ผลกระทบของแผ่นดินไหวและแรงลมที่มีผลต่ออาคารเตี้ย

EFFECTS OF EARTHQUAKE AND WIND LOADS ON LOW-RISE BUILDINGS

ชินวัฒน์ เรือนคำปา[1] บุญมี ชินนาบุญ[2,*] และ สมชาย ชูชีพสกุล[3]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร
[2]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร
[3]ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: boonme.chi@kmutt.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบแรงด้านข้างจากแรงแผ่นดินไหวและแรงลมที่มีผลต่ออาคารเตี้ย ซึ่งเป็นกลุ่มอาคารที่นิยมก่อสร้างจำนวนมากโดยเฉพาะโครงการบ้านจัดสรร การศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกนำเสนอผลวิเคราะห์อาคารตัวอย่าง 1, 2 และ 3 ชั้น โดยตั้งสมมุติฐานว่าอาคารตั้งอยู่ในพื้นที่แผ่นดินไหวรุนแรง อ.วังชิ้น จ.แพร่ มีค่าอัตราเร่งตอบสนองต่อพื้นดิน 0.2 วินาทีที่ 1.086g เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างแรงเฉือนที่ฐานอาคาร แรงเฉือนต่อตัวโครงสร้างแนวดิ่ง และเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า วิธีสเปกตรัมตอบสนองแบบโหมด และแรงลมตามกฎกระทรวง และมยผ.1311-50 ส่วนที่ 2 วิเคราะห์อาคารตัวอย่าง 2 ชั้น สมมุติฐานว่าอาคารตั้งอยู่ในพื้นที่ 3 บริเวณ การศึกษาพบว่าเมื่อเปรียบเทียบแรงกระทำด้านข้างจากแผ่นดินไหวมีผลกระทบต่อตัวอาคารมากกว่าแรงลมอย่างมีนัยสำคัญ ด้วยวิธีสเปกตรัมตอบสนองแบบโหมด โดยทำการดัดแปลงสเปกตรัมที่เรียกว่า Modified Response Spectrum Analysis (MRSA) ให้ค่าแรงเฉือนที่ฐานอาคารประมาณ 2-3 เท่า เมื่อเทียบกับวิธีแรงสถิตเทียบเท่า แรงเฉือนในชิ้นส่วนแนวดิ่งเมื่อวิเคราะห์ร่วมกับแรงกระทำแนวดิ่งพบว่าอาคาร 1 ชั้นและ 2 ชั้น แรงเฉือนจากแผ่นดินไหวด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าและวิธีสเปกตรัมตอบสนองแบบโหมดให้ค่าใกล้เคียงกัน ในส่วนอาคาร 3 ชั้นพบว่าแรงเฉือนในชิ้นส่วนจากวิธีแรงสถิตเทียบเท่าให้ค่ามากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: อาคารเตี้ย,แผ่นดินไหว,แรงลม,วิธีสถิตเทียบเท่า,วิธีสเปกตรัมตอบสนองแบบโหมด

Abstract

This paper aims to study the effects of earthquake and wind loads on low-rise buildings that represent the most popular ones for many constructions, especially housing projects. The study can be divided into 2 parts. The first part presented the analysis results of the one, two, and three-storey sample buildings. The buildings are assumed to be in a high seismic area (Phrae, Thailand) with a ground response acceleration value of 0.2 sec. at 1.086g. The structural behavior, base shear, and shear force of vertical structural members are studied and compared by using the equivalent static analysis, modal response spectrum analysis, wind load from Building Control Act, B.E. 2522, and wind load by DPT 1311-50 standard. The second part was an analysis of the two-storey buildings by assuming that the buildings are in three different areas. The study found that the lateral forces from earthquakes significantly affect the building more than the wind forces. The Modified Response Spectrum Analysis (MRSA) provides the base shears about 2-3 times comparing to those obtained from the equivalent static force. The shear forces in the vertical members for one- and two-storey buildings obtained from the equivalent static force and MRSA are close to each other. However, for the three-storey building, the shear forces in the vertical members from the equivalent static method were explicitly higher than those calculated from MRSA.

Keywords: low-rise buildings, earthquake, wind, Equivalent static, Modal response spectrum analysis

1. บทนำ

ปัจจุบันอาคารบ้านพักอาศัยที่มีลักษณะเป็นอาคารเตี้ยที่มีจำนวนชั้นตั้งแต่ 1 ถึง 3 ชั้น เป็นอาคารที่ได้รับความนิยมก่อสร้างโดยเฉพาะโครงการบ้านจัดสรร เป็นผลมาจากประชากรที่เพิ่มมากขึ้นและการย้ายถิ่นฐาน ในอดีตนั้นการออกแบบอาคารบ้านเรือนมักไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบที่อาจเกิดจากแรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหวและผลกระทบเนื่องจากแรงลม ซึ่งเป็นภัยพิบัติที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้า ดังนั้นเมื่ออาคารได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหวอาจก่อเกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน จากเหตุการณ์แผ่นดินไหว อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย [1] เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2557 พบความเสียหายอาคารที่อยู่อาศัย 15,139 หลัง ส่วนใหญ่เป็นบ้านเรือนประชาชน เนื่องจากเป็นกลุ่มอาคารที่มีปริมาณมาก [2]

ลักษณะความเสียหายคือบริเวณโครงสร้างของเสาอาคาร เกิดจากรับแรงเฉือนที่สูงและกำลังรับแรงเฉือนของเสาไม่เพียงพอ ดังนั้นเมื่ออาคารเกิดความเสียหายย่อมส่งผลเป็นวงกว้าง

