

พฤติกรรมของอาคารสูงเดิมที่มีชั้นอ่อนภายใต้แผ่นดินไหวสำหรับกรุงเทพมหานคร Behavior of Existing High-Rise Building with Soft-Story under Bangkok Earthquakes

เสรี รัสสุโษ^{1*} และ ประกิต ชมชื่น²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: rahsusoh13@gmail.com

บทคัดย่อ

การพัฒนาของเทคโนโลยีและข้อจำกัดด้านพื้นที่ส่งผลให้อาคารสูงได้รับความนิยมในกรุงเทพมหานคร ด้วยเงื่อนไขหลายประการส่งผลให้อาคารสูงจำนวนมากได้รับการออกแบบและก่อสร้างโดยมีชั้นอ่อน ชั้นอ่อนดังกล่าวส่งผลให้อาคารอ่อนแอต่อแผ่นดินไหว มาตรฐานการออกแบบอาคารด้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวของกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.) ที่ประกาศครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2550 และมีการปรับปรุงล่าสุดในปี พ.ศ. 2561 (มยผ. 1301/1302-61) ได้กำหนดเงื่อนไขการพิจารณาความสม่ำเสมอของสติฟเนสของอาคารในแนวตั้งไว้ ซึ่งใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินว่าอาคารมีชั้นอ่อนหรือไม่ การวิเคราะห์ผลตอบสนองของอาคารที่มีชั้นอ่อนภายใต้แผ่นดินไหวต้องใช้วิธีการวิเคราะห์แบบประวัติเวลาเท่ากัน การศึกษานี้มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมภายใต้แรงแผ่นดินไหวในกรุงเทพมหานคร ของอาคารสูงเดิมที่มีการออกแบบและก่อสร้างก่อนมีกฎหมายกำหนดให้คำนึงถึงผลของแผ่นดินไหวและมีชั้นอ่อน อาคารสูงที่เลือกศึกษาเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก มีจำนวนชั้นทั้งหมด 34 ชั้น และความสูงทั้งหมด 129.60 เมตร เมื่อพิจารณาจากเกณฑ์ตามมาตรฐานแล้วพบว่าโครงสร้างชั้นที่ 7 ถือเป็นชั้นอ่อน รายละเอียดของผลการตอบสนองของอาคารวิเคราะห์ด้วยวิธีประวัติเวลาภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่กำหนดในมาตรฐานสำหรับกรุงเทพมหานคร ได้แสดงและอภิปรายในบทความนี้

คำสำคัญ: อาคารที่มีชั้นอ่อน, อาคารสูงเดิม, ผลตอบสนองของอาคารสูงเดิมภายใต้แผ่นดินไหว, การวิเคราะห์แบบประวัติเวลา

Abstract

Technological developments and space constraints have made high-rise buildings popular in Bangkok. Number of conditions resulted in many high-rise buildings being designed and constructed with soft story. The soft story makes buildings weak to earthquakes. Earthquake-resistant design standard of the Department of Public Works and Town & Country Planning (DPT) was announced in 2007 and last updated in 2018 (DPT 1301/1302-61). In this standard, the condition for determining the uniformity of the vertical stiffness of the building, which is used as a criterion to judge whether a building has a soft-story or not, was established. The standard also stipulates that the response analysis of soft-story buildings under earthquakes requires only time-historical analysis methods. This study focuses on behavior of the existing high-rise building with soft story in Bangkok, that was designed and constructed before the law required to take into account the effects of earthquakes,

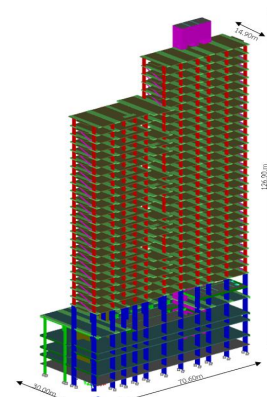
under earthquake. The case study in this paper is an existing high-rise reinforced concrete building with soft story in Bangkok. There are a total of 34 floors and a total height of 129.60 meters. Considering the standard criteria, the 7th floor structure is considered as a soft story. Details of time-history responses of the building under the earthquake ground motions for Bangkok area will be presented and discussed in this paper.

Keywords: Soft-story Buildings, Existing High-Rise Buildings, Responses of Existing High-Rise Buildings under Earthquake, Time-History Analysis.

1. บทนำ

การพัฒนาของเทคโนโลยีและข้อจำกัดด้านพื้นที่ส่งผลให้อาคารสูงได้รับความนิยมในกรุงเทพมหานคร ด้วยเงื่อนไขหลายประการส่งผลให้อาคารสูงจำนวนมากได้รับการออกแบบและก่อสร้างโดยมีชั้นอ่อน ชั้นอ่อนดังกล่าวส่งผลให้อาคารอ่อนแอต่อแผ่นดินไหว มาตรฐานการออกแบบอาคารด้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวของกรมโยธาธิการและผังเมือง มีการปรับปรุงล่าสุดในปี พ.ศ. 2561 (มยผ. 1301/1302-61) [1] ได้กำหนดเงื่อนไขการพิจารณาความสม่ำเสมอของสติฟเนสของอาคารในแนวตั้งไว้

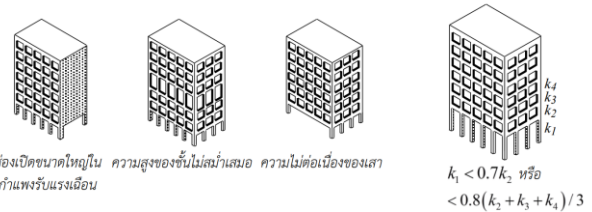
บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารตัวอย่างโดยใช้วิธีประวัติเวลาแบบเชิงเส้น (Linear Time history Analysis, LTHA) [5] เพื่อศึกษาพฤติกรรมของอาคารสูงเดิมที่มีชั้นอ่อนภายใต้แผ่นดินไหวสำหรับกรุงเทพมหานคร ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยมีค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างเดิม ดังแสดงในตารางที่ 1-3 เพื่อเปรียบเทียบผลของสติฟเนสแนวตั้ง (Vertical Stiffness) ผลของแรงเฉือนที่ฐานรวม (Total Base Shear) ผลของการเคลื่อนตัวด้านข้าง (Horizontal Displacement) และผลของการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้น (Inter story drift) เป็นสำคัญ [1]



รูปที่ 1 ภาพรวมของโครงสร้างอาคารเดิม

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์คุณสมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติของวัสดุ	กำลังของวัสดุ (กก/ตร.ซม)	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ (กก/ตร.ซม)
พื้นที่ทั่วไป, พื้นคอนกรีตอัดแรง	320	270,117
เสาและผนังรับแรงเฉือน	400	320,000
เหล็กเสริมพื้น	4,000 (SD40)	2,040,000
เหล็กเสริมพื้นคอนกรีตอัดแรง	4,000 (SD40)	2,040,000
เหล็กเสริมเสาและผนังรับแรงเฉือน	5,000 (SD50)	2,040,000



