

บทที่ 4

การทดสอบแบบจำลองอาคารที่ติดตั้งตัวหน่วงปรับค่าได้

จากบทที่ 3 จะเห็นได้ว่าตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กสามารถทำงานได้อย่างดีภายใต้รูปแบบการควบคุมแบบต่างๆ โดยมีการเคลื่อนที่แบบวัฏจักรแบบ Sine ที่ความถี่ต่างๆ ที่คงที่ แต่ในการนำไปใช้งานจริงๆ ภายใต้แผ่นดินไหวจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่มีความถี่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ในบทนี้จึงได้ทำการทดสอบแบบจำลองอาคารที่มีการติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กภายใต้การเคลื่อนที่ฐาน เพื่อที่จะดูประสิทธิภาพผลตัวหน่วงปรับค่าได้ที่ได้นำเสนอ ในการควบคุมผลตอบสนองไม่เชิงเส้นของแบบจำลองอาคาร

4.1 แบบจำลองอาคาร

แบบจำลองอาคารที่ใช้ในการทดสอบเป็นโครงสร้างเหล็กสูง 3 ชั้น ดังรูปที่ 4.1 โดยมีมวลของชั้นที่ 1, 2 และ 3 เป็น 37.5 kg, 37.4 kg และ 30.6 kg ตามลำดับ ในแต่ละชั้นจะมีเสา 4 ต้น โดยมีเหล็กฉากต่อระหว่างเสากับแผ่นพื้นโดยยึดต่อกันด้วยสลักเกลียว แบบจำลองสูงประมาณ 1 m แผ่นพื้นมีขนาดกว้าง 40 cm ยาว 80 cm เนื่องจากแผ่นพื้นแข็งเกร็งในระนาบแนวราบ ดังนั้นแบบจำลองจึงมี 3 ระดับชั้นความเสรี คือ การเคลื่อนที่แนวราบของชั้น 1, 2 และ 3 แบบจำลองอาคารมีการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดระยะเคลื่อนที่ที่ชั้น 1, 2 และ 3 อุปกรณ์วัดความเร่งที่ชั้น 1, 2, 3 และ ฐาน มีการติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กระหว่างฐานและพื้นชั้นที่ 1 และมีการติดตั้งเครื่องวัดแรงระหว่างตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กกับแท่นยึด ดังรูปที่ 4.2 ใช้สำหรับวัดค่าแรงหน่วงในตัวหน่วง รูปที่ 4.3 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองอาคาร $u_1(t)$, $u_2(t)$ และ $u_3(t)$ คือระยะเคลื่อนที่ของชั้น 1, 2 และ 3 เทียบกับฐาน ตามลำดับ m_1 , m_2 และ m_3 คือมวลของชั้น 1, 2 และ 3 ตามลำดับ c_1 , c_2 และ c_3 คือ สัมประสิทธิ์ความหน่วงของเสาชั้น 1, 2 และ 3 ตามลำดับ $f_{s1}(t)$, $f_{s2}(t)$ และ $f_{s3}(t)$ คือ แรงต้านในเสาชั้น 1, 2 และ 3 ตามลำดับ $f_d(t)$ คือแรงหน่วง $\ddot{u}_g(t)$ คือ ความเร่งที่ฐาน สมการการเคลื่อนที่ของแบบจำลองภายใต้การเคลื่อนที่ที่ฐานแสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{F}_s(t) + \mathbf{F}_d(t) = -\mathbf{M}\mathbf{1}\ddot{u}_g(t) \quad (4.1)$$

โดยที่

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}, \mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix}, \mathbf{F}_s(t) = \begin{bmatrix} f_{s1}(t) - f_{s2}(t) \\ f_{s2}(t) - f_{s3}(t) \\ f_{s3}(t) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_d(t) = \begin{bmatrix} f_d(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

4.1.1 การหาค่าคาบธรรมชาติของแบบจำลองอาคาร

รูปที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบการสั่นอิสระ (free vibration) แบบจำลองอาคาร รูปที่ 4.4(ก) แสดงค่าความเร่งของชั้นที่ 3 กับเวลา จากการทำ Fourier Transformation รูปที่ 4.4(ข) แสดงความเร่งกับความถี่จะเห็นได้ว่ามีค่าความถี่หลักอยู่ 3 ค่าคือ 1.37, 4.00 และ 5.86 Hz ดังนั้นแบบจำลองอาคารมีค่าคาบธรรมชาติของโหมด 1, 2 และ 3 เป็น 0.73, 0.25 และ 0.17 s ตามลำดับ จาก International Building Code [ICC, 2000] ค่าคาบธรรมชาติของโหมด 1 ของอาคารโครงสร้างเหล็กมีค่าขอบเขตล่างและขอบเขตบน ดังสมการที่ (4.2) และ (4.3)

$$\text{ค่าขอบเขตล่าง} \quad T_L = 0.028H^{0.8} \quad (4.2)$$

$$\text{ค่าขอบเขตบน} \quad T_U = 0.045H^{0.8} \quad (4.3)$$

โดยที่ H คือ ความสูงของอาคาร (feet)

เมื่อพิจารณาอาคารโครงสร้างเหล็ก 3 ชั้นซึ่งมีความสูงประมาณ 10 m แทนค่าในสมการที่ (4.2) และ (4.3) จะได้ $T_L = 0.46$ s, $T_U = 0.74$ s จะเห็นได้ว่าแบบจำลองอาคารมีคาบธรรมชาติอยู่ในช่วงที่กำหนด

4.1.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง

เนื่องจากเสาของแบบจำลองอาคารทั้งสามชั้นมีขนาดและคุณสมบัติใกล้เคียงกันมากจึงสมมติว่าค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของเสาทั้งสามชั้นมีค่าเท่ากัน $c_1 = c_2 = c_3$ โดยสัมประสิทธิ์ความหน่วงเกิดจากการเปลี่ยนแปลงในเสาและข้อต่อ เมื่อทำการทดสอบแบบจำลองที่มีพฤติกรรมเชิงเส้นโดยไม่มีการติดตั้งตัวหน่วงสามารถเขียนสมการที่ (4.1) ได้เป็น

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = -\mathbf{M}\mathbf{1}\ddot{u}_g(t) \quad (4.4)$$

$$\text{เมื่อ } \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix}$$

k_1 , k_2 และ k_3 คือ ค่าสติฟเนสของเสาชั้น 1, 2 และ 3 ตามลำดับโดยค่าสติฟเนสของเสาแต่ละชั้นหามาจากการทดสอบการสั่นอิสระ (free vibration test) เมื่อสมมติค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงแล้วคำนวณหาค่าผลตอบสนองของแบบจำลองอาคารเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่วัดได้โดยได้ลองแปรเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงหลายค่าพบว่าค่าเท่ากับ 1.75 N-s/m ให้ผลดีที่สุด รูปที่ 4.5 แสดงระยะเคลื่อนที่ของชั้น 1, 2 และ 3 เมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับ 1.75 N-s/m จากรูปจะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของทั้งสามชั้นค่าที่วัดได้กับค่าที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก ส่วนในช่วงที่ระยะเคลื่อนที่น้อยค่าระยะเคลื่อนที่ที่คำนวณได้น้อยกว่าระยะเคลื่อนที่ที่วัดได้ เนื่องจากในความเป็นจริงค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงจะไม่คงที่โดยจะมีค่ามากขึ้นเมื่อระยะเคลื่อนที่มากขึ้น ดังนั้นเมื่อเลือกค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงที่เหมาะสมสำหรับระยะเคลื่อนที่สูงสุดจึงทำให้ระยะเคลื่อนที่ที่คำนวณได้น้อยกว่าที่วัดได้ในช่วงอื่น รูปที่ 4.6 แสดงค่าความเร็วของแต่ละชั้นเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับ 1.75 N-s/m จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าความเร็วที่ได้จากสองวิธีใกล้เคียงกัน รูปที่ 4.7 แสดงค่าความเร่งของชั้นต่างๆเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับ 1.75 N-s/m จากรูปจะเห็นได้ว่าความเร่งสูงสุดที่วัดได้กับที่คำนวณได้ใกล้เคียงกันแต่ในช่วงที่ความเร่งน้อยค่าความเร่งที่คำนวณได้จะน้อยกว่าความเร่งที่วัดได้เนื่องจากเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของทั้งสามชั้นมีค่าเท่ากับ 1.75 N-s/m

4.1.3 การคำนวณหาค่าแรงต้านในเสา

จากสมการที่ (4.1) เมื่อวัดระยะเคลื่อนที่และความเร่งสัมบูรณ์ของแต่ละชั้นก็สามารถคำนวณหาแรงต้านในเสาได้ดังสมการที่ (4.5) ถึง (4.7)

$$f_{s3}(t) = -[m_3\ddot{u}_3^a(t) + c_3(\dot{u}_3(t) - \dot{u}_2(t))] \quad (4.5)$$

$$f_{s2}(t) = -[m_2\ddot{u}_2^a(t) + c_3(\dot{u}_2(t) - \dot{u}_3(t)) + c_2(\dot{u}_2(t) - \dot{u}_1(t)) - f_{s3}(t)] \quad (4.6)$$

$$f_{s1}(t) = -[m_1\ddot{u}_1^a(t) + c_2(\dot{u}_1(t) - \dot{u}_2(t)) + c_1\dot{u}_1(t) - f_{s2}(t) + f_d(t)] \quad (4.7)$$

โดยที่ $\ddot{u}_1^a(t)$, $\ddot{u}_2^a(t)$ และ $\ddot{u}_3^a(t)$ คือ ความเร่งสัมบูรณ์ของชั้น 1, 2 และ 3 ตามลำดับโดยค่าความเร่งสัมบูรณ์วัดโดยใช้เครื่องวัดความเร่ง (accelerometer) ความเร็วได้มาจากการคำนวณโดยวิธีระยะเคลื่อนที่และเวลา ส่วนค่าแรงหน่วยวัดโดยเครื่องวัดแรง (load cell)

4.2 การทดสอบแบบจำลองอาคารที่ติดตั้งตัวหน่วงภายใต้การเคลื่อนที่ที่ฐาน

เครื่องจำลองแผ่นดินไหว (shaking table) จำลองการเคลื่อนที่ในแนวราบใน 1 ทิศทาง โดยแบบจำลองอาคารจะมีการเคลื่อนที่ที่ฐานในด้านยาวของอาคาร คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการทดสอบมี 2 ชนิด คือ

(1) คลื่น JMA Kobe ซึ่งวัดในทิศทางเหนือใต้ที่สถานีอุตุวิทยามหาวิทยาลัย Kobe ในแผ่นดินไหว Hyogo-ken Nanbu วันที่ 17 มกราคม ค.ศ.1995 มีขนาด 7.2 มีจุดศูนย์กลางที่เกิดลึก 14 km มีค่าความเร่งสัมบูรณ์สูงสุด 8.18 m/s^2 รูปที่ 4.8 แสดงคลื่น JMA Kobe โดยคลื่น JMA Kobe ที่ใช้ในการทดสอบมีระดับความเข้ม 10%, 17% และ 20% ของคลื่นจริงๆ โดยไม่มีการปรับค่าในแกนเวลา

(2) คลื่น El Centro ซึ่งวัดในทิศทางเหนือใต้ที่สถานีย่อย Imperial Valley Irrigation District ในเมือง El Centro มลรัฐ California ในแผ่นดินไหว Imperial Valley วันที่ 18 พฤษภาคม ค.ศ. 1940 มีขนาด 7.1 มีจุดศูนย์กลางที่เกิดลึก 16 km มีค่าความเร่งสัมบูรณ์สูงสุด 3.42 m/s^2 รูปที่ 4.9 แสดงคลื่น El Centro โดยคลื่น El Centro ที่ใช้ในการทดสอบมีระดับความเข้ม 27%, 40% และ 44% ของคลื่นจริงๆ โดยไม่มีการปรับค่าในแกนเวลา

ตารางที่ 4.1 แสดงกรณีที่ทำการทดสอบสำหรับคลื่นแผ่นดินไหวชนิดต่างๆ ที่ระดับความเข้มต่างๆ จากตารางจะเห็นได้ว่าจะมีกรณีที่ไม่มีการควบคุม กรณีที่ไม่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้ตัวหน่วง ส่วนกรณีที่มีการควบคุมนั้นจะมีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วง 3 แบบ คือ รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน แบบหนืด และแบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้ โดยแต่ละรูปแบบการควบคุมจะมีการแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์เป็น 3 ค่าเพื่อทำให้ค่าแรงที่เกิดในตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กมีค่าครอบคลุมตลอดช่วงที่สามารถให้แรงได้

4.3 ผลตอบสนองของแบบจำลองอาคาร

4.3.1 กรณีที่ไม่มีการควบคุม

รูปที่ 4.10 แสดงผลตอบสนองของแบบจำลองอาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วงภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20% รูปที่ 4.10(ก) แสดงค่าความเร่งที่ฐาน รูปที่ 4.10(ข), 4.10(ค) และ 4.10(ง) แสดงระยะเคลื่อนที่ของชั้นต่างๆพบว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 เป็น 22.1, 31.2 และ 35.1 mm ตามลำดับ รูปที่ 4.10(จ) แสดงค่าแรงเฉือนที่ฐาน ค่าแรงเฉือนที่ฐานสูงสุด 195 N รูปที่ 4.10(ฉ), 4.10(ช) และ 4.10(ซ) แสดงค่าความเร่งของชั้นต่างๆ พบว่าค่าความเร่งสูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 เป็น 1.75, 1.92 และ 2.26 m/s^2 ตามลำดับ รูปที่ 4.11 แสดงพลังงานที่สลายไปในเสาของเสาชั้น 1, 2 และ 3 พลังงานที่สลายสูงสุดมีค่า 7.53, 1.39 และ 1.01 N-m ตามลำดับ รูปที่ 4.12(ก), 4.12(ข) และ 4.12(ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาแต่ละชั้น จากรูปจะเห็นได้ว่าเสาชั้น 1 เกิดความไม่เชิงเส้นโดยมีระยะเคลื่อนที่สูงสุด 22.1 mm ส่วนเสาชั้น 2 และ 3 มีระยะเคลื่อนที่สูงสุด 10.3 mm และ 4.9 mm ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานที่สลายภายในเสา ดังรูปที่ 4.11

4.3.2 กรณีที่มีการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน

รูปที่ 4.13 แสดงผลตอบสนองของแบบจำลองอาคารที่มีการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานโดยที่ควบคุมให้แรงเสียดทานเท่ากับ 30 N ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20% รูปที่ 4.13(ก) แสดงค่าความเร่งที่ฐาน รูปที่ 4.13(ข), 4.13(ค) และ 4.13(ง) แสดงระยะเคลื่อนที่ของชั้นต่างๆจากรูปจะเห็นว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 12.8, 22.2 และ 27.2 mm ตามลำดับ ลดลงจากกรณีที่ไม่มีการควบคุม 42%, 29% และ 23% ตามลำดับ จากรูปที่ 4.13(จ) ค่าแรงเฉือนที่ฐานสูงสุด 160 N ลดลง 18% รูปที่ 4.13(ฉ), 4.13(ช) และ 4.13(ซ) แสดงค่าความเร่งของชั้นต่างๆ พบว่าค่าความเร่งสูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 เป็น 1.72, 1.75 และ 2.61 m/s^2 ตามลำดับ ความเร่งชั้น 1 และ ชั้น 2 ลดลง 2% และ 9% ตามลำดับ ส่วนค่าความเร่งของชั้น 3 เพิ่มขึ้น 15% รูปที่ 4.14 แสดงผลตอบสนองของตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20% รูปที่ 4.14(ก) แสดงค่าแรงที่สั่งกับแรงที่ได้ในตัวหน่วงค่าแรงที่สั่งสูงสุด 30 N ค่าแรงที่วัดได้สูงสุด 46.0 N จะเห็นได้ว่าแรงที่ได้ต่างกันเนื่องจากตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 รูปที่ 4.14(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับระยะเคลื่อนที่ของตัวหน่วง รูปที่ 4.14(ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับความเร็ว จากทั้งสอง

รูปจะเห็นได้ว่าตัวหนังสือสามารถทำงานได้อย่างดีแต่มีผลของความล่าช้าของตัวหนังสือในช่วงที่ความเร็วกลับเครื่องหมาย รูปที่ 4.15(ก) แสดงพลังงานที่สลายไปในเสาชั้นต่างๆ พบว่าพลังงานที่สลายสูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 0.86, 0.75 และ 0.94 N-m ตามลำดับ ลดลงจากกรณีที่ไม่มีการควบคุม 89%, 46% และ 7% ตามลำดับ รูปที่ 4.15(ข) แสดงพลังงานที่สลายโดยตัวหนังสือซึ่งมีค่าสูงสุด 5.1 N-m รูปที่ 4.16(ก), 4.16(ข) และ 4.16(ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาแต่ละชั้นพบว่าค่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 12.8, 9.8 และ 5.2 mm ตามลำดับ ระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้น 1 และ 2 ลดลง 42% และ 5% ตามลำดับ ส่วนของชั้น 3 เพิ่มขึ้น 6% จะเห็นได้ว่าเสาชั้น 1 มีความไม่เชิงเส้นลดลงมาก

4.3.3 กรณีที่มีการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด

รูปที่ 4.17 แสดงผลตอบสนองของแบบจำลองอาคารที่มีการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20% รูปที่ 4.17(ก) แสดงค่าความเร่งที่ฐาน รูปที่ 4.17(ข), 4.17(ค) และ 4.17(ง) แสดงระยะเคลื่อนที่ของชั้นต่างๆจากรูปจะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 16.8, 25.5 และ 30.2 mm ตามลำดับ ลดลงจากกรณีที่ไม่มีการควบคุม 24%, 18% และ 14% ตามลำดับ รูปที่ 4.17(จ) แสดงค่าแรงเฉือนที่ฐานค่าแรงเฉือนที่ฐานสูงสุด 180 N ลดลง 7% รูปที่ 4.17(ฉ), 4.17(ช) และ 4.17(ซ) แสดงค่าความเร่งของชั้นต่างๆ พบว่าค่าความเร่งสูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 เป็น 1.42, 1.94 และ 2.08 m/s^2 ตามลำดับ ความเร่งชั้น 1 และชั้น 3 ลดลง 19% และ 8% ตามลำดับ ส่วนค่าความเร่งของชั้น 2 เพิ่มขึ้น 1% รูปที่ 4.18 แสดงผลตอบสนองของตัวหนังสือที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20% รูปที่ 4.18(ก) แสดงค่าแรงที่สั่งกับแรงที่ได้ในตัวหนังสือจะเห็นได้ว่าแรงที่สั่งกับแรงที่ได้ในตัวหนังสือใกล้เคียงกันโดยค่าแรงที่ได้สูงสุด 31.6 N รูปที่ 4.18(ข) และ 4.18(ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับระยะเคลื่อนที่ของตัวหนังสือและความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับความเร็ว จะเห็นได้ว่าตัวหนังสือสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากรูปที่ 4.19(ก) พลังงานที่สลายไปในเสาสูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 2.89, 0.82 และ 0.69 N-m ตามลำดับ ลดลง 62%, 41% และ 32% ตามลำดับ รูปที่ 4.19(ข) แสดงพลังงานที่สลายในตัวหนังสือมีค่าสูงสุด 5.2 N-m รูปที่ 4.20(ก), 4.20(ข) และ 4.20(ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาแต่ละชั้น พบว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 16.8, 9.9 และ 4.7 mm ตามลำดับ ลดลง 24%, 4% และ 4% ตามลำดับจะเห็นได้ว่าเสาชั้น 1 มีความไม่เชิงเส้นลดลง

