การเปรียบเทียบการวิเคราะห์โครงสร้างกับการทดสอบโครงสร้างภายใต้การเคลื่อนที่ของผิวดิน

Comparison between Analyzing and Testing of Structures under Ground Movements

ณรงค์ฤทธิ์ พร้อมจะบก[1,*] และ ประกิต ชมชื่น[1]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพฯ
*Corresponding author; E-mail address: 6319310002@mut.ac.th.

บทคัดย่อ

บทความนี้วิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างในระนาบ 4 ชั้นด้วยวิธีประวัติเวลาเชิงเส้น 2 หลักการคือ 1.หลักการความเร่ง และ 2.หลักการเคลื่อนที่ ผลตอบสนองจากการวิเคราะห์โครงสร้างแสดงในรูปแบบของความเร่งแต่ละชั้น นอกจากนี้ยังทำการทดสอบแบบจำลองโครงสร้างด้วยโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวพร้อมทั้งตรวจวัดความเร่งที่เกิดขึ้นจริงแต่ละชั้นเพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างทั้ง 2 หลักการ การทดสอบทำโดยกำหนดการเคลื่อนที่ของฐานแบบจำลองแบบฮาร์โมนิก จำนวน 4 ความถี่ได้แก่ 1.0 Hz 2.0 Hz 3.0Hz และ 4.0 Hz การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบพบว่าผลการวิเคราะห์ประวัติเวลาของแบบจำลองโครงสร้างด้วยหลักการความเร่งมีค่าสูงกว่าวิธีการวิเคราะห์ด้วยหลักการการเคลื่อนที่และผลจากการทดสอบจำลองโครงสร้างด้วยโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความถี่ของการเคลื่อนที่ของฐานสูงขึ้น

คำสำคัญ: โต๊ะจำลองแผ่นดินไหว, การวิเคราะห์ประวัติเวลาเชิงเส้น, การทดสอบอาคารภายใต้แผ่นดินไหว

This study performs time history analyses of 4-storey plane building model under base movements with 2 approaches i.e., acceleration and displacement approaches. Results of the analysis show in form of acceleration history at each building level. This study also performs the shaking table test to verify the analytical results. The building model is testing under 4 different frequencies harmonic movements i.e., 1.0 Hz, 2.0 Hz, 3.0 Hz and 4.0 Hz. Experimental results in form of acceleration history at each level are compared with the analytical results. The comparisons show that the acceleration approach gives higher maximum acceleration than those from experiment. While, the displacement approach gives more accurate results.

Keywords: Shaking Table, Linear Time-History Analysis, Building testing under Earthquake.

1. บทนำ

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีประวัติเวลาเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและเชื่อถือสำหรับการศึกษาผลกระทบของแผ่นดินไหวต่อโครงสร้าง การวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้แรงกระทำจากแผ่นดินไหวด้วยวิธีประวัติเวลาสามารถทำได้ทั้งแบบกำหนดความเร่งแก่โครงสร้างโดยตรงเรียกว่า “การวิเคราะห์ด้วยหลักการความเร่ง (Acceleration Approach)” และแบบกำหนดการเคลื่อนที่ของผิวดินแก่ฐานรากของโครงสร้างเรียกว่า “การวิเคราะห์ด้วยหลักการการเคลื่อนที่ (Displacement Approach)” ทฤษฎีการวิเคราะห์โครงสร้างแสดงอย่างชัดเจนว่าการวิเคราะห์ด้วยหลักการความเร่งเป็นรูปแบบอย่างง่ายของการวิเคราะห์ด้วยหลักการการเคลื่อนที่ เนื่องจากความซับซ้อนของแรงกระทำต่อโครงสร้างอันเป็นผลจากความหน่วงที่แตกต่างกันจะไม่ได้รับการพิจารณาเมื่อวิเคราะห์โครงสร้างด้วยหลักการความเร่ง และผลเฉลยของทั้ง 2 หลักการจะมีค่าใกล้เคียงกันอย่างมากสำหรับระบบโครงสร้างที่มีอัตราส่วนความหน่วงน้อยอย่างเช่นโครงสร้างในงานวิศวกรรมโยธา [1]

Naibin และคณะ [2] แสดงผลการวิเคราะห์ระบบหล่อเย็นของเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ภายใต้แรงกระทำจากแผ่นดินไหวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยทั้งหลักการความเร่งและหลักการการเคลื่อนที่ ซึ่งพบว่าแม้โครงสร้างจะมีอัตราส่วนความหน่วงน้อยแต่ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจากทั้ง 2 หลักการมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ

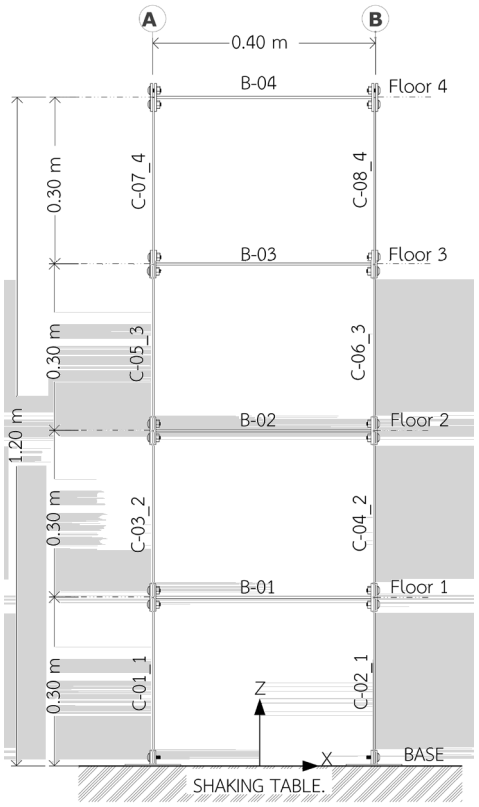
แม้จะมีการทดสอบแบบจำลองโครงสร้างกับโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวจำนวนมาก [3-8] แต่การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวิเคราะห์โครงสร้างแบบประวัติเวลาด้วยทั้ง 2 หลักการยังไม่มีผู้ใดกล่าวถึง

