

บทที่ 5

การวิเคราะห์อาคารมาตรฐานที่ควบคุมด้วยตัวห่วงปรับค่าได้

5.1 แบบจำลองในการวิเคราะห์

อาคารที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นอาคารมาตรฐานสำหรับการศึกษาคอมพิวเตอร์ควบคุม ผลตอบสนองไม่เชิงเส้นภายใต้แผ่นดินไหว อาคารเป็นโครงเหล็กสูง 3 ชั้นมีการติดตั้งตัวห่วงของเหลวแม่เหล็กระหว่างฐานกับพื้นชั้น 1 ดังรูปที่ 5.1 ขนาดกว้าง 36.58 m ยาว 54.87 m สูง 11.89 m ระยะระหว่างช่วงวัดจากศูนย์กลางเสาถึงศูนย์กลางเสา 9.15 m โดยมี 4 ช่วงในแนวเหนือ-ใต้ และมี 6 ช่วงในแนวตะวันออก-ตะวันตก อาคารมีระบบต้านทานแรงด้านข้างแบบโครงข้อแข็ง เสาเป็นเหล็กรูปพรรณปีกกว้าง ชั้น 3 เป็นหลังคา ความสูงระหว่างพื้นถึงพื้น (วัดจากศูนย์กลางคานถึงศูนย์กลางคาน) 3.96 m โคนเสาของเสาชั้นล่างมีจุดรองรับแบบยึดแน่น พื้นเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กสมมติว่าพื้นแข็งเกร็งในระนาบราบ มวลของชั้นที่ 1 และ ชั้นที่ 2 มีค่า 957 ton มวลของชั้นที่ 3 มีค่า 1,040 ton มวลรวมของทั้งโครงสร้างมีค่า 2,950 ton

ในการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ในระนาบ 2 มิติ โดยโครงข้อแข็งที่พิจารณาอยู่ในแนวเหนือ-ใต้ (ด้านสั้นหรือด้านอ่อนของอาคาร) แบบจำลองของโครงข้อแข็งใช้แบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์โดยใช้แบบจำลองแบบวิจักรแบบเส้นตรงสองเส้น (bilinear) จำลองพฤติกรรมการดัดแบบไม่เชิงเส้นในช่วงที่เกิดแผ่นดินไหวรุนแรง คานและเสาของอาคารถูกจำลองเป็นชิ้นส่วนโครงข้อแข็งในระนาบ ชิ้นส่วนคานวัดจากศูนย์กลางของเสาถึงศูนย์กลางของเสา แรงเฉื่อยกระจายอย่างสม่ำเสมอที่จุดต่อโดยสมมติเป็นรูปแบบแบบรวมมวล จุดต่อ (node) อยู่ที่ตำแหน่งรอยต่อของคานและเสา แต่ละจุดต่อจะมี 3 ระดับชั้นความเร็ว คือ การเคลื่อนที่แนวราบ การเคลื่อนที่แนวตั้ง และมุมหมุน โครงสร้างมีระดับชั้นความเร็วทั้งหมด 60 ระดับชั้นความเร็วก่อนที่จะใส่เงื่อนไขการยึดรั้ง แต่ละชิ้นส่วนของโครงข้อแข็งในระนาบประกอบด้วย 2 จุดต่อ และ 6 ระดับชั้นความเร็ว และได้กำหนดความยาว พื้นที่หน้าตัด โมเมนต์ความเฉื่อย โมดูลัสยืดหยุ่น และความหนาแน่นของมวลไว้ล่วงหน้าสำหรับแต่ละชิ้นส่วน และได้เมตริกซ์ของมวลและเมตริกซ์ของสติฟเนสของระบบจากการรวมเมตริกซ์ของมวลและเมตริกซ์ของสติฟเนสของชิ้นส่วน ไม่พิจารณาความเฉื่อยของการหมุน เมตริกซ์ความหน่วงคำนวณโดยใช้สมมติฐานของ Rayleigh damping คาบธรรมชาติของสามโหมดแรกคือ 1.01 s, 0.33 s และ 0.17 s

5.2 คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์

คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์มี 2 คลื่น คือ คลื่นแผ่นดินไหว El Centro และ คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe รูปที่ 5.2 แสดงคลื่น 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 รูปที่ 5.3 แสดงคลื่น JMA Kobe ซึ่งวัดในทิศทางเหนือใต้ที่สถานีอุตุนิยมวิทยา Kobe ในช่วงแผ่นดินไหว Hyogo-ken Nanbu วันที่ 17 มกราคม ค.ศ.1995 มีขนาด 7.2 มีจุดศูนย์กลางที่เกิดลึก 14 km ค่าความเร่งสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหวทั้งสองชนิดเป็น 3.42 และ 8.18 m/s^2 ตามลำดับ โดยคลื่นแผ่นดินไหวทั้งสองชนิดมีการปรับระดับความเข้มดังนี้ คลื่น El Centro ปรับระดับความเข้มเป็น 0.5, 1.0 และ 1.5 เท่าของคลื่นจริงๆ การปรับคลื่นให้มีขนาด 1.5 เท่า เพื่อศึกษาคลื่นที่มีขนาดใหญ่ ส่วนคลื่น JMA Kobe ปรับระดับความเข้มเป็น 0.5 และ 1.0 เท่าของคลื่นจริงๆ จึงมีคลื่นแผ่นดินไหวทั้งหมด 5 คลื่น

5.3 ผลตอบสนองของอาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วง

รูปที่ 5.4 แสดงค่าความเหนียวที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วงภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริงจากรูปจะเห็นว่าโครงสร้างมีพฤติกรรมไม่เชิงเส้นโดยค่าความเหนียวสูงสุดที่เกิดในเสาเกิดในโคนเสาชั้น 1 ที่จุดต่อ (node) 2 และ 3 มีค่าความเหนียว 3.18 ส่วนค่าความเหนียวสูงสุดที่เกิดขึ้นในคานเกิดในคานชั้น 3 ที่จุดต่อ 16 และ 19 มีค่า 3.98 รูปที่ 5.5 แสดงผลตอบสนองของอาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วงภายใต้แผ่นดินไหว JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง จากรูปจะเห็นว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 0.086, 0.193 และ 0.307 m ตามลำดับ โดยทั้งสามชั้นจะมีระยะเคลื่อนที่คงค้างเท่ากับ 0.025, 0.047 และ 0.083 m ตามลำดับ ความเร่งสูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 12.0, 10.5 และ 8.8 m/s^2 ตามลำดับ ค่าความเร่งสูงสุดของชั้น 1 มีค่ามากที่สุดและชั้น 3 น้อยที่สุดเนื่องจากอาคารมีความถี่ธรรมชาติของโหมด 2 เท่ากับ 3.06 Hz และเมื่อพิจารณาสเปกตรัมความเร่งของคลื่น JMA Kobe ในรูป 5.3(ง) จะเห็นได้ว่ามีค่าสูงที่ความถี่ประมาณ 3 Hz แสดงว่าอาคารถูกกระตุ้นโหมด 2 จึงทำให้ค่าความเร่งสูงสุดชั้นล่างมากกว่าชั้นบน รูปที่ 5.6 แสดงค่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 จากรูปจะเห็นว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 เป็น 0.086, 0.110 และ 0.145 m ตามลำดับ

รูปที่ 5.7 แสดงค่าความเหนียวที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัว
 หน่วงภายใต้คลื่น EI Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริงจากรูปจะเห็นได้ว่าเกิดพฤติกรรมไม่เชิงเส้น
 ขึ้นที่ปลายชิ้นส่วนโครงสร้างโดยเสาจะมีค่าความเหนียวสูงสุดที่โคนเสาชั้น 1 ที่จุดต่อ 2 และ 3
 โดยมีค่า 2.12 ส่วนค่าความเหนียวสูงสุดที่เกิดขึ้นในคานเกิดในคานชั้น 1 ที่จุดต่อ 6 และ 9 มีค่า
 2.29 รูปที่ 5.8 แสดงผลตอบสนองของอาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วงภายใต้แผ่นดินไหว EI
 Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง จากรูปจะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า
 0.059, 0.126 และ 0.172 m ตามลำดับ โดยทั้งสามชั้นจะมีระยะเคลื่อนที่คงค้างเท่ากับ 0.011,
 0.018 และ 0.020 m ตามลำดับ ความเร่งสูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 5.27, 6.10 และ 7.40
 m/s^2 ตามลำดับ รูปที่ 5.9 แสดงระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 จากรูปจะเห็นได้ว่า
 ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 เป็น 0.059, 0.068 และ 0.067 m ตามลำดับ

จะเห็นได้ว่าภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวขนาดใหญ่อาคารจะมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงไม่เชิงเส้น
 เพื่อที่จะลดผลตอบสนองของอาคารจึงมีการติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กโดยติดตั้งระหว่าง
 ฐานกับพื้นชั้นที่ 1 โดยมีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบต่างๆเพื่อดูประสิทธิผลของรูปแบบการ
 ควบคุมแรงหน่วงแบบต่างๆ

5.4 ผลตอบสนองของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแบบแพสซีฟ

ในหัวข้อนี้จะทำการตรวจสอบประสิทธิผลของรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบแพสซีฟ 2
 ชนิด คือ รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานกับรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด
 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe และ EI Centro