การประกาศกฎกระทรวง [3] ว่าด้วยกำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคารและพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ.2564 ได้แบ่งเป็น 3 บริเวณได้แก่ บริเวณที่ต้องเฝ้าระวัง บริเวณที่อาจได้รับผลกระทบในระดับปานกลาง และบริเวณอาจได้รับผลกระทบระดับสูง ส่งผลให้บริเวณที่ 3 อาคารที่มีความสูงตั้งแต่ 10 เมตรขึ้นไปและอาคารอยู่อาศัยว่าด้วยการจัดสรรที่ดิน ที่ส่วนมากเป็นลักษณะอาคารเตี้ยจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ตามด้วยประกาศกระทรวงมหาดไทย [4] เรื่องการออกแบบและคำนวณโครงสร้างอาคารเพื่อต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ได้กำหนดวิธีและขั้นตอนการออกแบบและคำนวณแรงแผ่นดินไหว โดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า (Equivalent Static Analysis) รวมถึงการกำหนดโครงสร้างให้มีความเหนียวที่เหมาะสมโดยไม่เกิดการพังทลาย

บทความนี้นำเสนอผลวิเคราะห์แรงด้านข้างจากแรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหวและแรงลมที่มีผลต่ออาคารเตี้ย ในส่วนของแรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหวคำนวณโดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า ตามที่ได้มีการประกาศกระทรวงมหาดไทย และวิธีเชิงพลศาสตร์ด้วยวิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด (Modal Response Spectrum Analysis) ตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ.1301/1302-61 [5] ที่ได้มีการปรับแก้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบคำนวณแรงเฉือนที่ฐานเรียกว่า Modified Response Spectrum Analysis (MRSA) [5,8] การคำนวณแรงลมเป็นไปตามกฎกระทรวง ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2527) [6] และมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ.1311-50 [7] โดยศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้าง เปรียบเทียบผลวิเคราะห์แรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear) แรงเฉือนที่ใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนแนวดิ่งโดยคำนึงถึงแรงด้านข้างร่วมด้วยในบริเวณพื้นที่อาจจะได้รับผลกระทบระดับสูงเมื่อมีแรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหว อ.วังชิ้น จ.แพร่ มีค่าอัตราเร่งตอบสนองต่อพื้นดิน 0.2 วินาทีที่ 1.086g และ1.0 วินาทีที่ 0.275g ในส่วนที่สองสมมุติฐานเมื่ออาคารตัวอย่างตั้งอยู่ในพื้นที่ทั้ง 3 บริเวณตามประกาศของกฎกระทรวง ได้แก่ จ.สงขลา จ.ภูเก็ต และ จ.แพร่ เพื่อแสดงผลกระทบแรงด้านข้างที่มีผลต่ออาคารเตี้ยในแต่ละบริเวณ จึงเป็นที่มาของบทความวิจัยนี้

2. วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย

2.1 วัตถุประสงค์งานวิจัย

บทความนี้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารเตี้ยด้วยการวิเคราะห์ผลของแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวและแรงลม ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า [4] วิธีเชิงพลศาสตร์ด้วยวิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด [5] การคำนวณแรงลมตามกฎกระทรวง ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2527) [6] และวิธีการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร มยผ.1311-50 [7] โดยทำการศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แรงเฉือนที่ฐาน รวมทั้งแรงที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนเนื่องจากแรงกระทำด้านข้าง เพื่อแสดงถึงอิทธิผลของแรงด้านข้างที่มีผลต่ออาคารเตี้ย

2.2 ขอบเขตงานวิจัย

การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารเตี้ยโดยอ้างอิงมาจากแบบบ้านกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย จำนวน 3 ตัวอย่าง ได้แก่ บ้านต้านทานแผ่นดินไหว 1 ชั้น บ้านต้านทานแผ่นดินไหว 2 ชั้น และตึกแถวอนุรักษ์ ภาคกลาง 3 ชั้น ด้วยวิธีระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านซอฟต์แวร์ ETABS [9] ส่วนแรกมีสมมุติฐานว่าอาคารตั้งอยู่ อ.วังชิ้น จ.แพร่ เป็นบริเวณที่ 3 ตามกฎกระทรวง [3] เป็นพื้นที่ที่มีความเป็นไปได้ว่าอาคารอาจได้รับผลกระทบทางด้านความมั่นคงแข็งแรงและเสถียรภาพในระดับสูงเมื่อมีแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ส่วนที่ 2 ทำการเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ฐานของตัวอาคาร 2 ชั้น เมื่ออาคารตั้งอยู่ อ.เมือง จ.สงขลา,อ.เมือง จ.ภูเก็ต และ อ.วังชิ้น จ.แพร่ ซึ่งเป็นพื้นที่บริเวณที่ 1 บริเวณที่ 2 และบริเวณที่ 3 ตามกฎกระทรวง [3] โดยลักษณะบริเวณรอบอาคารที่ตั้งมีลักษณะภูมิประเทศแบบโล่ง โดยสร้างแบบจำลองแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic Model)

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว

3.1.1 วิธีแรงสถิตเทียบเท่า

วิธีแรงสถิตเทียบเท่า [4] วิธีนี้เริ่มจากการคำนวณหาแรงสถิตเทียบเท่าในรูปของแรงเฉือนที่ฐานของอาคาร (Seismic Base Shear,) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การตอบสนองของแผ่นดินไหว ( ) และน้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผลของอาคาร ( ) โดยหาได้จากสมการ

(1)

ค่าสัมประสิทธิ์ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหว ( ) คำนวณจาก

(2)

โดยที่ คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร

คือ ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง

คือ ตัวประกอบความสำคัญของอาคาร

หาก ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่า 0.01 ให้ใช้ค่า 0.01

คาบการสั่นพื้นฐาน (หน่วยเป็นวินาที) สามารถคำนวณจากสูตรการประมาณค่า ดังนี้

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (3)

อาคารโครงสร้างเหล็ก (4)

โดยที่ คือ ความสูงจากอาคารวัดจากพื้นดิน (เมตร)

การกระจายแรงเฉือนที่ฐานเป็นแรงกระทำด้านข้างต่ออาคารในชั้นต่างๆ ให้คำนวณจาก

= (5)

และ

$$= \frac{}{\sum_{=1}} \quad (6)$$

โดยที่ คือ ตัวประกอบกระจายในแนวดิ่ง

และ คือ น้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผลของชั้น และ ตามลำดับ