รูปที่ 2 การจำแนกความไม่สม่ำเสมอของสติฟเนส

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างของพื้น เสาและผนังรับแรงเฉือน

ระดับชั้น	ความสูงชั้น (เมตร)	พื้น (เมตร)	C1 (เมตร)	C2 (เมตร)	W1, W2 (เมตร)
ชั้นหลังคา	3.00	RC 0.20	-	-	0.3
ชั้นถ้ำน้ำ	3.70	RC 0.20	-	-	0.3
ชั้นห้องเครื่อง	1.90	RC 0.20	-	-	0.3
ชั้น 7-34	3.25	PTS 0.25	-	0.4x1.6	0.3
ชั้น 6-7	9.35	PTS 0.25	-	0.4x2.4	0.3
ชั้น 5-6	6.40	PTS 0.25	0.4x1.2	0.4x2.4	0.3
ชั้น 4B-5	1.25	PTS 0.30	0.4x1.2	0.4x2.4	0.3
ชั้น 4A-4B	1.50	PTS 0.30	0.4x1.2	0.4x2.4	0.3
ชั้น 3-4A	3.10	PTS 0.30	0.4x1.2	0.4x2.4	0.3
ชั้น 2-3	3.10	PTS 0.30	0.4x1.2	0.4x2.4	0.3
ชั้น 1-2	3.90	RC 0.30	0.4x1.2	0.4x2.4	0.3

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์น้ำหนักรวมทุกเพิ่มเติมและน้ำหนักรวมทุกจร

ชั้น	น้ำหนักบรรทุกทุกเพิ่มเติม(กก/ตร.ม)	น้ำหนักบรรทุกจร(กก/ตร.ม)
ชั้นดาดฟ้า	-	2,000
ชั้น 7-34	350	200
ชั้น 6	350	500
ชั้น 2-5	-	400
ชั้น 1	350	500

2. มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนแผ่นดินไหว (มยผ.1301/1302-61)

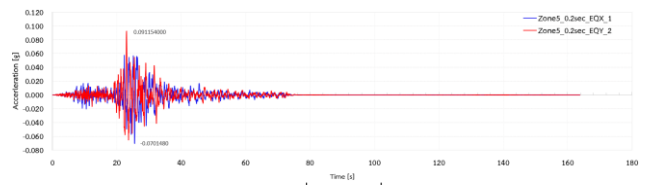
2.1 การจำแนกลักษณะรูปแบบอาคารที่มีความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้างในแนวตั้ง (Vertical Structural Irregularities) [1] ดังแสดงในรูปที่ 2 สามารถแบ่งออกได้ 2 ระดับดังนี้

2.1.1 ความไม่สม่ำเสมอของสติฟเนสหรือมีชั้นที่อ่อน (Stiffness-Soft Story Irregularity) กรณีที่มีชั้นหนึ่งชั้นใดของอาคารมีค่าสติฟเนสทางด้านข้าง (Lateral Stiffness) น้อยกว่าร้อยละ 70 ของค่าในชั้นที่เหนือถัดขึ้นไปหรือน้อยกว่าร้อยละ 80 ของค่าสติฟเนสเฉลี่ยของสามชั้นที่เหนือขึ้นไป

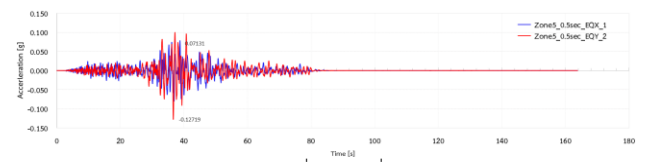
2.1.2 ความไม่สม่ำเสมออย่างมากของสติฟเนสหรือมีชั้นที่อ่อนอย่างมาก (Stiffness-Extreme Soft Story Irregularity) กรณีที่มีชั้นหนึ่งชั้นใดของอาคารมีค่าสติฟเนสทางด้านข้าง (Lateral Stiffness) น้อยกว่าร้อยละ 60 ของค่าในชั้นที่เหนือถัดขึ้นไป หรือน้อยกว่าร้อยละ 70 ของค่าสติฟเนสเฉลี่ยของสามชั้นที่เหนือขึ้นไป

2.2 ข้อมูลคลื่นความเร่งของผิวดิน (Ground Motion)

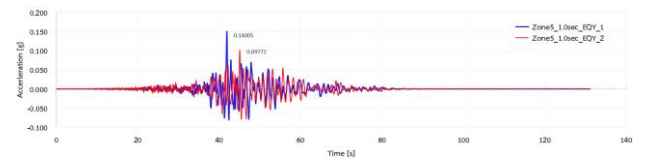
ความเร่งของพื้นดินที่ใช้กระทำที่ฐานอาคาร โดยข้อมูลแบบประวัติเวลาต้องมีจำนวนความเร่งของพื้นดินไม่น้อยกว่า 3 ชุด และคลื่นความเร่งแต่ละชุดจะต้องประกอบด้วยคู่ของความเร่งของพื้นดินในแนวราบสองทิศทางที่ตั้งฉากกัน ในกรณีที่ใช้คลื่นความเร่งไม่น้อยกว่า 7 ชุด อนุญาตให้ใช้ค่าเฉลี่ยของแรงภายในชิ้นส่วนโครงสร้างและการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นได้สำหรับอาคารตัวอย่างนี้ตั้งอยู่ในกรุงเทพมหานครซึ่งเป็นพื้นที่ที่กระทบแผ่นดินไหว โซน 5 โดยมีชั้นดินคาบการสั่นประเภท D มีค่าความหน่วงของโครงสร้างร้อยละ 2.5 [6] และใช้ค่าความเร่งผลตอบสนองที่คาบการสั่นของอาคาร ที่ 0.2 วินาที 0.5 วินาที 1.0 วินาที 1.5 วินาที 2.0 วินาที และ 3.0 วินาที รวมทั้งหมด 23 ชุด [1] ดังแสดงในรูปที่ 3 (ก-ฉ)



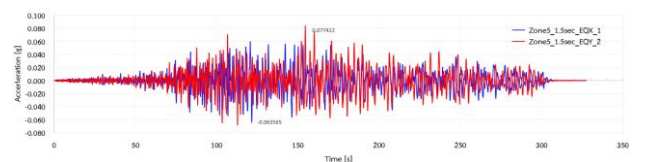
ก.) ความเร่งผลตอบสนองที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (แกน X แกน Y)



