลการสำรวจความเสียหายของอาคารบ้านพักอาศัยตามแนวชายฝั่งพบว่าการก่อสร้างในพื้นที่ชายฝั่งที่มีความเสี่ยงมักจะทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังก่ออิฐ ดังนั้นเพื่อบรรเทาและประเมินความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคตจำเป็นต้องทำความเข้าใจพฤติกรรมความต้านทานของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังก่ออิฐภายใต้แรงกระทำเนื่องจากสึนามิ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาถึงผลของการพิจารณาผนังก่ออิฐในโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยได้ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ [3-5] พบว่าผนังก่ออิฐช่วยเพิ่มความต้านทานแรงกระทำและสติเฟนสด้านข้างของโครงสร้างอาคารอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังสามารถช่วยเพิ่มความเหนียวของอาคารอีกด้วย ซึ่งรูปแบบการวิบัติของผนังก่ออิฐที่อยู่ในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กมี 2 รูปแบบได้แก่ การวิบัติเนื่องจากแรงอัด (Compression Failure) และการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน (Shear Failure) ซึ่งรูปแบบการวิบัตินั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความสูงต่อความยาว (Aspect Ratio) ของโครงข้อแข็งที่วิเคราะห์และอัตราส่วนระหว่างกำลังของชิ้นส่วนผนังก่ออิฐและโครงข้อแข็ง นอกจากนี้ยังได้มีการเสนอแบบจำลองสำหรับจำลองพฤติกรรมของผนังก่ออิฐที่อยู่ในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยได้จำลองเป็นชิ้นส่วนสปริงในแนวทแยง 1 ชั้น [6-7] ชิ้นส่วนสปริงในแนวทแยง 2 ชั้น [8-9] ชิ้นส่วนสปริงในแนวทแยง 3 ชั้น

[10-11] ชิ้นส่วนสปริงในแนวราบ [12-13] รวมทั้งการจำลองพฤติกรรมโดยใช้ชิ้นส่วนไฟไนต์เอลิเมนต์ [14-15] ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีที่มีความแม่นยำมากที่สุดและสามารถพิจารณาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นได้อย่างละเอียด

จากงานวิจัยข้างต้นนั้นเป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังก่ออิฐภายใต้แรงกระทำเนื่องจากแผ่นดินไหว ซึ่งแรงกระทำเนื่องจากแผ่นดินไหวเป็นแรงที่กระทำที่ตำแหน่งที่มีมวลมาก แตกต่างจากพฤติกรรมของแรงกระทำเนื่องจากสึนามิซึ่งเป็นแรงกระทำในลักษณะของแรงอุทกพลวัตที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดความลึกน้ำ [16-18] สำหรับงานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมผนังก่ออิฐภายใต้แรงกระทำเนื่องจากสึนามิ Foytong et al. [19] ได้จำลองผนังก่ออิฐด้วยชิ้นส่วนสปริงในแนวราบ 1 ชิ้น แต่ไม่สามารถแสดงพฤติกรรมในกรณีที่ระดับความสูงน้ำต่ำๆ ได้ Waenpracha et al. [20] ได้จำลองผนังก่ออิฐด้วยชิ้นส่วนสปริงในแนวราบหลายชิ้น ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมดีขึ้นอย่างชัดเจน แต่จำเป็นต้องปรับตำแหน่งของแบบจำลองให้สอดคล้องกับระดับความสูงน้ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังก่ออิฐภายใต้แรงกระทำเนื่องจากสึนามิด้วยใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจำลองโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยชิ้นส่วนอีลาสติกเชิงเส้น (Elastic Element) และจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) สำหรับผนังก่ออิฐจำลองพฤติกรรมด้วยชิ้นส่วนเปลือกบาง (Shell Element) แบบสี่เหลี่ยม (Q4 Element) โดยในแต่ละชิ้นส่วนนั้นจะมีจุดเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วน (Integration Point) 4 จุด ที่มีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear) พิจารณาระดับความสูงน้ำที่กระทำต่อโครงสร้าง 7 ระดับ ได้แก่ 0.250, 0.375, 0.500, 0.625, 0.750, 0.875 และ 1.00 เท่าของความสูงโครงข้อแข็ง เพื่อให้ทราบถึงอิทธิพลของระดับความสูงน้ำต่อพฤติกรรมของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังก่ออิฐ

