



ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของผนังอิฐมอญภายใต้แรงอัดแกนเดียวที่ทำมุมกับแนวการก่ออิฐ
STRESS-STRAIN RELATIONSHIP OF CLAY BRICK PANELS UNDER UNIAXIAL COMPRESSION
LOADING INCLINED TO BED JOINT

สมบุญ เชียงจิน^{1*} ปรีดา ไชยมหาวัน¹ และวิชัยรัตน์ แก้วเจือ²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

บทคัดย่อ

ผนังก่ออิฐที่บรรจุในโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีผลกระทบต่อพฤติกรรมการรับแรงด้านข้างของโครงสร้าง แต่งานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมการรับแรงอัดของผนังก่ออิฐในประเทศไทยยังมีน้อย การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะทำการศึกษาศึกษาโดยทำการทดสอบให้แรงอัดกับตัวอย่างผนังก่ออิฐ ตัวอย่างมีขนาดความกว้างและความสูง 760x760 มม.² โดยใช้ก้อนอิฐที่มีขนาด 65x160x40 มม.³ ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ทั่วไปในการก่อสร้างอาคาร การทดสอบจะให้แรงอัดกระทำกับตัวอย่างผนังก่ออิฐ โดยที่แนวแรงอัดทำมุม 0 15 30 45 60 75 และ 90 องศา กับแนวการก่ออิฐ ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่ามุมระหว่างแนวแรงอัดกับแนวการก่ออิฐมีผลต่อกำลังอัดและลักษณะการวิบัติอย่างมีนัยสำคัญ เกณฑ์การวิบัติของผนังก่ออิฐและการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของผนังก่ออิฐในการรับแรงอัดได้เสนอไว้โดยใช้ข้อมูลการทดสอบ

คำสำคัญ: ผนังก่ออิฐ, กำลังอัด, เกณฑ์การวิบัติ, ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

ABSTRACT

Masonry infilled in reinforced concrete frames affects the behavior of structures subjected to lateral loading. However, there are few researches about compressive behavior of masonry panel in Thailand. The objective of this study is testing the masonry panels subjected to compressive loading. The panels are about 760x760 mm² in width and height. They are constructed with clay bricks, 65x160x40 mm³ for dimensions, usually used in construction industrial. The compressive loading directions incline to the bed joint varied 0, 15, 30, 45, 60, 75 and 90 degrees. The test results indicated that the inclined angle between loading direction and bed joint significantly affects the strength and failure characteristic. The failure criterion and stress-strain relationship of the masonry panel subjected to compressive loading are proposed based on the tested data.

KEYWORDS: masonry panel, compressive strength, failure criterion, stress-strain relation

Somboon Shaingchin¹, Preeda Chaimahawan¹ and Wichairat Kaewjuea²

¹Assistant Professor, School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Phayao

²Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

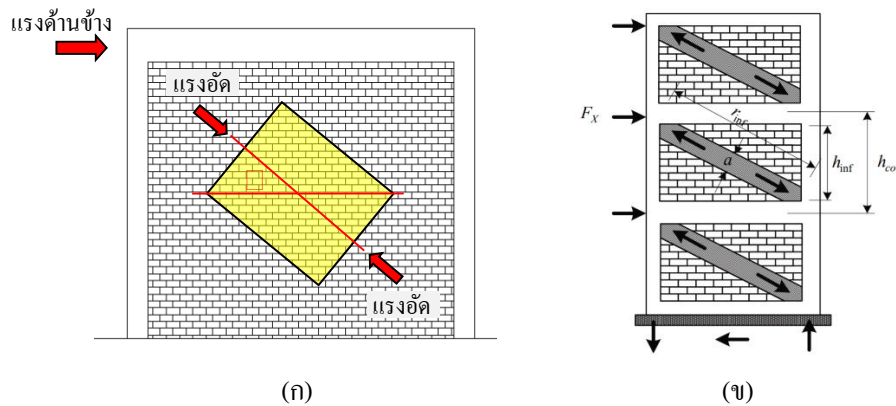
1. บทนำ

การก่อสร้างอาคาร 2-4 ชั้น ในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นระบบคานและเสา ในการวิเคราะห์โครงสร้างนั้นสามารถจำลองเป็นระบบโครงข้อแข็งได้ และมีการก่อผนังกันเป็นห้องเพื่อประโยชน์ใช้สอยโดยใช้อิฐมวลเบาเพราะว่ามีราคาถูกและหาซื้อได้ง่าย งานวิจัยในอดีตโดย Lukkunaprasit และคณะ [1] ได้รวบรวมสมรรถนะของอาคารที่เกิดความเสียหายจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในประเทศไทย เกิดขึ้นเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 ขนาด 6.3 แมกนิจูด มีจุดศูนย์กลางในจังหวัดเชียงราย ซึ่งพบว่าผนังก่ออิฐที่เดิมในช่องว่างของโครงข้อแข็งมีอิทธิพลอย่างมากกับพฤติกรรมการรับแรงด้านข้างของโครงสร้างอาคาร โดยเพิ่มสติเฟนทางด้านข้างให้กับโครงข้อแข็งอย่างมีนัยสำคัญ ผลกระทบกับโครงสร้างที่มีลักษณะ (ก) โครงสร้างชั้น 1 เปิดโล่ง (ไม่มีผนังก่ออิฐ) แต่ชั้นบนมีผนังก่ออิฐ จะทำให้โครงสร้างชั้นบนมีสติเฟนทางด้านข้างมากกว่าโครงสร้างชั้น 1 มาก จึงส่งผลให้เกิดการโยกตัวของอาคารทางด้านข้างในชั้น 1 มาก และทำให้โครงสร้างเสาในชั้น 1 เกิดความเสียหาย (ข) โครงสร้างชั้น 1 ที่มีผนังก่ออิฐอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางมวลออกไปทางด้านใดด้านหนึ่ง จึงทำให้เกิดระยะเชื่อมโยงระหว่างจุดศูนย์กลางการรับแรงทางด้านข้างของโครงสร้างและจุดศูนย์กลางมวล เมื่อมีแรงแผ่นดินไหวเกิดขึ้น โครงสร้างจะเกิดการบิด ทำให้เสาด้านที่ไม่มีผนังก่ออิฐเกิดความเสียหายได้ และ (ค) โครงสร้างที่มีผนังก่ออิฐ จะเกิดความเสียหายกับโครงสร้างเสา ซึ่งจะวิบัติแบบเฉือนหรือเกิดการวิบัติแบบอัดแตกที่ผนังก่ออิฐเนื่องจากการถ่ายแรงทางด้านข้างจากโครงข้อแข็งไปผนังก่ออิฐในแนวทแยง ทำให้เสารับแรงเฉือนมากขึ้น (ดังรูปที่ 1) จากที่ได้กล่าวข้างต้น วิศวกรไม่สามารถเพิกเฉยผลกระทบของผนังก่ออิฐในการวิเคราะห์โครงสร้างให้มีความสามารถในการรับแรงกระทำด้านข้างจากแผ่นดินไหวได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Srechai and Lukkunaprasit [2] และ เกริกฤทธิ พรหมดวง [3] ที่ได้ทำการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงทางด้านข้างของโครงข้อแข็งที่มีผนังก่ออิฐบรรจุภายในช่องว่าง แล้วพบว่าพฤติกรรมการวิบัติแบบเปราะ โดยกำลังรับแรงด้านข้างลดลงทันทีเมื่อผนังก่ออิฐเกิดการอัดแตกบริเวณมุมเสา-คาน และทำให้สามมิติพฤติกรรมเป็นเสาสั้นจึงเกิดการวิบัติแบบเฉือนขึ้นในเสาหรือในจุดต่อเสา-คาน