5.4.1 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe

รูปที่ 5.10 ค่าความเหนียวที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรง
 หน่วงแบบเสียดทานที่มีค่าแรงเสียดทาน 9 MN ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริงจาก
 รูปจะเห็นได้ว่าความไม่เชิงเส้นลดลงจากกรณีที่ไม่มีการควบคุมโดยค่าความเหนียวในเสาสูงสุดที่
 จุดต่อ 2 และ 3 มีค่า 1.31 ลดลง 59% ส่วนค่าความเหนียวในคานสูงสุดที่จุดต่อ 16 และ 19 มีค่า
 2.84 ลดลง 29% รูปที่ 5.11 แสดงผลตอบสนองของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบ
 เสียดทานโดยมีค่าแรงเสียดทาน 9 MN ภายใต้แผ่นดินไหว JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง จาก

รูปจะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 0.044, 0.128 และ 0.221 m ตามลำดับ ลดลง 49%, 34% และ 39% ตามลำดับ โดยทั้งสามชั้นจะมีระยะเคลื่อนที่ค้ำงเท่ากับ 0.004, 0.020 และ 0.048 m ตามลำดับ ลดลง 84%, 57% และ 42% ตามลำดับ ความเร่งสูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 8.97, 9.00 และ 8.30 m/s^2 ตามลำดับ ลดลง 25%, 14% และ 6% ตามลำดับ รูปที่ 5.12 แสดงระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 จากรูปจะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 0.044, 0.085 และ 0.107 m ตามลำดับ ลดลง 49%, 23% และ 26% ตามลำดับ รูปที่ 5.13 แสดงผลตอบสนองของตัวนองที่มีรูปแบบการควบคุมแรงนองแบบเสียดทาน จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการกระตุ้นน้อยๆ ค่าแรงนองจะน้อยกว่า 9 MN พลังงานที่สลายในตัวนองสูงสุดมีค่า 4.1 MN-m ตัวนองมีระยะเคลื่อนที่สูงสุด 0.044 m ความเร็วสูงสุด 0.462 m/s

5.4.2 รูปแบบการควบคุมแรงนองแบบหนืดภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe

รูปที่ 5.14 ค่าความเหนียวที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงนองแบบหนืดที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 30 MN-s/m ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง จากรูปจะเห็นได้ว่าความไม่เชิงเส้นลดลงโดยค่าความเหนียวในเสาสูงสุดที่จุดต่อ 2 และ 3 มีค่า 1.46 ลดลง 54% ส่วนค่าความเหนียวในคานสูงสุดที่จุดต่อ 16 และ 19 มีค่า 3.18 ลดลง 20% รูปที่ 5.15 แสดงผลตอบสนองของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงนองแบบหนืดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 30 MN-s/m เพื่อให้ได้แรงนองประมาณ 9 MN ภายใต้แผ่นดินไหว JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง จากรูปจะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 0.049, 0.143 และ 0.256 m ตามลำดับ ลดลง 43%, 26% และ 17% ตามลำดับ โดยทั้งสามชั้นจะมีระยะเคลื่อนที่ค้ำงเท่ากับ 0.007, 0.024 และ 0.043 m ตามลำดับ ลดลง 72%, 49% และ 48% ตามลำดับ ความเร่งสูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 7.35, 6.06 และ 7.64 m/s^2 ตามลำดับ ลดลง 39%, 42% และ 13% ตามลำดับ รูปที่ 5.16 แสดงระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 จากรูปจะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 เป็น 0.049, 0.095 และ 0.120 m ตามลำดับ ลดลง 43%, 14% และ 17% รูปที่ 5.17 แสดงผลตอบสนองของตัวนองที่มีรูปแบบการควบคุมแรงนองแบบหนืด จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าแรงนองสูงสุดมีค่า 9.4 MN พลังงานที่สลายในตัวนองสูงสุดมีค่า 3.8 MN-m ตัวนองมีระยะเคลื่อนที่สูงสุด 0.049 m ความเร็วสูงสุด 0.315 m/s

5.4.3 เปรียบเทียบรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบแพสซีฟภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe

รูปที่ 5.18 แสดงค่าความเหนียวสูงสุดที่ปลายของชิ้นส่วนโครงสร้างกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบแพสซีฟภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 50% และ 100% ของคลื่นจริง จากรูปจะเห็นว่าค่าความเหนียวที่จุดต่อของเสาและคานชั้น 1 ลดลงเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้น ภายใต้คลื่นระดับความเข้ม 100% รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานมีแนวโน้มที่จะลดค่าความเหนียวได้ดีกว่า ส่วนค่าความเหนียวสูงสุดในเสาชั้นที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้นโดยรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานมีแนวโน้มมีค่าความเหนียวสูงกว่า ส่วนค่าความเหนียวในเสาชั้น 3 ค่อนข้างจะคงที่เมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความเหนียวในคานชั้นที่ 2 ภายใต้คลื่นที่ระดับความเข้ม 100% ค่าความเหนียวลดลงเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสัดส่วนแรงหน่วงเท่ากับ 1.88 และ 1.97 สำหรับรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานและแบบหนืดตามลำดับเมื่อค่าสัดส่วนแรงหน่วงมากกว่าค่านี้ จะทำให้ค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นโดยรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานมีแนวโน้มลดค่าความเหนียวได้ดีกว่า ส่วนค่าความเหนียวสูงสุดในคานชั้น 3 มีแนวโน้มลักษณะเดียวกับคานชั้น 2

รูปที่ 5.19 แสดงผลตอบสนองสูงสุดของชิ้นต่างๆของอาคารกับค่าสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ของรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานและแบบหนืดภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 50% และ 100% ของคลื่นจริง จากรูปจะเห็นว่าภายใต้คลื่นที่ระดับความเข้ม 100% ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของชั้น 1 และ 2 จะลดลงเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้น โดยรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานลดระยะเคลื่อนที่สูงสุดของทั้งสามชั้นได้ดีกว่า ส่วนค่าความเร่งสูงสุดของทั้งสามชั้น สำหรับรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดค่าความเร่งสูงสุดของชั้น 1 ลดลงเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้น ส่วนชั้น 2 ค่าความเร่งสูงสุดจะลดลงเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสัดส่วนแรงหน่วงเท่ากับ 2 และค่าความเร่งสูงสุดจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าสัดส่วนแรงหน่วงเพิ่มขึ้นมากกว่า 2 ส่วนค่าความเร่งสูงสุดของชั้น 3 มีแนวโน้มลักษณะเดียวกับชั้น 2 เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงทั้งสองแบบพบว่าภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 100% ในช่วงค่าสัดส่วนแรงหน่วงน้อยกว่า 0.5 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานลดค่าความเร่งสูงสุดได้ดีกว่า แต่ในช่วงที่สัดส่วนแรงหน่วงมากกว่า 0.5 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดลดค่าความเร่งสูงสุดได้ดีกว่า รูปที่ 5.20 แสดงระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 จะเห็นว่าภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 100% ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1 ลดลงเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้นโดยรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานสามารถลดระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาได้ดีกว่า ส่วนระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 2 ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสา

ลดลงเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสัดส่วนแรงหน่วงเท่ากับ 2.09 สำหรับรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานและ 2.68 สำหรับรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด เมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้นมากกว่าค่านี้ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาจะเพิ่มขึ้น ส่วนระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 3 มีแนวโน้มลักษณะเดียวกับชั้น 2 โดยรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานมีแนวโน้มลดระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาได้ดีกว่า รูปที่ 5.21 แสดงพลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุดกับค่าสัดส่วนแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ของรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานและแบบหนืดภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 50% และ 100% ของคลื่นจริง จากรูปจะเห็นได้ว่าพลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุดของรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานภายใต้คลื่นระดับความเข้ม 100% เพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนแรงหน่วงเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสัดส่วนแรงหน่วงเท่ากับ 1.88 พลังงานที่สลายในตัวหน่วงจะลดลงเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้น ภายใต้คลื่นที่ระดับความเข้ม 50% มีแนวโน้มเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองรูปแบบการควบคุมพบว่าในช่วงที่สัดส่วนแรงหน่วงต่ำกว่าประมาณ 2.3 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วงมีค่ามากกว่า ส่วนในช่วงที่สัดส่วนแรงหน่วงมากกว่า 2.3 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดพลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วงมีค่ามากกว่า

จากการเปรียบเทียบทั้งสองรูปแบบการควบคุมพบว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานมีแนวโน้มลดระยะเคลื่อนที่สูงสุดของชั้นและระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาได้มากกว่า ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 100% ส่วนที่ระดับความเข้ม 50% รูปแบบการควบคุมทั้งสองแบบสามารถลดระยะเคลื่อนที่สูงสุดได้ใกล้เคียงกัน รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดมีแนวโน้มลดค่าความเร่งสูงสุดของชั้นได้มากกว่า ส่วนค่าพลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุดรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานสลายพลังงานสูงสุดได้มากกว่าในช่วงสัดส่วนแรงหน่วงน้อยกว่า 2.3 ส่วนในช่วงสัดส่วนแรงหน่วงมากกว่า 2.3 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดสามารถสลายพลังงานได้มากกว่า

5.4.4 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว EI

Centro

รูปที่ 5.22 แสดงค่าความเหนียวที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานที่มีค่าแรงเสียดทาน 6 MN ภายใต้คลื่น EI Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริงจากรูปจะเห็นได้ว่าชิ้นส่วนโครงสร้างมีพฤติกรรมไม่เชิงเส้นลดลงโดยเสามีพฤติกรรมในช่วงเชิงเส้นโดยค่าความเหนียวในเสาสูงสุดที่จุดต่อ 2 และ 3 มีค่า 0.94 ลดลง 56% ส่วนค่า

