

การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารตึกข้างด้านทานแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 SEISMIC ANALYSIS FOR THE ELEPHANT TOWER PER DPT1301/1302-61

นิติกร แสงสว่าง^{1*}, อาทิตย์ เพชรศศิธร², สุวัฒน์ ธีรเศรษฐ์³ และ ณีฎฐภัทร วงศ์ภักดี⁴

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร

³ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร

⁴ วิศวกรโครงสร้าง, บริษัท อินฟรา กรุ๊ป จำกัด, กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author address: nitikorn.kmitl@gmail.com

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการแข่งขันในอุตสาหกรรมการก่อสร้างและความต้องการเชิงสถาปัตยกรรมสูงขึ้นส่งผลให้รูปร่างของโครงสร้างอาคารมีความไม่สมมาตรและไม่สม่ำเสมอในรูปแบบต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น ความไม่สม่ำเสมอเชิงการบิด ความไม่สม่ำเสมอแนวระนาบ หรือความไม่สม่ำเสมอแนวตั้ง บทความนี้นำเสนอผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างตึกข้าง (Elephant Tower) ซึ่งเป็นอาคารที่ได้รับรางวัลดีกรีฟ้าที่มีเอกลักษณ์อันดับที่ 4 ใน 20 ของโลกในปี 2011 และเป็นอาคารที่มีรูปทรงโครงสร้างไม่สม่ำเสมอดังกล่าว มาตรฐานการออกแบบอาคารด้านทานการสั่นสะเทือนของแรงแผ่นดินไหว มยผ.1301/1302-61 ได้กำหนดวิธีการออกแบบโครงสร้างอาคารในลักษณะดังกล่าว โดยตั้งสมมติฐานว่าอาคารตั้งอยู่บริเวณพื้นที่แผ่นดินไหวรุนแรง อ.เมือง จ.เชียงใหม่ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้าง ผลตอบสนองของอาคารและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า วิธีสเปกตรัมตอบสนองแบบโหมดและวิธีวิเคราะห์การตอบสนองเชิงเส้นแบบประวัติเวลาตามมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61

คำสำคัญ: วิธีแรงสถิตเทียบเท่า, วิธีสเปกตรัมตอบสนองแบบโหมด, วิธีวิเคราะห์การตอบสนองเชิงเส้นแบบประวัติเวลา, มยผ.1301/1302-61

Abstract

Nowadays, industrial and architectural demand increase that affect the complexity of shape and irregularity of the structures such as torsional irregularity, horizontal irregularity and vertical irregularity. This research presents the analytical results of the Elephant Tower which the building was ranked number four of the 20 World's Iconic Skyscraper by CNNGO in 2011. Design standard, DPT1301/1302-61 defines the seismic design methods for asymmetry and irregularity of structures. The elephant tower is assumed to be located in high seismic area, Chiang Mai, Thailand. Structural behavior and seismic responses of the building are investigated including equivalent static analysis, modal response spectrum analysis and linear time history analysis according to DPT 1301/1302-61.

Keywords: Equivalent static, Modal response spectrum analysis, Linear time history analysis, DPT1301/1302-61

1. บทนำ

ปัจจุบันการแข่งขันในอุตสาหกรรมการก่อสร้างและความต้องการในเชิงสถาปัตยกรรมค่อนข้างสูง ส่งผลให้รูปทรงของอาคารมีความซับซ้อนและไม่สม่ำเสมอทางโครงสร้างทั้งแนวตั้ง แนวราบ และความไม่สม่ำเสมอเชิงการบิด กรมโยธาธิการและผังเมืองได้กำหนดมาตรฐานการออกแบบอาคารด้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ.1302-52 [1] และ มยผ.1301/1302-61 [2] สำหรับอาคารดังกล่าว มีสมมติฐานการออกแบบโครงสร้างอาคารที่มีความเหนียวและสามารถสลายพลังงานจากการสั่นสะเทือนเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวในระดับที่เหมาะสมโดยไม่เกิดการพังทลาย

มยผ.1301-1302-52 [1] ได้กำหนดวิธีคำนวณแรงแผ่นดินไหวไว้ 2 วิธี ได้แก่ วิธีแรงสถิตเทียบเท่า (Equivalent Static Analysis)

และวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Analysis) และปรับปรุงเป็นมาตรฐานฉบับใหม่ มยผ.1301/1302-61 [2] เพื่อปรับปรุงรายละเอียดให้ทันสมัยและสอดคล้องกับมาตรฐานสากล เช่น ปรับแก้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบวิธีการคำนวณหาแรงเฉือนที่ฐาน MRSA [2,5] และชุดข้อมูลการสั่นไหวของพื้นที่ที่เหมาะสมแก่การวิเคราะห์โครงสร้าง เป็นต้น

วิธีแรงสถิตเทียบเท่าเป็นวิธีคำนวณแรงแผ่นดินไหวอย่างง่ายซึ่งไม่เหมาะสมกับลักษณะของโครงสร้างอาคารที่ไม่สม่ำเสมอในลักษณะต่างๆ ซึ่งก่อให้เกิดการกระจายตัวของแรงกระทำด้านข้างและแรงบิดของอาคารไม่คงที่ การออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์มีความเหมาะสมมากกว่าเนื่องจากพิจารณาผลกระทบดังกล่าว โดยวิธีเชิงพลศาสตร์สามารถจำแนกได้ 3 วิธี ได้แก่ วิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด วิธีวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างเชิง

เส้นแบบประวัติเวลาและวิธีวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างไม่เชิงเส้นแบบประวัติเวลา

บทความนี้นำเสนอผลวิเคราะห์โครงสร้างอาคารตัวอย่างที่มีความไม่สม่ำเสมอทั้งแนวดิ่งและแนวราบ อาคารตัวอย่างดังกล่าวเป็นอาคารที่ได้รับรางวัลตีกระฟ้าที่มีเอกลักษณ์ของโลกอันดับที่ 4 ใน 20 ของโลก [3] โดยศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างและเปรียบเทียบผลวิเคราะห์แรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear) การเคลื่อนตัวของโครงสร้างในแต่ละชั้น (Floor Displacement) และการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story Drift) เป็นสำคัญ