โครงข้อแข็งที่มีผนังก่ออิฐบรรจุเต็มเมื่อรับแรงทางด้านข้าง ผนังก่ออิฐภายในโครงข้อแข็งจะช่วยรับแรงทางด้านข้างเป็นแรงอัดตามแนวทแยงที่มีทิศทางของแรงอัดทำมุมกับแนวการก่ออิฐ ดังแสดงในรูปที่ 2(ก) โดยมาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารตาม มขพ.1303-57 [4] ให้จำลองผนังก่ออิฐเป็นค้ำยันรับแรงอัดในแนวทแยงดังแสดงในรูปที่ 2(ข) โดยมีข้อกำหนดของความกว้างที่เหมาะสมของค้ำยันรับแรงอัด ซึ่งขึ้นอยู่กับสติเฟนของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็ก และค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของผนังก่ออิฐ (E_m) ซึ่งกำหนดให้ใช้เท่ากับ 550 เท่าของกำลังอัดของผนังอิฐก่อ (f'_m) นั่นคือ $E_m = 550f'_m$



รูปที่ 1 ความเสียหายในผนังอิฐก่อและเสาจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 6.3 แมกนิจูด จังหวัดเชียงราย



รูปที่ 2 การถ่ายแรงด้านข้างเข้าสู่ผนังก่ออิฐภายในโครงข้อแข็ง

การวิจัยคุณสมบัติด้านกำลังอัดของผนังก่ออิฐโดยส่วนใหญ่จะศึกษาด้วยการทดสอบตัวอย่างที่ก่ออิฐเป็นปริซึมตามมาตรฐาน ASTM C1314 [5] เช่น ลิทธิชัย แสงอาทิตย์ [6] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของก้อนอิฐ (f'_{br}) และกำลังอัดของปริซึมอิฐก่อ (f'_m) โดยใช้ก้อนอิฐจากโรงงานในจังหวัดนครราชสีมาและปริมาณลดโดยแบ่งเป็นก้อนอิฐที่ผลิตด้วยมือ (อิฐมอญทั่วไป) และอิฐที่อัดด้วยเครื่อง (อิฐมอญมาตรฐาน) โดยผลการศึกษาให้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของปริซึมอิฐก่อและกำลังอัดของก้อนอิฐคือ $f'_m = 0.196 f'_{br}$ สำหรับอิฐมอญทั่วไป และ $f'_m = 0.280 f'_{br}$ สำหรับอิฐมอญมาตรฐาน และค่ากำลังอัดของปริซึมอิฐก่อจะมีค่าในช่วง 4-6 MPa และมีความเครียดที่กำลังอัดสูงสุดประมาณ 0.004-0.005 Kaushik และคณะ [7] ได้ทำการเสนอความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของปริซึมอิฐก่อ โดยใช้ขนาดของอิฐมอญยาว 230 มม. กว้าง 110 มม. และหนา 75 มม. การศึกษาจะทำการทดสอบกำลังอัดของก้อนอิฐ (f'_{br}) และกำลังอัดของปูนก่อ (f'_j) แล้วจึงสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของปริซึมอิฐก่อกับกำลังอัดของก้อนอิฐและปูนก่อ คือ $f'_m = 0.63 f'_{br}{}^{0.49} f'_j{}^{0.32}$ สำหรับค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E_m) ของปริซึมอิฐก่อจะอยู่ระหว่าง 250-1100 เท่าของกำลังอัดของปริซึมอิฐก่อ หากพิจารณาจากค่าเฉลี่ยจะให้ความสัมพันธ์ $E_m = 550 f'_m$ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่ใช้ใน มยพ. 1303-57 [4] ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของปริซึมอิฐก่อได้นำเสนอในรูปแบบของสมการพาราโบลาโดยขึ้นอยู่กับค่ากำลังอัดสูงสุด (f'_m) และค่าความเครียดที่กำลังอัดสูงสุด (ϵ'_m) ดังสมการที่ (1)

$$f_m = f'_m \left[2 \frac{\epsilon_m}{\epsilon'_m} - \left(\frac{\epsilon_m}{\epsilon'_m} \right)^2 \right] \quad (1)$$

อย่างไรก็ตาม ขนาดตัวอย่างอิฐที่ใช้ในการศึกษาของ Kaushik และคณะ [7] นั้นแตกต่างจากขนาดอิฐที่กำหนดไว้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมอิฐกลวงก่อแฉงไม่รับน้ำหนัก (มอก. 153-2540) [8] ของประเทศไทย ที่กำหนดขนาดของก้อนอิฐมีความยาว 160 มม. กว้าง 65 มม. และหนา 40 มม.

