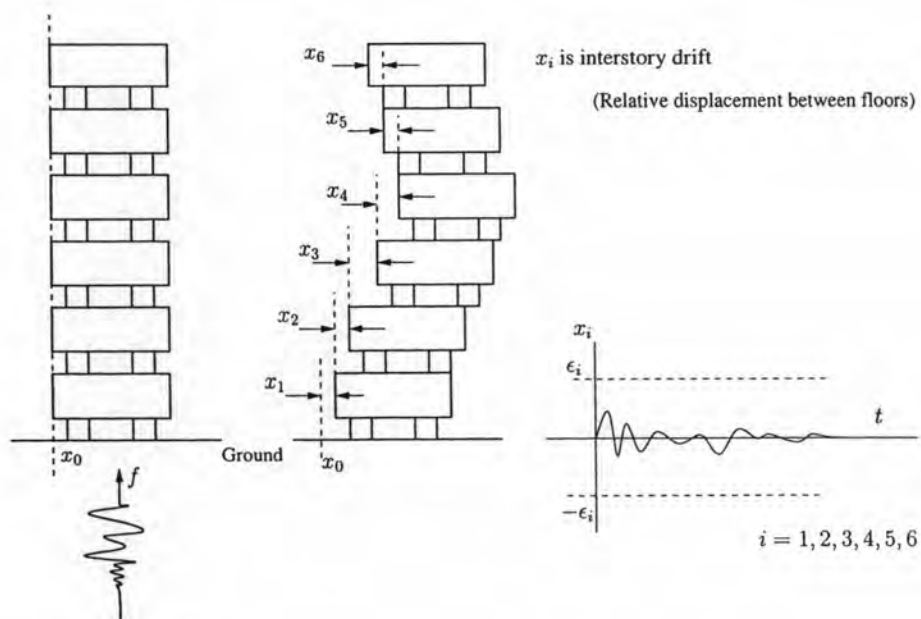


## บทที่ 5

### การออกแบบระบบควบคุมอาคารภายใต้สภาวะแผ่นดินไหว

ในบทนี้วิธีการคำนวณดัชนีสมรรถนะที่เสนอในบทที่ 3 และกระบวนการคำนวณในบทที่ 4 ถูกนำมาออกแบบระบบควบคุมอาคารภายใต้สภาวะแผ่นดินไหว เพื่อแสดงให้เห็นว่าวิธีการคำนวณดัชนีสมรรถนะที่เสนอ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเซตเป็นไปได้ ที่กำหนดลักษณะสมบัติด้วยเงื่อนไขขอบเขตที่มีจำนวนมากกว่า 2 เงื่อนไข และแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มเงื่อนไขขอบเขตสามารถทำให้ผลการออกแบบดีขึ้น

เมื่อเกิดแผ่นดินไหว อาคารสูงจะได้รับผลกระทบ และถ้าแผ่นดินไหวมีความรุนแรงมาก อาคารอาจจะเกิดความเสียหาย หรืออาคารอาจจะถล่ม ทำให้เกิดความเสียหายอย่างมากโดยเฉพาะต่อชีวิตมนุษย์ เพื่อความปลอดภัยต่อมนุษย์และทรัพย์สินวิศวกรโครงสร้าง (structural engineer) ได้ระบุว่า *ระยะกระจัดระหว่างชั้น (interstorey drift)  $x_i$*  ต้องถูกจำกัดให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้ตามมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา (Uniform Building Code, 1997) เมื่อโครงสร้างของอาคารสั่น เนื่องจากแรงภายนอก อาทิเช่นแรงแผ่นดินไหว  $f$  ถ้าการสั่นดังกล่าวทำให้ระยะกระจัดระหว่างชั้นมีขนาดเกินที่กำหนด อาคารอาจจะได้รับความเสียหายขั้นร้ายแรงได้ แสดงในรูปที่ 5.1