4.3.4 กรณีที่มีการควบคุมแรงหน่วงแบบ VVF

รูปที่ 4.21 แสดงผลตอบสนองของแบบจำลองอาคารที่มีการควบคุมแรงหน่วงแบบ VVF ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20% รูปที่ 4.21(ก) แสดงค่าความเร่งที่ฐาน รูปที่ 4.21(ข), 4.21(ค) และ 4.21(ง) แสดงระยะเคลื่อนที่ของชั้นต่างๆ จากรูปจะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 14.7, 23.6 และ 27.8 mm ตามลำดับ ลดลงจากกรณีที่ไม่มีการควบคุม 33%, 24% และ 21% ตามลำดับ รูปที่ 4.21(จ) แสดงค่าแรงเฉือนที่ฐานค่าแรงเฉือนที่ฐานสูงสุด 182 N ลดลง 7% รูปที่ 4.21(ฉ), 4.21(ช) และ 4.21(ซ) แสดงค่าความเร่งของชั้นต่างๆ พบว่าค่าความเร่งสูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 เป็น 1.36, 1.94 และ 1.95 m/s^2 ตามลำดับ ความเร่งชั้น 1 และ ชั้น 3 ลดลง 22% และ 14% ตามลำดับ ส่วนค่าความเร่งของชั้น 2 เพิ่มขึ้น 1% รูปที่ 4.22 แสดงผลตอบสนองของตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20% รูปที่ 4.22(ก) แสดงแรงที่สั่งกับแรงที่ได้ในตัวหน่วงจะเห็นได้ว่าค่าแรงใกล้เคียงกันค่าแรงที่สั่งสูงสุด 30 N ค่าแรงที่วัดได้สูงสุด 39.4 N ค่าแรงสูงสุดต่างกันเพราะผลจากความล่าช้าของตัวหน่วง รูปที่ 4.22(ข) และ 4.22(ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับระยะเคลื่อนที่ของตัวหน่วง และความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับความเร็ว จากรูปจะเห็นได้ว่าตัวหน่วงสามารถทำงานได้อย่างดี รูปที่ 4.23(ก) แสดงพลังงานที่สลายไปในเสาชั้นต่างๆ พบว่าค่าพลังงานที่สลายสูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 1.54, 0.50 และ 0.99 N-m ตามลำดับ ลดลง 80%, 64% และ 2% ตามลำดับ จากรูปที่ 4.23(ข) พลังงานที่สลายโดยตัวหน่วงสูงสุดมีค่า 6.4 N-m รูปที่ 4.24(ก), 4.24(ข) และ 4.24(ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาแต่ละชั้น ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 14.7, 9.4 และ 4.2 mm ตามลำดับ ระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้น 1, 2 และ 3 ลดลง 33%, 9% และ 14% ตามลำดับ

4.4 ผลตอบสนองสูงสุดของแบบจำลองอาคาร

4.4.1 ผลตอบสนองสูงสุดของแบบจำลองอาคารภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMA

Kobe

รูปที่ 4.25(ก), 4.25(ข) และ 4.25(ค) แสดงระยะเคลื่อนที่สูงสุดของแต่ละชั้นกับแรงหน่วงสูงสุดของรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน แบบหนืด และแบบ VVF ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 3 ระดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนที่ที่จะลดลงเมื่อ

แรงท่วงเพิ่มขึ้นโดยรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทานสามารถลดระยะเคลื่อนที่ได้ดีที่สุด รองลงมาคือรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบ VVF รูปที่ 4.25(ง), 4.25(จ) และ 4.25(ฉ) แสดงระยะเคลื่อนที่สูงสุดของแต่ละชั้นกับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวท่วง จากรูปจะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนที่ลดลงเมื่อพลังงานที่สลายในตัวท่วงมากขึ้นสำหรับรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนืดและแบบ VVF ส่วนรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทานระยะเคลื่อนที่สูงสุดลดลงเมื่อพลังงานที่สลายในตัวท่วงเพิ่มขึ้นจนถึงค่าเท่ากับ 5.1 N-m ภายใต้คลื่นที่ระดับความเข้ม 20% ระยะเคลื่อนที่สูงสุดลดลงโดยที่พลังงานที่สลายในตัวท่วงลดลงเนื่องจากที่ค่าแรงท่วงมากตัวท่วงจะมีระยะเคลื่อนที่น้อยมากจึงทำให้เกิดการสลายพลังงานได้น้อยในตัวท่วง รูปที่ 4.26(ก), 4.26(ข) และ 4.26(ค) แสดงค่าความเร่งสูงสุดของแต่ละชั้นกับแรงท่วงสูงสุดของรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 3 ระดับ จะเห็นได้ว่าความเร่งของชั้น 1 รูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบ VVF สามารถลดค่าความเร่งได้ดีที่สุด ความเร่งของชั้น 2 รูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทานสามารถลดค่าความเร่งได้ดีที่สุด รองลงมาคือรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบ VVF ส่วนค่าความเร่งของชั้น 3 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 10% รูปแบบการควบคุมทั้งสามแบบให้ผลใกล้เคียงกัน ส่วนคลื่นที่ระดับความเข้ม 17% และ 20% ในช่วงที่แรงท่วงน้อยกว่า 30 และ 35 N รูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนืดสามารถลดค่าความเร่งได้ดีที่สุด แต่ในช่วงที่แรงท่วงมากกว่าค่า 30 และ 35 N รูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบ VVF ให้ผลดีที่สุด รูปที่ 4.27(ก), 4.27(ข) และ 4.27(ค) แสดงค่าพลังงานที่สลายในเสาสูงสุดกับแรงท่วงสูงสุดของรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆ ภายใต้แผ่นดินไหว JMA Kobe ที่ระดับความเข้มต่างๆ จากรูปจะเห็นได้ว่าเสาชั้น 1 มีการสลายพลังงานในเสามากที่สุดซึ่งเกิดความเสียหายมากที่สุดค่าพลังงานที่สลายในเสาลดลงเมื่อแรงท่วงเพิ่มขึ้น โดยรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทานและแบบ VVF สามารถลดพลังงานที่สลายไปในเสาได้มาก รูปที่ 4.28(ก), 4.28(ข) และ 4.28(ค) แสดงระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาแต่ละชั้นกับแรงท่วงสูงสุดของรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆ ภายใต้แผ่นดินไหว JMA Kobe ที่ระดับความเข้มต่างๆ จากรูปจะเห็นได้ว่าเสาชั้น 1 จะเคลื่อนที่ลดลงเมื่อแรงท่วงเพิ่มขึ้นโดยรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทานสามารถลดระยะเคลื่อนที่ของเสาได้ดีที่สุด รองลงมาคือรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบ VVF ส่วนเสาชั้นที่ 2 จะเคลื่อนที่ลดลงเล็กน้อยเมื่อแรงท่วงเพิ่มขึ้น โดยรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทานให้ผลดีที่สุด เสาชั้น 3 ระยะเคลื่อนที่ลดลงเล็กน้อยเมื่อแรงท่วงเพิ่มขึ้น รูปแบบการควบคุมทั้งสามแบบให้ค่าใกล้เคียงกัน รูปที่ 4.29(ก) แสดงค่าแรงเฉือนที่ฐานสูงสุดกับค่าแรงท่วงสูงสุดของรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 3 ระดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าแรงเฉือนที่ฐานลดลงเมื่อแรงท่วงเพิ่มขึ้นโดยรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทานลดค่าแรงเฉือนที่ฐานได้มากที่สุด

4.4.2 ผลตอบสนองสูงสุดของแบบจำลองอาคารภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว EI

Centro

รูปที่ 4.30(ก), 4.30(ข) และ 4.30(ค) แสดงระยะเคลื่อนที่สูงสุดของแต่ละชั้นกับแรงท่วงสูงสุดของรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทาน แบบหนืด และแบบ VVF ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว EI Centro ที่ระดับความเข้ม 3 ระดับ จะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนที่ของทั้งสามชั้นจะลดลงเมื่อแรงท่วงเพิ่มขึ้น ระยะเคลื่อนที่ชั้น 1 รูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทานและแบบ VVF สามารถลดระยะเคลื่อนที่ได้ใกล้เคียงกันและสามารถลดระยะเคลื่อนที่ได้ดีกว่ารูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนืด ส่วนระยะเคลื่อนที่ชั้น 2 และ ชั้น 3 รูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทานให้ผลดีที่สุด รูปที่ 4.30(ง), 4.30(จ) และ 4.30(ฉ) แสดงระยะเคลื่อนที่สูงสุดของแต่ละชั้นกับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวท่วง จากรูปจะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดลดลงเมื่อพลังงานที่สลายในตัวท่วงเพิ่มขึ้นสำหรับรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนืดและแบบ VVF ส่วนรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทานระยะเคลื่อนที่สูงสุดลดลงเมื่อพลังงานที่สลายในตัวท่วงเพิ่มขึ้นจนถึงค่าเท่ากับ 4.23 N-m สำหรับคลื่นที่ระดับความเข้ม 44% ระยะเคลื่อนที่สูงสุดจะลดลงโดยที่พลังงานที่สลายในตัวท่วงลดลงเนื่องจากที่ค่าแรงท่วงมากตัวท่วงจะมีระยะเคลื่อนที่น้อยมากจึงทำให้เกิดการสลายพลังงานได้น้อยในตัวท่วง รูปที่ 4.31(ก), 4.31(ข) และ 4.31(ค) แสดงค่าความเร่งสูงสุดของแต่ละชั้นกับแรงท่วงสูงสุดของรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว EI Centro ที่ระดับความเข้ม 3 ระดับ จากรูปที่ 4.31(ก) รูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบ VVF สามารถลดค่าความเร่งชั้นที่ 1 ได้ดีที่สุด รองลงมาคือรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทาน จากรูปที่ 4.31(ข) ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว EI Centro ที่ระดับความเข้ม 44% รูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบ VVF สามารถลดค่าความเร่งของชั้นที่ 2 ได้ดีที่สุด รองลงมาคือรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนืด ส่วนคลื่นแผ่นดินไหวที่ระดับความเข้ม 40% รูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนืดให้ผลดีที่สุด รองลงมาคือรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบ VVF ส่วนคลื่นแผ่นดินไหวที่ระดับความเข้ม 27% รูปแบบการควบคุมทั้งสามแบบให้ค่าใกล้เคียงกัน รูปที่ 4.31(ค) ในช่วงค่าแรงท่วงน้อยรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบ VVF สามารถลดค่าความเร่งของชั้น 3 ได้ดีที่สุดในช่วงที่ค่าแรงท่วงมากรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทานให้ค่าดีที่สุด รูปที่ 4.32(ก), 4.32(ข) และ 4.32(ค) แสดงค่าพลังงานที่สลายในเสาสูงสุดกับค่าแรงท่วงสูงสุดของรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว EI Centro ที่ระดับความเข้ม 3 ระดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าเสาชั้นที่ 1 พลังงานที่สลายในเสาลดลงเมื่อแรงท่วงเพิ่มขึ้น ในช่วงแรงท่วงน้อยกว่าค่าประมาณ 18 N รูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบ VVF สามารถลดค่าพลังงานที่สลายในเสาได้ดีที่สุด รองลงมาคือรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียด

ทาน ในช่วงแรงหน่วงมากกว่าค่าประมาณ 18 N รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานให้ผลดีที่สุด รองลงมาคือรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบ VVF รูปที่ 4.33(ก), 4.33(ข) และ 4.33(ค) แสดงระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาแต่ละชั้นกับแรงหน่วงสูงสุดของรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro ที่ระดับความเข้ม 3 ระดับ จากรูปที่ 4.33(ก) ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาลดลงเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้นโดยรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานและแบบ VVF สามารถลดระยะเคลื่อนที่ของชั้น 1 ได้ใกล้เคียงกันโดยสามารถลดได้มากกว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด จากรูปที่ 4.33(ข) ระยะเคลื่อนที่ของเสาลดลงเล็กน้อยเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้นโดยรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานสามารถลดระยะเคลื่อนที่ได้ดีที่สุด จากรูปที่ 4.33(ค) รูปแบบการควบคุมทั้งสามแบบให้ค่าใกล้เคียงกัน รูปที่ 4.34 แสดงค่าแรงเฉือนสูงสุดกับค่าแรงหน่วงสูงสุดของรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน แบบหนืด และแบบ VVF ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro ที่ระดับความเข้ม 3 ระดับ จากรูปจะเห็นว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานสามารถลดค่าแรงเฉือนได้มากที่สุด

4.5 สรุปผลการทดสอบ

เพื่อศึกษาประสิทธิผลของตัวหน่วงปรับค่าได้ที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้ (VVF) ในการควบคุมผลตอบสนองไม่เชิงเส้นของแบบจำลองอาคาร จึงได้ทำการทดสอบแบบจำลองอาคารโครงสร้างเหล็กสูง 3 ชั้น กว้าง 40 cm ยาว 80 cm สูงประมาณ 1 m มีค่าคาบธรรมชาติของโหมด 1, 2 และ 3 เป็น 0.73, 0.25 และ 0.17 s ตามลำดับ มีการติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe และ คลื่น El Centro ที่ระดับความเข้มต่างๆ โดยมีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน แบบหนืด และ แบบ VVF ในการควบคุมผลตอบสนองไม่เชิงเส้นของแบบจำลองอาคาร สำหรับผลการทดสอบกรณีคลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20% เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการควบคุมพบว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานสามารถลดระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1 และ 2 ได้ 42% และ 5% ตามลำดับ ส่วนชั้นที่ 3 เพิ่มขึ้น 6% พลังงานที่สลายในเสาชั้น 1, 2 และ 3 ลดลง 89%, 46% และ 7% ตามลำดับ ค่าความเร่งของชั้น 1 และ 2 ลดลง 2% และ 9% ส่วนชั้น 3 เพิ่มขึ้น 15% พลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุด 5.1 N-m ส่วนรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดสามารถลดระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 ได้ 24%, 4% และ 4% ตามลำดับ พลังงานที่สลายในเสาชั้น 1, 2 และ 3 ลดลง 62%, 41% และ 32% ตามลำดับ ค่าความเร่งชั้น 1 และ ชั้น 3 ลดลง 19% และ 8% ตามลำดับ ส่วนค่าความเร่งของชั้น 2 เพิ่มขึ้น 1% พลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุด 5.2 N-m ส่วนรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบ VVF สามารถลดระยะเคลื่อนที่

สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 ได้ 33%, 9% และ 14% ตามลำดับ พลังงานที่สลายในเสาชั้น 1, 2 และ 3 ลดลง 80%, 64% และ 2% ตามลำดับ ค่าความเร่งของชั้น 1 และ 3 ลดลง 22% และ 14% ส่วนชั้น 2 เพิ่มขึ้น 1% พลังงานที่สลายในตัวห้วงสูงสุด 6.4 N-m เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการควบคุมแรงท่วงทั้งสามแบบพบว่ารูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทานลระยะเคลื่อนที่ และพลังงานที่สลายในเสาได้ดีที่สุด ส่วนรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบ VVF ลดค่าความเร่งได้ดีใกล้เคียงกับแบบหนืดและมีการสลายพลังงานในตัวห้วงสูงสุด

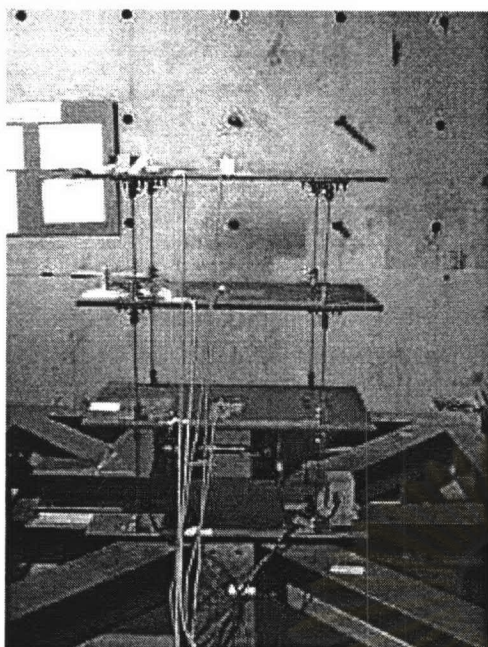


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

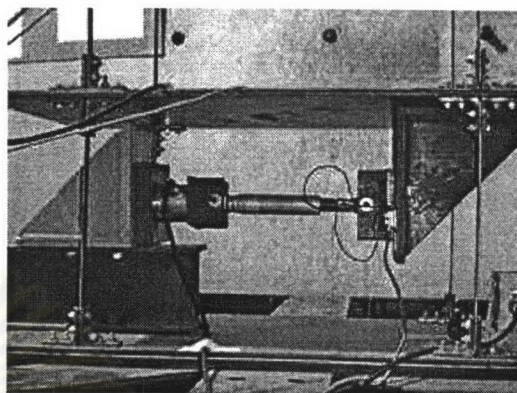
ตารางที่ 4.1 กรณีที่ทำการทดสอบ

กรณี	รูปแบบการควบคุมแรงหน่วง	ค่าพารามิเตอร์สำหรับการควบคุม
1	ไม่ติดตั้งตัวหน่วง	ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วง
2	ไม่จ่ายกระแสไฟให้ตัวหน่วง	มีการติดตั้งตัวหน่วงแต่ไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ตัวหน่วง
3	แบบเสียดทาน	ค่าแรงเสียดทาน 10 N
4	แบบเสียดทาน	ค่าแรงเสียดทาน 30 N
5	แบบเสียดทาน	ค่าแรงเสียดทาน 50 N
6	แบบหนืด	ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 0.25 N-s/mm
7	แบบหนืด	ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 0.50 N-s/mm
8	แบบหนืด	ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 0.75 N-s/mm
9	แบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้	ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 0.50 N-s/mm ค่าแรงเสียดทาน 10 N
10	แบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้	ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 0.50 N-s/mm ค่าแรงเสียดทาน 30 N
11	แบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้	ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 0.50 N-s/mm ค่าแรงเสียดทาน 50 N

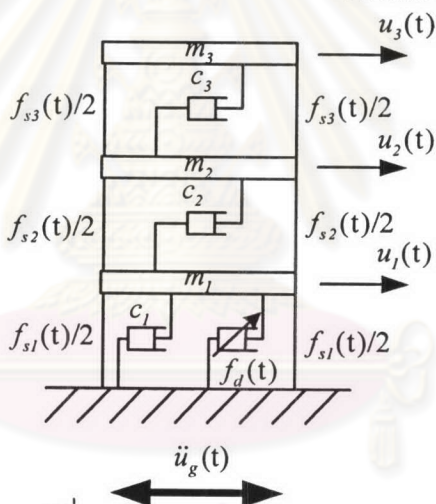
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