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบกำลังอัดของผนังก่ออิฐแบบสองทิศทาง โดยให้แรงอัดในทิศทางตั้งฉาก (f_n) และในทิศทางขนาน (f_p) กับแนวการก่ออิฐ ดังเช่น Naraine and Sinha [9] ได้ทำการทดสอบตัวอย่างผนังก่ออิฐขนาด 360x360x115 มม.³ ซึ่งก่อสร้างจากก้อนอิฐขนาด 115x55x35 มม.³ และใช้ปูนก่อหนา 6 มม. โดยมีอัตราส่วนของ f_n/f_p เท่ากับ 0 0.2 0.6 1.0 1.67 5.0 และ ∞ ผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดในทิศทางขนานกับแนวปูนก่อจะสูงกว่ากำลังอัดในทิศทางตั้งฉากกับแนวปูนก่อ และแรงอัด

ในทิศทางขนานจะช่วยให้กำลังอัดในทิศทางตั้งฉากกับแนวปูนก่อสูงขึ้น ในทำนองเดียวกันแรงอัดในทิศทางตั้งฉากจะช่วยให้กำลังอัดในทิศทางขนานกับแนวก่ออิฐสูงขึ้น นอกจากนี้ Naraine and Sinha [10] ยังได้เสนอวิธีการหาค่ากำลังอัดสูงสุดของผนังก่ออิฐ ความเครียดที่กำลังอัดสูงสุด และเสนอความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในรูปของสมการเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential Function)

อย่างไรก็ตาม การศึกษาคุณสมบัติความเค้นและความเครียดของผนังก่ออิฐในประเทศไทยยังมีน้อย และคาดว่าไม่สามารถนำผลการศึกษานี้ไปเทียบเคียงกับผนังก่ออิฐในประเทศไทยได้ เนื่องจากมีคุณลักษณะของดินที่แตกต่างกัน และมีขนาดของก้อนอิฐที่แตกต่างกัน อีกทั้งการพิจารณาผนังก่ออิฐเป็นค้ำยันรับแรงอัดในแนวทแยง แรงอัดจะกระทำในทิศทางที่ทำมุม θ กับแนวการก่ออิฐ ดังแสดงในรูปที่ 2(ก) งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะทำการศึกษากำลังอัดของผนังก่ออิฐที่ทิศทางของแรงอัดทำมุมเดียวกับแนวการก่ออิฐ เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลเพื่อพิจารณาเกณฑ์การวิบัติ และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของผนังก่ออิฐภายใต้แรงอัด โดยคาดหวังว่าจะเป็นองค์ความรู้ที่นำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีผนังก่ออิฐที่บรรจุภายในได้ดียิ่งขึ้น

2. วิธีการศึกษา

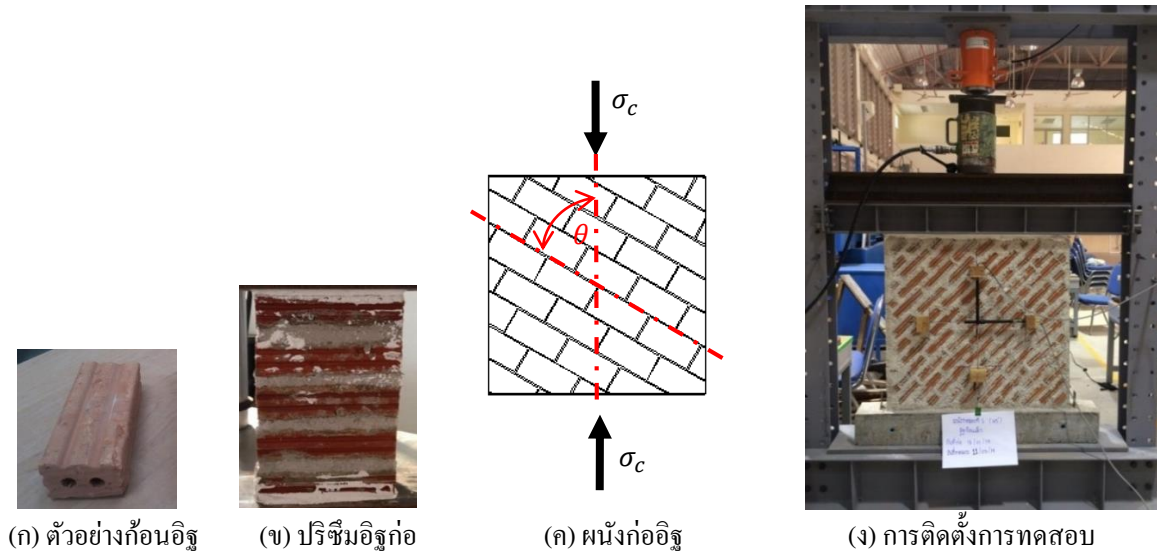
2.1 ตัวอย่างผนังก่ออิฐ

ก้อนอิฐที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นอิฐมอญที่ใช้ในงานก่อผนังเป็นผนังกันห้องไม่รับน้ำหนัก ซึ่งมีขนาดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เลขที่ 153-2540 [8] ที่กำหนดขนาดไว้ $65 \times 160 \times 40$ มม.³ ดังแสดงในรูปที่ 3(ก) เมื่อทำการสุ่มวัดขนาดของก้อนอิฐจะมีค่าเฉลี่ยคือ ความกว้าง 65.5 มม. ความยาว 157.9 มม. และความหนา 39.1 มม. ค่ากำลังอัดของก้อนอิฐที่สภาวะอบแห้งและค่าการดูดซึมน้ำของก้อนอิฐ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.02 MPa และ 18.22% ตามลำดับ เมื่อนำผลการทดสอบเทียบกับเกณฑ์ มอก.153-2540 อิฐที่นำมาทดสอบจัดเป็นอิฐก่อผนัง ชั้นคุณภาพ ค ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้ก่อภายใน ไม่เผชิญต่อฝน หรือการเปียกชื้น อย่างไรก็ตาม ก้อนอิฐที่ใช้ในการก่อสร้างจะไม่ได้ถูกอบให้แห้ง แต่จะมีความชื้นตามสภาวะธรรมชาติ เมื่อทำการทดสอบกำลังอัดก้อนอิฐที่ได้จากโรงงานซึ่งมีความชื้นประมาณ 1.20% ค่ากำลังอัดเฉลี่ยจะมีค่าเท่ากับ 5.37 MPa ปูนก่อเป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์ทราย และน้ำ โดยให้ส่วนผสมมีค่าการไหลประมาณ 110 % การศึกษานี้จะใช้อัตราส่วนผสมของ ปูนซีเมนต์ ทราย และน้ำ คือ 1:3:0.55 โดยน้ำหนัก เมื่อนำไปทดสอบกำลังอัดของก้อนมอร์ตาร์ขนาด 50×50 มม.² ที่อายุ 28 วัน จะได้ค่าเฉลี่ยกำลังอัดเท่ากับ 27.3 MPa

