ดัชนีความเสียหายสำหรับการประเมินความเสียหายผนังอิฐก่อในอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก
Damage Index for Seismic Evaluation of Infill Walls in Reinforced Concrete Frames

วนัชพร งามประเทืองโสภา[1,*] จรัญ ศรีชัย[2] และ สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์[3]

[1,3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย
[2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี, ประเทศไทย
**Corresponding author; E-mail address: vanatchaporn.ngam@kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการกำหนดดัชนีความเสียหายที่เหมาะสม สำหรับการประเมินผนังอิฐก่อในโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (Masonry Infilled RC Frame) เพื่อใช้เป็นเกณฑ์บ่งชี้ระดับความความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นภายใต้แรงแผ่นดินไหว ดัชนีความเสียหายจะคำนวณจากผลการวิเคราะห์และจากแบบจำลองโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กร่วมกับแบบจำลองผนังอิฐก่อ โดยอาศัยสมการของ Park-Ang และทำการปรับแก้ค่าดัชนีให้สอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ข้อมูลที่นำมาใช้ในการศึกษานี้มาจากการรวบรวมผลการทดสอบในอดีต ของโครงสร้างคอนกรีตที่มีผนังอิฐก่อภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักร ในส่วนของการจำลองพฤติกรรมของโครงสร้างผนังอิฐก่อเพื่อการประเมินความเสียหาย จะจำลองเป็นลักษณะค้ำยันเทียบเท่าสองค้ำยันวางตัวเป็นรูปกากบาท โดยที่ค้ำยันแต่ละตัวรับแรงได้เฉพาะแรงอัด จากนั้นนำผลการวิเคราะห์มาประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างผนัง โดยพิจารณาจากค่าการเสียรูปและการสลายพลังงาน และคำนวณเป็นดัชนีความเสียหายให้เหมาะสมกับระดับความเสียหายแต่ละระดับ ดัชนีความเสียหายที่กำหนดขึ้นสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและประเมินสมรรถนะอาคารประเภทคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐได้

คำสำคัญ: ดัชนีความเสียหาย, ผนังอิฐก่อ, แรงแบบวัฏจักร, ค้ำยันเทียบเท่า

Abstract

This research presents the determination of an appropriate earthquake damage index for infilled masonry walls in reinforced concrete frame structures. The index can be used to determine the level of damage to the infill wall under earthquake loading. The damage index can be obtained from structural analysis of the infilled RC frame with appropriate model for the frame and infill elements using Park-Ang formula. The proposed damage index was calibrated with the test results collected from previous studies. The data used in this study were based on cyclic tests of RC frames with masonry wall subjected to monotonic and horizontal cyclic loads. The behavior of the infilled wall was stimulated using as two equivalent compression-only struts. The analysis results including the displacement and energy dissipation were used to assess the damage occurred to the infilled wall. The proposed damage index can be used in the design and performance assessment of reinforced concrete frames with masonry walls.

Keywords: Damage Index, Infill Wall, Cyclic Load, Equivalent Strut

1. บทนำ

แผ่นดินไหวเป็นแรงที่เกิดขึ้นในแนวราบและจะกระจายตัวไปในทุกชั้นของโครงสร้าง จากการเกิดแผ่นดินไหวทำให้มีความเสียหายเกิดขึ้นกับผนังอิฐก่อในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ส่งผลต่อความปลอดภัยของผู้ใช้อาคาร จึงได้มีงานวิจัยจำนวนมาก เกี่ยวกับการประเมินระดับความเสียหายโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว และวิธีปรับปรุงโครงสร้างให้สามารถต้านแผ่นดินไหวได้ เพื่อลดความสูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สินจากภัยพิบัติดังกล่าว ซึ่งพบว่าในพื้นที่ของประเทศไทย มีความเสี่ยงที่จะเกิดแผ่นดินไหวได้ อาคารส่วนมากที่พบว่าได้รับความเสียหาย คือ อาคารขนาดเล็กและขนาดกลาง ได้แก่ บ้านพักอาศัย อาคารพาณิชย์ และอาคารโรงเรียน ซึ่งอาคารเหล่านี้มักนิยมใช้อิฐมาก่อเป็นผนังกั้นห้อง

