

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวด้วยระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบต่าง ๆ และตรวจสอบความถูกต้องของการใช้วิธีการลดลำดับของแบบจำลองกับอาคารสูง 76 ชั้น ภายใต้แรงลมที่ได้จากการทดลองในอุโมงค์ลม

3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างที่มีระดับชั้นความเร็วเดียว ที่ทำการติดตั้งระบบมวลหน่วงแบบต่าง ๆ

ในการศึกษานี้จะใช้อาคารใบหยก 1 เป็นอาคารตัวอย่างเพื่อจะทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและเปรียบเทียบผลการลดการสั่นไหวในกรณีการควบคุมแบบต่าง ๆ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นค่าพารามิเตอร์ในโหมดการสั่นที่หนึ่ง โดยที่ลักษณะของแรงภายนอกที่มากระทำต่อโครงสร้างใช้เป็นแบบฮาร์โมนิกที่มีขนาดแอมพลิจูด 0.2 กิโลนิวตันและมีความถี่เท่ากับความถี่ของโหมดการสั่นที่หนึ่งของโครงสร้าง กระทำเป็นเวลา 60 วินาที ซึ่งเมื่อทำการคำนวณหาระยะการเคลื่อนที่ของโครงสร้างในกรณีที่ไม่ติดตั้งระบบควบคุม และกรณีที่ทำการติดตั้งระบบควบคุมแบบต่าง ๆ ซึ่งใช้ค่าพารามิเตอร์ดังที่แสดงในตารางที่ 3.1 และแสดงสมการที่ใช้คำนวณของแต่ละระบบดังสมการด้านล่าง จะได้ผลเปรียบเทียบขนาดของระยะการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง (Displacement Response) ดังรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ

โครงสร้างหลัก:	$m_s = 4620$ ตัน	$k_s = 38600$ กิโลนิวตันต่อเมตร	$c_s = 534$ กิโลนิวตันวินาทีต่อเมตร
PTMD	: $m_d = 138$ ตัน	$k_d = 1091$ กิโลนิวตันต่อเมตร	$c_d = 80.8$ กิโลนิวตันวินาทีต่อเมตร
ATMD	: $\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	, $\mathbf{R} = 1 \times 10^{-5}$	
STMD	: $c_{d,min} = 0.00$ กิโลนิวตันวินาทีต่อเมตร	$c_{d,max} = 757$ กิโลนิวตันวินาทีต่อเมตร	