และ คือ ความสูงที่ระดับ และ ตามลำดับ

คือ ค่าสัมประสิทธิ์กำหนดรูปแบบการกระจายแรง ซึ่งมีค่าดังนี้

$=1.0$ เมื่อ $\leq$ วินาที

$=1+\frac{-0.5}{2}$ เมื่อ วินาที

$=2.0$ เมื่อ ≥ 2.5 วินาที

3.1.2 วิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด

การออกแบบด้วยวิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด (Modal Response Spectrum Analysis) [5] จะต้องทำการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อคำนวณค่าคาบการสั่นและรูปร่างโหมดธรรมชาติของการสั่นไหวของโครงสร้าง สำหรับการออกแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์วิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด จะต้องเป็นสเปกตรัมสำหรับอัตราส่วนความหน่วงสอดคล้องกับอัตราส่วนความหน่วงของอาคารที่กำลังออกแบบนั้น โดยจำนวนโหมดที่พิจารณาจะต้องเพียงพอที่จะทำให้ผลรวมของน้ำหนักประสิทธิผลเชิงโหมด (Effective Modal Weight, or Modal Weight Participation) ของทุกโหมดมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 90 ของน้ำหนักประสิทธิผลทั้งหมดของอาคาร

ในที่นี้หากคำนวณแรงเฉือนรวมที่ฐาน (Total Base Shear) ซึ่งรวมผลจากหลายโหมดด้วยวิธีรากที่สองของผลรวมของค่ากำลังสอง (Square Root of Sum of Squares, SRSS) หรือวิธีการรวมแบบสมบูรณ์ของค่ากำลังสอง (Complete Quadratic Combination, CQC) โดยทุกโหมดถูกคูณด้วย

– จะได้ค่าแรงเฉือนที่ฐานจากการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ (Total Base Shear,) สำหรับใช้ใน

3.2.2 มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร มยผ.1311-50

การคำนวณแรงลมสถิตเทียบเท่าโดยวิธีอย่างง่าย [7] เป็นวิธีที่ง่ายและเป็นที่ใช้อย่างแพร่หลาย โดยวิธีการอย่างง่ายใช้กับโครงสร้าง ระบบโครงสร้างหลักต้านแรงลม (Main Wind-Force Resistant System) ของอาคารเตี้ยและอาคารสูงปานกลางที่มีความสูงไม่เกิน 80 เมตร และมีความสูงไม่เกิน 3 เท่าของความกว้างประสิทธิผลที่น้อยที่สุด โดยหน่วยแรงลมที่กระทำบนผิวภายนอกของอาคารในทิศทางลม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (10)

(10)

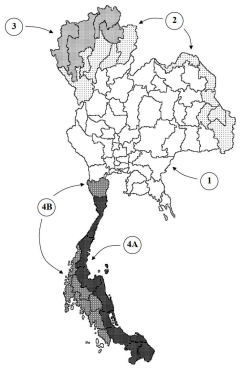
โดยที่ คือ หน่วยแรงลมสถิตเทียบเท่า (Equivalent Static Wind Pressure) กระทำตั้งฉากกับพื้นผิวนอก
คือ ค่าประกอบความสำคัญของแรงลม
คือ หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม
คือ ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ
คือ ค่าประกอบเนื่องจากผลกระโชกของลม
คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของหน่วยแรงลมที่กระทำภายนอกอาคาร

สำหรับค่าพารามิเตอร์ หน่วยแรงลมอ้างอิงเนื่องจากความเร็วลม สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (11)

(11)

โดยที่ ที่คำนวณได้มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (แรง) ต่อตารางเมตร
คือ ความหนาแน่นของมวลอากาศ
คือ ความเร็วลมอ้างอิง มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที
คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ 9.806 ม/วินาที^{2}

ความเร็วลมอ้างอิง คือ ค่าความเร็วเฉลี่ยใน 1 ชั่วโมง ที่ความสูง 10 เมตรจากพื้นดิน ในสภาพภูมิประเทศโล่ง (Open exposure) สำหรับคาบเวลากลับ (Return period) 50 ปี ($_{50}$) หน่วยเป็นเมตรต่อวินาที คำนวณจากสมการที่ (12) และ (13) ความเร็วลมอ้างอิงของพื้นที่ต่างๆในประเทศไทย แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนที่การแบ่งกลุ่มความเร็วลมอ้างอิง ( ) [7]

สำหรับการออกแบบที่สภาวะจำกัดด้านการใช้งาน

(12)

สำหรับการออกแบบที่สภาวะจำกัดด้านกำลัง

(13)

การจำแนกและการแบ่งกลุ่มความเร็วลมโดยกลุ่มความเร็วลมอ้างอิงมีจำนวน 5 กลุ่มดังแสดงในรูปที่ 1 ได้แก่

กลุ่มที่ 1 $_{50}$ = 25 เมตร ต่อ วินาที : =1.0
กลุ่มที่ 2 $_{50}$ = 27 เมตร ต่อ วินาที : =1.0
กลุ่มที่ 3 $_{50}$ = 29 เมตร ต่อ วินาที : =1.0
กลุ่มที่ 4A $_{50}$ = 25 เมตร ต่อ วินาที : =1.2
กลุ่มที่ 4B $_{50}$ = 25 เมตร ต่อ วินาที : =1.08

สำหรับค่าพารามิเตอร์ ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ สามารถใช้ค่าในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าประกอบเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ ( )

ความสูงจากพื้น	สภาพภูมิประเทศ แบบ A	สภาพภูมิประเทศ แบบ B
สูงไม่เกิน 6 เมตร	0.90	0.70
สูงเกิน 6 เมตร แต่ไม่เกิน 10 เมตร	1.00	0.70
สูงเกิน 10 เมตร แต่ไม่เกิน 20 เมตร	1.15	0.82
สูงเกิน 20 เมตร แต่ไม่เกิน 30 เมตร	1.25	0.92
สูงเกิน 30 เมตร แต่ไม่เกิน 40 เมตร	1.32	1.00
สูงเกิน 40 เมตร แต่ไม่เกิน 60 เมตร	1.43	1.13
สูงเกิน 60 เมตร แต่ไม่เกิน 80 เมตร	1.52	1.24