2. วัตถุประสงค์และขอบเขตงานวิจัย

2.1. วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัย

ศึกษาพฤติกรรมและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารตัวอย่างด้วยวิธีการวิเคราะห์ผลของแรงแผ่นดินไหวต่อโครงสร้าง ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า [2] วิธีสเปกตรัมตอบสนองแบบโหมด [2] และวิธีวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างเชิงเส้นแบบประวัติเวลา [1] โดยทำการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แรงเฉือนที่ฐาน การเคลื่อนตัวแต่ละชั้น และการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น

2.2. ขอบเขตของการวิจัย

วิเคราะห์โครงสร้างโดยการสร้างแบบจำลองอาคารตัวอย่างด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ETABS [4] โดยไม่รวมชั้นใต้ดินและผลของการถ่ายแรงต่างข้างของผนังก่อกันในอาคาร มีสมมติฐานว่าอาคารตั้งอยู่บริเวณแผ่นดินไหวรุนแรง อ.เมือง จ.เชียงใหม่ โดยสร้างแบบจำลองแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Elastic Model) และพิจารณาผลกระทบของ P-Delta

3. การออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว

ตามมาตรฐานมยผ.1301/1302-61

3.1. วิธีแรงสถิตเทียบเท่า

วิธีแรงสถิตเทียบเท่า [2] เป็นวิธีการคำนวณแรงแผ่นดินไหวอย่างง่ายเพื่อหาแรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear, V) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การตอบสนองของแผ่นดินไหว (C_s) และน้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผล (W) ดังสมการที่ (1)

$$V = C_s W \quad (1)$$

โดยค่า C_s คำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$C_s = S_a \left(\frac{I}{R} \right) \geq 0.01g \quad (2)$$

โดย S_a คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม

I คือ ค่าตัวประกอบความสำคัญของอาคาร และ

R คือ ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง

การหาค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบที่ศูนย์กลางมวลของชั้นใดๆ (δ_x) หาได้จากสมการที่ (3)

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I} \quad (3)$$

C_d คือ ตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว และ

δ_{xe} คือ ค่าการเคลื่อนตัวในแนวราบที่จุดศูนย์กลางมวลของชั้น x

ค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ (Story Drift, Δ) คือผลต่างระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวราบของชั้นบนและชั้นล่าง

3.2. วิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด

การออกแบบด้วยวิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด [2] (Modal Response Spectrum Analysis, RSA) โดยคำนวณจากคาบการสั่นและรูปร่างโหมดธรรมชาติของการสั่นของโครงสร้างหลายโหมดและใช้สเปกตรัมในการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ และมีค่าอัตราส่วนความหน่วงต้องสอดคล้องกับอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างอาคาร

จำนวนโหมดที่พิจารณาจะต้องเพียงพอที่จะทำให้ผลรวมของน้ำหนักประสิทธิผลเชิงโหมด (Model Mass Participation) มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 90 ของน้ำหนักประสิทธิผลทั้งหมดของอาคารสำหรับแต่ละทิศของแรงแผ่นดินไหวในแนวราบที่ตั้งฉากกัน

การคำนวณแรงเฉือนรวมที่ฐาน (Total Base Shear, V_t) เป็นผลรวมของแรงเฉือนแต่ละโหมดด้วยวิธีรากที่สองของผลรวมของค่ากำลังสองหรือวิธีรวมแบบสัมบูรณ์ของค่ากำลังสอง โดยทุกโหมดถูกคูณด้วย $\frac{I}{R}$ จะได้แรงเฉือนที่ฐาน V_t สำหรับใช้ในการคำนวณตัวคูณปรับค่า (S_F) ตามสมการที่ (4)

$$V_t = \frac{I}{R} \sqrt{V_{b,1e}^2 + V_{b,2e}^2 + V_{b,3e}^2 + \dots} \quad (4)$$

โดย $V_{b,ie}$ คือ แรงเฉือนที่ฐานของโหมด i ของระบบเชิงเส้น

แรงเฉือนที่ฐานรวม (Total Base Shear, V_t) เป็นคำนวณจากการรวมการตอบสนองของโหมดต่างๆตามสมการที่ (4) ที่มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 85 ของค่าแรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear, V) ที่ได้จากวิธีแรงสถิตเทียบเท่า ให้ปรับแก้ค่าแรงภายในที่ใช้ในการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์โดยคูณค่าตัวประกอบปรับค่า (Scaling Factor, S_F) ตามสมการที่ (5)

$$S_F = 0.85 \frac{V}{V_t} \quad (5)$$

ทั้งนี้ไม่ต้องคูณค่าตัวประกอบปรับค่า (S_F) สำหรับการคำนวณการเคลื่อนตัวแต่ละชั้นและการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น การคำนวณค่าแรงเฉือนสำหรับการออกแบบชั้นส่วน

โครงสร้างแนวตั้งรายชิ้นส่วน (Individual Vertical Member) เฉพาะโหนดแรกให้คูณค่าแรงเฉือนสูงสุดของชิ้นส่วนนั้นในระบบเชิงเส้นด้วย $\frac{S_F I \Omega_0}{R}$ โดยที่ Ω_0 คือ ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน [2] และ S_F คือ ตัวคูณปรับค่าตามสมการที่ (5) จะได้ค่าแรงเฉือนต้านทานเพื่อใช้ในการออกแบบกำลังรับแรงเฉือนของชิ้นส่วนโครงสร้างแนวตั้งรายชิ้นส่วนตามสมการที่ (6)

$$V = I \sqrt{\left(\frac{S_F \Omega_0 V_{1e}}{R}\right)^2 + V_{2e}^2 + V_{3e}^2 + \dots} \quad (6)$$