การศึกษานี้จึงศึกษาเปรียบเทียบผลการตอบสนองของโครงสร้างที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างแบบประวัติเวลาด้วยหลักการความเร่งและหลักการการเคลื่อนที่กับผลการตอบสนองของโครงสร้างที่วัดได้จากการทดสอบจริง เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพของแต่ละหลักการวิเคราะห์โครงสร้างเทียบกับการทดสอบจริง โดยการทดสอบที่ใช้จะเป็นการทดสอบแบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายด้วยโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักรที่มีความถี่แตกต่างกัน รายละเอียดแสดงดังต่อไปนี้

2. แบบจำลองโครงสร้างอาคารและคุณสมบัติพื้นฐาน

แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่ายที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นแบบจำลองโครงสร้างอาคารสูง 4 ชั้น เสาทำจากอะคริลิคหนา 3 มิลลิเมตร กว้าง 5 เซนติเมตร และยาว 30 เซนติเมตร คานเหล็กหนา 4 มิลิเมตร กว้าง 5 เซนติเมตร และยาว 40 เซนติเมตร ยึดกันด้วยข้อต่อเหล็กและน็อต เพื่อให้แบบจำลองโครงสร้างมีลักษณะเป็นอาคารแบบเฉือนในระนาบ (Plane Shear Building) รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 1

คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างได้จากการทดสอบวัสดุจริงแสดงดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2 สำหรับอะคริลิกและเหล็กตามลำดับ



รูปที่ 1 รายละเอียดแบบจำลองของโครงสร้างอาคาร

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของอะคริลิก

รหัส	ความหนา (มม.)	ความกว้าง (มม.)	โมดูลัสยืดหยุ่น (กก./ซม.)
C-01_1	2.80	50.00	32,754.02
C-02_1	2.80	50.00	32,754.54
C-03_2	2.70	50.00	32,748.27
C-04_2	2.70	50.00	32,734.50
C-05_3	2.70	50.00	32,734.50
C-06_3	2.70	50.00	32,709.98
C-07_4	2.70	50.00	31,709.98
C-08_4	2.70	50.00	31,709.48

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกลของคานเหล็ก

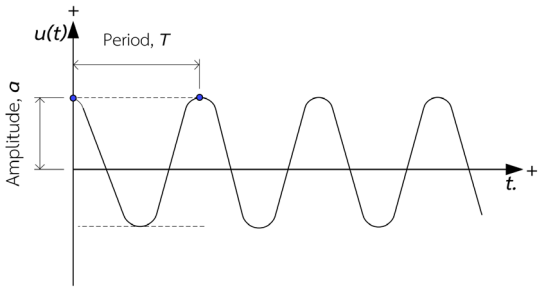
รหัส	ความหนา (มม.)	ความกว้าง (มม.)	โมดูลัสยืดหยุ่น (กก./ซม.)	น้ำหนัก (กก.)
B-01	4.00	50.00	2.04×10^6	0.978
B-02	4.00	50.00	2.04×10^6	0.980
B-03	4.00	50.00	2.04×10^6	0.975
B-04	4.00	50.00	2.04×10^6	0.981

3. การทดสอบด้วยโต๊ะจำลองแผ่นดินไหว

การศึกษานี้ใช้โต๊ะจำลองแผ่นดินไหวทิศทางเดียวดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของผิวดินที่ฐานของโครงสร้างและวัดผลตอบสนองของโครงสร้างภายใต้การเคลื่อนที่ของฐานด้วยอุปกรณ์วัดความเร่ง รายละเอียดดังนี้

3.1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษา

การเคลื่อนที่ของโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นการเคลื่อนที่ฮาร์โมนิกอย่างง่ายดังแสดงในรูปที่ 2 โดยใช้ความถี่แตกต่างกัน 4 ค่าดังสรุปในตารางที่ 3 สมการการเคลื่อนที่และความเร่งของโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวแสดงดังในสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ



รูปที่ 2 ลักษณะการเคลื่อนที่ของโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวที่ใช้ทดสอบ

$$u_{(t)} = a\cos\omega t \quad (1)$$

$$\ddot{u}_{(t)} = -a\omega^2 \cos\omega t \quad (2)$$

ตารางที่ 3 แสดงการเคลื่อนที่และความเร่งจะใช้ป้อนในคอมพิวเตอร์โปรแกรม

ความถี่ (เฮิรตซ์)	การเคลื่อนที่สูงสุด (มม.)	ความเร่งสูงสุด (g.)	จำนวนรอบ (รอบ)	เวลา (วินาที)
1.00	42.500	0.171	5	19.95
2.00	21.230	0.342	5	20.53
3.00	14.150	0.512	6	19.33
4.00	10.620	0.685	11	20.25

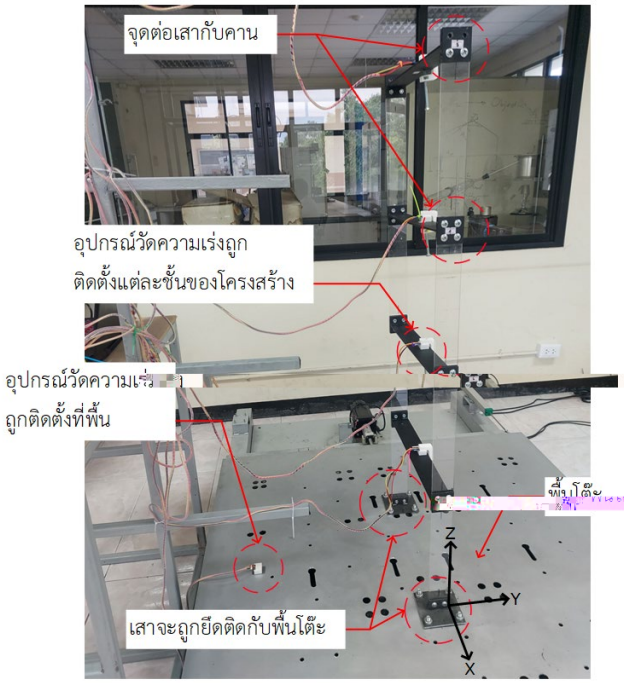
จากตารางที่ 3 แสดงว่าการทดสอบที่ความถี่แตกต่างกันจะมีขนาดของการเคลื่อนที่สูงสุด ความเร่งสูงสุด จำนวนรอบการเคลื่อนที่ และเวลาในการ