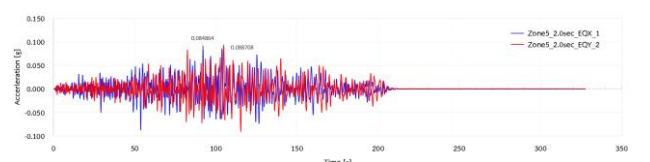
ข.) ความเร่งผลตอบสนองที่คาบการสั่น 0.5 วินาที (แกน X แกน Y)



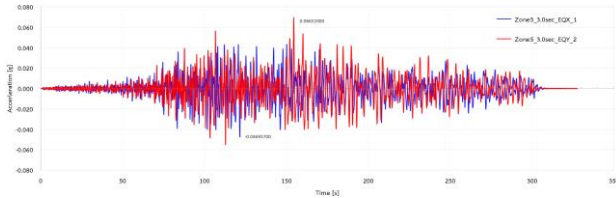
ค.) ความเร่งผลตอบสนองที่คาบการสั่น 1.0 วินาที (แกน X แกน Y)



ง.) ความเร่งผลตอบสนองที่คาบการสั่น 1.5 วินาที (แกน X แกน Y)



จ.) ความเร่งผลตอบสนองที่คาบการสั่น 2.0 วินาที (แกน X แกน Y)



ฉ. ความเร่งผลตอบสนองที่คาบการสั่น 3.0 วินาที (แกน X แกน Y)
รูปที่ 3 ความเร่งผลตอบสนองที่คาบการสั่นของอาคาร

2.3 สมการการเคลื่อนที่

สมการการเคลื่อนที่ของระบบ(Multi degree of freedom system ,MDOF สามารถใช้หลักการเดียวกับระบบ Single degree of freedom system ,SDOF ซึ่งมีข้อเพิ่มเติมคือพิจารณาสำหรับทุกๆ Degree of freedom system ,DOF โดยใช้หลักการสมดุลโดยตรง เพื่อแสดงแรงพลศาสตร์ทั้งหมดที่กระทำแต่ละ DOF และเขียนสมดุลแรงในรูปแบบการเคลื่อนที่ในรูปแบบเมทริกซ์ [2],[5] ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}\mathbf{u} = \mathbf{m}\mathbf{1}\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

เมทริกซ์ของมวล \mathbf{m}

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

เมทริกซ์ของความหน่วง \mathbf{c}

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & \dots & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & \dots & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & c_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

เมทริกซ์ของสติเฟนส \mathbf{k}

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & \dots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \dots & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & k_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{เมื่อ } k = \frac{12E_c}{h^2 \left[\frac{1}{\sum k_c} + \frac{1}{\sum k_b} \right]}$$

เมทริกซ์ของเวกเตอร์ตอบสนอง \mathbf{u} ,เมทริกซ์ความเร็วตอบสนอง $\dot{\mathbf{u}}$ และความเร่งตอบสนอง $\ddot{\mathbf{u}}$

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_N \end{Bmatrix}, \dot{\mathbf{u}} = \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \vdots \\ \dot{u}_N \end{Bmatrix}, \ddot{\mathbf{u}} = \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \vdots \\ \ddot{u}_N \end{Bmatrix} \quad (5)$$

เมทริกซ์ของเวกเตอร์ $\mathbf{m}\mathbf{1}$

$$\mathbf{m}\mathbf{1} = \sum_{n=1}^N \mathbf{S}_n = \sum_{n=1}^N \Gamma_n \mathbf{m} \phi_n \quad (6)$$

$$\Gamma_n = \frac{L_n^h}{M_n}, L_n^h = \sum_{j=1}^N m_j \phi_{jn}, M_n = \sum_{j=1}^N m_j \phi_{jn}^2 \quad (7)$$

เมื่อ ϕ คือไอเกนเวกเตอร์

ϕ คือรูปร่างการสั่นไหว

Γ_n คือค่าประกอบการมีส่วนร่วมเชิงโหมด

2.4 ความถี่ธรรมชาติในรูปแบบการสั่นไหว (Natural Frequency and Mode Shape)

คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่สำคัญของระบบที่มีระดับขั้นความเสรีมากกว่าหนึ่งประกอบไปด้วยความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหว [5] ดังแสดงในสมการที่ (8-9)

$$[\mathbf{k} - \omega^2 \mathbf{m}] \phi = 0 \quad (8)$$

$$\det[\mathbf{k} - \omega^2 \mathbf{m}] = 0 \quad (9)$$

เมื่อ ω คือความถี่เชิงมุมประจำโหมดใดๆ

ϕ คือไอเกนเวกเตอร์

2.5 ความหน่วงของโครงสร้างคอนกรีตเหล็ก(Damping ratio)

ความหน่วงที่ใช้สำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีค่าแปรผันตามความสูงรวมของอาคาร โดยความสูงรวมของอาคารที่มีค่าน้อยกว่า 16 เมตร จะมีค่าความหน่วงร้อยละ 5.0 ความสูงรวมของอาคารที่มีค่าอยู่ระหว่าง 16-64 เมตร จะมีค่าความหน่วงร้อยละ 2.5-5.0 และความสูงรวมของอาคารที่ค่ามากกว่า 64 เมตรขึ้นไป จะมีค่าความหน่วงร้อยละ 2.5 [6] ดังแสดงในสมการที่ (10-12)

$$\xi = 0.05 \text{ for } H < 16.00m \quad (10)$$

$$\xi = \frac{0.2}{\sqrt{H}} \text{ for } 16.00m \leq H \leq 64.00m \quad (11)$$

$$\xi = 0.025 \text{ for } H \geq 64.00m \quad (12)$$

2.6 การคำนวณมวลประสิทธิผลหรือน้ำหนักประสิทธิผล

ในแต่ละโหมดการสั่นจะมีมวลประสิทธิผล[1],[5] ที่ก่อให้เกิดแรงในโครงสร้างที่ไม่เท่ากัน การคำนวณมวลมวลประสิทธิผลหรือน้ำหนักประสิทธิผล M_m หรือน้ำหนักประสิทธิผล W_m จะต้องคำนวณพารามิเตอร์ Modal mass M_m และ L_m (Earthquake participation factor) ก่อน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (13,14)

$$L_m = \sum_{j=1}^N m_j \phi_{jm} \text{ or } L_m = \frac{\sum_{j=1}^N W_j \phi_{jm}}{g} \quad (13)$$

$$M_m = \sum_{j=1}^N m_j \phi_{jm}^2 \text{ or } L_m = \frac{\sum_{j=1}^N W_j \phi_{jm}^2}{g} \quad (14)$$