ผนังอิฐก่อเป็นส่วนหนึ่งของอาคารที่มีความสำคัญต่อพฤติกรรมอาคารภายใต้แรงกระทำจากแผ่นดินไหว อาคารที่มีโครงสร้างอิฐก่อส่วนใหญ่ในประเทศไทยผนังก่อสร้างด้วยอิฐมอญ อิฐบล็อก หรืออิฐบล็อกประสาน และทำหน้าที่รับน้ำหนักจากคาน พื้นหรือหลังคาที่ก่อสร้างด้วยวัสดุประเภทอื่น เช่น ไม้หรือเหล็กรูปพรรณเป็นต้น การพังทลายของอาคารโครงสร้างอิฐก่อส่วนใหญ่เป็นผลเนื่องมาจากการเอนออกจากระนาบ (out of plane) ของผนังอิฐก่อ โดยความเสียหายเริ่มต้นจากผนังเกิดการแตกร้าวในแนวทแยง (diagonal cracks) ซึ่งเป็นผลจากแรงสั่นสะเทือนในช่วงเริ่มต้น และหากการสั่นสะเทือนมีความรุนแรงมากขึ้นจะส่งผลให้รอยแตกร้าวกว้างมากขึ้นจนผนังไม่สามารถคงสภาพอยู่ในระนาบต่อไปได้ ทำให้ผนังส่วนนั้นเกิดการพังถล่ม สามารถกล่าวได้ว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นเกิดจากผนังมีปฏิสัมพันธ์กับโครงอาคารเมื่ออาคารมีการเคลื่อนตัวภายใต้แรงแผ่นดินไหว ระดับความเสียหายในผนังนั้นจะสามารถประเมินจากการวิเคราะห์โครงสร้างได้ หากมีแบบจำลองและเกณฑ์การประเมินที่เหมาะสม

งานวิจัยนี้นำเสนอการกำหนดดัชนีความเสียหายที่เหมาะสม สำหรับการประเมินผนังอิฐก่อในโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (Masonry Infilled RC Frame) เพื่อใช้เป็นเกณฑ์บ่งชี้ระดับความความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นภายใต้แรงแผ่นดินไหว ดัชนีความเสียหายจะคำนวณจากผลการวิเคราะห์และจากแบบจำลองโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กร่วมกับแบบจำลองผนังอิฐก่อ โดยอาศัยสมการของ Park-Ang [1] และทำการปรับแก้ค่าดัชนีให้สอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ดัชนีความเสียหาย (Damage Index) ของ Park-Ang

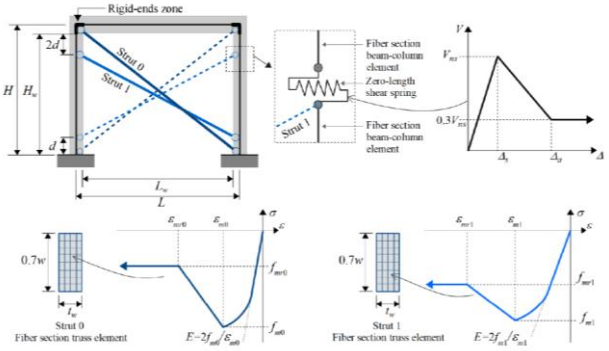
ดัชนีความเสียหายหมายถึง เกณฑ์วัดความเสียหายในเชิงปริมาณตัวเลข กล่าวคือ โครงสร้างที่มีแรงภายนอกมากระทำเช่น แรงแผ่นดินไหว แรงกระทำด้านข้าง จนทำให้เกิดความเสียหาย ซึ่งสามารถประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ด้วยการบอกระดับของความเสียหาย โดยทั่วไปแล้ว ดัชนีความเสียหายจะถูกกำหนดเป็นค่า โดยที่เมื่อมีค่าเป็น 0 หมายถึง 'ไม่มีความเสียหาย' และเมื่อมีค่าเป็น 1 หมายถึง ระดับความเสียหายสูงมากถึงจุดวิบัติ ในการศึกษานี้ได้นำสมการดัชนีความเสียหาย Park-Ang [1] มาใช้ในการประเมินความเสียหายขององค์อาคารผนังอิฐก่อ โดยแสดงอยู่ในรูปของผลรวมความเสียหายที่เกิดจากค่าการโก่งตัวแบบไม่ยืดหยุ่นและความเสียหายเนื่องจากพลังงานที่สลายไปในโครงสร้าง อันเป็นผลมาจากผลตอบสนองกลับไปมา สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$DI = \frac{\delta_M}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y \delta_u} E \qquad (1)$$

