

การประเมินความสามารถในการรับแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างผนังอิฐรับน้ำหนัก ด้วยวิธีโต๊ะที่ปรับเอียง วัชรินทร์ จินต์วุฒิ

Seismic Evaluation of Unreinforced Masonry using the Static Tilt Table Testing Watcharin Jinwuth

ภาควิชาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

Department of Architecture, Faculty of Architecture, Naresuan University, Phitsanulok Province.

*Corresponding Author. E-mail address: watcharinj@nu.ac.th

Received 30 May 2011; accepted 31 August 2011

บทคัดย่อ

บ้านดินที่ปลูกสร้างด้วยระบบผนังรับน้ำหนักอิฐดินดิบ เป็นระบบโครงสร้างที่ง่ายต่อการเสียหายจากแรงแผ่นดินไหว ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาทำให้เกิดการสูญเสียมากมายทั้งต่อชีวิตและทรัพย์สิน โดยเฉพาะกับประชาชนที่อาศัยอยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวของประเทศที่กำลังพัฒนา ที่ผ่านมานงานวิจัยที่จะมีส่วนช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับอาคารประเภทนี้มีข้อจำกัดอยู่ที่อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบที่มีราคาแพง และต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญ ทำให้งานวิจัยด้านแผ่นดินไหวถูกจำกัดอยู่เฉพาะในประเทศที่พัฒนาแล้ว งานวิจัยฉบับนี้เป็นการประเมินประสิทธิภาพของโต๊ะที่ปรับเอียงตามหลักทฤษฎีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับทดสอบความสามารถในการต้านแรงแผ่นดินไหวของหุ่นจำลองโครงสร้างผนังอิฐดินดิบรูปทรงกลมซึ่งเป็นรูปทรงที่มีความแข็งแรงสูงสุด เปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบด้วยโต๊ะสั่นไหวตามหลักทฤษฎีพลศาสตร์ ผลการทดลองเปรียบเทียบยืนยันในประสิทธิภาพของโต๊ะที่ปรับเอียง รวมทั้งทำให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการวิบัติของบ้านอิฐดินดิบรูปทรงกลม ผลงานวิจัยนี้เป็นประโยชน์ในการศึกษาและพัฒนาโต๊ะที่ปรับเอียงสำหรับใช้วิจัยด้านแผ่นดินไหวต่อไป ทั้งนี้ก็เพื่อลดการสูญเสียที่เกิดจากการพังทลายของอาคารประเภทนี้ในเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

คำสำคัญ: บ้านดิน อิฐดินดิบ ด้านแผ่นดินไหว บ้านทรงกลม โต๊ะที่ปรับเอียง

Abstract

Unreinforced adobe or mud-brick structures are weak when subjected to seismic forces. These types of buildings used in many locations throughout the world suffer severe damage from seismic forces and cause a vast number of deaths. There has been limited research on the effect of seismic forces on adobe structures as the research equipment is expensive and requires specialist research personnel to undertake meaningful investigations. Most seismic research on adobe structures has been undertaken in the developed countries that are able to afford the specialized research equipment and staff. This paper presents the seismic experiments undertaken to evaluate the results of the performance of circular adobe structure failure utilising a simple static-tilt-table. The static tilt-table testing was compared to test results using a dynamic shake-table. Two small-scale circular models (1:3 scale) of unreinforced adobe structures were built, tested on a static tilt-table testing and a dynamic shake-table. The results confirmed that the results from the tilt-table testing coincided with the results of the dynamic shake-table. In addition, the failure of circular adobe buildings assisted to predict the failure mechanism of unreinforced adobe or mud-brick structures in the future.

Keywords: Adobe construction, mud-brick, earthquake resistance, circular building, tilt table test

บทนำ

แผ่นดินไหวเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของพื้นดิน อันเนื่องมาจากการปลดปล่อยพลังงานเพื่อลดความเครียดที่สะสมไว้ในโลกออกมา เพื่อปรับสมดุลของเปลือกโลกให้คงที่ การสั่นสะเทือนดังกล่าวส่งผลให้เกิดความเสียหายมากมาย ทั้งต่ออาคารบ้านเรือน ระบบเศรษฐกิจ ระบบสาธารณสุข รวมไปถึงการสูญเสียชีวิตของมนุษย์ ซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากการพังทลายของอาคาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาคารที่ก่อสร้างด้วยระบบโครงสร้างผนังอิฐรับน้ำหนักที่ไม่มีการเสริมเหล็ก (Unreinforced masonry structures) ประเภทของอาคารชนิดนี้ ได้แก่ อาคารที่ก่อสร้างด้วยผนังอิฐดินดิบ ผนังอิฐมวลเบา ผนังอิฐบล็อกประสาน และ ผนังคอนกรีตบล็อก เป็นต้น วัสดุก่อสร้างเหล่านี้มีความต้านทานแรงดึงและความเหนียว