ทดสอบไม่เท่ากัน จากตารางยังแสดงอีกว่าการทดสอบกระทำโดยการกำหนดการเคลื่อนที่ที่ฐานของโครงสร้างตามจำนวนรอบที่กำหนด จากนั้นหยุดการเคลื่อนที่ของฐานโดยตรวจวัดความเร่งต่อจนกระทั่งโครงสร้างกลับสู่ภาวะหยุดนิ่งหรือใกล้หยุดนิ่งจึงเป็นเวลาของการทดสอบทั้งหมด

จากรายละเอียดการทดสอบดังกล่าวแสดงว่าพฤติกรรมของโครงสร้างสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงได้แก่ช่วงพฤติกรรมการสั่นภายใต้สิ่งเร้า (Force Vibration) และพฤติกรรมการสั่นอิสระ (Free Vibration) การศึกษานี้ใช้พฤติกรรมกาสั่นอิสระของโครงสร้างเพื่อประเมินอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างแบบจำลอง ซึ่งทุกการทดสอบให้ค่าตรงกันว่าแบบจำลองโครงสร้างมีอัตราส่วนความหน่วงประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์

3.2 รายละเอียดการติดตั้งแบบจำลองโครงสร้างและอุปกรณ์ตรวจวัด

เสาของแบบจำลองโครงสร้างทั้ง 2 เสาจะถูกยึดติดกับพื้นโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวด้วยจุดรองรับเหล็กชนิดเดียวกับจุดต่อระหว่างคานกับเสา อุปกรณ์วัดความเร่งถูกติดตั้งที่พื้นของโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวและที่แต่ละชั้นของโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3

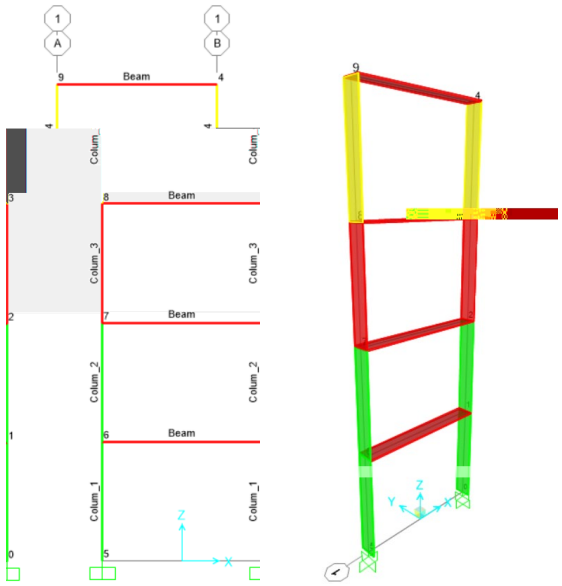


รูปที่ 3 การติดตั้งแบบจำลองโครงสร้างเข้ากับโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวและตำแหน่งอุปกรณ์วัดความเร่ง

4. การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

4.1 แบบจำลองโครงสร้างในคอมพิวเตอร์

การศึกษานี้วิเคราะห์โครงสร้างด้วยหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองโครงสร้างในคอมพิวเตอร์ถูกสร้างขึ้นตามขนาดจริงของแบบจำลองโครงสร้างทางกายภาพทุกชิ้นส่วน คานและเสาจำลองด้วยเอลิเมนต์แบบโครงข้อแข็ง (Frame Elements) จุดต่อทุกจุดกำหนดให้เป็นแบบแข็งเกร็ง (Rigid Connections joint) ที่คำนึงถึงบริเวณแข็งเกร็งพิเศษที่ปลาย (Rigid - end Zone) จุดรองรับกำหนดให้เป็นจุดรองรับแบบยึดแน่น (Fixed Supports) คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้กำหนดให้กับชิ้นส่วนโครงสร้างใช้ค่าที่ได้จากการทดสอบวัสดุจริงดังกล่าวแล้วในหัวข้อที่ 2.1 แบบจำลองในคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แบบจำลองของโครงสร้างในคอมพิวเตอร์

4.2 คุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง

การศึกษานี้ใช้การวิเคราะห์เชิงโหมด (Modal Analysis) สำหรับการคำนวณคุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง คุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์ของโครงสร้างที่ได้จากการวิเคราะห์สรุปดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คุณสมบัติพื้นฐานทางพลศาสตร์ของโครงสร้างที่ศึกษา

โหมด	คาบ (วินาที)	ความถี่ธรรมชาติ (เฮิรตซ์)	มวลประสิทธิผล (ร้อยละ)
1	1.0727	0.932	0.889
2	0.372	2.687	0.084
3	0.243	4.114	0.019
4	0.197	5.067	0.003

4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างแบบประวัติเวลา

การวิเคราะห์โครงสร้างแบบจำลองด้วยวิธีประวัติเวลา หรือ Time History Analysis ซึ่งการวิเคราะห์โครงสร้างแบบประวัติเวลานี้ยังแบ่งออกเป็นแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น (linear Response History Analysis และ Nonlinear Response History Analysis) โดยวิธีการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นนั้นต้องทราบความแข็งแกร็งและกำลังรับน้ำหนัก

ของชิ้นส่วนโครงสร้างตั้งแต่ก่อนการเคลื่อนตัวและหลังจุดครากจนถึงจุดวิบัติก่อนเริ่มการวิเคราะห์ ส่วนใหญ่มักจะใช้วิเคราะห์โครงสร้างที่มีความสำคัญมาก ๆ เช่น เขื่อน โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ โครงสร้างใต้ดิน แต่สำหรับบทความนี้เสนอวิธีการวิเคราะห์โดยวิธีประวัติเวลาแบบเชิงเส้น