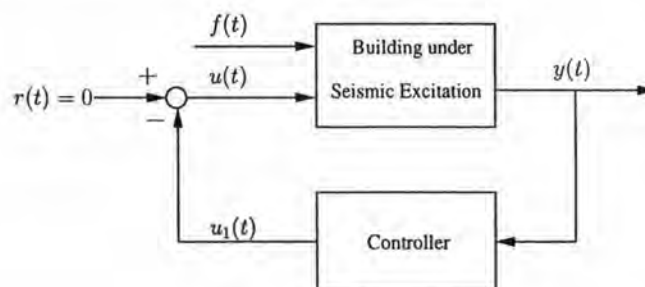


รูปที่ 5.1: ระยะกระจัดระหว่างชั้นเมื่ออาคารถูกแรงกระทำจากแผ่นดินไหว

งานวิจัยที่ผ่านมาทฤษฎีการควบคุม (control theory) หลายทฤษฎีถูกนำมาประยุกต์เพื่อออกแบบ ดัดแปลง หรือเพิ่มเติมโครงสร้างอาคาร เพื่อรักษาระยะกระจัดระหว่างชั้นให้อยู่ในขอบเขต เมื่อมีแรงแผ่นดินไหวเข้ามากระทำกับอาคาร เช่น Kelly, Leitmann and Soldatos (1987), Suhardjo and Spencer (1990), Tadjbaksh and Rofooei (1992), Schmitendorf, Jabbari and Yang (1994), Jabbari, Schmitendorf and Yang (1995), Köse, Schmitendorf, Jabbari and Yang (1996), Palazzo and Petti (1997), Maeim and Kelly (1999), และ Marzbanrad, Ahmadi and Jha (2004) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยเกี่ยวกับระบบควบคุมอาคารในสภาวะแผ่นดินไหวเหล่านั้น ไม่ได้พิจารณาปัญหาตรงกับความต้องการจริง ที่มีวัตถุประสงค์ในการควบคุมคือต้องการให้ระยะกระจัดระหว่างชั้นอยู่ในขอบเขตที่กำหนด เมื่อเกิดแผ่นดินไหว

อนึ่งข้อมูลการเกิดแผ่นดินไหวในอดีตได้มีการบันทึกไว้ ทำให้วิศวกรโครงสร้างทราบลักษณะ สัญญาณแผ่นดินไหวที่เคยเกิดขึ้น ดังนั้นกรอบงานของ Zakian มีความเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมอาคารในสภาวะแผ่นดินไหว โดยการกำหนดเซตเป็นไป ได้จากลักษณะแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในอดีต แล้วหาคำตอบของสมการ (1.2) สำหรับสัญญาณเข้า ทุกสัญญาณในเซตเป็นไปได้ที่กำหนดขึ้น ในที่นี้สัญญาณออกที่สนใจคือ ระยะกระจัดระหว่าง ชั้น ถ้าเกิดแผ่นดินไหวและสัญญาณแผ่นดินไหวเป็นสมาชิกของเซตเป็นไปได้ที่ใช้ในการออกแบบ ระยะกระจัดระหว่างชั้นจะอยู่ในขอบเขตที่กำหนดเสมอ อาคารจะไม่ได้ได้รับความเสียหาย

ที่ผ่านมา Arunsawatwong (2005) ได้ออกแบบระบบควบคุมสำหรับอาคารในสภาวะแผ่นดิน ไหว ด้วยกรอบงานของ Zakian เพื่อรับประกันว่าระยะกระจัดระหว่างชั้นไม่เกินขอบเขตที่กำหนด ไว้ อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่าระบบควบคุมดังกล่าวมีความอนุรักษ์ ทำให้ขนาดมากที่สุด ของสัญญาณควบคุมจากตัวขับเคลื่อนมีค่าสูง ต้องใช้ตัวขับเคลื่อนขนาดใหญ่ มีราคาแพง ในวิทยานิพนธ์ นี้พิจารณาปัญหาการลดความอนุรักษ์ที่เกิดขึ้น โดยการเพิ่มเงื่อนไขขอบเขตให้กับเซตเป็นไป ได้เดิม ทำให้เซตเป็นไปได้นั้นมีขนาดเล็กลง สัญญาณเข้าที่ไม่เกิดขึ้นจริงบางส่วนถูกตัดทิ้งออกไป เป็นผลให้ความอนุรักษ์ในการออกแบบลดลง



รูปที่ 5.2: โครงแบบควบคุม

แบบจำลองอาคาร 6 ชั้นในสภาวะแผ่นดินไหวที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นแบบจำลองเดียวกันกับที่ใช้ใน Schmitendorf และคณะ (1994) แบบจำลองดังกล่าวแทนด้วยสมการสถานะมิติจำกัด แสดง

ในภาคผนวกที่ ข) โครงแบบควบคุม (control configuration) เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับ สัญญาณออก (output feedback control) แสดงในรูปที่ 5.2 ตัวควบคุม (controller) มีสมการสถานะ ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_c(t) &= A_c x_c(t) + B_c y(t) \\ u_1(t) &= C_c x_c(t) + D_c y(t) \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