3.2.3 การรวมผลของแรงด้านข้างกับน้ำหนักบรรทุกแนวดิ่ง

องค์อาคารทุกส่วนในโครงสร้างจะต้องได้รับการออกแบบให้สามารถต้านทานแรงในแนวแกน แรงเฉือน แรงดัดที่เกิดกับองค์อาคารนั้นๆ เมื่อโครงสร้างถูกกระทำด้วยแรงด้านข้างร่วมกับน้ำหนักบรรทุกแนวดิ่ง สำหรับแรงกระทำจากแรงแผ่นดินไหวให้รวมผลของแรงสำหรับออกแบบโดยวิธีตัวคูณต้านทานและน้ำหนักบรรทุก [4] ดังสมการที่ (14) – (15) ในกรณีคำนึงกำลังส่วนเกินของโครงสร้างให้ใช้วิธีรวมผลของแรง ดังสมการที่ (16) – (17)

(14)

(15)

(16)

(17)

สำหรับส่วนอาคารที่คิดแรงลมด้วย ให้ใช้น้ำหนักบรรทุกประลัย ตามประกาศกฎกระทรวง ฉบับที่6 (พ.ศ. 2527) [6] ดังสมการที่ (18) - (19)

(18)

(19)

โดยที่ คือ ผลที่เกิดจากแผ่นดินไหวตามที่คำนวณ
คือ ผลที่เกิดจากน้ำหนักคงที่
คือ ผลที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกจร
คือ ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน
คือ ผลที่เกิดจากแรงลม

4. วิธีการวิเคราะห์อาคารตัวอย่าง

4.1 แบบจำลองอาคาร

อาคารตัวอย่างเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 3 ตัวอย่าง ได้แก่ บ้านต้านทานแผ่นดินไหว 1 ชั้น บ้านต้านทานแผ่นดินไหว 2 ชั้น และตึกแถวอนุรักษ์ ภาคกลาง 3 ชั้น มีความสูง 5.6 เมตร, 9.65 เมตรและ 14 เมตร ตามลำดับ จำลองแบบ 3 มิติโดยใช้วิธีระเบียบไฟไนท์เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2



ก.) แบบจำลองอาคาร 1 ชั้น



ข.) แบบจำลองอาคาร 2 ชั้น



ค.) แบบจำลองอาคาร 3 ชั้น

รูปที่ 2 แบบจำลองโครงสร้างอาคารด้วยโปรแกรม ETABS [9]

โครงสร้างอาคารตัวอย่างใช้ระบบคาน – เสา (Beam – Column Frame) คอนกรีตเสริมเหล็ก คอนกรีตมีกำลังอัดประลัย 240 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เหล็กเส้นกลมรับแรงดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า 2,400 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเหล็กข้ออ้อยรับแรงดึงที่จุดครากไม่น้อยกว่า 4,000 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ใช้พื้นหล่อในที่ความหนาที่ 10 เซนติเมตร น้ำหนักบรรทุกคงที่เพิ่มเติมเท่ากับ 150 กิโลกรัมต่อตารางเมตร น้ำหนักบรรทุกจรเท่ากับ 150 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และผนังอิฐมอญน้ำหนัก 180 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ข้อมูลทางโครงสร้างของเสาและคานเป็นไปตาม ตารางที่ 3 และตารางที่ 4 น้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผลของอาคาร แสดงในตารางที่ 5 แบบจำลองอาคารได้คำนึงถึงผลของการแตกร้าวที่มีผลต่อค่าสตีฟเนสขององค์อาคาร [5] โดยลดค่าสตีฟเนสของเสาและคานก่อนเกิดการแตกร้าวที่ 70% และ 35% ตามลำดับ จากค่าโมเมนต์ความเฉื่อย และค่าพื้นที่หน้าตัดประสิทธิผล ก่อนเกิดการแตกร้าวของชิ้นส่วน

ตารางที่ 3 ข้อมูลเสาที่ใช้ในแบบจำลองอาคาร

อาคาร	เสา	ขนาด	เหล็กเสริม	@ เหล็กปลอก	กำลังต้านทานแรงเฉือน (kgf.)
1 ชั้น	C1	0.20x0.20	4-DB16	0.075	4,694
	C1A	0.20x0.20	4-DB16	0.15	3,463
2 ชั้น	C1	0.30x0.30	6-DB16	0.075	8,716
	C1A	0.20x0.20	4-DB16	0.15	3,463
	CX	0.20x0.20	4-DB16	0.15	3,463
3 ชั้น	C1	0.20X0.20	4-DB16	0.20	3,156
	C2	0.30X0.20	8-DB16	0.20	6,119
	C2	0.20X0.20	4-DB16	0.20	3,156
	C3	0.35X0.20	8-DB20	0.20	7,138
	C3	0.20X0.20	4-DB20	0.20	3,156
	C4	0.45X0.25	8-DB20	0.25	9,604
	C4	0.30X0.20	4-DB20	0.20	5,195
	C4	0.25X0.20	4-DB20	0.20	4,945
	C4	0.20X0.20	4-DB20	0.20	3,156
	C5	0.15X0.15	4-DB12	0.15	2,179

ตารางที่ 4 ข้อมูลคานที่ใช้ในแบบจำลองอาคาร

อาคาร	คาน	ขนาด	เหล็กเสริม	@ เหล็กปลอก	ร้อยละของเหล็กเสริมในคาน
1 ชั้น	B1	0.20X.040	4-DB16	0.075	1.01
	B2	0.20X0.40	6-DB16	0.075	1.51
	RB	0.20X0.30	9-DB12	0.075	1.70
2 ชั้น	B1	0.20X0.40	4-DB12	0.15	0.57
	B2	0.20X0.40	4-DB16	0.075	1.01
	B3	0.20X0.40	5-DB16	0.075	1.26
	B4	0.20X0.65	5-DB16	0.125	0.77
	B5	0.20X0.40	5-DB16	0.075	1.26
	RB	0.15X0.40	4-DB12	0.15	0.75
3 ชั้น	B1	0.20X0.40	6-DB16	0.15	1.51
	B2	0.20X0.40	5-DB16	0.15	1.26
	B3	0.20X0.40	4-DB16	0.10	1.01
	B4	0.20X0.40	6-DB16	0.20	1.51
	B5	0.20X0.40	5-DB20	0.10	1.96
	B6	0.20X0.40	6-DB20	0.10	2.36
	B7	0.20X0.50	6-DB20	0.15	1.88
	BR	0.20X0.40	4-DB16	0.15	1.01