4.3.1 หลักการของความเร่ง

การเคลื่อนที่ของความเร่งที่ผิวดินได้จากการสมดุลแรงทั้งหมด โดยเกิดจากการเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่ฐานรองรับอย่างมีความเร่งจากตำแหน่งสมดุลซึ่งส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ทั้งระบบ พฤติกรรมของโครงสร้างเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว ระยะกระจัดของการเคลื่อนที่ของฐานรองรับแทนด้วย u_g ส่วนระยะกระจัดสัมพัทธ์ระหว่างมวลกับที่ฐานรองรับแทนด้วย u ดังนั้นระยะกระจัดรวมของมวล u^t สำหรับโครงสร้างอาคารที่จำลองเป็นอาคาร N ชั้น หรือระดับขั้นความเสรีมากกว่าหนึ่ง (Multi degree of freedom system ,MDOF) ภายใต้พื้นที่มีการสั่นด้วยความเร่ง $\ddot{u}_g$คือ เสมือนมีแรงภายนอกกระทำต่อระบบค่าเท่ากับ $-m\ddot{u}_g(t)$ เรียกผลเช่นนี้ว่า แรงแผ่นดินไหวประสิทธิผล (Effective earthquake force) ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -M\{1\}\ddot{u}_g(t) \qquad (3)$$

โดยที่ คือ M มวล (Mass) ของโครงสร้างในการสร้างแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์ ,C คือ ความหน่วง (Dumping) คือคุณสมบัติในการสลายพลังงานของการเคลื่อนที่ และ K สติฟเนส (Stiffness) ของโครงสร้างมีนิยามคือค่าแรงที่ใช้ในการทำให้โครงสร้างเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนรูปเท่ากับหนึ่งหน่วยการกระจัด

4.3.2 หลักการของการเคลื่อนที่

สำหรับรูปแบบโครงสร้างแบบ 3 มิติ ที่มีกระทำภายใต้แรงแผ่นดินไหว (Seismic excitation) ที่ฐานรองรับ (Support) สามารถเขียนสมการที่มีความเกี่ยวข้องกัน (Coupled equation) ของการเคลื่อนที่ในรูปแบบเมทริกซ์แบบแบ่งพาร์ติชั้น แสดงดังในสมการที่ (4)

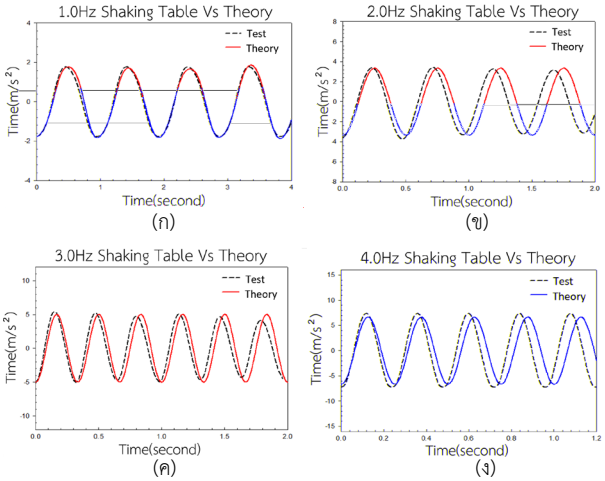
$$\begin{bmatrix} m & m_g \\ m_g^T & m_{gg} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{u}^t \\ \ddot{u}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & c_g \\ c_g^T & c_{gg} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{u}^t \\ \dot{u}_g \end{bmatrix} + \ldots$$
$$+ \begin{bmatrix} k & k_g \\ k_g^T & k_{gg} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u^t \\ u_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ P_g\,(t) \end{bmatrix} \qquad (4)$$

สมการที่ (4) ใช้ในวิธีการวิเคราะห์แบบประวัติเวลา ของหลักการการเคลื่อนที่ ด้วยการกำหนดการเคลื่อนที่เข้าที่ฐานรองรับของแบบจำลองโครงสร้างอาคาร (Support) เพื่อจะได้ถึงทราบถึงเงื่อนไขขอบเขตเริ่มต้น (Boundary condition) และสามารถแก้สมการ (4) เพื่อหาการเคลื่อนที่แบบสัมบูรณ์ (Absolute Traslational displacements) ของทั้งระบบโครงสร้างอาคารได้

5. การเคลื่อนที่ของโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวที่ได้จากการทดสอบ

5.1 ความเร่งที่ฐานของแบบจำลองโครงสร้างจากการทดสอบ

ความเร่งในการเคลื่อนที่ของโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวที่วัดได้จากการทดสอบถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าจากทฤษฎีเพื่อตรวจสอบความเร่งที่เกิดขึ้นจริงที่ฐานของแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 5