การก่อผนังก่ออิฐจะทำโดยการแช่ก้อนอิฐในน้ำ 12 ชั่วโมง แล้วนำมาก่อในโครงไม้แบบที่เตรียมไว้ ตัวอย่างผนังก่ออิฐมีทั้งหมด 7 ตัวอย่าง ขนาดของผนังก่ออิฐจะมีขนาดประมาณ 760×760 มม.² โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาคือ มุมเอียง θ ระหว่างทิศทางของแรงอัดและแนวการก่ออิฐ (ดูรูปที่ 3(ค)) โดยมีค่ามุม θ เท่ากับ 0 15 30 45 60 75 และ 90 องศา ซึ่งชื่อตัวอย่างผนังก่ออิฐจะอ้างตามมุม θ คือตัวอย่าง M0 M15 M30 M45 M60 M75 และ M90 ตามลำดับ เมื่อทำการก่อผนังเรียบร้อยแล้ว ตัวอย่างจะถูกทำการบ่มโดยใช้ถุงผ้าครอบไว้เป็นเวลา 28 วัน นอกจากนี้ ระหว่างเตรียมตัวอย่างผนังก่ออิฐแต่ละตัวอย่าง จะทำการเก็บตัวอย่างปริซึมอิฐก่อ โดยเรียงอิฐ 5 ก้อน ดังแสดงในรูปที่ 3(ข) เพื่อทดสอบหาค่ากำลังอัดของปริซึมอิฐก่อตาม ASTM C1314 [5] ด้วย

2.2 วิธีการทดสอบ

ติดตั้งโครงเฟรมทดสอบดังในรูป 3(ง) ประกอบไปด้วยเสาและคานถ่ายแรงด้านบนและด้านล่าง ที่คานถ่ายแรงด้านบนจะติดตั้งอุปกรณ์วัดแรง (load cell) ผนังก่ออิฐจะถูกยกไปวางบนคานถ่ายแรงด้านล่าง แล้ววางเหล็กถ่ายแรงกระจายที่ด้านบนของผนังก่ออิฐ การให้แรงอัดจะใช้อุปกรณ์ไฮดรอลิก ขนาด 60 ตัน อุปกรณ์วัดระยะจะถูกนำมาติดตั้งในช่วงความยาวเกจ 400 มม. เพื่อวัดระยะการหดตัวตามแนวแรงที่กดตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3 ก้อนอิฐ ตัวอย่างผนังก่ออิฐ และการติดตั้งการทดสอบ

2.3 วิธีการแปลงชุดความเค้น

จากการทดสอบจะได้ค่ากำลังอัดของผนังก่ออิฐ (f_m'') และกำลังอัดของปริซึมอิฐก่อ (f_m') การศึกษานี้จะใช้ค่ากำลังอัดของผนังก่ออิฐที่ทำให้ไร่หน่วยด้วยการหารกำลังอัดของปริซึมอิฐก่อ $\sigma_c = f_m''/f_m'$ เป็นค่ากำลังอัดในทิศทางที่ทำมุม θ กับแนวการก่ออิฐ เมื่อทำการแปลงกำลังอัดไปในทิศทางตั้งฉาก (แกน n) และในทิศทางขนาน (แกน p) กับแนวการก่ออิฐ จะได้ค่ากำลังอัดตามสมการที่ (2) เมื่อแทนค่ามุมต่าง ๆ ที่จะทำการศึกษา จะได้ค่าความเค้นดังแสดงในตารางที่ 1

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_c \left(\frac{1 - \cos 2\theta}{2} \right) \\ \sigma_p &= \sigma_c \left(\frac{1 + \cos 2\theta}{2} \right) \\ \sigma_{np} &= \sigma_c \left(\frac{\sin 2\theta}{2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

โดยที่ σ_n คือ ความเค้นในแนวตั้งฉากกับแนวการก่ออิฐ

σ_p คือ ความเค้นในแนวขนานกับแนวการก่ออิฐ

σ_{np} คือ ความเค้นเฉือนในแนวก่ออิฐ

ตารางที่ 1 ค่ากำลังอัดในทิศทางตั้งฉากและขนานกับแนวการก่ออิฐ

ตัวอย่าง	มุม θ	$\frac{\sigma_n}{\sigma_c}$	$\frac{\sigma_p}{\sigma_c}$	$\frac{\sigma_{np}}{\sigma_c}$	ทิศทางของกำลังอัด
M0	0	0	1	0	
M 15	15	0.068	0.933	0.250	
M 30	30	0.250	0.750	0.433	
M 45	45	0.500	0.500	0.500	
M 60	60	0.750	0.250	0.433	
M 75	75	0.933	0.067	0.250	
M 90	90	1	0	0	