โดยที่  $u_1$  เป็นสัญญาณควบคุม โครงสร้างของเมทริกซ์  $A_c$ ,  $B_c$ ,  $C_c$  และ  $D_c$  แสดงในภาคผนวก ค) และสมาชิกในเมทริกซ์เหล่านี้เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ ระบบควบคุมวงปิดมีหนึ่งช่องทางสัญญาณเข้า ได้แก่สัญญาณรบกวนแผ่นดินไหว สัญญาณออกเจ็ดช่องทาง ได้แก่ ระยะเวลาจัดระหว่างชั้นทั้ง 6 ชั้น  $y_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 6$  และสัญญาณควบคุมจากตัวขับเคลื่อน  $u$

สมมติอาคาร 6 ชั้น แต่ละชั้นมีความสูง 1 เมตร ค่ามาตรฐานของระยะจัดระหว่างชั้นคือ 25 mm (Uniform Building Code, 1997) นิยามดัชนีสมรรถนะดังต่อไปนี้

$$\hat{\lambda} \triangleq \max \operatorname{Re} \lambda_i(A_{cl}) \quad (5.2)$$

$$\hat{y}_i \triangleq \sup_{t \geq 0} \sup_{f \in \mathcal{P}} |y_i(t, f, p)| \quad i = 1, 2, 3, \dots, 6 \quad (5.3)$$

$$\hat{u} \triangleq \sup_{t \geq 0} \sup_{f \in \mathcal{P}} |u(t, f, p)| \quad (5.4)$$

โดยที่  $\lambda_i(A)$  คือค่าเฉพาะจริง (eigenvalue) ของเมทริกซ์  $A$   $\hat{y}_i$  เป็นดัชนีสมรรถนะของ  $y_i$ , ( $i = 1, 2, \dots, 6$ )  $\hat{u}$  เป็นดัชนีสมรรถนะของ  $u$  ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการควบคุม มีดังนี้

- |                             |  |
|-----------------------------|--|
| ก) เงื่อนไขเสถียรภาพของระบบ | $\hat{\lambda} \leq -\varepsilon_\lambda$          |
| ข) ขอบเขตระยะจัดระหว่างชั้น | $\hat{y}_i \leq 25 \text{ mm}, i = 1, 2, \dots, 6$ |
| ค) ข้อจำกัดสัญญาณควบคุม     | $\hat{u} \leq U_m \text{ kN}$                      |

โดยที่  $\varepsilon_\lambda$  เป็นจำนวนจริงบวกขนาดเล็ก (ในบทนี้มีค่า 0.01) และ  $U_m$  เป็นขอบเขตของตัวขับเคลื่อน (actuator bound)

ผลที่ได้ในบทนี้ใช้ขั้นตอนที่เสนอในบทที่ 4 เนื่องจากระบบที่ใช้ออกแบบเป็นระบบที่มีเสถียรภาพเลขชี้กำลัง ขั้นตอนในหัวข้อที่ 4.2 ถูกนำมาใช้ โดยกำหนดให้  $\varepsilon_T = 1.0 \times 10^{-5}$

## 5.1 ความอนุรักษณ์ในการออกแบบ

รูปคลื่นของสัญญาณแผ่นดินไหวรุนแรงสองรูปคลื่นได้แก่ รูปคลื่นการเกิดแผ่นดินไหวที่ Northridge และ Kobe ได้บันทึกไว้ แสดงในภาคผนวก ง) ตาราง 5.1 แสดงผลการคำนวณค่านอร์ม  $L_2$  และ  $L_\infty$  ของรูปคลื่นแผ่นดินไหวทั้งสอง ในวิทยานิพนธ์นี้สมมติว่าการเกิดแผ่นดินไหวทั้งสองเป็นการเกิดแผ่นดินไหวที่รุนแรงที่สุด เซตเป็นไปได้ที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมใช้นอร์ม  $L_2$  และ/หรือ  $L_\infty$  ของคลื่นแผ่นดินไหวทั้งสองเป็นตัวกำหนดลักษณะของเซตเป็นไปได้ ถ้าในอนาคตมีแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงมากกว่าแผ่นดินไหวทั้งสอง เซตเป็นไปได้เซตใหม่ก็สามารถนำมาใช้แทนเซตเป็นไปได้ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

