

พฤติกรรมการวิบัติของผนังอิฐภายใต้แรงกระทำแบบสองทิศทาง

Failure Behavior of Masonry Wall under Bidirectional Forces

พงศ์ศักดิ์ สุขมณี^{1,*} และ นันทชัย ชุติลปี่¹

¹สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย บ่อทราย เมือง สงขลา 90000

Pongsak Sookmanee^{1,*} and Nuntachai Chusilpi¹

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Boyang, Muang, Songkhla, 90000, Thailand

*Corresponding Author E-mail: pongsak.s@rmutsv.ac.th

Received: Feb 25, 2023; Revised: Nov 01, 2023; Accepted: Nov 15, 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของผนังอิฐภายใต้แรงกระทำแบบสองทิศทาง (แนวตั้งและแรงกระทำด้านข้าง) สำหรับประยุกต์ใช้งานก่อสร้างอาคารชุมชนขนาดเล็กที่รับน้ำหนักไม่มาก โดยทดสอบอิฐ 3 ประเภท ได้แก่ อิฐมอญ อิฐมวลเบา และอิฐบล็อก ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของอิฐแต่ละประเภท สำหรับการทดสอบความสามารถในการรับแรงของผนังอิฐ ใช้ผนังก่อแบบเต็มแผ่นและแบบครึ่งแผ่น ขนาดกว้าง 1.0 เมตร × 1.0 เมตร 3 รูปแบบแตกต่างกัน ได้แก่ 1) แบบไม่มีช่องว่าง 2) แบบมีช่องหน้าต่าง และ 3) แบบมีช่องประตู รับแรงกระทำแนวตั้งและด้านข้าง ผลการศึกษาพบว่า รูปแบบหลักในการวิบัติเป็นการวิบัติจากแรงเฉือนทแยง และเกิดจากแรงกระทำด้านข้างมากกว่าแรงแนวตั้ง โดยผนังอิฐที่รับแรงแนวตั้งไม่มีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นเนื่องจากการทดสอบแบบไม่ทำลาย ส่วนผนังอิฐที่รับแรงกระทำด้านข้างเกิดรอยแตกร้าวอยู่ในแนวทแยงรูปแบบขึ้นบันไดและเป็นเส้นตรงเป็นรูปแบบหลัก ผนังอิฐมอญทั้งแบบครึ่งแผ่นและแบบเต็มแผ่นมีรอยแตกร้าวชัดเจนกว่าผนังอิฐบล็อกและผนังอิฐมวลเบา มีทั้งการแตกร้าวระหว่างผิวสัมผัสของอิฐกับปูนก่อ การแตกร้าวผ่านก้อนอิฐ และการแตกร้าวที่อิฐและปูนก่อแตกไปด้วยกัน ผนังอิฐแบบมีช่องหน้าต่างและช่องประตูซึ่งมีพื้นที่ก่ออิฐคิดเป็นร้อยละ 82 และ 76 ของผนังอิฐแบบไม่มีช่องว่าง สามารถรับแรงกระทำจนวิบัติได้น้อยกว่าโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 48 และ 70 และยังพบว่ากำลังของผนังอิฐขึ้นอยู่กับกำลังดึงของอิฐก่อและกำลังรับแรงเฉือนของปูนก่ออีกด้วย

คำสำคัญ: ผนังอิฐ, แรงกระทำแบบสองทิศทาง, การวิบัติจากแรงเฉือนทแยง, กำลังดึง

Abstract

The objective of this research is to investigate the failure behavior of masonry walls under bidirectional forces (vertical and lateral loads) for application in the construction of small community buildings with limited load-bearing capacity. To achieve this, three types of bricks, namely clay bricks, lightweight bricks, and block bricks, were subjected to testing in accordance with industrial product standards specific to each brick type. These tests aimed to assess the load-bearing capacity of masonry walls, utilizing full-sheet and half-sheet walls with dimensions of 1.0 meter × 1.0 meter, available in three different styles: 1) walls without gaps, 2) walls with window openings, and 3) walls with door openings, all designed to endure both vertical and lateral forces. The study's findings revealed that the primary mode of failure was attributed to diagonal shear failure, primarily induced by lateral forces rather than vertical ones. Masonry walls subjected to vertical forces displayed no signs of cracking because this

was a non-destructive test. In contrast, masonry walls subjected to lateral forces exhibited cracks in diagonal patterns and straight lines as the predominant forms. Notably, both half-sheet and full-sheet brick walls exhibited more prominent cracks compared to block brick walls and lightweight bricks. Cracking was observed in the interfaces between the bricks and the mortar, as well as within the bricks and mortar themselves. Furthermore, it was observed that brick walls with window and door openings had 82 and 76 percent of the brick area compared to walls without gaps, respectively. These walls were able to withstand forces until failure, approximately 48 and 70 percent less on average. Lastly, the study highlighted that the strength of a brick wall is contingent on the tensile strength of the bricks and the shear strength of the mortar.

Keywords: Masonry wall, Bidirectional forces, Diagonal shear failure, Tensile strength

1. บทนำ

ผนังก่ออิฐเป็นวัสดุดั้งเดิมและเก่าแก่สำหรับใช้ในการก่อสร้างบ้านพักอาศัยและเชื่อว่าถูกใช้และแพร่หลายมาช้านานตั้งแต่อดีตเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 6000 ปี ในหลายพื้นที่ในโลก และยังคงใช้งานมาจนถึงปัจจุบันรวมถึงประเทศไทย เนื่องมาจากวัสดุที่ใช้ในการผลิตอิฐนั้น หาได้ง่าย ราคาถูก มีกรรมวิธีการผลิตที่ง่ายและมีแหล่งผลิตอยู่ทั่วไป โดยผนังก่ออิฐประกอบด้วยวัสดุสองส่วนหลักด้วยกัน ได้แก่ อิฐ และ ปูนก่อหรือมอร์ต้า ซึ่งในส่วนของอิฐก็จะมีรูปแบบที่แตกต่างกัน มีทั้งแบบตัน แบบกลวง รวมถึงความแตกต่างของวัสดุที่นำมาใช้ในการทำอิฐ เช่น อิฐมอญหรืออิฐที่ทำมาจากดินเหนียว อิฐบล็อกหรืออิฐที่ทำมาจากคอนกรีต รวมถึงอิฐมวลเบา เป็นต้น [1] ซึ่งเป็นอิฐที่ใช้ในงานก่อสร้างได้ทั้งสิ้น โดยพฤติกรรมการรับแรงของผนังอิฐจะรับแรงอัดได้ดีและรับแรงดึงได้ค่อนข้างน้อย [2] ทำให้การศึกษาพฤติกรรมการรับกำลังของผนังก่ออิฐส่วนใหญ่ที่ผ่านมาเป็นการศึกษาประสิทธิภาพและการวิบัติของผนังก่ออิฐภายใต้แรงกดอัดในรูปแบบต่างๆเป็นหลัก [3–5] ในปี ค.ศ. 2017 Singh and Munjal ได้ศึกษาพฤติกรรมการรับกำลังอัดของผนังก่ออิฐจำนวน 120 ตัวอย่างที่ผลิตมาจากดินและคอนกรีตรวมถึงประเภทของมอร์ต้าที่ใช้ในการก่อผนังอิฐที่แตกต่างกัน พบว่าประสิทธิภาพในการรับกำลังของผนังก่ออิฐเพิ่มขึ้นตามกำลังการรับแรงอัดของอิฐและกำลังของมอร์ต้าที่เพิ่มขึ้น [6] ในปีเดียวกัน Ravula และคณะ พบว่าการวิบัติของผนังก่ออิฐที่ผลิตมาจากดินเหนียวอ่อนเนื่องจากแรงกดอัดจะมีผลน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังของอิฐและมอร์ต้า โดยการวิบัติจะเกิดบริเวณปูนก่อ

ซึ่งเป็นมอร์ต้าที่มีกำลังสูง [7] และยังมีการศึกษาพฤติกรรมของผนังก่ออิฐที่รับแรงดัดและแรงเฉือน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการรับแรง และรูปแบบการวิบัติ [8–10]

ในประเทศไทยผนังก่ออิฐเป็นส่วนของอาคารบ้านพักอาศัย โรงเรียน และโบราณสถานต่างๆมาตั้งแต่อดีต มีการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงของผนังก่ออิฐด้วยรูปแบบต่างๆ ด้วยแรงกระทำที่แตกต่างกัน [11–15] ทั้งนี้อิฐที่ใช้ก่อผนังที่พบเห็นทั่วไปในประเทศไทยจะเป็น อิฐมอญ อิฐมวลเบา และอิฐบล็อก และมีรูปแบบในการก่อผนัง 2 รูปแบบ คือ การก่อผนังอิฐแบบเต็มแผ่น โดยความหนาของผนังจะเท่ากับด้านยาวของอิฐ และการก่อผนังอิฐแบบครึ่งแผ่น คือความหนาของผนังจะเท่ากับด้านกว้างของอิฐ และมักจะใช้การฉาบปูนเรียบเพื่อความสวยงามและเพื่อป้องกันเนื้ออิฐที่อาจเกิดการสึกกร่อนได้ง่าย

อย่างไรก็ตามผนังก่ออิฐสามารถรับแรงได้แต่ก็ยังมีความข้อจำกัด คือเมื่อผนังก่ออิฐรับน้ำหนักบรรทุกเกินกำลัง หรือภัยพิบัติจากธรรมชาติ เช่น การเกิดแผ่นดินไหวที่จังหวัดเชียงราย เมื่อปี พ.ศ.2557 [16] ส่งผลให้อาคารและสิ่งปลูกสร้างเกิดความเสียหาย หรือตัวโครงสร้างของอาคารพักอาศัยเกิดการทรุดตัว ก็อาจจะทำให้ผนังก่ออิฐเกิดรอยแตกร้าวได้ ซึ่งจะส่งผลทำให้โครงสร้างของผนังก่ออิฐนั้น อาจเกิดการวิบัติผิดรูปไม่สวยงาม การที่ผนังมีรอยแตกร้าวขึ้นอาจเกิดได้หลายสาเหตุ เช่น รอยร้าวแนวตั้งบนผนัง สาเหตุเกิดจากคานรับน้ำหนักไม่ไหวจะเกิดการแอ่นตัวของพื้นและคานที่อยู่เหนือผนังส่งผลให้ผนังที่อยู่ติดกับโครงสร้างนั้นเกิดการแตกร้าว หรือรอยร้าวแนวเฉียงกลางผนัง สาเหตุเกิดจากการที่เสาของบ้านในจุดใดจุดหนึ่งเกิดการทรุดตัวลงส่งผลให้ผนังเกิดรอยแตกร้าวขึ้น เป็นต้น ซึ่งสามารถจำแนกแรง