โดยที่ δ_M คือ ค่าการเสียรูปที่เกิดขึ้นขององค์อาคารภายใต้แรงสลับทิศ, δ_u คือ ค่าความสามารถในการเสียรูปสูงสุดภายใต้แรงทิศทางเดียวก่อนที่จะเกิดการวิบัติ, β คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับพลังงานที่สะสมโดยมีค่าขึ้นกับประเภทขององค์อาคารที่ทำการวิเคราะห์, Q_y คือ กำลังที่จุดครากขององค์อาคาร และ E คือ พลังงานสะสมภายใต้แรงกระทำสลับทิศ ค่าการเสียรูป δ_M และค่าพลังงานสะสมภายใต้แรงกระทำสลับทิศ E สามารถวิเคราะห์ได้โดยอาศัยแบบจำลองภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่พิจารณา ค่าความสามารถในการเสียรูปสูงสุด δ_u และค่าสัมประสิทธิ์ β จะขึ้นกับประเภทขององค์อาคารที่วิเคราะห์ และจะต้องมีการปรับเทียบกับค่าจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

2.2 แบบจำลองผนังอิฐก่อสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้าง

ค่าการเสียรูปและค่าพลังงานสะสมภายใต้แรงกระทำสลับทิศ ในสมการที่ 1 สามารถหาได้โดยการวิเคราะห์โครงสร้างของอาคารภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่พิจารณา โดยใช้แบบจำลองที่เหมาะสม Srechai และคณะ [2] ได้ทำการเสนอการสร้างแบบจำลองผนังอิฐก่อแบบมหาภาคโดยใช้ค้ำยันคู่ (Multiple-Strut Model) สำหรับผนังอิฐก่อในโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นรูปแบบค้ำยันเทียบเท่ารับกำลังแรงอัดแนวทแยงวางตัวตามรูปที่ 1 เป็นรูปกากบาท ตำแหน่งของค้ำยันชุดแรกอยู่ระหว่างมุมของคานและเสา ค้ำยันอีกชุดด้านบนอยู่ที่เสาที่ระยะ 2d จากท้องคาน ด้านล่างอยู่ที่ระยะเท่ากับ d จากฐานรองรับ แบบจำลองค้ำยันกำหนดให้เป็นองค์ประกอบไฟเบอร์ (Fiber-section truss elements) โดยมีค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็น ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองค้ำยันผนังอิฐก่อ [2]

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในแบบจำลอง จะถูกกำหนดโดยใช้พารามิเตอร์ 4 ตัว ได้แก่ กำลังสูงสุด (peak strength, f_{mi}), ความเครียดสูงสุด (peak strain, ε_{mi}), กำลังคงค้าง (residual strength, f_{mri}) และ ความเครียดคงค้าง (residual strain, ε_{mri}) ซึ่งหาได้จากสมการที่ปรับเทียบมาจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

สำหรับขนาดหน้าตัดของค้ำยันในแบบจำลองกำหนดให้ใช้ความหนาของค้ำยันเท่ากับความหนาจริงของผนังเดิม (t_w) และความกว้างประสิทธิผล (Effective Width) เท่ากับ $0.7a$ โดยที่ a เป็นไปตามข้อกำหนดโดยมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 [3] ดังนี้

$$a = 0.175(\lambda_1 h_{col})^{-0.4} r_{\inf} \qquad (2)$$

โดยที่ h_{col} คือ ความสูงเสาวัดจากโคนเสาไปจุดกึ่งกลางคาน, $r_{\inf}$ คือ ความยาวแนวทแยงของผนังอิฐก่อ และ λ_1 *คือ* สัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการหาความกว้างแนวค้ำยันเทียบเท่าของผนังก่อ เขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\lambda_1 = \left[\frac{E_{me} t_{\inf} \sin(2\theta)}{4 E_{fe} I_{col} h_{\inf}} \right]^{0.25} \qquad (3)$$