ของวัสดุที่ต่ำ ส่งผลให้ผนังของอาคารเกิดการแตกร้าวและพังทลาย เมื่อมีแรงกระทำด้านข้างที่เกิดจากแผ่นดินไหวเข้ากระทำ จากผลการสำรวจจำนวนผู้ที่เสียชีวิตจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในช่วงศตวรรษที่ 20 พบว่าสาเหตุหลักมาจากการพังทลายของผนังอิฐ สูงถึงร้อยละ 65 ของสาเหตุการเสียชีวิตทั้งหมด ผนังอิฐดินดิบเป็นระบบผนังรับน้ำหนักที่ทำให้เกิดการสูญเสียจากแผ่นดินไหวมากที่สุด เมื่อเทียบกับโครงสร้างผนังอิฐรับน้ำหนักประเภทอื่น ๆ (Smith, 1941) เนื่องจากผนังอิฐดินดิบเป็นวัสดุที่ทำได้ง่ายในท้องถิ่น จึงเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างอาคารที่พักอาศัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่กำลังพัฒนา ดังนั้นงานวิจัยที่จะมีส่วนช่วยลดความเสียหายจากแรงแผ่นดินไหวสำหรับอาคารประเภทนี้ จึงสมควรมีการดำเนินการอย่างเร่งด่วน เพื่อลดความสูญเสียที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

ในการประเมินความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างนั้น โดยทั่วไปสามารถดำเนินการทดสอบได้ 2 วิธี คือ วิถีพลศาสตร์ (Dynamic analysis) และวิธีแรงสถิตเทียบเท่า (Static analysis) (บุญจัต, 2551) สำหรับวิถีทางพลศาสตร์นั้น เป็นการทดสอบพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของโครงสร้างที่เกิดขึ้นจริงในขณะที่เกิดแผ่นดินไหว ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับและนิยมใช้ในการประเมินความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้าง (Arros, 2003) แต่วิธีการทดสอบนี้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่สูงและขั้นตอนการทดสอบที่ยุ่งยากทำให้เกิดเป็นข้อจำกัดสำหรับงานวิจัยด้านแผ่นดินไหว โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับประเทศที่กำลังพัฒนาซึ่งขาดแคลนทั้งทุนทรัพย์และผู้เชี่ยวชาญ สำหรับวิธีแรงสถิตเทียบเท่า โครงสร้างจะถูกประเมินจากกำลังรับแรงสถิตที่กระทำในแนวนอน (Horizontal forces) แล้วทำการเปรียบเทียบกับ

สถิตแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในพื้นที่นั้น ๆ ซึ่งวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการทดลองที่ต่ำกว่าและขั้นตอนทดลองที่ไม่ยุ่งยาก การประเมินความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่านี้ สามารถแบ่งย่อยออกได้ 2 วิธีคือ วิธีคำนวณจากสมการแรงสถิตเทียบเท่า (Equivalent-static-force analysis) และ วิธีการทดสอบด้วยโต๊ะที่ปรับเอียง (Static tilt-table testing) สำหรับวิธีคำนวณจากสมการแรงสถิตเทียบเท่านี้ มีระบุไว้ในมาตรฐานการออกแบบอาคารสำหรับต้านทานแรงแผ่นดินไหวของประเทศต่าง ๆ เช่น กฎกระทรวงฉบับที่ 49 พ.ศ. 2540 ของประเทศไทย มาตรฐานออสเตรเลีย AS 1170.4 เป็นต้น โดยวิธีนี้ใช้สมมติฐานที่ว่าแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้าง (V) สามารถคำนวณได้จากตัวแปรต่างๆ ตามสมการด้านล่างนี้

$$V = k_p \times Z \times C_h(T_1) \times S_p / \mu \times W_1 \quad (\text{Standards Australia, 2007}) \quad (1)$$

โดย

k_p = Probability factor for the annual probability of exceedance
= 1 (for an annual probability of exceedance 1/500)

Z = Hazard factor (ground acceleration) for specific locations

$C_h(T_1)$ = Spectral shape factor dependent on sub soil and period

μ = Ductility factor = 1.25 (สำหรับผนังอิฐดินดิบ)

S_p = Structural performance factor = 0.77 (สำหรับผนังอิฐดินดิบ)