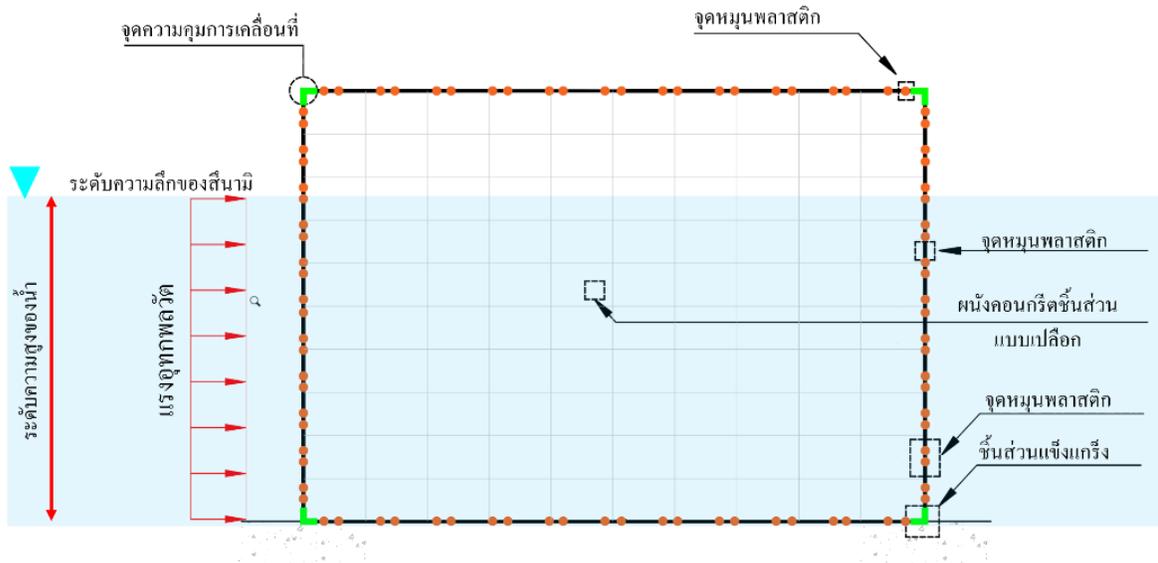
## แรงกระทำเนื่องจากสึนามิ

แรงสึนามิคือแรงที่เกิดจากน้ำระหว่างเหตุการณ์สึนามิที่กระทำต่อโครงสร้างชายฝั่ง FEMA P646 [17] ระบุรูปแบบแรงสึนามิที่แตกต่างกันเพื่อรวมไว้ในกรณีการคำนวณการออกแบบ แรงดังกล่าวสามารถแบ่งออกเป็นสามองค์ประกอบหลักได้แก่แรงอุทกสถิต (Hydrostatic Force) แรงอุทกพลวัต (Hydrodynamic Force) และแรงกระแทกจากซากปรักหักพัง (Debris Impact Force) แรงอุทกสถิตเป็นแรงที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ กระทำกับโครงสร้างแรงนี้สามารถทำให้เกิดความเสียหายโครงสร้างอย่างมาก เนื่องจากความแตกต่างของแรงกดดันระหว่างด้านตรงข้ามของส่วนที่พิจารณา โดยทั่วไปแรงอุทกสถิตส่งผลกระทบต่อการป้องกันตามแนวชายฝั่งที่มีความยาวมาก ๆ เช่น เขื่อนกันทรายและคลื่น (Jetty), กำแพงป้องกันริมชายหาด (Sea Wall), เขื่อนป้องกันคลื่นนอกชายฝั่ง (Offshore break water) เป็นต้น อย่างไรก็ตามแรงอุทกพลวัตอาจไม่มีผลกระทบต่ออาคารที่สูงไม่มากและมีความกว้างน้อย รวมทั้งเมื่อสึนามิกระทบต่ออาคารน้ำไหลเข้าภายในอาคารอย่างรวดเร็ว สำหรับแรงอุทกพลวัตคือแรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของน้ำ ซึ่งสามารถทำให้เกิดความเสียหายอย่างมากต่อโครงสร้างเนื่องจากความเร็วการไหลที่แรงที่เกิดจากสึนามิ แรงอุทกพลวัตเป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นของของเหลว ความเร็วการไหลและลักษณะอาคาร ASCE 7-22 [21] ได้กำหนดให้พิจารณาผลของแรงกระทำในรูปแบบของแรงอุทกพลวัตโดยการพิจารณาโครงสร้างอาคารทั้งหลังและแต่ละส่วนของโครงสร้างอาคารที่จมอยู่ใต้น้ำ ซึ่งแรงอุทกพลวัตยังสามารถเรียกว่าแรงดูด (Drag Force) FEMA P55 [22] และ CCH [23] เสนอความสัมพันธ์ในการหาค่าของแรงอุทกพลวัตได้ดังสมการที่ (1)

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A \rho u^2 \quad (1)$$

โดยที่  $C_D$  คือสัมประสิทธิ์การฉุด (Drag Coefficient),  $A$  คือพื้นที่ที่โครงสร้างตั้งฉากกับทิศทางการไหลของน้ำ,  $\rho$  คือความหนาแน่นของของน้ำ, และ  $u$  คือความเร็วของการไหล ซึ่ง CCH [23] และ FEMA P55 [22] ได้กำหนดสัมประสิทธิ์การฉุดมีค่าเท่ากับ 2.0 สำหรับลักษณะโครงสร้างอาคารที่มีพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของน้ำเป็นสี่เหลี่ยม

แรงกระแทกจากซากปรักหักพังคือแรงที่เกิดจากการชนของน้ำกับโครงสร้าง ซึ่งสามารถทำให้เกิดความเสียหายอย่างมากต่อโครงสร้างเนื่องจากการถ่ายทอดแรงอุทกพลวัตและแรงโมเมนตัม (Momentum) ที่กระทำต่ออาคาร [22] แรงกระแทกจากซากปรักหักพังเป็นฟังก์ชันของน้ำหนักของซากปรักหักพัง ความลึกของการไหล และความเร็วสูงสุดของการไหลที่ขนส่งซากปรักหักพัง โดยทั่วไป แรงกระแทกจากซากปรักหักพังมักเกิดขึ้นอิสระจากแรงสึนามิอื่น ๆ จึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองแรงที่เหมาะสมสำหรับการจำลองพฤติกรรมของแรงเนื่องจากสึนามิกระทำต่อโครงสร้างอาคารคือแบบจำลองในรูปแบบแรงอุทกพลวัต ซึ่งเป็นแรงที่กระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดความลึกของน้ำ [16-18] ดังนั้น การศึกษานี้จึงศึกษาพฤติกรรมแรงสึนามิกระทำต่อของโครงสร้างอาคารที่มีผนังก่ออริฐด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยจำลองแรงกระทำสึนามิในรูปแบบของแรงอุทกพลวัตซึ่งเป็นแรงที่กระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดความลึกของน้ำดังแสดงในภาพที่ 1