กระทำที่เกิดขึ้นกับผนังได้เป็นสองทิศทาง ได้แก่ แรงกระทำในแนวดิ่ง และแรงกระทำในแนวราบหรือแรงกระทำด้านข้าง โดย K. M. Dolatshahi ได้ศึกษาพฤติกรรมของกำแพงอิฐที่ไม่เสริมแรงภายใต้แรงกระทำสองทิศทาง [17–19] และผนังอิฐที่มีช่องเปิดรับแรงสองทิศทางโดย T. Deb และคณะ ในปี ค.ศ. 2021 [20] เป็นต้น ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นแนวทางเบื้องต้น สำหรับดำเนินการศึกษาผนังก่ออิฐรับแรงกระทำสองทิศทาง

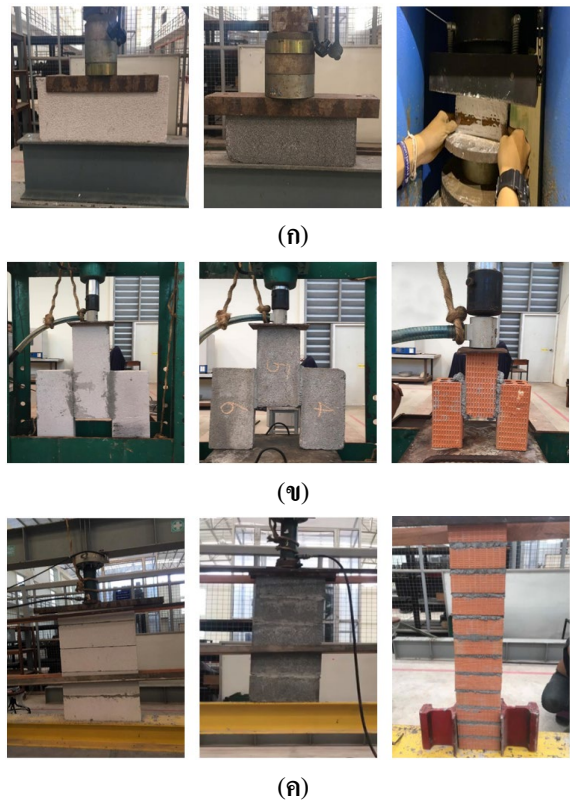
งานวิจัยนี้มุ่งเน้นใช้อิฐที่มีสถานที่ผลิตหรือสามารถหาได้ในพื้นที่จังหวัดสงขลาในการศึกษาเพื่อเป็นแนวทางเบื้องต้นในการนำวัสดุทางด้านการก่อสร้างในพื้นที่สำหรับการประยุกต์ใช้กับอาคารชุมชนขนาดเล็กที่รับน้ำหนักไม่มาก โดยการใช้อิฐในการก่อผนังที่แตกต่างกัน ได้แก่ อิฐมอญ อิฐมวลเบา และอิฐบล็อก เป็นวัสดุหลักวิจัย ซึ่งอิฐจะถูกทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานเบื้องต้นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนและผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของอิฐแต่ละประเภท และทำการทดสอบในการก่อผนังอิฐแบบเต็มแผ่นและแบบครึ่งแผ่น โดยจะรับน้ำหนักภายใต้แรงกระทำด้านข้างและแนวดิ่งจนเกิดการวิบัติ โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อจะวิเคราะห์พฤติกรรมการวิบัติและลักษณะรอยแตกร้าวของผนังก่ออิฐแต่ละประเภทภายใต้แรงกระทำแบบสองทิศทาง โดยผลที่ได้จะเป็นแนวทางเบื้องต้นในการปรับปรุงคุณภาพของอิฐในพื้นที่ชุมชน และรูปแบบของการก่ออิฐรวมถึงคุณภาพของปูนก่อที่สามารถช่วยลดอัตราการแตกร้าวจากแรงกระทำ ในลำดับต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 อิฐ และปูนก่อ

วัสดุหลักในการศึกษาคืออิฐ 3 ประเภท ได้แก่ อิฐมวลเบา อิฐบล็อก และอิฐมอญ รวมถึงปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการก่อผนัง โดยการทดสอบกระทำภายในห้องปฏิบัติการของสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย โดยเบื้องต้นทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของอิฐและปูนก่อ ได้แก่ มิติต่าง ๆ ของอิฐ รวมถึงกำลังรับแรงอัด (f'_c) ของอิฐแต่ละประเภทตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.1505-

2541, มอก.57-2560 และ มอก.77-2545) [21–23] และกำลังรับแรงเฉือนของปูนก่อ (τ_b) ที่ใช้ก่อกับอิฐประเภทต่างๆ ทดสอบซึ่งประยุกต์วิธีการจากมาตรฐาน ASTM E519-02 [24] และการศึกษาของ G. Lan และคณะ [25] โดยรูปในการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 1 (แถวซ้ายอิฐมวลเบา แถวกลางอิฐบล็อก และแถวขวอิฐมอญ)

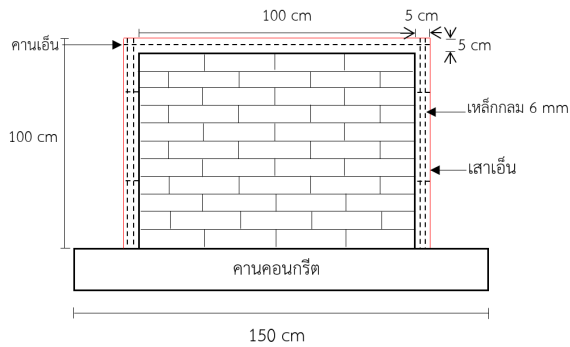


รูปที่ 1 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของอิฐและปูนก่อ (ก) การทดสอบกำลังอัดของอิฐ (ข) การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของปูนก่อ (ค) การทดสอบกำลังอัดของอิฐก่อสูง 1.00 เมตร

2.2 ผนังก่ออิฐ

อิฐได้มาจากโรงงานผลิตภายในเขตพื้นที่จังหวัดสงขลาที่ผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.) ถูกนำมาก่อด้วยปูนก่อเป็นผนังขนาดกว้าง 1.00 เมตร สูง 1.00 เมตร จำนวน 15 ตัวอย่าง ด้วยกัน ได้แก่ ผนังก่ออิฐบล็อก 4 ตัวอย่าง (แบบไม่มีช่องว่าง 2 ตัวอย่าง แบบมีช่องหน้าต่าง 1 ตัวอย่าง และแบบมีช่องประตู 1 ตัวอย่าง), ผนังก่ออิฐมวลเบา 4 ตัวอย่าง (แบบไม่มีช่องว่าง 2 ตัวอย่าง แบบมีช่องหน้าต่าง 1 ตัวอย่าง และแบบมีช่องประตู 1 ตัวอย่าง), ผนังก่ออิฐมอญครึ่งแผ่น 4 ตัวอย่าง

(แบบไม่มีช่องว่าง 2 ตัวอย่าง แบบมีช่องหน้าต่าง 1 ตัวอย่าง และแบบมีช่องประตู 1 ตัวอย่าง) และผนังก่ออิฐมอญเต็มแผ่น 3 ตัวอย่าง (แบบไม่มีช่องว่าง 1 ตัวอย่าง แบบมีช่องหน้าต่าง 1 ตัวอย่าง และแบบมีช่องประตู 1 ตัวอย่าง) โดยการก่ออิฐจะมีเอ็นรอบเสมือนผนังก่ออยู่ในโครงข้อแข็ง ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขนาดของผนังก่ออิฐที่ใช้ในการศึกษา

ในตารางที่ 1 สรุปรายละเอียดของผนังก่ออิฐที่ใช้ในการทดสอบ โดยสัญลักษณ์ที่ใช้คือ CB แทนผนังก่ออิฐบล็อก (Concrete Block), RB-H แทนผนังก่ออิฐมอญครึ่งแผ่น (Half Red Brick), RB-F แทนผนังก่ออิฐมอญเต็มแผ่น (Full Red Brick), LB แทนผนังก่ออิฐมวลเบา (Lightweight Brick), W แทนช่องหน้าต่าง (Window) และ D แทนประตู (Door) ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์เช่น RB-H-W-2 หมายถึง ผนังก่ออิฐมอญแบบครึ่งแผ่นมีช่องเปิดแบบช่องหน้าต่าง ทดสอบรับกำลังด้านข้าง หรือ CB-1 หมายถึงผนังอิฐบล็อกไม่มีช่องรับกำลังในแนวดิ่ง (เลข 1 หมายถึงผนังอิฐที่ถูกทดสอบเฉพาะแรงในแนวดิ่ง และเลข 2 หมายถึงผนังอิฐที่ถูกทดสอบด้วยแรงกระทำสองทิศทาง คือทั้งแรงกระทำในแนวดิ่งและแรงกระทำด้านข้าง) เป็นต้น

ตารางที่ 1 ตัวอย่างในการทดสอบพฤติกรรมของผนังอิฐภายใต้แรงกระทำแบบสองทิศทาง

ชนิดของอิฐ	จำนวน	ขนาด	รูปแบบ			
			1	2	3	4
ผนังอิฐบล็อก (CB)	4 ตัวอย่าง	1×1 เมตร	CB-1	CB-2	CB-W-2	CB-D-2
ผนังอิฐมอญครึ่งแผ่น (RB-H)	4 ตัวอย่าง	1×1 เมตร	RB-H-1	RB-H-2	RB-H-W-2	RB-H-D-2
ผนังอิฐมอญเต็มแผ่น (RB-F)	3 ตัวอย่าง	1×1 เมตร	-	RB-F-2	RB-F-W-2	RB-F-D-2
ผนังอิฐมวลเบา (LB)	4 ตัวอย่าง	1×1 เมตร	LB-1	LB-2	LB-W-2	LB-D-2

ในตารางที่ 1 ผนังได้ถูกก่อขึ้นจากอิฐแต่ละประเภทด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราเสือ และใช้เหล็กกลม (dia. 6 มิลลิเมตร) สำหรับก่อสร้างเอ็นทั้งแนวดิ่งและแนวดิ่งภายหลังแกะแบบ ดำเนินการเจาะช่องเปิดหน้าต่างขนาดกว้าง 0.30 เมตร สูง 0.60 เมตร สำหรับช่องหน้าต่าง และสูง 0.80 เมตร สำหรับช่องประตู โดยตำแหน่งในการเจาะช่องหน้าต่างและช่องประตูและตัวอย่างผนังก่ออิฐบางส่วนดังรูปที่ 3 โดยรูปบนเป็นผนังก่ออิฐมวลเบา (LB-2) และผนังอิฐมอญครึ่งแผ่น (RB-H-2) สำหรับรูปล่างเป็นผนังอิฐบล็อกเจาะช่องประตู (CB-D-2) และผนังอิฐมอญเจาะช่องหน้าต่าง (RB-H-D-2) ตามลำดับ สำหรับวิธีการทดสอบได้ประยุกต์รูปแบบและขั้นตอนบางส่วนจากมาตรฐาน ASTM C62-69 [26], ASTM C67-97 [27] รวมถึงวิธีการบางส่วนจากการศึกษาของ E. Minaie และคณะ [28]