ตารางที่ 5.1: นอร์ม  $L_2$  และ  $L_\infty$  ของคลื่นแผ่นดินไหว Northridge และ Kobe

Seismic Name	$\ f\ _2$ (m/s <sup>2</sup> )	$\ f\ _\infty$ (m/s <sup>2</sup> )	$\ \dot{f}\ _2$ (m/s <sup>3</sup> )	$\ \dot{f}\ _\infty$ (m/s <sup>3</sup> )
Northridge	5.59	8.27	102.62	318.86
Kobe	7.24	8.18	106.79	141.50

อ้างอิงค่านอร์มที่แสดงในตารางที่ 5.1 Arunsawatwong (2005) ใช้เซต  $\mathcal{P}_2^2$  กำหนดลักษณะของเซตเป็นไปได้อย่างไรสำหรับสัญญาณแผ่นดินไหว กล่าวคือ

$$\mathcal{P}_2^2 = \{f : \|f\|_2 \leq M_2 \text{ และ } \|\dot{f}\|_2 \leq D_2\}$$

โดยที่

$$M_2 = 7.24 \text{ m/s}^2 \text{ และ } D_2 = 106.79 \text{ m/s}^3$$

ดังนั้นคลื่นแผ่นดินไหว Northridge และ Kobe รวมอยู่ในเซต  $\mathcal{P}_2^2$  ด้วย ในการออกแบบระบบควบคุมที่ผ่านมา Arunsawatwong (2005) กำหนดให้  $U_m = 220$  kN ถึงแม้ว่าตัวควบคุมที่ได้จะสองคล้องตามวัตถุประสงค์ ก) - ค) แต่  $U_m$  ที่ใช้มีขนาดมาก เนื่องจากเกิดความอนุรักษ์จึงแสดงให้เห็นในลำดับต่อไป

กำหนดให้ช่องสัญญาณออก  $k = 1, 2, \dots, 6$  แทนระยะกระจัดระหว่างชั้น  $1, 2, \dots, 6$  ตามลำดับ และช่องสัญญาณออก  $k = 7$  แทนสัญญาณ  $u$  ให้  $f_k^*(\mathcal{P}, p)$  แทนสัญญาณเข้าใหญ่สุดในเซต  $\mathcal{P}$  สำหรับระบบที่ได้จากพารามิเตอร์ในการออกแบบ  $p$  ซึ่งก่อให้เกิดดัชนีสมรรถนะที่ช่องสัญญาณออก  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, 7$ ) และให้  $p_s$  แทนผลลัพธ์การออกแบบตัวควบคุมที่ได้จาก Arunsawatwong (2005)

สัญญาณเข้าใหญ่สุด  $f_k^*(\mathcal{P}_2^2, p_s)$  สามารถสร้างได้โดยใช้วิธีที่เสนอในหัวข้อ 3 (และ Lane (2005) ด้วย) ตารางที่ 5.2 แสดงให้เห็นว่า ค่า  $\|f_k^*(\mathcal{P}_2^2, p_s)\|_\infty$  ( $k = 1, 2, \dots, 7$ ) มีค่ามากกว่าค่ามากที่สุดของคลื่นสัญญาณ Northridge (มีค่า  $8.27 \text{ m/s}^2$  ตามที่แสดงในตารางที่ 5.1)

ตารางที่ 5.2: ขนาดมากที่สุดของสัญญาณเข้าใหญ่สุดสำหรับเซต  $\mathcal{P}_2^2$

$k$ :	1	2	3	4	5	6	7
$\ f_k^*(\mathcal{P}_2^2)\ _\infty$	21.53	21.49	21.3	20.59	22.0	23.35	20.75 (m/s <sup>2</sup> )

จากการที่สมมติว่าคลื่นแผ่นดินไหว Northridge มีความรุนแรงมากที่สุด หมายความว่าขนาดมากที่สุดของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นจริงๆ มีค่าไม่เกิน  $8.27 \text{ m/s}^2$  ดังนั้น  $f_k^*(\mathcal{P}_2^2, p_s)$  ( $k = 1, 2, \dots, 7$ ) เป็นสัญญาณเข้าที่ไม่เกิดขึ้นจริง อธิบายได้โดยใช้รูปภาพที่ 5.3) พิจารณาเซตเป็นไปได้อย่างใหม่  $\mathcal{P}_0^2$