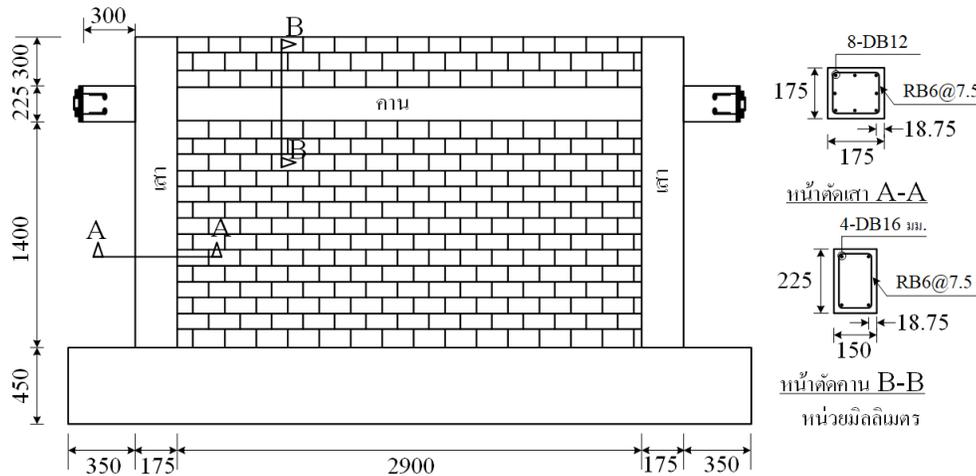


ภาพที่ 1 แรงกระทำเนื่องจากสึนามิในรูปแบบของแรงอุทกพลวัตที่กระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดความลึกของน้ำ

### โครงข้อแข็งที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในการศึกษานี้ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของผนังก่ออริฐที่อยู่ในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำเนื่องจากสึนามิโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยได้พิจารณาตัวอย่างทดสอบจากการศึกษาของ Mehrabi et al. [3] ที่ได้ทำการทดสอบโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังก่ออริฐภายใต้แรงกระทำด้านข้าง เพื่อใช้ในการสอบเทียบและวิเคราะห์แบบจำลอง ขนาดหน้าตัดเสาและคานของโครงข้อแข็งแสดงดังภาพที่ 2 ซึ่งเป็นขนาดที่ใกล้เคียงกับอาคารที่พักอาศัยคอนกรีต

เสริมเหล็กตามแนวชายฝั่งของประเทศไทย [24] โครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กประกอบด้วยเสาขนาดของหน้าตัด 175x175 มม. ด้วยเหล็กเสริมตามยาว DB12 มม. จำนวน 8 เส้น และเหล็กปลอก RB6@75 มม. และคานขนาดหน้าตัด 150x225 มม. ด้วยเหล็กเสริมตามยาว DB16 มม. จำนวน 4 เส้น และเหล็กปลอก RB6@75 มม. โครงข้อแข็งได้รับแรงกดแนวตั้งที่หัวเสา ขนาด 293 kN คุณสมบัติเหล็กเสริมแสดงดังตารางที่ 1 กำลังรับแรงดึงที่จุดครากของเหล็กเสริมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6, 12 และ 16 มม. มีค่าเท่ากับ 368 MPa, 420 MPa และ 414 MPa ตามลำดับ สำหรับคุณสมบัติคอนกรีตและวัสดุผนังก่ออิฐแสดงดังตารางที่ 2 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 30.9 MPa และมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 21.9 GPa ในขณะที่ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็กเสริมมีค่าเท่ากับ 200.6 GPa สำหรับคุณสมบัติของส่วนประกอบชิ้นส่วนผนังก่ออิฐ อิฐก่อมีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 16.5 MPa ในขณะที่ของปูนก่อมีกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 15.5 MPa ความหนาของปูนก่อที่รอยต่ออิฐก่อในชิ้นส่วนผนังก่ออิฐมีค่าเท่ากับ 9.21 มม. สำหรับกำลังรับแรงอัดของชิ้นส่วนผนังก่ออิฐมีค่าเท่ากับ 9.5 MPa ที่ค่าความเครียด 0.0027 โดยมีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นเท่ากับ 5.1 GPa



ภาพที่ 2 ขนาดและหน้าตัดของโครงข้อแข็งที่มีผนังก่ออิฐที่ใช้ในการวิเคราะห์ [3]

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเหล็กเสริมของตัวอย่างทดสอบจากผลการศึกษาของ Mehrabi et al. [3]

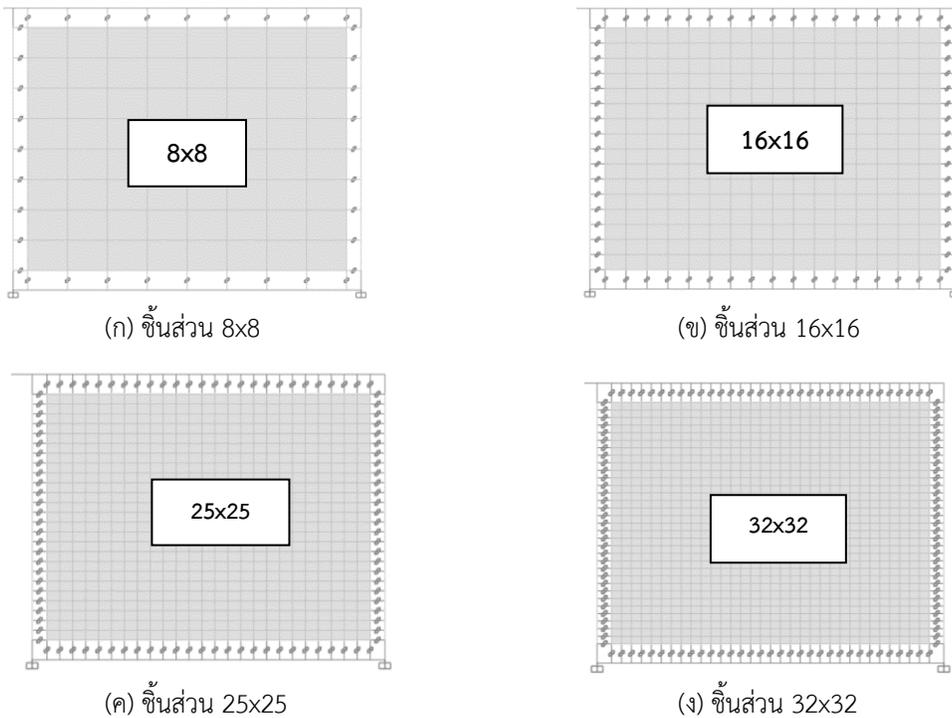
วัสดุ	กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (MPa)	โมดูลัสความยืดหยุ่น (GPa)
เหล็กเสริม	DB16 มม.	413.7
	DB12 มม.	420.6
	RB6 มม.	367.5