สมการที่ใช้คำนวณของแต่ละระบบ เป็นดังนี้

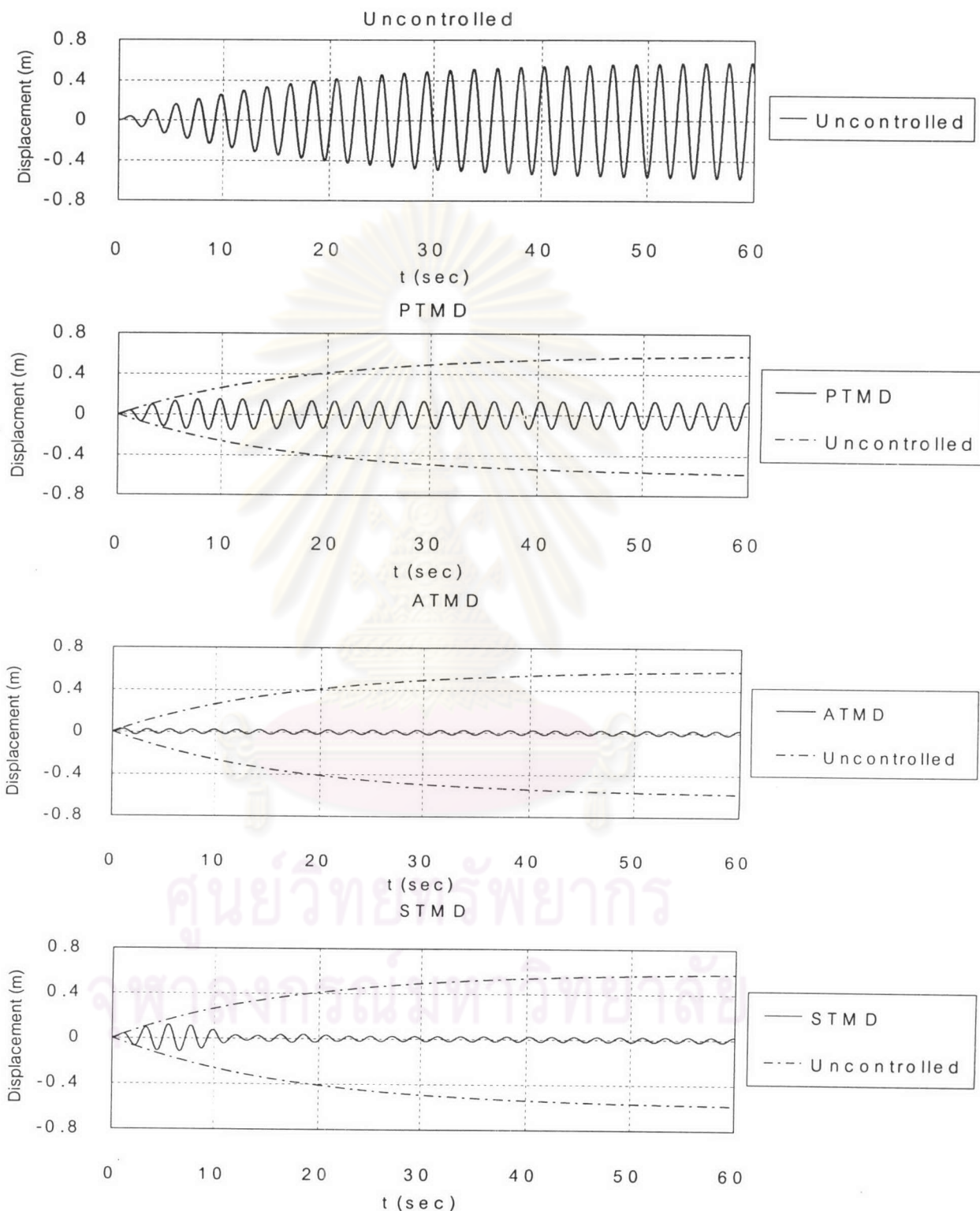
Uncontrolled: 
$$m_s \ddot{y}_s + c_s \dot{y}_s + k_s y_s = F_s \tag{3.1}$$

PTMD: 
$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ m_d & m_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{y}_s \\ \ddot{y}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & -c_d \\ 0 & c_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{y}_s \\ \dot{y}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & -k_d \\ 0 & k_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_s \\ y_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_s \\ F_d \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

ATMD: 
$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ m_d & m_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{y}_s \\ \ddot{y}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & -c_d \\ 0 & c_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{y}_s \\ \dot{y}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & -k_d \\ 0 & k_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_s \\ y_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_s + u(t) \\ F_d - u(t) \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

STMD: 
$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ m_d & m_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{y}_s \\ \ddot{y}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{y}_s \\ \dot{y}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & -k_d \\ 0 & k_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_s \\ y_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_s + u'(t) \\ F_d - u'(t) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

โดยที่  $u'(t) = c_d(t)\dot{y}_d$



รูปที่ 3.1 ภาพแสดงการเปรียบเทียบผลระยะการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง (Displacement Response) ในกรณีที่ทำการติดตั้งระบบควบคุมแบบต่าง ๆ