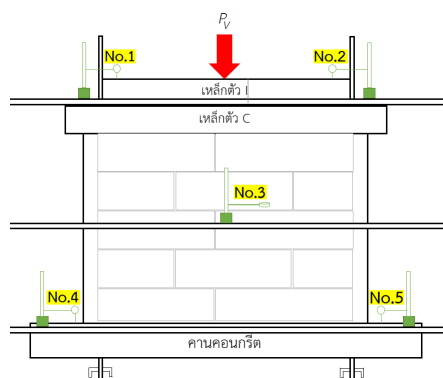


รูปที่ 3 ผนังก่ออิฐที่ใช้ในการศึกษา (ระบุตำแหน่งช่องเปิด)

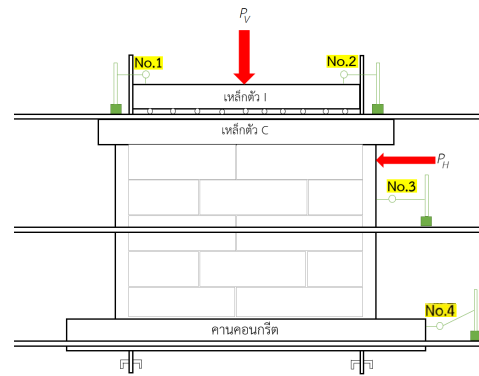
2.3 การติดตั้งชุดเครื่องมือในการทดสอบ

ในการศึกษานี้ ผนังก่ออิฐถูกกระทำด้วยแรงในแนวตั้ง (Vertical Load, P_V) และแรงในแนวราบ (Horizontal Load, P_H) ภายในโครงข้อแข็งเหล็กผ่านระบบให้แรงกระทำด้วยไฮดรอลิก และโพลีเซลล์ขนาดความสามารถ 200 กิโลนิวตัน พร้อมทั้งวัดการเคลื่อนตัวของผนังก่ออิฐเนื่องจากแรงกระทำด้วยเครื่องมือวัด Linear Variable Differential Transducers (LVDTs) จำนวน 5 ตำแหน่งด้วยกัน (No.1–No.5) โดย No.1, No.2, No.4 และ No. 5 จะวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง (Vertical Displacement) สำหรับ LVDTs No.3 จะวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบ (Horizontal Displacement) ดังรูปที่ 4 และเมื่อมีแรงกระทำด้านข้างเพิ่มมา ตำแหน่งการวัดค่าจะมี 4 ตำแหน่ง โดย No.1 และ No.2 จะวัดการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง และ No.3 กับ No.4 สำหรับวัดการเคลื่อนตัวในแนวราบ ดังรูปที่ 5

การทดสอบจะแบ่งเป็น 2 กลุ่มด้วยกัน (ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5) โดยกลุ่มที่ 1 ถูกทดสอบตามรูปที่ 4 รับเฉพาะแรงกระทำในแนวตั้ง (P_V) ซึ่งจะทดสอบผนังอิฐรูปแบบที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยเพิ่มแรงกระทำขึ้นเรื่อยๆ ให้อยู่ในช่วง 50 ถึง 100 กิโลนิวตัน (ไม่ทำการทดสอบจนวิบัติเนื่องจากประสิทธิภาพของอุปกรณ์และเครื่องมือไม่เพียงพอในขณะนั้น) และกลุ่มที่ 2 ถูกทดสอบตามรูปที่ 5 ซึ่งจะใช้ผนังอิฐรูปแบบที่ 2, 3 และ 4 ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยถูกทดสอบรับทั้งแรงกระทำในแนวตั้งและแรงกระทำด้านข้างพร้อมกัน ($P_V + P_H$) โดยผนังอิฐรูปแบบที่ 2 เป็นผนังก่ออิฐที่ไม่มีช่องเปิด จะรับแรงกระทำในแนวตั้งคงที่ 10 กิโลนิวตัน และค่อยๆ เพิ่มแรงกระทำด้านข้างขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งผนังอิฐเกิดการวิบัติ



รูปที่ 4 การติดตั้งชุดทดสอบและเครื่องมือสำหรับผนังก่ออิฐที่รับเฉพาะแรงกระทำในแนวตั้ง (P_V)



รูปที่ 5 การติดตั้งชุดทดสอบและเครื่องมือสำหรับผนังก่ออิฐที่รับทั้งแรงกระทำในแนวตั้งและด้านข้าง ($P_V + P_H$)

ส่วนรูปแบบที่ 3 และ 4 จะเป็นผนังที่มีช่องเปิดเสมือนหน้าต่างและประตูตามลำดับ ถูกรับแรงกระทำในแนวตั้งคงที่ 5 กิโลนิวตัน และค่อยๆ เพิ่มแรงกระทำด้านข้างขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งผนังอิฐเกิดการวิบัติ โดยการทดสอบในทุกกลุ่มและผนังอิฐทุกรูปแบบจะทำการบันทึกค่าของแรงกระทำที่เกิดขึ้นพร้อมทั้งการเคลื่อนตัวของผนังในทิศทางต่างๆ (การเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (Δ_V) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้จาก LVDTs No.1 และ No.2 กับ No.4 และ No.5 ที่แสดงในรูปที่ 4 และการเคลื่อนที่ในแนวราบ (Δ_H) ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้จาก LVDTs No.3 กับ No.4 ที่แสดงในรูปที่ 5) และนำค่าที่บันทึกไว้ด้วย Data Logger รวมถึงรูปแบบและพฤติกรรมของการวิบัติของผนังก่ออิฐทั้งหมดไปวิเคราะห์ทั้งนี้ตัวอย่างในการติดตั้งผนังอิฐและเครื่องมือบันทึกค่าในห้องปฏิบัติการเพื่อการทดสอบ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การติดตั้งผนังอิฐและชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ทั้งนี้เราสามารถวิเคราะห์หาค่ากำลังความแข็งแรงของผนังก่ออิฐที่ถูกทำการทดสอบรับแรงกระทำทางด้านข้าง ในขณะที่แรงกระทำในแนวดิ่งมีค่าคงที่ได้ด้วยหลักการทางกำลังของวัสดุ (Strength of Materials) [29] ซึ่งในกรณีผนังก่ออิฐรับแรงเฉือนสามารถจำแนกได้ 3 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 เมื่อพิจารณาการวิบัติเนื่องจากแรงคด จะสามารถหาค่าแรงกระทำได้จากสมการที่ (1)

$$P_b = \frac{1}{150} (f'_m) \frac{tL^2}{H} \quad (1)$$

เมื่อ P_b คือแรงกระทำที่ปลายผนังอิฐเมื่อพิจารณาการวิบัติเนื่องจากแรงคด (กิโลกรัม), H คือความสูง (เซนติเมตร), L คือความยาว (เซนติเมตร), t คือความหนา (เซนติเมตร) ของผนังก่ออิฐ และ f'_m คือกำลังอัดของอิฐก่อ (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่ากำลังอัดของอิฐ (f'_b) ตามสมการ $f'_m = 2\sqrt{f'_b} + 3\sqrt{f'_b}$ สำหรับกรณีที่ 2 เมื่อพิจารณาการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน จะสามารถหาค่าแรงกระทำได้จากสมการที่ (2)

$$P_s = \frac{\tau_b CLt (\frac{L}{H})}{1.5 (\frac{L}{H}) - \mu C} \quad (2)$$

เมื่อ P_s คือแรงกระทำที่ปลายผนังอิฐเมื่อพิจารณาการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน (กิโลกรัม), τ_b คือกำลังรับแรงเฉือนของปูนก่อ (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร), C คือสัมประสิทธิ์ลดกำลัง ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับฝีมือการก่อ (Workmanship) มีค่าระหว่าง 0.60 ถึง 1.00 จึงสามารถเลือกใช้ได้ตามความเรียบร้อยในการก่อ (ในการศึกษานี้ใช้เท่ากับ 0.80) และ μ คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของอิฐ (อิฐมอญ 0.66, อิฐมวลเบา 1.00 และอิฐบล็อก 1.60) และสำหรับกรณีที่ 3 เมื่อพิจารณาการวิบัติเนื่องจากแรงคดในแนวทแยง จะสามารถหาค่าแรงกระทำได้จากสมการที่ (3)

$$P_{dia} = \frac{\sigma_t Lt \left(1 + \sqrt{1 + 9 \left(\frac{L}{H}\right)^2}\right)}{4.5 \left(\frac{L}{H}\right)} \quad (2)$$

เมื่อ P_{dia} คือแรงกระทำที่ปลายผนังอิฐเมื่อพิจารณาการวิบัติเนื่องจากแรงคดในแนวทแยง (กิโลกรัม), σ_t คือหน่วย

แรงดึงหลัก (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) มีค่าเป็นร้อยละของกำลังอัดของอิฐแต่ละประเภท (ร้อยละของกำลังอัดของอิฐมวลเบาเท่ากับ 16.40 ร้อยละของกำลังอัดของอิฐบล็อกเท่ากับ 16.50 และร้อยละของกำลังอัดของอิฐมอญเท่ากับ 8.50) ยกตัวอย่างเช่น ค่ากำลังอัดของอิฐก่อประเภทอิฐมอญ (f'_m) ซึ่งคำนวณจากสมการ $f'_m = 2\sqrt{f'_b} + 3\sqrt{f'_b}$ มีค่าเท่ากับ 40.31 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จะได้ค่า σ_t เท่ากับ 0.085 คูณกับ 40.31 ซึ่งเท่ากับ 3.43 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นต้น

การทดสอบผนังอิฐรับแรงกระทำในแนวดิ่งและแรงกระทำด้านข้างจนเกิดการวิบัติ โดยการวิบัติที่เกิดขึ้นถูกจัดเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ 1) การวิบัติเนื่องจากการคด (Bending Failure) 2) การวิบัติเนื่องจากการเฉือน (Shearing Failure) และ 3) การวิบัติเนื่องจากแรงคดในแนวทแยง (Diagonal Tension Failure) และจะถูกพิจารณาในการศึกษานี้

3. ผลการทดสอบ

3.1 ผลทดสอบอิฐและปูนก่อ

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของอิฐและปูนก่อ ในรูปที่ 1 หัวข้อ 2.1 ได้ผลดังตารางที่ 2 และรูปที่ 7