ตารางที่ 2 คุณสมบัติคอนกรีตและวัสดุผนังก่ออิฐของตัวอย่างทดสอบจากผลการศึกษาของ Mehrabi et al. [3]

วัสดุ	กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก (MPa)	โมดูลัสความยืดหยุ่น (GPa)
คอนกรีต	30.9	21.9
ชิ้นส่วนผนังก่ออิฐ	9.5	5.1
อิฐก่อ	16.5	-
ปูนก่อ	15.5	-

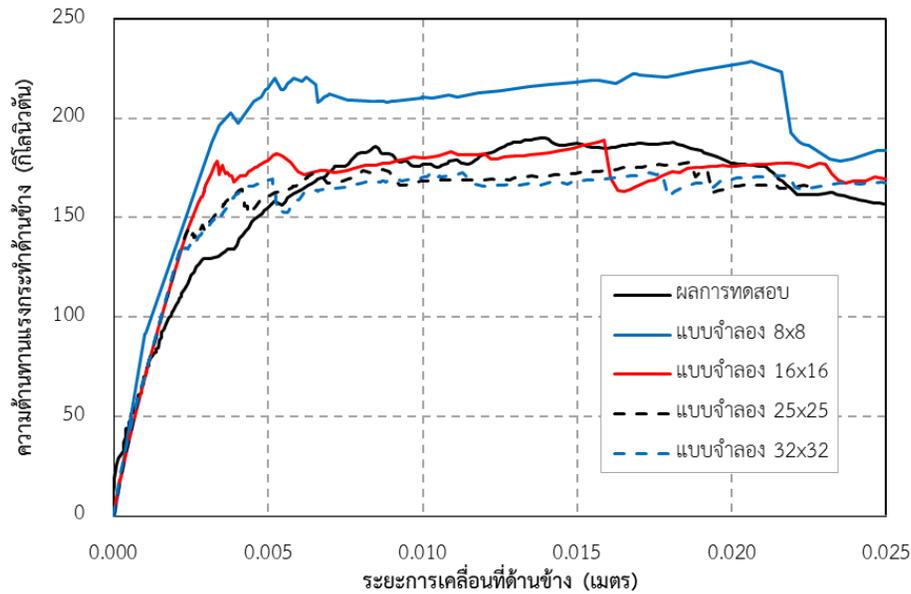
### แบบจำลองและการสอบเทียบแบบจำลอง

แบบจำลองผนังก่ออิฐในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำของสึนามิที่ใช้ในการวิจัยนี้ประกอบด้วยแบบจำลองของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กและแบบจำลองผนังก่ออิฐดังแสดงในภาพที่ 1 การจำลองผนังอิฐก่ออิฐด้วยชิ้นส่วนไฟไนต์เอลิเมนต์ที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งเหมาะสำหรับการรับแรงกระทำจากสึนามิที่กระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดความลึกน้ำ สำหรับแบบจำลองโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กคานและเสาประกอบไปด้วยชิ้นส่วนยืดหยุ่นอีลาสติกเชิงเส้น (Linear Elastic) และจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) จุดหมุนพลาสติกถูกวางที่ตำแหน่งปลายทั้งสองข้างของคานและเสาเพื่อแสดงพฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Behavior) พฤติกรรมของจุดหมุนพลาสติกในความสัมพันธ์ของโมเมนต์กับความโค้ง (Curvature) ถูกกำหนดตาม ASCE 41-13 [25] ฐานรากของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นแบบยึดแน่น [26] สำหรับชิ้นส่วนผนังก่ออิฐทำการจำลองโดยใช้ชิ้นส่วนไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีคุณสมบัติแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Finite Element) กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งกำหนดพฤติกรรมด้วยความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียด (Stress and Strain Relationship) ทำการจำลองโดยใช้ชิ้นส่วนโครงสร้างแบบเปลือกบาง (Shell Element) แบบสี่เหลี่ยม (Q4 Element) โดยในแต่ละชิ้นส่วนนั้นจะมีจุดเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วน (Integration Point) 4 จุด สำหรับการส่งถ่ายแรงระหว่างโครงข้อแข็งและผนังก่ออิฐใช้ชิ้นส่วนเชื่อมต่อแบบแข็งเกร็ง (Rigid Link) ที่สามารถรับได้เฉพาะแรงอัด ในการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นจำเป็นต้องกำหนดค่าสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในแต่ละจุด ซึ่งถูกกำหนดด้วยคุณสมบัติวัสดุที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ลักษณะและขนาดของชิ้นส่วนก็เป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งที่จำเป็นต้องทำการสอบเทียบเพื่อให้ได้ขนาดชิ้นส่วนที่เหมาะสมสำหรับการจำลองพฤติกรรม ดังนั้นการศึกษานี้จึงทำการสอบเทียบหาขนาดที่เหมาะสมของขนาดชิ้นส่วนไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการจำลองพฤติกรรมของผนังก่ออิฐกับผลการทดสอบของ Mehrabi et al. [3] โดยทำการแบ่งผนังก่ออิฐที่อยู่ในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างแบบเปลือกบางชนิดสี่เหลี่ยมจำนวน 8x8, 16x16, 25x25 และ 32x32 ชิ้นส่วน ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การแบ่งผนังก่ออิฐเป็นชิ้นส่วนย่อยแบบสี่เหลี่ยมแต่ละขนาดเพื่อใช้ในการสอบเทียบแบบจำลอง