ความเหนียวในคานสูงสุดที่จุดต่อ 16 และ 19 มีค่า 1.29 ลดลง 22% รูปที่ 5.23 แสดงผลตอบสนองของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทานโดยมีค่าแรงเสียดทาน 6 MN ภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง จากรูปจะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 0.029, 0.078 และ 0.132 m ตามลำดับ ลดลง 51%, 38% และ 23% ตามลำดับ โดยชั้น 2 และ 3 จะมีระยะเคลื่อนที่คงค้างเท่ากับ 0.007 และ 0.016 m ตามลำดับ ลดลง 61% และ 20% ตามลำดับ ความเร่งสูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 6.56, 7.44 และ 6.53 m/s^2 ตามลำดับ ชั้น 1 และ 2 เพิ่มขึ้น 25% และ 22% ตามลำดับ ส่วนชั้น 3 ลดลง 12% รูปที่ 5.24 แสดงระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 จากรูปจะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 เป็น 0.029, 0.049 และ 0.057 m ตามลำดับ ลดลง 51%, 28% และ 15% ตามลำดับ รูปที่ 5.25 แสดงผลตอบสนองของตัวท่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทาน จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อมีการกระตุ้นน้อยๆ ค่าแรงท่วงจะน้อยกว่า 6 MN พลังงานที่สลายในตัวท่วงสูงสุดมีค่า 3.0 MN-m ตัวท่วงมีระยะเคลื่อนที่สูงสุด 0.029 m ความเร็วสูงสุด 0.310 m/s

5.4.5 รูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนืดภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro

รูปที่ 5.26 แสดงค่าความเหนียวที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนืดที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 30 MN-s/m ภายใต้คลื่น El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริงจากรูปจะเห็นได้ว่าชิ้นส่วนโครงสร้างมีพฤติกรรมไม่เชิงเส้นลดลงโดยค่าความเหนียวในเสาสูงสุดที่จุดต่อ 2 และ 3 มีค่า 1.06 ลดลง 50% ส่วนค่าความเหนียวในคานสูงสุดที่จุดต่อ 16 และ 19 มีค่า 1.32 ลดลง 20% รูปที่ 5.27 แสดงผลตอบสนองของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนืดโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 30 MN-s/m เพื่อให้ได้ค่าแรงท่วงประมาณ 6 MN ภายใต้แผ่นดินไหว El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง จากรูปจะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 0.035, 0.090 และ 0.142 m ตามลำดับ ลดลง 41%, 29% และ 17% ตามลำดับ โดยชั้น 2 และ 3 จะมีระยะเคลื่อนที่คงค้างเท่ากับ 0.003 และ 0.008 m ตามลำดับ ลดลง 83% และ 60% ตามลำดับ ความเร่งสูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 4.00, 5.72 และ 6.89 m/s^2 ตามลำดับ ลดลง 24%, 6% และ 7% ตามลำดับ รูปที่ 5.28 แสดงระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 จากรูปจะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 เป็น 0.035, 0.055 และ 0.056 m ตามลำดับ ลดลง 41%, 19% และ 16% ตามลำดับ รูปที่ 5.29 แสดงผลตอบสนองของตัวท่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนืด จากรูปจะเห็นได้

ว่าค่าแรงท่วงสูงสุดมีค่า 6.5 MN พลังงานที่สลายในตัวท่วงสูงสุดมีค่า 2.9 MN-m ตัวท่วงมีระยะเคลื่อนที่สูงสุด 0.035 m ความเร็วสูงสุด 0.218 m/s

5.4.6 เปรียบเทียบรูปแบบการควบคุมแบบแพสซีฟภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว EI Centro

รูปที่ 5.30 แสดงค่าความเหนียวสูงสุดที่ปลายของชิ้นส่วนโครงสร้างกับสัดส่วนของแรงท่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบแพสซีฟภายใต้คลื่น EI Centro ที่ระดับความเข้มต่างๆ จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าความเหนียวของคานและเสาในชั้นที่ 1 ลดลงเมื่อแรงท่วงเพิ่มขึ้นโดยรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทานลดค่าความเหนียวได้ดีกว่า ส่วนค่าความเหนียวของเสาในชั้น 2 เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อแรงท่วงเพิ่มขึ้นโดยรูปแบบการควบคุมแรงท่วงทั้งสองแบบให้ค่าความเหนียวใกล้เคียงกัน ส่วนค่าความเหนียวในเสาชั้น 3 ค่อนข้างคงที่เมื่อแรงท่วงเพิ่มขึ้นโดยรูปแบบการควบคุมแรงท่วงทั้งสองแบบให้ค่าความเหนียวใกล้เคียงกัน ส่วนค่าความเหนียวในคานชั้น 2 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่ระดับความเข้ม 150% รูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนืดค่าความเหนียวจะลดลงเมื่อแรงท่วงเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสัดส่วนแรงท่วงเท่ากับ 1.81 จะทำให้ค่าความเหนียวต่ำสุดมีค่า 1.41 และเมื่อสัดส่วนแรงท่วงมีค่ามากกว่า 1.81 จะทำให้ค่าความเหนียวเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองรูปแบบการควบคุมแรงท่วงพบว่ารูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนืดลดค่าความเหนียวของคานชั้น 2 ได้ดีกว่า ส่วนคานชั้น 3 ก็มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน รูปที่ 5.31 แสดงผลตอบสนองสูงสุดของแต่ละชั้นกับค่าสัดส่วนแรงท่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ของรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทานและแบบหนืดภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว EI Centro ที่ระดับความเข้ม 50%, 100% และ 150% ของคลื่นจริง จากรูปจะเห็นได้ว่าภายใต้คลื่นที่ระดับความเข้ม 150% ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของชั้น 1 และ 2 จะลดลงเมื่อแรงท่วงเพิ่มขึ้น โดยรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทานสามารถลดระยะเคลื่อนที่สูงสุดได้ดีกว่าส่วนระยะเคลื่อนที่สูงสุดชั้น 3 รูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทานระยะเคลื่อนที่สูงสุดจะลดลงเมื่อแรงท่วงเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสัดส่วนแรงท่วง 1.46 จะทำให้ระยะเคลื่อนที่สูงสุดต่ำสุดและระยะเคลื่อนที่สูงสุดจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อสัดส่วนแรงท่วงมากกว่า 1.46 ส่วนรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนืดระยะเคลื่อนที่สูงสุดลดลงเมื่อแรงท่วงเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความเร่งสูงสุดของชั้นต่างๆภายใต้คลื่นที่ระดับความเข้ม 150% รูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนืดค่าความเร่งสูงสุดของทั้งสามชั้นจะลดลงเมื่อแรงท่วงเพิ่มขึ้นโดยมีค่าความเร่งต่ำสุดที่สัดส่วนแรงท่วงค่าหนึ่งและค่าความเร่งสูงสุดจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าสัดส่วนแรงท่วงเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าที่จุดนี้ ส่วนรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบเสียดทาน ค่าความเร่งสูงสุดชั้น 1 จะเพิ่มขึ้นเมื่อแรงท่วงเพิ่มขึ้นจนถึง

ค่าสัดส่วนแรงหน่วงค่าหนึ่งจะทำให้ค่าความเร่งสูงสุดลดลง ส่วนค่าความเร่งสูงสุดชั้นที่ 3 ค่าความเร่งสูงสุดจะลดลงเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสัดส่วนแรงหน่วงเท่ากับ 1.05 จะทำให้ค่าความเร่งสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองรูปแบบการควบคุมพบว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งสามารถลดค่าความเร่งสูงสุดชั้น 1 และ 2 ได้ดีกว่า ส่วนค่าความเร่งสูงสุดชั้น 3 ทั้งสองรูปแบบให้ค่าใกล้เคียงกัน รูปที่ 5.32 แสดงระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 จะเห็นได้ว่าภายใต้คลื่นที่ระดับความเข้ม 150% ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1 ลดลงเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้นโดยรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานสามารถลดระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1 ได้ดีกว่า ส่วนระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 3 จะลดลงเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสัดส่วนแรงหน่วงประมาณ 1.3 ระยะเคลื่อนที่สูงสุดจะเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนแรงหน่วงมากกว่า 1.3 โดยรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งสามารถลดระยะเคลื่อนที่สูงสุดได้ดีกว่ารูปที่ 5.33 แสดงพลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุดกับค่าสัดส่วนแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ของรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานและแบบหนึ่งภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro ที่ระดับความเข้ม 50%, 100% และ 150% ของคลื่นจริง จากรูปจะเห็นได้ว่าภายใต้คลื่นที่ระดับความเข้ม 150% สำหรับรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน พลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุดเพิ่มขึ้นเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้นจนถึงสัดส่วนแรงหน่วงเท่ากับ 1.5 พลังงานที่สลายจะลดลงเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบทั้งสองรูปแบบการควบคุมพบว่า ในช่วงที่สัดส่วนแรงหน่วงน้อยกว่า 1.6 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานสลายพลังงานในตัวหน่วงได้มากกว่าแต่ในช่วงสัดส่วนแรงหน่วงมากกว่า 1.6 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งมีการสลายพลังงานในตัวหน่วงมากกว่า

จากการเปรียบเทียบทั้งสองรูปแบบการควบคุมพบว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานมีแนวโน้มลดระยะเคลื่อนที่สูงสุดของชั้นและระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาได้มากกว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งมีแนวโน้มลดค่าความเร่งสูงสุดของชั้นได้มากกว่า ส่วนค่าพลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุดภายใต้คลื่นที่ระดับความเข้ม 150% รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานสลายพลังงานสูงสุดได้มากกว่าในช่วงสัดส่วนแรงหน่วงน้อยกว่า 1.6 ส่วนในช่วงสัดส่วนแรงหน่วงมากกว่า 1.6 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งสามารถสลายพลังงานได้มากกว่า