ซึ่งเกิดจากการเพิ่มเงื่อนไขขอบเขตบนนอร์ม  $L_\infty$  ของขนาดสัญญาณเข้า ให้กับเซต  $P_2^2$  กล่าวคือ

$$P_0^2 = \{f : \|f\|_2 \leq M_2, \|f\|_\infty \leq M_\infty \text{ และ } \|f\|_2 \leq D_2\}$$

โดยที่

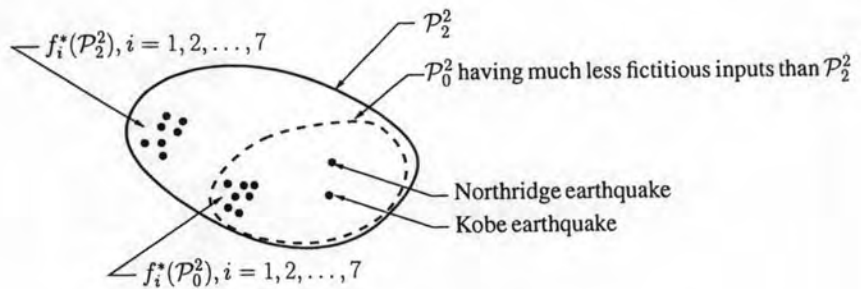
$$M_2 = 7.24 \text{ m/s}^2, D_2 = 106.79 \text{ m/s}^3 \text{ and } M_\infty = 8.5 \text{ m/s}^2$$

เซตใหม่นี้จะแยกสัญญาณที่มีขนาดมากที่สุดเกิน  $M_\infty$  ออกไป เป็นการช่วยลดสัญญาณเข้าที่ไม่เกิดขึ้นจริงเหล่านั้น

ตารางที่ 5.3: ดัชนีสมรรถนะของระบบควบคุมอาคารภายใต้สภาวะแผ่นดินไหวด้วยตัวควบคุมที่สร้างจาก  $p_s$

Possible sets	$\hat{y}_1(P, p_s)$ ( $\mu\text{m}$ )	$\hat{y}_2(P, p_s)$ (mm)	$\hat{y}_3(P, p_s)$ (mm)	$\hat{y}_4(P, p_s)$ (mm)	$\hat{y}_5(P, p_s)$ (mm)	$\hat{y}_6(P, p_s)$ (mm)	$\hat{u}(P, p_s)$ (kN)
$P = P_2^2$	1.56	24.99	24.67	19.83	16.70	14.09	214.6
$P = P_0^2$	0.98	16.98	17.22	14.33	12.17	11.70	170.2

ตารางที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่า  $\hat{y}_i(P_0^2, p_s) < \hat{y}_i(P_2^2, p_s)$  สำหรับทุก  $i = 1, 2, \dots, 6$  และ  $\hat{u}(P_0^2, p_s) < \hat{u}(P_2^2, p_s)$  นอกจากนี้ระยะกระจัดระหว่างชั้น  $\hat{y}_i(P_0^2, p_s)$  สำหรับทุก  $i = 1, 2, \dots, 6$  มีขอบว่าง (margin) ห่างจากค่าขอบเขต 25 mm มาก ดังนั้นถ้าใช้  $p_s$  เป็นจุดเริ่มสำหรับหาคำตอบของการออกแบบใหม่และใช้เซตเป็นไปได้  $P_0^2$  แทนลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหว ขอบเขตของตัวขับเคลื่อน  $U_m$  สามารถถูกลดค่าลงได้อีก (ต่ำกว่า 170.2 kN ตามที่แสดงในตารางที่ 5.3)



รูปที่ 5.3: เซตเป็นไปได้  $P_2^2$  และ  $P_0^2$

## 5.2 การออกแบบโดยใช้เซตเป็นไปได้ใหม่

ในการหาตัวควบคุมใหม่เพื่อลดความมอญักษ์ที่มีอยู่ เซตเป็นไปได้  $P_0^2$  ถูกนำมาใช้กำหนดลักษณะคลื่นแผ่นดินไหว เพื่อค้นหาพารามิเตอร์ในการออกแบบสำหรับตัวควบคุมอันดับ 2 ในการออก