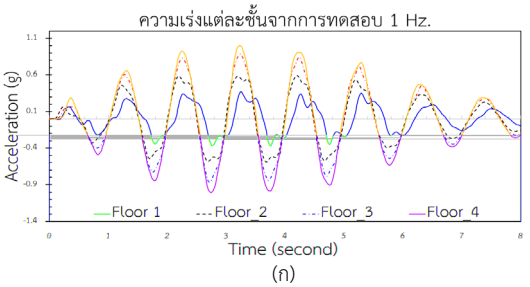


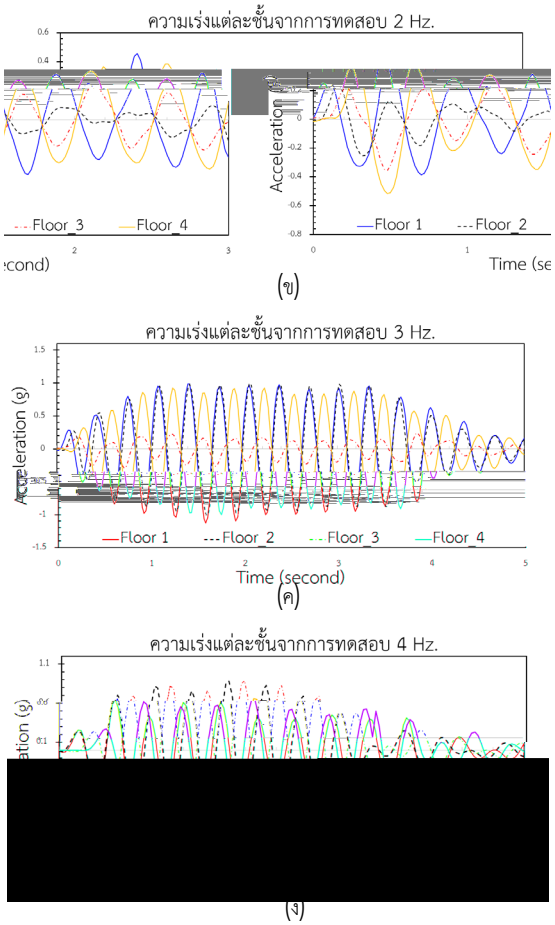
รูปที่ 5 เปรียบเทียบความเร่งของโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวจากการทดสอบกับทฤษฎี (ก) ความถี่ 1 Hz, (ข) ความถี่ 2 Hz, (ค) ความถี่ 3 Hz, และ (ง) ความถี่ 4 Hz

รูปที่ 5 แสดงผลการเปรียบเทียบความเร่งของการเคลื่อนที่ของโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวเทียบกับค่าที่กำหนดให้โต๊ะเคลื่อนที่ จากการเปรียบเทียบพบว่าการเคลื่อนที่ของโต๊ะมีความเร่งที่สอดคล้องกับค่าที่กำหนด ความแตกต่างบางส่วนอาจเป็นผลมาจากสัญญาณรบกวนซึ่งได้รับการกรองออกไปบางส่วนในการศึกษานี้

5.2 ความเร่งที่แต่ละชั้นของแบบจำลองโครงสร้างจากการทดสอบ

ผลการทดสอบในรูปแบบของผลตอบสนองของแบบจำลองโครงสร้างภายใต้การเคลื่อนที่ของฐานที่ความถี่แตกต่างกันสามารถแสดงในรูปแบบความเร่งของแต่ละชั้นของแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 6



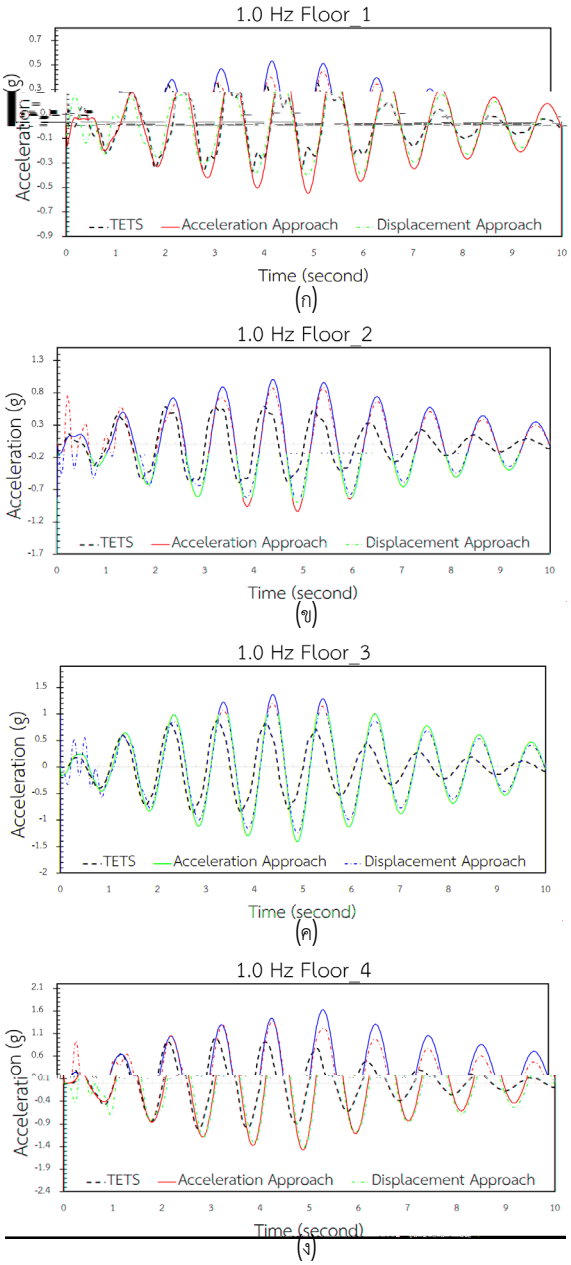


รูปที่ 6 ความเร่งแต่ละชั้นของโครงสร้างภายใต้การเคลื่อนที่ของโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวด้วยความถี่ต่างกัน (ก) ความถี่ 1 Hz, (ข) ความถี่ 2 Hz , (ค) ความถี่ 3 Hz , และ (ง) ความถี่ 4 Hz

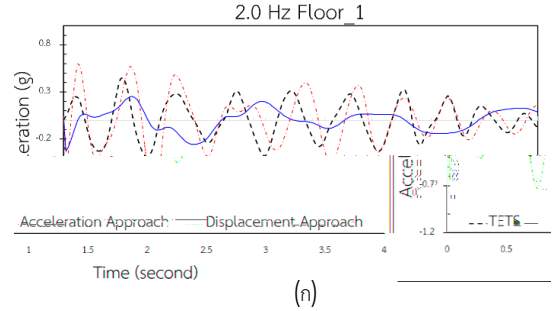
โดยเมื่อพิจารณารูปที่ 6(ก) ร่วมกับตารางที่ 4 จะพบว่า ความถี่ 1 Hz มีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติพื้นฐานของโครงสร้าง โครงสร้างทุกชั้นเกิดการเคลื่อนที่ร่วมในทิศทางเดียวกัน รูปที่ 6(ข) แสดงว่าการเคลื่อนที่ภายใต้ความถี่ 2 Hz ชั้นที่ 1 และ 2 เคลื่อนที่ไปทิศทางเดียวกัน ขณะที่ชั้น 3 และ 4 ก็เคลื่อนที่ไปทิศทางเดียวกันแต่ตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของชั้นที่ 1 และ 2 รูปที่ 6(ค) แสดงว่าการเคลื่อนที่ภายใต้ความถี่ 3 Hz ชั้นที่ 1 และ 2 เคลื่อนที่ไปทิศเดียวกันและมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของชั้นที่ 4 ขณะ ที่ชั้นที่ 3 เคลื่อนที่น้อยเมื่อเทียบกับชั้นอื่น รูปที่ 6(ง) แสดงว่าการเคลื่อนที่ของแต่ละชั้นมีความซับซ้อนมากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับตารางที่ 4 จะพบว่าการสั่นที่ความถี่ 4 Hz นั้นจะใกล้เคียงกับการสั่นธรรมชาติในรูปแบบที่ 3 ของแบบจำลองโครงสร้าง ซึ่งผลการทดสอบก็ให้ผลที่สอดคล้องกับทฤษฎี