5.5 การควบคุมผลตอบสนองโดยตัวห้วงปรับค่าได้

จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อก่อนหน้าจะเห็นได้ว่ารูปแบบการควบคุมทั้งสองแบบมีข้อดีและข้อเสียต่างกัน เพื่อนำข้อดีของทั้งสองรูปแบบมาผสมกันจึงมีการกำหนดรูปแบบการควบคุมแรงห้วงแบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้ ซึ่งคุณลักษณะได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 แต่เนื่องจากโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณไม่รองรับคำสั่งที่จำเป็นสำหรับการควบคุมแรงห้วงแบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้จึงใช้รูปแบบการควบคุมแรงห้วงที่ใกล้เคียงกัน คือ รูปแบบการควบคุมแรงห้วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นซึ่งคุณลักษณะได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ในหัวข้อนี้จะทำการตรวจสอบประสิทธิภาพของรูปแบบการควบคุมแรงห้วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe และ El Centro

5.5.1 รูปแบบการควบคุมแรงห้วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe

รูปที่ 5.34 ค่าความเหนียวที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงห้วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 50 MN-s/m แรงเสียดทาน 9 MN ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ขนาดเท่าของจริง จากรูปจะเห็นได้ว่าชิ้นส่วนโครงสร้างมีพฤติกรรมไม่เชิงเส้นลดลงโดยค่าความเหนียวในเสาสูงสุดที่จุดต่อ 2 และ 3 มีค่า 1.33 ลดลง 58% ส่วนค่าความเหนียวในคานสูงสุดที่จุดต่อ 16 และ 19 มีค่า 3.11 ลดลง 22% รูปที่ 5.35 แสดงผลตอบสนองของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงห้วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 50 MN-s/m ค่าแรงที่กำหนด 9 MN ภายใต้แผ่นดินไหว JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง จากรูปจะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 0.046, 0.134 และ 0.240 m ตามลำดับ ลดลง 47%, 31% และ 22% ตามลำดับ โดยทั้งสามชั้นจะมีระยะเคลื่อนที่คงค้างเท่ากับ 0.006, 0.027 และ 0.056 m ตามลำดับ ลดลง 76%, 43% และ 33% ตามลำดับ ความเร่งสูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 8.59, 7.97 และ 8.09 m/s^2 ตามลำดับ ลดลง 28%, 24% และ 8% ตามลำดับ รูปที่ 5.36 แสดงระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 จากรูปจะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 เป็น 0.046, 0.088 และ 0.116 m ตามลำดับ ลดลง 47%, 20% และ 20% รูปที่ 5.37 แสดงผลตอบสนองของตัวห้วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงห้วงแบบหนืดไม่เชิงเส้น จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าแรงห้วงสูงสุดมีค่า 9.00 MN พลังงานที่สลายในตัวห้วงสูงสุดมีค่า 4.2 MN-m ตัวห้วงมีระยะเคลื่อนที่สูงสุด 0.046 m ความเร็วสูงสุด 0.364 m/s

5.5.2 เปรียบเทียบรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบต่างๆภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe

รูปที่ 5.38 แสดงค่าความเหนียวสูงสุดที่ปลายของชิ้นส่วนโครงสร้างกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบต่างๆภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้มต่างๆ จากรูปจะเห็นได้ว่าภายใต้คลื่นที่ระดับความเข้ม 100% ค่าความเหนียวสูงสุดในเสาชั้น 1 ลดลงเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้น รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานและแบบหนีดไม่เชิงเส้นมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่าความเหนียวในเสาชั้น 2 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนีดและแบบหนีดไม่เชิงเส้นมีค่าความเหนียวใกล้เคียงกันและมีค่าน้อยกว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน ส่วนค่าความเหนียวในเสาชั้น 3 รูปแบบการควบคุมทั้งสามแบบให้ค่าใกล้เคียงกัน ค่าความเหนียวในคานชั้น 1 ลดลงเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้น รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนีดไม่เชิงเส้นสามารถลดค่าความเหนียวได้ใกล้เคียงแบบเสียดทานและสามารถลดได้ดีกว่าแบบหนีด ส่วนค่าความเหนียวในคานชั้น 2 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนีดไม่เชิงเส้นสามารถลดค่าความเหนียวได้ดีกว่าแบบหนีด ส่วนค่าความเหนียวในคานชั้น 3 มีแนวโน้มลักษณะเดียวกับคานชั้น 2 รูปที่ 5.39 แสดงผลตอบสนองสูงสุดของชิ้นต่างๆกับค่าสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ของรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน แบบหนีด และแบบหนีดไม่เชิงเส้นภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 50% และ 100% ของคลื่นจริง จากรูปจะเห็นได้ว่าภายใต้คลื่นที่ระดับความเข้ม 100% ระยะเวลาเคลื่อนที่สูงสุดของชั้น 1 และ 2 จะลดลงเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้น รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานและแบบหนีดไม่เชิงเส้นสามารถลดระยะเวลาเคลื่อนที่สูงสุดได้ใกล้เคียงกันและลดได้ดีกว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนีด ส่วนระยะเวลาเคลื่อนที่สูงสุดชั้น 3 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานสามารถลดระยะเวลาเคลื่อนที่ได้ดีที่สุด รองลงมาคือรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนีดไม่เชิงเส้น ส่วนค่าความเร่งสูงสุดของชิ้นต่างๆจะเห็นได้ว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนีดสามารถลดค่าความเร่งสูงสุดได้ดีที่สุด รองลงมา คือรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนีดไม่เชิงเส้น รูปที่ 5.40 แสดงระยะเวลาเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 จากรูปจะเห็นได้ว่าภายใต้คลื่นที่ระดับความเข้ม 100% ระยะเวลาเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1 ลดลงเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้น รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานสามารถลดระยะเวลาเคลื่อนที่สูงสุดของเสาทั้งสามชั้นได้ดีที่สุด รองลงมา คือ รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนีดไม่เชิงเส้น รูปที่ 5.41 แสดงพลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุดกับค่าสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ของรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน แบบหนีด และแบบหนีดไม่เชิงเส้นภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 50% และ 100% ของคลื่นจริง จากรูปจะเห็นได้ว่าพลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุดภายใต้คลื่นที่ระดับความเข้ม 100%

ช่วงที่สัดส่วนแรงหน่วงต่ำกว่าค่าประมาณ 1.5 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานและแบบหนืดไม่เชิงเส้นมีค่าพลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุดใกล้เคียงกันและมีค่ามากกว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด ส่วนในช่วงที่สัดส่วนแรงหน่วงมากกว่า 1.5 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นมีค่าพลังงานที่สลายสูงสุดมากที่สุด

จากการเปรียบเทียบรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงทั้งสามแบบพบว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานมีแนวโน้มลดระยะเคลื่อนที่สูงสุดได้ดีที่สุดแต่มีค่าความเร่งสูงสุดมากที่สุด รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดมีค่าความเร่งสูงสุดน้อยที่สุดแต่มีระยะเคลื่อนที่สูงสุดมากที่สุด ส่วนรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นมีระยะเคลื่อนที่สูงสุดน้อยกว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด และมีค่าความเร่งสูงสุดน้อยกว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน นอกจากนี้รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นมีแนวโน้มที่มีค่าการสลายพลังงานในตัวหน่วงสูงสุดมากที่สุด

5.5.3 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว EI Centro

รูปที่ 5.42 แสดงค่าความเหนียวที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 50 MN-s/m แรงเสียดทาน 6 MN ภายใต้คลื่น EI Centro ขนาด 1.5 เท่าของจริง จากรูปจะเห็นได้ว่าชิ้นส่วนโครงสร้างมีพฤติกรรมไม่เชิงเส้นลดลงโดยค่าความเหนียวในเสาสูงสุดที่จุดต่อ 2 และ 3 มีค่า 0.96 ลดลง 55% ส่วนค่าความเหนียวในคานสูงสุดที่จุดต่อ 16 และ 19 มีค่า 1.35 ลดลง 18% รูปที่ 5.43 แสดงผลตอบสนองของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นโดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 50 MN-s/m ค่าแรงที่กำหนด 6 MN ภายใต้แผ่นดินไหว EI Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง จากรูปจะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 0.032, 0.083 และ 0.136 m ตามลำดับ ลดลง 46%, 34% และ 21% ตามลำดับ โดยชั้น 2 และ 3 จะมีระยะเคลื่อนที่คงค้างเท่ากับ 0.006 และ 0.013 m ตามลำดับ ลดลง 67% และ 35% ตามลำดับ ความเร่งสูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 มีค่า 4.24, 5.67 และ 6.82 m/s^2 ตามลำดับ ลดลง 20%, 7% และ 8% ตามลำดับ รูปที่ 5.44 แสดงระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 จากรูปจะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 เป็น 0.032, 0.052 และ 0.057 m ตามลำดับ ลดลง 46%, 24% และ 15% ตามลำดับ รูปที่ 5.45 แสดงผลตอบสนองของตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด

ไม่เชิงเส้น จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าแรงหน่วงสูงสุดมีค่า 6.0 MN พลังงานที่สลายสูงสุดในตัวหน่วงมีค่า 3.2 MN-m ตัวหน่วงมีระยะเคลื่อนที่สูงสุด 0.032 m ความเร็วสูงสุด 0.240 m/s