เมื่อ M_j คือมวลในแต่ละชั้น
 W_{jm} คือน้ำหนักในแต่ละชั้น
 ϕ_{jm} คือรูปแบบการสั่นในแต่ละชั้นในโหมดที่พิจารณา
 g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก 9.81 เมตร/วินาที
 มวลประสิทธิผลหรือน้ำหนักประสิทธิผล M_m หรือน้ำหนักประสิทธิผล W_m [1] ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (15)

$$M_m = \frac{L_m^2}{M_n} \text{ or } W_m = \frac{L_m^2}{M_n} g \quad (15)$$

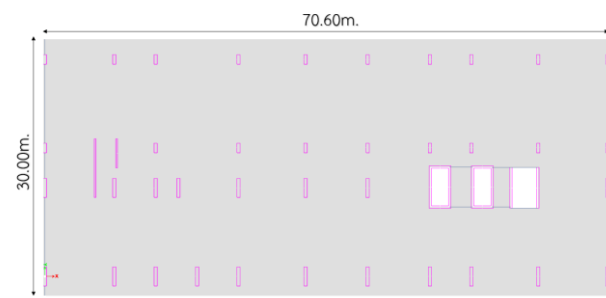
ผลรวมของมวลประสิทธิผลของทุกโหมดที่พิจารณาจะต้องมากกว่าร้อยละ 90 ของมวลทั้งหมดของอาคารหรือเมื่อคำนวณอัตราส่วนของมวล (Participation mass ratio, PM) ทุกๆโหมดที่พิจารณาแล้วต้องมีค่ามากกว่าร้อยละ 90 [1,5] ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (16)

$$PM = \frac{L_m^2 \times 100}{M_m \sum M} = \frac{M_m \times 100}{\sum M} \geq 90 \quad (16)$$

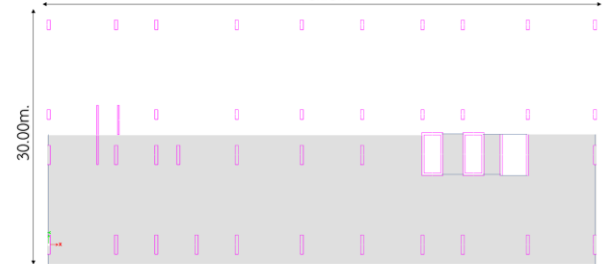
3. อาคารตัวอย่างที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

อาคารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างเป็นอาคารสูง 34 ชั้น มีความสูงรวม 129.60 เมตร อาคารตั้งอยู่ในกรุงเทพมหานคร วิเคราะห์โครงสร้างแบบวิธีประวัติเวลาแบบเชิงเส้น (Linear Time history Analysis, LTHA) [1] โดยพิจารณาผนังก่ออิฐรับแรงด้านข้าง พิจารณาผลกระทบของ $P-\Delta$ และไม่รวมฐานรากกับชั้นใต้ดิน

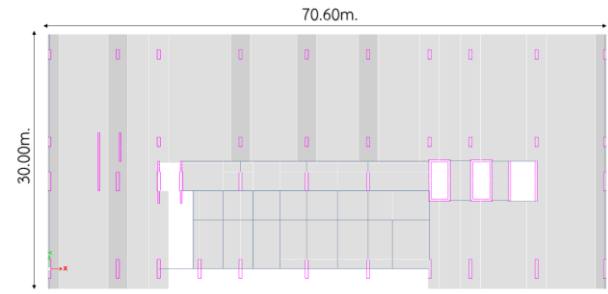
บทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์โครงสร้างด้านทานแผ่นดินไหวด้วยวิธีประวัติเวลาแบบเชิงเส้น เพื่อศึกษาพฤติกรรมของอาคารสูงเดิมที่มีชั้นอ่อนและนำผลการวิเคราะห์ค่าสถิติเพนส ค่าเคลื่อนตัวทางด้านข้าง และค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นมาเปรียบเทียบกับข้อกำหนดมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 ที่ยอมให้ [1] โดยมีรายละเอียดของอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก-ฉ) และมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4-6



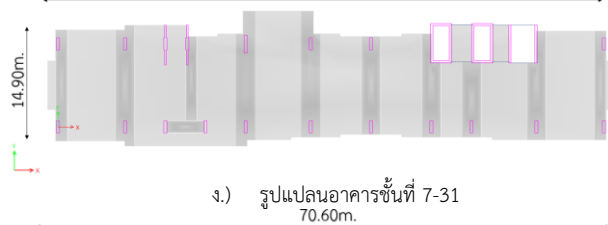
ก.) รูปแปลนอาคารชั้นที่ 1-2
70.60m.



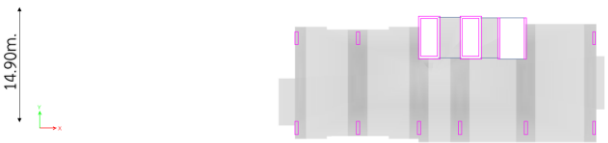
ข.) รูปแปลนอาคารชั้นที่ 3-5



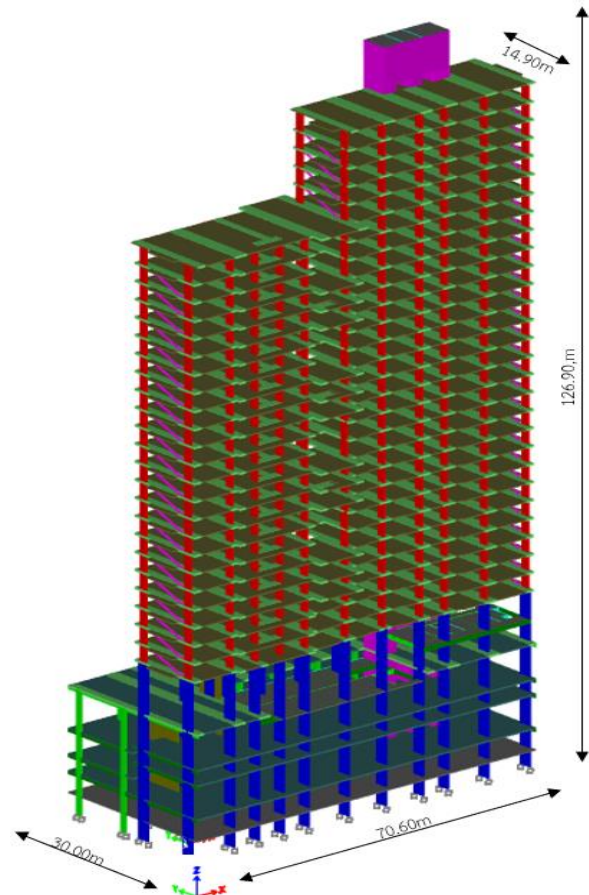
ค.) รูปแปลนอาคารชั้นที่ 6
70.60m.