W_1 = น้ำหนักโดยรวมของโครงสร้าง

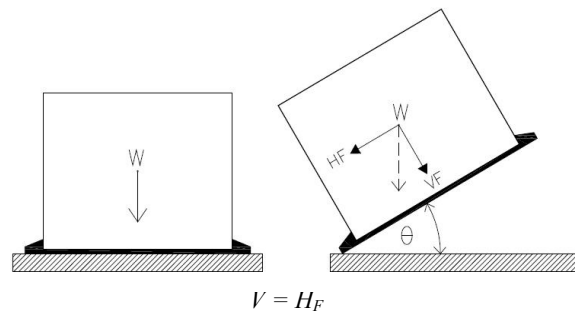
สำหรับกรณีศึกษาของงานวิจัยนี้ใช้สมการแรงสถิตเทียบเท่าของมาตรฐานออสเตรเลียในการวิเคราะห์หาค่าแรงเฉือนที่ฐาน เนื่องด้วยมาตรฐานออสเตรเลียมีการกำหนดค่าตัวแปรเฉพาะสำหรับผนังอิฐดินดิบเอาไว้ เช่น ค่าความเหนียวของวัสดุ เป็นต้น ซึ่งบางมาตรฐานไม่ได้รับอนุญาตสมบัติวัสดุเฉพาะสำหรับอาคารประเภทนี้ รวมถึงกฎกระทรวงของประเทศไทยด้วย

ทั้งนี้การคำนวณด้วยวิธีแทนค่าในสมการดังกล่าวมีข้อจำกัดที่นำไปใช้ได้เฉพาะอาคารที่มีรูปทรงปกติและวัสดุก่อสร้างมาตรฐานเท่านั้น เนื่องจากการคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติของอาคาร ($C_h(T_1)$) สำหรับรูปทรงอาคารที่ผิดปกติ หรือใช้วัสดุก่อสร้างที่ไม่มีมาตรฐานควบคุม เช่น อิฐดินดิบ เป็นต้น มีขั้นตอนคำนวณหาค่าความถี่อาคารที่ยุ่งยากและเสียค่าใช้จ่ายสูง ส่วนในกรณีของวิธีทดสอบด้วยโต๊ะที่ปรับเอียงนั้น เป็นวิธีทดสอบหุน้ำหนักที่ใช้วัสดุจริงเพื่อหาค่าแรงเฉือนสูงสุด (Maximum tensile strength) ที่ทำให้โครงสร้างอาคารเกิดการรื้อพัง ซึ่งไม่มีค่าความถี่ของอาคารมาเกี่ยวข้องกับการทดลอง จึงสามารถทดสอบได้ทั้งอาคารรูปทรงปกติและไม่ปกติ

สำหรับวิธีทดสอบด้วยโต๊ะที่ปรับเอียงนั้น โครงสร้างของหุน้ำหนักจะถูกกระทำจากแรงกระทำด้านข้าง (Horizontal force, HF) ที่เกิดจากน้ำหนักของโครงสร้าง (W_1) คูณด้วย $\sin\theta$ ของโต๊ะปรับเอียงตามสมการ (Jinwuth et al., 2010) ดังนี้

$$HF = \sin\theta \times W_1 \quad (2)$$

ในรูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงการแปลงน้ำหนักของหุน้ำหนัก (W_1) ไปเป็นแรงกระทำด้านข้าง (HF) เมื่อโต๊ะที่ปรับเอียงถูกยกขึ้นที่มุมองศาเท่ากับ θ ซึ่งเทียบได้กับแรงกระทำด้านข้างจากแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างในสถานการณ์จริง



รูปที่ 1 แสดงแนวคิดของการทดสอบความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวด้วยวิธีโต๊ะที่ปรับเอียง

ดังนั้นเมื่อหุน้ำหนักถูกยกเอียง จนถึงจุดที่สังเกตเห็นได้ถึงการรื้อพังของโครงสร้าง นั้นแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับแรงกระทำด้านข้างสูงสุดของโครงสร้างที่เกิดจาก ณ มุมองศานั้น

เอกสารงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงรายละเอียดการประเมินประสิทธิภาพของวิธีทดสอบด้วยโต๊ะที่ปรับเอียง

(Tilt table testing) ตามหลักของทฤษฎีแรงสถิตเทียบเท่า ในการทดสอบความสามารถในการรับแรงแผ่นดินไหวของหุ่นจำลองโครงสร้างผนังอิฐดินดิบรับน้ำหนัก โดยหุ่นจำลองดังกล่าวมีมาตราส่วน 1:3 และมีผนังเป็นรูปทรงกลม ซึ่งเป็นรูปทรงที่มีความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวสูงสุด (Samali et al., 2011) และเปรียบเทียบผลการทดลองกับวิธีพลศาสตร์ โดยการทดสอบด้วยวิธีโต๊ะสั่นไหว (Shake table testing) ซึ่งดำเนินการทดสอบ ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีชิตินัย ผลจากงานวิจัยนั้นนอกจากจะยืนยันประสิทธิภาพในการทดสอบโครงสร้างผนังอิฐดินดิบด้วยวิธีโต๊ะที่ปรับเอียง ยังสามารถนำวิธีการทดลองไปประยุกต์ใช้ในการประเมินความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างชนิดนี้ในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวอื่นของโลกได้ นอกจากนี้ผลการทดลองยังทำให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการวิบัติและความสามารถในการต้านแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างผนังอิฐดินดิบทรงกลม ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาความสามารถในการต้านแรงแผ่นดินไหวของอาคารประเภทนี้ได้ในอนาคต