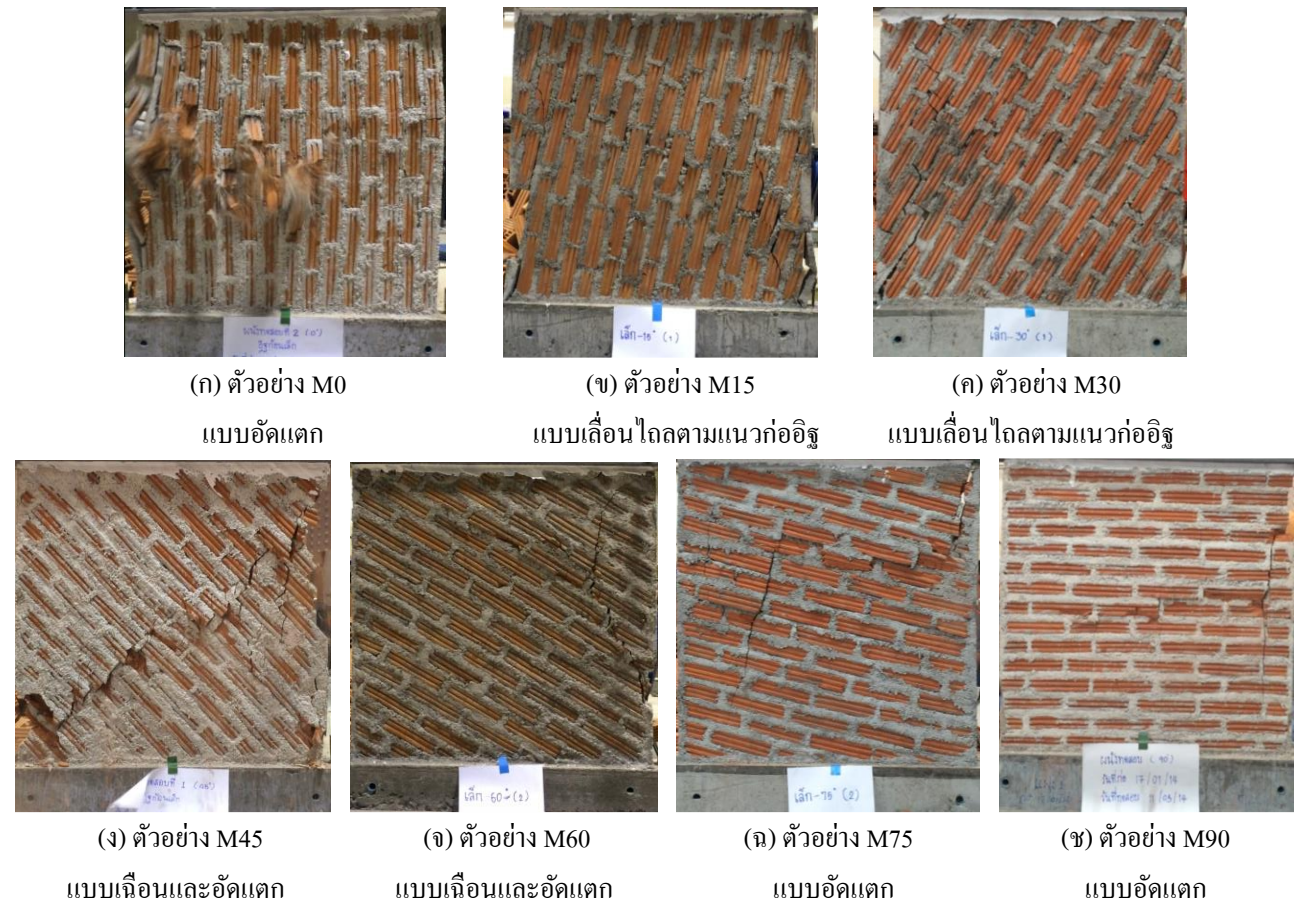
3. ผลการทดสอบ

3.1 ลักษณะการวิบัติ

จากการสังเกตลักษณะการวิบัติจะแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ แบบที่ 1 การวิบัติแบบอัดแตก โดยก้อนอิฐจะถูกอัดแตก หรือ มีการแตกร้าวแยกในแนวตั้งฉากกับทิศทางการให้แรงอัด (splitting crack) แบบที่ 2 การวิบัติแบบเลื่อนไถลตามแนวการก่ออิฐ โดยเกิดรอยแตกร้าวในแนวขนานกับแนวก่ออิฐและเกิดการไถล แบบที่ 3 การวิบัติแบบเฉือน ซึ่งจะเกิดรอยแตกร้าวในแนวทแยงผ่าก้อนอิฐ รูปที่ 4 แสดงลักษณะการวิบัติของแต่ละตัวอย่าง ผนังก่ออิฐ M0 จะเกิดการอัดแตกที่ก้อนอิฐ (รูปที่ 4(ก)) ผนังก่ออิฐ M15 และ M30 จะเกิดการรอยแตกร้าวตามแนวการก่ออิฐและเลื่อนไถลตามแนวการก่ออิฐ (รูปที่ 4(ข) และ 4(ค)) สำหรับผนังก่ออิฐ M45 จะเกิดรอยแตกร้าวทแยงผ่าก้อนอิฐ แต่จุดที่กำลังอัดลดลงเกิดจากการอัดแตกของก้อนอิฐ (รูปที่ 4(ง)) ผนังก่ออิฐ M60 และ M75 ผนังก่ออิฐ จะเกิดรอยแตกร้าวในแนวทแยงผ่าก้อนอิฐและเกิดการการแตกร้าวแยกในแนวตั้งฉากกับการแนวการก่ออิฐ (รูปที่ 4(จ) และรูปที่ 4(ฉ)) การวิบัติของผนังก่ออิฐ M90 จะเกิดการวิบัติแบบอัดแตกของก้อนอิฐและเกิดรอยแตกร้าวแยก (รูปที่ 4(ซ))

3.2 กำลังอัดของผนังก่ออิฐ

จากการทดสอบกำลังอัดของผนังก่ออิฐ และกำลังอัดของปริซึมอิฐก่อ ได้ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 2 เมื่อพิจารณา กำลังอัดของปริซึมอิฐก่อ จะเห็นได้ว่าปริซึมอิฐก่อมีกำลังอัดเฉลี่ย 5.76 MPa เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของมุมระหว่างทิศทางของแรงอัดและแนวการก่ออิฐ พบว่า กำลังอัดของตัวอย่างผนังก่ออิฐ M0 (ทิศทางของแรงอัดทำมุม 0 องศา กับแนวการก่ออิฐ) ให้ค่ากำลังอัดมากที่สุด 1.35 เท่าของกำลังอัดปริซึมอิฐก่อ ($f_m'' = 1.35 f_m'$) ในขณะที่กำลังอัดของตัวอย่าง M90 มีค่าใกล้เคียงกับกำลังอัดของปริซึมอิฐก่อ คือ $f_m'' = 0.93 f_m'$ ตัวอย่างผนังก่ออิฐ M30 จะมีค่ากำลังอัดน้อยสุด คือ $f_m'' = 0.31 f_m'$ ซึ่งเป็นตัวอย่างทดสอบที่แปลงชุดความเค้นแล้วมีแรงเฉือนมาก แต่มีแรงอัดตั้งฉากกับแนวการก่ออิฐน้อย จึงทำให้เกิดการเลื่อนไถลตามแนวการก่ออิฐที่กำลังอัดต่ำ



รูปที่ 4 ลักษณะการวิบัติของผนังท่อน้ำ

ตารางที่ 2 กำลังอัดของตัวอย่างผนังท่อน้ำ

ตัวอย่าง*	กำลังอัดปริซึม f'_m (MPa)	กำลังอัดผนังท่อน้ำ f''_m (MPa)	$\sigma_c = \frac{f''_m}{f'_m}$
M0	5.85	7.91	1.35
M15	6.60	4.71	0.71
M30	6.40	1.96	0.31
M45	6.01	3.41	0.57
M60	5.37	2.81	0.52
M75	4.70	4.02	0.86
M90	5.43	5.04	0.93