ง.) รูปแปลนอาคารชั้นที่ 7-31
70.60m.



จ.) รูปแปลนอาคารชั้นที่ 31-คาดฟ้า



ฉ.) รูปแบบจำลองโครงสร้าง 3 มิติ
รูปที่ 4 แบบจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรม Etabs [4]

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์คุณสมบัติของวัสดุงานโครงสร้าง

คุณสมบัติของวัสดุ	กำลังของวัสดุ (กก/ตร.ซม)	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ(กก/ตร.ซม)
พื้นทั่วไป,พื้นคอนกรีตอัดแรง	320	270,117
เสาและผนังรับแรงเฉือน	400	320,000
เหล็กเสริมพื้นทั่วไป	4,000 (SD40)	2,040,000
เหล็กเสริมพื้นคอนกรีตอัดแรง	4,000 (SD40)	2,040,000
เหล็กเสริมเสาและผนังรับแรงเฉือน	5,000 (SD50)	2,040,000

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์พื้น, เสาและผนังรับแรงเฉือน

ระดับชั้น	ความสูงชั้น(เมตร)	พื้น(เมตร)	C1(เมตร)	C2(เมตร)	W1(เมตร)	W2(เมตร)
ชั้นหลังคา	3.00	RC 0.20	-	-	0.30	0.30
ชั้นลิ้งน้ำ	3.70	RC 0.20	-	-	0.30	0.30
ชั้นห้องเครื่อง	1.90	RC 0.20	-	-	0.30	0.30
ชั้น 7-34	3.25	PTS 0.25	-	0.40x1.60	0.30	0.30
ชั้น 6-7	9.35	PTS 0.25	-	0.40x2.40	0.30	0.30
ชั้น 5-6	6.40	PTS 0.25	0.40x1.20	0.40x2.40	0.30	0.30
ชั้น 4B-5	1.25	PTS 0.30	0.40x1.20	0.40x2.40	0.30	0.30
ชั้น 4A-4B	1.50	PTS 0.30	0.40x1.20	0.40x2.40	0.30	0.30
ชั้น 3-4A	3.10	PTS 0.30	0.40x1.20	0.40x2.40	0.30	0.30
ชั้น 2-3	3.10	PTS 0.30	0.40x1.20	0.40x2.40	0.30	0.30
ชั้น 1-2	3.90	RC 0.30	0.40x1.20	0.40x2.40	0.30	0.30

ตารางที่ 6 พารามิเตอร์อื่นๆ

หัวข้อ	รายละเอียด
สถานที่ตั้งของอาคาร	กรุงเทพมหานคร
ขนาดของอาคาร	ชั้นที่ 1-6 กว้าง 30.0เมตร ยาว 70.60เมตร ชั้นที่ 7-30 กว้าง 14.90เมตร ยาว 70.60เมตร ชั้นที่ 31-คาคพ้า กว้าง 14.90เมตร ยาว 30.60เมตร,ความสูงรวม 129.60เมตร
น้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL)	คอนกรีตเสริมเหล็ก 2,400 กก/ลบ.ม.
น้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม (SDL)	ห้องพัก,ส่วนกลาง 350กก/ตรม.
น้ำหนักบรรทุกจร (LL)	ห้องพัก 200 กก/ตรม.สำนักงานและที่จอดรถ 400 กก/ตรม.พื้นที่ส่วนกลาง 500 กก/ตรม.ห้องระบบไฟฟ้า 500 กก/ตรม. ห้องเครื่องทั่วไป 1,000 กก/ตรม.ห้องเครื่องลิฟท์โดยสาร 2,000 กก/ตรม.
ประเภทของแผ่นดินไหว	ง
ประเภทความสำคัญของอาคาร	III
ประเภทของชั้นดิน	D
ความหน่วงของโครงสร้างร้อยละ	2.5
ระบบของโครงสร้างต้านแรงด้านข้าง	กำแพงรับแรงเฉือนแบบที่มีการให้รายละเอียดพิเศษ
ค่าสถิติเนสของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก	เสาคอนกรีต $I_{eff} = 0.70I_g$ และ $A_{eff} = 1.0I_g$ กำแพงรับแรงเฉือน $I_{eff} = 0.70I_g$ คานคอนกรีต $I_{eff} = 0.35I_g$ พื้นคอนกรีตอัดแรง $I_{eff} = 0.25I_g$
การเคลื่อนด้านข้างที่ยอมให้	$H / 500$
การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่ยอมให้ร้อยละ	1.5

4. ผลการวิเคราะห์โครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวด้วยวิธี ประวัติเวลาแบบเชิงเส้น (Linear Time history Analysis ,LTHA)

4.1 ผลการวิเคราะห์เชิงโหมดและรวมของน้ำหนักประสิทธิผล

ผลจากการวิเคราะห์เชิงโหมดและรวมของน้ำหนักประสิทธิผล แกน X แกน Y ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (16) ผลรวมของมวลประสิทธิผลจำนวน 31 โหมด [1],[4] สามารถสรุปผลได้ดังนี้

4.1.1 ผลรวมของน้ำหนักประสิทธิผล ในแนวแกน X ที่ควบคุมมีจำนวน 6 โหมด ได้แก่โหมดที่ 1,4,6,7,8,11รวมอัตราส่วนของน้ำหนักประสิทธิผล *PM* ร้อยละ 90.015 [1],[4] ดังแสดงในตารางที่ 7

4.1.2 ผลรวมของน้ำหนักประสิทธิผล ในแนวแกน Y ที่ควบคุมมีจำนวน 12 โหมด ได้แก่โหมดที่ 2,3,5,9,10,12,14,15,19,20,25,31รวมอัตราส่วนของน้ำหนักประสิทธิผล *PM* ร้อยละ 90.054 [1],[4] ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 7 ผลรวมของน้ำหนักประสิทธิผล แกน X

โหมด	คาบการสั่น(วินาที)	เวกเตอร์(X)	ผลรวม W(X)
1	12.704	0.6569	0.6569
4	3.031	0.1108	0.7677
6	1.582	0.0027	0.7704
7	1.378	0.0548	0.8252
8	0.827	0.0473	0.8725
11	0.563	0.0290	0.9015

ตารางที่ 8 ผลรวมของน้ำหนักประสิทธิผล แกน Y

โหมด	คาบการสั่น(วินาที)	เวกเตอร์(Y)	ผลรวม W(Y)
2	6.926	0.5280	0.5280
3	5.500	0.0948	0.6228
5	1.681	0.1304	0.7532
9	0.766	0.0131	0.7663
10	0.694	0.445	0.8108
12	0.482	0.0093	0.8201
14	0.385	0.0326	0.8527
15	0.364	0.0085	0.8612
19	0.273	0.0055	0.8667
20	0.252	0.0256	0.8923
25	0.200	0.0023	0.8946
31	0.178	0.0108	0.9054