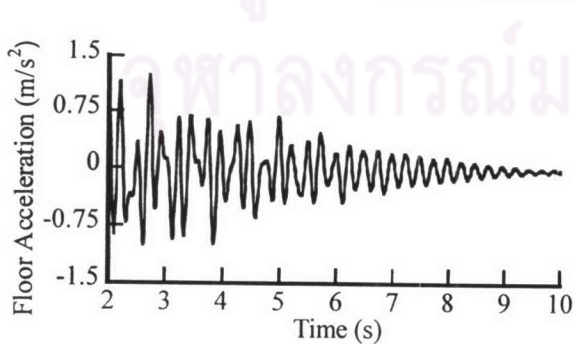
รูปที่ 4.1 แสดงแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบ



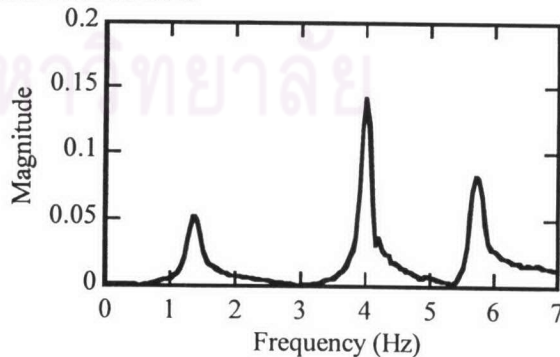
รูปที่ 4.2 แสดงการติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กในแบบจำลอง



รูปที่ 4.3 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองอาคาร

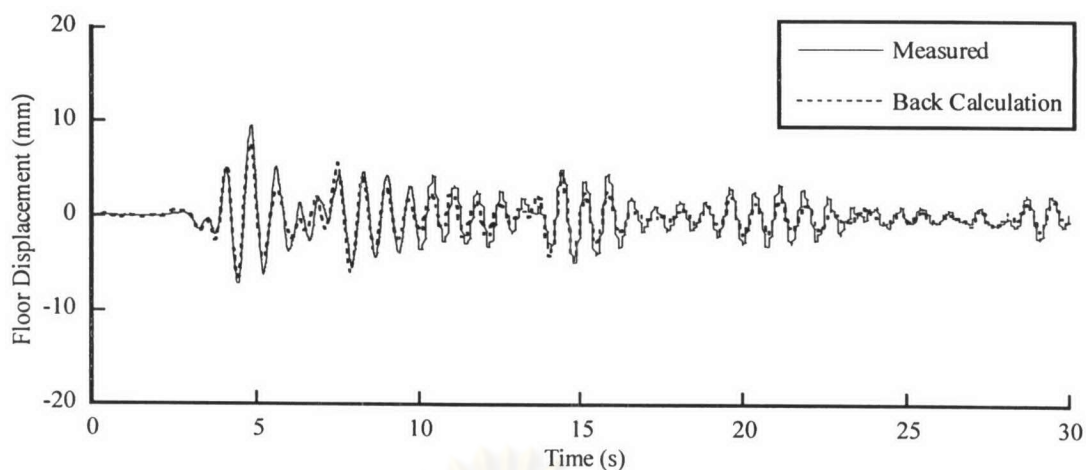


(ก) ความเร่งของชั้น 3 กับเวลา

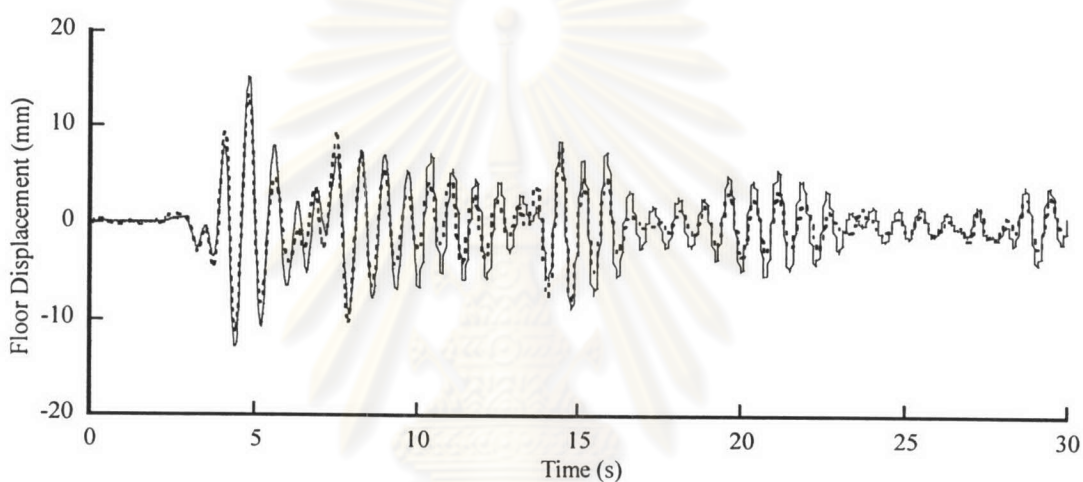


(ข) ความเร่งของชั้น 3 กับความถี่

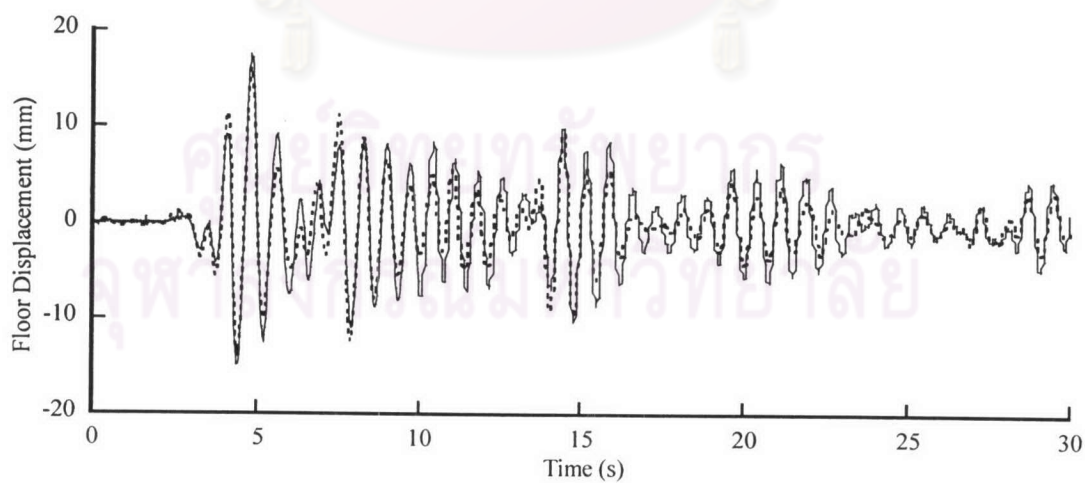
รูปที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบการสั่นอิสระ (free vibration test)



(ก) ระยะเวลาเคลื่อนที่ชั้น 1



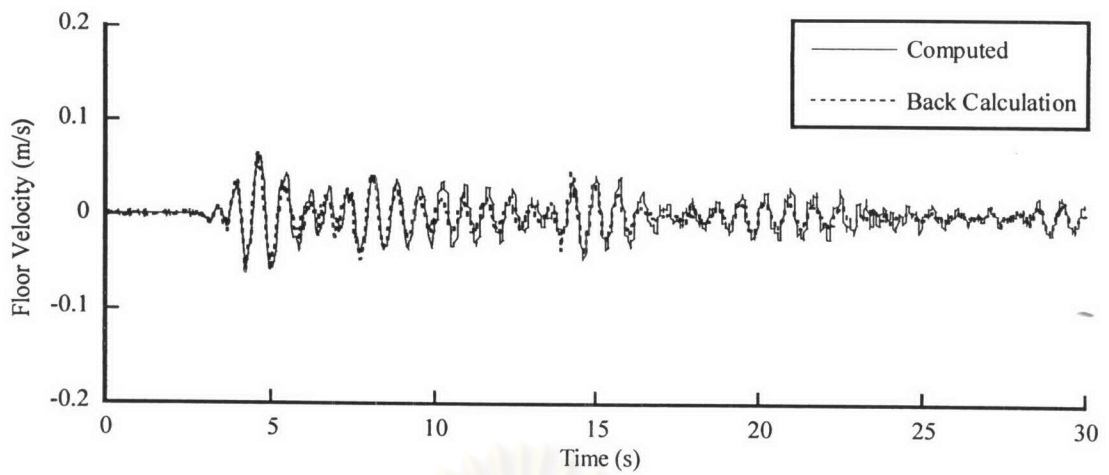
(ข) ระยะเวลาเคลื่อนที่ชั้น 2



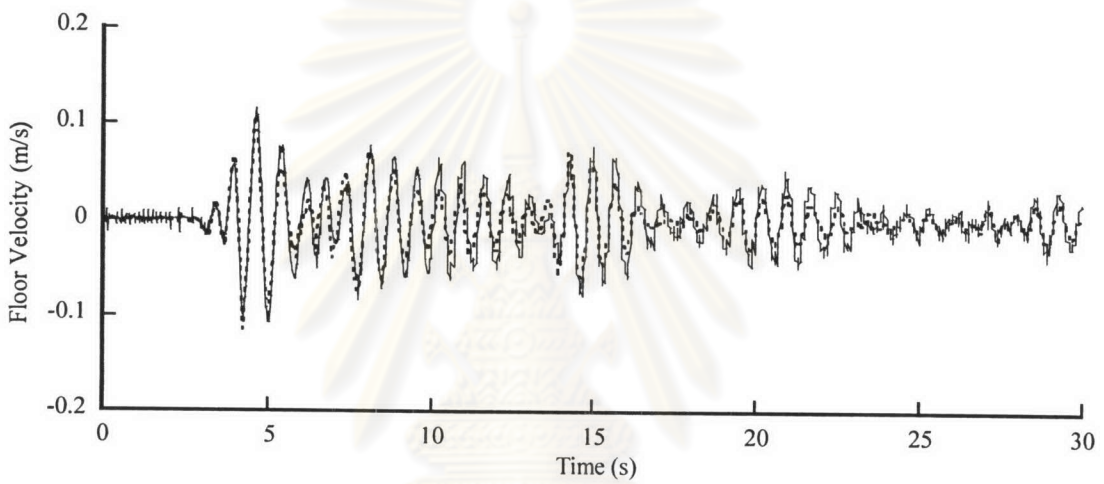
(ค) ระยะเวลาเคลื่อนที่ชั้น 3

รูปที่ 4.5 แสดงระยะเวลาเคลื่อนที่ของชั้นต่างๆที่ได้จากการวัดและจากการคำนวณเมื่อ

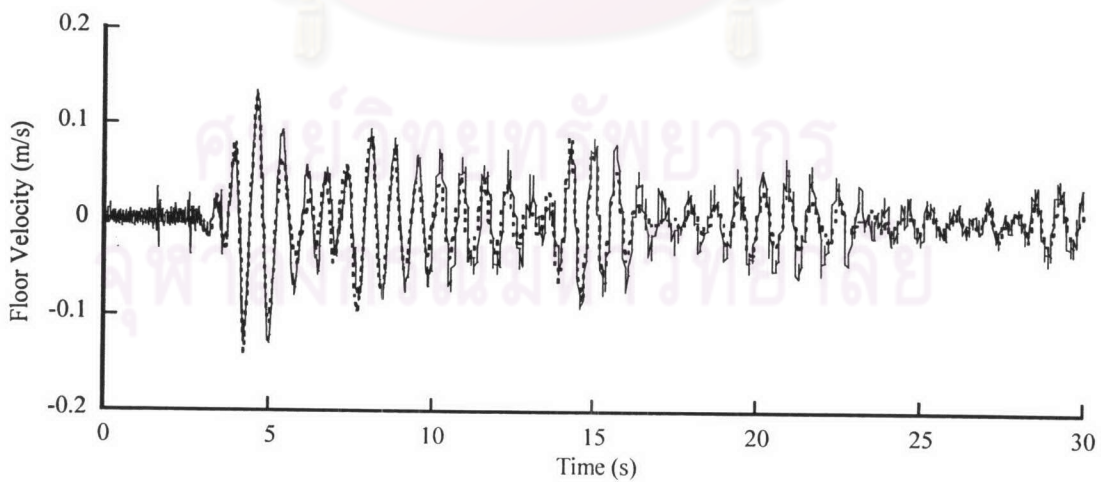
กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับ 1.75 N-s/m



(ก) ความเร็วชั้น 1

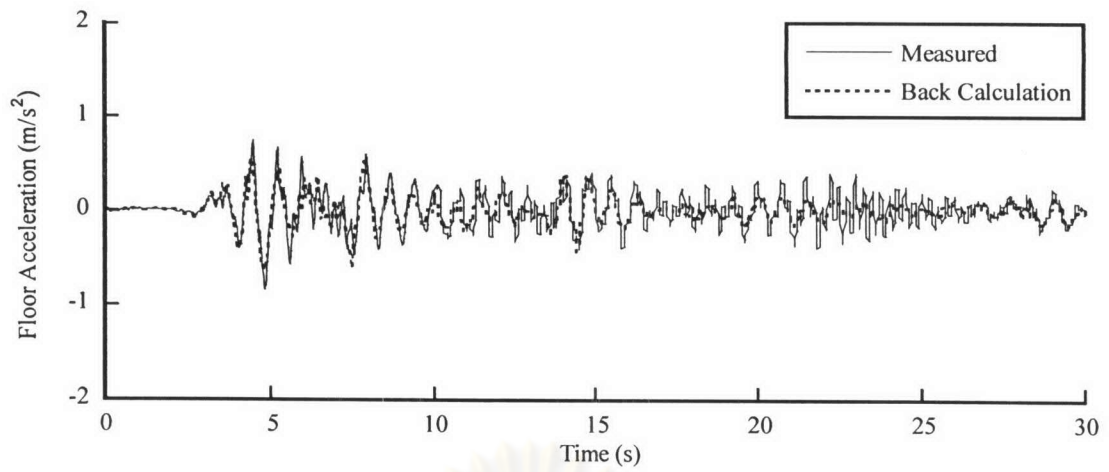


(ข) ความเร็วชั้น 2

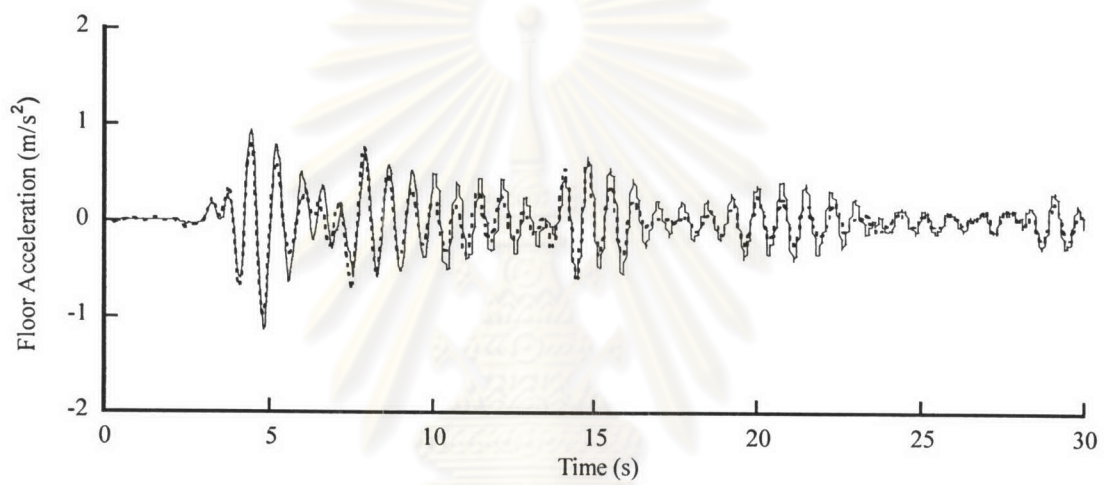


(ค) ความเร็วชั้น 3

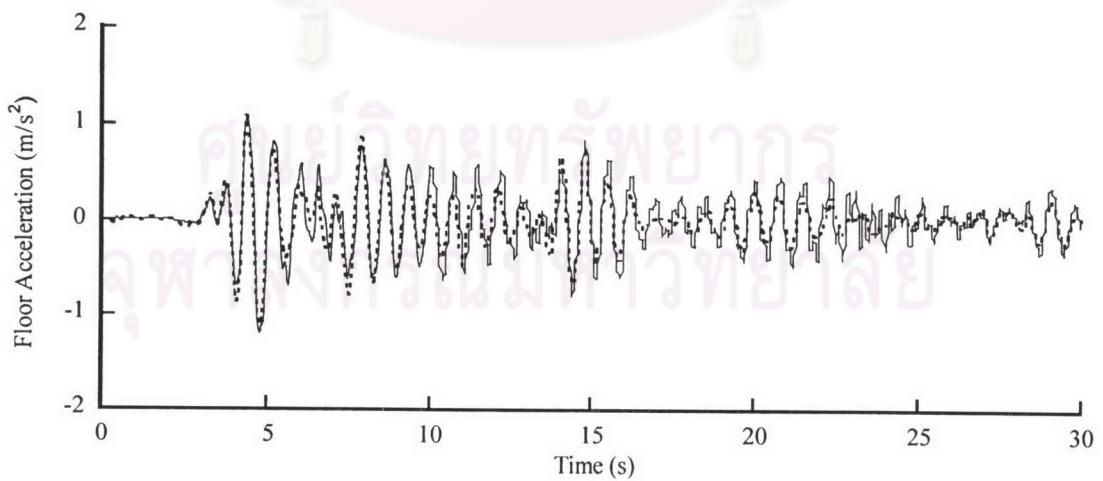
รูปที่ 4.6 แสดงความเร็วของชั้นต่างๆที่ได้จากการวัดระยะเคลื่อนที่แล้วคำนวณเป็นความเร็วและจากการคำนวณเมื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับ 1.75 N-s/m



(ก) ความเร่งชั้น 1

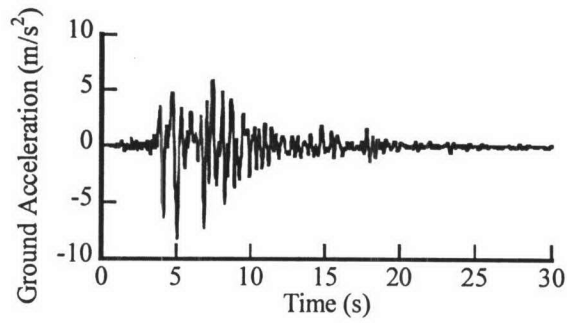


(ข) ความเร่งชั้น 2

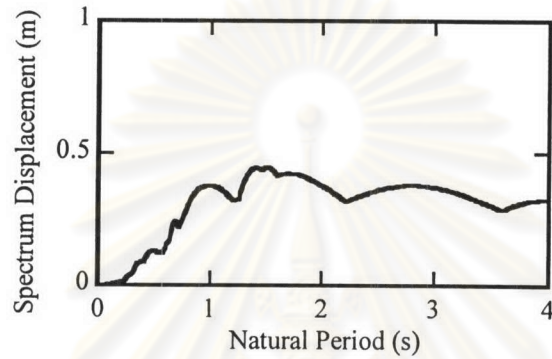


(ค) ความเร่งชั้น 3

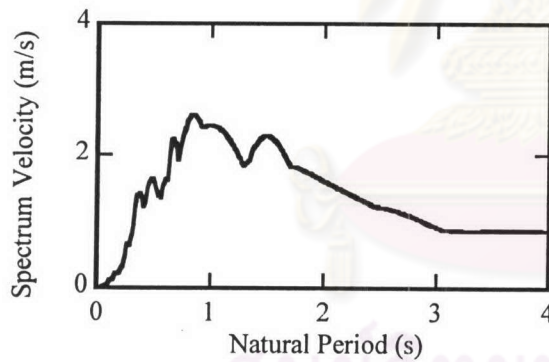
รูปที่ 4.7 แสดงความเร่งของชั้นต่างๆที่ได้จากการวัดและจากการคำนวณเมื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับ 1.75 N-s/m