โดย V_{ie} คือ แรงเฉือนในระนาบของโหนด i ของระบบเชิงเส้น

วิธีการคำนวณนี้เรียกว่า Modified Response Spectrum Analysis (MRSA) [2,5] ซึ่งเป็นการปรับวิธีการคำนวณแรงเฉือนที่ใช้ในการออกแบบโดยพิจารณาที่โหนดสูงสุดเป็นแบบยึดหยุ่นเชิงเส้น โดยคำนวณแกน X และแกน Y แต่ละแกนแยกกัน

ทั้งนี้การเคลื่อนตัวในแนวราบที่จุดศูนย์กลางมวล (δ) และการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Δ) จะพิจารณาผลของการเสียรูปแบบอินทิลาสติกสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7) และสมการที่ (8) ตามลำดับ

$$\delta = \frac{C_d}{R} \sqrt{\delta_{1e}^2 + \delta_{2e}^2 + \delta_{3e}^2 + \dots} \quad (7)$$

$$\Delta = \frac{C_d}{R} \sqrt{\Delta_{1e}^2 + \Delta_{2e}^2 + \Delta_{3e}^2 + \dots} \quad (8)$$

โดย δ_{ie} คือ การเคลื่อนตัวของโหนด i ของระบบเชิงเส้น

Δ_{ie} คือ การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของโหนด i ของระบบเชิง

3.3. วิธีวิเคราะห์การตอบสนองเชิงเส้นแบบประวัติเวลา

การวิเคราะห์โครงสร้างเชิงเส้นแบบประวัติเวลา [1] (Linear Time History Analysis, LTHA) เป็นการวิเคราะห์ผลตอบสนองของช่วงเวลาที่เกิดการสั่นไหวของโครงสร้างที่ถูกกระทำด้วยความเร่งของผิวดินที่ฐานของอาคาร โดยการวิเคราะห์ต้องใช้ประวัติเวลาความเร่งของผิวดิน (Ground Motion) ที่เหมาะสมกระทำที่ฐานของอาคารไม่น้อยกว่า 3 ชุด และคลื่นแต่ละชุดจะต้องประกอบด้วยคู่ของความเร่งของผิวดินในแนวราบสองทิศทางที่ตั้งฉากกัน ในกรณีทีวิเคราะห์โดยใช้คลื่นไม่น้อยกว่า 7 ชุด อนุญาตให้ใช้ค่าเฉลี่ยของแรงภายในชิ้นส่วนโครงสร้างและการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นได้ ชุดข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินที่เหมาะสมแก่การวิเคราะห์โครงสร้างตามมาตรฐาน มยพ.1301/1302-61 [2] ได้กำหนดข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบที่คาบการเกิดแผ่นดินไหวที่ 2,475 ปี โดยแบ่งพื้นที่เป็น 3 กลุ่ม ประกอบด้วยพื้นที่แผ่นดินไหวระดับรุนแรง (แพร่) พื้นที่แผ่นดินไหวระดับปานกลาง (ลำปาง) และพื้นที่แผ่นดินไหวระดับต่ำ (กาญจนบุรี) ตั้งอยู่บน

ชั้นดินประเภท D โดยคลื่นแต่ละกลุ่มแสดงค่าสเปกตรัมผลตอบสนองที่คาบการสั่นของอาคารที่ 0.2 วินาที และ 1.0 วินาที ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐานว่าอาคารตั้งอยู่บนพื้นที่แผ่นดินไหวรุนแรงและวิเคราะห์ด้วยชุดข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินที่คาบการสั่นที่ 0.2 วินาทีและ 1.0 วินาที ทั้งหมด 7 ชุด ตามตารางที่ (1)

การหาค่าตัวประกอบปรับค่า (S_F) ให้ใช้ V_t คูณด้วย $\frac{I}{R}$ ทุกโหนดและตรวจสอบค่าแรงเฉือนขั้นต่ำที่กำหนดไว้ในกาออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า $V_{min} = 0.01W$ โดยที่ W คือ น้ำหนักประสิทธิผลของโครงสร้าง ถ้าแรงเฉือนที่ฐาน V_t มีค่าน้อยกว่าแรงเฉือนขั้นต่ำ V_{min} จะต้องปรับค่าแรงเฉือนที่ฐานตามสมการที่ (9)

$$S_F = \frac{V_{min}}{V_t} \quad (9)$$

ค่าแรงเฉือนที่ฐานสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างแนวตั้งรายชิ้นส่วน (Individual Vertical Member) สำหรับโหนดแรกให้คูณค่าแรงเฉือนสูงสุดของชิ้นส่วนนั้นด้วย $\frac{S_F I \Omega_0}{R}$ ตามสมการที่ (10)

$$V(t) = I \left[\frac{S_F \Omega_0 V_{1e}(t)}{R} + V_{2e}(t) + V_{3e}(t) + \dots \right] \quad (10)$$

สำหรับงานวิจัยนี้การวิเคราะห์ด้วยวิธีเชิงเส้นแบบประวัติเวลาใช้คลื่นจาก มยพ.1301/1302-61 [2] ดังแสดงในตารางที่ (1) และคำนวณแรงเฉือนที่ฐานสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างตามมาตรฐาน มยพ.1302-52 [1] ตามสมการที่ (11)

$$V(t) = \frac{I}{R} [V_{1e}(t) + V_{2e}(t) + V_{3e}(t) + \dots] \quad (11)$$

ตารางที่ 1 ชุดข้อมูลการสั่นไหวของพื้นดินที่คาบการสั่น 0.2 วินาที และ 1.0 วินาที [2]