จากตารางที่ 2 กำลังอัดเฉลี่ยสูงสุด (f'_b) ที่ทดสอบจากการทดสอบอิฐมอญ มีค่าเท่ากับ 65.02 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าสูงกว่าอิฐบล็อกและอิฐมวลเบา เนื่องมาจากอิฐมอญมีขนาดของความสูงในขณะที่รับแรงกระทำที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับอิฐบล็อกและอิฐมวลเบาซึ่งมีความสูงของอิฐเท่ากันคือประมาณ 20 เซนติเมตร ส่งผลให้ค่าที่ได้มีค่าสูงกว่าเมื่อทดสอบเฉพาะก้อนอิฐ และอาจประกอบกับความหนาแน่นและวัสดุที่ใช้สำหรับอิฐแต่ละประเภทซึ่งถูกผลิตมาด้วยวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน

และเมื่อเราพิจารณาในรูปที่ 7 จะพบว่าการวิบัติของอิฐบล็อกซึ่งรับกำลังอัดได้น้อยสุด มีลักษณะการวิบัติแบบแตกละเอียดมากกว่าอิฐชนิดอื่น แสดงให้เห็นถึงความเปราะของอิฐบล็อกที่ค่อนข้างมากประกอบกับการยึดเกาะกันของวัสดุภายในอิฐบล็อกอาจจะน้อยกว่าอิฐอีก

สองประเภท และเมื่อพิจารณากำลึงเฉือนของปูนก่อก่อนการก่ออิฐมวลเบา พบว่าค่าที่ได้คือ 3.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร มากกว่าที่ทดสอบได้จากอิฐอีกสองประเภท แสดงให้เห็นว่าอิฐมวลเบามีประสิทธิภาพในการยึดเกาะกับปูนก่อในการรับแรงเฉือนได้ดีกว่าอิฐมวลเบาและอิฐบล็อก แต่เมื่อพิจารณาผลการทดสอบการรับแรงอัดของอิฐก่อสูง 1.00 เมตร กลับพบว่าอิฐที่ก่อจากอิฐมวลเบารับแรงอัดได้น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอิฐที่ก่อด้วยอิฐมวลเบาซึ่งรับแรงได้สูงที่สุดเท่ากับ 18.35×10^3 กิโลกรัม อิฐบล็อกและอิฐมวลเบามีจำนวนชั้นในการก่อที่มากกว่าเนื่องจากขนาดที่เล็กกว่าทำให้ในขณะรับแรงกระทำในแนวตั้งอาจมีการกระจายของแรงตรงรอยปูนก่อได้มากกว่า ประกอบกับขนาดยาวที่น้อย เมื่อก่อสูง 1.00 เมตร จะทำให้มีอัตราส่วนของความชะลุดที่มากกว่า ซึ่งคำนวณมาจากขนาดของอิฐแต่ละประเภท ดังแสดงในตารางที่ 3 (อัตราส่วนความชะลุดคืออัตราส่วนของความสูงของอิฐก่อซึ่งการศึกษานี้เท่ากับ 1.00 เมตร ต่อความยาวเฉลี่ยของอิฐแต่ละประเภท โดยค่าอัตราส่วนความชะลุดจะมีค่าเท่ากับ 1.69, 2.58 และ 5.71 สำหรับอิฐมวลเบา อิฐบล็อก และอิฐมวลเบ ตามลำดับ) ส่งผลให้ในขณะรับแรงกระทำที่เท่ากันอาจเกิดการโก่งตัวด้านข้างที่มากกว่าประกอบกับรอยต่อของอิฐแต่ละก้อนจากปูนก่อมีมาก จึงทำให้มีความสามารถในการรับแรงอัดได้น้อยกว่า แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากตารางที่ 2 และรูปที่ 7 เป็นเพียงผลเบื้องต้น เมื่อมีการก่อผนังขนาดกว้าง 1.00 เมตร สูง 1.00 เมตร ผลที่ได้จะถูกนำเสนอและวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของอิฐประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษา

ชนิดของผนังก่อ	กำลังอัดเฉลี่ย f'_b (ksc)	กำลังเฉือนปูนก่อเฉลี่ย τ_b (ksc)	แรงอัดอิฐก่อ 1 เมตร $\times 10^3$ (kg)
อิฐมวลเบา	40.10	2.90	18.35
อิฐบล็อก	24.14	1.80	14.32
อิฐมวลเบ	65.02	3.50	12.23



อิฐมวลเบา

อิฐบล็อก

อิฐมวลเบ

รูปที่ 7 ความเสียหายของอิฐจากการทดสอบ กำลังอัด กำลังเฉือนปูนก่อ และแรงอัดของอิฐก่อ 1.00 เมตร

ตารางที่ 3 ขนาดของอิฐแต่ละประเภทและจำนวนชั้นของปูนก่อ สำหรับความสูงในการก่อ 1 เมตร

ชนิดของอิฐ	ความยาวเฉลี่ย (cm)	ความกว้างเฉลี่ย (cm)	จำนวนชั้นปูนก่อ
อิฐมวลเบา	59.10	19.50	4
อิฐบล็อก	38.70	19.60	4
อิฐมวลเบ	17.50	6.90	11

ความหนาของอิฐทุกประเภทมีขนาดเท่ากันคือ 7.00 เซนติเมตร

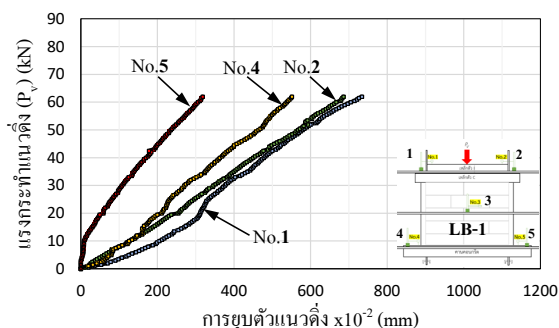
3.2 ผลการทดสอบผนังก่ออิฐ

จากการทดสอบพบว่าพฤติกรรมของผนังก่ออิฐขนาดกว้าง 1.00 เมตร สูง 1.00 เมตร ที่ได้จากการทดสอบการรับแรงกระทำด้านข้าง แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนและแรงดึงแนวทแยง ซึ่งได้จากการทดสอบและได้จากการคำนวณเบื้องต้น และยังพบว่าไม่เกิดการวิบัติเนื่องจากการโก่งบิดตัว (ค่าที่ได้มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับผลจากแรงเฉือน) ดังนั้น การวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้จะเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการวิบัติด้วยแรงเฉือน

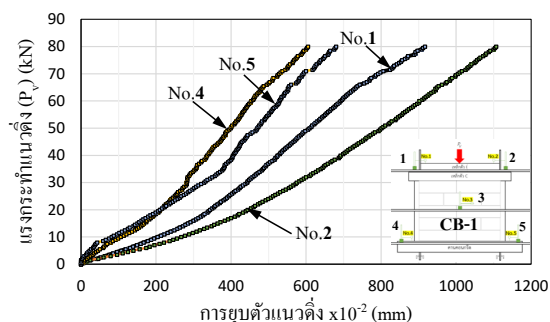
3.2.1 ผนังรับแรงกระทำในแนวตั้ง (รูปแบบที่ 1)

รูปที่ 8-10 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำในแนวตั้ง (P_v) กับค่าการยุบตัวในแนวตั้งของผนังก่อด้วยอิฐมวลเบา อิฐบล็อก และอิฐมวลเบตามลำดับ จะเห็นว่าที่ตำแหน่งหมายเลข 1

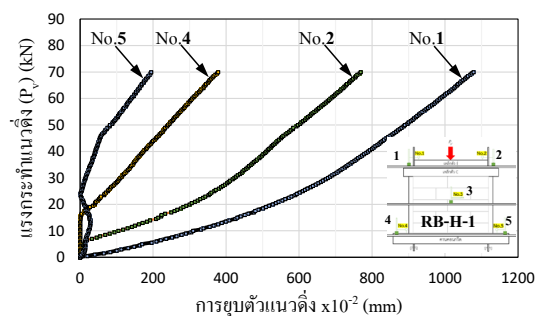
และ 2 ซึ่งอยู่ตำแหน่งด้านบนของผนังก่ออิฐได้แรงกระทำเมื่อเทียบกับค่าการยุบตัวที่ตำแหน่ง 4 และ 5 ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่งด้านล่างของผนังก่ออิฐ จะมีค่าการยุบตัวที่มากกว่าในทุกประเภทของผนังก่ออิฐ ซึ่งเป็นมาจากการที่ปูนก่อมีการยุบตัวรวมอยู่ด้วยและเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผนังที่ก่อด้วยอิฐมวลเบา จะเห็นว่าค่าการยุบตัวในแนวตั้งที่ตำแหน่ง 1 และ 2 มีค่าที่สูงกว่า แต่เมื่อเทียบกับผนังที่ก่อด้วยอิฐบล็อก การยุบตัวในแนวตั้งมีทิศทางที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าอิฐบล็อกที่ใช้ก่อผนังนั้นรับแรงในแนวตั้งได้ไม่มากเท่ากับผนังที่ก่อด้วยอิฐมวลเบา (เมื่อพิจารณาจากจำนวนชั้นของปูนก่อที่น้อยกว่าระหว่างการก่อด้วยอิฐบล็อกและอิฐมวลเบาที่มีความสูงของผนังเท่ากัน) แต่แนวโน้มของแรงกระทำและการยุบตัวมีทิศทางที่เหมือนกันคือเมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการยุบตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในการทดสอบเฉพาะแรงในแนวตั้งนี้ ไม่ได้ทดสอบจนวิบัติ โดยแรงกระทำสูงสุดที่ทำการทดสอบผนังก่ออิฐแต่ละประเภทมีค่าอยู่ในช่วง 65.00 กิโลนิวตัน ถึง 80.00 กิโลนิวตัน และไม่พบว่ามีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นในช่วงที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 8 แรงกระทำแนวตั้ง (P_v) กับค่ายุบตัวแนวตั้งจาก LVDTs (อิฐมวลเบา, LB-1) (รูปแบบที่ 1)



รูปที่ 9 แรงกระทำแนวตั้ง (P_v) กับค่ายุบตัวแนวตั้งจาก LVDTs (อิฐบล็อก, CB-1) (รูปแบบที่ 1)

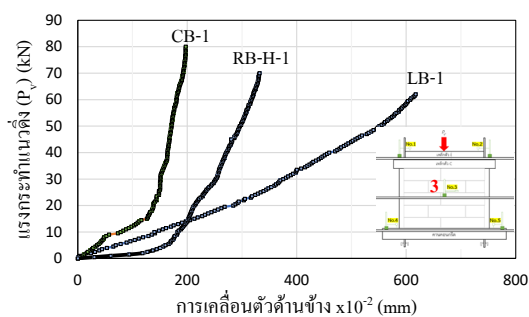


รูปที่ 10 แรงกระทำแนวตั้ง (P_v) กับค่ายุบตัวแนวตั้งจาก LVDTs (อิฐมวลเบา, RB-H-1) (รูปแบบที่ 1)