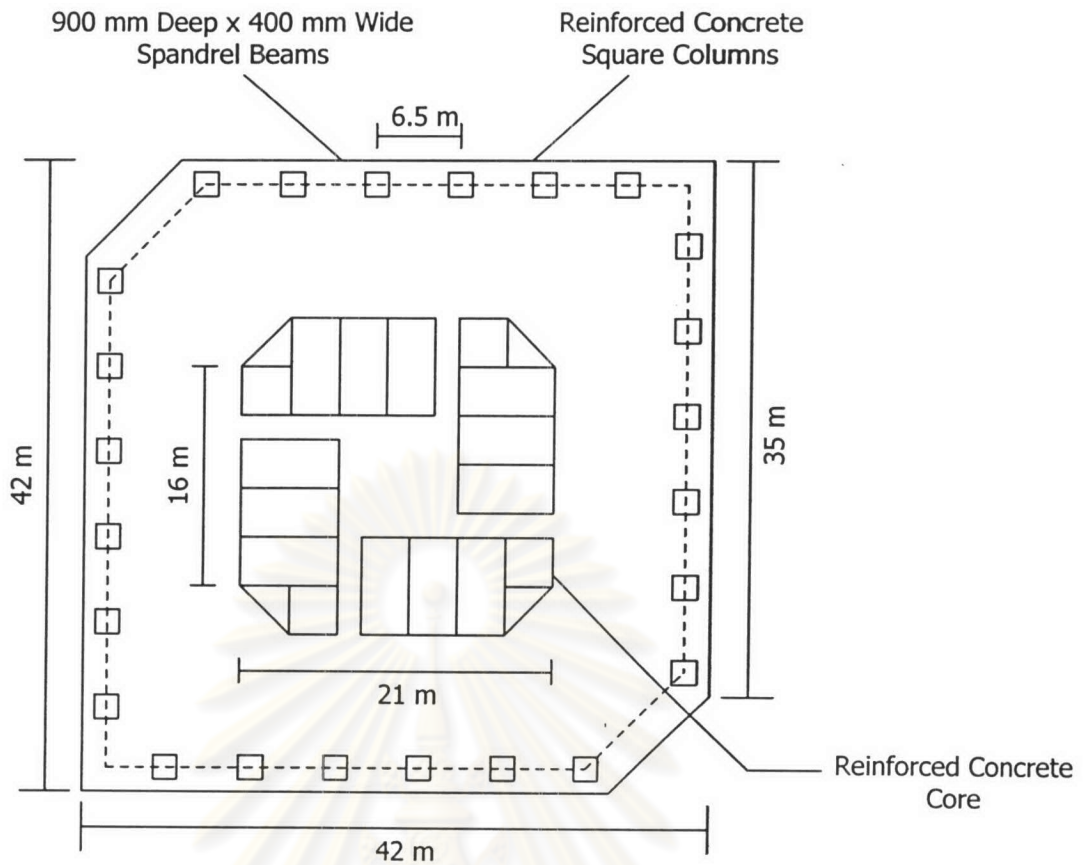
จากผลที่ได้ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1 พบว่าการลดระยะเวลาการเคลื่อนที่ของโครงสร้างจากการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ แอ็กทีฟ และเคมีแอ็กทีฟ สามารถช่วยลดการสั่นของโครงสร้างได้ โดยที่ประสิทธิภาพในการลดระยะเวลาการเคลื่อนที่ของโครงสร้างของวิธีการทั้งสามสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.2 ซึ่งจะพบว่าการลดระยะเวลาการเคลื่อนที่ของโครงสร้างโดยการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบเคมีแอ็กทีฟสามารถลดระยะเวลาการเคลื่อนที่ของโครงสร้างได้มากกว่าการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การลดระยะเวลาการเคลื่อนที่ของโครงสร้างของวิธีการควบคุมแบบต่าง ๆ เทียบกับกรณีที่ไม่มีการควบคุม

วิธีการควบคุม	การลดระยะเวลาการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)	
	ปริมาณสูงสุด	ปริมาณรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย
Uncontrolled	0	0
PTMD	74.1	72.8
ATMD	95.5	95.6
STMD	79.9	91.8

### 3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารสูง 76 ชั้น ที่รับแรงลม ทั้งที่มีและไม่มีติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ

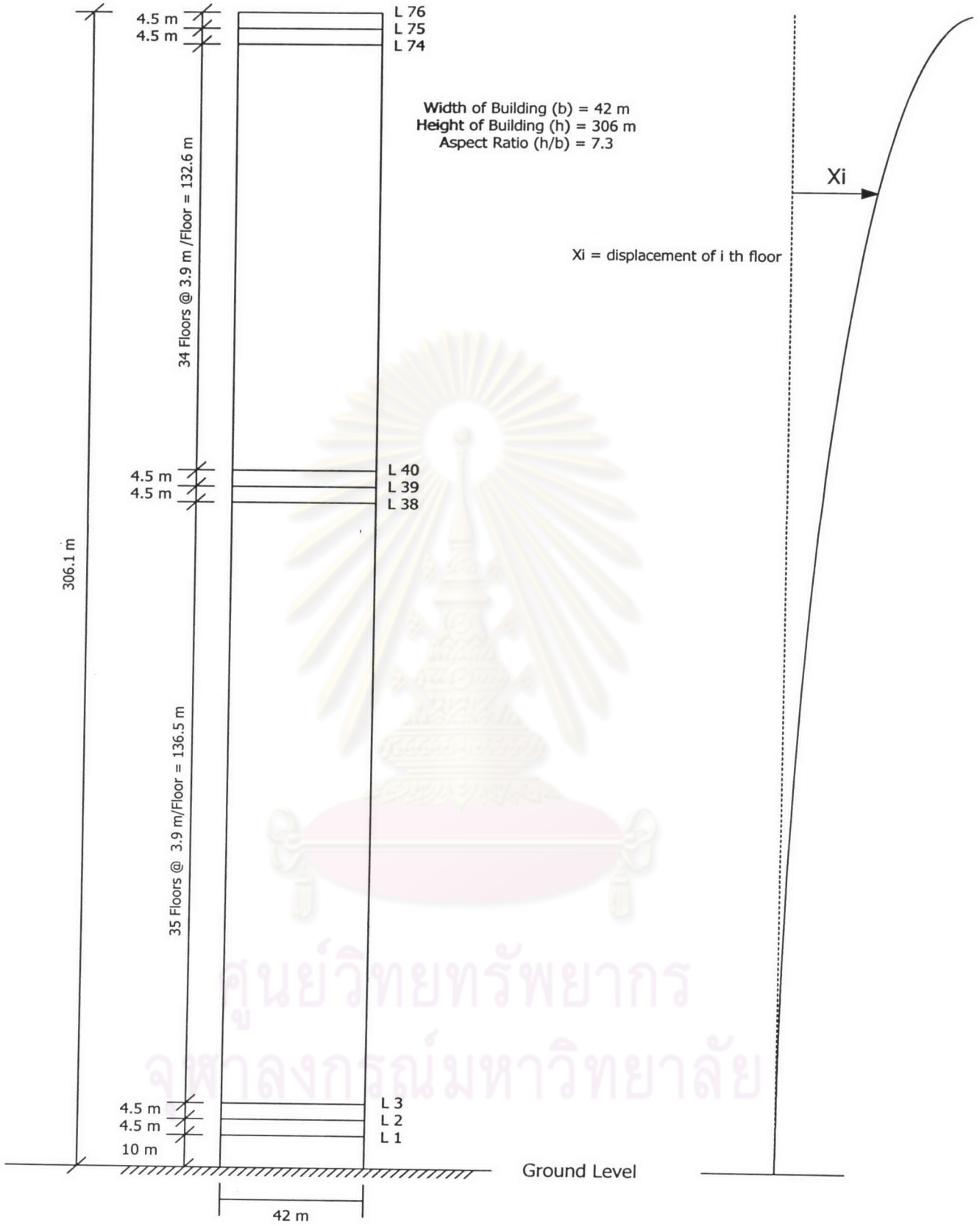
อาคารสูงที่นำมาใช้ทำการพิจารณาเป็นอาคารสำนักงานที่จะทำการสร้างที่เมืองเมลเบิร์น ประเทศออสเตรเลีย [Yang และคณะ (2000)] ซึ่งเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ประกอบด้วยแกนกลางคอนกรีตและโครงข้อแข็งคอนกรีต โดยแกนกลางถูกออกแบบมาเพื่อรับแรงลมส่วนใหญ่โดยเฉพาะ ในขณะที่โครงข้อแข็งถูกออกแบบมาเพื่อรับน้ำหนักของอาคารและช่วยรับแรงลมบางส่วน ความจริงแล้วการวิเคราะห์และการออกแบบโครงสร้างนั้นได้ทำเสร็จสมบูรณ์แล้ว แต่เนื่องจากความถดถอยทางเศรษฐกิจทำให้ยังไม่มีมีการก่อสร้างเกิดขึ้น อาคารดังกล่าวมีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีมุมตัด 2 มุมที่อยู่ตรงข้ามกัน เส้นรอบรูปของแกนคอนกรีตเท่ากับ  $21 \times 21$  เมตร ส่วนระยะระหว่างเสาของโครงข้อแข็งตามเส้นรอบรูปของตัวอาคารเท่ากับ 6.5 เมตร โดยคานเชื่อมระหว่างเสามีขนาดเท่ากับ  $0.4 \times 0.9$  เมตร ซึ่งมีขนาดเท่ากันทุกชั้น จำนวนเสาแต่ละชั้นมี 24 ต้น ซึ่งมีจำนวน 6 ต้นในแต่ละด้านดังแสดงในรูปที่ 3.2