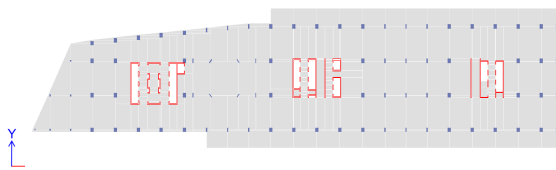
	คลื่นแผ่นดินไหว	สถานี	คาบ(วินาที)
1	RSN161_IMPVALI.H_H-BRA	H-BRA	0.2
2	RSN1107_KOBE_KAK	KAK	0.2
3	RSN821_ERZINCAN_ERZ	ERZ	0.2
4	RSN6_IMPVALI_I-ELC	I-ELC	1.0
5	RSN725_SUPER.B_B-POE	POE	1.0
6	RSN8124_CCHURCH_RHSCN	RHSCN	1.0
7	RSN1082_NORTHRO	RO	1.0

4. อาคารตัวอย่างและผลการวิเคราะห์โครงสร้าง

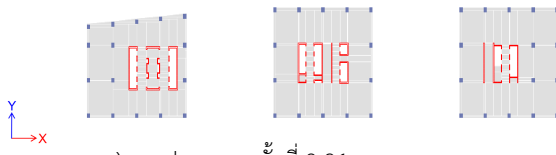
อาคารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง คือ ตึกช้าง (Elephant Tower) โดยลักษณะของอาคารตามรูปที่ 1 และสมมติให้อาคารตั้งอยู่บริเวณแผ่นดินไหวรุนแรง อ.เมือง จ.เชียงใหม่ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 2 โดย

แบบจำลองเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Elastic Model) และพิจารณาผลกระทบของ P-Delta

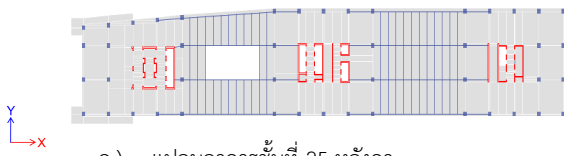
บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์โครงสร้างต้านทานแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า [2] วิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด [2] และวิธีวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างเชิงเส้นแบบประวัติเวลา [1] เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าแรงเฉือนที่ฐาน การเคลื่อนที่ในแต่ละชั้นและการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้น



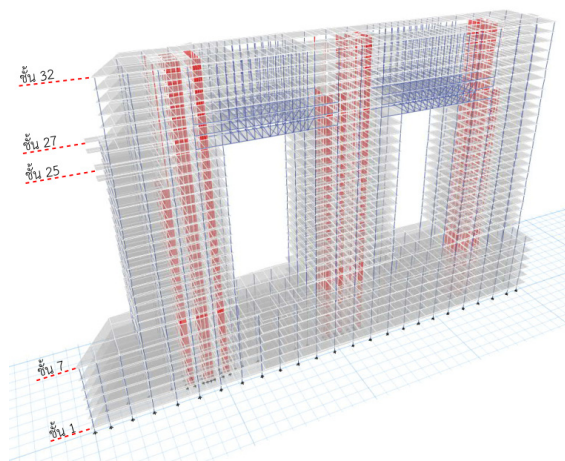
ก.) แพลนอาคารชั้นที่ 1-7



ข.) แพลนอาคารชั้นที่ 8-24



ค.) แพลนอาคารชั้นที่ 25-หลังคา



ง.) แบบจำลอง 3 มิติ

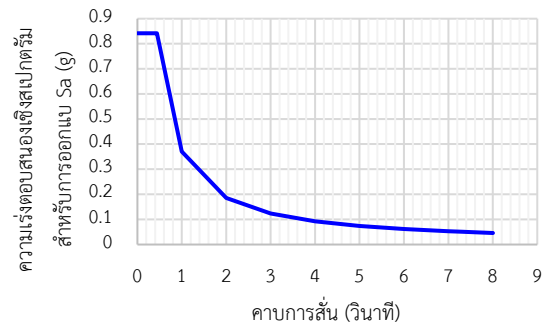
รูปที่ 1 แบบจำลองโครงสร้างตึกข้างด้วยโปรแกรม ETABS [4]

4.1. ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ใช้ออกแบบ

4.1.1. วิธีแรงสถิตเทียบเท่า (STATIC) [2]

แรงแผ่นดินไหวที่ใช้ออกแบบจะอยู่ในรูปของแรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear, V) โดยหาความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่มีค่าความหน่วงของโครงสร้าง 2.5% ตามรูปที่ 2 โดยมีตัวแปรดังนี้

คาบธรรมชาติ (T)	= 2.56 วินาที		W	= 1.48×10^6 kN
C_s	= 0.0256		V	= 3.79×10^4 kN



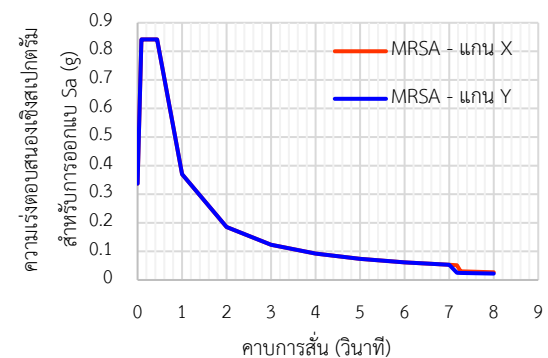
รูปที่ 2 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า

4.1.2. วิธีสเปกตรัมตอบสนองแบบโหมด (RSA) [2]

ค่าตัวประกอบปรับค่า (S_p) จากสมการที่ (5) ของแกน X และ Y มีค่าเท่ากับ 1.42 และ 1.17 ตามลำดับ

ในการวิเคราะห์ได้คำนวณโหมดการเสียรูปของอาคารทั้งหมด 30 โหมด เพื่อให้ผลรวมของน้ำหนักประสิทธิผลเชิงโหมดตามแกน X และ Y เท่ากับ 92.3% และ 90.0% ของน้ำหนักประสิทธิผลของทั้งอาคารตามลำดับ ตารางที่ 3 แสดงคาบการสั่นและผลรวมของน้ำหนักประสิทธิผลตามแกน X และ Y

ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่ใช้ออกแบบด้วยวิธี MRSA [2,5] ตามรูปที่ 3 เพื่อคำนวณค่าแรงเฉือนสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างแนวตั้งรายชิ้นส่วนตามสมการที่ (6)



รูปที่ 3 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีสเปกตรัมตอบสนองแบบโหมด

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ

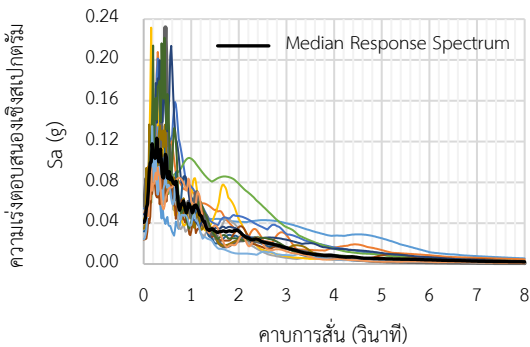
พารามิเตอร์	รายละเอียด					
1. ลักษณะโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก	น้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผล (W)					
ความสูงระหว่างชั้น 1-7 : 4.5 เมตร	ชั้น 1-7 = 66.7×10^3 kN					
ความสูงระหว่างชั้น 8-24 : 3.7 เมตร	ชั้น 8-24 = 35.6×10^3 kN					
ความสูงระหว่างชั้น 25-27 : 3.7 เมตร	ชั้น 25-27 = 50.8×10^3 kN					
ความสูงระหว่างชั้น 28-32 : 3.7 เมตร	ชั้น 28-32 = 51.2×10^3 kN					
2. คุณสมบัติของวัสดุงานโครงสร้าง	เสาและกำแพงรับแรงเฉือน	50MPa				
	พื้นคอนกรีตอัดแรง	32MPa				
	โครงสร้างอื่นๆ	32MPa				
	เหล็กเสริมคอนกรีต	SD40				
3. ขนาดเสาและกำแพงรับแรงเฉือน (เมตร)						
ระดับชั้น	C1	C2	C3	C4	W1	W2
ชั้น 1-7	1.20x1.20	0.50x1.20	0.30x1.25	0.50x0.50	0.30	0.25
ชั้น 8-24	1.20x1.20	-	-	-	0.30	0.25
ชั้น 25-27	1.20x1.20	-	-	-	0.30	0.25
ชั้น 28-32	1.20x1.20	-	-	-	0.30	0.25
4. สถานที่ตั้งอาคาร	อ.เมือง จ.เชียงใหม่					
5. ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ	$S_S = 0.963$	$F_a = 1.118$	$S_{DS} = 0.842g$			
	$S_I = 0.248$	$F_v = 1.904$	$S_{DI} = 0.370g$			
6. ขนาดของอาคารและจำนวนชั้น	กว้าง 38.9ม. ยาว 199ม. และ สูง 128ม. จำนวน 32 ชั้น					
7. น้ำหนักบรรทุก (LL, SDL) kPa	1. ลานจอดรถ (4, 0.5)					
น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load, LL)	2. พื้นที่ร้านค้า (4, 3.5)					
น้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม (Super Imposed Dead Load, SDL)	3. ห้องงานระบบ (10, 2)					
	4. พื้นที่ภูมิสถาปัตย์ (12, 10)					
	5. ห้องพัก (2, 3)					
	6. สำนักงาน (2.5, 3)					
8. ประเภทการออกแบบต้านแผ่นดินไหว (Design Category)	ง					
9. ประเภทความสำคัญอาคาร (Important Factor)	III					
10. ประเภทชั้นดิน	D					
11. ความหน่วงของโครงสร้าง (Damping)	2.5%					
12. ระบบโครงสร้าง	ระบบโครงอาคาร (Building Frame System)					
13. ระบบต้านแรงด้านข้าง	กำแพงรับแรงเฉือนแบบที่มีการให้รายละเอียดพิเศษ (Special Reinforced Concrete Shear Wall)					
14. ตัวประกอบผลตอบสนอง (Response Modification Factor, R)	6					
15. ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (System Overstrength Factor, Ω_0)	2.5					
16. ตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (Deflection Amplification Factor, C_d)	5					
17. ค่าสติเฟนสขององค์อาคารคอนกรีต	1. เสา $I_{eff} = 0.70I_g$ และ $A_{eff} = 1.0A_g$					
	2. กำแพงรับแรงเฉือน $I_{eff} = 0.70I_g$					
	3. พื้นคอนกรีตอัดแรง $I_{eff} = 0.50I_g$					

ตารางที่ 3 คาบการสั่นและผลรวมของน้ำหนักประสิทธิผล

โหมด	คาบการสั่น (วินาที)	การเคลื่อนตัว แกน X	การเคลื่อนตัว แกน Y	ผลรวม W แกน X	ผลรวม W แกน Y
1	7.26	0.687	0.024	0.687	0.024
2	7.17	0.032	0.326	0.719	0.350
3	5.33	0.001	0.275	0.720	0.625
.
29	0.33	0.003	0.000	0.923	0.895
30	0.31	0.000	0.005	0.923	0.900

4.1.3. วิธีวิเคราะห์การตอบสนองเชิงเส้นแบบประวัตินเวลา (LTHA) [1]

ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของชุดคลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 7 ชุด (ตารางที่ 1) เทียบกับค่า มัธยฐาน (Median) ตามรูปที่ 4 โดยค่าความหน่วงของโครงสร้าง 2.5% เพื่อหาค่าตัวปรับคูณค่า (S_F)



รูปที่ 1 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมด้วยวิธีวิเคราะห์การตอบสนองเชิงเส้นแบบประวัตินเวลา