5.5.4 เปรียบเทียบรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบต่างๆภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro

รูปที่ 5.46 แสดงค่าความเหนียวสูงสุดที่ปลายของชิ้นส่วนโครงสร้างกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบต่างๆภายใต้คลื่น El Centro ระดับความเข้มต่างๆ จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าความเหนียวในเสาชั้น 1 ลดลงเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้น โดยรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นสามารถลดค่าความเหนียวได้ใกล้เคียงแบบเสียดทานและลดได้ดีกว่าแบบหนืด ส่วนค่าความเหนียวในเสาชั้น 2 และ 3 รูปแบบการควบคุมทั้งสามแบบให้ค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่าความเหนียวในคานานั้นสำหรับคานาชั้น 1 ค่าความเหนียวลดลงเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้นโดยรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นและแบบเสียดทาน สามารถลดค่าความเหนียวได้ใกล้เคียงกันโดยสามารถลดได้ดีกว่าแบบหนืด ส่วนค่าความเหนียวในคานาชั้น 2 และ 3 ภายใต้คลื่นที่ระดับความเข้ม 150% รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นสามารถลดค่าความเหนียวได้ใกล้เคียงกับแบบเสียดทานในช่วงที่สัดส่วนแรงหน่วงน้อยกว่า 1.25 และ เมื่อสัดส่วนแรงหน่วงมากกว่า 1.25 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นสามารถลดค่าความเหนียวได้ใกล้เคียงแบบหนืดและสามารถลดได้ดีกว่าแบบเสียดทาน รูปที่ 5.47 แสดงผลตอบสนองสูงสุดของแต่ละชั้นกับค่าสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ของรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน แบบหนืด และแบบหนืดไม่เชิงเส้นภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro ที่ระดับความเข้ม 50%, 100% และ 150% ของคลื่นจริง จากรูปจะเห็นได้ว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานและรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นสามารถลดระยะเคลื่อนที่ของทั้งสามชั้นได้ใกล้เคียงกัน และลดได้ดีกว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด ส่วนค่าความเร่งสูงสุดจะเห็นได้ว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดสามารถลดค่าความเร่งสูงสุดได้ดีที่สุด รองลงมา คือรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้น รูปที่ 5.48 แสดงระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 จากรูปจะเห็นได้ว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1 ลดลงเมื่อแรงหน่วงเพิ่มขึ้น รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานและรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นสามารถลดค่าระยะเคลื่อนที่ของเสาทั้งสามชั้นได้ใกล้เคียงกันและสามารถลดได้ดีกว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด รูปที่ 5.49 แสดงพลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุดกับค่าสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ของรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน แบบหนืด และแบบหนืดไม่เชิงเส้นภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El

Centro ที่ระดับความเข้ม 50% 100% และ 150% ของคลื่นจริง จากรูปจะเห็นได้ว่าภายใต้คลื่นที่ระดับความเข้ม 100% และ 150% รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นสามารถสลายพลังงานในตัวหน่วงได้สูงสุด ภายใต้คลื่นที่ระดับความเข้ม 50% รูปแบบการควบคุมทั้งสามแบบสามารถสลายพลังงานได้ใกล้เคียงกัน

จากการเปรียบเทียบรูปแบบการควบคุมทั้งสามแบบพบว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานมีแนวโน้มลดระยะเคลื่อนที่สูงสุดได้ดีที่สุดแต่มีค่าความเร่งสูงสุดมากที่สุด รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดมีค่าความเร่งสูงสุดน้อยที่สุดแต่มีค่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดมากที่สุด ส่วนรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นมีระยะเคลื่อนที่สูงสุดน้อยกว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด และมีค่าความเร่งสูงสุดน้อยกว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน นอกจากนี้รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นมีแนวโน้มที่มีค่าการสลายพลังงานในตัวหน่วงสูงสุดมากที่สุด

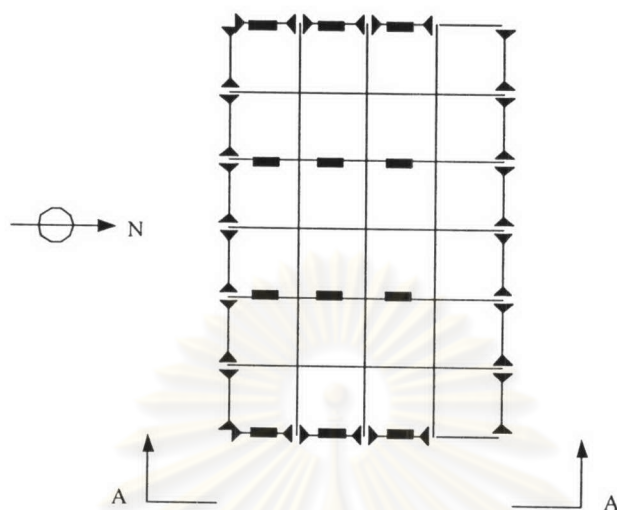
5.6 สรุปผลการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์หอคอยเหล็กสูง 3 ชั้นขนาดกว้าง 36.58 m ยาว 54.87 m สูง 11.89 m มีค่าคาบธรรมชาติของสามโหมดแรกคือ 1.01 s, 0.33 s และ 0.17 s มีการติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กระหว่างฐานกับพื้นชั้น 1 โดยมีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบต่างๆ เพื่อลดผลตอบแทนไม่เชิงเส้นของอาคารภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe และ El Centro ที่ระดับความเข้มต่างๆกัน สำหรับผลการวิเคราะห์กรณีคลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการควบคุมพบว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานที่มีค่าแรงเสียดทาน 9 MN สามารถลดค่าความเหนียวในเสาสูงสุดได้ 59% และลดค่าความเหนียวในคานสูงสุดได้ 29% ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 ลดลง 49%, 23% และ 26% ตามลำดับ ค่าความเร่งสูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 ลดลง 25%, 14% และ 6% ตามลำดับ พลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุดมีค่า 4.1 MN-m รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดมีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 30 MN-s/m เพื่อให้ได้แรงหน่วงประมาณ 9 MN สามารถลดค่าความเหนียวในเสาสูงสุดได้ 54% และลดค่าความเหนียวในคานสูงสุดได้ 20% ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 ลดลง 43%, 14% และ 17% ตามลำดับ ค่าความเร่งสูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 ลดลง 39%, 42% และ 13% ตามลำดับ พลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุดมีค่า 3.8 MN-m รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นซึ่งใช้แทนรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้เนื่องจากโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณไม่รองรับคำสั่งที่จำเป็นสำหรับการควบคุมแรงหน่วงแบบ

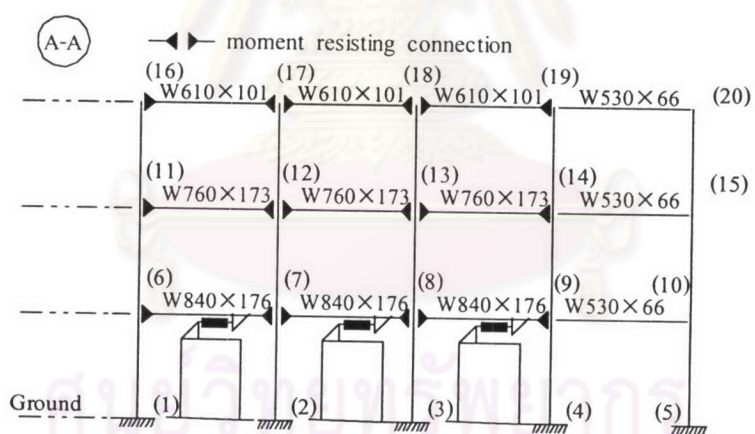
ชนิดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้ โดยรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบชนิดไม่เชิงเส้นมีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 50 MN-s/m ค่าแรงที่กำหนด 9 MN สามารถลดค่าความเหนียวในเสาสูงสุดได้ 58% และลดค่าความเหนียวในคานสูงสุดได้ 22% ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1, 2 และ 3 ลดลง 47%, 20% และ 20% ตามลำดับ ค่าความเร่งสูงสุดของชั้น 1, 2 และ 3 ลดลง 28%, 24% และ 8% ตามลำดับ พลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุดมีค่า 4.2 MN-m จากการเปรียบเทียบทั้งสามรูปแบบการควบคุมพบว่า รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบชนิดไม่เชิงเส้นและแบบเสียดทานสามารถลดค่าความเหนียวในเสาและคานได้ดีใกล้เคียงกันและสามารถลดได้ดีกว่าแบบชนิดรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานมีแนวโน้มลดระยะเคลื่อนที่ได้ดีแต่มีค่าความเร่งสูงรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบชนิดสามารถลดค่าความเร่งสูงสุดได้ดีที่สุดแต่มีระยะเคลื่อนที่สูงสุดมากที่สุด ส่วนรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบชนิดไม่เชิงเส้น สามารถลดระยะเคลื่อนที่สูงสุดได้ดีกว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบชนิด และสามารถลดค่าความเร่งสูงสุดได้ดีกว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน นอกจากนี้รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบชนิดไม่เชิงเส้นมีการสลายพลังงานในตัวหน่วงได้มากที่สุด