*ตัวเลข แทน มุมองศาระหว่างทิศทางการให้แรงอัดและแนวการท่อน้ำ

4. เกณฑ์การวิบัติของผนังก่ออิฐ

งานวิจัยในอดีตมีการเสนอเกณฑ์การวิบัติของผนังก่ออิฐ โดยใช้ความเค้นอัดในทิศทางตั้งฉากและขนานกับแนวการก่ออิฐ และความเค้นเฉือน [11] โดยใช้สมการโพลีโนเมียลอันดับ 2 ซึ่งเป็นสมการอย่างง่าย ตามสมการ (3)

$$F_1\sigma_x + F_2\sigma_y + F_3\sigma_x^2 + F_4\sigma_y^2 + F_5\tau^2 + 2F_6\sigma_x\sigma_y - 1 = 0 \quad (3)$$

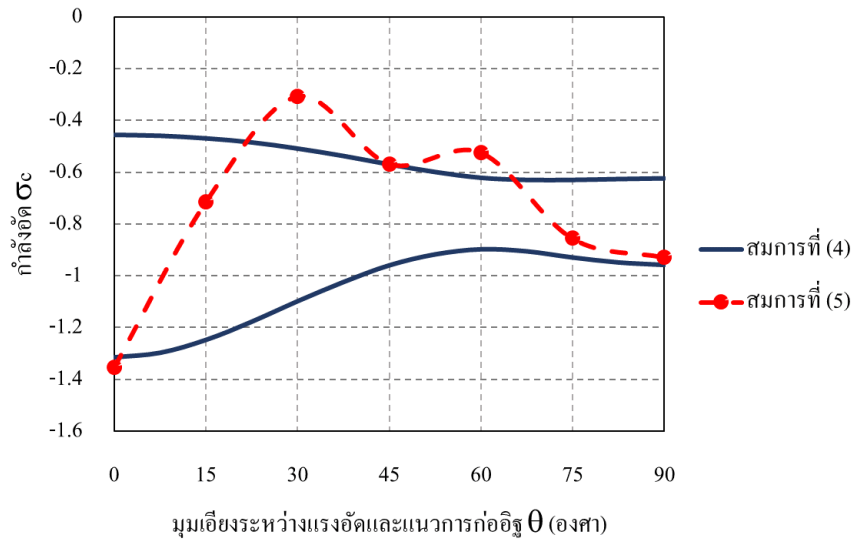
โดยที่ σ_x และ σ_y คือ ค่าความเค้นในแกน x และ y ซึ่งจะแทนด้วยค่าลบถ้าเป็นความเค้นอัด และ τ คือความเค้นเฉือน และชุดแฟกเตอร์ F ที่เหมาะสมกับผลการทดสอบ ในการศึกษานี้ ค่ากำลังอัดที่ได้จะเป็นค่าที่อยู่ในทิศทางทำมุมกับแนวกับการก่ออิฐ ซึ่งสามารถแปลงเป็นความเค้นในทิศทางตั้งฉาก (แกน y) และในทิศทางขนาน (แกน x) กับแนวการก่ออิฐตามสมการ (2) เมื่อนำค่าความเค้นที่แปลงแล้วแทนในสมการที่ (3) จะจัดรูปสมการได้ดังสมการที่ (4) ซึ่งอยู่ในรูปของกำลังอัดในทิศทางทำมุมกับแนวการก่ออิฐ σ_c และค่าโคไซน์ของมุม

$$F_1\sigma_c + F_2\sigma_c^2 + F_3\sigma_c \cos(2\theta) + F_4(\sigma_c \cos(\theta))^2 - 1 = 0 \quad (4)$$

เพื่อหาชุดแฟกเตอร์ F ที่เหมาะสมกับผลการทดสอบ จึงได้ทำการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด (Least-square regression) กับผลการทดสอบ ซึ่งได้ค่าแฟกเตอร์ $F_1 = -2.802$ $F_2 = -1.833$ $F_3 = -0.1562$ $F_4 = 0.1613$ อย่างไรก็ตาม การใช้เกณฑ์การวิบัติตามสมการที่ (4) นั้น ที่ค่ามุม θ ใด ๆ จะได้ค่ากำลังอัด σ_c 2 ค่า ดังแสดงด้วยเส้นทึบ 2 เส้นในรูปที่ 5 จึงทำให้เกิดข้อพิจารณาว่าจะใช้ค่า σ_c ใดเป็นค่ากำลังอัดที่ถูกต้อง เพื่อลดข้อพิจารณา การศึกษานี้จึงเสนอให้หาค่ากำลังอัด σ_c โดยการประมาณค่าในช่วงด้วยพหุนามลากรองจ์ (Lagrange Polynomial) ตามสมการที่ (5) ซึ่งจะได้เส้นโค้งที่ผ่านจุดจากผลการทดสอบทั้งหมด ดังแสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 5

$$\sigma_c = \sum_{i=1}^N \sigma_{ci} \prod_{m \neq i} \frac{\theta - \theta_m}{\theta_i - \theta_m} \quad (5)$$

โดยที่ σ_{ci} คือ ข้อมูลกำลังอัดที่มุม θ_i ซึ่งมีทั้งหมด 7 จุด ตามจำนวนตัวอย่างทดสอบในการศึกษานี้