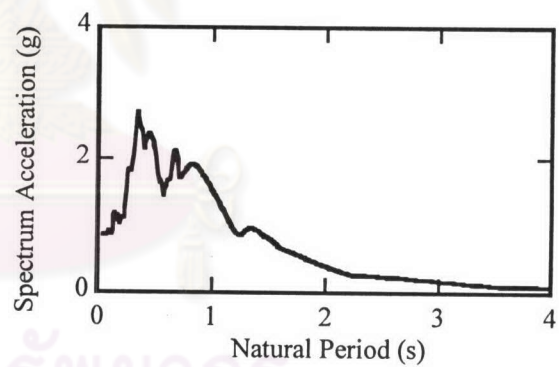
(ก) ความเร่ง



(ข) สเปกตรัมผลตอบสนองของระยะเคลื่อนที่

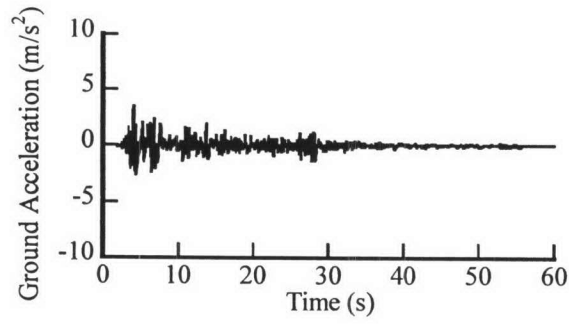


(ค) สเปกตรัมผลตอบสนองของความเร็ว

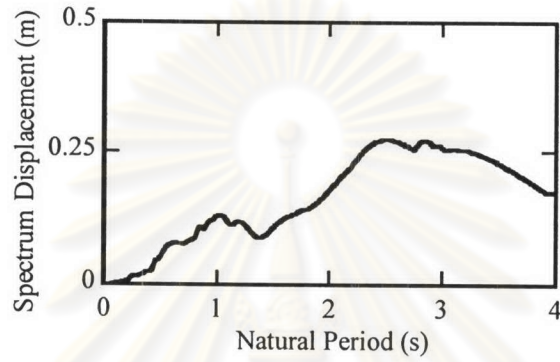


(ง) สเปกตรัมผลตอบสนองของความเร่ง

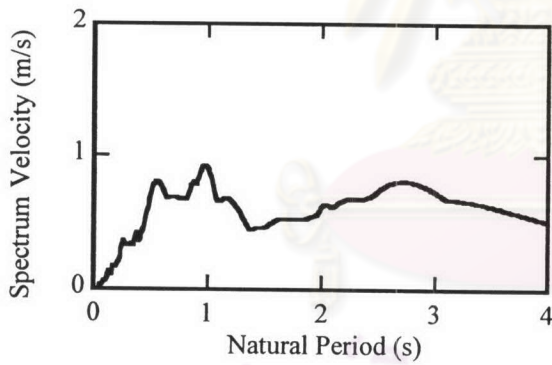
รูปที่ 4.8 คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe



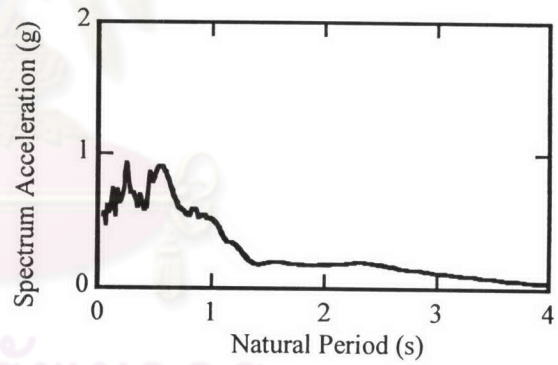
(ก) ความเร่ง



(ข) สเปกตรัมผลตอบสนองของระยะเคลื่อนที่

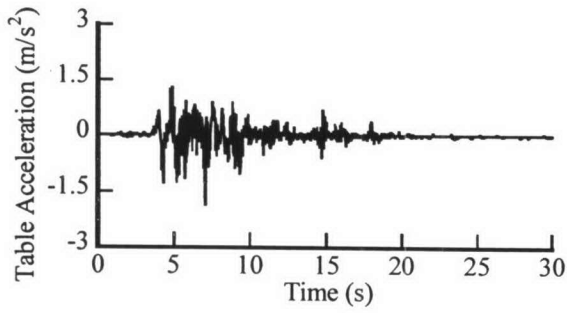


(ค) สเปกตรัมผลตอบสนองของความเร็ว

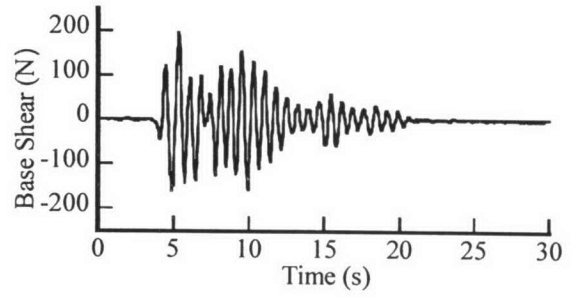


(ง) สเปกตรัมผลตอบสนองของความเร่ง

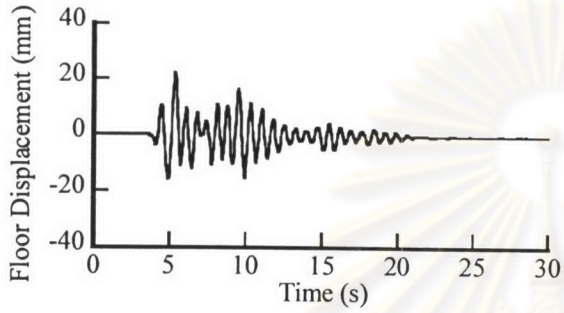
รูปที่ 4.9 คลื่นแผ่นดินไหว El Centro



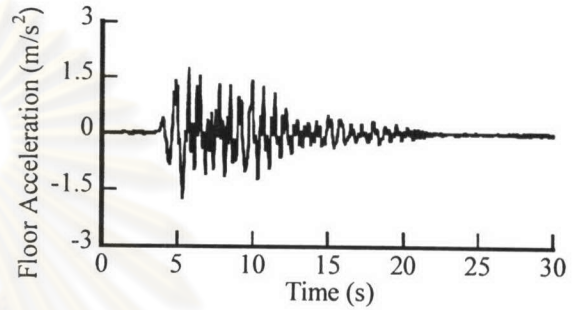
(ก) ความเร่งที่ฐาน



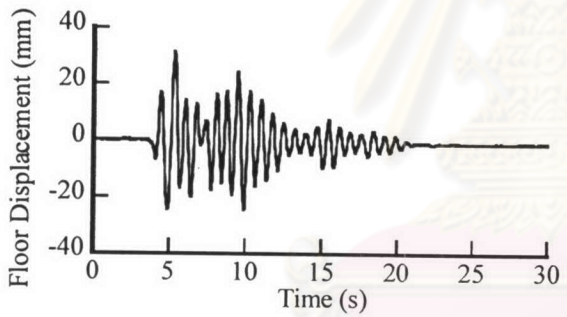
(จ) แรงเฉือนที่ฐาน



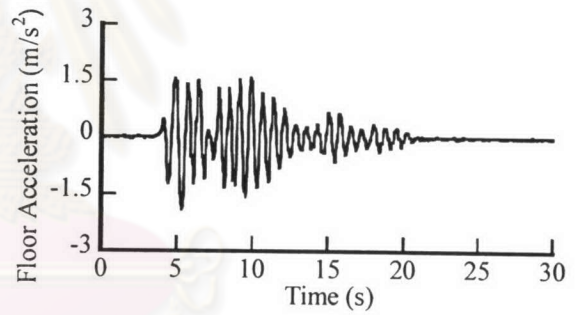
(ข) ระยะเคลื่อนที่ของชั้น 1



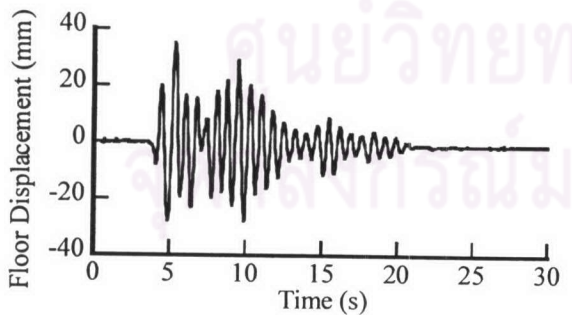
(ฉ) ความเร่งของชั้น 1



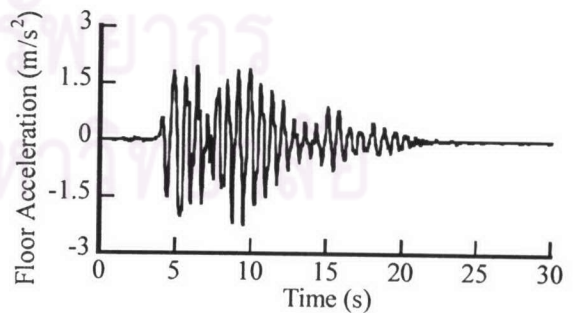
(ค) ระยะเคลื่อนที่ของชั้น 2



(ช) ความเร่งของชั้น 2



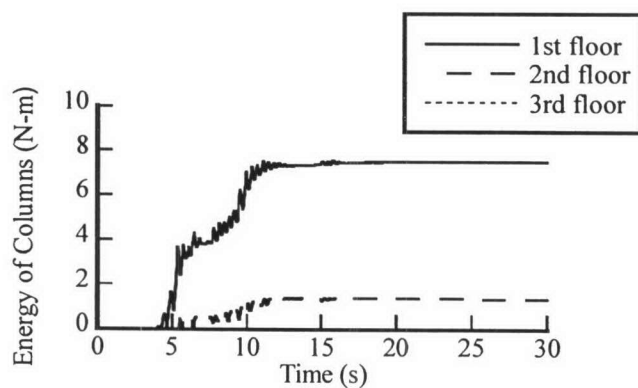
(ง) ระยะเคลื่อนที่ของชั้น 3



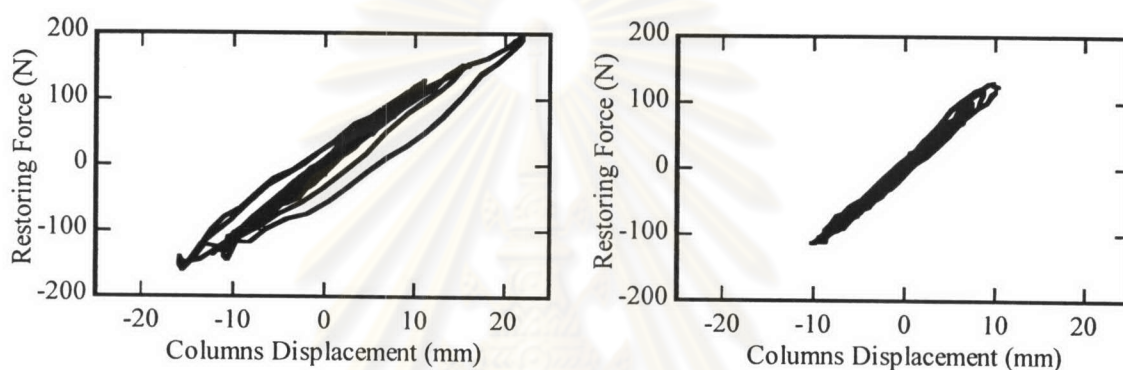
(ซ) ความเร่งของชั้น 3

รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองของแบบจำลองอาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วงภายใต้

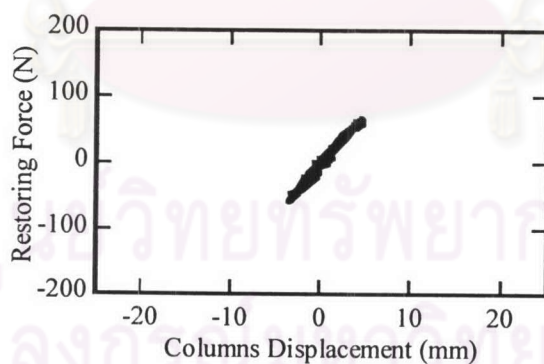
คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%



รูปที่ 4.11 พลังงานที่สลายในเสา

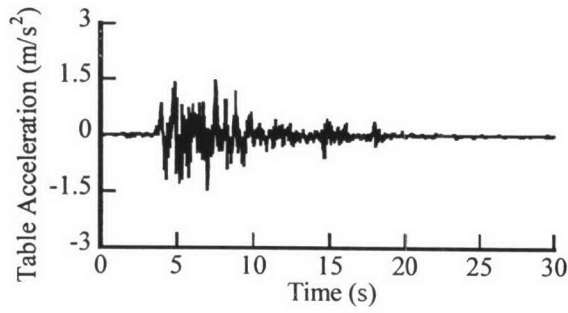


(ก) แรงต้านในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้น 1 (ข) แรงต้านในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้น 2

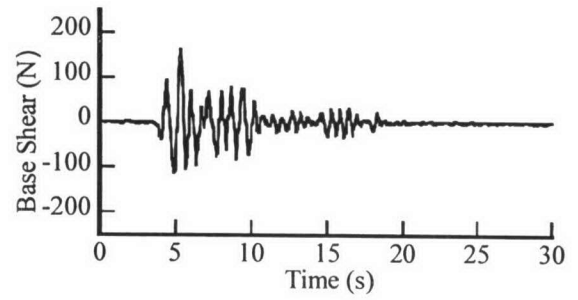


(ค) แรงต้านในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้น 3

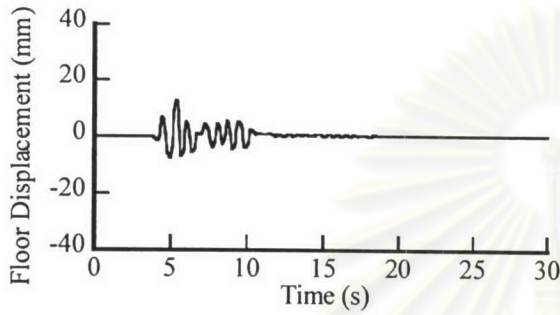
รูปที่ 4.12 แรงต้านในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วงภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%



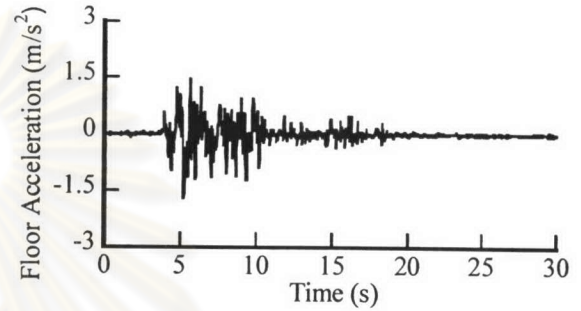
(ก) ความเร่งที่ฐาน



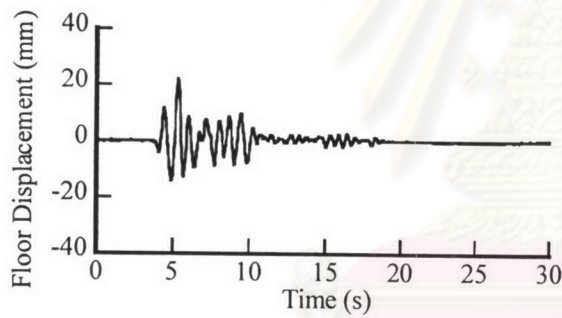
(จ) แรงเฉือนที่ฐาน



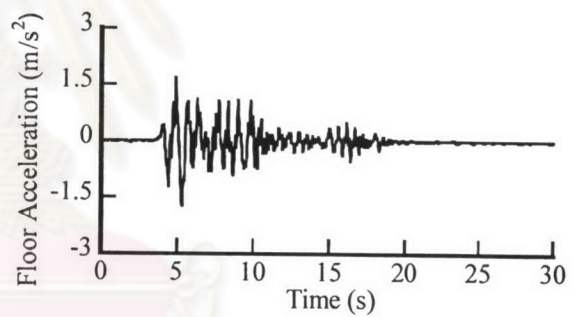
(ข) ระยะเคลื่อนที่ของชั้น 1



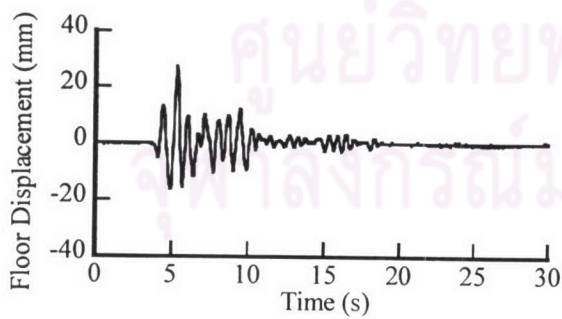
(ฉ) ความเร่งของชั้น 1



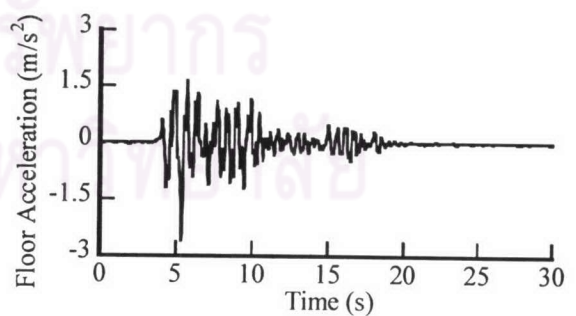
(ค) ระยะเคลื่อนที่ของชั้น 2



(ช) ความเร่งของชั้น 2

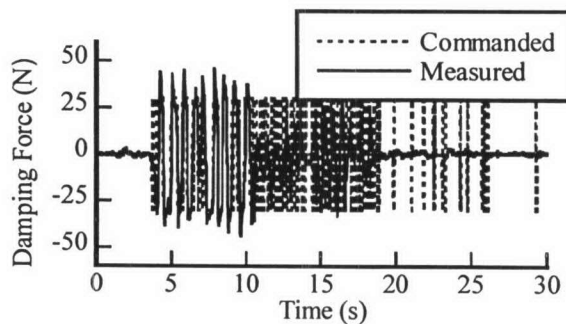


(ง) ระยะเคลื่อนที่ของชั้น 3

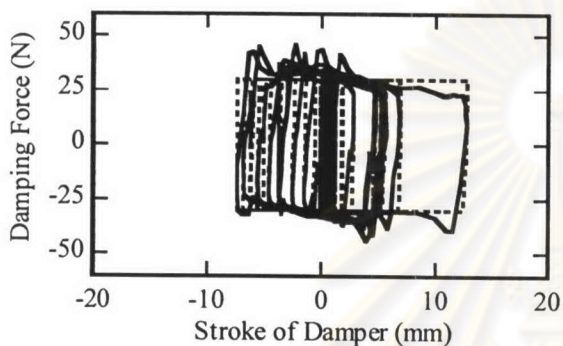


(ซ) ความเร่งของชั้น 3

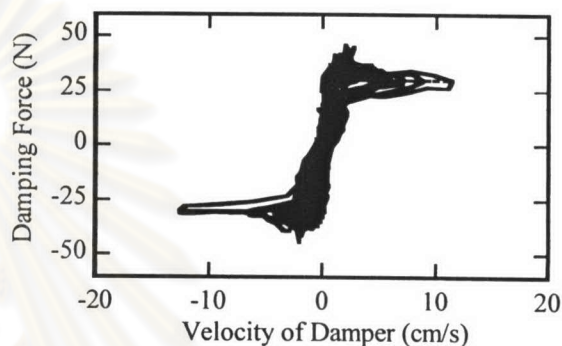
รูปที่ 4.13 ผลตอบสนองของแบบจำลองอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%