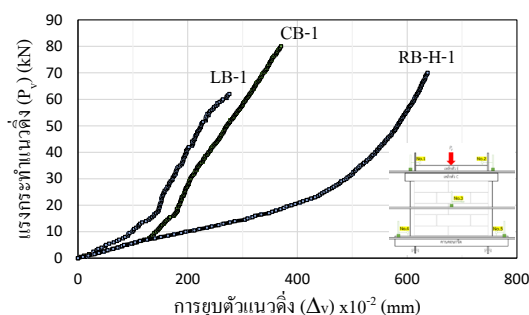
และสำหรับรูปที่ 11 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวตั้งกับการเคลื่อนตัวด้านข้างของผนังเนื่องจากอุปกรณ์การวัดที่ตำแหน่ง 3 พบว่าผนังที่ก่อด้วยอิฐมวลเบามีการเคลื่อนตัวด้านข้างหรือโก่งตัวด้านข้างสูงที่สุดเมื่อเทียบกับผนังก่ออิฐอีก 2 ประเภท เมื่อพิจารณาที่แรงกระทำที่เท่ากัน โดยมีผนังที่ก่อด้วยอิฐมวลเบาและอิฐบล็อกมีการเคลื่อนตัวทางด้านข้างน้อยลง ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าระหว่างผนังก่ออิฐที่มีจำนวนชั้นของปูนก่อที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 3 (อิฐมวลเบากับอิฐบล็อก) ผนังที่ก่อด้วยอิฐมวลเบามีการยึดหยุ่นที่ดีกว่า ในขณะที่ผนังที่ก่อด้วยอิฐบล็อกค่อนข้างที่จะมีความแข็งเนื่องจากมีค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของผนังที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับผนังที่ก่อด้วยอิฐมวลเบาและอิฐมวลเบาตามลำดับ

เมื่อพิจารณาจากการยุบตัวในแนวตั้งสัมพัทธ์ (Δ_v) หรือความแตกต่างระหว่างการยุบตัวด้านบนกับด้านล่างเนื่องจากแรงกระทำในแนวตั้งของผนังก่ออิฐแต่ละประเภทดังรูปที่ 12 พบว่าเมื่อผนังก่ออิฐรับแรงกระทำในช่วงแรกผนังก่ออิฐบล็อกและผนังก่ออิฐมวลเบารั้งแผ่น มีพฤติกรรมของการยุบตัวคล้ายกัน ซึ่งต่างจากผนังก่ออิฐมวลเบาที่มีพฤติกรรมของการยุบตัวน้อยกว่า เมื่อมีแรงกระทำที่ 8.50 กิโลนิวตัน ผนังก่ออิฐมวลเบาเกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมในลักษณะของการยุบตัวน้อยลง ส่วนผนังก่ออิฐบล็อกค่าการยุบตัวน้อยเมื่อมีแรงกระทำ 7.50 กิโลนิวตัน ในขณะที่ผนังก่ออิฐมวลเบาเกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมในลักษณะของการยุบตัวน้อยลงที่แรงกระทำ 18.50 กิโลนิวตัน โดยค่าแรงกระทำในแนวตั้ง

ที่ได้จากการทดสอบของผนังก่ออิฐมวลเบา ผนังก่ออิฐบล็อก และผนังก่ออิฐก่ออิฐมอญครึ่งแผ่นมีค่าเท่ากับ 70.00 กิโลนิวตัน, 62.00 กิโลนิวตัน และ 80.00 กิโลนิวตัน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาในช่วงที่มีแรงกระทำเท่ากันที่ 60.00 กิโลนิวตัน ผนังก่ออิฐมวลเบา ผนังก่ออิฐบล็อก และผนังก่ออิฐก่ออิฐมอญครึ่งแผ่น มีค่าการขยับตัวเท่ากับ 2.64 มิลลิเมตร 3.06 มิลลิเมตร และ 6.13 มิลลิเมตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผนังก่ออิฐที่มีค่าการขยับตัวมากที่สุด คือ ผนังก่ออิฐมอญครึ่งแผ่น ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ผนังก่ออิฐมอญครึ่งแผ่นเกิดการขยับตัวมากอาจเกิดจากการขยับตัวของปูนก่อ เพราะปูนก่อของผนังก่ออิฐมอญครึ่งแผ่นมีจำนวน 11 ชั้น ต่อการก่อสูง 1.00 เมตร ส่งผลให้ความหนาปูนก่อรวมมากกว่าผนังก่ออิฐมวลเบา และผนังก่ออิฐบล็อก ตามลำดับ (ตารางที่ 3) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในช่วงต้น



รูปที่ 11 แรงกระทำแนวตั้ง (P_v) กับค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างจาก LVDTs ของผนังก่ออิฐทั้ง 3 ประเภท



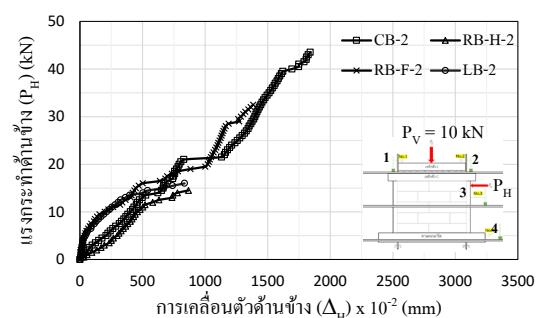
รูปที่ 12 แรงกระทำแนวตั้ง (P_v) กับค่าการขยับตัวในแนวตั้ง (Δ_v) ของผนังก่ออิฐทั้ง 3 ประเภท

3.2.2 ผนังรับแรงด้านข้างและแรงในแนวตั้ง (รูปแบบที่ 2, รูปแบบที่ 3 และรูปแบบที่ 4)

ผลการทดสอบผนังก่ออิฐรับแรงด้านข้างและแรงในแนวตั้งแบ่งเป็น 3 รูปแบบด้วยกัน ได้แก่ รูปแบบ 1 รูปแบบ 2 และรูปแบบ 3 ดังแสดงในตารางที่ 1 และได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 13–15 ตามลำดับ

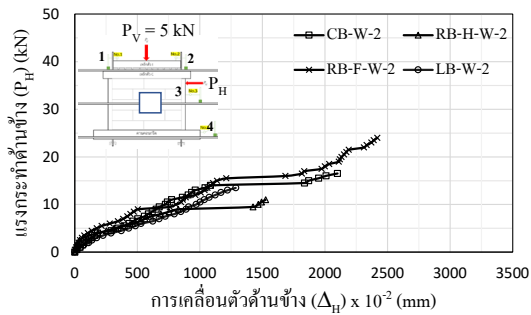
พบว่าในรูปที่ 13 เมื่อผนังก่ออิฐรับแรงกระทำในช่วงแรก พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของผนังก่ออิฐมวลเบา มีลักษณะการเคลื่อนตัวคล้ายผนังก่ออิฐมอญแบบเต็มแผ่น ซึ่งต่างจากผนังก่ออิฐบล็อกที่มีลักษณะการเคลื่อนตัวคล้ายผนังก่ออิฐมอญแบบครึ่งแผ่น และเกิดการเสียรูปมากกว่าเมื่อรับแรงกระทำในช่วงแรก สำหรับช่วงที่ผนังก่ออิฐเริ่มเกิดรอยแตกร้าว คือ แรงกระทำมีค่าเท่ากับ 15.0, 40.0, 13.5 และ 30.0 กิโลนิวตัน สำหรับ LB-2, CB-2, RB-H-2 และ RB-F-2 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเกิดรอยแตกร้าวขึ้นผนังทั้ง 4 แบบ ยังรับแรงกระทำได้เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 54.55, 13.04, 37.21 และ 21.05 ตามลำดับ จนวิบัติ โดยผนังจะไม่วิบัติแบบทันทีทันใด

และในรูปแบบที่ 3 และรูปแบบที่ 4 สำหรับรูปที่ 14 และ 15 พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของผนังก่ออิฐทั้งสี่ตัวอย่างมีลักษณะที่คล้าย ๆ กัน ค่าการเคลื่อนตัวไม่แตกต่างกันมาก

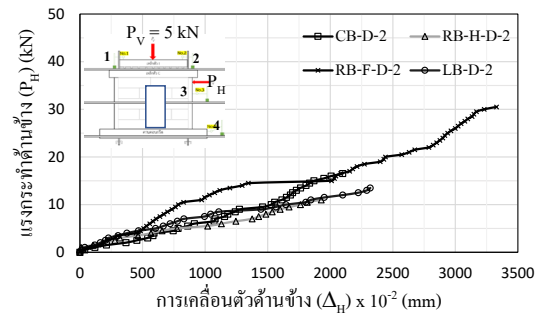


รูปที่ 13 แรงกระทำด้านข้าง (P_H) กับค่าการเคลื่อนตัวด้านข้าง (Δ_H) ($P_v = 10$ กิโลนิวตัน) (รูปแบบที่ 2)

แต่เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบที่ 2 ผนังก่ออิฐแบบมีช่องเปิดเริ่มเกิดรอยแตกร้าวที่ผนังเมื่อรับแรงกระทำด้านข้างได้น้อยกว่า โดยแรงน้อยสุดที่เริ่มแตกร้าวบันทึกได้ในรูปแบบที่ 3 ดังค่าได้สรุปในตารางที่ 4



รูปที่ 14 แรงกระทำด้านข้าง (P_H) กับค่าการเคลื่อนตัวด้านข้าง (Δ_H) ($P_V = 5$ กิโลนิวตัน) (รูปแบบที่ 3)



รูปที่ 15 แรงกระทำด้านข้าง (P_H) กับค่าการเคลื่อนตัวด้านข้าง (Δ_H) ($P_V = 5$ กิโลนิวตัน) (รูปแบบที่ 4)

ตารางที่ 4 ค่าแรงกระทำที่ผนังก่ออิฐเริ่มแตกร้าวและเกิดการวิบัติ

ผนังก่ออิฐ	แรงกระทำที่ผนังเริ่มแตกร้าว, ผนังวิบัติ และการเคลื่อนตัวของผนังก่ออิฐแต่ละรูปแบบ											
	รูปแบบที่ 1			รูปแบบที่ 2			รูปแบบที่ 3			รูปแบบที่ 4		
	crack	-	Δ_V	crack	failure	Δ_H	crack	failure	Δ_H	crack	failure	Δ_H
	(kN)	P_V (kN)	(mm)	(kN)	P_H (kN)	(mm)	(kN)	P_H (kN)	(mm)	(kN)	P_H (kN)	(mm)
CB	-	80.00	3.70	40.00	46.50	18.40	11.00	18.50	21.00	15.50	19.50	21.00
RB-H	-	70.00	6.37	13.50	21.50	8.67	8.50	11.00	15.25	9.50	12.50	19.28
RB-F	-	-	-	30.00	38.00	19.84	15.50	24.00	24.18	22.50	31.00	33.29
LB	-	62.00	2.76	15.00	33.00	8.35	10.00	17.00	12.87	10.00	18.50	23.20