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. หุ่นจำลองบ้านอิฐดินดิบทรงกลม

หุ่นจำลองบ้านอิฐดินดิบทรงกลม มาตราส่วน 1:3 จำนวน 2 หลัง ถูกสร้างจากอิฐดินดิบตากแห้งจำนวน 432

ก้อนต่อหลัง โดยขนาดของอิฐย่อส่วนมาจากขนาดอิฐดินดิบที่นิยมใช้ในเมืองไทย ขนาด 300 x 200 x 100 มิลลิเมตร (Uthai Phat Ra Kun, 2004) อิฐแต่ละก้อนมีน้ำหนักประมาณ 375 กรัม ส่วนผสมของอิฐดินดิบประกอบไปด้วย ดิน 2 ส่วน ทราช 2 ส่วน และแกลบข้าว 1 ส่วน จากผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดของอิฐดินดิบดังกล่าว พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 667 kPa หลังจากที่ยอิฐดินดิบทั้งหมดแห้งสนิทจากการตากแดด จึงนำมาถือเป็นผนังอิฐดินดิบทรงกลม สำหรับดินก่อที่ใช้ในการประสานระหว่างอิฐแต่ละก้อนใช้ส่วนผสมเดียวกับการทำอิฐดินดิบแต่มีความเหลวกว่า ซึ่งมีความหนาของดินก่อเท่ากับ 10-12 มิลลิเมตร โดยหุ่นจำลองมีรัศมีของผนังด้านนอกสุดเท่ากับ 0.60 เมตร และสูง 1.20 เมตร รายละเอียดขนาดของหุ่นจำลองแสดงไว้ตามตารางที่ 1 เมื่อก่อผนังอิฐดินดิบได้ตามความสูงที่ต้องการ หุ่นจำลองทั้งสองจะถูกนำมาตากแดด ทิ้งไว้จนกว่าผนังจะแห้งสนิท รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนการก่อสร้างหุ่นจำลองอิฐดินดิบรูปทรงโค้ง หลังจากก่อผนังหุ่นจำลองแห้งสนิท หุ่นจำลองจะถูกติดตั้งหลังคาแผ่นไม้อัด และวางอุทราชไว้บริเวณด้านบน เพื่อเพิ่มน้ำหนักของหลังคาให้ได้เท่ากับ 2.25 kN ทั้งนี้เพื่อจำลองรูปแบบการรับน้ำหนักของผนังหุ่นจำลองให้เหมือนกับอาคารต้นแบบที่มีน้ำหนักหลังคากระทำ รูปที่ 3 แสดงขั้นตอนการติดตั้งหลังคา

ตาราง 1 รายละเอียดขนาดของหุ่นจำลองผนังอิฐดินดิบทรงกลม

Model shape	Wall thickness (mm)	Plan Dimension (m)	Wall height (m)	Roof load pressure (kN/m ²)	Total roof load (kN)	Total wall load (kN)
ผนังโค้ง	31	1.2 (Diameter)	0.82	2	2.25	1.56



(1)



(2)



(3)



(4)

รูปที่ 2 แสดงลำดับขั้นตอนการก่อสร้างผนังอิฐดินดิบรูปทรงโค้ง

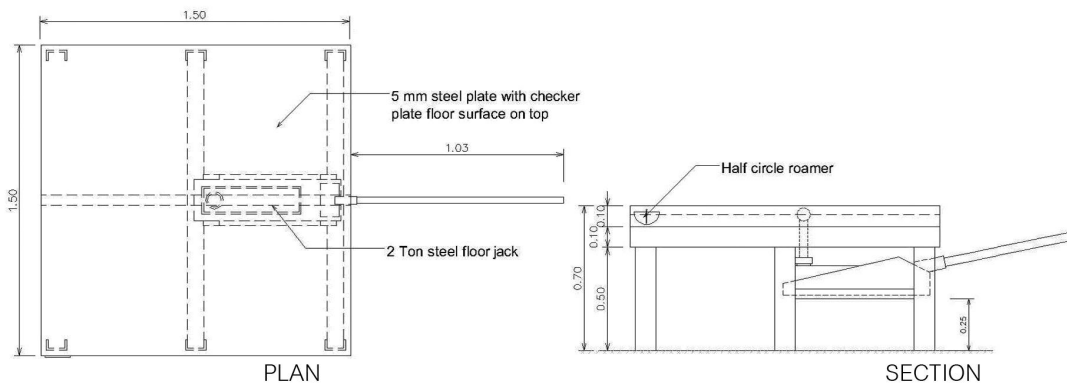


รูปที่ 3 แสดงติดตั้งหลังคาและอุทราทรากก่อนทำการทดสอบ

2. โต๊ะที่ปรับเอียง (Tilt table)