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงกระทำด้านข้างและระยะการเคลื่อนตัวระหว่างผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองที่ปรับเปลี่ยนขนาดชิ้นส่วนไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบของ Mehrabi et al. [3] แสดงดังภาพที่ 4 แบบจำลองผนังก่ออิฐที่ถูกแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อยแบบสี่เหลี่ยม 8x8 ให้ค่าสติฟเนส (Stiffness) ค่าความต้านทานแรงกระทำด้านข้าง (Lateral Resistance) ที่สูงกว่าค่าที่ได้จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการอย่างมาก ในขณะที่แบบจำลองผนังก่ออิฐที่ถูกแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อยแบบสี่เหลี่ยม 16x16 มีความแม่นยำในการคาดการณ์ความแข็งแรงสูงสุดดีขึ้น แต่ก็ยังไม่สามารถจำลองผลตอบสนองก่อนและหลังจุดสูงสุดของความต้านทานได้ ถึงแม้แบบจำลองผนังก่ออิฐที่ถูกแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อยแบบสี่เหลี่ยม 16x16 จะเริ่มจับภาพพฤติกรรมของผนังก่ออิฐได้ดีกว่าแบบจำลองผนังก่ออิฐที่ถูกแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อยแบบสี่เหลี่ยม 8x8 เมื่อพิจารณาแบบจำลองผนังก่ออิฐที่ถูกแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อยแบบสี่เหลี่ยม 25x25 และ 32x32 พบว่ามีความสอดคล้องกับผลการทดสอบมากขึ้น แบบจำลอง 25x25 สามารถแสดงค่าความแข็งแรงเริ่มต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพรวมทั้งพฤติกรรมที่จุดสูงสุดและหลังจากจุดสูงสุดของความต้านทานแรงกระทำด้านข้าง ซึ่งชี้ให้เห็นถึงการจำลองพฤติกรรมที่มีความละเอียดมากขึ้น แบบจำลองผนังก่ออิฐที่ถูกแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อยแบบสี่เหลี่ยม 32x32 ให้ค่าความต้านทานแรงกระทำด้านข้างที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการมากที่สุด แต่ใช้ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองนานกว่าถึง 2 เท่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองผนังก่ออิฐที่ถูกแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อยแบบสี่เหลี่ยม 25x25 แต่ให้ผลที่ต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นการจำลองพฤติกรรมผนังก่ออิฐด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ชิ้นส่วนผนังบางที่ถูกแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อยแบบสี่เหลี่ยม 25x25 มีความเหมาะสมมากที่สุด