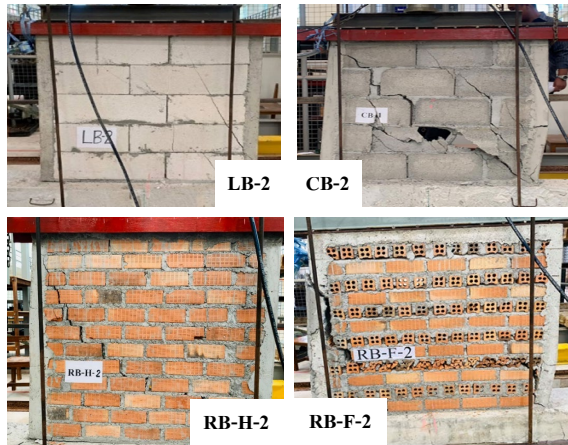
3.2.3 รูปแบบการวิบัติของผนังก่ออิฐ

จากตารางที่ 4 จะเห็นว่าค่าแรงกระทำที่ทำให้ผนังก่ออิฐเกิดการวิบัติมีความแตกต่างกันในแต่ละรูปแบบและประเภทของการก่ออิฐ ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นกับผนังก่ออิฐที่มีช่องเปิด หรือผนังรูปแบบที่ 3 และรูปแบบที่ 4 จะมีความสามารถในการรับแรงที่น้อยลงเมื่อเทียบกับผนังก่ออิฐที่ไม่มีช่องเปิด หรือรูปแบบที่ 2 แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผนังรูปแบบที่ 3 กับ 4 ที่มีช่องเปิดต่างกันจะเห็นว่า

ในภาพรวม รูปแบบที่ 3 จะรับแรงได้น้อยกว่าหรือเกิดการวิบัติก่อนรูปแบบที่ 4 แต่หากพิจารณาจากประเภทของการก่ออิฐจะพบว่า การก่ออิฐมอญแบบครึ่งแผ่น (RB-H) มีความสามารถในการรับแรงได้น้อยที่สุด โดยมีผนังที่ก่ออิฐมอญแบบเต็มแผ่น (RB-F) ผนังก่อด้วยอิฐบล็อก (CB) และผนังก่อด้วยอิฐมวลเบา (LB) มีความสามารถในการรับแรงกระทำเฉลี่ยได้มากเรียงตามลำดับ ซึ่งมีผลต่อรูปแบบการวิบัติของผนังก่ออิฐที่ต่างกัน ดังรูปที่ 16-19



รูปที่ 16 การวิบัติของผนังก่ออิฐรูปแบบที่ 1



รูปที่ 17 การวิบัติของผนังก่ออิฐรูปแบบที่ 2



รูปที่ 18 การวิบัติของผนังก่ออิฐรูปแบบที่ 3



รูปที่ 19 การวิบัติของผนังก่ออิฐรูปแบบที่ 4

การวิบัติของผนังก่ออิฐเนื่องมาจากแรงกระทำด้านข้าง (รูปที่ 17–19) จะมีพฤติกรรมเริ่มแตกร้าวและมีการเพิ่มการแตกร้าวของผนังก่ออิฐขึ้นทีละน้อย ตามค่าของแรงกระทำที่เพิ่มขึ้นจนวิบัติ เป็นการวิบัติแบบค่อยเป็นไป ซึ่งการวิบัติ

จัดเป็น 3 กลุ่ม ดังกล่าวข้างต้นคือ 1) การวิบัติเนื่องจากการคัด 2) การวิบัติเนื่องจากการ และ 3) การวิบัติเนื่องจากแรงดึงในแนวทแยง โดยในการศึกษานี้เราจะพบว่าผนังก่ออิฐที่ถูกทดสอบจนวิบัติ จะมีรูปแบบการวิบัติจัดอยู่ในกลุ่มที่ 2) และ 3) ซึ่งรูปแบบการวิบัติผนังก่ออิฐจะมีลักษณะแตกร้าวในแนวเอียงหรือแนวทแยงจากมุมด้านบนของผนังไปยังมุมด้านล่างของผนัง โดยเฉพาะจะเห็นรูปแบบการวิบัติดังกล่าวชัดเจนในกลุ่มของผนังที่ก่อด้วยอิฐมอญ เช่น RB-H-2 และ RB-F-2 เป็นต้น

สำหรับผนังก่ออิฐแบบมีช่องเปิด รูปแบบการวิบัติมีลักษณะของการแตกร้าวในแนวทแยงหรือแนวเอียงเช่นเดียวกัน โดยจะมีการเริ่มแตกร้าวตรงบริเวณของมุมของช่องเปิดด้านบนและรอยร้าวเริ่มขยายมากขึ้นในแนวทแยงซึ่งรอยร้าวที่เกิดขึ้นมีทั้งเกิดการแตกของก้อนอิฐและรอยร้าวผ่านในแนวของปูนก่อ แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของอิฐและปูนก่อต่างก็มีผลต่อการวิบัติ ดังแสดงในรูปที่ 18 และ 19 สำหรับผนังที่ก่อด้วยอิฐมอญ ในส่วนของผนังที่ก่อด้วยอิฐบล็อกและอิฐมวลเบาการวิบัติที่เกิดขึ้น แนวของการวิบัติเกิดในแนวเอียงเช่นกัน แต่จะมีความแตกต่างกัน กล่าวคือ ลักษณะแนวการวิบัติของผนังที่ก่อด้วยอิฐบล็อกจะมีแนวทแยงผ่านก้อนอิฐบล็อกอย่างชัดเจน ในขณะที่ผนังที่ก่อด้วยอิฐมวลเบา แนวของการวิบัติหรือรอยการแตกร้าวจะอยู่ในแนวของปูนก่อเป็นส่วนใหญ่ จะมีการแตกร้าวของก้อนอิฐบ้างเพียงบางส่วน นั่นอาจแสดงให้เห็นถึงคุณภาพของอิฐที่แตกต่างกันตามวัสดุและประเภทของการใช้งาน และเมื่อพิจารณาควบคู่กับตารางที่ 2 จะพบว่าแรงกระทำสูงสุดที่เกิดขึ้นกับผนังอิฐก่อประเภทอิฐบล็อกสามารถรับแรงกระทำที่สูงกว่าผนังจากการก่อด้วยอิฐมวลเบา

3.2.4 การวิเคราะห์โดยทฤษฎีและเปรียบเทียบ

จากรูปแบบของการวิบัติที่แตกต่างกันดังกล่าวข้างต้น ซึ่งจำแนกเป็น 3 กลุ่ม จากการทดสอบได้ผลดังแสดงในตารางที่ 2 และรูปแบบของการวิบัติดังรูปที่ 16–19 การพิจารณาผลการวิเคราะห์ด้วยสมการที่ (1), (2) และ (3) จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบ

ตารางที่ 5 แสดงค่าที่ได้มาจากการวัดค่าและการทดสอบผนังก่ออิฐ ซึ่งถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาค่าแรงกระทำที่ปลายผนังก่ออิฐ (P_b , P_s และ P_{dia}) โดยอาศัยสมการที่ (1)–(3) ดังแสดงในตารางที่ 6–8 และค่าที่ได้จาก

การวิเคราะห์โดยสมการดังกล่าวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบด้วยแรงกระทำด้านข้าง โดยผลการเปรียบเทียบ ดังแสดงในรูปที่ 20–22 ตามลำดับ

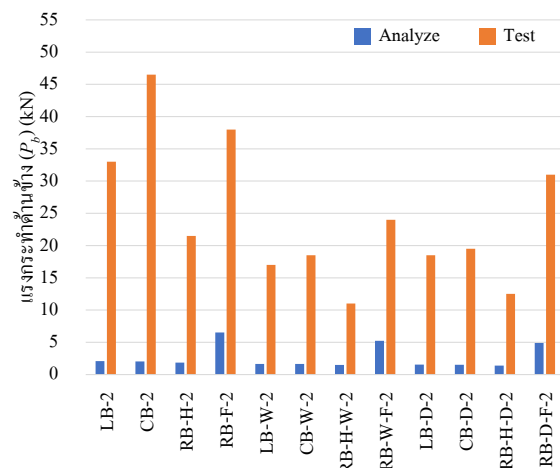
ตารางที่ 5 ค่าที่ได้จากการวัดและการทดสอบผนังก่ออิฐ

ผนังก่ออิฐ	thickness	Length	Hight	f'_m	τ_b	C	μ	σ_t
	(cm)	(cm)	(cm)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)			(kg/cm ²)
LB	7.00	100.00	100.00	31.62	2.90	0.80	1.00	3.64
CB	7.00	100.00	100.00	24.56	1.80	0.80	1.60	7.33
RB-H	7.00	100.00	100.00	40.31	3.50	0.80	0.66	3.43
RB-F	17.50	100.00	100.00	57.01	3.50	0.80	0.66	4.56

ตารางที่ 6 ค่าแรงกระทำด้านข้าง (P_b) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการ (1) พิจารณาสาเหตุอันเนื่องมาจากการคด

แบบไม่มีช่องว่าง		LB-2	CB-2	RB-H-2	RB-F-2
P_b (kN)	Analyze	2.07	2.03	1.85	6.52
	Test	33.00	46.50	21.50	38.00
แบบมีช่องหน้าต่าง		LB-W-2	CB-W-2	RB-H-W-2	RB-W-F-2
P_b (kN)	Analyze	1.65	1.63	1.48	5.22
	Test	17.00	18.50	11.00	24.00
แบบมีช่องประตู		LB-D-2	CB-D-2	RB-H-D-2	RB-D-F-2
P_b (kN)	Analyze	1.55	1.52	1.38	4.89
	Test	18.50	19.50	12.50	31.00

จากรูปที่ 20 เป็นการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการกับค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยพิจารณาสาเหตุของการวิบัติอันเนื่องมาจากการคด (Bending Failure) (ตารางที่ 6) ซึ่งจะพบว่าค่าของแรงกระทำด้านข้าง (P_b) ที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการนั้นมีความแตกต่างกันมากอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 75 ถึงร้อยละ 95 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการ (1)



รูปที่ 20 การเปรียบเทียบผลจากทฤษฎีกับการทดสอบจากการวิบัติโดยพิจารณาสาเหตุอันเนื่องมาจากการคด