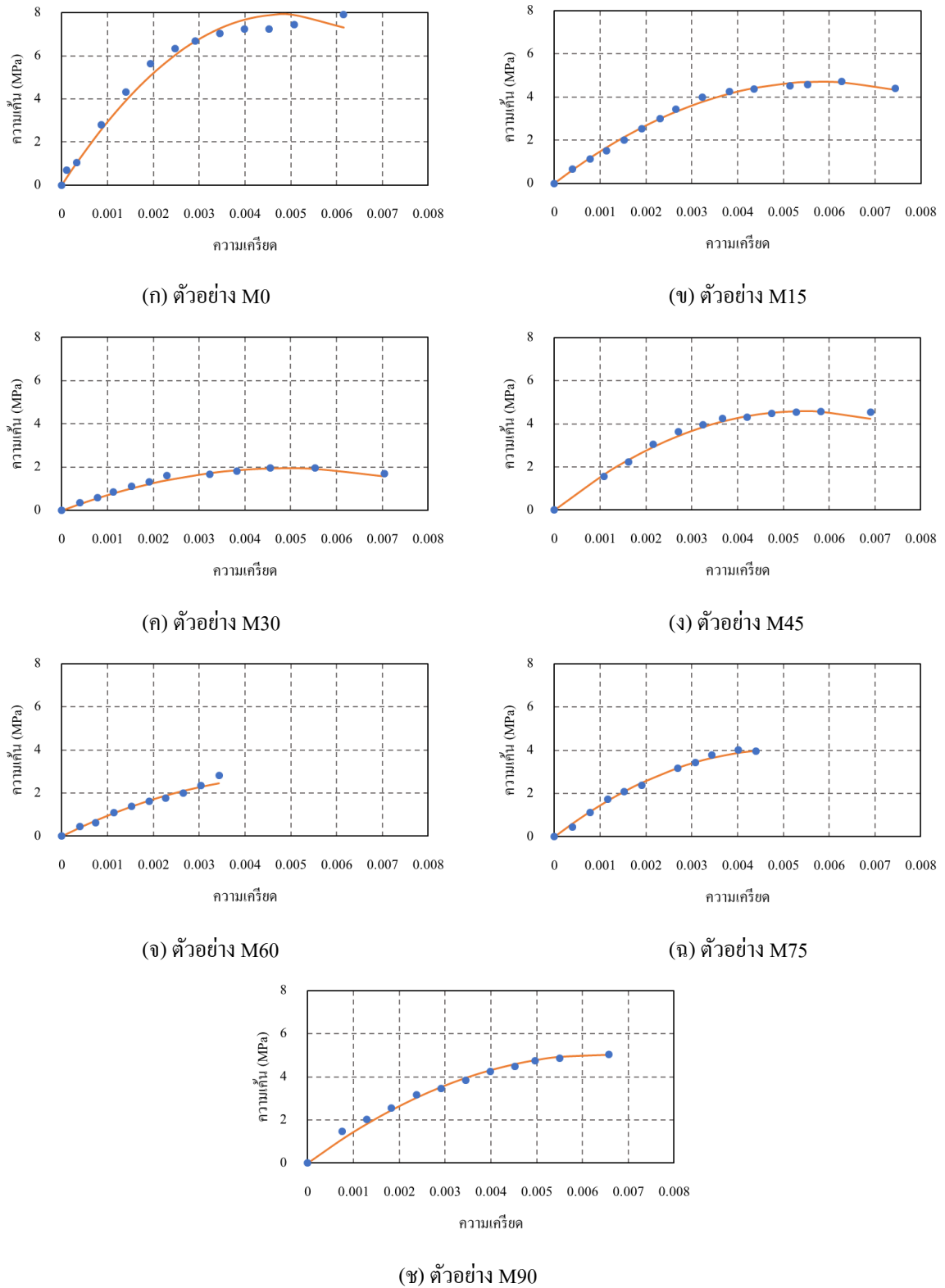
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและมุมแนวแรงกับแนวการก่อกอิฐ

5. ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

ข้อมูลจากการทดสอบที่ได้ทำการบันทึกไว้ คือ แรงอัด และการหดตัวในช่วงความยาวเกจ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณเป็นค่าความเค้น และ ค่าความเครียดได้ โดย ความเค้น (f_m) เท่ากับ แรงอัดต่อพื้นที่หน้าตัดที่รับแรงอัด และ ความเครียด (ε_m) เท่ากับ ระยะหดต่อความยาวเกจ ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ความยาวเกจเท่ากับ 400 มม. เมื่อนำข้อมูลความเค้นและความเครียดมาแสดงผลเป็นจุดบนกราฟ จะได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะมีลักษณะโค้งคว่ำ จากการศึกษาในอดีตพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของผนังอิฐก่อกมีลักษณะเป็นสมการพาราโบลาคว่ำ [7] คล้ายกับความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต เหมือนกับสมการที่ (1) ที่เป็นสมการสำหรับปริซึมอิฐก่อก แต่เปลี่ยนค่าตัวแปรกำลังอัดสูงสุดและความเครียดที่กำลังอัดสูงสุดเป็นของผนังก่อกอิฐ โดยใช้สัญลักษณ์ f_m'' และ ε_m'' ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$f_m = f_m'' \left[\frac{2\varepsilon_m}{\varepsilon_m''} - \left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_m''} \right)^2 \right] \quad (6)$$

เมื่อทำการปรับเส้นโค้งของสมการที่ (6) ด้วยการวิเคราะห์สมการถดถอยแบบกำลังสองน้อยสุด (Least-square regression) เพื่อหาค่า ε_m'' ที่เหมาะสมที่สุด แล้วทำการแสดงเส้นโค้งนั้นเทียบกับผลการทดสอบจะได้เส้นโค้งดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งสอดคล้องกับจุดการทดสอบได้ดี ค่า ε_m'' ที่เหมาะสมที่คำนวณได้ของแต่ละตัวอย่างจะมีค่าประมาณ 0.005-0.006 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0054



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

การหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด จะทำโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความเค้นอัด $0.05f_m''$ และ $0.33f_m''$ [12] เมื่อแทนค่าความเค้นลงในสมการที่ (6) จะคำนวณอัตราส่วน $\varepsilon_m/\varepsilon_m''$ ได้เท่ากับ 0.253 และ 0.1815 ตามลำดับ ดังนั้น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นจึงมีค่า $E_m = 1.793f_m''/\varepsilon_m''$ เมื่อทำการแทนค่า ε_m'' ในช่วง 0.005-0.006 จึงได้ค่า $E_m \approx 300f_m'' - 360f_m''$ หากใช้ความเครียดที่ค่าสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 0.0054 จะได้ค่า $E_m \approx 330f_m''$ ซึ่งเป็นค่าที่น้อยกว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่มีมาตรฐาน มยผ. 1303-57 กำหนดให้ใช้ค่า $E_m \approx 550f_m''$ [4]

การวิจัยนี้เสนอวิธีการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของผนังก่ออิฐ ในกรณีที่ทราบเฉพาะค่ากำลังอัดของปริซึมอิฐก่อ (f_m') เมื่อกำหนดมุมเอียงระหว่างทิศทางความเค้นอัดกับแนวการก่ออิฐแล้ว ให้ใช้สมการที่ (5) เพื่อทำนายกำลังอัด σ_c ซึ่งแปลงเป็นค่ากำลังอัดของผนังก่ออิฐได้ คือ $f_m'' = \sigma_c f_m'$ เนื่องจากค่าความเครียดอัดที่จุดกำลังอัดสูงสุดไม่เปลี่ยนแปลงตามมุมการให้แรงอัดอย่างมีนัยสำคัญ การศึกษานี้จึงเลือกใช้ความเครียดที่จุดกำลังอัดสูงสุดเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบ นั่นคือ $\varepsilon_m'' = 0.0054$ แล้วใช้สมการที่ (6) สร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของผนังก่ออิฐได้ ดังแสดงขั้นตอนการคำนวณ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : ทราบค่ากำลังอัดของปริซึมอิฐก่อ (f_m') สมมติค่า $f_m' = 4$ MPa ทราบค่ามุมระหว่างทิศทางของแรงอัดและแนวการก่ออิฐ สมมติค่า 40 องศา