โต๊ะที่ปรับเอียงถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อทดสอบความสามารถในการรับแรงแผ่นดินไหว (รูปที่ 4) ตามหลักทฤษฎีแรงสถิตเทียบเท่า โดยดำเนินการก่อสร้างที่คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ พื้นโต๊ะรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสถูกสร้างขึ้นจากเหล็กแผ่นหนา 5 มิลลิเมตร ขนาด 1.5 เมตร x 1.5 เมตร โดยมีแผ่นเหล็กลายตารางความหนา 2 มิลลิเมตร วางเชื่อมติดกับพื้นโต๊ะด้านบนเพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะระหว่างแผ่นเหล็กกับอิฐดินดิบสำหรับการสร้างผนังหุ่นจำลอง แม่แรงไฮดรอลิก

ขนาด 2 ตัน ถูกติดตั้งไว้บริเวณด้านใต้ของโต๊ะเหล็กสำหรับยกพื้นโต๊ะให้เอียงหนึ่งด้าน ดังแสดงไว้ตามรูปที่ 2 แผ่นพลาสติกที่มีครึ่งวงกลมถูกติดตั้งไว้ด้านข้างกับตัวพื้นโต๊ะเพื่อแสดงมุมมองของพื้นระหว่างการยกทดสอบ โดยโต๊ะที่ปรับเอียงนี้สามารถยกเอียงทำมุมได้สูงสุด 55 องศา แผ่นเหล็กแบนความหนา 2 มิลลิเมตร สูง 5 เซนติเมตร ตัดโค้งตามรัศมีของหุ่นจำลองและถูกเชื่อมติดตั้งฉากกับตัวพื้นโต๊ะ เพื่อป้องกันการวิบัติจากแรงเฉือนบริเวณฐานของหุ่นจำลองในขณะยกเอียง ซึ่งกรณีการวิบัติดังกล่าวไม่ได้เกิดขึ้นกับอาคารประเภทนี้ในเหตุการณ์แผ่นดินไหวจริง



รูปที่ 4 รายละเอียดขนาดของโต๊ะที่ปรับเอียงที่ออกแบบและสร้างขึ้นสำหรับการทดลอง

3. โต๊ะสั่นไหว (Shake table)

การทดสอบความสามารถในการรับแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีพลศาสตร์นั้น ถูกดำเนินการทดสอบ ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีชิตินัย (UTS) ประเทศออสเตรเลีย ด้วยอุปกรณ์โต๊ะสั่นไหวแบบ Uni-axial โดยมีรายละเอียดและคุณสมบัติของอุปกรณ์โต๊ะสั่นไหว ตามตารางที่ 2 และรูปถ่ายของโต๊ะสั่นไหวแสดงในรูปที่ 5

ตาราง 2 รายละเอียดขนาดของโต๊ะสั่นไหว

Table dimension	3m x 3m
Maximum payload	10 tonnes
Overtuning moment	100kN-m
Maximum displacement	±100mm
Maximum velocity	±550mm/sec
Maximum acceleration	±2.5g or 0.9g (full load)
Testing frequency	0.1 – 50 Hz



รูปที่ 5 โต๊ะสั่นไหวสำหรับวิธีการทดสอบทางพลศาสตร์

ในการทดสอบด้วยวิธีพลศาสตร์ โต๊ะสั่นไหวจะถูกกำหนดให้จำลองการเคลื่อนที่ตามข้อมูลความรุนแรงของเหตุการณ์แผ่นดินไหวในอดีต ซึ่งผู้วิจัยตัดสินใจใช้ข้อมูลแผ่นดินไหวจำนวน 4 เหตุการณ์ สำหรับการทดสอบความสามารถในการรับแรงแผ่นดินไหวของหุ่นจำลอง โดย

ข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหว ดังกล่าวเป็นที่นิยมของนักวิจัยในการใช้จำลองการเคลื่อนที่ของโต๊ะสั่นไหว ซึ่งทำให้สามารถนำผลการทดลองของงานวิจัยนี้ไปใช้เทียบเคียงกับผลงานวิจัยอื่นๆ ได้

สำหรับวิธีการทดลองจะใช้ลำดับการทดสอบตามขนาดความรุนแรงของอัตราเร่ง (Ground acceleration) ของโต๊ะสั่นไหว โดยข้อมูลอัตราเร่งของแต่ละเหตุการณ์จะถูกจำลองการเคลื่อนที่ โดยการลดและเพิ่มลำดับความรุนแรง

(Simulated Intensity) ตามอัตราส่วนร้อยละเทียบกับอัตราเร่งผิวพื้นของเหตุการณ์จริง ซึ่งการทดลองจะเริ่มต้นจำลองการเคลื่อนที่จากลำดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวน้อยไปหามาก จนกระทั่งปรากฏรอยร้าวขึ้นบนผนังของหุ่นจำลอง จึงหยุดการทดสอบลำดับรายชื่อและความรุนแรงของเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับการทดสอบด้วยโต๊ะสั่นไหวแสดงไว้ในตาราง 3 รวมทั้งร้อยละของลำดับความรุนแรงของแต่ละเหตุการณ์