โดยที่ E_{fe} คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุโครงข้อแข็ง, E_{me} คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุผนังอิฐก่อ, I_{col} คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดเสา, $h_{\inf}$ คือ ความสูงของผนังอิฐก่อ, $t_{\inf}$ คือ ความหนาของผนังอิฐก่อ และ θ คือมุมระหว่างความสูงและความยาวของอิฐก่อ (radians)

3. การปรับเทียบสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสียหายและการสลายพลังงาน

ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับพลังงานที่สะสม β จะขึ้นกับประเภทขององค์อาคารที่ทำการวิเคราะห์และจะสามารถหาได้จากการปรับเทียบจากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ในการศึกษานี้จะหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมสำหรับใช้กับผนังอิฐก่อ โดยจะนำตัวอย่างผลการทดสอบในงานวิจัยจากที่ต่างๆ ในอดีต และทำการสร้างแบบจำลองตัวอย่างทดสอบโดยการจำลองเป็นลักษณะค้ำยันเทียบเท่าสองค้ำยันดังที่กล่าวไว้ข้างต้น จากนั้นนำผลการวิเคราะห์มาประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างผนัง โดยพิจารณาจากค่าการเสียรูปและการสลายพลังงาน และปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับพลังงานที่สะสม เพื่อให้ได้ค่าที่สอดคล้องกับผลการทดสอบ

3.1 ตัวอย่างในการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกผลทดสอบจากในอดีตจากที่ต่างๆ มาศึกษา โดยตัวอย่างทดสอบในอดีตที่เลือกมาเหล่านี้มีความหลากหลายของการออกแบบ มีทั้งออกแบบมาที่คำนึงและไม่คำนึงถึงเพื่อต้านแรงแผ่นดินไหว ความหลากหลายของระบบโครงสร้างของตัวอย่างทดสอบ โดยจะทำการศึกษาจำนวนทั้งสิ้น 8 ตัวอย่าง มีลักษณะดังนี้ ตัวอย่าง Mehrabi และคณะ [4] เป็นโครงข้อแข็ง และผนังอิฐก่อคอนกรีตบล็อกกลวง ตัวอย่างของ Wararuksajja และคณะ [5] เป็นโครงต้านแรงดัด และผนังอิฐก่อคอนกรีตบล็อกกลวง ตัวอย่างของ Jiang และคณะ [6] เป็นโครงข้อแข็ง ผนังก่ออิฐมวลเบา ตัวอย่างของ Morandi และคณะ [7] เป็นโครงข้อแข็ง ผนังก่ออิฐดินเผากลวง และตัวอย่างของ Huang และคณะ [8] เป็นโครงข้อแข็ง ผนังอิฐดินเผา และคอนกรีตบล็อกกลวงตามลำดับ มีขนาดและรายละเอียดของตัวอย่างแบบจำลองตามรูปที่ 1 แสดงดังตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 รายละเอียดของตัวอย่างแบบจำลอง

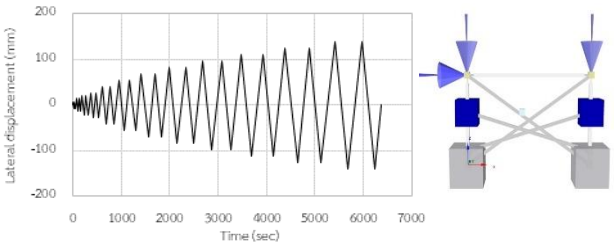
ชื่อตัวอย่าง	H (mm)	L (mm)	d (mm)	0.7w (mm)	t_w (mm)
Mehrabi et al. [4]					
No.4	1537	2312	147	187	92
Wararuksajja et al. [5]					
WS01	2800	4000	250	315	100
WS02	2800	4000	250	331	100
WS03	2800	4000	250	334	100
Jiang et al. [6]					
AFKJ1	2950	5940	350	200	427
Morandi et al. [7]					
TA2	3125	45870	300	350	370
Huang et al. [8]					
IF-1	1375	2250	218	120	200
IF-2	1375	2250	218	180	204