นั้นแสดงให้เห็นว่าการวิบัติของตัวอย่างผนังก่ออิฐที่ทำการศึกษานี้ไม่ได้เกิดขึ้นเนื่องมาจากการคดเป็นหลัก อาจจะมีผลบ้างแต่ค่อนข้างที่จะน้อยมาก และเมื่อพิจารณาควบคู่กับตารางที่ 4 และรูปการวิบัติที่แสดงก่อนหน้านี้ ซึ่งค่าแรงกระทำสูงสุดและรูปแบบของการแตกร้าวจนกระทั่งเกิดการวิบัติที่ชัดเจนจะมีลักษณะในแนวเอียงและแนวทแยง ซึ่งเป็นผลจากแรงเฉือนและแรงดึงทแยงมากกว่าการคด โดยผลการเปรียบเทียบเนื่องมาจากแรงดึงทแยง (ตารางที่ 7–8) ดังรูปที่ 21 และ 22

ตารางที่ 7 ค่าแรงกระทำด้านข้าง (P_s) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการ (2) พิจารณาสาเหตุอื่นเนื่องมาจากแรงเฉือน

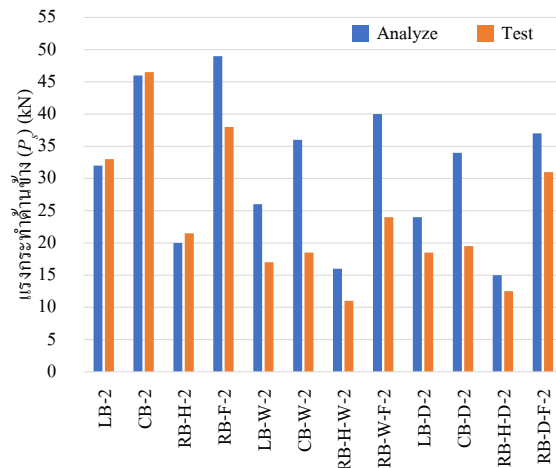
แบบไม่มีช่องว่าง		LB-2	CB-2	RB-H-2	RB-F-2
P_s (kN)	Analyze	32.00	46.00	20.00	49.00
	Test	33.00	46.50	21.50	38.00
แบบมีช่องหน้าต่าง		LB-W-2	CB-W-2	RB-H-W-2	RB-W-F-2
P_s (kN)	Analyze	26.00	36.00	16.00	40.00
	Test	17.00	18.50	11.00	24.00
แบบมีช่องประตู		LB-D-2	CB-D-2	RB-H-D-2	RB-D-F-2
P_s (kN)	Analyze	24.00	34.00	15.00	37.00
	Test	18.50	19.50	12.50	31.00

ตารางที่ 8 ค่าแรงกระทำด้านข้าง (P_{dia}) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการ (3) พิจารณาสาเหตุอื่นเนื่องมาจากแรงดึงในแนวทแยง

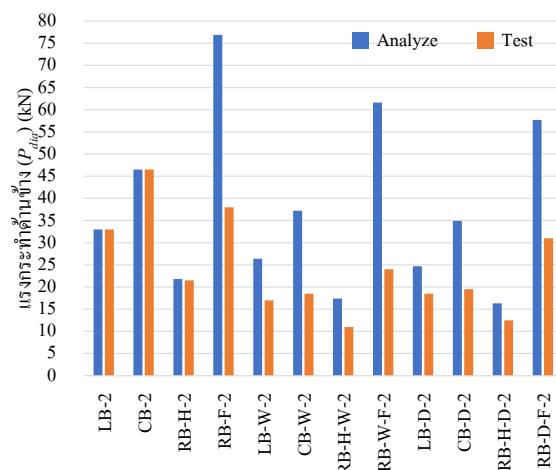
แบบไม่มีช่องว่าง		LB-2	CB-2	RB-H-2	RB-F-2
P_{dia} (kN)	Analyze	33.00	46.50	21.80	76.90
	Test	33.00	46.50	21.50	38.00
แบบมีช่องหน้าต่าง		LB-W-2	CB-W-2	RB-H-W-2	RB-W-F-2
P_{dia} (kN)	Analyze	26.40	37.20	17.40	61.60
	Test	17.00	18.50	11.00	24.00
แบบมีช่องประตู		LB-D-2	CB-D-2	RB-H-D-2	RB-D-F-2
P_{dia} (kN)	Analyze	24.70	34.90	16.30	57.70
	Test	18.50	19.50	12.50	31.00

จากรูปที่ 20–22 จะเห็นว่าผนังก่ออิฐรับแรงด้านข้างเมื่อพิจารณาการวิบัติเนื่องจากแรงดัด แรงเฉือน และแรงดึงในแนวทแยง พบว่าสำหรับการวิบัติเนื่องจากแรงดัด ผลการคำนวณค่าของแรงกระทำด้านข้าง (P_b) มีค่าน้อยกว่าผลการทดสอบอยู่มากประมาณร้อยละ 75 ถึง 95 ดังนั้นจึง

สันนิษฐานว่าผนังก่ออิฐไม่ได้เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดัด ส่วนการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนและแรงดึงในแนวทแยงกรณีของผนังก่ออิฐมวลเบาและผนังก่ออิฐบล็อกแบบไม่มีช่องว่าง การวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน พบว่าค่าของแรงกระทำด้านข้าง (P_s) มีความแตกต่างระหว่างผลจากการทดสอบกับผลที่วิเคราะห์ได้จากสมการ (2) อยู่ที่ประมาณร้อยละ 1 ถึง 2



รูปที่ 21 การเปรียบเทียบผลจากทฤษฎีกับการทดสอบจากการวิบัติโดยพิจารณาสาเหตุอื่นเนื่องมาจากแรงเฉือน



รูปที่ 22 การเปรียบเทียบผลจากทฤษฎีกับการทดสอบจากการวิบัติโดยพิจารณาสาเหตุอื่นเนื่องมาจากแรงดึงทแยง

และกรณีการวิบัติเนื่องจากแรงดึงในแนวทแยง พบว่าค่าของแรงกระทำด้านข้าง (P_{dia}) มีความแตกต่างระหว่างผลจากการทดสอบกับผลที่วิเคราะห์ได้จากสมการ (3) อยู่ที่ประมาณร้อยละ 0 ถึง 1 ส่วนผนังก่ออิฐมวลเบาแบบครึ่งและ

แบบเต็มแผ่นแบบไม่มีช่องว่าง การวัดนี้เนื่องจากแรงเฉือนและแรงดึงในแนวทแยง ค่าของแรงกระทำด้านข้าง (P_s , P_{dia}) มีความแตกต่างระหว่างผลจากการทดสอบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการ (2) และสมการ (3) ประมาณร้อยละ 8 ถึง 25 และร้อยละ 1 ถึง 50 ตามลำดับ ในกรณีของผนังก่ออิฐแบบมีช่องหน้าต่างทั้งสี่ชนิด การคำนวณการวัดนี้เนื่องจากแรงเฉือนและแรงดึงในแนวทแยง ค่าของแรงกระทำด้านข้าง (P_s , P_{dia}) มีความแตกต่างระหว่างผลจากการทดสอบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการ (2) และสมการ (3) ประมาณร้อยละ 30 ถึง 50 และร้อยละ 30 ถึง 60 ตามลำดับ และกรณีของผนังก่ออิฐแบบมีช่องประตูทั้งสี่ชนิด การคำนวณการวัดนี้เนื่องจากแรงเฉือนและแรงดึงในแนวทแยง มีค่าของแรงกระทำด้านข้าง (P_s , P_{dia}) มีความแตกต่างระหว่างผลจากการทดสอบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการ (2) และสมการ (3) ประมาณร้อยละ 15 ถึง 40 และร้อยละ 20 ถึง 45 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าความแตกต่างระหว่างผลจากการทดสอบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการของการวัดนี้เนื่องจากแรงเฉือนและแรงดึงในแนวทแยงไปในทิศทางเดียวกัน กรณีของผนังก่ออิฐแบบไม่มีช่องว่าง ค่าที่ได้สามารถประมาณแรงกระทำด้านข้างของผนังก่ออิฐได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ส่วนผนังก่ออิฐแบบมีช่องหน้าต่างและแบบมีช่องประตู ค่าที่ได้จากการคำนวณโดยพิจารณาการวัดนี้เนื่องจากแรงเฉือนและแรงดึงในแนวทแยงมีค่าที่แตกต่างกันมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบ

4. อภิปรายและสรุปผล

จากการศึกษาพฤติกรรมการวัดของผนังอิฐภายใต้แรงกระทำแบบสองทิศทาง คือแรงกระทำแนวตั้งและแรงกระทำด้านข้าง สามารถสรุปได้ดังนี้

4.1) ผนังก่ออิฐที่ทดสอบรับแรงกระทำเฉพาะในแนวตั้งไม่มีรอยแตกร้าวเกิดขึ้น (เนื่องจากไม่ได้ทำการทดสอบจนวิบัติ) ทำการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพในการรับแรงกระทำในแนวตั้งเบื้องต้น สำหรับใช้ในการกำหนดค่าแรงกระทำในแนวตั้งที่เหมาะสมในการทดสอบผนังอิฐด้วยแรงกระทำสองทิศทาง พบว่าผนังก่ออิฐทั้ง

สามประเภทมีประสิทธิภาพในการรับแรงในแนวตั้ง (ผนังอิฐรับแรงกระทำได้ 65 กิโลนิวตัน, 70 กิโลนิวตัน และ 80 กิโลนิวตัน สำหรับผนังที่ก่อด้วยอิฐมวลเบา อิฐมอญ และอิฐบล็อก ตามลำดับ) ได้เป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานผนังก่ออิฐสำหรับงานก่อสร้างในประเทศไทยที่ไม่ได้มุ่งเน้นให้ผนังอิฐรับแรงกระทำในแนวตั้ง โดยเฉพาะอาคารชุมชนขนาดเล็กในพื้นที่จังหวัดสงขลา

4.2) ผนังก่ออิฐที่ทดสอบรับแรงกระทำสองทิศทางคือแรงกระทำในแนวตั้งซึ่งมีค่าคงที่ (10 กิโลนิวตัน และ 5 กิโลนิวตัน) และแรงกระทำด้านข้างเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนวิบัติพบว่ารอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นอยู่ในแนวทแยง มีลักษณะทั้งรูปแบบเป็นขั้นบันไดและเป็นเส้นตรง ซึ่งผนังก่ออิฐมอญทั้งแบบครึ่งแผ่นและแบบเต็มแผ่นจะพบรอยแตกร้าวชัดกว่าผนังก่ออิฐบล็อกและผนังก่ออิฐมวลเบา โดยรอยแตกร้าวในผนังก่ออิฐนี้มีสาเหตุเนื่องจากแรงเฉือนและแรงดึงในแนวทแยง ลักษณะการแตกร้าวมีทั้งการแตกร้าวระหว่างผิวสัมผัสของอิฐกับปูนก่อ การแตกร้าวผ่านก้อนอิฐ และการแตกร้าวที่อิฐและปูนก่อแตกไปด้วยกัน