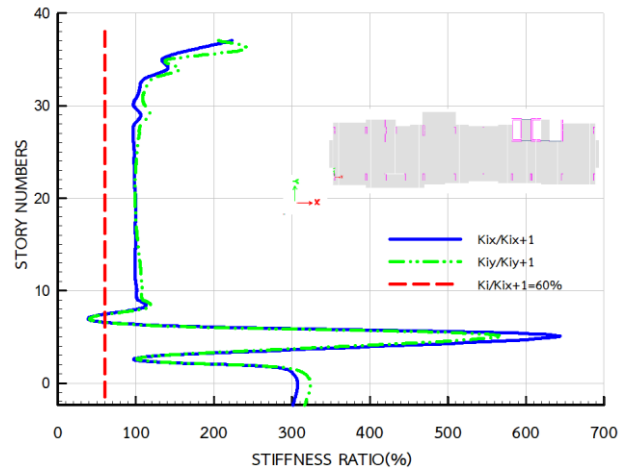
4.2 ผลของอัตราส่วนสติฟเนสแนวตั้งในแต่ละชั้น

ผลของอัตราส่วนสติฟเนสของโครงสร้างเดิมทั้งแกน X และแกน Y มีความไม่สม่ำเสมออย่างมากของสติฟเนสหรือมีชั้นที่อ่อนอย่างมาก (Stiffness-Extreme Soft Story Irregularity) กรณีที่มีชั้นหนึ่งชั้นใดของอาคารมีค่าสติฟเนสทางด้านข้าง (Lateral Stiffness) น้อยกว่าร้อยละ 60 ของค่าในชั้นที่เหนือถัดขึ้นไป หรือน้อยกว่าร้อยละ 70 ของค่าสติฟเนสเฉลี่ยของสามชั้นที่เหนือขึ้นไป [1] สามารถสรุปได้ดังนี้

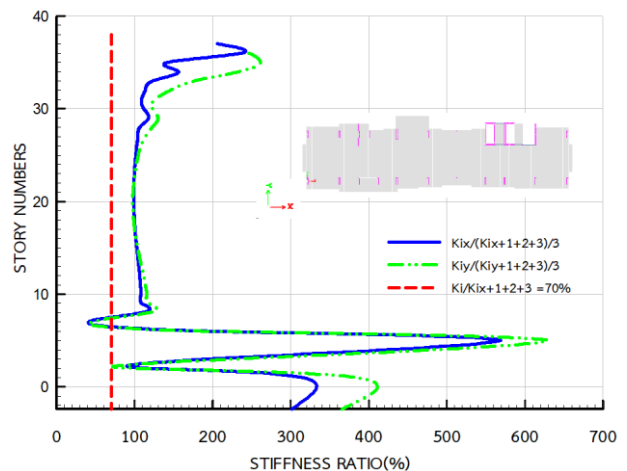
4.2.1 อัตราส่วนสติฟเนสของโครงสร้างเดิมทั้งแกน X และแกน Y พบว่าโครงสร้างพื้นชั้น 7 มีค่าสติฟเนสเท่ากับร้อยละ 39.40,41.30 ตามลำดับ น้อยกว่าข้อกำหนดของมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 ร้อยละ 60 [1] ของค่าสติฟเนสชั้นที่เหนือขึ้นไปถือว่าเข้าข่ายเป็นชั้นอ่อนอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 5

4.2.2 อัตราส่วนสติฟเนสโครงสร้างเดิมทั้งแกน X และแกน Y พบว่าโครงสร้างพื้นชั้น 7 มีค่าสติฟเนสเท่ากับร้อยละ 41.30 , 44.90 ตามลำดับ

ซึ่งน้อยกว่าข้อกำหนดของมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 ร้อยละ 70 ของค่าสติฟเนสเฉลี่ยของสามชั้นที่เหนือขึ้นไปถือว่าเข้าข่ายเป็นชั้นอ่อนอย่างมาก [1] ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 5 อัตราส่วนสติฟเนสโครงสร้างเดิมแกน X,Y



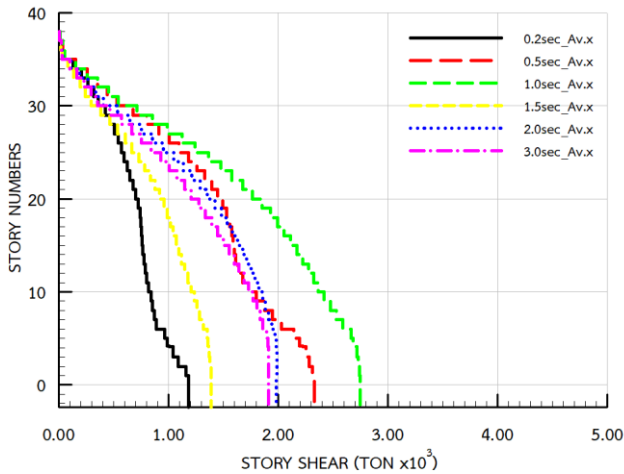
รูปที่ 6 อัตราส่วนสติฟเนสโครงสร้างเดิมแกน X,Y

4.3 ผลค่าเฉลี่ยแรงเฉือนที่ฐาน

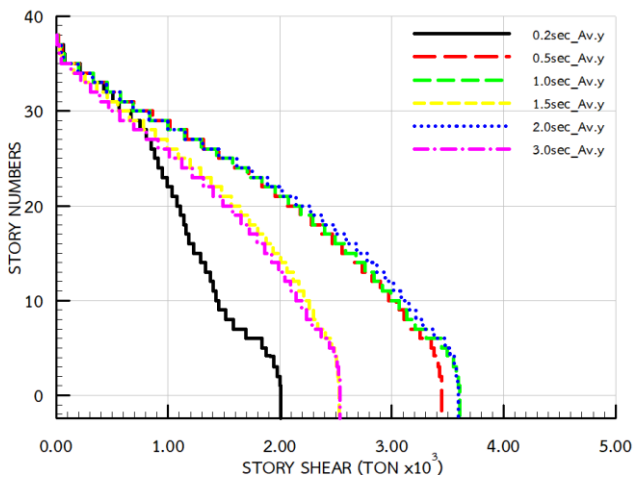
ผลของค่าเฉลี่ยแรงเฉือนที่ฐานที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้าง โดยใช้ค่าความเร่งผลตอบสนองที่คาบการสั่นของอาคาร ที่ 0.2 วินาที 0.5 วินาที 1.0 วินาที 1.5 วินาที 2.0 วินาที และ 3.0 วินาที [1] ดังแสดงในรูปที่ 3 ในแนวแกน X,Y ตามสมการเคลื่อนที่ (1) ผลการวิเคราะห์หวิเคราะห์โครงสร้างประวัติเวลาแบบเชิงเส้น (Linear Time History Analysis ,LTHA) [4] สามารถสรุปได้ดังนี้