No. of columns per floor = 24 ( six on each side at 6.5 m centers)

รูปที่ 3.2 ภาพแปลนอาคารสูง 76 ชั้น ที่นำมาทำการพิจารณา

อาคารสูง 76 ชั้น ที่แสดงในรูปที่ 3.3.1 ถูกจำลองเป็นคานยื่นในแนวตั้งดังรูปที่ 3.3.2 โดยจะกำหนดให้  $X_i$  เป็นระยะการเคลื่อนที่ของชั้นที่  $i$  เทียบกับพื้นดิน แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ถูกสร้างขึ้นโดยพิจารณาส่วนของอาคารของชั้นที่ติดกันเป็นชิ้นส่วนคานแบบคลาสสิกอลที่มีความหนาคงที่ทำให้ได้แบบจำลองที่มี 76 ระดับชั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ด้านข้าง และ 76 ระดับชั้นความเร็วของการหมุน แต่เนื่องจากระดับชั้นความเร็วของการหมุนสามารถกำจัดออกได้โดยวิธีสแตติกคอนเดนเซนชัน (Static Condensation) ผลที่ได้ทำให้แบบจำลองนี้เหลือเพียงแค่ 76 ระดับชั้นความเร็วเท่านั้น เมตริกซ์ความหน่วงขนาด  $76 \times 76$  ของอาคารนี้หาจากการสมมติอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 1 เปอร์เซนต์

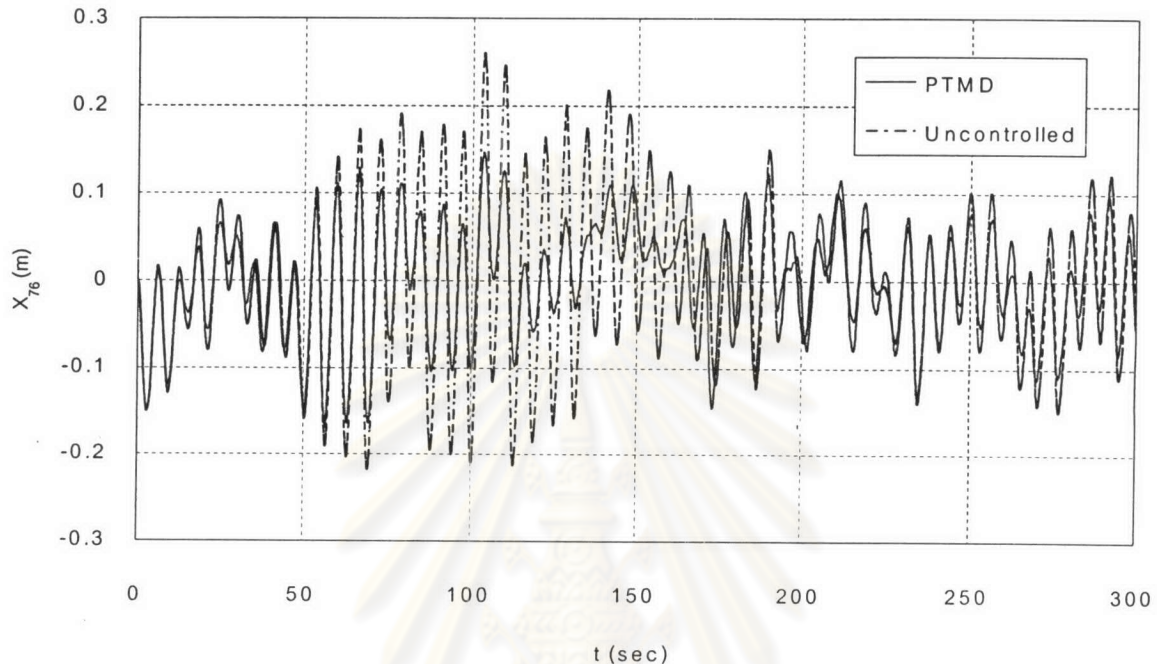


รูปที่ 3.3.1

รูปที่ 3.3.2

รูปที่ 3.3 ภาพแสดงอาคารทางด้านข้างและภาพการจำลองโดยสังเขป

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะใช้ข้อมูลจากแฟ้มข้อมูลที่ได้จากการทดลองของมหาวิทยาลัย ชิดนีย์ ทั้งเมตริกซ์มวล ความหน่วง สติฟเนส และแรงลมที่กระทำ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ระยะ การเคลื่อนที่ที่ชั้นบนสุดของโครงสร้าง ( $X_{76}$ ) ทั้งที่มีและไม่มีการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบ แพลสส์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ภาพแสดงการเปรียบเทียบผลระยะการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง (Displacement Response) ที่ชั้นบนสุดทั้งที่มีและไม่มีการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพลสส์