4.3) ความสัมพันธ์ของการรับแรงกับการเสียรูปของผนังก่ออิฐ เมื่อรับแรงกระทำด้านข้างโดยพิจารณาช่วงที่เคลื่อนตัวเท่ากัน ผนังก่ออิฐแบบมีช่องหน้าต่างรับแรงกระทำได้น้อยกว่าผนังก่ออิฐแบบไม่มีช่องว่างโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 48 โดยมีพื้นที่ก่ออิฐคิดเป็นร้อยละ 82 ของผนังก่ออิฐแบบไม่มีช่องว่าง (ส่วนที่เป็นช่องว่างคิดเป็นร้อยละ 18) ส่วนผนังก่ออิฐแบบมีช่องประตูรับแรงกระทำได้น้อยกว่าผนังก่ออิฐแบบไม่มีช่องว่างโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 70 โดยมีพื้นที่ก่ออิฐคิดเป็นร้อยละ 76 ของผนังก่ออิฐแบบไม่มีช่องว่าง (ส่วนที่เป็นช่องว่างคิดเป็นร้อยละ 24) แสดงให้เห็นว่าผนังก่ออิฐที่มีช่องว่าง มีความสามารถในการรับแรงกระทำน้อยลงเมื่อเทียบกับผนังก่ออิฐที่ไม่มีช่องว่าง

4.4) ผนังก่ออิฐรับแรงด้านข้าง จากการคำนวณโดยพิจารณาการวัดนี้เนื่องจากแรงดัด ผลการคำนวณมีค่าน้อยกว่าผลการทดสอบอยู่มาก ดังนั้นจึงสันนิษฐานว่าผนังก่ออิฐไม่ได้เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดัด ส่วนการวัดนี้เนื่องจากแรงเฉือนและแรงดึงในแนวทแยง กรณีผนังก่ออิฐแบบไม่มีช่องว่าง มีค่าความคาดเคลื่อนจากผลการทดสอบ

ไม่มากนัก ทำให้การประมาณแรงกระทำด้านข้างของผนังก่ออิฐได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ และกรณีของผนังก่ออิฐแบบมีช่องหน้าต่างและแบบมีช่องประตู ความแตกต่างระหว่างผลจากการทดสอบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการยังคงมีความแตกต่างอยู่มาก โดยค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่าที่สูงกว่าผลการทดสอบ

4.5) ความสามารถในการรับแรงกระทำทั้งแรงในแนวตั้งและแรงกระทำด้านข้างของผนังก่ออิฐแต่ละประเภทยังขึ้นอยู่กับกำลังของอิฐที่ใช้ก่อ (ทั้งกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึง) รวมถึงวัสดุที่ใช้ในการผลิตอิฐ ตลอดจนถึงกำลังรับแรงเฉือนของปูนก่อหรืออีกนัยหนึ่งก็คือคุณภาพของวัสดุก่ออีกด้วย

ด้วยผลการทดสอบและข้อสรุปดังกล่าวข้างต้นสามารถที่จะนำไปใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการเลือกใช้อิฐแต่ละประเภทในการก่อผนังได้อย่างเหมาะสมมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการก่อสร้างอาคารชุมชนขนาดเล็กในพื้นที่จังหวัดสงขลาที่รับน้ำหนักไม่มากโดยกลุ่มช่างก่อสร้างในพื้นที่ที่ก่อสร้างอาคารและมีการทาดัวและขาดการบำรุงรักษาอาคารอย่างต่อเนื่อง ตลอดจนสามารถใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาคุณภาพของอิฐที่ถูกผลิตและการพัฒนารูปแบบการก่อผนังอิฐเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานแรงดึงในแนวทแยงเพื่อลดการวิบัติและการแตกร้าวของผนังอิฐ รวมถึงการพัฒนาวัสดุก่อผนังที่ใช้งานในพื้นที่ชุมชนต่อไปได้

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่สนับสนุนอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่สำหรับการทดสอบ จนกระทั่งทำให้งานวิจัยในครั้งนี้บรรลุวัตถุประสงค์และสำเร็จไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

[1] N. N. Thaickavil and J. Thomas, "Behavior and strength assessment of masonry prism," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 8, pp. 23–38, 2018, doi: 10.1016/j.cscm.2017.12.007.

[2] H. B. Kaushik, D. C. Rai and S. K. Jain, "Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, no. 9, pp. 728–739, 2007, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(728).

[3] G. Sarangapani, B. V. Venkatarama Reddy and K. S. Jagadish, "Brick-mortar bond and masonry compressive strength," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 229–237, 2005, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:2(229).

[4] A. Brencich and L. Gambarotta, "Mechanical response of solid clay brickwork under eccentric loading. Part I: Unreinforced masonry," *Materials and Structures*, vol. 38, no. 2, pp. 257–266, 2005, doi: 10.1007/BF02479351.

[5] L. Berto, A. Saetta, R. Scotta and R. Vitaliani, "Failure mechanism of masonry prism loaded in axial compression: computation aspects," *Materials and Structures*, vol. 3, no. 2, pp. 249–256, 2005, doi: 10.1007/BF02479350.

[6] S.B. Singh and P. Munjal, "Bond strength and compressive stress-strain characteristics of brick masonry," *Journal of Building Engineering*, vol. 9, pp. 10–16, 2017, doi: 10.1016/j.jobbe.2016.11.006.

[7] M. B. Ravula and K. V. L. Subramaniam, "Experimental investigation of compressive failure in masonry brick assemblages made with soft brick," *Materials and Structures*, vol. 50, no. 19, pp. 1–11, 2017, doi: 10.1617/s11527-016-0926-1.

[8] M. C. Griffith, N. T. Lam, J. L. Wilson and K. Doherty, "Experimental investigation of unreinforced brick masonry walls in flexure," *Journal of Structural Engineering*, vol. 130, no. 3, pp. 423–432, 2004, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:3(423).

[9] P. Alcaino and H. Santa-Maria, "Experimental response of externally retrofitted masonry walls

- subjected to shear loading,” *Journal of Composites for Construction*, vol. 12, no. 5, pp. 489–498, 2008, doi: [10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2008\)12:5\(489\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:5(489)).
- [10] I. S. Kolsida, A. K. Tomor and C. A. Booth, “Experimental evaluation of changes in strain under compressive fatigue loading of brick masonry,” *Construction and Building Materials*, vol. 162, pp. 104–112, 2018, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2017.12.016](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.016).
- [11] P. Joyklad and Q. Hussain, “Experimental study on axial and diagonal compressive behavior of brick masonry walls,” *Kasem Bundit Engineering Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 1–20, 2018.
- [12] R. Werasak, J. Meng and K. Ratchaneewan, “Behaviors of historic masonry walls retrofitted with GFRP under axial load,” *Advanced Materials Research*, vols. 133–134, pp. 959–964, 2010, doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.959](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.959).
- [13] R. Kerdmongkon, M. Jing and W. Raongjant, “Study on the behavior of ancient masonry walls retrofitted using glass fiber reinforced polymer under axial load,” in *Proc. 15th Nation Convention on Civil Engineering (NCCE15)*, UbonRatchathani, Thailand, May. 12–14, 2010, pp. MAT06-1–MAT06-6.
- [14] P. Odthon and N. Yoosuk, “Behavior of lightweight concrete block wall subjected to axial load,” B.E. thesis, Dept. Civil Eng., Burapha Univ., Chonburi, Thailand, 2007.
- [15] K. Kaewthep and P. Phaichaleam, “The behavior of lightweight reinforced mortar wall under compression load,” B.E. thesis, Dept. Civil Eng., Burapha Univ., Chonburi, Thailand, 2017.
- [16] S. Leelataviwat and P. Warnitchai, “Lessons from damage to small and medium-sized buildings in the event of the Mae Lao earthquake Chiang Rai Province,” in *Lessons from the Mae Lao Earthquake, Chiang Rai, Disaster Nearby Seminar*, Bangkok, Thailand, Nov. 20, 2014, pp.99–114.
- [17] K. M. Dolatshahi, A. J. Aref and M. Yekrangnia, “Bidirectional behavior of unreinforced masonry walls,” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 43, no. 15, pp. 2377–2397, 2014, doi: [10.1002/eqe.2455](https://doi.org/10.1002/eqe.2455)
- [18] K. M. Dolatshahi, A. J. Aref and M. Yekrangnia, “A Study of Multi-Directional Response of Unreinforced Masonry Walls,” in *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Istanbul, Turkey, Aug. 25–29, 2014, pp.1–10.
- [19] K. M. Dolatshahi and A. J. Aref, “Multi-directional response of unreinforced masonry walls: experimental and computational investigations,” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 45, no. 9, pp.1427–1447, 2016, doi: [10.1002/eqe.2714](https://doi.org/10.1002/eqe.2714).
- [20] T. Deb, T. Y. P. Yuen, D. Lee, R. Halder and Y. C. You, “Bi-directional collapse fragility assessment by DFEM of unreinforced masonry building with opening and different configurations,” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 50, no. 15, pp. 4097–4120, 2021, doi: [10.1002/eqe.3547](https://doi.org/10.1002/eqe.3547).
- [21] *Thai Industrial Standard for Half Red Brick*, Tis no. 77-2545, Thai Industrial Standard Institute (TISI), Ministry of Industry, Bangkok, Thailand, 2002.
- [22] *Thai Industrial Standard for Concrete Block*, Tis no. 57-2560, Thai Industrial Standard Institute (TISI), Ministry of Industry, Bangkok, Thailand, 2017.
- [23] *Thai Industrial Standard for Lightweight Brick*, Tis no. 1505–2541, Thai Industrial Standard Institute (TISI), Ministry of Industry, Bangkok, Thailand, 2013.
- [24] *Standard Test Method for Diagonal Tension (shear) in Masonry Assemblages*, ASTM E519-02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2002.
- [25] G. Lan, Y. Wang, L. Xin and Y. Liu, “Shear test method analysis of earth block masonry mortar joints,”

- Construction and Building Materials*, vol. 264, 2020, Art. no. 119997, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119997.
- [26] *Standard Test Method of Sampling and Testing Brick and Structural Clay*, ASTM C67-97, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 1997.
- [27] *Standard Specification for Building Brick*, ASTM C62-69, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA, 2001.
- [28] E. Minaie, F. L. Moon and A. A. Hamid, “Nonlinear finite element modeling of reinforced masonry shear walls for bidirectional loading response,” *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 84, pp. 44–53, 2014, doi: 10.1016/j.finel.2014.02.001.
- [29] A. Chomvong, “Strength of Brickwall Subjected to Lateral Load,” M.E. thesis, Dept. Civil Eng., Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand, 1982.