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



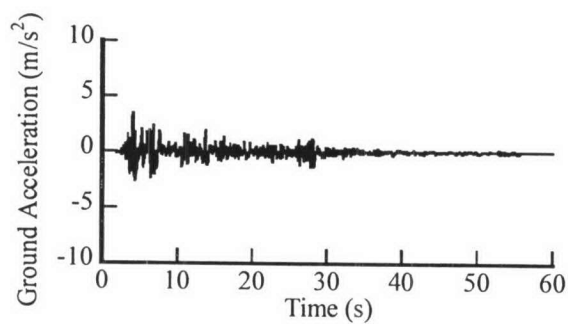
(ก) รูปแปลน



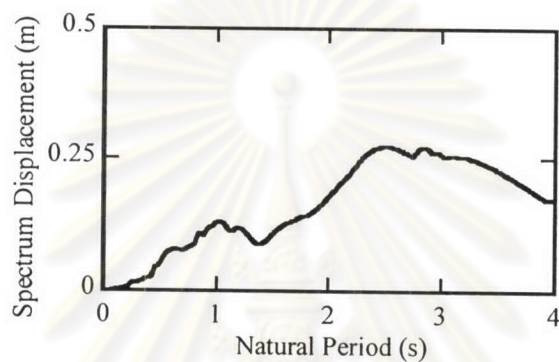
(ข) รูปด้านข้าง

รูปที่ 5.1 โครงข้อแข็งอาคารมาตรฐาน 3 ชั้นทิศเหนือ-ใต้

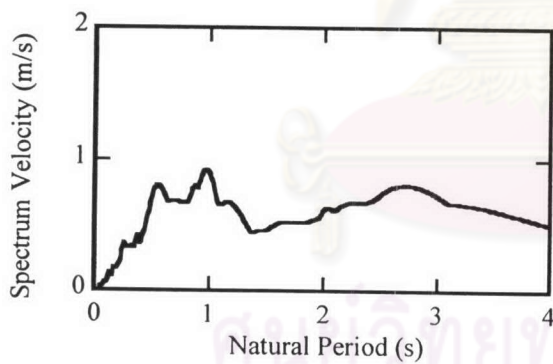
(จาก Y. Ohtori และคณะ ค.ศ. 2000)



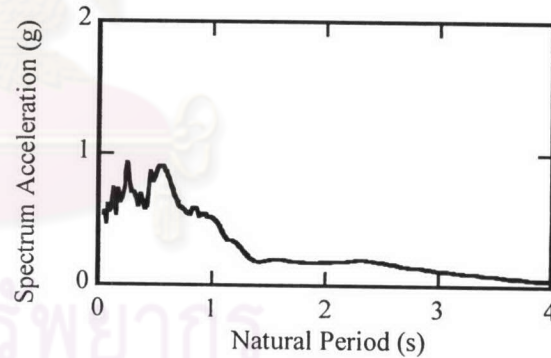
(ก) ความเร่ง



(ข) สเปกตรัมผลตอบสนองของระยะเคลื่อนที่

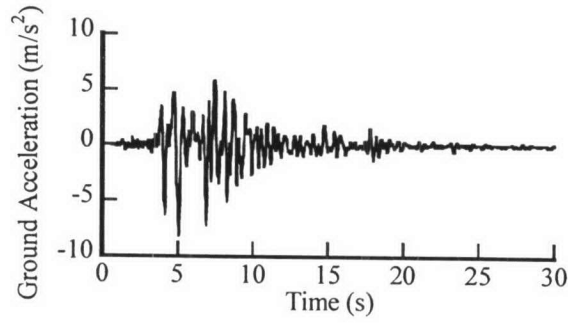


(ค) สเปกตรัมผลตอบสนองของความเร็ว

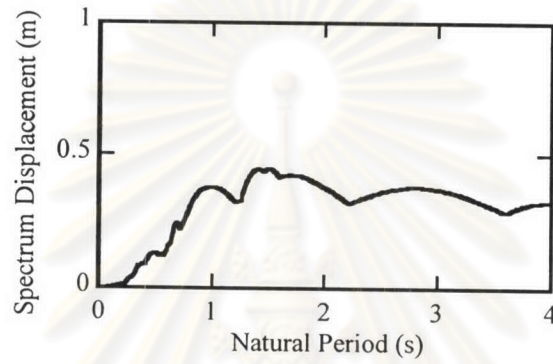


(ง) สเปกตรัมผลตอบสนองของความเร่ง

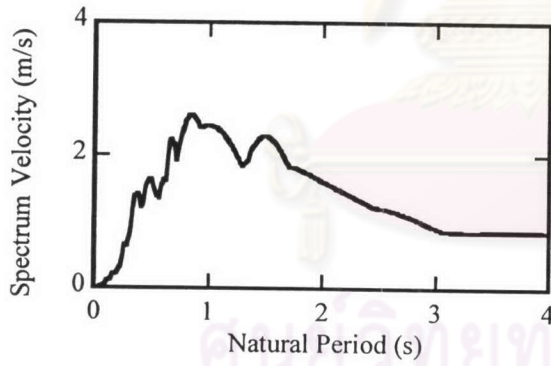
รูปที่ 5.2 คลื่นแผ่นดินไหว El Centro



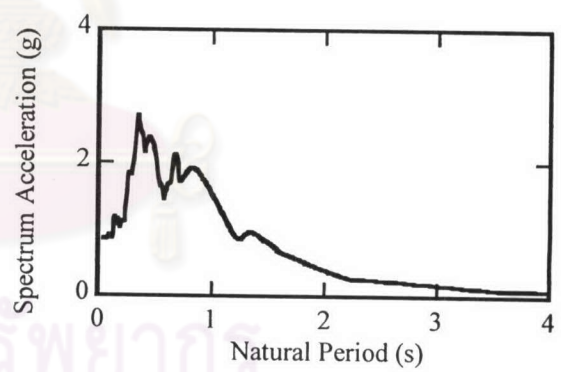
(ก) ความเร่ง



(ข) สเปกตรัมผลตอบสนองของระยะเคลื่อนที่

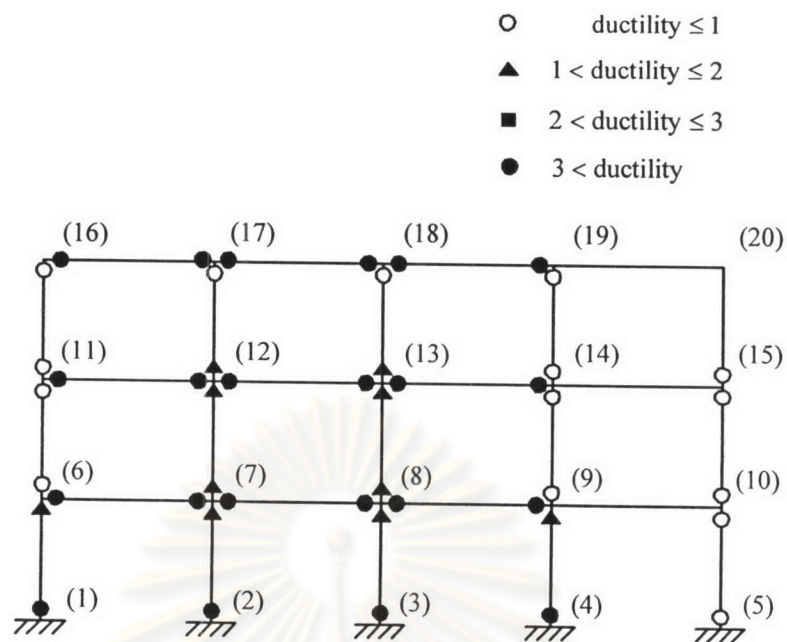


(ค) สเปกตรัมผลตอบสนองของความเร็ว



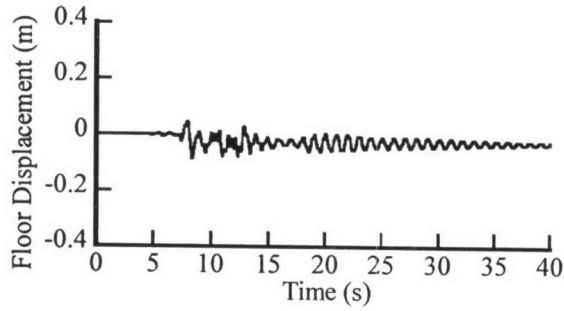
(ง) สเปกตรัมผลตอบสนองของความเร่ง

รูปที่ 5.3 คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe

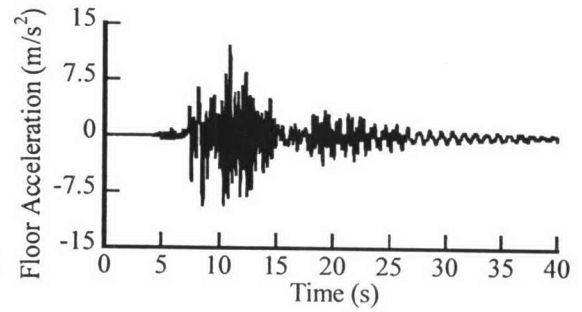


รูปที่ 5.4 ค่าความเหนียวเชิงความโค้งที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วง
 ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง

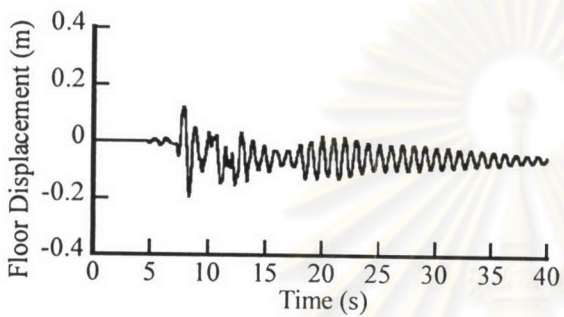
ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