4.3.1 ค่าความเร่งผลตอบสนองที่คาบการสั่นของอาคารในแนวแกน X ที่คาบการสั่น 1.0 วินาทีที่มีค่าเฉลี่ยแรงเฉือนที่ฐานสูงสุด ถัดลงมาคือคาบการสั่น 0.5 วินาที,คาบการสั่น 3.0 วินาที,คาบการสั่น 1.5 วินาทีและคาบการสั่น 0.2 วินาที [1] ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 7

4.3.2 ค่าความเร่งผลตอบสนองที่คาบการสั่นของอาคารในแนวแกน Y ที่คาบการสั่น 2.0 วินาทีที่มีค่าเฉลี่ยแรงเฉือนที่ฐานสูงสุด ถัดลงมาคือคาบการสั่น 1.0 วินาที,คาบการสั่น 0.5 วินาที,คาบการสั่น 1.5 วินาที,คาบการสั่น 2.0 วินาทีวินาทีและคาบการสั่น 0.2 วินาที [1] ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 8



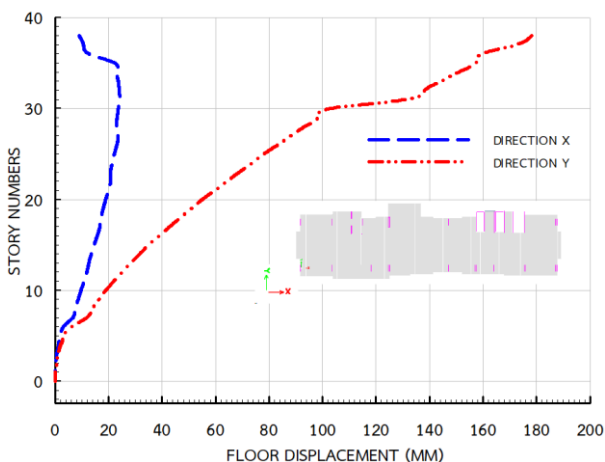
รูปที่ 7 แรงเฉือนที่ฐานรวมเฉลี่ยแกน X



รูปที่ 8 แรงเฉือนที่ฐานรวมเฉลี่ยแกน Y

4.4 ผลการเคลื่อนตัวเฉลี่ยด้านข้างของโครงสร้าง

ผลจากการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้าง แบบอีลาสติก (Elastic Displacement) [1] ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีประวัติเวลาแบบเชิงเส้น (Linear Time History Analysis, LTHA) [4] มีการเคลื่อนตัวรวมสูงสุดเฉลี่ยในแกน X แกน Y เท่ากับ 24.11 มิลลิเมตร 178.06 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าที่ยอมให้ $\frac{H}{500} = 259.20\text{มม.}$ [1] ดังแสดงในรูปที่ 9



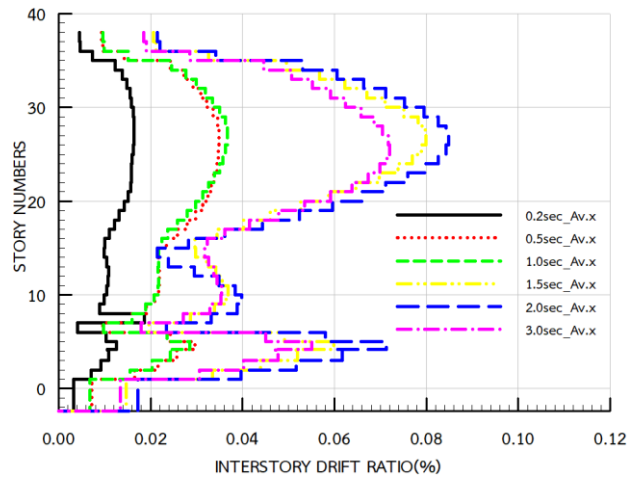
รูปที่ 9 การเคลื่อนตัวด้านข้างเฉลี่ยแกน X,Y

4.5 ผลของการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น

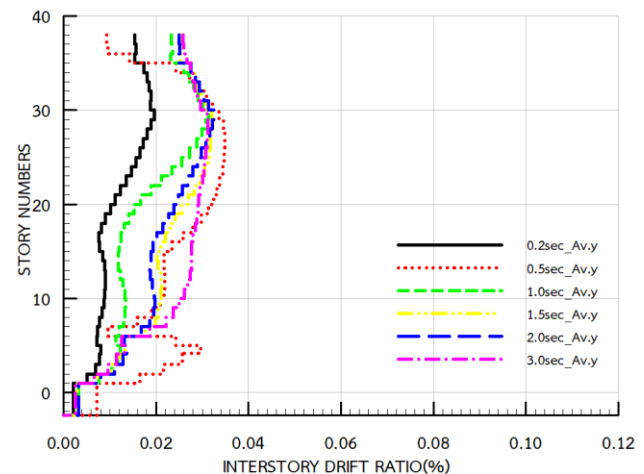
ผลของการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นได้แสดงผลค่าเฉลี่ยได้จากการวิเคราะห์โครงสร้าง โดยใช้ค่าความเร่งผลตอบสนองที่คาบการสั่นของอาคาร ที่ 0.2 วินาที 0.5 วินาที 1.0 วินาที 1.5 วินาที 2.0 วินาที และ 3.0 วินาที [1] ดังแสดงในรูปที่ 4 ในแนวแกน X,Y จากสมการที่ (1) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างประวัติเวลาแบบเชิงเส้น (Linear Time History Analysis, LTHA) [4] สามารถสรุปได้ดังนี้

4.5.1 ค่าความเร่งผลตอบสนองที่คาบการสั่นของอาคารใน แนวแกน X ที่คาบการสั่น 2.0 วินาทีที่มีค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นมากที่สุด ถัดลงมาคือคาบการสั่น 1.5 วินาที, คาบการสั่น 3.0 วินาที, คาบการสั่น 0.5 วินาที, คาบการสั่น 1.0 และคาบการสั่น 0.2 วินาที [1] ตามลำดับ ทั้งนี้การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นมีค่าไม่เกินค่าที่ยอมให้ $\Delta_a = 1.5\%$ ของความสูงระหว่างชั้น [1] ดังแสดงในรูปที่ 10