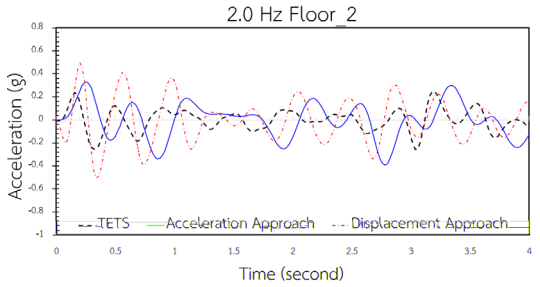
6. เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างกับผลการทดสอบ

ค่าความเร่งที่แต่ละชั้นของโครงสร้างที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างด้วยวิธีประวัติเวลาทั้งแบบหลักการความเร่งและหลักการการเคลื่อนที่ความถี่เพื่อศึกษาถึงความแม่นยำเหมาะสมของแต่ละวิธีวิเคราะห์เทียบกับผลการทดสอบ รูปที่ 7, 8, 9 และ 10 แสดงผลการเปรียบเทียบสำหรับการทดสอบที่ความถี่ 1.0 Hz , 2.0 Hz , 3.0 Hz และ 4.0 Hz ตามลำดับ

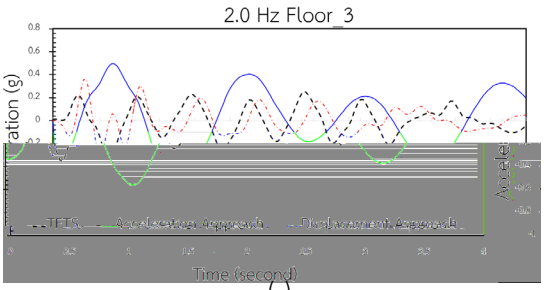


รูปที่ 7 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบของโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยหลักการความเร่งและหลักการการเคลื่อนที่ ความถี่ 1 Hz, (ก) ชั้นที่ 1, (ข) ชั้นที่ 2, (ค) ชั้นที่ 3, และ (ง) ชั้นที่ 4

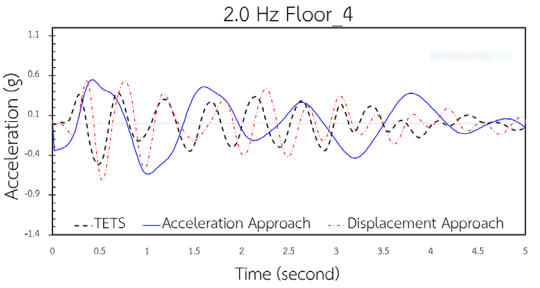




(ข)

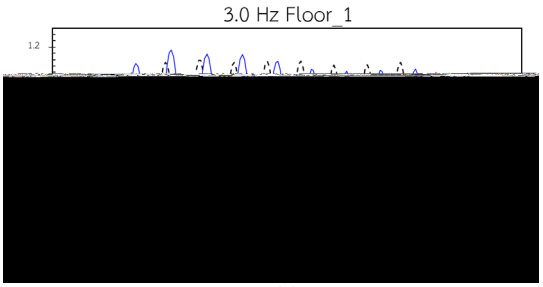


(ค)

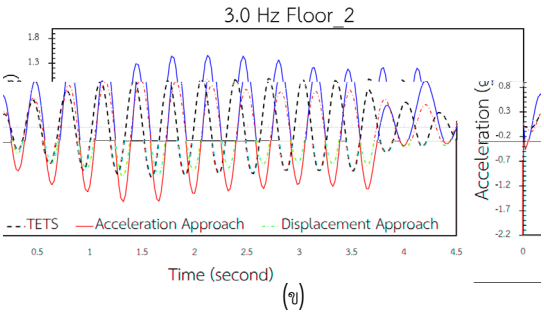


(ง)

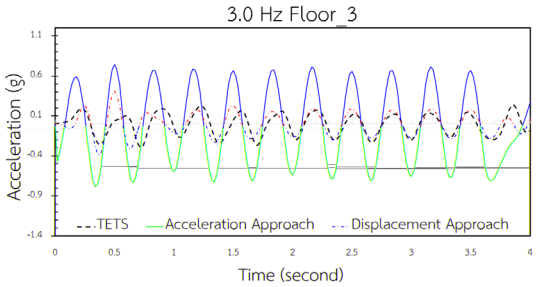
รูปที่ 8 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบของโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยหลักการความเร่งและหลักการการเคลื่อนที่ ความถี่ 2 Hz, (ก) ชั้นที่ 1, (ข) ชั้นที่ 2, (ค) ชั้นที่ 3, และ (ง) ชั้นที่ 4



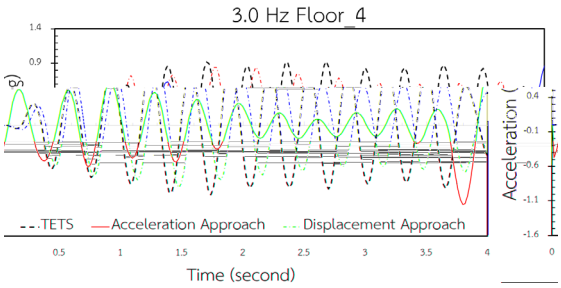
(ก)



(ข)