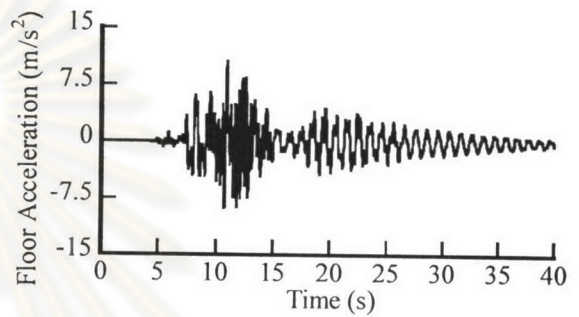
(ก) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของชั้น 1



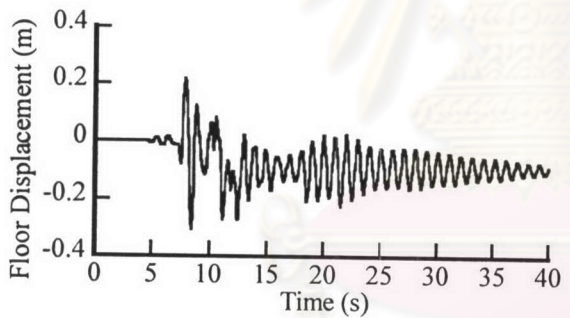
(ง) ความเร่งของชั้น 1



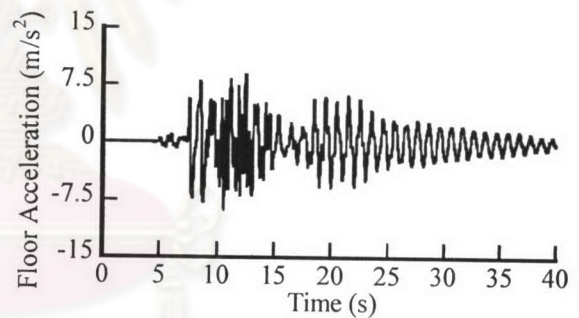
(ข) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของชั้น 2



(จ) ความเร่งของชั้น 2

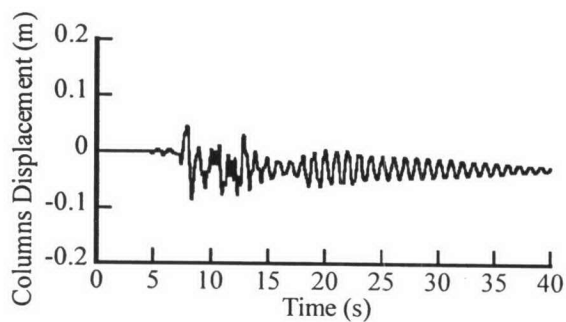


(ค) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของชั้น 3

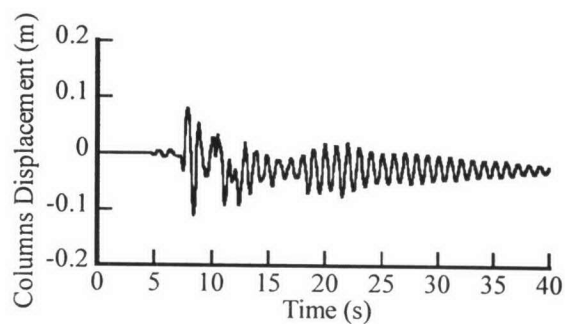


(ฉ) ความเร่งของชั้น 3

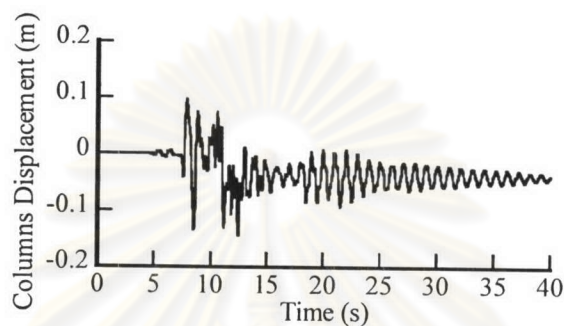
รูปที่ 5.5 ผลตอบสนองของอาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วงภายใต้
คลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง



(ก) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้น 1



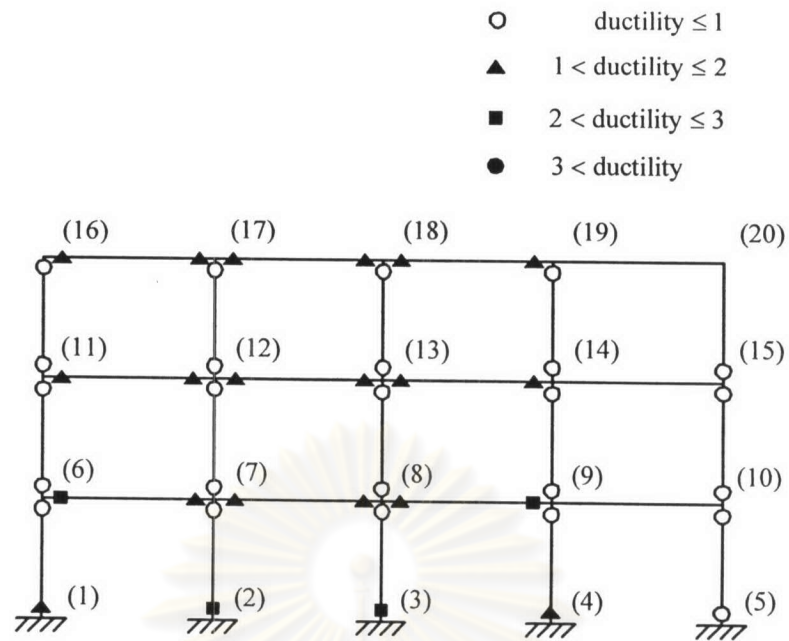
(ข) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้น 2



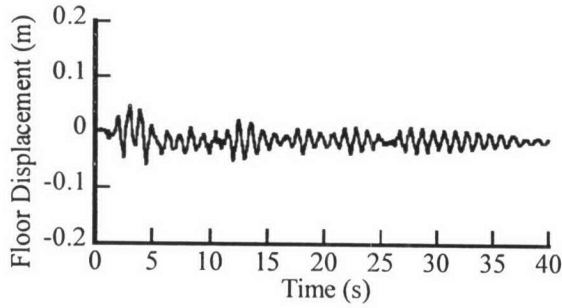
(ค) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้น 3

รูปที่ 5.6 ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆของอาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วงภายใต้
คลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง

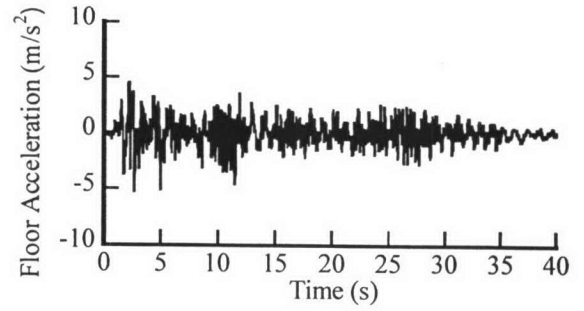
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



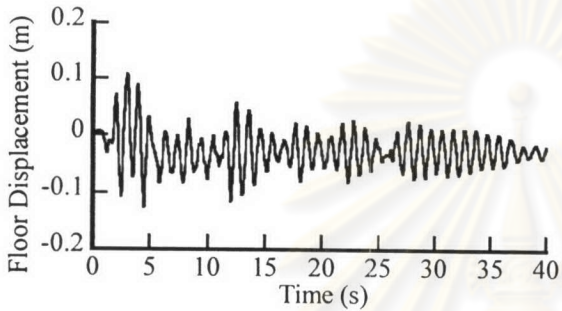
รูปที่ 5.7 ค่าความเหนียวเชิงความโค้งที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วง
ภายใต้คลื่น El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง



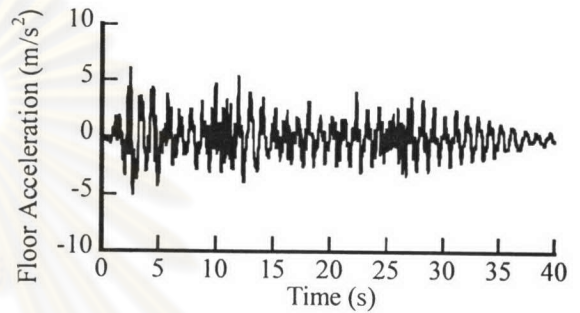
(ก) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของชั้น 1



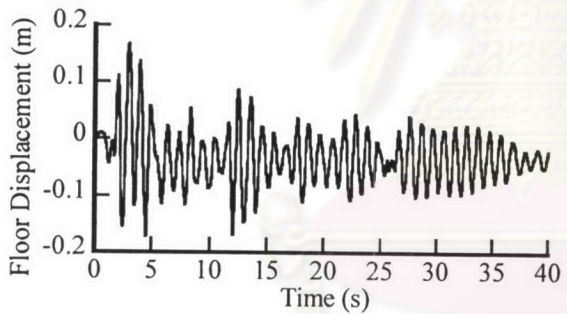
(ง) ความเร่งของชั้น 1



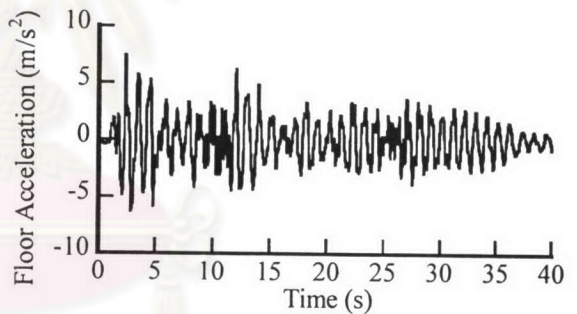
(ข) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของชั้น 2