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกลของค้ำยันที่ใช้ในแบบจำลอง

ชื่อตัวอย่าง	กำลังอัดสูงสุด (MPa)	กำลังคงค้าง (MPa)	ความเครียดที่กำลังรับแรงอัด	ความเครียดที่กำลังคงค้าง
Mehrabi et al. [4]				
No.4	5.5	0.19	0.0010	0.006
Wararuksajja et al. [5]				
WS01	9.4	0.20	0.0017	0.005
WS02	7.8	0.20	0.0017	0.005
WS03	6.8	0.20	0.0014	0.0018
Jiang et al. [6]				
AFKJ1	3.8	0.47	0.0016	0.006
Morandi et al. [7]				
TA2	2.9	0.38	0.0011	0.006
Huang et al. [8]				
IF-1	5.4	0.22	0.0020	0.009
IF-2	2.8	0.46	0.0014	0.010

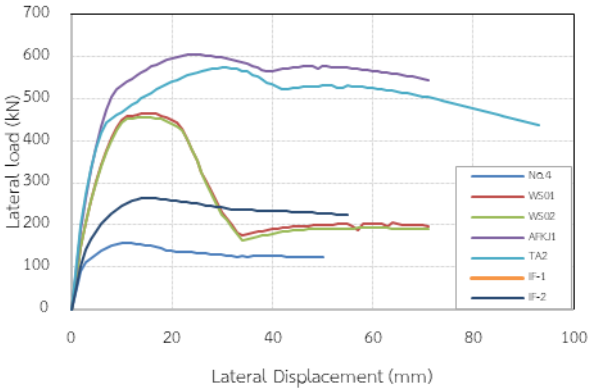
3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างตัวอย่างทดสอบ

ในการศึกษาวิจัยนี้จะจำลองโครงสร้างผนังอิฐตามแบบที่ทดสอบในแต่ละงานวิจัย ด้วยโปรแกรม SeismoStruct [9] โดยทำการจำลองผนังอิฐก่อด้วยค้ำยัน 2 ตัว ที่บริเวณหัวเสาจำลองด้วยการวิบัติของสปริงแรงเฉือน (Shear spring) และกำหนดคุณสมบัติของค้ำยันแต่ละตัวให้เหมาะสมกับพฤติกรรมการวิบัติของผนังก่ออิฐได้ตามผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และ ทำการวิเคราะห์การเสียรูปของตัวอย่าง แบบให้แรงกระทำทิศทางเดียว (Monotonic Loading) และแบบแรงสลับทิศ (Cyclic Loading) โดยการกำหนดค่าการเคลื่อนตัว (Displacement Control) ตามรูปแบบแรงที่ใช้ในการทดสอบแต่ละตัวอย่าง รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างการกำหนดค่าการเคลื่อนตัวในแบบจำลอง หลังจากนั้นจึงนำผลการวิเคราะห์มาคำนวณหาสัมประสิทธิ์และคำนวณหาดัชนีความเสียหาย (Damage Index) ที่เหมาะสมต่อไป