แบบใหม่นี้ วัตถุประสงค์ ก) และ ข) คงเดิม แต่ปรับลดค่าขอบเขตของตัวขับเคลื่อนในวัตถุประสงค์ ค) ให้มีค่า  $U_m = 140\text{kN}$  โดยการใช้กระบวนการ moving boundaries ตัวควบคุมใหม่ที่ทำให้ระบบควบคุมสอดคล้องกับวัตถุประสงค์การควบคุมมีเมทริกซ์ดังนี้

$$A_c = \begin{bmatrix} 0, & -1.1085 \times 10^4 \\ 1, & -4.4970 \times 10^2 \end{bmatrix}, \quad C_c = [0, \quad 1],$$

$$B_c = \begin{bmatrix} -3.6181 \times 10^7, & -3.7887 \times 10^9 \\ 1.8817 \times 10^9, & -2.8372 \times 10^8 \\ 4.9303 \times 10^9, & -5.8042 \times 10^7 \\ 7.7592 \times 10^8, & -6.3858 \times 10^7 \\ 1.0701 \times 10^9, & -6.0621 \times 10^7 \\ 3.1150 \times 10^9 & 1.0189 \times 10^{10} \end{bmatrix}^T, \quad D_c = \begin{bmatrix} -3.2847 \times 10^7 \\ 2.7539 \times 10^7 \\ -9.8645 \times 10^6 \\ -1.1132 \times 10^7 \\ -2.1769 \times 10^7 \\ 6.6276 \times 10^6 \end{bmatrix}^T$$

ตารางที่ 5.4: ดัชนีสมรรถนะของระบบควบคุมที่ออกแบบใหม่โดยใช้เซตเป็นไปได้  $P_0^2$

$\hat{y}_1(P_0^2)$ ( $\mu\text{m}$ )	$\hat{y}_2(P_0^2)$ (mm)	$\hat{y}_3(P_0^2)$ (mm)	$\hat{y}_4(P_0^2)$ (mm)	$\hat{y}_5(P_0^2)$ (mm)	$\hat{y}_6(P_0^2)$ (mm)	$\hat{u}(P_0^2)$ (kN)
1.39	24.33	25.00	20.60	16.57	11.76	133.0

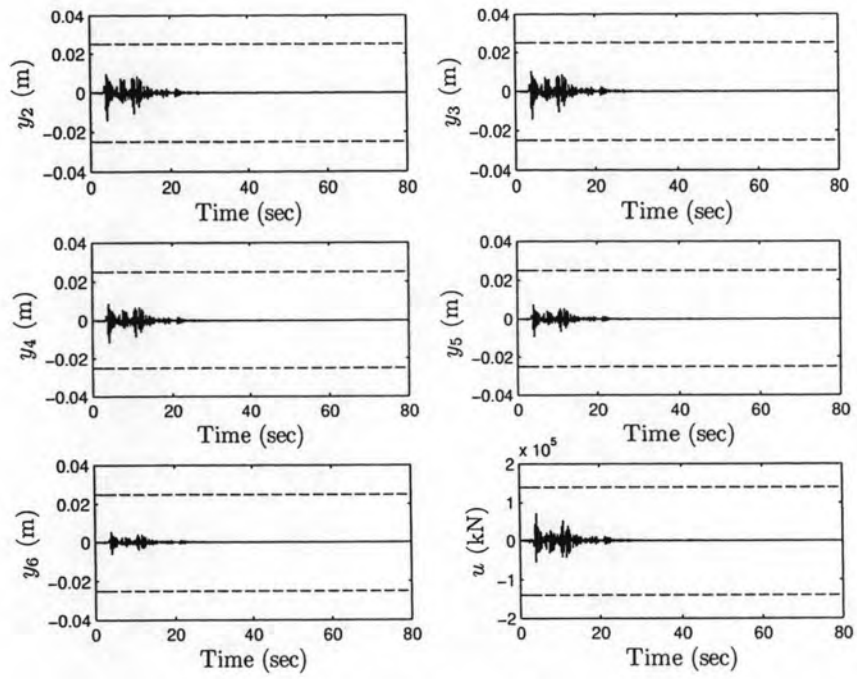
ดัชนีสมรรถนะต่างๆที่ได้จากตัวควบคุมใหม่แสดงในตารางที่ 5.4 เพื่อพิสูจน์ตัวควบคุมที่ได้นอร์ม  $L_\infty$  ของผลตอบเมื่อเกิดแผ่นดินไหว Northridge และ Kobe แสดงในตารางที่ 5.5 ผลตอบของทั้งสองกรณีแสดงในรูปที่ 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ ผลตอบระยะกระจัด  $y_1$  ไม่แสดงในรูปทั้งสอง เนื่องจากตารางที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่าขนาดระยะกระจัดของชั้นดังกล่าวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะกระจัดชั้นอื่นๆ จากรูปที่ 5.4 และ 5.5 พบว่า ระยะกระจัด  $y_i$  อยู่ในขอบเขตที่กำหนดตลอดเวลาเมื่อเกิดแผ่นดินไหว และขนาดมากที่สุดของสัญญาณควบคุม  $u$  น้อยกว่า 140kN