4.2. ผลการวิเคราะห์

4.2.1. แรงเฉือนที่ฐาน

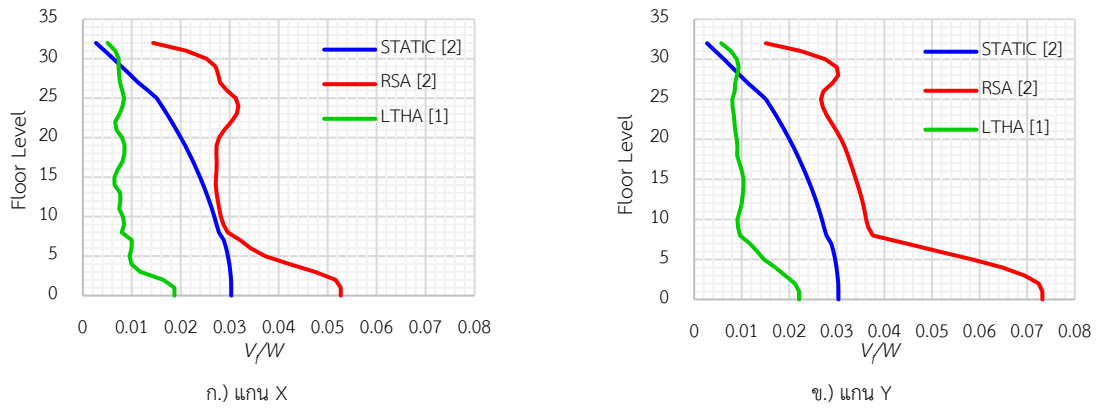
รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบแรงเฉือนที่ฐาน ผลวิเคราะห์ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าจะมีค่าเท่ากับ 3.03% ของน้ำหนักประสิทธิผลของโครงสร้าง โดยแรงเฉือนที่ฐานมีค่าเท่ากันทั้งแกน X และ Y วิธีสเปกตรัมตอบสนองแบบโหมตมีค่าแรงเฉือนที่ฐานทางแกน X และ Y เท่ากับ 5.27% และ 7.32% ของน้ำหนักประสิทธิผลของโครงสร้างตามลำดับ และวิธีการวิเคราะห์การตอบสนองเชิงเส้นแบบประวัตินเวลามีค่าแรงเฉือนที่ฐานทางแกน X และ Y เท่ากับ 1.87% และ 2.21% ของน้ำหนักประสิทธิผลของโครงสร้าง

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมต และวิธีวิเคราะห์การตอบสนองเชิงเส้นแบบประวัตินเวลา ค่าแรงเฉือนของแต่ละชั้นมีแนวโน้มคล้ายกัน โดยที่ชั้น 7-8 ซึ่งเป็นชั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผลทำให้ค่าแรงเฉือนแต่ละชั้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน หากพิจารณาแรงเฉือนที่ฐานผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมตได้ค่าแรงเฉือนที่ฐานมากที่สุดซึ่งมีค่ามากกว่าวิธีแรงสถิตเทียบเท่า 1.8 เท่า และมากกว่าวิธีวิเคราะห์การตอบสนองเชิงเส้นแบบประวัตินเวลา 2.8 เท่า สำหรับแรงเฉือนที่ฐานทางแกน Y ด้วยวิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมตมีแรงเฉือนที่ฐานมากที่สุด ซึ่งมากกว่าวิธีแรงสถิตเทียบเท่า 2.4 เท่า และมากกว่าวิธีวิเคราะห์การตอบสนองเชิงเส้นแบบประวัตินเวลา 3.3 เท่า พบว่าวิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมต ทั้งแกน X และ Y มีค่าแรงเฉือนที่ฐานมากอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากวิธีวิเคราะห์แรงเฉือนโดยวิธี M RSA [2,5] ค่าแรงเฉือนที่ฐานคูณด้วย $\frac{S_F I \Omega_0}{R}$ เพียงโหมตแรงเพียงโหมตเดียวแต่วิธีแรงสถิตเทียบเท่าและวิธีวิเคราะห์การตอบสนองเชิงเส้นแบบประวัตินเวลา ค่าแรงเฉือนที่ฐานคูณด้วย $\frac{I}{R}$ ทุกโหมตทำให้ค่าแรงเฉือนที่ฐานมีค่าน้อยกว่า

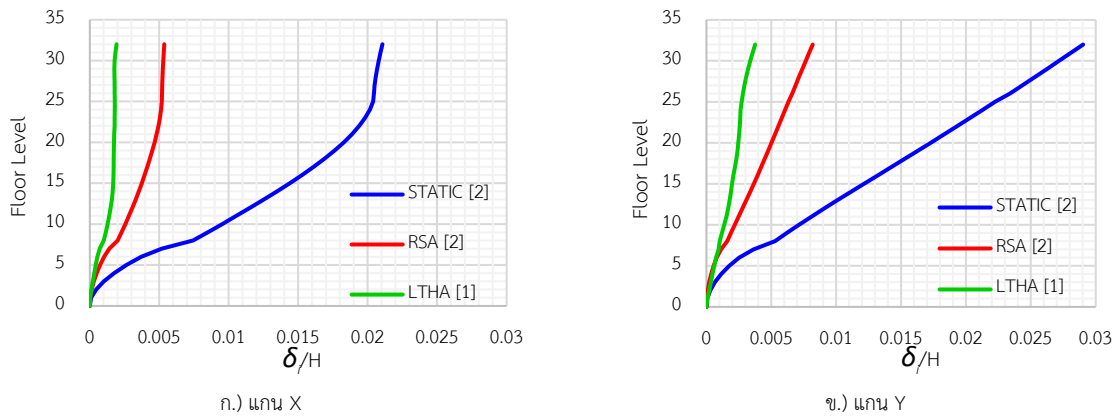
4.2.2. การเคลื่อนตัวแต่ละชั้นของโครงสร้าง