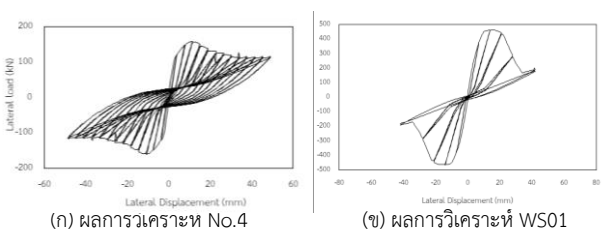


รูปที่ 2 ลักษณะการเคลื่อนตัวของแบบจำลอง

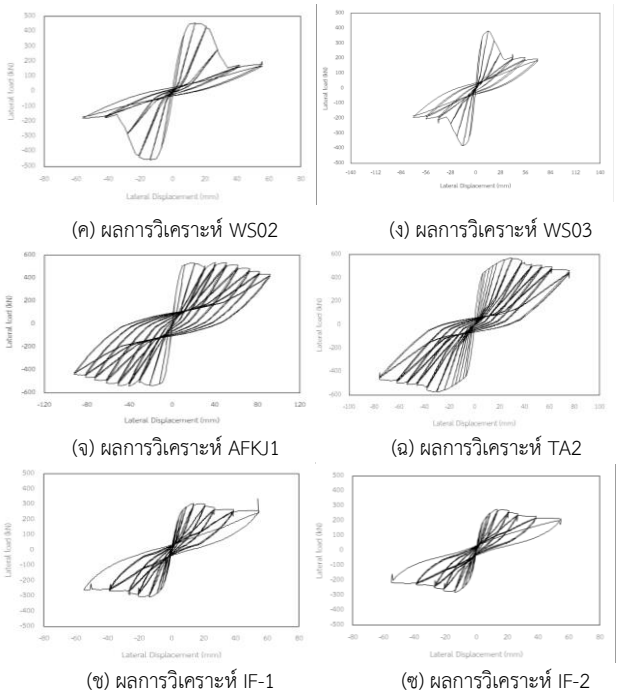
ผลจากการวิเคราะห์พฤติกรรมการเสียรูปของแบบจำลอง ได้ผลดังรูปที่ 3 และ 4 ซึ่งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (Drift) กับแรงที่กระทำด้านข้างของแต่ละตัวอย่างทดสอบ จากรูปเมื่อเพิ่มแรงกระทำด้านข้างอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดสิ้นสุดเกิดการวิบัติของโครงสร้าง จะพบว่าแรงกระทำด้านข้างสูงสุด (Maximum lateral load) จากการวิเคราะห์ได้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ แสดงดังตารางที่ 3



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้าง



(ก) ผลการวเคราะห No.4 (ข) ผลการวิเคราะห์ WS01



(ค) ผลการวิเคราะห์ WS02 (ง) ผลการวิเคราะห์ WS03

(จ) ผลการวิเคราะห์ AFKJ1 (ฉ) ผลการวิเคราะห์ TA2

(ช) ผลการวิเคราะห์ IF-1 (ซ) ผลการวิเคราะห์ IF-2

รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์แบบให้แรงสลับทิศ

3.3 การคำนวณดัชนีความเสียหาย

การคำนวณหาค่าดัชนีความเสียหาย ต้องใช้ตัวแปรที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง โดยค่าตัวแปรต่างๆ จะหาได้ดังนี้

พลังงานสะสมภายใต้แรงกระทำสลับทิศ (E) จะคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปในแนวแกนของค้ำยัน และสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟแรงอัดกับการเสียรูปของค้ำยันทั้ง 4 ตัว ภายใต้แรงแบบสลับทิศ โดยพลังงานที่นำมาไปใช้คำนวณเป็นพลังงานสะสมรวมของผนังอิฐก่อ

ค่ากำลังความเค้นที่จุดคราก (Q_y) จะหาจากกำลังต้านทานแรงด้านข้างของค้ำยันทั้ง 4 ตัว และกำหนดใช้มีค่าที่ร้อยละ 70 ของกำลังแรงรวมสูงสุด

ค่าความสามารถในการเสียรูปสูงสุดภายใต้แรงสลับทิศ (δ_M) จากผลการวิเคราะห์การเสียรูปของโครงสร้างที่มีองค์ประกอบร่วมกับค้ำยันทั้ง 4 ตัว ภายใต้แรงแบบสลับทิศ ณ ที่การเคลื่อนที่สูงสุดของแต่ละรอบวัฏจักร โดยกำหนดให้ค่าที่จะนำไปใช้คำนวณดัชนีความเสียหายเป็นทิศทางบวกเท่านั้น

ค่าความสามารถในการเสียรูปสูงสุดภายใต้แรงทิศทางเดียว (δ_u) จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1.25 เท่าของค่าการเสียรูปที่จุดวิบัติจากผลการทดสอบ โดยที่ค่าการเสียรูปที่จุดวิบัติของโครงสร้างจะกำหนดให้เท่ากับค่าการเสียรูปที่กำลังรับแรงโดยรวมลดลงร้อยละ 25 จากค่ากำลังรับแรงสูงสุด

ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับพลังงานที่สะสม (β) จะหาโดยการปรับค่า ด้วยการทดลองกำหนดค่าสัมประสิทธิ์จาก 0.1 ถึง 0.35 และคำนวณหาค่าดัชนีความเสียหาย ที่ได้ ที่จุดที่เกิดการวิบัติขึ้น ซึ่งจะได้ค่าดัชนีความเสียหายที่มีค่าต่างกันในแต่ละตัวอย่างทดสอบ ค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสม จะหาได้โดยโดยใช้สถิติคำนวณหาค่าเฉลี่ยดัชนีความเสียหายที่ได้จากทั้ง 8 ตัวอย่าง