ตารางที่ 5.5: ดัชนีสมรรถนะของระบบควบคุมที่ออกแบบใหม่เมื่อถูกรบกวนด้วยคลื่นแผ่นดินไหว Northridge และ Kobe

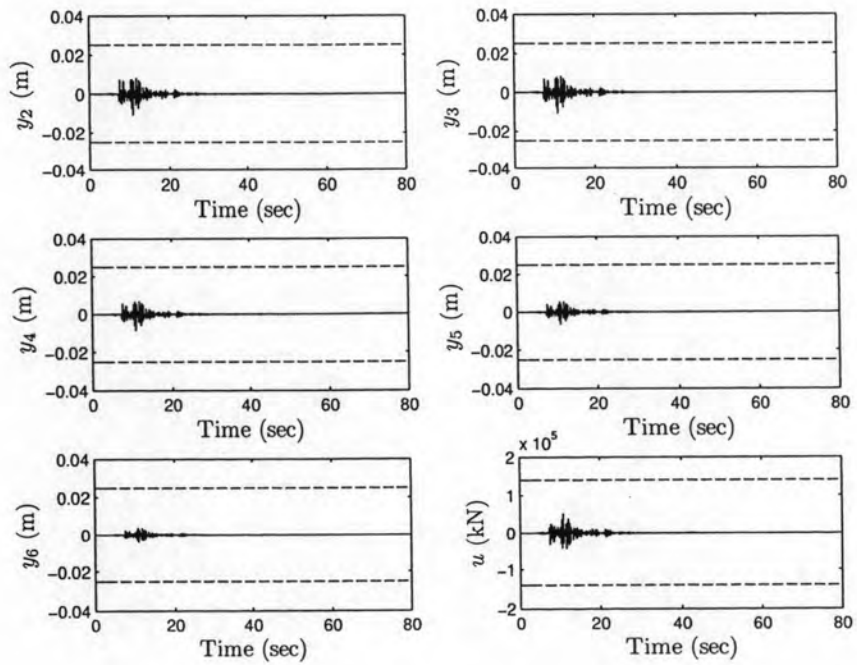
Inputs	$\ y_1\ _\infty$ ( $\mu\text{m}$ )	$\ y_2\ _\infty$ (mm)	$\ y_3\ _\infty$ (mm)	$\ y_4\ _\infty$ (mm)	$\ y_5\ _\infty$ (mm)	$\ y_6\ _\infty$ (mm)	$\ u\ _\infty$ (kN)
Northridge	0.56	9.38	10.00	8.67	7.46	5.23	71.5
Kobe	0.50	8.26	8.43	6.83	5.44	3.77	51.1

### 5.3 สรุป

ในบทนี้แสดงให้เห็นถึงคุณประโยชน์ของวิธีการคำนวณดัชนีสมรรถนะสำหรับเซตเป็นไปได้ ที่มีเงื่อนไขขอบเขตมากกว่า 2 เงื่อนไข การเพิ่มเงื่อนไขขอบเขตให้กับเซตเป็นไปได้ทำให้ สัญญาณเข้า



รูปที่ 5.4: ผลตอบต่อคลื่นแผ่นดินไหว Northridge



รูปที่ 5.5: ผลตอบต่อคลื่นแผ่นดินไหว Kobe

ที่ไม่เกิดขึ้นจริงบางส่วนถูกแยกออกไป และนำไปสู่ผลการออกแบบที่ดีขึ้น จากผลการออกแบบใหม่ที่ได้ในหัวข้อที่ 5.2 เห็นได้ชัดว่า  $\hat{u}(P_0^2)$  มีค่าลดลง ประมาณ 40% จาก  $\hat{u}(P_2^2, p_s)$  กล่าวคือ การออกแบบใหม่โดยใช้เซตเป็นไปได้ออกแบบ  $P_0^2$  ลดความอนุรักษ์ที่เกิดขึ้นจากระบบควบคุมเดิมที่ได้จากการออกแบบโดยใช้เซตเป็นไปได้ออกแบบ  $P_2^2$  ผลที่ได้คือค่าขอบเขต  $U_m$  รวมถึง  $\hat{u}$  มีค่าลดลง ทำให้ขนาดของตัวขับเคลื่อนเล็กลง