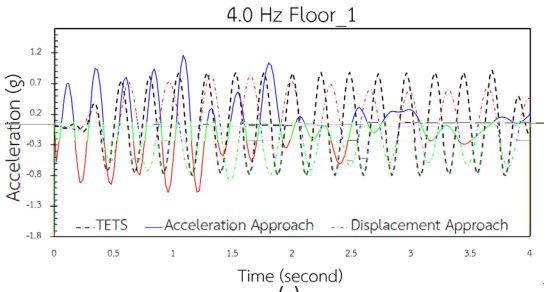


(ค)

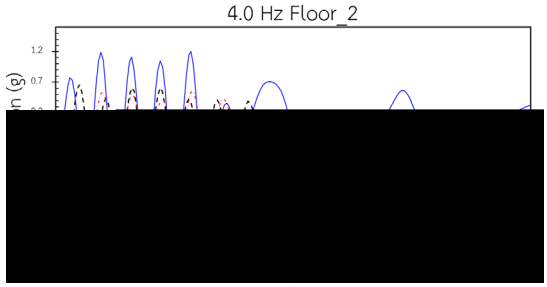


(ง)

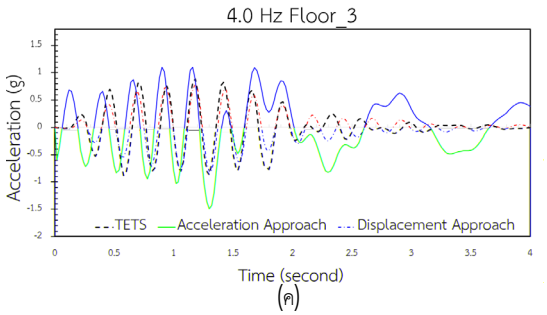
รูปที่ 9 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบของโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยหลักการความเร่งและหลักการการเคลื่อนที่ ความถี่ 3 Hz, (ก) ชั้นที่ 1, (ข) ชั้นที่ 2, (ค) ชั้นที่ 3, และ (ง) ชั้นที่ 4



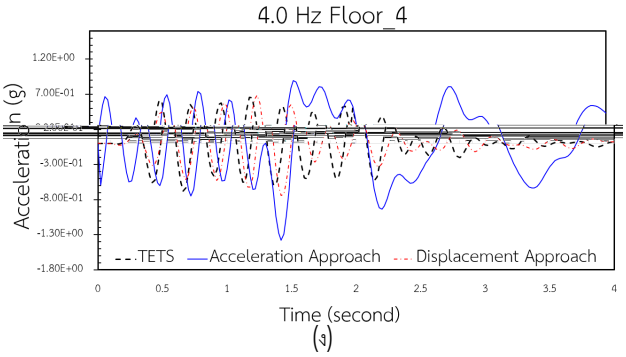
(ก)



(ข)



(ค)



รูปที่ 10 เปรียบเทียบผลจากการทดสอบของโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยหลักการความเร่งและหลักการการเคลื่อนที่ ความถี่ 4 Hz, (ก) ชั้นที่ 1, (ข) ชั้นที่ 2, (ค) ชั้นที่ 3, และ (ง) ชั้นที่ 4

จากผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าทั้งหลักการความเร่งและหลักการการเคลื่อนที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกันกับผลการทดสอบภายใต้การเคลื่อนที่ของฐานโครงสร้างที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติพื้นฐานของโครงสร้าง ผลการวิเคราะห์ด้วยหลักการการเคลื่อนที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากกว่าเมื่อฐานของโครงสร้างเกิดการเคลื่อนที่ด้วยความถี่ที่สูงขึ้น

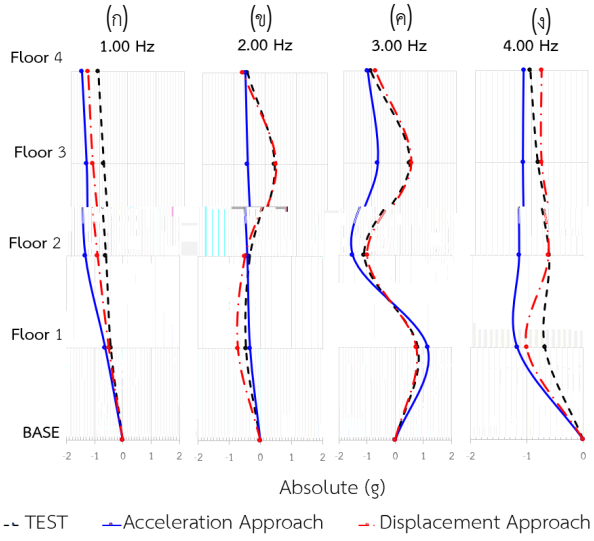
การทดสอบนี้ยังมีข้อจำกัดในการทดสอบคือ การหยุดการเคลื่อนที่ของโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวทำโดยผู้ทดสอบเอง ซึ่งอาจส่งผลให้ไม่ได้หยุดโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวที่ตำแหน่งเดียวกันกับค่าที่กำหนดให้เป็นการเคลื่อนที่ของฐานสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้าง ดังนั้นผลการตอบสนองในช่วงการสั่นอิสระจนถึงหยุดนิ่งอาจยังไม่สามารถเชื่อถือได้อย่างแน่นอน

7. เปรียบเทียบความเร่งสูงสุดของแบบจำลองโครงสร้าง

ความเร่งสูงสุดที่แต่ละชั้นของแบบจำลองโครงสร้างที่จากผลตอบสนองในรูปแบบประวัติเวลาในหัวข้อที่ 6 สามารถสรุปดังตารางที่ 5 และแสดงดังในรูปที่ 11 จากการเปรียบเทียบพบว่าลักษณะความเร่งที่ได้จากการทดสอบด้วยโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวมีแนวโน้มที่ตรงกับวิธีการวิเคราะห์ด้วยหลักการการเคลื่อนที่ในทุกกรณีที่พิจารณา อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์โครงสร้างจะให้ค่าสูงกว่าผลการทดสอบอยู่บ้างในบางตำแหน่งเช่นที่ชั้นที่ 1 ของแบบจำลองโครงสร้างภายใต้การเคลื่อนที่ของฐานที่ความถี่ 4.0 Hz เป็นต้น