ตารางที่ 3 แรงและการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดแบบให้แรงสลับทิศ (Cyclic Loading)

ชื่อตัวอย่าง	ผลทดสอบ		แบบจำลอง	
	แรงสูงสุด (kN)	การเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุด (mm)	แรงสูงสุด (kN)	การเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุด (mm)
No.4	162.36	11.94	159.92	10.84
WS01	465.00	14.95	463.70	14.00
WS02	450.00	14.86	456.67	14.00
WS03	410.00	14.00	382.53	14.00
AFKJ1	587.71	40.60	540.08	41.00
TA2	547.00	35.00	574.20	30.97
IF-1	319.00	19.50	305.66	14.00
IF-2	275.92	14.40	278.69	13.50

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบที่สำคัญ

ชื่อตัวอย่าง	Q_y (kN)	δ_M (m)	δ_u (m)
No.4	87.74	0.030	0.0375
WS01	301.63	0.028	0.0344
WS02	299.29	0.028	0.0356
WS03	234.36	0.028	0.0325
AFKJ1	302.24	0.082	0.1056
TA2	326.73	0.062	0.0844
IF-1	139.63	0.039	0.0587
IF-2	114.21	0.039	0.0512

ตารางที่ 5 แสดงค่าหาดัชนีความเสียหายที่คำนวณได้ของแต่ละตัวอย่าง และค่าดัชนีความเสียหายเฉลี่ย ณ จุดที่ตัวอย่างถึงจุดวิบัติ จากการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ค่าต่างๆ จากตารางจะพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสม จะมีค่าเท่ากับ 0.25 โดยจะทำให้สามารถคำนวณค่าเฉลี่ยดัชนีความเสียหายเฉลี่ยเท่ากับ 1.028 ที่จุดวิบัติ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ 1 มากที่สุด

ตารางที่ 5 ดัชนีความเสียหาย (DI) จากการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ (β) ค่าต่างๆ

ชื่อตัวอย่าง	β					
	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35
No.4	0.923	0.979	1.036	1.092	1.149	1.205
WS01	0.918	0.970	1.022	1.073	1.125	1.177
WS02	0.885	0.935	0.984	1.034	1.083	1.133
WS03	0.980	1.039	1.098	1.157	1.216	1.275
AFKJ1	0.863	0.907	0.950	0.993	1.037	1.080
TA2	0.842	0.896	0.949	1.003	1.057	1.110
IF-1	0.750	0.793	0.835	0.878	0.921	0.964
IF-2	0.854	0.900	0.947	0.993	1.040	1.086
ค่าเฉลี่ย	0.877	0.927	0.978	1.028	1.078	1.129
Standard deviation	0.068	0.073	0.078	0.083	0.088	0.093
Avg+SD	0.945	1.000	1.056	1.111	1.167	1.222
Avg-SD	0.809	0.854	0.900	0.945	0.990	1.035

4. การพิจารณาระดับความเสียหาย

หลังจากที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์ β ที่เหมาะสมเท่ากับ 0.25 แล้ว จึงนำไปคำนวณค่าดัชนีความเสียหาย ที่ระดับค่าการเสียรูปต่างๆ จากตัวอย่างทดสอบ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการบ่งชี้ระดับความความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นได้ ผลการคำนวณค่าดัชนีความเสียหาย ของตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยของ Wararuksajja และคณะ [5] 3 ตัวอย่าง ได้แก่ WS01 WS02 และWS03 ได้ค่าดัชนีความเสียหาย ณ จุดที่เกิดความเสียหายต่างๆ ดังแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ดัชนีความเสียหาย ณ แต่ละความเสียหายระดับต่าง ๆ

ลักษณะความเสียหาย	ดัชนีความเสียหาย (DI)		
	WS01	WS02	WS03
Total collapse of infill	1.57	1.52	1.16
Extensive large cracks	1.07	1.03	0.84
Corner crushing	0.77	0.74	0.52
First diagonal crack	0.48	0.47	0.24