ตาราง 3 ลำดับรายชื่อและขนาดความรุนแรงของเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับการทดสอบด้วยโต๊ะสั่นไหว

ลำดับ	Earthquake Record	Magnitude	Peak Acceleration (g)	Simulated Intensity
1	El Centro earthquake, 1940	7.1	0.35	20%, 40%, 60%, 80%, 100%, 120%,
2	Northridge earthquake,	6.7	0.88	60%
3	Kobe earthquake, 1995	6.9	0.84	60%
4	El Salvador earthquake,	7.6	0.74	40%, 60%, 80%, 100%, 120%

ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงแผ่นดินไหวของหุ่นจำลองด้วยวิธีทางพลศาสตร์นี้ จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยโต๊ะที่ปรับเอียง โดยเปรียบเทียบเฉพาะความสามารถในการรับแรงกระทำด้านข้างสูงสุดของการเกิดรอยร้าวครั้งแรก เนื่องจากหากดำเนินการทดสอบจนกระทั่งหุ่นจำลองบ้านอิฐดินพังทลายด้วยโต๊ะที่สั่นไหว อาจทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่โดยรอบผนังหุ่นจำลอง ผู้วิจัยจึงตัดสินใจใช้ตัวชี้วัดเฉพาะผลการเกิดรอยร้าวครั้งแรกมาเปรียบเทียบ โดยเอาผลของอัตราเร่งสูงสุด (Peak Ground Acceleration, a) ที่ทำให้หุ่นจำลองเกิดรอยร้าวครั้งแรกมาแปลงเป็นแรงกระทำด้านข้าง ด้วยการแทนค่าสัมประสิทธิ์ในสมการ (1) ดังนี้

$$V(H_F) = 1 \times a \times 0.77 / 1.25 \times W_1 \quad (3)$$

โดย

$$a = Z \times C_h(T_1)$$

ผลการศึกษา

3.1 ผลการทดสอบด้วยโต๊ะที่ปรับเอียง (Static tilt-table-testing)

หลังจากที่หุ่นจำลองได้รับการติดตั้งหลังคาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว โต๊ะที่ปรับเอียงจะค่อยๆ ถูกยกขึ้นเริ่มจากมุม 0 องศา ตามรูปที่ 6(1) จนกระทั่งถึงมุม 29 องศา จึงปรากฏให้เห็นรอยร้าวบริเวณผนังด้านบนของหุ่นจำลอง ตามรูปที่ 6(2) และเมื่อเพิ่มองศาของโต๊ะที่ปรับเอียงพบว่ามียอยร้าวเพิ่มขึ้นที่ผนังด้านตรงข้ามกับรอยแรก สุดท้ายหุ่นจำลองพังทลายทั้งหมดเมื่อโต๊ะปรับมุมเอียงถูกยกเอียงเท่ากับ 32 องศา ตามรูปที่ 6(4) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณแรงเฉือนสูงสุดที่ฐาน หรือแรงกระทำด้านข้างสูงสุด ตามสมการที่ (2) รายละเอียดผลการทดลองแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 ผลการทดลองด้วยโต๊ะที่ปรับเอียง

	First shear crack	Complete failure
มุมยกเอียง	29°	32°
แรงกระทำด้านข้างสูงสุด	1.73 kN	2.02 kN



(1)

(2)



(3)

(4)

รูปที่ 6 การทดสอบด้วยโต๊ะที่ปรับเอียง

3.2 ผลการทดสอบด้วยโต๊ะสั่นไหว (Dynamic shake-table-testing)

หลังจากที่หุ่นจำลองถูกติดตั้งกับโต๊ะสั่นไหวเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ตามรูปที่ 7(1) จึงเริ่มทำการทดสอบทางพลศาสตร์ตามลำดับรายชื่อและขนาดความรุนแรงของเหตุการณ์แผ่นดินไหว ตามที่ระบุไว้ในตาราง 3 โดยที่คาบเวลาการสั่นของโต๊ะสั่นไหวจะถูกเร่งให้เร็วขึ้น ตามสัดส่วนความแตกต่างระหว่างค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารต้นแบบ

กับหุ่นจำลองย่อส่วน ด้วยวิธี Finite Element Method (FEM) ซึ่งจากผลการศึกษา FEM ได้ค่าความต่างเท่ากับ 1.3 ค่ายังกล่าวมาใช้ในการย่อส่วนคาบเวลาการสั่นไหวตามข้อมูลแผ่นดินไหวเหตุการณ์นั้น ๆ ทั้งนี้ก็เพื่อจำลองสภาพการทดสอบของหุ่นจำลองให้เหมือนกับอาคารต้นแบบจริง ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากสำหรับการทดลองทางพลศาสตร์ (Krawinkler, 1988)