(ก) แรงหน่วง

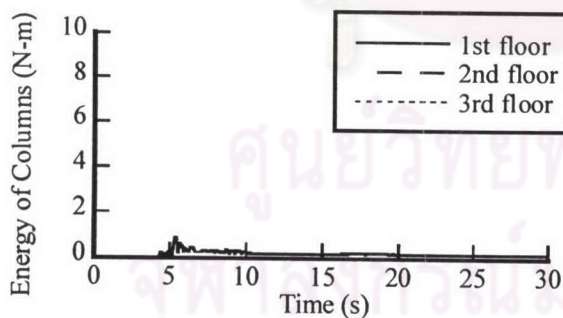


(ข) แรงหน่วงกับระยะเคลื่อนที่ของตัวหน่วง

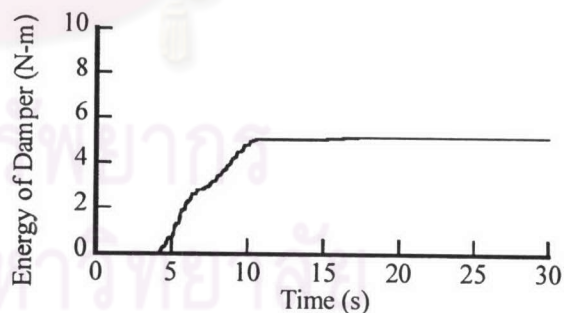


(ค) แรงหน่วงกับความเร็วของตัวหน่วง

รูปที่ 4.14 ผลตอบสนองของตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน
ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%

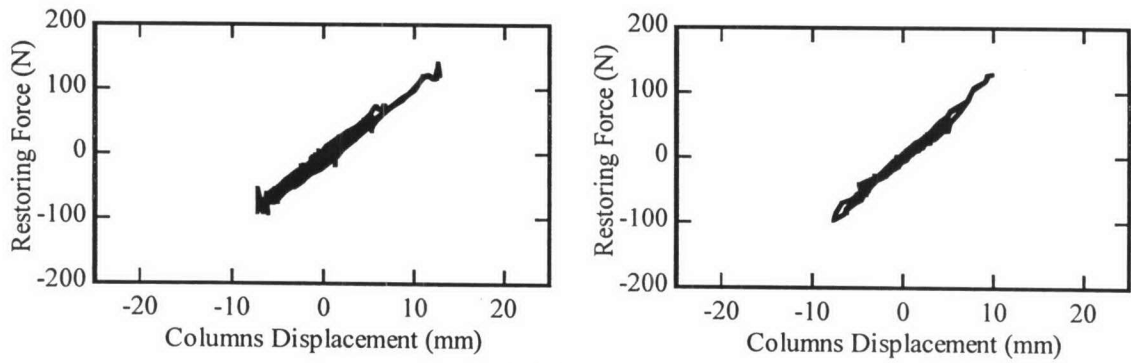


(ก) พลังงานที่สลายในเสา

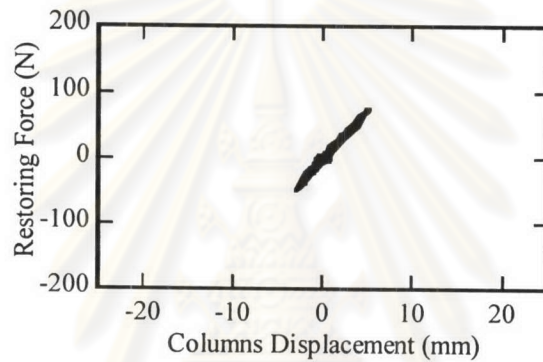


(ข) พลังงานที่สลายในตัวหน่วง

รูปที่ 4.15 พลังงานที่สลายในเสาและในตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน
ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%



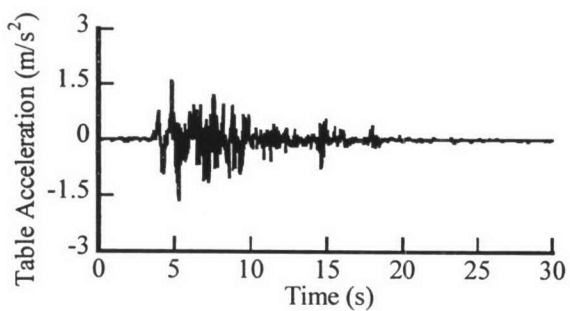
(ก) แรงต้านในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้น 1 (ข) แรงต้านในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้น 2



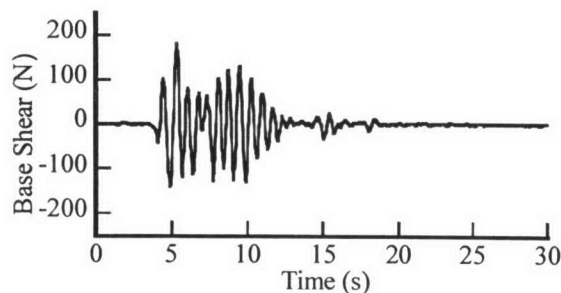
(ค) แรงต้านในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้น 3

รูปที่ 4.16 แรงต้านในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%

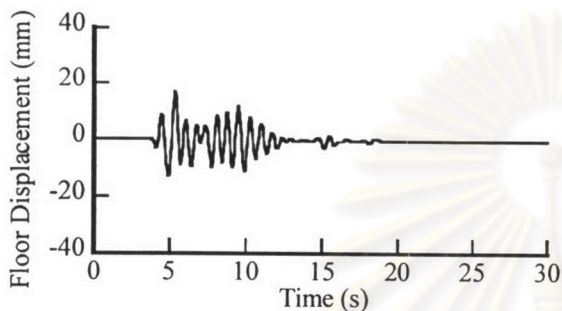
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



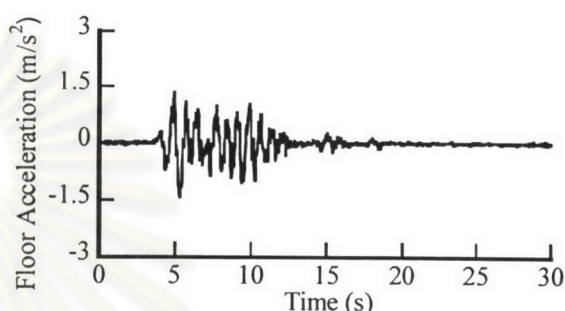
(ก) ความเร่งที่ฐาน



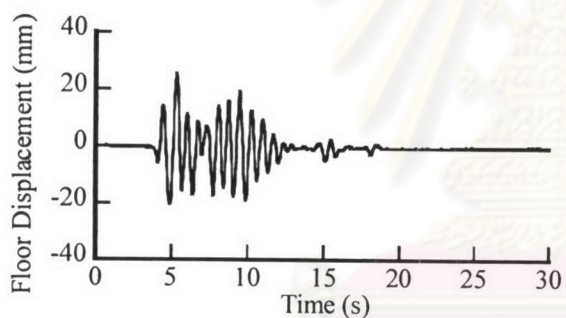
(จ) แรงเฉือนที่ฐาน



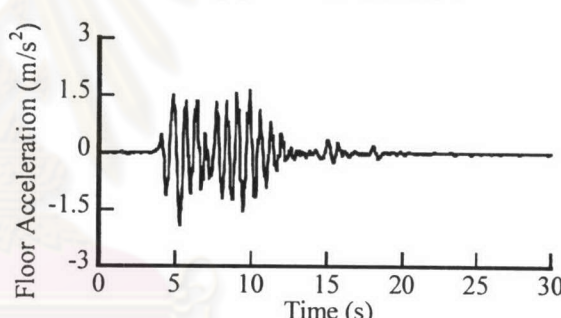
(ข) ระยะเคลื่อนที่ของชั้น 1



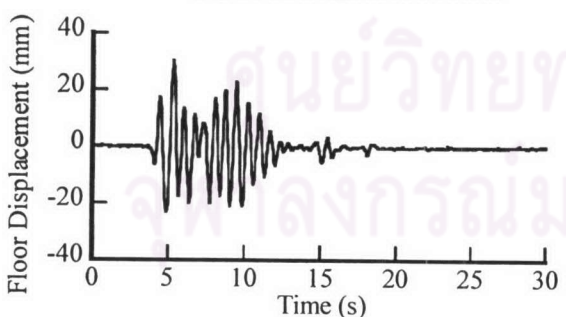
(ฉ) ความเร่งของชั้น 1



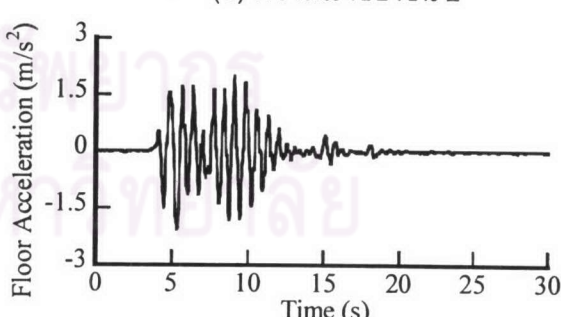
(ค) ระยะเคลื่อนที่ของชั้น 2



(ช) ความเร่งของชั้น 2

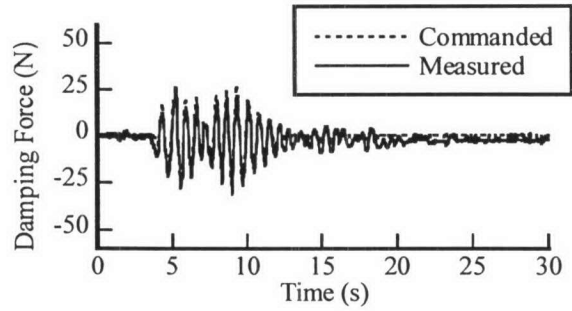


(ง) ระยะเคลื่อนที่ของชั้น 3

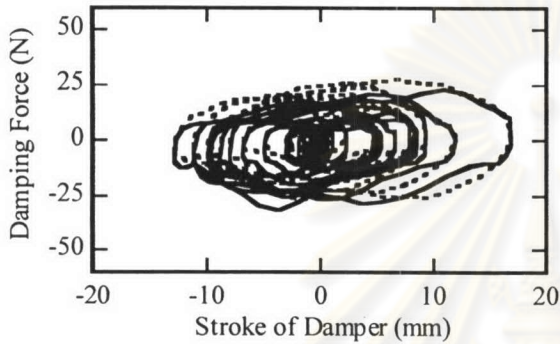


(ซ) ความเร่งของชั้น 3

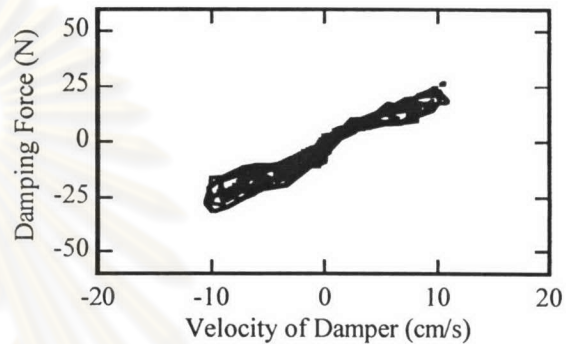
รูปที่ 4.17 ผลตอบสนองของแบบจำลองอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%



(ก) แรงหน่วง

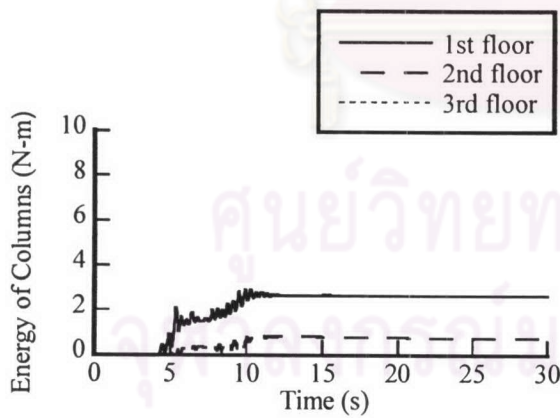


(ข) แรงหน่วงกับระยะเคลื่อนที่ของตัวหน่วง

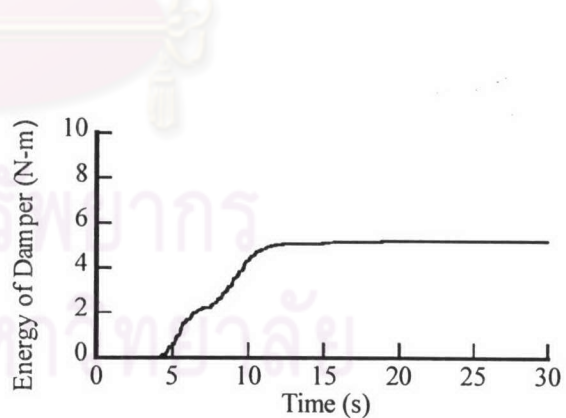


(ค) แรงหน่วงกับความเร็วของตัวหน่วง

รูปที่ 4.18 ผลตอบสนองของตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%

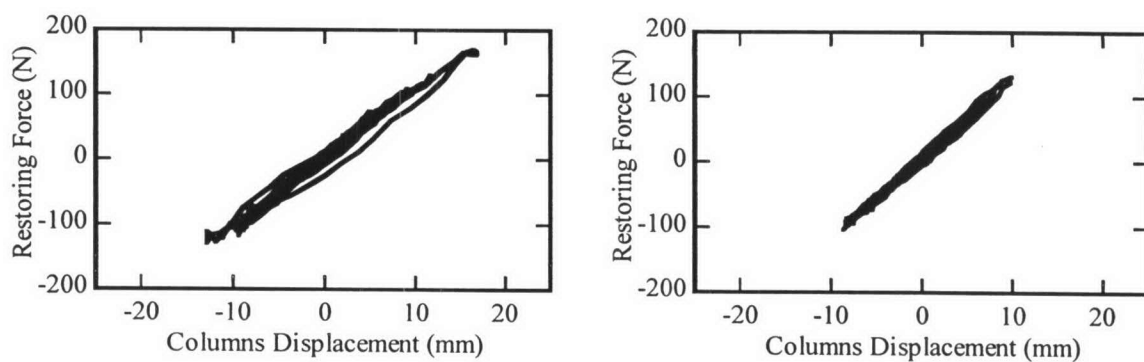


(ก) พลังงานที่สลายในเสา

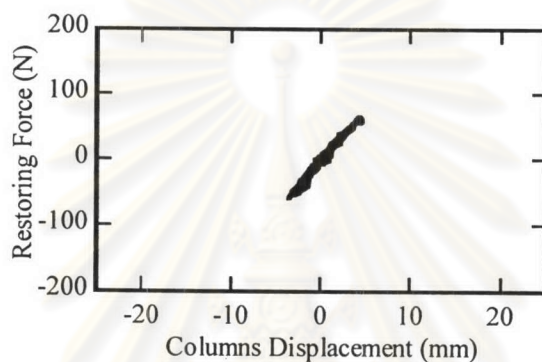


(ข) พลังงานที่สลายในตัวหน่วง

รูปที่ 4.19 พลังงานที่สลายในเสาและในตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%



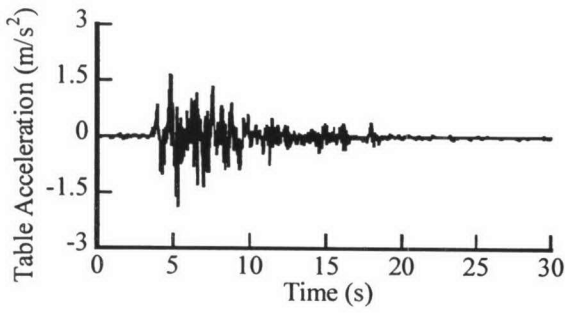
(ก) แรงต้านในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้น 1 (ข) แรงต้านในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้น 2



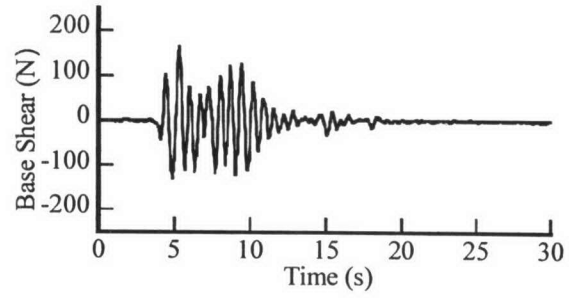
(ค) แรงต้านในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้น 3

รูปที่ 4.20 แรงต้านในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%

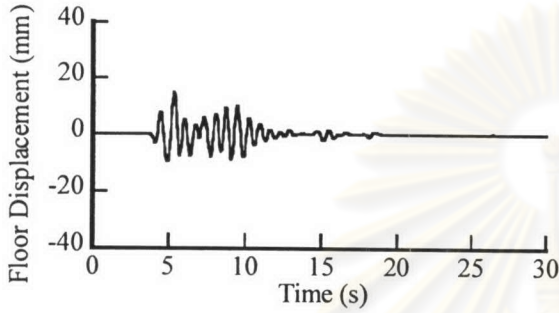
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