รูปที่ 11 ยังแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยหลักการการเคลื่อนที่ให้รูปแบบความเร่งสูงสุดของแต่ละชั้นใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากกว่าผลจากการวิเคราะห์ด้วยหลักการความเร่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความถี่ของการเคลื่อนที่ของฐานสูงขึ้น

ตารางที่ 5 แสดงผลเปรียบเทียบผลในรูปแบบความเร่งสูงสุดของวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยหลักการความเร่งให้ค่าเฉลี่ยสูงกว่าผลการทดสอบ ร้อยละ 30.50 ขณะที่การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยหลักการการเคลื่อนที่ให้ค่าเฉลี่ยสูงกว่าผลการทดสอบ ร้อยละ 19.40



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าจากการวิเคราะห์ทั้ง 3 วิธี (ก) ความถี่ 1 Hz, (ข) ความถี่ 2 Hz, (ค) ความถี่ 3 Hz, และ(ง) ความถี่ 4 Hz

ตารางที่ 5 ร้อยละจากการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธีกับ ค่าจากการทดสอบจากแบบจำลองโครงสร้างด้วยโต๊ะจำลองแผ่นดินไหว

ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความเร่งสูงสุด (g)					
	ชั้นที่	ทดสอบ	วิธีความเร่ง	เปรียบเทียบการทดสอบ (%)	วิธีการเคลื่อนที่	เปรียบเทียบการทดสอบ (%)
1.0	1	-0.430	-0.542	20.60	-0.385	10.46
	2	-0.603	-1.021	35.06	-0.901	26.41
	3	-0.854	-1.423	39.98	-1.240	31.12
	4	-1.065	-1.608	32.83	-1.413	23.56
2.0	1	-0.464	-0.332	28.44	-0.730	36.43
	2	-0.340	-0.421	19.23	-0.501	32.13
	3	0.314	-0.558	43.72	0.356	11.79
	4	-0.569	-0.635	10.39	-0.716	20.53
3.0	1	0.797	1.154	30.93	0.757	5.01
	2	-1.091	-1.506	27.55	-0.988	9.44
	3	0.345	-0.785	56.05	0.408	15.44
	4	-1.030	-1.145	10.04	-0.856	15.77
4.0	1	-0.677	-1.166	41.93	-1.001	30.20
	2	-0.602	-1.131	46.77	-0.612	1.60
	3	-0.884	-1.149	23.06	-0.818	7.46
	4	-1.018	-1.137	10.45	-0.819	19.52
ค่าเฉลี่ยความคาดเคลื่อน (%)				30.50 %		19.40 %

***แสดงค่าความเร่งสูงสุดของแต่ละชั้นและทิศทางของการวิเคราะห์ด้วยหลักการความเร่งและหลักการการเคลื่อนที่ เปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบด้วยโต๊ะจำลองแผ่นดินไหว*

8. สรุปผล

ผลการวิเคราะห์ประวัติเวลาของแบบจำลองโครงสร้างด้วยหลักการความเร่งมีค่าสูงกว่าวิธีการวิเคราะห์ด้วยหลักการการเคลื่อนที่และผลจากการทดสอบจำลองโครงสร้างด้วยโต๊ะจำลองแผ่นดินไหวอย่างมีนัยยะสำคัญ แม้โครงสร้างที่ทดสอบจะมีอัตราส่วนความหน่วงที่ต่ำ ซึ่งเป็นอัตราส่วนความหน่วงระดับเดียวกับโครงสร้างทางงานวิศวกรรมโยธาทั่วไป ดังนั้นการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้แรงกระทำจากแผ่นดินไหวอาจต้องพิจารณาถึงความแม่นยำของวิธีการวิเคราะห์ที่เลือกใช้ด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือ ดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดีจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ประกิต ชมชื่น ในการแนะนำ ตรวจสอบ แก้ไข ให้ข้อเสนอแนะ ติดตามความก้าวหน้างานวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของอาจารย์เป็นอย่างยิ่งและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ และขอขอบคุณน้องนักศึกษา ป.ตรี ช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือตรวจวัดพร้อมทั้งช่วยในส่วนงานทดสอบจนบรรลุผลสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

[1] Anil k. Chopra (1989). *Dynamics of Structures.* Multiple Support Excitation, Inc., pp.387-391

[2] Jiang N., Mao Qing., and Zhang Y. (2007). Research on Time-history Input Methodology of Seismic Analysis. *Transactions, SMiRT 19, Toronto*, August 2007

[3] Andrea Tapia Andrade and Wilson Torres Berni. (2021). Evaluation of the Dynamic Properties of A 2D-Frame (MDOF) in a Shaking Table, Ingenius. Revista de Ciencia Tecnología.

[4] El-Attar A-G, White R.N. and Gergely P. (1991). Shake Table Test of a 1/6 Scale Two-Story Lightly Reinforced Concrete Building. *Technical Report NCEER-91-0017*, Buffalo, NY.

[5] Islam M. S. and Anam I. (2015). Seismic Shake Table Analysis of SDOF System Using Similitude Laws. *International Conference on Recent Innovation in Civil Engineering for Sustainable Development (IICSD-2015)*, Gazipur, Bangladesh.

[6] Sertac Tuhta, Furkan Gunday, and Obaidullah Abrar. (2019), Experimental Study on Effect of Seismic Damper to Reduce the Dynamic Response of Bench-Scale Steel Structure Model, *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, 5(5).

[7] Tomoshi Miyamura, Takuzo Yamashita, Hiroshi Akiba, and Makoto Ohsaki. (2014) Dynamic FE Simulation of Four-Story Steel Frame Modeled by Solid Elements and its Validation using Results of Full-Scale Shake-Table Test, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 44(9).

[8] Xilin Lu, Gongkang Fu, Weixing Shi and Wensheng Lu. (2008). *The Structural Design of Tall and Special Building*, Shake Table Model Testing and Its Application, 17., pp.181-201.