จากผลการทดลองพบว่าหุ่นจำลองบ้านดินดิบทรงกลมเกิดรอยร้าวที่สังเกตได้ เมื่อทดสอบด้วยความรุนแรง 100% ของ El Salvador earthquake โดยมีค่าอัตราเร่งสูงสุดเท่ากับ 0.74g รอยร้าวดังกล่าวปรากฏขึ้น โดยเริ่มจากผนังด้านบนเฉียงลงมายังด้านล่างของฐาน ตามรูปที่ 7(2) รายละเอียดผลการทดสอบได้ตามตาราง 5 และเมื่อแทนค่าอัตราเร่งสูงสุดในสมการที่ (3) จะได้แรงกระทำด้านข้างสูงสุดเท่ากับ 1.74 kN



รูปที่ 7 การทดสอบด้วยโต๊ะสั่นไหว

ตาราง 5 ผลการทดลองด้วยโต๊ะสั่นไหว

Simulation	Intensity	Peak Ground Acceleration (g)	Observations
El Centro earthquake			
S1	20%	0.07	ไม่พบความเสียหาย
S2	40%	0.14	ไม่พบความเสียหาย
S3	60%	0.21	ไม่พบความเสียหาย
S4	80%	0.28	ไม่พบความเสียหาย
S5	100%	0.35	ไม่พบความเสียหาย
S6	120%	0.42	ไม่พบความเสียหาย
S7	140%	0.49	ไม่พบความเสียหาย
Northridge earthquake			
S8	60%	0.528	ไม่พบความเสียหาย
Kobe earthquake			
S9	60%	0.504	ไม่พบความเสียหาย
El Salvador earthquake			
S10	40%	0.296	ไม่พบความเสียหาย
S11	60%	0.444	ไม่พบความเสียหาย
S12	80%	0.592	ไม่พบความเสียหาย
S13	100%	0.74	ปรากฏรอยร้าวขึ้นที่ผนังทิศเหนือ
S14	120%	0.888	ปรากฏรอยร้าวเพิ่มขึ้น ผนังเกิดการแยกตัว

อภิปรายผลการศึกษา

จากผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงแผ่นดินไหวของหุ่นจำลองบ้านอิฐดินดิบทรงกลม พบว่าผลการทดสอบทั้ง 2 วิธีคือ วิธีทดสอบโดยใช้โต๊ะที่ปรับเอียงตามหลักทฤษฎีแรงสถิตเทียบเท่า และ โต๊ะสั่นไหวตามหลักทฤษฎีพลศาสตร์ ให้ผลลัพธ์ความสามารถในการรับแรงกระทำด้านข้างสูงสุด ณ รอยร้าวครั้งแรกที่ใกล้เคียงกันมาก คือ 1.73 kN และ 1.74 kN ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการทดสอบด้วยโต๊ะที่ปรับเอียงสามารถนำมาประยุกต์

ใช้ในการประเมินความสามารถในการรับแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างผนังรับน้ำหนักอิฐดินดิบได้ดี

จากผลการสังเกตลักษณะความเสียหายของหุ่นจำลองบ้านอิฐดินดิบทรงกลมเมื่อถูกกระทำด้วยแรงแผ่นดินไหวทั้ง 2 การทดลองพบว่า หุ่นจำลองมีลักษณะของการวิบัติที่เหมือนกัน คือ จะเริ่มปรากฏรอยแตกร้าวที่ผนังด้านบนแล้วเฉียงโค้งลงมายังผนังด้านล่างเมื่อแรงกระทำที่เกิดขึ้นเท่ากับค่าแรงเฉือนสูงสุด โดยจะปรากฏให้เห็นบนผนังด้านที่ขนานไปกับแนวแรงทั้ง 2 ด้าน หากผนังดังกล่าวได้รับแรงกระทำอย่างต่อเนื่อง จะส่งผลให้รอยแตกร้าวเดิม

ขยายตัว (อาจเกิดการแตกร้าวเพิ่มขึ้นในตำแหน่งอื่น) ส่งผลให้ผนังด้านที่ตั้งฉากกับแนวแรงพังทลายลง ตามมาด้วยการพังทลายลงของผนังส่วนที่เหลือและโครงสร้างหลังคา ทั้งนี้จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าผนังรับน้ำหนักอิฐดินดิบรูปทรงกลมมีความแข็งแรงกว่าผนังอิฐดินดิบรูปทรงอื่น ๆ โดยมีความแข็งแรงมากกว่าผนังอิฐดินดิบรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส 1.2 เท่า (Samali et al., 2011) เนื่องด้วยรูปทรงกลมสามารถกระจายแรงกระทำไปได้ทั่วพื้นผิวผนัง จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้ก่อสร้างในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวมากกว่ารูปทรงแบบอื่น