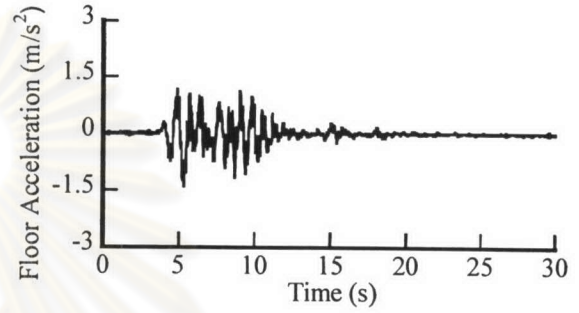
(ก) ความเร่งที่ฐาน



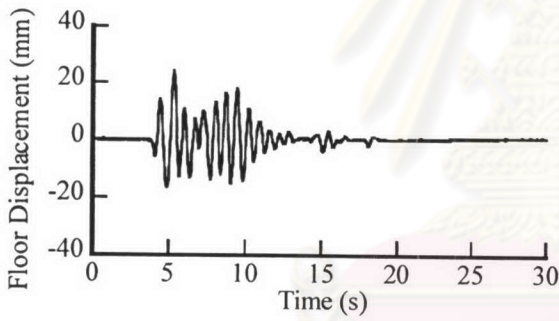
(จ) แรงเฉือนที่ฐาน



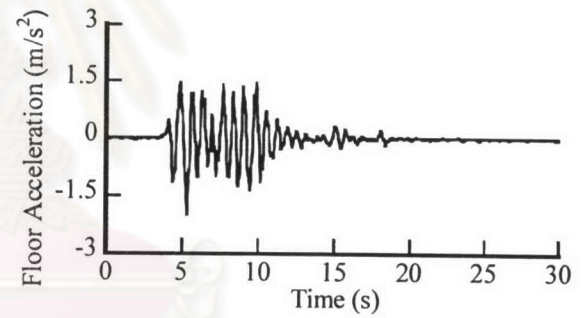
(ข) ระยะเคลื่อนที่ของชั้น 1



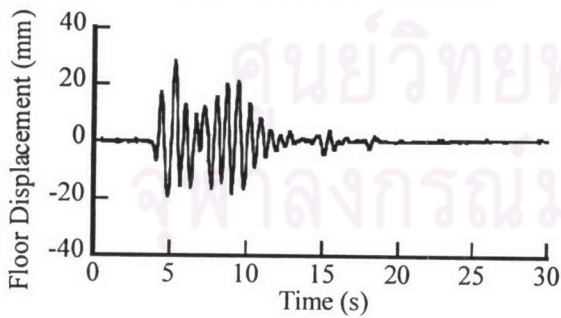
(ฉ) ความเร่งของชั้น 1



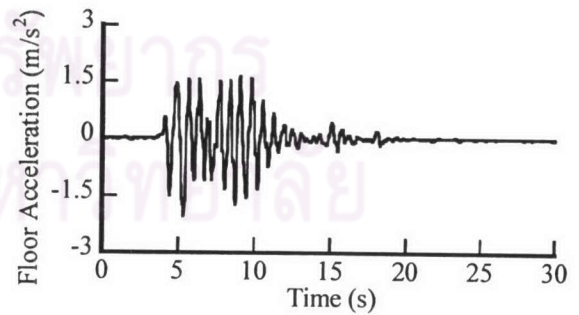
(ค) ระยะเคลื่อนที่ของชั้น 2



(ช) ความเร่งของชั้น 2

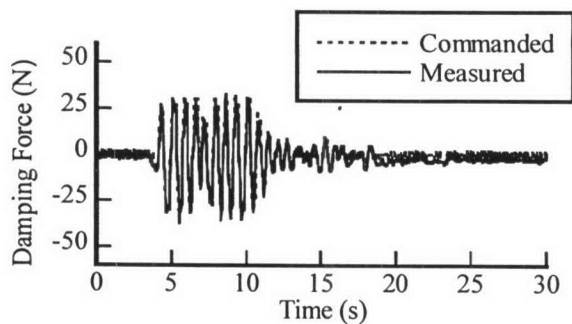


(ง) ระยะเคลื่อนที่ของชั้น 3

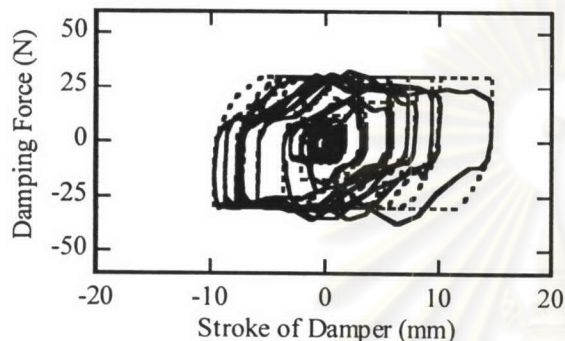


(ซ) ความเร่งของชั้น 3

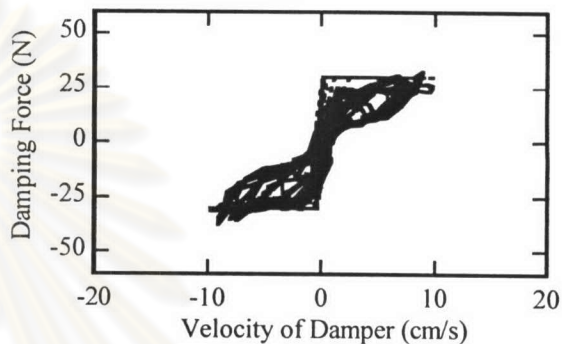
รูปที่ 4.21 ผลตอบสนองของแบบจำลองอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%



(ก) แรงหน่วง

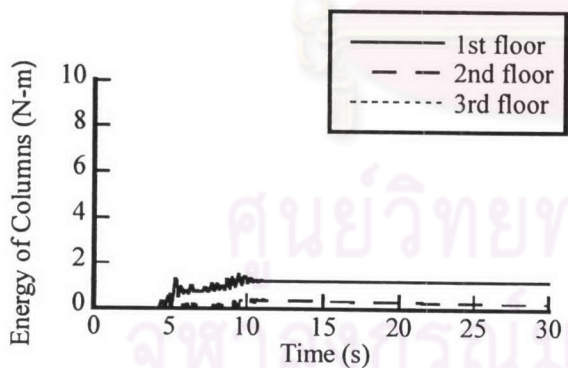


(ข) แรงหน่วงกับระยะเคลื่อนที่ของตัวหน่วง

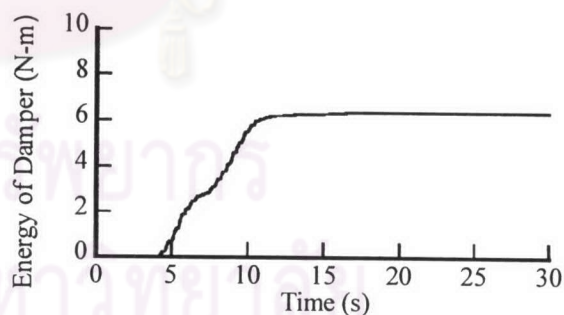


(ค) แรงหน่วงกับความเร็วของตัวหน่วง

รูปที่ 4.22 ผลตอบสนองของตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%

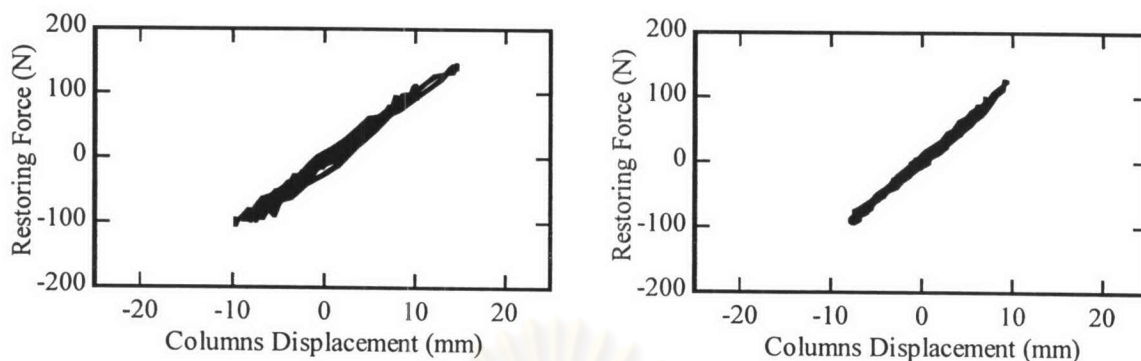


(ก) พลังงานที่สลายในเสา

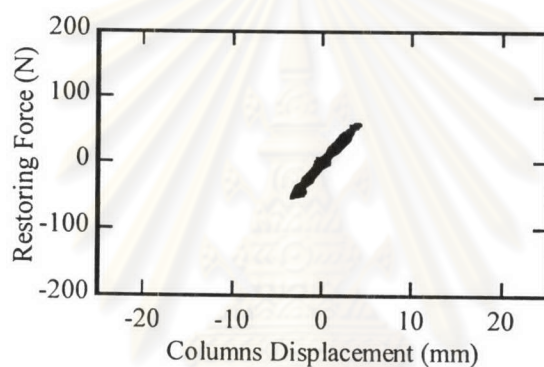


(ข) พลังงานที่สลายในตัวหน่วง

รูปที่ 4.23 พลังงานที่สลายในเสาและในตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%



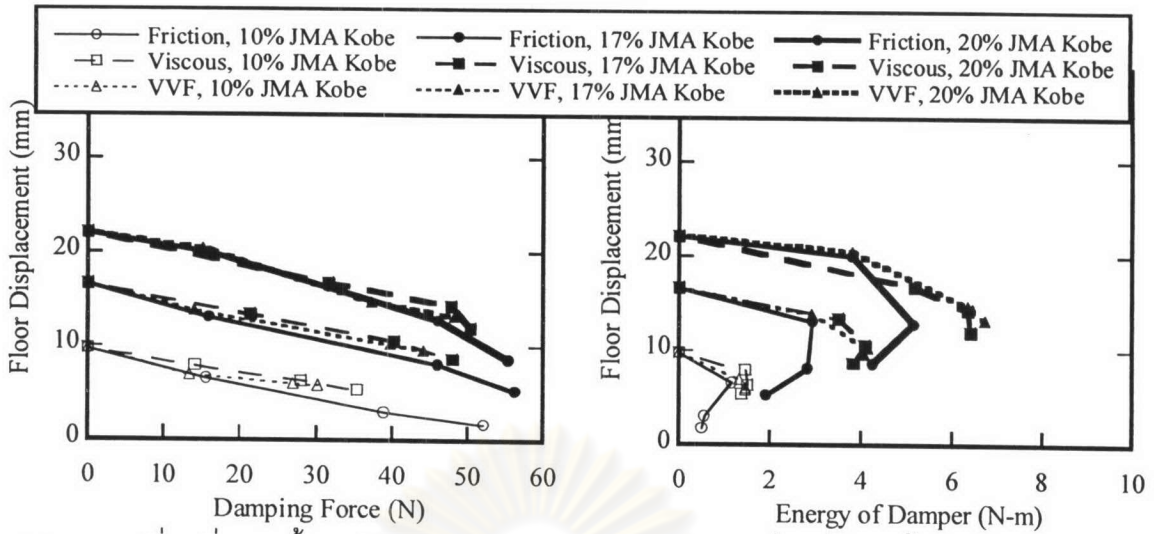
(ก) แรงต้านในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้น 1 (ข) แรงต้านในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้น 2



(ค) แรงต้านในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้น 3

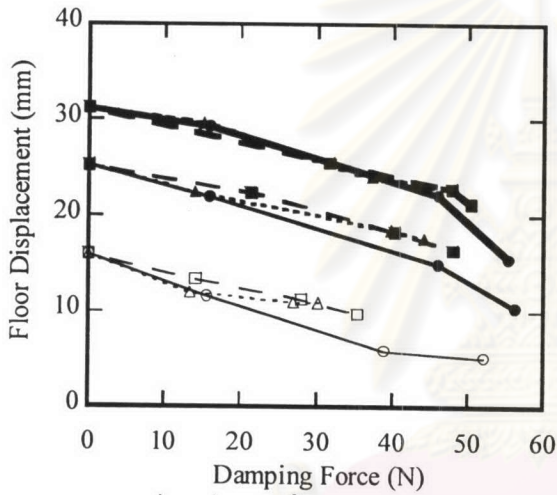
รูปที่ 4.24 แรงต้านในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆ ของแบบจำลองอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนึ่งดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

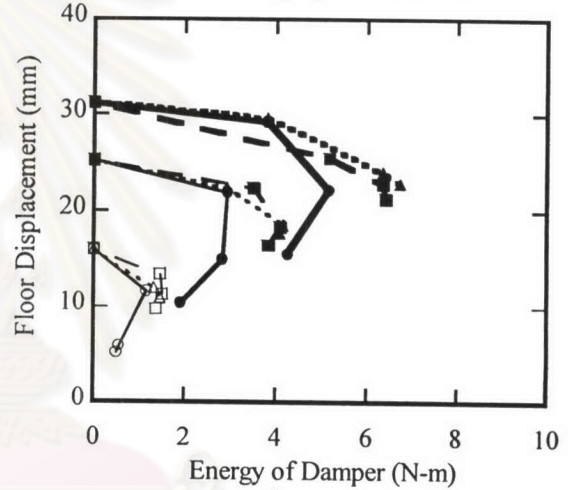


(ก) ระยะเคลื่อนที่สูงสุดชั้น 1 กับแรงหน่วงสูงสุด

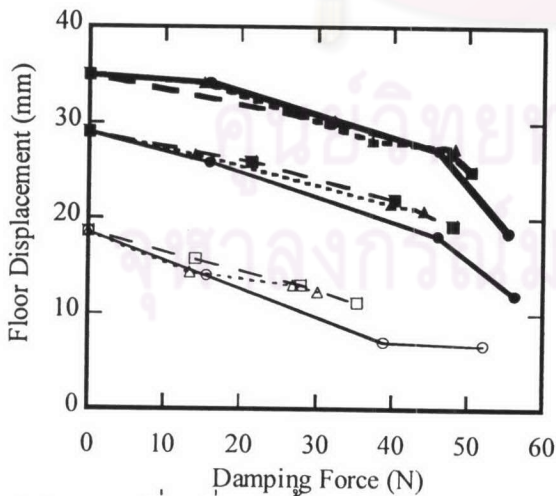
(ง) ระยะเคลื่อนที่สูงสุดชั้น 1 กับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วง



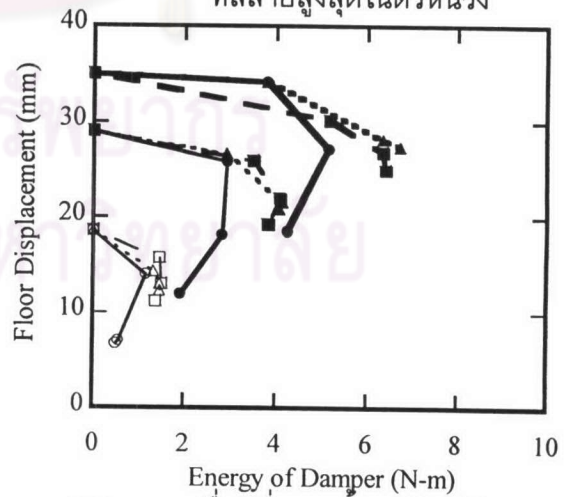
(ข) ระยะเคลื่อนที่สูงสุดชั้น 2 กับแรงหน่วงสูงสุด



(จ) ระยะเคลื่อนที่สูงสุดชั้น 2 กับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วง

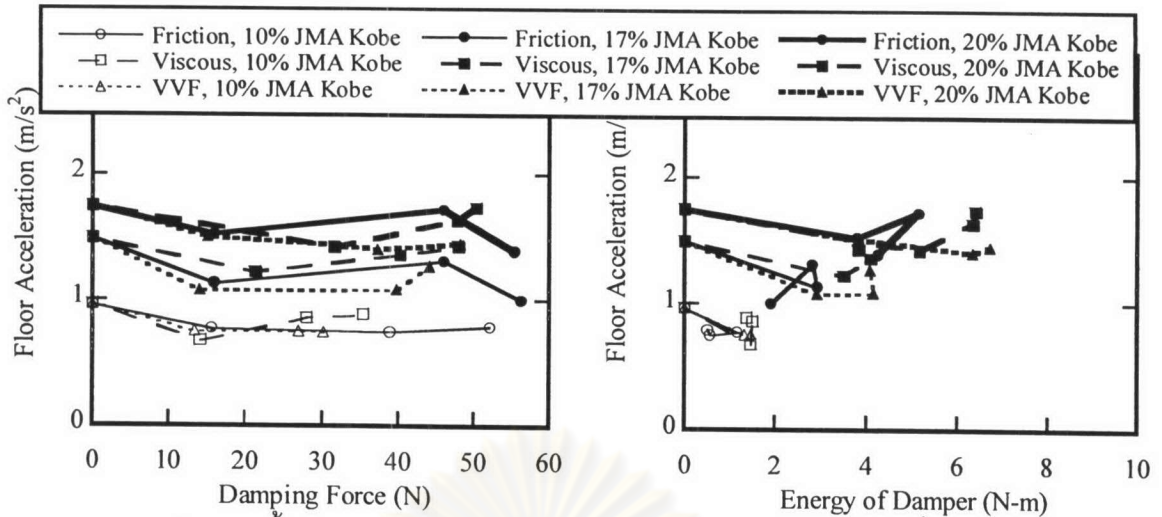


(ค) ระยะเคลื่อนที่สูงสุดชั้น 3 กับแรงหน่วงสูงสุด



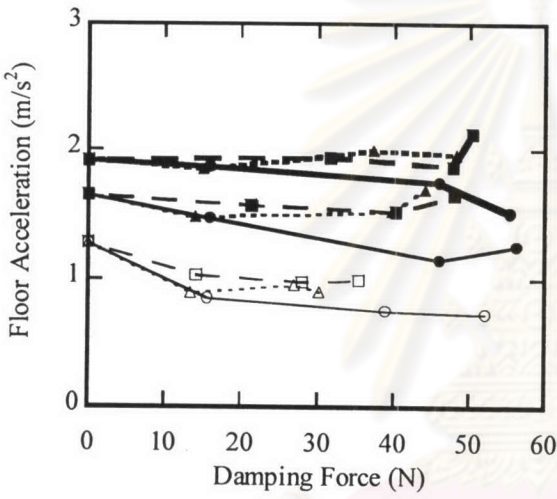
(ฉ) ระยะเคลื่อนที่สูงสุดชั้น 3 กับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วง

รูปที่ 4.25 ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคารกับคุณสมบัติของตัวหน่วงที่มีการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้มต่างๆ

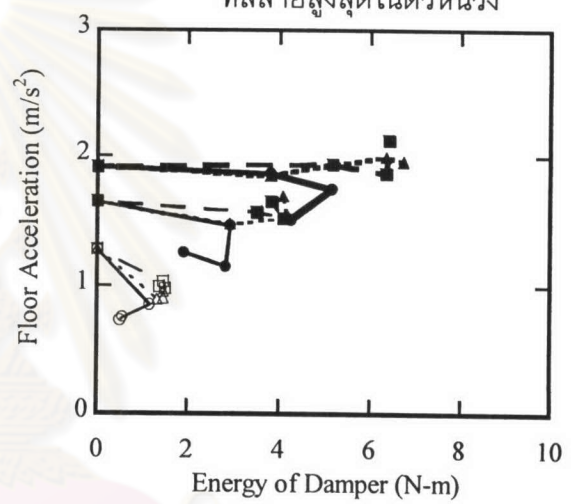


(ก) ความเร่งสูงสุดชั้น 1 กับแรงหน่วงสูงสุด

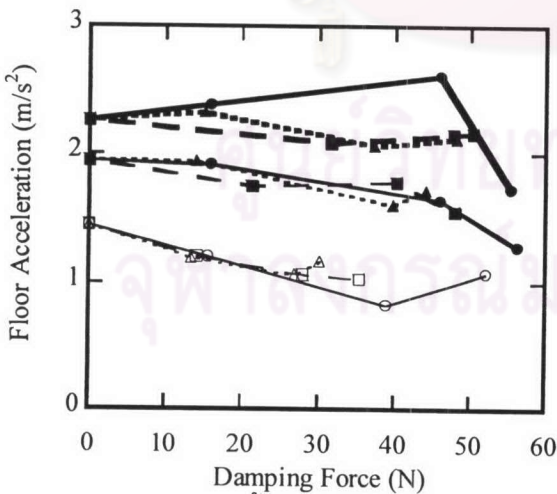
(ง) ความเร่งสูงสุดชั้น 1 กับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วง