ตารางที่ 5 น้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผลของอาคาร

อาคาร	น้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผลของอาคาร (ตัน)
1 ชั้น	148.17
2 ชั้น	188.22
3 ชั้น	755.16

4.2 การวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหว

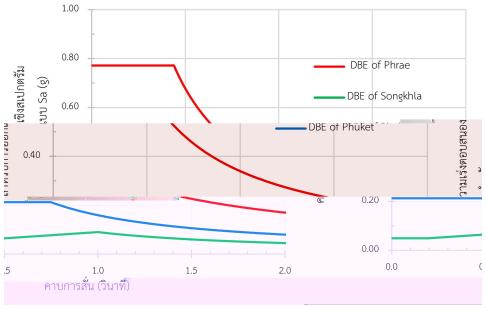
สำหรับงานวิจัยนี้ในการวิเคราะห์โครงสร้างแผ่นดินไหวได้กำหนดชนิดของโครงสร้างเป็นแบบโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวปานกลาง (Intermediate RC Moment-Resisting Frame) ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (Response Modification Factor,) เท่ากับ 5 และตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (System Overstrength Factor,) เท่ากับ 3 ตามประกาศกระทรวงมหาดไทย [4] โดยมีค่าอัตราเร่งตอบสนองต่อพื้นดิน ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม

สถานที่	ค่าความเร่งตอบสนอง (g)	
		1
อ.เมือง จ.สงขลา	0.069	0.073
อ.เมือง จ.ภูเก็ต	0.299	0.129
อ.วังชิ้น จ.แพร่	1.086	0.275

ข้อกำหนดความสูงสำหรับประเภทการออกแบบต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวประเภท ง สำหรับโครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวปานกลางหรือความเหนียวจำกัด สามารถใช้ได้กับอาคารที่มีความสูงไม่เกิน 40 เมตร ทั้งนี้ในการออกแบบด้านกำลัง ให้เพิ่มค่าแรงแผ่นดินไหวในการออกแบบองค์อาคารอีกร้อยละ 40 ในส่วนการคำนวณการเสียรูป ไม่จำเป็นต้องเพิ่มค่าแรงที่ใช้ในการคำนวณ

4.2.1 การวิเคราะห์ด้วยแรงสถิตเทียบเท่า

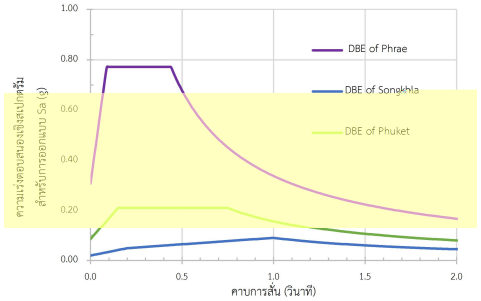


รูปที่ 3 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าโดยใช้ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการคำนวณแรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า [4] สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ค่าความรุนแรงแผ่นดินไหวเท่ากับแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (Design Basis Earthquake, DBE) มีความรุนแรงเป็น 2 ใน 3 ของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณาในการออกแบบ (Maximum Considered Earthquake, MCE) [5] สามารถสร้างกราฟความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบได้ ดังรูปที่ 3

4.2.1 วิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีพลศาสตร์โดยวิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด (Model Response Spectrum Analysis) [5] ใช้ค่าความรุนแรงแผ่นดินไหวเท่ากับแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (Design Basis Earthquake, DBE) เช่นเดียวกับวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สามารถสร้างกราฟสเปกตรัมสำหรับการออกแบบได้ใน ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์

จำนวนโหมดที่นำมาพิจารณาต้องมีผลรวมน้ำหนักเชิงประสิทธิผลเชิงโหมด (Modal Weight Participation) ไม่น้อยกว่า 90% ของน้ำหนักประสิทธิผลทั้งหมดของอาคารในแต่ละทิศทาง สำหรับอาคาร 1 ชั้น แสดงในตารางที่ 7 อาคาร 2 ชั้น แสดงในตารางที่ 8 และอาคาร 3 ชั้น แสดงในตารางที่ 9 โดยใช้วิธีรวมค่าการตอบสนองของทุกโหมดที่พิจารณาด้วยวิธีรากที่สองของผลบวกยกกำลังสอง (Square Root Sum of Square, SRSS) [5]

ตารางที่ 7 คาบการสั่นและอัตราการมีส่วนร่วมของมวล อาคาร 1 ชั้น

โหมด	คาบการสั่น (วินาที)	อัตราการมีส่วนร่วมในทิศทาง X (%)	อัตราการมีส่วนร่วมในทิศทาง Y (%)
1	0.384	19.52	0.86
2	0.334	3.60	29.21
.	.	.	.
7	0.109	52.08	0.42
8	0.105	0.51	63.73
.	.	.	.
20	0.024	0	0
	ผลรวม	99.81%	99.85%

ตารางที่ 8 คาบการสั่นและอัตราการมีส่วนร่วมของมวล อาคาร 2 ชั้น

โหมด	คาบการสั่น (วินาที)	อัตราการมีส่วนร่วมในทิศทาง X (%)	อัตราการมีส่วนร่วมในทิศทาง Y (%)
1	0.634	53.84	1.23
2	0.614	1.92	48.99
3	0.549	0.41	5.85
.	.	.	.
20	0.033	0	0
	ผลรวม	99.95%	99.97%

ตารางที่ 9 คาบการสั่นและอัตราการมีส่วนร่วมของมวล อาคาร 3 ชั้น

โหมด	คาบการสั่น (วินาที)	อัตราการมีส่วนร่วมในทิศทาง X (%)	อัตราการมีส่วนร่วมในทิศทาง Y (%)
1	1.402	61.09	0
2	1.282	0	63.96
3	1.163	4.93	0
.	.	.	.
30	0.067	0	0
ผลรวม		100%	100%

สำหรับความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ใช้ในการออกแบบในชิ้นส่วนแนวดิ่งต้องทำการดัดแปลงสเปกตรัมตอบสนองเรียกว่า MRSA [5,8] โดยการปรับแก้ความเร่งตอบสนองสำหรับการออกแบบในคาบการสั่นที่มีน้ำหนักเชิงประสิทธิผลเชิงโหมดสูงสุดในแต่ละทิศทาง ด้วยการคูณค่า $\frac{\Omega}{\quad}$ เข้าไปในคาบการสั่นนั้นๆ สามารถสร้างกราฟสเปกตรัมสำหรับการออกแบบได้ดังแสดงรูปที่ 5

รูปที่ 5 ตัวอย่างความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมดัดแปลงสำหรับออกแบบด้วยวิธีสเปกตรัมตอบสนองแบบโหมด MRSA

4.3 การวิเคราะห์แรงลม

จากการวิเคราะห์แรงลมขนาดของแรงลมที่กระทำต่ออาคารจากข้อกำหนดตามกฎกระทรวง ฉบับที่6 (พ.ศ.2527) และมาตรฐานของ มยผ. 1311-50 โดยมีสมมุติฐานว่าอาคารตั้งอยู่ในบริเวณที่โล่ง พบว่าแรงลมตามมาตรฐาน มยผ.1311-50 มีขนาดแรงลมที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับแรงลมตามกฎกระทรวง ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2527) ดังแสดงในรูปที่ 7

รูปที่ 6 แรงลมตามกฎกระทรวงและมาตรฐาน มยผ.1311-50 อ.วังชิ้น จ.แพร่ ภูมิประเทศแบบโล่ง

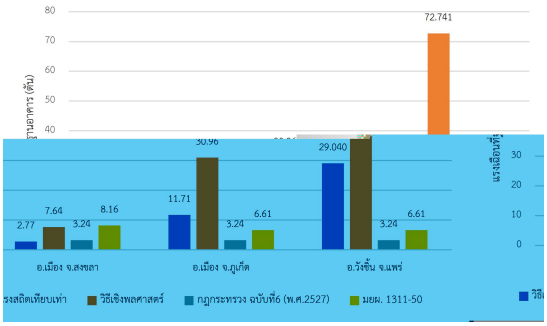
5. ผลการวิจัย

5.1 แรงเฉือนที่ฐานอาคาร

แรงเฉือนที่ฐานอาคารโดยที่ตั้งอาคารอยู่ในพื้นที่ อ.วังชิ้น จ.แพร่ ซึ่งเป็นพื้นที่ความเข้มข้นแผ่นดินไหวรุนแรง ดังแสดงในตารางที่ 10 พบว่าวิธีเชิงพลศาสตร์ด้วยวิธีสเปกตรัมตอบสนองต่อโหมดให้ค่าแรงเฉือนที่ฐานมากที่สุดทั้งแกน X และ Y ซึ่งมีค่ามากกว่าวิธีแรงสถิตเทียบเท่า 2-2.8 เท่า และมากกว่าแรงลมอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 10 แรงเฉือนที่ฐานอาคาร ที่ตั้งอาคาร อ.วังชิ้น จ.แพร่

อาคาร	ทิศทาง	แรงแผ่นดินไหว (tonf)		แรงลม (tonf)	
		วิธีแรงสถิตเทียบเท่า	วิธีเชิงพลศาสตร์	กฎกระทรวง	มยผ.
1 ชั้น	X	22.86	59.89	59.84	1.58	2.17
	Y	22.86	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]



รูปที่ 7 แรงเฉือนที่ฐานอาคาร

5.2 แรงเฉือนสูงสุดที่กระทำต่อชิ้นส่วนโครงสร้าง

การวิเคราะห์เพื่อหาแรงที่เกิดขึ้นสูงสุดกับชิ้นส่วนอาคาร เพื่อนำไปออกแบบองค์อาคารนั้นๆ ให้พิจารณาแรงกระทำแนวดิ่งร่วมกับแรงกระทำด้านข้าง ที่เกิดขึ้นร่วมกันและนำไปออกแบบองค์อาคารนั้นๆ

จากการวิเคราะห์แรงเฉือนต่อชิ้นส่วนเสาซึ่งเป็นชิ้นส่วนอาคารแนวดิ่ง ดังแสดงในตารางที่ 11 แสดงให้เห็นถึงแรงเฉือนในชิ้นเสามีปัจจัยหลักมาจากแรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหวมากกว่าแรงลม การวิเคราะห์ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าเมื่อรวมผลของแรงพบว่าให้ค่าแรงเฉือนในชิ้นส่วนเสาที่มากกว่าวิธีเชิงพลศาสตร์ด้วยวิธีสเปกตรัมตอบสนองแบบโหมด ยกเว้นอาคารตัวอย่าง 1 ชั้น ในทิศทาง X มีค่าแรงเฉือนในชิ้นส่วนจากวิธีแรงสถิตเทียบเท่าและวิธีเชิงพลศาสตร์ เท่ากับ 6,460 kgf. และ 8,192 kgf. ตามลำดับ เนื่องมากจากการรวมแรงในชิ้นส่วนเสาจากวิธีเชิงพลศาสตร์ ที่ได้มีการดัดแปลงความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ที่เรียกว่า MRSA [3,8] ถือว่าได้คูณตัวประกอบกำลังส่วนเกินแล้วจึงไม่ต้องคูณตัวประกอบกำลังส่วนเกินซ้ำอีก แต่วิธีแรงสถิตเทียบเท่าให้คูณด้วย Ω_0 สำหรับผลของแรงที่คำนึงถึงกำลังส่วนเกินของโครงสร้าง เมื่อรวมผลแรงอาจทำให้การรวมวิธีวิธีเชิงพลศาสตร์มีค่าแรงเฉือนในชิ้นส่วนเสามีค่าน้อยกว่า