จากผลที่ได้ดังที่แสดงในรูปที่ 3.4 พบว่าระยะการเคลื่อนที่ของชั้นบนสุดซึ่งเป็นชั้นที่มีการ สั่นไหวมากที่สุด เมื่อทำการติดตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพลสส์ จะลดลงจากกรณีที่ไม่มีการ ติดตั้งอย่างเห็นได้ชัด

3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารสูง 76 ชั้น ที่รับแรงลม ทั้งที่มีและไม่มีการติดตั้งระบบมวลหน่วง ปรับค่าแบบแพลสส์โดยใช้การลดลำดับของแบบจำลอง และแนวทางในการติดตั้งระบบมวล หน่วงปรับค่าแบบอื่น ๆ

พิจารณาสมการการเคลื่อนที่ของอาคารที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบเอกทิพบนชั้น บนสุด ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = H_u + W \quad (3.5)$$

โดยที่  $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_{76}, X_m]^T$

$X_i$  = ระยะการเคลื่อนที่ของชั้นที่  $i$

$X_m$  = ระยะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของมวลหน่วงเทียบกับชั้นบนสุดของอาคาร

$\mathbf{M}$   $\mathbf{C}$  และ  $\mathbf{K}$  เป็นเมตริกซ์ขนาด  $77 \times 77$  ของมวล ความหน่วง และ สติฟเนส ตามลำดับ  $u$  เป็นแรงควบคุมที่เป็นสเกลาร์ ที่ขึ้นกับเวลา  $\mathbf{W}$  เป็นเวกเตอร์แสดงแรงลมที่มีขนาด  $77 \times 1$  และ  $\mathbf{H}$  เป็นเวกเตอร์ที่แสดงผลกระทบของการคอนโทรลซึ่งมีขนาด  $77 \times 1$  เช่นกัน

การคำนวณเชิงตัวเลขของการควบคุมการตอบสนองที่ประกอบด้วยผลการตอบสนองสูงสุด ผลการตอบสนองรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ยของแบบจำลองขนาด 77 ระดับชั้นความเร็ว จะต้องใช้เวลาในการคำนวณอย่างมากจากที่ได้ทำการศึกษามาแล้วในหัวข้อที่ 3.2 ดังนั้นวิธีการลดลำดับของแบบจำลอง (State Reduce-Order) จะถูกนำมาใช้ในการลดลำดับของแบบจำลองอาคารสูงทั้งที่มีและไม่มีมวลหน่วง ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้จะสามารถคงคุณสมบัติของระบบเดิมไว้ได้เป็นอย่างดี เมื่อใช้วิธีดังกล่าวนี้แล้ว แบบจำลอง 77 ระดับชั้นความเร็ว ในสมการที่ (3.5) จะถูกทำการลดลงเหลือ 24 ระดับชั้นความเร็ว ซึ่งสามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$\dot{\mathbf{Z}} = \mathbf{A}\mathbf{Z} + \mathbf{B}u + \mathbf{E}\mathbf{W} \quad (3.6)$$

โดยที่  $\mathbf{Z} = [\bar{\mathbf{X}}^T \quad \dot{\bar{\mathbf{X}}}^T]^T$  มีขนาดเท่ากับ  $48 \times 1$  และ

$$\bar{\mathbf{X}} = [X_3, X_6, X_{10}, X_{13}, X_{16}, X_{20}, X_{23}, X_{26}, X_{30}, X_{33}, X_{36}, X_{40}, X_{43}, X_{46}, X_{50}, X_{53}, X_{56}, X_{60}, X_{63}, X_{66}, X_{70}, X_{73}, X_{76}, X_m]^T$$

= เวกเตอร์ที่แสดงตำแหน่งชั้นที่ต้องการทราบค่าการตอบสนองในการวิเคราะห์

โครงสร้างโดยใช้การลดลำดับของแบบจำลอง

เมตริกซ์  $\mathbf{A}$  จะมีขนาดเท่ากับ  $48 \times 48$  เมตริกซ์  $\mathbf{B}$  จะมีขนาดเท่ากับ  $48 \times 1$  และ  $\mathbf{E}$  จะมีขนาดเท่ากับ  $48 \times 77$