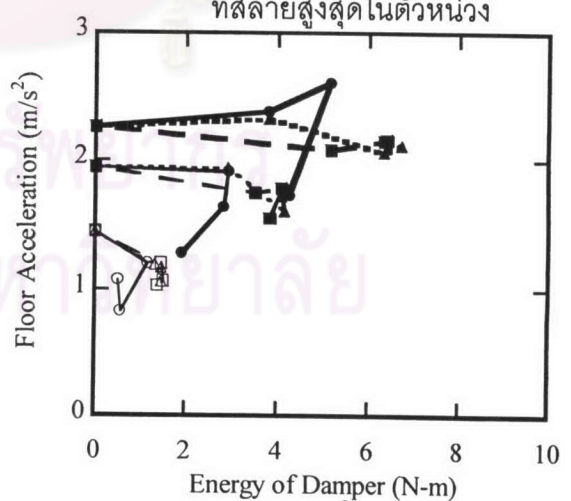
(ข) ความเร่งสูงสุดชั้น 2 กับแรงหน่วงสูงสุด



(จ) ความเร่งสูงสุดชั้น 2 กับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วง

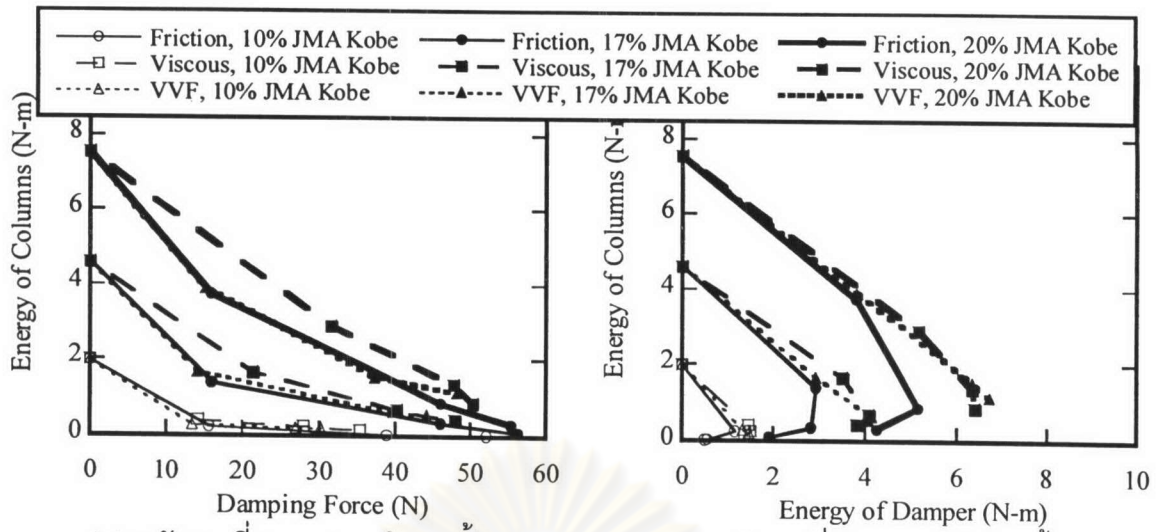


(ค) ความเร่งสูงสุดชั้น 3 กับแรงหน่วงสูงสุด



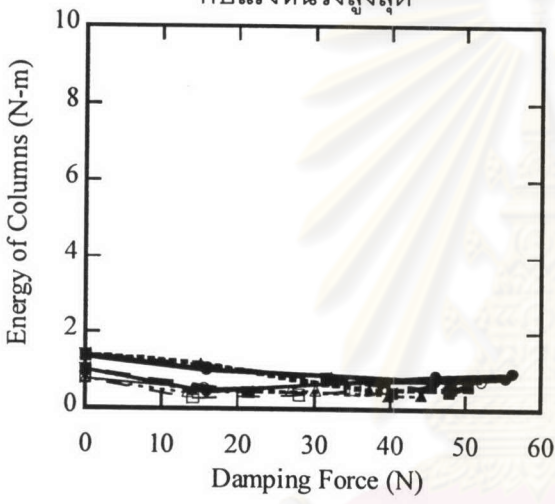
(ฉ) ความเร่งสูงสุดชั้น 3 กับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วง

รูปที่ 4.26 ความเร่งสูงสุดของชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคารกับคุณสมบัติของตัวหน่วงที่มีการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้มต่างๆ

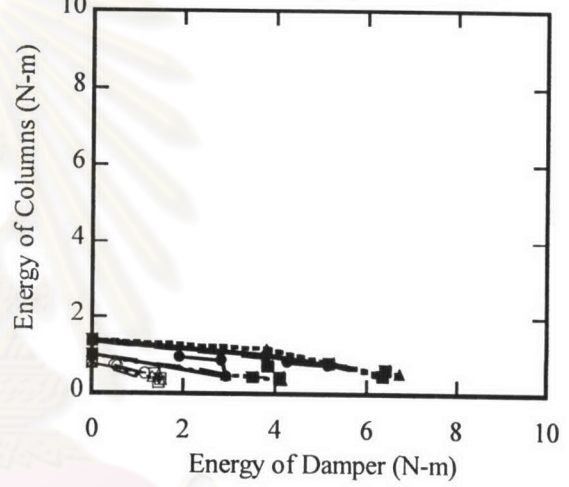


(ก) พลังงานที่สลายสูงสุดในเสาชั้น 1 กับแรงหน่วงสูงสุด

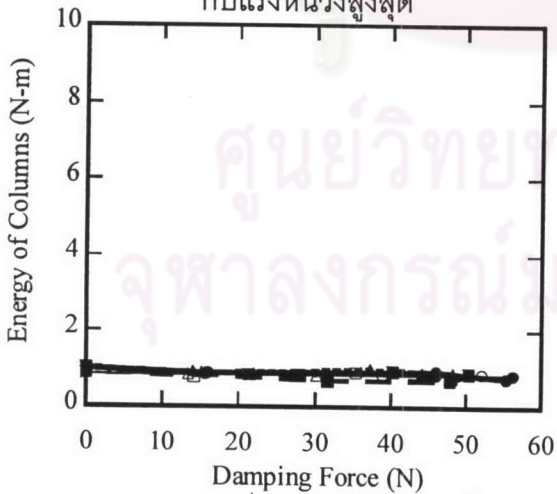
(ง) พลังงานที่สลายสูงสุดในเสาชั้น 1 กับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วง



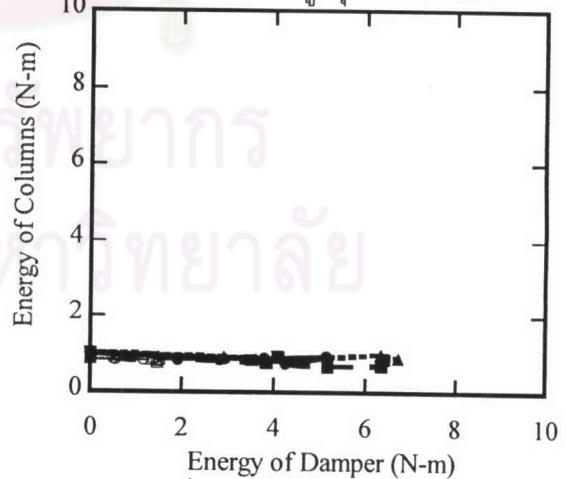
(ข) พลังงานที่สลายสูงสุดในเสาชั้น 2 กับแรงหน่วงสูงสุด



(จ) พลังงานที่สลายสูงสุดในเสาชั้น 2 กับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วง

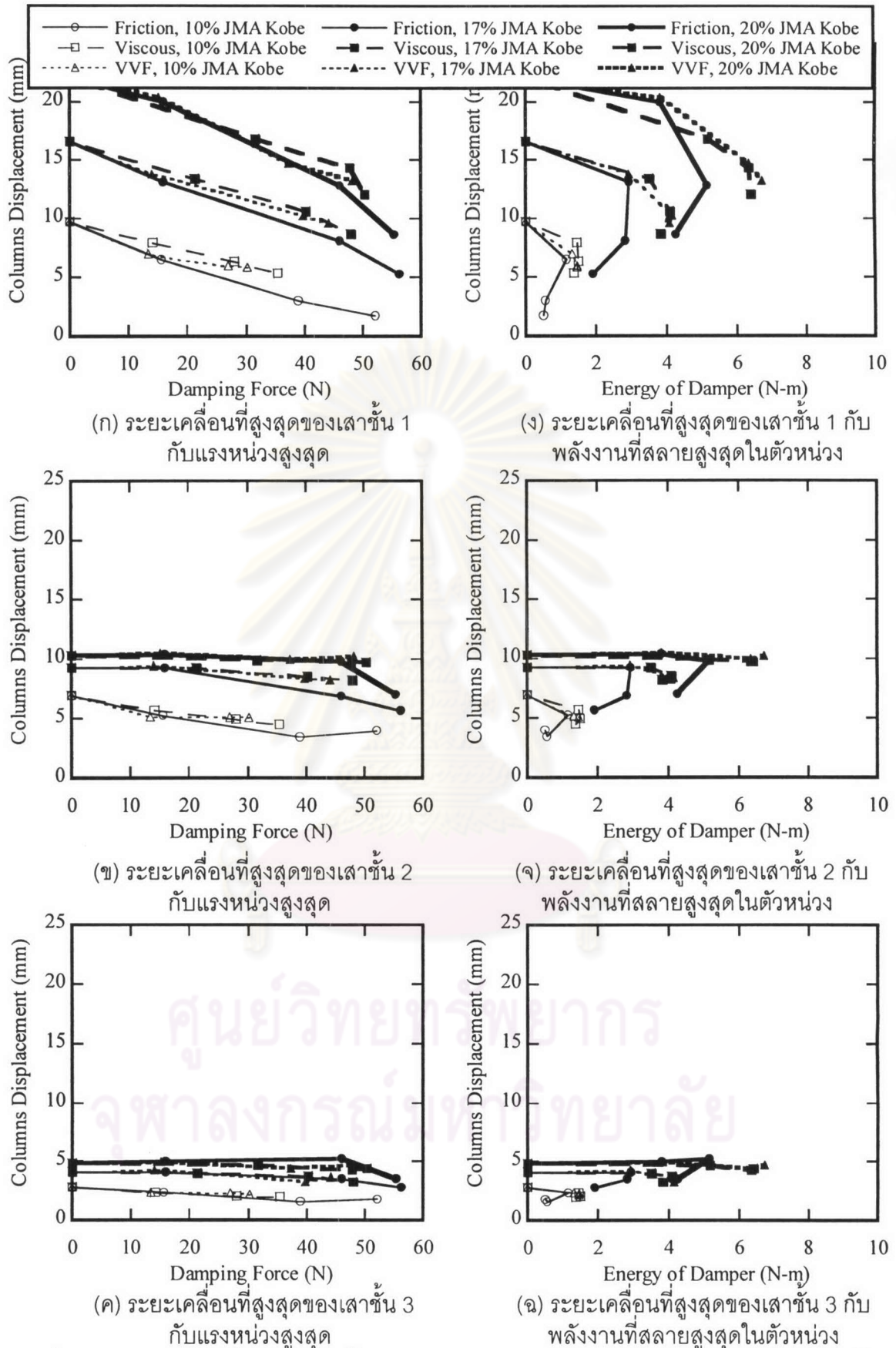


(ค) พลังงานที่สลายสูงสุดในเสาชั้น 3 กับแรงหน่วงสูงสุด

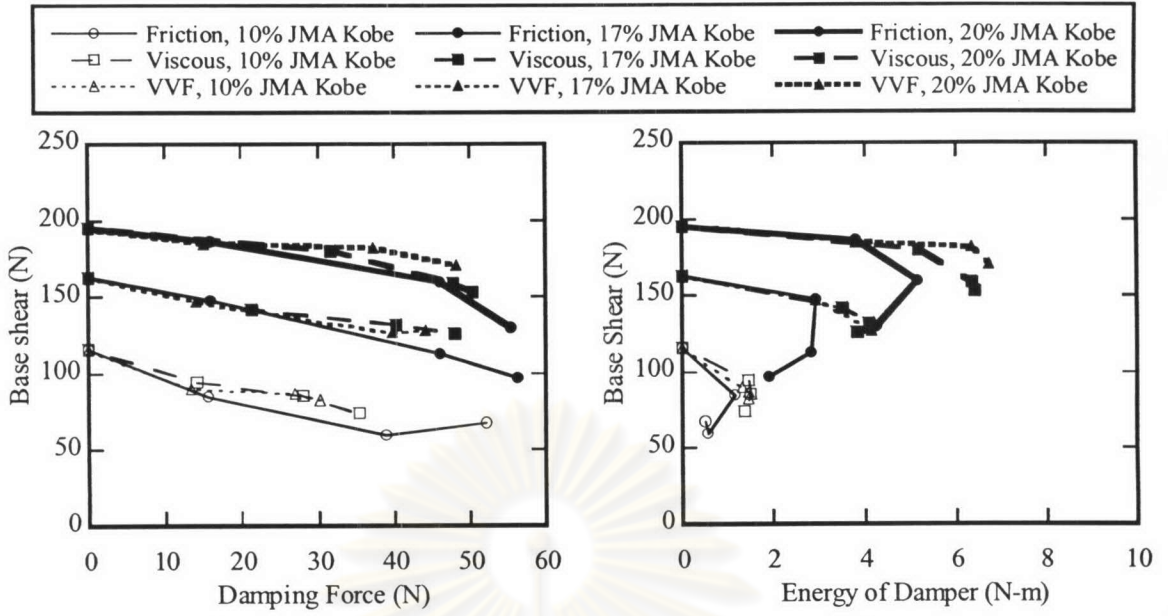


(ฉ) พลังงานที่สลายสูงสุดในเสาชั้น 3 กับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วง

รูปที่ 4.27 พลังงานที่สลายสูงสุดในเสาชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคารกับคุณสมบัติของตัวหน่วงที่มีการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้มต่างๆ



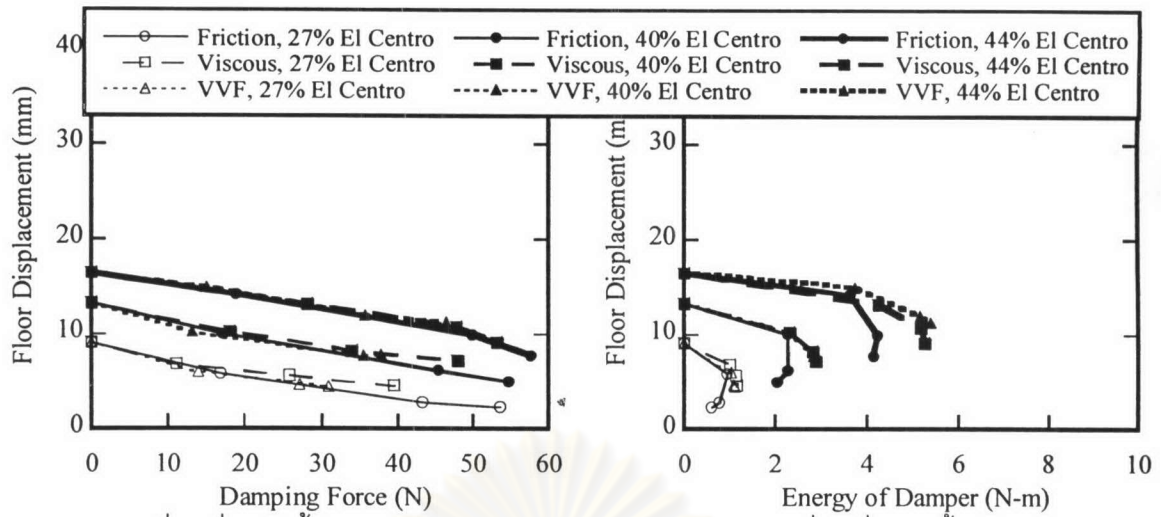
รูปที่ 4.28 ระยะเคลื่อนที่สูงสุดในเสาชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคารกับคุณสมบัติของตัวหน่วงที่มีการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้มต่างๆ



(ก) แรงเฉือนที่ฐานสูงสุดกับแรงหน่วงสูงสุด

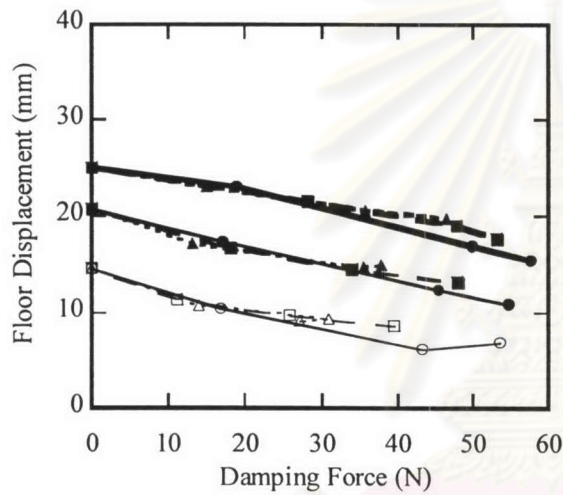
(ข) แรงเฉือนที่ฐานสูงสุดกับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วง

รูปที่ 4.29 แรงเฉือนที่ฐานสูงสุดของแบบจำลองอาคารกับคุณสมบัติของตัวหน่วงที่มีการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้มต่างๆ



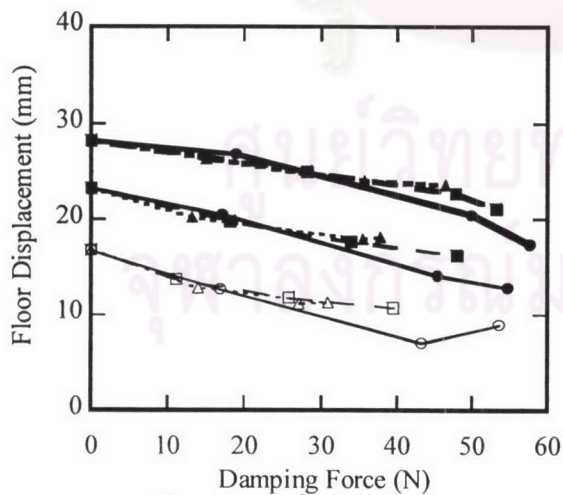
(ก) ระยะเคลื่อนที่สูงสุดชั้น 1 กับแรงหน่วงสูงสุด

(ง) ระยะเคลื่อนที่สูงสุดชั้น 1 กับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วง