4.5.2 ค่าความเร่งผลตอบสนองที่คาบการสั่นของอาคารในแนวแกน Y ที่คาบการสั่น 0.5 วินาทีที่มีค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นมากที่สุด ถัดลงมาคือคาบการสั่น 3.0 วินาที,คาบการสั่น 1.5 วินาที,คาบการสั่น 2.0 วินาที,คาบการสั่น 1.0 และคาบการสั่น 0.2 วินาที [1] ตามลำดับ ทั้งนี้การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นมีค่าไม่เกินค่าที่ยอมให้ $\Delta_a = 1.5\%$ ของความสูงระหว่างชั้น [1] ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 10 การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นเฉลี่ย แกน X



รูปที่ 11 การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นเฉลี่ย แกน Y

5. สรุปผล

ผลจากการศึกษาพฤติกรรมของอาคารสูงเดิมที่มีชั้นอ่อนภายใต้แผ่นดินไหวสำหรับอาคารตัวอย่างที่ตั้งอยู่ในกรุงเทพมหานคร ขนาด 34 ชั้น มีความสูงรวมทั้ง 129.60 เมตร โดยการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีความไม่สม่ำเสมอของสติฟเนสหรือมีชั้นที่อ่อน ด้วยวิธีประวัติเวลาแบบเชิงเส้น (Linear Time History Analysis ,LTHA) [1] และเปรียบเทียบผลของสติฟเนสแนวตั้ง (Vertical Stiffness) ผลของค่าเฉลี่ยของแรงเฉือนที่ฐานรวม (Total Base Shear) ผลของการเคลื่อนตัวด้านข้าง (Horizontal Displacement) และผลของการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้น (Inter story drift) กับข้อกำหนดมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 [1] สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างสร้างเดิมร่วมกับผนังก่อ ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าโครงสร้างที่ชั้น 7 มีค่าสติฟเนสด้านแนวตั้ง แกน X แกน Y ร้อยละ 39.40 ,41.30 ของชั้นถัดไปตามลำดับ และร้อยละ 41.30,43.90 ของค่าเฉลี่ยของสามชั้นถัดไปตามลำดับ น้อยกว่าข้อกำหนดมาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61 [1] ดังนั้นโครงสร้างที่ชั้น 7 มีพฤติกรรมเป็นชั้นที่อ่อนมาก

5.2 ผลของค่าเฉลี่ยแรงเฉือนรวมที่ฐาน โดยใช้ค่าความเร่งผลตอบสนองที่คาบการสั่นของอาคาร ที่ 0.2 วินาที 0.5 วินาที 1.0 วินาที 1.5 วินาที 2.0 วินาที และ 3.0 วินาที [1] ในแนวแกน X แกน Y พบว่าค่าแรงเฉือนรวมที่ฐานมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน ทั้งแกน 2 แกน มีค่าผลตอบสนองที่แตกต่างกัน โดยในแนวแกน X มีค่าตอบสนองสูงสุดที่คาบการสั่นของอาคาร ที่ 1.0 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 7 และในแนวแกน Y มีค่าตอบสนองมากที่สุดที่คาบการสั่นของอาคาร ที่ 2.0 วินาที [1]

5.3 ค่าเคลื่อนตัวด้านข้างเฉลี่ยของอาคารในแนวแกน X และแกน Y มีค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดมีค่าเท่ากับ 24.11 มิลลิเมตร 178.06 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าข้อกำหนดมาตรฐาน มยผ.1301/1302-61 อยู่เกณฑ์ค่าที่ยอมให้ $\frac{H}{500} = 259.20$ มิลลิเมตร [1]

5.4 ค่าเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นเฉลี่ยของอาคารในแนวแกน X แนวแกน Y มีค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นสูงสุดที่ชั้น 7 มีค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นร้อยละ 0.070 , 0.035 ตามลำดับ โดยค่าเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นน้อยกว่าข้อกำหนดมาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61 [1] อยู่เกณฑ์ค่าที่ยอมให้ร้อยละ 1.5 ของความสูงระหว่างชั้น

6. อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์โครงสร้างด้านทานแผ่นดินไหวสำหรับอาคารสูงเดิมในกรุงเทพมหานครที่อาคารมีความไม่สม่ำเสมออย่างมากของสติฟเนสหรือมีชั้นที่อ่อนอย่างมาก (Stiffness-Extreme Soft Story Irregularity) ด้วยวิธีประวัติเวลาแบบเชิงเส้น (Linear Time History Analysis ,LTHA) โดยใช้ค่าความเร่งผลตอบสนองที่คาบการสั่นของอาคาร ที่ 0.2 วินาที 0.5 วินาที 1.0 วินาที 1.5 วินาที 2.0 วินาที และ 3.0 วินาที ตามมาตรฐาน มยผ. 1301/1302-61 [1] และใช้ค่าความหน่วงของโครงสร้างร้อยละ 2.5 [6] ซึ่งพบว่าโครงสร้างมีความไม่สม่ำเสมออย่างมากของสติฟเนสที่ชั้น 7 แต่โครงสร้างอาคารยังสามารถต้านทานต่อแรงแผ่นดินไหวได้อย่างปลอดภัย ผู้วิจัยเห็นว่าถ้าต้องการทราบถึงประสิทธิภาพหรือสมรรถนะความต้านทานแผ่นดินไหวจริงๆของโครงสร้างอาคารจะต้องวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธี

ประวัติเวลาแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Time history Analysis ,NLTHA)

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ต้องขอขอบคุณอาจารย์ ที่ปรึกษา ดร.ประภิต ชมชื่น ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในทุกด้าน ของงานวิจัย และขอขอบคุณน้อง ๆ ที่คอยสนับสนุนในการทำวิจัย

8. การอ้างอิง

- [1] มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านการสั่นสะเทือนของ แผ่นดินไหว มยผ. 1301/1302-61 ปี 2561, กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย
- [2] นคร กูว์โรดม (2561). *พลศาสตร์โครงสร้างพื้นฐาน สำหรับการออกแบบต้านทานแรงลมและแรงเนื่องจากแผ่นดินไหว* สำนักพิมพ์ บริษัท เอส.พี.เอ็ม.การพิมพ์ จำกัด กรุงเทพฯ,ประเทศไทย
- [3] มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านการสั่นสะเทือนของ แผ่นดินไหว มยผ. 1302-52 ปี 2552, กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย
- [4] Computers and Structures, Inc., Integrated Building Design Software, User's guide ETABS version 2018.1.1, USA., 2018.1.1
- [5] Chopra AK, (1995). *Structural Dynamics of structures Theory and applications Earthquake engineering fourth edition*, University of California at Berkley.
- [6] Pacific Earthquake Research Center (2017). *Tall Building Initiative: Guidelines for Performance Based Seismic Design of Tall Buildings*, Report no.2017/06, Berkeley, CA