ในกรณีที่ตั้งระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพลสซีฟ ค่าของ  $u$  ในสมการที่ (3.5) จะมีค่าเท่ากับศูนย์

ในทำนองเดียวกัน แบบจำลอง 76 ระดับชั้นความเร็ว (อาคารปราศจากมวลหน่วง) สามารถลดลำดับลงเหลือ 23 ระดับชั้นความเร็ว ได้โดยเหลือ 46 โหมดเชิงซ้อนของระบบเดิม เมื่อเทียบกับสมการที่ (3.6) ในกรณีนี้ขนาดของเมตริกซ์  $\mathbf{Z}$   $\mathbf{A}$   $\mathbf{B}$  และ  $\mathbf{E}$  จะมีขนาดเท่ากับ  $(46 \times 1)$   $(46 \times 46)$   $(46 \times 1)$  และ  $(46 \times 76)$  ตามลำดับ ค่าของ  $u$  จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่วน  $\bar{\mathbf{X}}$  จะเหมือนกับกรณี 24 ระดับชั้นความเร็ว แต่ไม่มี  $X_m$  เมตริกซ์  $\mathbf{A}$   $\mathbf{B}$  และ  $\mathbf{E}$  ที่ได้จะแตกต่างจากในกรณีของ 24 ระดับชั้นความเร็ว ในระบบการลดอันดับที่กล่าวมา แรงลมที่กระทำในแต่ละชั้นของ 23 ชั้นจะหามาจากการเปลี่ยนแรงลมที่กระทำในแต่ละชั้นของ 76 ชั้น โดยจะทำการรวมแรงลมที่กระทำในชั้นที่ติดกัน

ที่ตำแหน่งที่สอดคล้องกับแบบจำลอง 23 หรือ 24 ระดับชั้นความเร็ว (ในกรณีที่ทำการศึกษาติดตั้งระบบมวลห่อ) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ดังนั้นเมตริกซ์ E ในกรณีที่ไม่มีการควบคุมใด ๆ และกรณีที่ทำการศึกษาติดตั้งระบบมวลห่อจะถูกลดลงเป็นขนาด 46 x 23 และ 48 x 24 ตามลำดับ ผลที่ได้จากการลดอันดับนี้ จะทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาปริมาณการตอบสนองลดลงได้มากเลยทีเดียว

จากการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารสูง 76 ชั้นที่รับแรงลม ทั้งที่มีและไม่มีการศึกษาติดตั้งระบบมวลห่อปรับค่าแบบแพสซีฟโดยใช้และไม่ใช้การลดลำดับของแบบจำลอง ผลของระยะการเคลื่อนที่ของโครงสร้างแสดงในตารางที่ 3.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการใช้แบบจำลองแบบลดลำดับมีค่าเท่ากับกับการวิเคราะห์โดยตรง และใกล้เคียงกับผลการวิจัยในอดีตมาก [Yang และคณะ (2000)]