ตารางที่ 11 แรงเฉือนสูงสุดที่ต้องต้านทานของชิ้นส่วนเสา

อาคาร	ทิศทาง	แรงแผ่นดินไหว (kgf)		แรงลม (kgf)	
		วิธีแรงสถิตเทียบเท่า	วิธีเชิงพลศาสตร์	กฎกระทรวง	มยผ.
1 ชั้น	X	6,460	8,192	542	595
	Y	7,789	7,357	753	810
2 ชั้น	X	16,201	13,972	2,074	2,122
	Y	11,673	11,497	2,023	2,172
3 ชั้น	X	53,045	32,293	2,334	2,580
	Y	37,448	33,498	2,857	4,266

บทความนี้ได้ตรวจสอบความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือน จากการตรวจสอบอัตราส่วนของแรงเฉือนสูงสุดที่ต้องต้านทานเมื่อพิจารณาแรงด้านข้างร่วมกับแนวดิ่งและกำลังต้านทานแรงเฉือนของชิ้นส่วนของเสา Demand to Capacity Ratio (D/C) ดังแสดงในตารางที่ 12 พบว่าเมื่อพิจารณาแรงกระทำจากแผ่นดินไหวในพื้นที่ อ.วังชิ้น จ.แพร่ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีความรุนแรงของแผ่นดินไหว ชิ้นส่วนของเสามีความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือน และเมื่อพิจารณาแรงลมพบว่าชิ้นส่วนเสาไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือน

ตารางที่ 12 อัตราส่วนแรงเฉือนสูงสุดที่ต้องต้านทานและกำลังต้านทานของเสา

อาคาร	ทิศทาง	แรงแผ่นดินไหว		แรงลม	
		วิธีแรงสถิตเทียบเท่า	วิธีเชิงพลศาสตร์	กฎกระทรวง	มยผ.
1 ชั้น	X	1.38	1.75	0.12	0.13
	Y	1.66	1.57	0.16	0.17
2 ชั้น	X	1.86	1.60	0.24	0.24
	Y	1.34	1.32	0.23	0.25
3 ชั้น	X	5.52	3.36	0.24	0.27
	Y	3.90	3.49	0.30	0.44

6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิเคราะห์ผลกระทบแผ่นดินไหวและแรงลมที่มีผลต่ออาคารเตี้ยด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า [4] วิธีเชิงพลศาสตร์ด้วยวิธีสเปกตรัมตอบสนองแบบโหมด [5] แรงลมตามประกาศกฎกระทรวง ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2527) [6] และวิธีการคำนวณแรงลม มยผ.1311-50 [7] โดยส่วนการศึกษาที่ 1 สมมุติฐานว่าอาคารตั้งอยู่ในพื้นที่แผ่นดินไหวรุนแรง อ.วังชิ้น จ.แพร่ จำนวน 3 ตัวอย่าง ได้แก่ บ้านต้านทานแผ่นดินไหว 1 ชั้น,บ้านต้านทานแผ่นดินไหว 2 ชั้น และตึกแถวอนุรักษ์ ภาคกลาง 3 ชั้น และส่วนที่สอง สมมุติฐานอาคารตัวอย่าง 2 ชั้น ตั้งอยู่ในพื้นที่บริเวณที่ต้องเฝ้าระวัง บริเวณที่อาจได้รับผลกระทบในระดับปานกลาง และบริเวณอาจได้รับผลกระทบระดับสูง สามารถสรุปได้ดังนี้

6.1 สรุปผลการวิจัย

1.) แรงเฉือนที่ฐานอาคาร (Base Shear) เมื่ออาคารตั้งอยู่ในบริเวณที่อาจได้รับผลกระทบแผ่นดินไหวระดับสูง เมื่อวิเคราะห์วิธีเชิงพลศาสตร์ด้วยวิธีสเปกตรัมตอบสนองแบบโหมด MRSA มีค่าแรงเฉือนที่ฐานเป็น 2 – 2.8 เท่าเมื่อเทียบกับวิธีแรงสถิตเทียบเท่า และเมื่อเทียบกับแรงลมมีค่ามากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าแรงเฉือนที่ฐานถูกนำมาคูณด้วย ——— เฉพาะโหมดที่มีอัตราการมีส่วนร่วมของมวลมากที่สุด (Modal Participating Mass Ratio) เพียงโหมดเดียวซึ่งต่างจากวิธีแรงสถิตเทียบเท่าที่ค่าแรงเฉือนที่ฐานคูณด้วย —

2.) แรงเฉือนที่ฐานอาคาร (Base Shear) เมื่ออาคารตั้งอยู่ในพื้นที่ต้องเฝ้าระวัง บริเวณที่อาจได้รับผลกระทบในระดับปานกลาง และบริเวณที่อาจได้รับผลกระทบระดับสูง ในบริเวณที่ต้องเฝ้าระวัง อาคารได้รับผลกระทบจากแรงแผ่นดินไหวและแรงลมมีค่าแรงเฉือนที่ฐานอาคารใกล้เคียงกัน ในส่วนของบริเวณที่อาจได้รับผลกระทบในระดับปานกลาง และบริเวณที่อาจได้รับผลกระทบระดับสูงเห็นได้ชัดว่าแรงกระทำแผ่นดินไหวมีผลต่ออาคารเตี้ยอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับแรงลม

3.) การวิเคราะห์แรงเฉือนสูงสุดที่ใช้ในการออกแบบ พิจารณาแรงกระทำแนวดิ่งร่วมกับแรงกระทำด้านข้าง ในบริเวณที่อาจได้รับผลกระทบแผ่นดินไหวระดับสูง พบว่าวิธีแรงสถิตเทียบเท่ามีแนวโน้มให้แรงเฉือนที่ใช้ในการออกแบบมากกว่าวิธีเชิงพลศาสตร์ด้วยวิธีสเปกตรัมตอบสนองต่อโหมด MRSA วิธีแรงลมตามกฎกระทรวง และ มยผ.1311-50 เนื่องจากวิธี MRSA ได้ทำการคูณตัวประกอบกำลังส่วนเกินเข้าไปแล้ว ซึ่งถือว่าได้คูณตัวประกอบส่วนเกินแล้วจึงไม่ต้องคูณตัวประกอบส่วนเกินซ้ำอีกในการรวมแรง ต่างจากวิธีแรงสถิตเทียบเท่าที่ต้องทำการคูณตัวประกอบส่วนเกินเข้าไปในการรวมแรงที่ใช้ในการออกแบบ ในส่วนของแรงลมค่าที่ใช้ในการออกแบบที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแรงกระทำแผ่นดินไหว เนื่องมาจากรูปร่างอาคารตัวอย่างมีลักษณะเป็นอาคารเตี้ย ส่งผลให้พื้นผิวที่แรงลมกระทำต่อโครงสร้างมีค่อนข้างน้อย ต่างจากแรงแผ่นดินไหวที่ลักษณะของแรงที่เกิดจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผลของอาคาร

4.) กำลังต้านทานแรงเฉือนของอาคารตัวอย่าง 1 ชั้น, 2 ชั้น และ 3 ชั้น โดยอ้างอิงแบบจากกรมโยธาธิการและผังเมือง พบว่ากำลังต้านทานของเสาไม่เพียงพอต่อแรงเฉือนสูงสุดที่ต้องต้านทาน D/C เมื่ออาคารตั้งอยู่ในพื้นที่แผ่นดินไหวระดับสูง ส่งผลให้เกิดความเสียหายที่เสาเมื่อพิจารณาแรงแผ่นดินไหว ในส่วนของแรงลมนั้นพบว่ากำลังต้านทานของเสามีความเพียงพอต่อแรงเฉือนสูงสุดที่ต้องต้านทาน

6.2 ข้อเสนอแนะ

1.) การออกแบบอาคารเตี้ยในพื้นที่บริเวณอาจได้รับผลกระทบระดับสูงจากแรงแผ่นดินไหวควรคำนึงถึงผลกระทบต่อแรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่ออาคารร่วมด้วย เนื่องจากแรงเฉือนจากแผ่นดินไหวมีค่าค่อนข้างมาก เมื่อเกิดแผ่นดินไหวอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างได้ จึงไม่ควรละเลยการออกแบบให้มีกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวให้เพียงพอ

2.) งานวิจัยนี้วิเคราะห์ผลของแรงลมที่มีผลต่อโครงสร้างหลัก ซึ่งไม่รวมถึงผลกระทบของแรงลมที่มีผลต่อชิ้นส่วนของโครงสร้างรอง (Secondary Structural Members) ดังนั้นในการวิเคราะห์ทั้งหมดขององค์อาคารควรพิจารณาร่วมด้วย เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ใช้อาคาร

3.) ตัวอย่างอาคารในงานวิจัยนี้เป็นเพียงอาคารหนึ่งรูปแบบไม่สามารถใช้เป็นคำตอบได้ทุกอาคาร และพื้นที่ตัวอย่างในงานวิจัยนี้เป็นเพียงการยกตัวอย่างพื้นที่บริเวณเท่านั้น ไม่สามารถใช้เป็นคำตอบได้ทุกพื้นที่

4.) งานวิจัยนี้เลือกใช้ระบบต้านทานแรงด้านข้าง ชนิดโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวปานกลาง ซึ่งจะต้องเพิ่มแรงแผ่นดินไหวในการออกแบบอีกร้อยละ 40 ในบริเวณ ง ที่มีความเข้มงวดของการออกแบบแผ่นดินไหว ซึ่งเป็นข้อจำกัดในแต่ละพื้นที่และระบบโครงสร้าง ดังนั้นการเลือกใช้ระบบต้านทานอื่น ๆ ควรศึกษาระบบต้านทานแรงด้านข้างเพิ่มเติมเพื่อให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในแต่ละพื้นที่

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปเป็นอย่างดี ต้องขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผ.ศ.ดร.บุญมี ชินนาบุญ ที่คอยให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่างๆอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัยฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตินิยมวิทยา (2014). รายงานการเกิดแผ่นดินไหวบริเวณจังหวัดเชียงราย วันที่ 5 พฤษภาคม 2557 *เอกสารทางวิชาการ เลขที่ 550.341-01-2557*, http://www.seismology.tmd.go.th/documents/file/seismo-doc-1404703458.pdf

[2] ชยานนท์ หรรษภิญโญ (2557). ถอดบทเรียนแผ่นดินไหว จ.เชียงราย 5 พฤษภาคม 2557 เพื่อการเตรียมพร้อมรับมือแผ่นดินไหวในอนาคต *การประชุมสัมมนาเรื่องบทเรียนแผ่นดินไหวแม่ลาว เชียงราย ภัยพิบัติใกล้ตัว,* 20 พฤศจิกายน 2557, หน้า 145-155

[3] *กฎกระทรวงกำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคารและพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2564* เล่ม 138 ตอนที่ 16 ก ราชกิจจานุเบกษา 4 มีนาคม 2564

[4] ประกาศกระทรวงมหาดไทย *เรื่องการออกแบบและคำนวณโครงสร้างอาคารเพื่อต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2564* เล่ม 138 ตอนพิเศษ 275 ง ราชกิจจานุเบกษา 9 พฤศจิกายน 2564

[5] มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ.1301/1302-61 ปี 2561 *กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย*, กรุงเทพ, ประเทศไทย

[6] กฎกระทรวง ฉบับที่ 6 พ.ศ. 2527 *ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522* เล่มที่101 ฉบับพิเศษ ตอนที่143 ราชกิจจานุเบกษา 11 ตุลาคม 2527

[7] มาตรฐานการคำนวณแรงลมและการตอบสนองของอาคาร มยผ. 1311-50 ปี 2550, *กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย*, กรุงเทพ, ประเทศไทย

[8] Kimleng Khy,Chatpan Chintanapakdee,Pennung Warnitchai and Anil C. Wijeyewickrema, *Modified response spectrum analysis to compute shear force in tall RC shear wall buildings*, Engineering Structures Vol.180, 2019, Page 295–309, DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.11.022

[9] Computers and Structures Inc. (2021). *Integrated Building Design Software*, User's guide ETABS version 20, USA.