รูปที่ 8 แสดงการเคลื่อนตัวแต่ละชั้นของโครงสร้างแบบอีลาสติก (Elastic Displacement) ตามสมการที่ 8 ผลการวิเคราะห์วิธีแรงสถิตเทียบเท่ามีการเคลื่อนตัวสูงสุดทางแกน X และ Y เท่ากับ 2.11% และ 2.90% ของความสูงของโครงสร้างทั้งหมดตามลำดับ วิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมตมีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดทางแกน X และ Y เท่ากับ 0.54% และ 0.82% ของความสูงของโครงสร้างทั้งหมด และวิธีวิเคราะห์การตอบสนองเชิงเส้นแบบประวัตินเวลามีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดทางแกน X และ Y เท่ากับ 0.19% และ 0.37% ของความสูงของโครงสร้างทั้งหมด

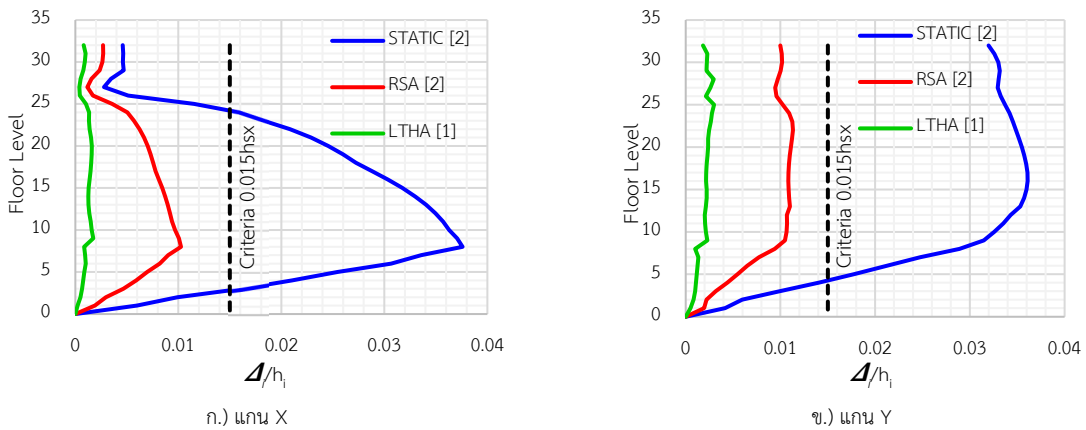
การเคลื่อนตัวแต่ละชั้นของโครงสร้างทางแกน X และแกน Y วิธีการวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหวทั้ง 3 วิธีมีแนวโน้มการเคลื่อนตัวในลักษณะเดียวกัน ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่ามีการเคลื่อนตัวมากที่สุดทางแกน X ซึ่งมีค่ามากกว่าวิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมต 3.9 เท่า และมากกว่าวิธีวิเคราะห์การตอบสนองเชิงเส้นแบบประวัตินเวลา 10.9 เท่า และทางแกน Y วิธีแรงสถิตเทียบเท่ามีการเคลื่อนตัวมากที่สุด ซึ่งมากกว่าวิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมต 3.54 เท่าและมากกว่าวิธีวิเคราะห์การตอบสนองเชิงเส้นแบบประวัตินเวลา 7.74 เท่า



รูปที่ 7 แรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear)



รูปที่ 8 การเคลื่อนตัวแต่ละชั้น (Floor Displacement)



รูปที่ 9 การเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างชั้น (Story Drift)

4.2.3. การเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้น

การออกแบบอาคารด้านแผ่นดินไหวให้พิจารณาค่าการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นที่ยอมให้ (Δ_d) ต้องมีค่าไม่มากกว่า 0.015 ของความสูงระหว่างชั้น (h_{sx}) [1,2] สำหรับประเภทความสำคัญของอาคาร III

ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้น (รูปที่ 9) ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าได้มีค่าการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ต่อความสูง

ระหว่างชั้นสูงสุดทางแกน X และ Y เท่ากับ 0.0376 และ 0.0361 ตามลำดับ วิธีสเปกตรัมตอบสนองแบบโหมดมีค่าการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ต่อความสูงระหว่างชั้นทางแกน X และ Y เท่ากับ 0.0102 และ 0.0113 และวิธีวิเคราะห์การตอบสนองเชิงเส้นแบบประวัติเวลา มีค่าการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ต่อความสูงระหว่างชั้นทางแกน X และ Y เท่ากับ 0.0067 และ 0.0111

การเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นของวิธีสเปกตรัมตอบสนองแบบโหมด [2] และวิธีวิเคราะห์การตอบสนองเชิงเส้นแบบประวัติ

เวลา [1] ทั้งแกน X และ Y อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมให้ตามมาตรฐาน มยผ. ในทางตรงกันข้ามวิธีแรงสถิตเทียบเท่า [2] มีค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่ยอมให้ทั้งแกน X และ Y ประมาณ 2.5 เท่า ซึ่งผลการวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหวทั้ง 3 วิธี การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นมีการเคลื่อนตัวในลักษณะเดียวกัน โดยที่การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลงมากที่สุดทางแกน X ในชั้นที่ 8 ซึ่งเป็นชั้นที่เปลี่ยนแปลงความไม่สม่ำเสมอของมวลและความไม่สม่ำเสมอของสติฟเนส เมื่อพิจารณาทางแกน X ที่ชั้น 25-27 ซึ่งเป็น ส่วนของโครงถักถ้ำน้ำหนัก (Transfer Truss) เชื่อมต่อแต่ละ อาคารทำให้ระบบโครงสร้างมีลักษณะคล้ายโมเมนต์เฟรม (Moment Frame System) ทำให้การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่าง ชั้นมีค่าน้อย และทางแกน Y เนื่องจากระบบโครงสร้างของอาคารมี ลักษณะคล้ายคานยื่น (Free Cantilever System) ที่เปลี่ยนแปลง ของสติฟเนสในแต่ละช่วง ทำให้การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ 8-32 มีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่

5. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมและเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์แรง แผ่นดินไหว 3 วิธี คือ วิธีแรงสถิตเทียบเท่า [2] วิธีสเปกตรัมการ ตอบสนองแบบโหมด [2] และวิธีวิเคราะห์การตอบสนองเชิงเส้น แบบประวัติเวลา [1] โดยใช้มาตรฐานการออกแบบอาคารด้าน แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว มยผ. เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนอง เชิงสเปกตรัมของโครงสร้าง โดยอาคารตัวอย่าง ตึกข้าง โดยมี สมมติฐานว่าอาคารตั้งอยู่บริเวณแผ่นดินไหวรุนแรง อ.เมือง จ. เชียงใหม่ เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กและระบบโครงสร้างเป็น ระบบโครงอาคารและกำแพงรับแรงเฉือนแบบที่มีการให้ รายละเอียดพิเศษ [1,2] โดยสรุปได้ดังนี้

1.) แรงเฉือนแต่ละชั้น (Story Shear) วิเคราะห์ด้วยวิธี สเปกตรัมตอบสนองแบบโหมดและวิธีวิเคราะห์การตอบสนองเชิง เส้นแบบประวัติเวลา มีแนวโน้มที่คล้ายกันที่ชั้น 7-8 และชั้น 24-25 ซึ่งเป็นชั้นที่เปลี่ยนแปลงความไม่สม่ำเสมอของมวลและความไม่ สม่ำเสมอของสติฟเนส ในทางตรงกันข้ามวิธีแรงสถิตเทียบเท่าให้ผล ของแรงเฉือนแต่ละชั้นมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้น ซึ่งให้ค่าแรงเฉือนไม่ สอดคล้องกับลักษณะความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างอาคาร

แรงเฉือนที่ฐานวิเคราะห์ด้วยวิธีสเปกตรัมตอบสนองแบบโหมด MRSA [2] มีค่ามากกว่ามีนัยสำคัญ เนื่องจากค่าแรงเฉือนที่ฐานคูณ ด้วย $\frac{S_F I \Omega_0}{R}$ เพียงโหมดแรกเพียงโหมดเดียวซึ่งแตกต่างจากวิธีอื่น ที่ค่าแรงเฉือนที่ฐานคูณด้วย $\frac{I}{R}$ ทุกโหมด

2.) การเคลื่อนตัวแต่ละชั้นและการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่าง ชั้นมีแนวโน้มที่คล้ายกัน ที่ชั้น 8 มีค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่าง ชั้นมากที่สุด เนื่องจากอาคารมีการเปลี่ยนแปลงความไม่สม่ำเสมอ

ของมวล วิธีสเปกตรัมตอบสนองแบบโหมดและวิธีวิเคราะห์การ ตอบสนองเชิงเส้นแบบประวัติเวลาให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นวิธีสเปกตรัม ตอบสนองแบบโหมดและวิธีวิเคราะห์การตอบสนองเชิงเส้นแบบ ประวัติเวลา มีค่าที่อยู่ในเกณฑ์ [1,2] แต่วิธีแรงสถิตเทียบเท่ามีค่า มากกว่าเกณฑ์ที่ยอมให้อย่างมีนัยสำคัญ [2]

3.) วิธีวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหวทั้ง 3 วิธี พบว่าวิธีสเปกตรัม ตอบสนองแบบโหมดและวิธีวิเคราะห์การตอบสนองเชิงเส้นแบบ ประวัติเวลา มีความเหมาะสมมากกว่าวิธีแรงสถิตเทียบเท่า เนื่องจาก ผลการวิเคราะห์แรงเฉือนแต่ละชั้นมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากตาม มวลและสติฟเนสแต่ละชั้นของอาคาร แต่ค่าแรงเฉือนแต่ละชั้นจาก วิธีแรงสถิตเทียบเท่ามีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นตั้งแต่ชั้นหลังคานจนถึงชั้น ล่างสุด และวิธีแรงสถิตเทียบเท่ายังเป็นวิธีวิเคราะห์ที่ไม่ได้คำนึงถึง ผลของการเสียรูปของอาคาร คาบธรรมชาติของอาคารในแต่ละ โหมดและไม่ได้คำนึงถึงผลของการกระจายตัวของแรงด้านข้าง ด้วย เหตุผลข้างต้นทำให้วิธีแรงสถิตเทียบเท่าไม่เหมาะสมที่จะใช้คำนวณ ผลของแรงแผ่นดินไหวกับอาคารตัวอย่าง ตึกข้าง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จล่วงได้เป็นอย่างดี ต้องขอขอบคุณอาจารย์ที่ ปรีक्षा ผศ.ดร.อาทิตย์ เพชรศศิธร ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาใน ทุกด้านของงานวิจัย

ขอขอบคุณพี่ๆและน้องๆ จากบริษัท อินฟรากรุป จำกัด ที่ให้คำ ปรึกษาในการทำวิจัยและสนับสนุนอุปกรณ์ในการทำวิจัย

7. การอ้างอิง

- [1] มาตรฐานการออกแบบอาคารด้านการสั่นสะเทือนของ แผ่นดินไหว มยผ. 1302-52 ปี 2552, กรมโยธาธิการและผัง เมือง กระทรวงมหาดไทย, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย
- [2] มาตรฐานการออกแบบอาคารด้านการสั่นสะเทือนของ แผ่นดินไหว มยผ. 1301/1302-61 ปี 2561, กรมโยธาธิการ และผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย
- [3] Chang (Elephant) Building, BKK Kids, 9 October 2013. Retrieved 9 March 2014
- [4] Computers and Structures, Inc., Integrated Building Design Software, User's guide ETABS version 2016, USA., 2016.
- [5] 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