เนื่องจากแบบจำลองระบบควบคุมอาคารภายใต้สภาวะแผ่นดินไหว เป็นระบบมิติจำกัด (ระบบตรรกยะ) ซึ่งระบบดังกล่าวมีเสถียรภาพเลขชี้กำลังได้ ดังนั้นกระบวนการคำนวณอัตโนมัติ 4.3 และ 4.4 นำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบในบั้นนี้ อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการคำนวณดัชนีสมรรถนะขึ้นอยู่กับค่าขอบเขต  $\varepsilon_T$  ที่ถูกกำหนด ตารางที่ 5.6 แสดงเวลาที่ใช้คำนวณดัชนีสมรรถนะ  $\hat{u}(P_0^2)$  สำหรับระบบควบคุมที่ออกแบบได้ในหัวข้อ 5.2 จะเห็นได้ว่า เมื่อกำหนดค่าขอบเขต  $\varepsilon_T$  ให้มีขนาดเล็กลง จำนวนตัวแปรมีค่ามากขึ้น และใช้เวลาคำนวณดัชนีสมรรถนะมากขึ้นเช่นกัน ตารางที่ 5.6 คำนวณจากการกำหนดให้  $\alpha = 0.98\lambda$  และ  $\sigma = 1 \times 10^{-3}$

$\varepsilon_T$	$T$ (seconds)	number of variables	CPU-time (seconds)
$1.0 \times 10^{-1}$	3.74	3,748	8.4
$1.0 \times 10^{-3}$	3.74	3,748	8.4
$1.0 \times 10^{-5}$	7.50	7,500	19.4
$1.0 \times 10^{-7}$	7.50	7,500	19.4
$1.0 \times 10^{-10}$	15.00	15,000	40.9
$1.0 \times 10^{-12}$	15.00	15,000	40.9

ตารางที่ 5.6: เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณดัชนีสมรรถนะกับค่าขอบเขต  $\varepsilon_T$

ในขณะเดียวกันค่า  $\alpha$  มีผลต่อเวลาที่ใช้คำนวณเช่นกัน ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณดัชนีสมรรถนะกับค่า  $\alpha = a\lambda$  และกำหนดให้  $\varepsilon_T = 1 \times 10^{-5}$ ,  $\sigma = 1 \times 10^{-3}$  เมื่อค่า  $\alpha$  ห่างจากค่า  $\lambda$  เวลาตัดปลาย  $T$  จะมีค่ามากขึ้น และเนื่องจากค่า  $\sigma$  ถูกกำหนดไว้คงที่ ทำให้จำนวนตัวแปรมีค่ามากขึ้นเมื่อ กระบวนการคำนวณใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นเช่นกัน

ในทางทฤษฎีค่า  $a = 1$  มีความเหมาะสมที่สุด แต่ในปฏิบัติการคำนวณค่าพิกัดเสถียรภาพ  $\lambda$  อาจจะมีคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นได้ (เช่น เกิดจากค่าคลาดเคลื่อนการตัดเศษ (round-off error) จากการคำนวณ) ดังนั้นการเลือกใช้  $a \neq 1$  จะมีส่วนช่วยในการแก้ปัญหาดังกล่าว แต่ทั้งนี้หากเลือกค่า  $a$  ที่มีค่าน้อยเกินไป จะใช้เวลาในการคำนวณมากดังที่ได้กล่าวไว้

ผลที่แสดงในตารางที่ 5.6 และ 5.7 คำนวณโดยใช้โปรแกรม MATLAB 7.5 สำหรับ Windows XP บนคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะด้วยตัวประมวลผลแบบ Intel Core(TM)2 ความเร็ว 1.86 GHz จำนวนความจำเข้าถึงแบบสุ่ม (random access memory หรือ RAM) 1.0 GB



$a$	$T$ (seconds)	number of variables	CPU-time (seconds)
1.0	7.12	7,120	17.52
0.9	7.91	7,910	20.33
0.8	8.90	8,900	23.83
0.6	11.86	11,860	33.94
0.5	14.23	14,230	40.37

ตารางที่ 5.7: เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการคำนวณดัชนีสมรรถนะกับค่า  $\alpha = a\lambda$