ในรายงานการศึกษาวิจัยอื่น เช่น Vargas & Ottazzi (1981) พบว่าวิธีการทดลองด้วยโต๊ะที่ปรับเอียงสามารถใช้ประเมินความสามารถในการรับแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างผนังรับน้ำหนักอิฐดินดิบได้ดี ทั้งนี้งานวิจัยดังกล่าวใช้โต๊ะที่ปรับเอียงกับการทดสอบกับหุ่นจำลองบ้านอิฐดินดิบขนาดมาตราส่วน 1:1 รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส เพื่อศึกษาการวิบัติของโครงสร้างเท่านั้น ไม่ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับโต๊ะที่สั้นหรือหาค่าแรงกระทำด้านข้างแต่อย่างใด รวมทั้งการทดสอบทางพลศาสตร์ส่วนใหญ่ที่ใช้โต๊ะสั้นไว้นั้น ไม่สามารถทดสอบด้วยหุ่นจำลองขนาดมาตราส่วน 1:1 ได้ เนื่องจากขนาดของโต๊ะที่จำกัด ทำให้ผลการทดสอบความสามารถในการรับแรงแผ่นดินไหวด้วยโต๊ะที่ปรับเอียงนี้ไม่ได้รับการยอมรับและพัฒนาจากนักวิจัยด้านนี้เท่าที่ควร ข้อจำกัดอย่างหนึ่งของโต๊ะที่ปรับเอียงคือ สามารถใช้ทดสอบได้ดีเฉพาะกับโครงสร้างผนังอิฐที่ไม่ได้เสริมเหล็ก (Unreinforced masonry structures) เท่านั้น เนื่องจากมีข้อจำกัดของมุมมองค่าที่โต๊ะสามารถยกเอียงได้ ซึ่งไม่เพียงพอที่จะทำความเสียหายให้กับโครงสร้างผนังระบบอื่น ๆ ได้

สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ยืนยันประสิทธิภาพของโต๊ะที่ปรับเอียงในการใช้ประเมินของความสามารถในการรับแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างผนังอิฐดินดิบ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับทดสอบด้วยโต๊ะสั้นให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน ซึ่งนั่นแสดงให้เห็นความเป็นไปได้ในการพัฒนาโต๊ะที่ปรับเอียงในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยด้านแผ่นดินไหวสำหรับเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างประเภทนี้ ทั้งนี้ก็เพื่อลดความสูญเสียทั้งต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนที่ใช้โครงสร้างผนังรับน้ำหนักอิฐดินดิบเป็นที่อยู่อาศัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งประชาชนที่อาศัยอยู่ในประเทศที่กำลังพัฒนาและตั้งอยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว รวมทั้งทำให้เข้าใจถึงพฤติกรรมการวิบัติของบ้านอิฐดินดิบรูปทรงกลม ซึ่งจะนำไปสู่การคาดการณ์การวิบัติของอาคารประเภทนี้ได้ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากกระทรวง

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ขอขอบคุณทีมวิศวกรของบริษัทกริซอินทรา (1989) จำกัด ที่ช่วยสร้างโต๊ะทดลองและดำเนินการทดสอบ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบวัสดุ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และคณาจารย์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีชิตนีย์ ที่ให้การช่วยเหลือการทดลองด้านพลศาสตร์ ขอขอบคุณกำลังใจจากครอบครัว รวมทั้งเพื่อนๆ ทุกคนที่มีส่วนช่วยให้งานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- บุญยฉัตร, ส. (2554). *การออกแบบโครงสร้างเพื่อรับแรงแผ่นดินไหว*. กรุงเทพฯ: บริษัท พี.เอ.ลิฟวิ่ง จำกัด.
- Arros, J. K. (2003). *Dynamics of structures*. Earthquake engineering handbook. W.-F. Chen and C. Scawthorn. Florida, CRC Press LLC: 3-1.
- Jinwuth, W., B. Samali, et al. (2010). *A Study into the earthquake resistance of circular adobe buildings using static tilt tests*. Paper presented at the meeting of the 2010 AEES Conference. Perth: The Australian Earthquake Engineering Society.
- Krawinkler, H. (1988), *Scale Effects in Static and Dynamic Model Testing*, Paper presented at the meeting of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan.
- Samali, B., W. Jinwuth, et al. (2011). *Seismic capacity comparison between square and circular plan adobe construction*. Paper presented at the meeting of the 12th East Asia-Pacific Structural Engineering and Construction Conference, Hong Kong, EASEC-12.
- Smith, J. W. (1941). *Vibration of Structures: applications in civil engineer design*. Bristol, J.W. Arrowsmith Ltd.
- Standards Australia (2007). *AS1170.4: Structure design Actions Part 4 : Earthquake Actions in Australia*. Sydney, Australia, Standards Australia: 23.
- Uthai Phat Ra Kun, T. (2004). *Chak Din Su Ban Sang Ban Duai Din*. Bangkok: Fueangfa printing.

Vargas, J. & Ottazzi, G. (1981), *Investigaciones en adobe*, Pontificia Universidad Catolica del Peru, Lima, Peru.