จากตารางที่ 6 ลักษณะความเสียหายของผนังอิฐก่อจากงานทดสอบ และดัชนีความเสียหาย สามารถกำหนดเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาระดับความเสียหายเป็น 4 ช่วง แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 เกณฑ์การพิจารณาระดับความเสียหาย

ระดับความเสียหาย	ลักษณะทางกายภาพ	ดัชนีความเสียหาย
Collapse	Total collapse of infill	> 1.00
Severe	Extensive large cracks	0.80 - 1.00
Moderate	Corner crushing	0.50 - 0.80
Minor	First diagonal crack	0.25 - 0.50

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการกำหนดดัชนีความเสียหายที่เหมาะสมสำหรับการประเมินผนังอิฐก่อในโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยการวิเคราะห์แบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมความเสียหายแบบให้แรงกระทำทิศทางเดียว (Monotonic Loading) และแบบแรงสลับทิศ (Cyclic Loading) และเปรียบเทียบกับผลการทดสอบต่างๆ ในอดีต เพื่อหาพารามิเตอร์และสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณหาดัชนีความเสียหาย (Damage Index) ของผนังอิฐก่อ ผลการศึกษาสามารถสรุปประเด็นสำคัญดังนี้

1. การวิเคราะห์แบบจำลองแบบให้แรงกระทำทิศทางเดียว และแบบแรงสลับทิศ ที่แรงกระทำด้านข้างสูงสุดจากการวิเคราะห์ได้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องไปในทิศทางเดียวกัน และการวิเคราะห์ให้ผลสอดคล้องกับผลการทดสอบ
2. ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับพลังงานที่สะสม (β) ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปคำนวณหาดัชนีความเสียหาย ตามสมการของ Park-Ang สำหรับองค์อาคารผนังอิฐก่อ มีค่าเท่ากับ 0.25
3. เกณฑ์การพิจารณาระดับความเสียหายกำหนดดังนี้ ดัชนีความเสียหายอยู่ระหว่าง 0.25 – 0.50 อยู่ในระดับความเสียหายน้อย ดัชนีความเสียหายมีค่าอยู่ระหว่าง 0.50 – 0.80 อยู่ในเกณฑ์ระดับความเสียหายปานกลาง ดัชนีความเสียหายมีค่าอยู่ระหว่าง 0.80 – 1.00 อยู่ในเกณฑ์ระดับความเสียหายรุนแรง และสุดท้าย ดัชนีความเสียหายมีค่ามากกว่า 1.00 โครงสร้างมีความเสียหายรุนแรงมากจนเกิดการวิบัติ

เอกสารอ้างอิง

[1] Park, Y.J. and Ang, A.H.S. (1985). Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. *Journal of Structural Engineering*, 111(4), pp. 723-732.

[2] Srechai, J., Leelataviwat, S., Wararuksajja, W. and Limkatanyu, S. (2022). Multi-strut and empirical formula-based macro modeling for masonry infilled RC frames. *Engineering Structures*, 266: 114559.

[3] มยผ. 1301/1302. (2561). มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว. กรมโยธาธิการและผังเมือง

[4] Mehrabi, A.B., Shing, P.B., Schuller, M.P. and Noland, J.L. (1996). Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames. *Journal of Structural Engineering*, 122(3), pp. 228-237.

[5] Wararuksajja, W., Srechai, J. and Leelataviwat, S.(2020). Seismic design of RC moment-resisting frames with concrete block infill walls considering local infill-frame interactions. Seismic design of RC moment-resisting frames with concrete block infill walls considering local infill-frame interactions. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18, pp. 6445-6474.

[6] Jiang, H., Liu, X. and Mao, J. (2015). Full-scale experimental study on masonry infilled RC moment-resisting frames under cyclic loads. *Engineering Structures*, 91, pp. 70-84.

[7] Morandi, P., Hak, S. and Magenes, G. (2018). Performance-based interpretation of in-plane cyclic tests on RC frames with strong masonry infills. *Engineering Structure*, 156, pp. 503-521.

[8] Huang, Q., Guo, Z. and Kuang, J.S. (2016). Designing infilled reinforced concrete frames with the 'strong frame-weak infill' principle. *Engineering Structures*, 123, pp.341-353.

[9] SeismoStruct user manual. (2021). *SeismoStruct user manual,* Seismosoft Ltd. Pavia, Italy.