ขั้นตอนที่ 2 : ใช้สมการที่ (5) เพื่อทำนายกำลังอัด ได้ค่า $\sigma_c = -0.496$ ดังนั้นค่ากำลังอัดของผนังอิฐก่อ $f_m'' = 0.496 \times 4 = 1.98$ MPa

ขั้นตอนที่ 3 : ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

$$f_m = 1.98 \left(2 \frac{\varepsilon_m}{0.0054} + \left(\frac{\varepsilon_m}{0.0054} \right)^2 \right) = 735\varepsilon_m + 68038\varepsilon_m^2 \text{ (MPa)}$$

6. บทสรุป

การศึกษานี้ได้ทำการทดสอบกำลังอัดของผนังก่ออิฐขนาด 760×760 มม.² โดยใช้อิฐก่อประเภทอิฐกลวงก่อแผงไม่รับน้ำหนักขนาด $65 \times 160 \times 40$ มม.³ รับแรงอัดในทิศทางที่ทำมุมกับแนวการก่ออิฐ ผลการทดสอบ พบว่า ลักษณะการวิบัติของผนังก่ออิฐเกิดขึ้นได้ 3 รูปแบบ คือ แบบอัดแตก แบบเลื่อนไถล และแบบเฉือน ค่ากำลังอัดของผนังก่ออิฐขึ้นอยู่กับมุมระหว่างทิศทางของแรงอัดกับแนวการก่ออิฐ โดยตัวอย่างผนังก่ออิฐที่ให้แรงอัดในทิศทางขนานกับแนวการก่ออิฐมีค่ากำลังอัดสูงสุด โดยมีค่าประมาณ 1.35 เท่าของกำลังอัดของปริซึมอิฐก่อ ตัวอย่างผนังก่ออิฐที่ให้แรงอัดตั้งฉากกับแนวการก่ออิฐจะได้ค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับกำลังอัดของปริซึมอิฐก่อ โดยมีค่าประมาณ 0.93 เท่าของกำลังอัดปริซึมอิฐก่อ และตัวอย่างผนังก่ออิฐที่ให้แรงอัดในทิศทางทำมุม 30 องศา กับแนวการก่ออิฐได้ค่ากำลังอัดน้อยสุด โดยมีค่าประมาณ 0.31 เท่าของกำลังอัดของปริซึมอิฐก่อ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของตัวอย่างผนังก่ออิฐจะเป็นเส้นโค้ง ซึ่งสามารถใช้สมการพาราโบลาคว่ำมาปรับเส้นโค้งให้สอดคล้องกับผลการทดสอบได้เป็นอย่างดี โดยค่าความเครียดที่จุดกำลังอัดสูงสุดจะอยู่ในช่วง 0.005-0.006 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0054 ดังนั้น การวิจัยนี้จึงได้เสนอให้ใช้สมการพาราโบลาคว่ำในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของผนังก่ออิฐ โดยใช้ค่ากำลังอัดของปริซึมอิฐก่อและมุมระหว่างทิศทางการให้แรงอัดกับแนวการก่ออิฐ มาทำนายกำลังอัดของผนังก่ออิฐ และให้ค่าความเครียด 0.0054 เป็นค่าความเครียดที่จุดกำลังอัดสูงสุด และนำมาใช้สร้างสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของผนังก่ออิฐได้ นอกจากนี้ ผลการศึกษาในครั้งนี้ บ่งชี้ว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของ

ผนังก่ออิฐจะมีค่าประมาณ 330 เท่าของกำลังอัดของผนังอิฐก่อ ซึ่งเป็นค่าที่น้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน มยผ. 1303-57 ดังนั้นควรมีการพิจารณาทบทวนมาตรฐาน มยผ.1303 เกี่ยวกับการใช้ผนังก่ออิฐเป็นค้ำยันรับแรงอัดในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณกองบริหารงานวิจัยและประกันคุณภาพการศึกษา มหาวิทยาลัยพะเยา ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย และคณะนิสิตและครูปฏิบัติการประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ช่วยให้การทดสอบสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lukkunaprasit, P., Ruangrassamee, A., Boonyatee, T., Chintanapakdee, C., Jankaew, K., Thanasisathit, N. and Chandrangsu, T. Performance of Structures in the Mw 6.1 Mae Lao Earthquake in Thailand on May 5, 2014 and Implications for Future Construction. *Journal of Earthquake Engineering*, 2016, 20(2), pp. 219-242. DOI: 10.1080/13632469.2015.1051636.
- [2] Srechai, J. and Lukkunaprasit, P. An innovative scheme for retrofitting masonry infilled non-ductile reinforced concrete frames. *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 2013, 6(4), pp. 277-289. DOI: 10.1080/19373260.2013.821716
- [3] Promdoug, K. *Cyclic testing of RC frame with masonry infilled wall*. Master Thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 2009.
- [4] DPT. 1303 Committees. *Seismic evaluation and rehabilitation of existing building (DPT. 1303-57)*. Department of Public Works and Town and Country Planning, Ministry of Interior, 2013.
- [5] ASTM C1314. Standard test method for compressive strength of masonry prisms. ASTM international, West Conshohocken, 2014.
- [6] Seangatith, S. *Testing and development of brick masonry structure*. Research report, Suranaree University of Technology, 1998.
- [7] Kaushik, H. B., Rai, D. C. and Jain, S. K. Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 2007, 19(9), pp.728-739. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(728).
- [8] Thai industrial standards institute. TIS 153-1996. *Structural clay non-load-bearing screen tiles*. Bangkok, 1996.
- [9] Naraine, K. and Sinha, S. Behavior of brick masonry under cyclic compressive loading. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1989, 115(6), pp.1432-1445. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:6(1432).
- [10] Naraine, K. and Sinha, S. Stress-strain curves for brick masonry in biaxial compression. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1992, 118(6), pp.1451-1461. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:6(1451).
- [11] Syrmakezis, C.A. and Asteris, P.G. Masonry failure criterion under biaxial stress state. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 2001, 13(1), pp. 58-64. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:1(58)
- [12] Masonry Standards Joint Committee. *Building code requirements for masonry structures (ACI 530-02/ASCE 5-02/TMS 402-02)*. American Concrete Institute, Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers, Masonry Society, 2002.