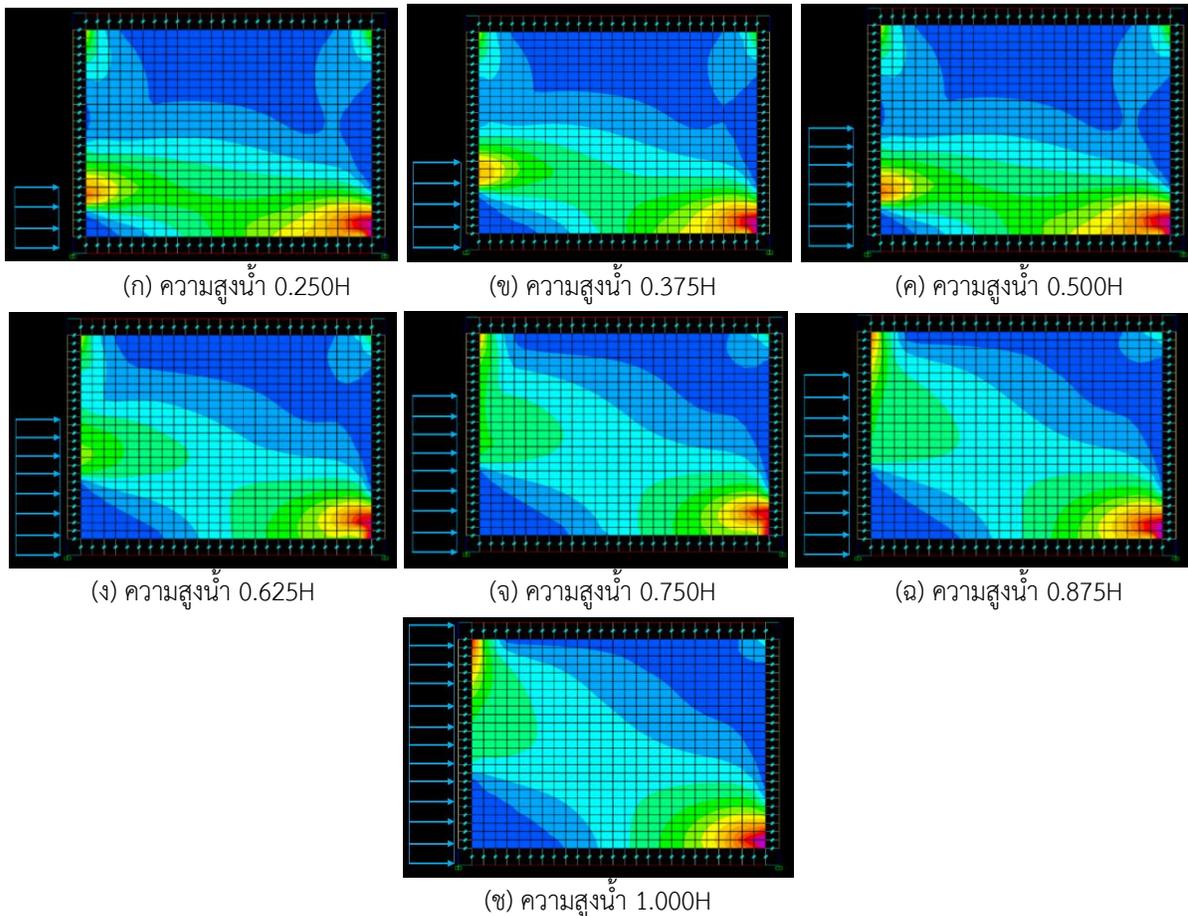


ภาพที่ 4 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองที่ปรับเปลี่ยนขนาดชิ้นส่วนไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบของ Mehrabi et al. [3]

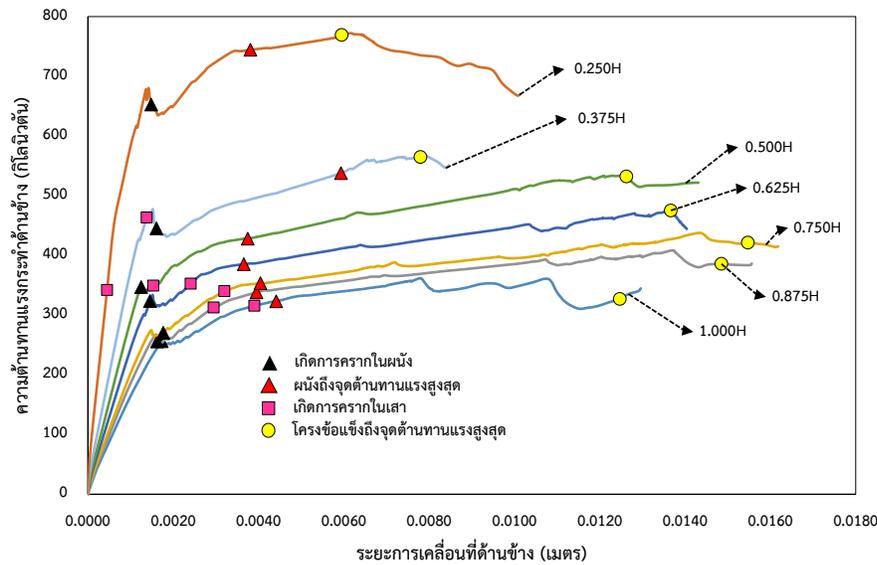
### ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง

ในการศึกษานี้วิเคราะห์พฤติกรรมของผนังก่ออิฐที่อยู่ในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำเนื่องจากสึนามิโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยได้พิจารณาตัวอย่างทดสอบจากการศึกษาของ Mehrabi et al. [3] โดยการจำลองพฤติกรรมผนังก่ออิฐด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้ชิ้นส่วนผนังบางที่ถูกแบ่งเป็นชิ้นส่วนย่อยแบบสี่เหลี่ยม 25x25 พิจารณาพฤติกรรมแรงกระทำเนื่องจากสึนามิในรูปแบบของแรงอุทกพลวัตที่เป็นแรงดันกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดระดับความลึกน้ำ ซึ่งพิจารณาพฤติกรรมที่ระดับความลึกน้ำ 7 ระดับความลึกเทียบกับความสูงของโครงข้อแข็งได้แก่ 0.250H, 0.357H, 0.500H, 0.625H, 0.750H, 0.875H และ 1.000H การกระจายตัวของหน่วยแรงที่ระนาบหลักจากผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของผนังก่ออิฐที่อยู่ในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำเนื่องจากสึนามิโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังภาพที่ 5 ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ว่าการกระจายตัวของหน่วยแรงที่ระนาบหลักเปลี่ยนแปลงไปตามระดับความสูงของน้ำ ในแบบจำลองที่มีระดับความสูงน้ำท่วมต่ำ ( $H=0.25H$  และ  $H=0.375H$ ) หน่วยแรงที่ระนาบหลักกระจุกตัวบริเวณโคนเสา ขณะที่ระดับน้ำท่วมถึงกลางเสา ( $H=0.5H$  และ  $H=0.625H$ ) การกระจายของแรงกดดันกลายเป็นสม่ำเสมอมากขึ้นตามส่วนล่างของผนัง เมื่อความลึกของน้ำเพิ่มขึ้น ( $H=0.750H$ ,  $H=0.875H$  และ  $H=1.000H$ ) พบว่าความเข้มข้นของแรงกดดันขยายตัวขึ้นไปสู่ส่วนบนของผนังอย่างชัดเจน โดยการกระจายตัวของหน่วยแรงนั้นจะมีลักษณะเป็นการกระจายตัวจากบนลงล่างในลักษณะเป็นเส้นทแยงมุมและเมื่อพิจารณาจากระดับแรงกระทำที่ระดับน้ำลดลงแนวการกระจายตัวของหน่วยแรงในผนังก็จะลดลงตามระดับไปด้วย และหน่วยแรงสูงสุดอยู่ที่บริเวณมุมของผนังด้านล่างที่ตรงข้ามกับแรงที่กระทำ จากผลการวิเคราะห์ยังพบอีกว่าค่าความกว้างการกระจายตัวของหน่วยแรงที่ถูกระดับความสูงน้ำมีขนาดใกล้เคียงกัน คำนี้นับบอกถึงความกว้างเทียบเท่าของค้ำยัน (Equivalent Stud Width) ในการรับแรงอัดของผนังก่ออิฐ ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณหาความต้านทานแรงกระทำด้านข้างของผนังก่ออิฐในแบบจำลองโดยชิ้นส่วนสปริงทั้งในแนวทแยงและแนวราบ