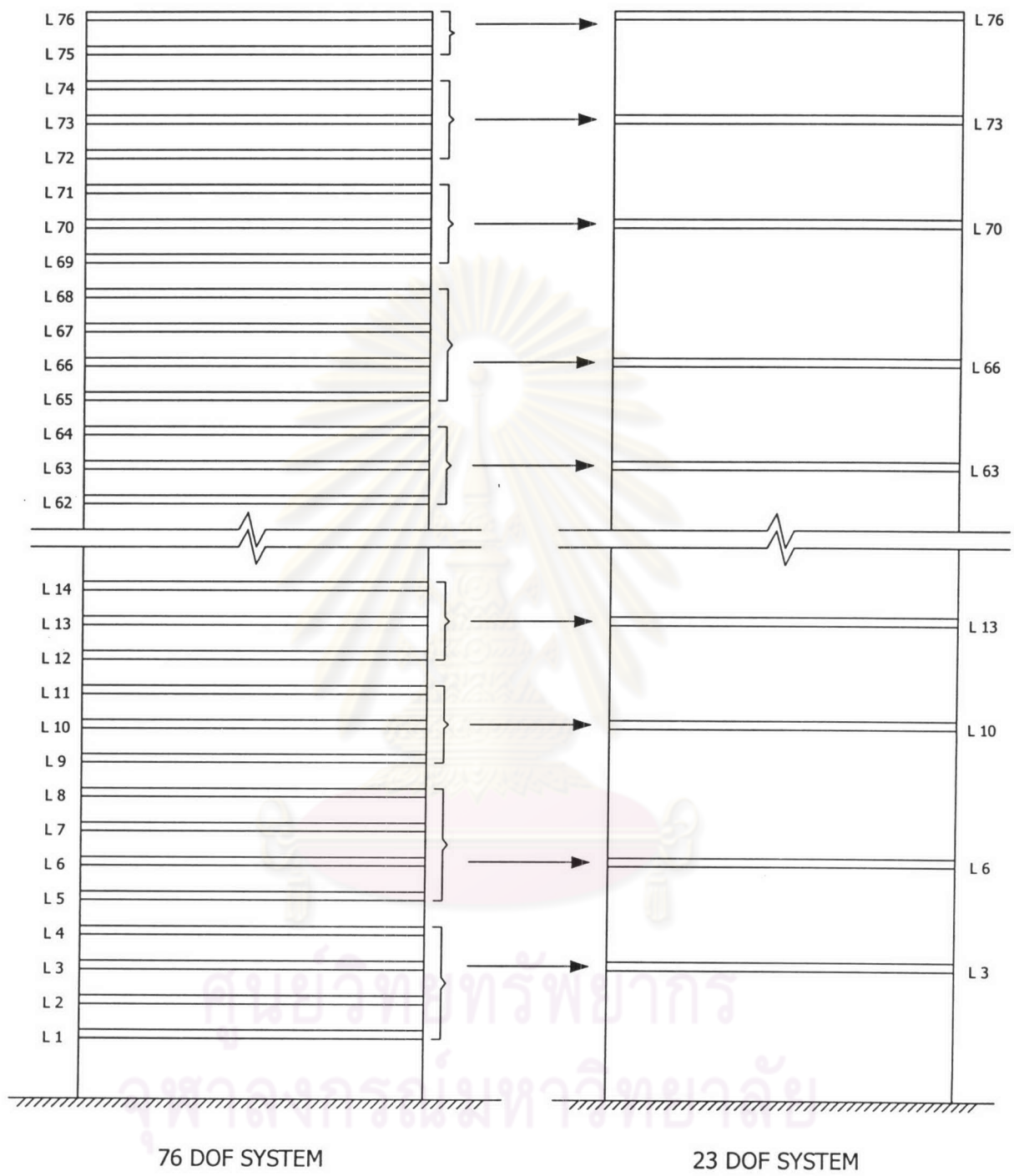
ตารางที่ 3.3 แสดงค่าระยะการเคลื่อนที่ที่ชั้นบนสุดของอาคารสูง 76 ชั้น ที่รับแรงลม

วิธีการควบคุม	ระยะการเคลื่อนที่ที่ชั้นบนสุดของอาคารสูงที่รับแรงลม (เมตร)	
	ปริมาณสูงสุด	ปริมาณรากที่สองของกำลังสองเฉลี่ย
Uncontrolled	0.2607, (0.2601)*	0.0908, (0.0988)*
Uncontrolled (reduced)	0.2607	0.0908
PTMD	0.1695, (0.1696)*	0.0626, (0.0577)*
PTMD (reduced)	0.1695	0.0626

( )\* เป็นค่าที่ได้จาก Yang และคณะ

เมื่อสังเกตจากการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีระดับชั้นความเร็วเดียว ที่ทำการติดตั้งระบบควบคุมแบบต่าง ๆ ที่ได้ทำการศึกษาแล้วในหัวข้อที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าการใช้ระบบมวลห่อปรับค่าแบบเคมีแอกทีฟสามารถลดการสั่นไหวของโครงสร้างได้มากยิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับระบบมวลห่อปรับค่าแบบแพสซีฟ โดยใช้ค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าระบบมวลห่อปรับค่าแบบเคมีแอกทีฟอยู่มาก ดังนั้นจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจในการศึกษาผลการติดตั้งมวลห่อปรับค่าแบบเคมีแอกทีฟกับอาคารสูงที่รับแรงลม





รูปที่ 3.5 ภาพแสดงการลดลำดับของแบบจำลองอาคารสูง