(ข) ระยะเคลื่อนที่สูงสุดชั้น 2 กับแรงหน่วงสูงสุด

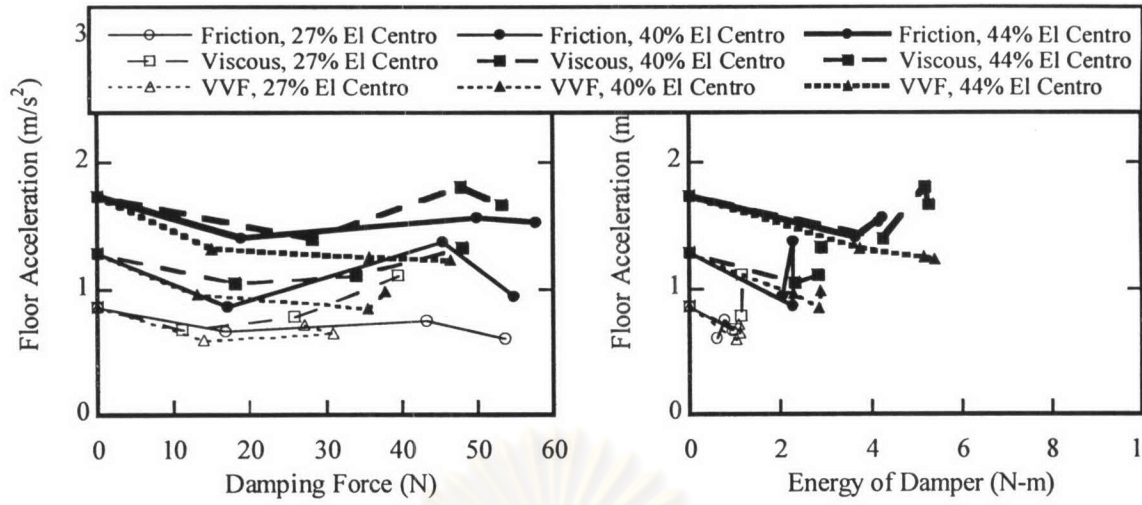
(จ) ระยะเคลื่อนที่สูงสุดชั้น 2 กับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วง



(ค) ระยะเคลื่อนที่สูงสุดชั้น 3 กับแรงหน่วงสูงสุด

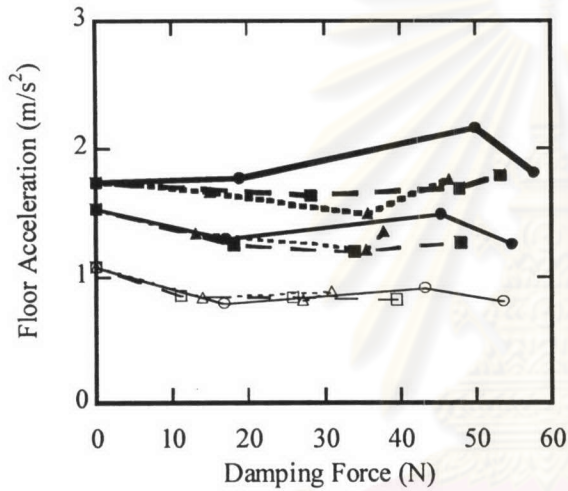
(ฉ) ระยะเคลื่อนที่สูงสุดชั้น 3 กับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วง

รูปที่ 4.30 ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคารกับคุณสมบัติของตัวหน่วงที่มีการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น El Centro ที่ระดับความเข้มต่างๆ

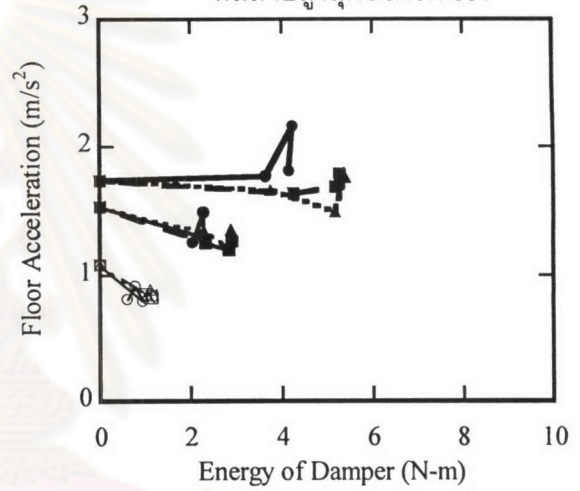


(ก) ความเร่งสูงสุดชั้น 1 กับแรงหน่วงสูงสุด

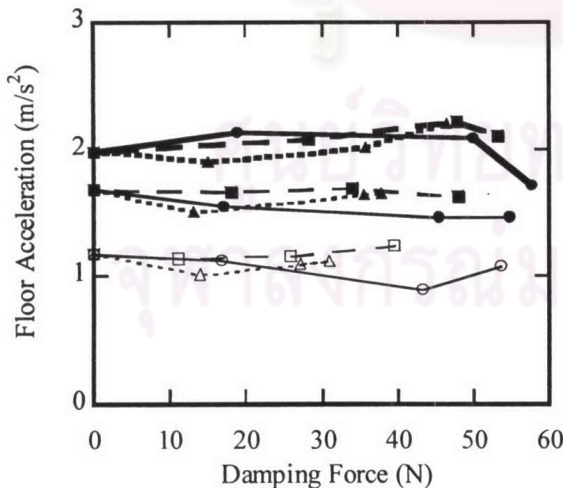
(ง) ความเร่งสูงสุดชั้น 1 กับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วง



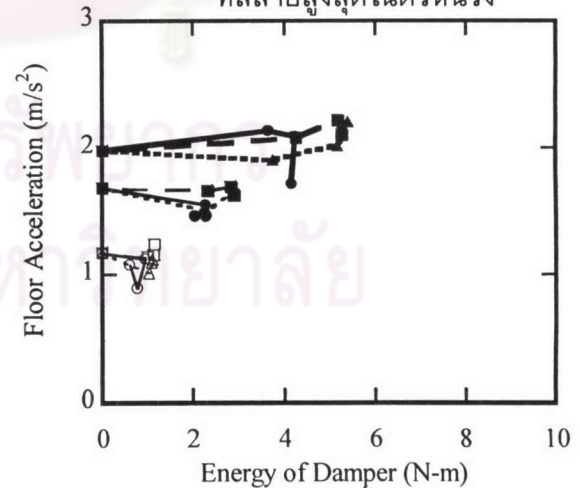
(ข) ความเร่งสูงสุดชั้น 2 กับแรงหน่วงสูงสุด



(จ) ความเร่งสูงสุดชั้น 2 กับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วง

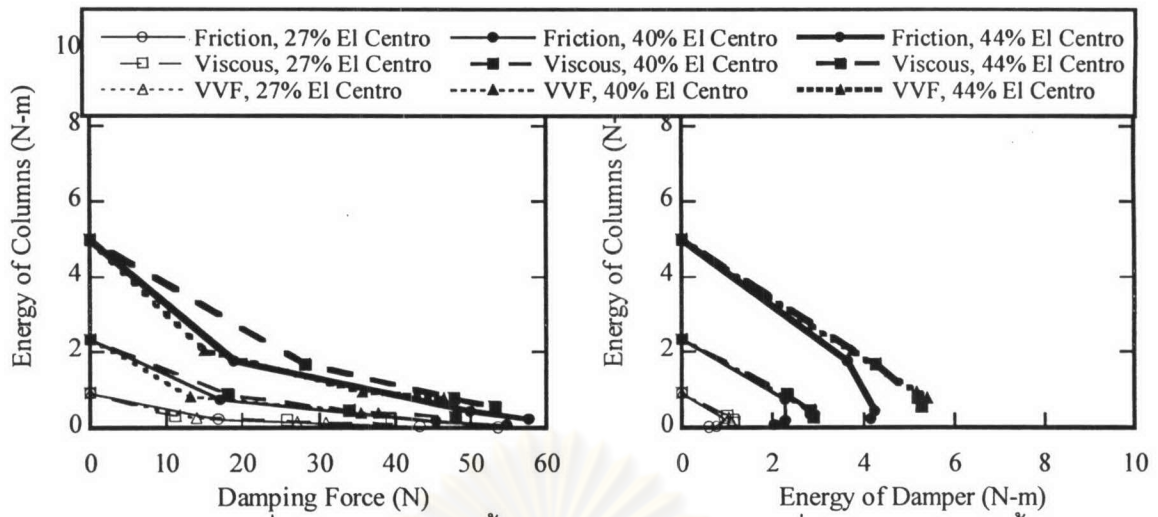


(ค) ความเร่งสูงสุดชั้น 3 กับแรงหน่วงสูงสุด



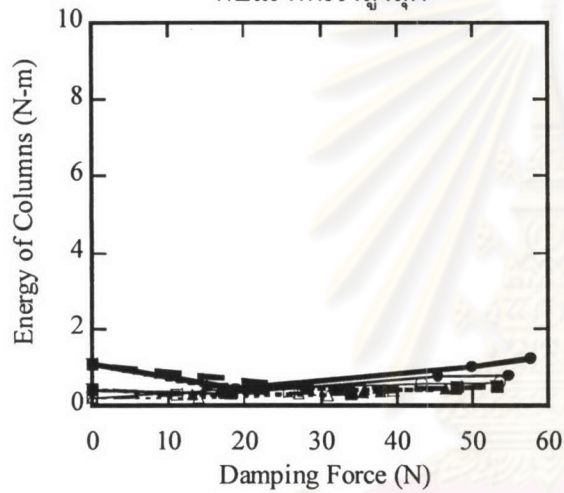
(ฉ) ความเร่งสูงสุดชั้น 3 กับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วง

รูปที่ 4.31 ความเร่งสูงสุดของชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคารกับคุณสมบัติของตัวหน่วงที่มีการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น El Centro ที่ระดับความเข้มต่างๆ

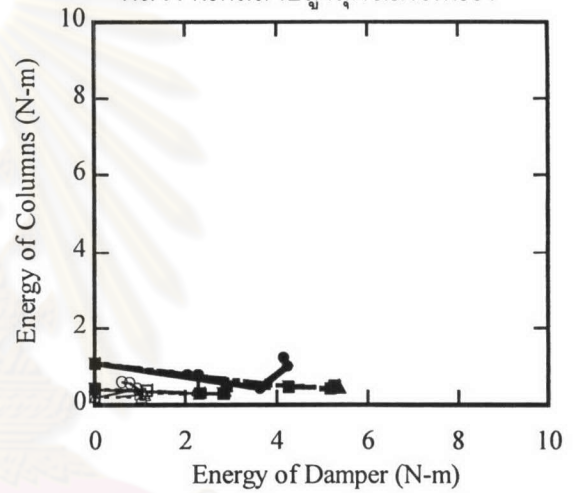


(ก) พลังงานที่สลายสูงสุดในเสาชั้น 1 กับแรงหน่วงสูงสุด

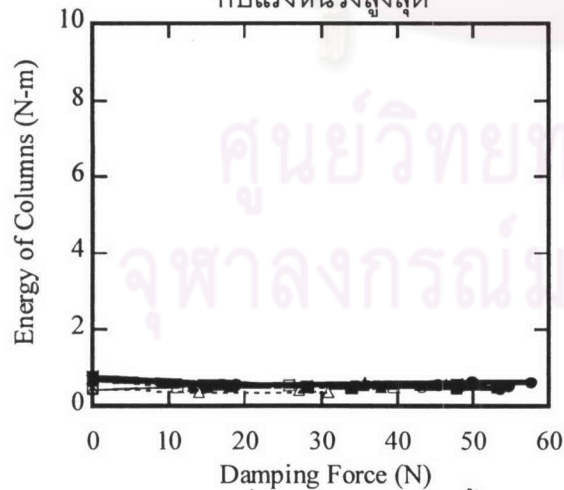
(ง) พลังงานที่สลายสูงสุดในเสาชั้น 1 กับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วง



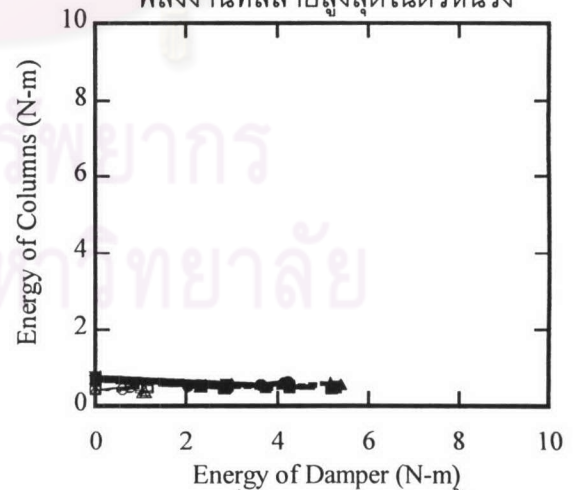
(ข) พลังงานที่สลายสูงสุดในเสาชั้น 2 กับแรงหน่วงสูงสุด



(จ) พลังงานที่สลายสูงสุดในเสาชั้น 2 กับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วง

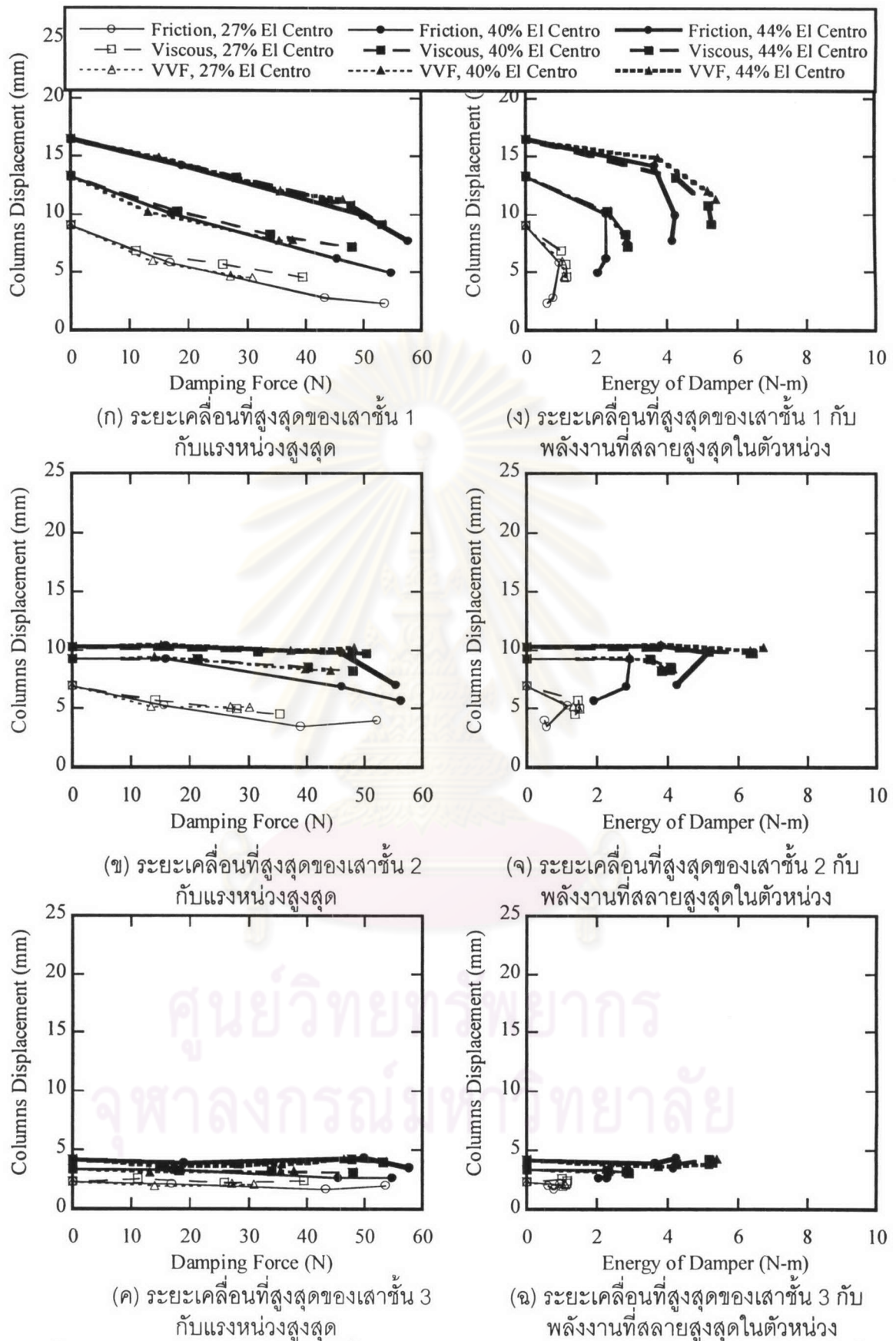


(ค) พลังงานที่สลายสูงสุดในเสาชั้น 3 กับแรงหน่วงสูงสุด

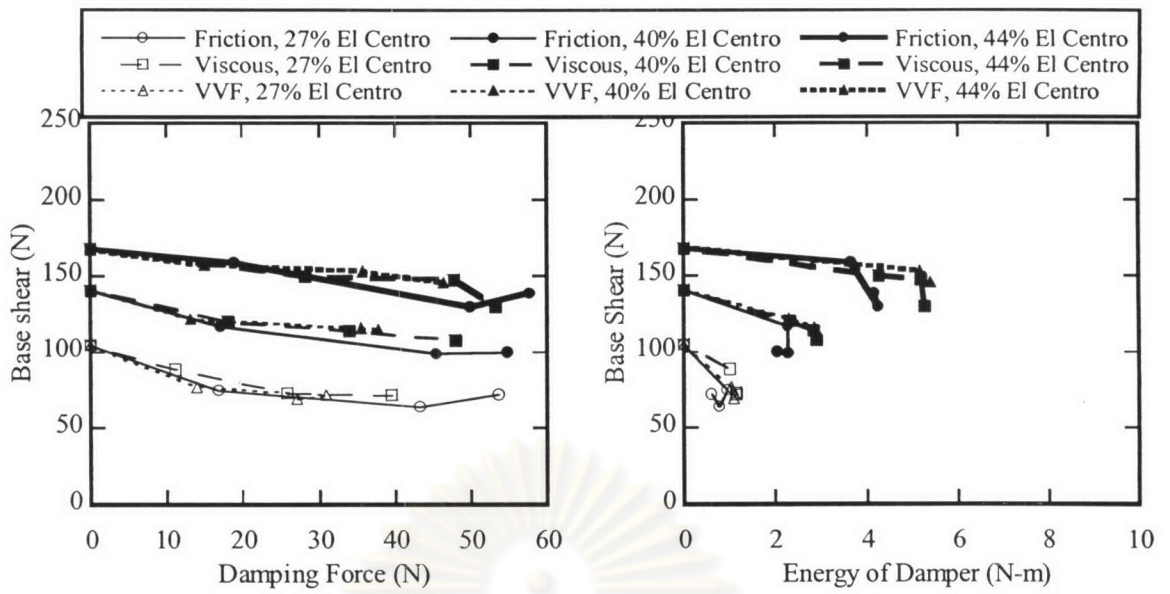


(ง) พลังงานที่สลายสูงสุดในเสาชั้น 3 กับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วง

รูปที่ 4.32 พลังงานที่สลายสูงสุดในเสาชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคารกับคุณสมบัติของตัวหน่วงที่มีการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น El Centro ที่ระดับความเข้มต่างๆ



รูปที่ 4.33 ระยะเคลื่อนที่สูงสุดในเสาชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคารกับคุณสมบัติของตัวหน่วงที่มีการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น El Centro ที่ระดับความเข้มต่างๆ



(ก) แรงเฉือนที่ฐานสูงสุดกับแรงหน่วงสูงสุด

(ข) แรงเฉือนที่ฐานสูงสุดกับพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วง

รูปที่ 4.34 แรงเฉือนที่ฐานสูงสุดของแบบจำลองอาคารกับคุณสมบัติของตัวหน่วงที่มีการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น El Centro ที่ระดับความเข้มต่างๆ