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงกระทำด้านข้างและระยะการเคลื่อนที่ของโครงข้อแข็งที่มีผนังก่ออิฐภายใต้แรงกระทำเนื่องจากสึนามิที่ระดับความลึกน้ำต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 6 จากผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อระดับความลึกน้ำเพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานแรงกระทำด้านข้างมีค่าลดลง เนื่องจากแรงกระทำสึนามิเป็นแรงที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดความลึกน้ำที่ระดับความลึกต่ำ ๆ ( $H=0.250H$  และ  $H=0.325H$ ) แรงที่กระทำที่เสาจึงถูกถ่ายลงสู่ฐานรากโดยตรง ทำให้ต้องใช้แรงผลึกที่มากขึ้นจึงจะเกิดการวิบัติในผนังก่ออิฐ สังเกตได้จากกลไกวิบัติที่เกิดขึ้น เกิด plastic hinge ในเสา ซึ่งเมื่อระดับน้ำสูงขึ้นอัตราส่วนของแรงที่ถูกถ่ายลงสู่ฐานรากโดยตรงจะมีค่าลดลง แรงกระทำจึงสามารถกระจายสู่โครงข้อแข็งและผนังก่ออิฐได้มากขึ้น สำหรับกลไกการวิบัติที่เกิดขึ้นที่ทุกระดับความสูงน้ำผนังก่ออิฐเกิดการวิบัติก่อนเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากผนังก่ออิฐมีค่าสติฟเนสที่สูงกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมาก ที่ระดับความสูงน้ำต่ำ ๆ  $0.250H$  และ  $0.375H$  เป็นระดับน้ำที่แรงกระทำเนื่องจากสึนามิถูกถ่ายลงสู่ฐานรากโดยตรงในอัตราส่วนที่ค่อนข้างมาก จึงส่งผลให้เกิดการครากขึ้นในเสาคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนที่จะเกิดการครากในผนังก่ออิฐ แล้วจึงตามมาด้วยกลไกการถึงจุดสูงสุดของความต้านทานในผนังและจุดสูงสุดของความต้านทานในเสา เมื่อระดับน้ำสูงขึ้น ที่ค่าความลึก  $0.500H$ ,  $0.625H$ ,  $0.750H$ ,  $0.875H$  และ  $1.000H$  แรงกระทำเนื่องจากสึนามิถูกถ่ายลงสู่ฐานรากโดยตรงในอัตราส่วนที่ลดลง กลไกการวิบัติจึงเกิดการครากในผนังก่อนเกิดการครากในเสา แล้วจึงตามมาด้วยกลไกการถึงจุดสูงสุดของความต้านทานในผนังและจุดสูงสุดของความต้านทานในเสา



ภาพที่ 5 การกระจายตัวของหน่วยแรงในระนาบหลักของผนังก่ออิฐที่ระดับความสูงน้ำที่พิจารณา



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแรงกระทำด้านข้างและระยะการเคลื่อนที่ของโครงข้อแข็งที่มีผนังก่ออิฐภายใต้แรงกระทำเนื่องจากสึนามิที่ระดับความลึกน้ำต่างๆ

### สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมของผนังก่ออิฐในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำเนื่องจากสึนามิโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ระดับความลึกต่างๆ ใช้ชิ้นส่วนโครงสร้างแบบเปลือกบางชนิดสี่เหลี่ยมแบบ Q4 ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนมีจุดเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วน จำนวน 4 จุด สามารถใช้สำหรับการจำลองการส่งถ่ายแรงระหว่างโครงข้อแข็งและผนังก่ออิฐได้อย่างเหมาะสม การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Finite Element Method) การจำลองพฤติกรรมผนังก่ออิฐที่อยู่ในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยชิ้นส่วนโครงสร้างแบบเปลือกบางชนิดสี่เหลี่ยม 25x25 ให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานมากที่สุด ด้วยการแสดงค่าความแข็งแรงเริ่มต้นและพฤติกรรมที่จุดสูงสุดและหลังจุดสูงสุดของความต้านทานแรงกระทำด้านข้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการวิเคราะห์พบว่าระดับความลึกของน้ำส่งผลต่อการกระจายของหน่วยแรงในโครงสร้าง ในระดับความลึกน้ำที่ต่ำๆ ช่วง 0.250H-0.500H หน่วยแรงกระจุกตัวที่โคนเสาอย่างมาก เมื่อระดับความลึกน้ำเพิ่มมากขึ้นค่าหน่วยแรงขยายตัวไปที่ส่วนบนของผนังก่ออิฐ การกระจายตัวของหน่วยแรงเป็นแบบเส้นทแยงมุมจากบนลงล่างและหน่วยแรงสูงสุดปรากฏที่มุมของผนังด้านล่างที่ตรงข้ามกับแรงที่กระทำ ผลการวิเคราะห์ยังชี้ให้เห็นว่าความกว้างการกระจายตัวของหน่วยแรงที่ระดับความสูงน้ำมีขนาดใกล้เคียงกัน เมื่อระดับความลึกน้ำเพิ่มมากขึ้น การวิบัติที่เกิดขึ้นที่ทุกระดับความสูงน้ำผนังก่ออิฐเกิดการวิบัติก่อนเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากผนังก่ออิฐมีค่าสติฟเนสที่สูงกว่าเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมาก ค่าความต้านทานแรงกระทำด้านข้างมีค่าลดลง โดยค่าความต้านทานที่ระดับความลึกน้ำ 0.250H มีค่าเท่ากับ 780 กิโลนิวตัน และค่าความต้านทานที่ระดับความลึกน้ำ 1.000H มีค่าเท่ากับ 320 กิโลนิวตัน เนื่องจากแรงกระทำสึนามิเป็นแรงที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดความลึกน้ำที่ระดับความลึกต่างๆ แรงที่กระทำที่เสาจึงถูกถ่ายลงสู่ฐานรากโดยตรงทำให้ต้องใช้แรงผลึกที่มากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

1. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Indian Ocean Earthquake and Tsunami: December 26, 2004. Retrieved, 2005, from <https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/26dec2004.html>
2. United States Geological Survey (USGS). M 9.0 - near the east coast of Honshu, Japan. Retrieved, 2011, from [https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official20110311054624120\\_30/executive](https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official20110311054624120_30/executive)
3. Mehrabi A, Shing P, Schuller M, Noland J. Experimental Evaluation of Masonry-Infilled Reinforced Concrete Frames. *Journal of Structural Engineering*. 1996; 122(3): 233-241.
4. Kakaletsis D, Karayannis C. Experimental Investigation of infilled R/C frames with eccentric Openings. *Structural Engineering & Mechanics*. 2007; 26(3): 231-250, DOI: 10.12989/sem.2007.26.3.231
5. Roosta S, Liu Y. Behavior of concrete masonry infills bounded by masonry frames subjected to in-plane lateral loading – Experimental study. *Engineering Structures*. 2021; 247: 113153. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.113153
6. Karayannis CG, Favvata MJ, Kakaletsis DJ. Seismic behavior of infilled and pilotis RC frame structures with beam-column joint degradation effect. *Eng. Struct.* 2011; 33: 2821-2831, DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.06.006
7. Mulgund GV, Kulkarni AB. Seismic assessment of RC frame buildings with brick masonry infills. *International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies (IJAEST)*. 2011; 2(2): 140-147.
8. Fiore A, Netti A, Monaco P. The influence of masonry infill on the seismic behavior of RC frame buildings. *Engineering Structures*. 2012; 44: 133-145, DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.05.023
9. Mohammad Y, Panagiotis GA. Multi-strut macro-model for masonry infilled frames with openings. *Journal of Building Engineering*. 2020; 32: 101683, DOI:10.1016/j.jobbe.2020.101683
10. Crisafulli FJ, Carr AJ, Park R. Analytical modelling of infilled frame structures-a general review. *Bull. New Zealand Society Earthquake Engineering*. 2000; 33: 30-47.
11. Crisafulli FJ, Carr AJ. Proposed macro-model for the analysis of infilled frame structures. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*. 2007; 40(2): 69-77.
12. Mostafaei H, Kabeyasawa T. Effect of infill masonry walls on the seismic response of reinforced concrete buildings subjected to the 2003 Bam earthquake strong motion. A case study of Bam telephone center. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*. 2004; 79: 133-156.
13. Islam MT, Noor-E-Khuda S, Saito TA. simple infill frame with macro element masonry model for the in-plane performance of infill walls. *Structures*. 2022; 42: 386-404.



14. Mehrabi A, Shing P. Finite Element Modeling of Masonry-Infilled RC Frames. *Journal of Structural Engineering*. 1997; 123(5): 604-613.
15. Memari A, Aliaari M. Finite Element Modeling of Masonry Infill Walls Equipped with Structural Fuse, *New Trends in Structural Engineering*. 2018; DOI: 10.5772/intechopen.77307
16. Yeh H. Design tsunami forces for onshore structures. *Journal of Disaster Research*. 2007; 2(6): 531-536.
17. Federal Emergency Management Agency (FEMA). FEMA P646: Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis. 2019; California: Applied Technology Council.
18. Lukkunaprasit P, Thanasisathit N, Yeh H. Experimental verification of FEMA P646 tsunami loading. *Journal of Disaster Research*. 2009; 4: 410-418.
19. Foytong P, Ruangrassamee A, Lukkunaprasit P. Correlation analysis of a reinforced-concrete building under tsunami load pattern and effect of masonry infill walls on tsunami load resistance. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*. 2013; 6(3): 173-184, DOI: 10.1080/19373260.2012.756125
20. Waenpracha S, Foytong P, Suppasri A, Tirapat S, Thanasisathit N, Maneekul P, et al. Development of Fragility Curves for Reinforced-Concrete Building with Masonry Infilled Wall under Tsunamis. *Advances in Civil Engineering*. 2023; 2023: 1-15, DOI: 10.1155/2023/8021378
21. American Society of Civil Engineers (ASCE). Standard: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, Standard by ASCE/SEI (7-22). 2021.
22. Federal Emergency Management Agency (FEMA). FEMA P55: Coastal construction manual. 3rd ed. 2011; Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.
23. City and County of Honolulu Building Code (CCH). Department of Planning and Permitting of Honolulu Hawaii. 2000, Chapter 16 Article 11, Honolulu, HI.
24. Foytong P, Ruangrassamee A, Lukkunaprasit P, Thanasisathit N. Behaviours of Reinforced-Concrete Building under Tsunami Loading. *The IES Journal Part A Civil & Structural Engineering*. 2015; 8(2): 101-110, DOI: 10.1080/19373260.2015.1013998
25. American Society of Civil Engineers (ASCE). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, Standard by ASCE/SEI (41-13). 2014.
26. Muangnoi N, Foytong P, Janpila A, Boonpichetvong M, Areemit N, Panachet T, et al. Behavior of Industrial Building under Seismic Loading. *International Journal of GEOMATE*. 2020; 18(69): 67-73.