(จ) ความเร่งของชั้น 2

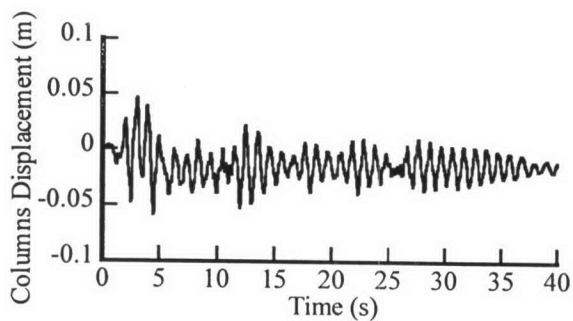


(ค) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของชั้น 3

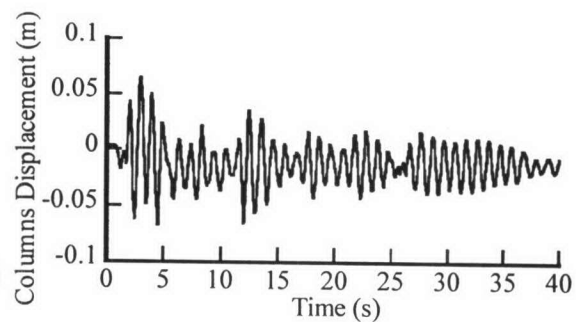


(ฉ) ความเร่งของชั้น 3

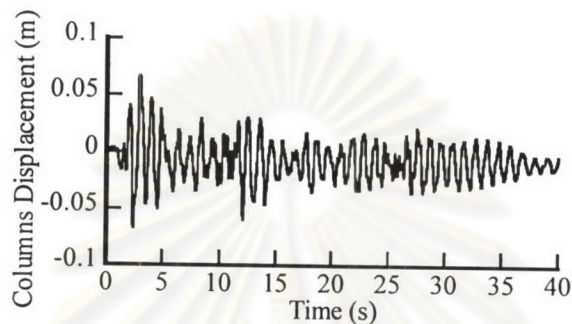
รูปที่ 5.8 ผลตอบสนองของอาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วงภายใต้
คลื่น El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง



(ก) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้น 1



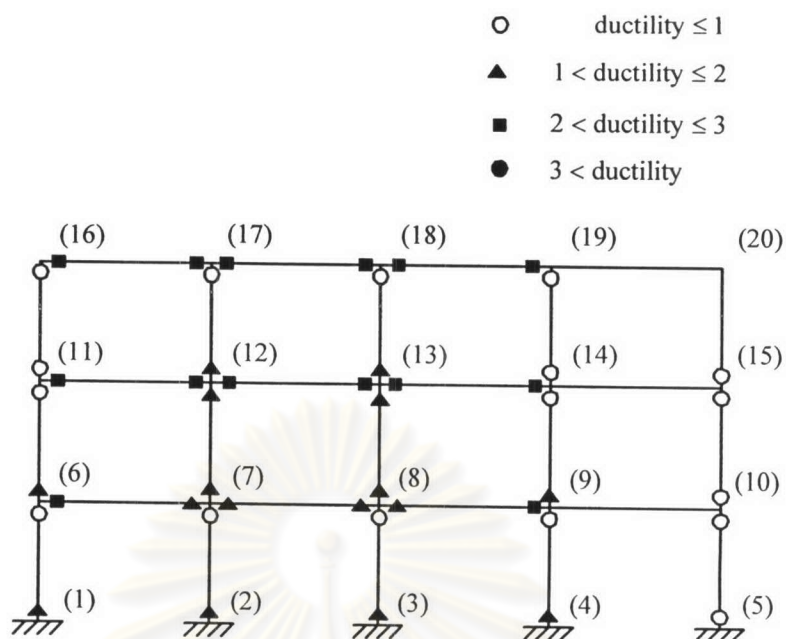
(ข) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้น 2



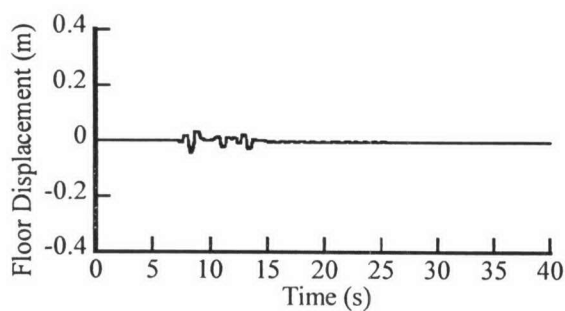
(ค) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้น 3

รูปที่ 5.9 ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆของอาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วงภายใต้คลื่น El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง

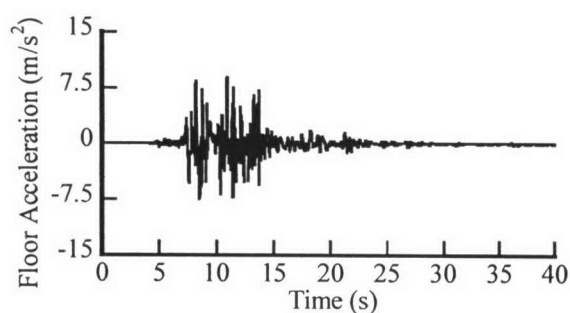
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



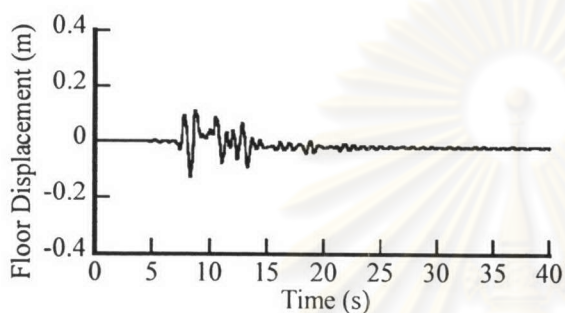
รูปที่ 5.10 ค่าความเหนียวเชิงความโค้งที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานที่มีค่าแรงเสียดทาน 9 MN ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง



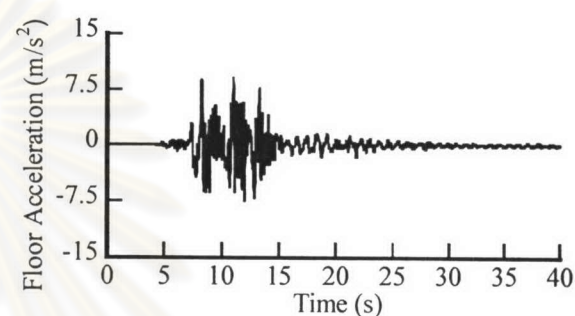
(ก) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของชั้น 1



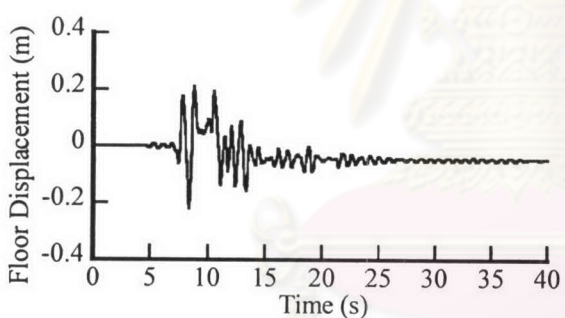
(ง) ความเร่งของชั้น 1



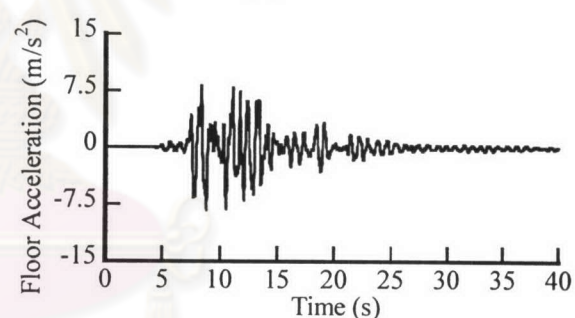
(ข) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของชั้น 2



(จ) ความเร่งของชั้น 2

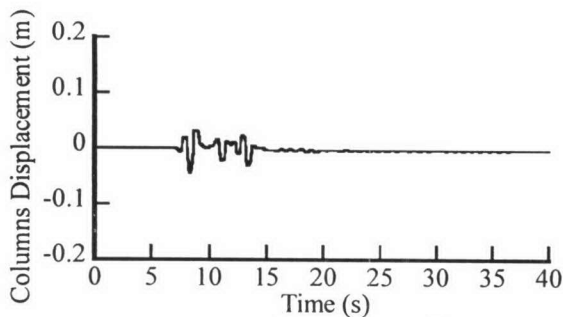


(ค) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของชั้น 3

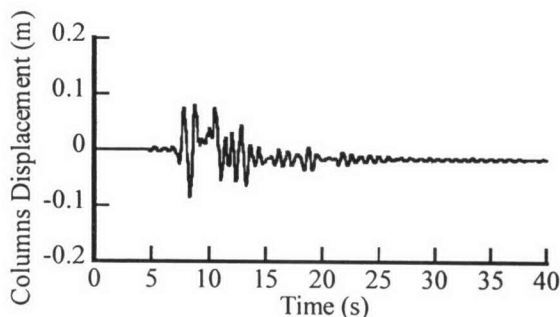


(ฉ) ความเร่งของชั้น 3

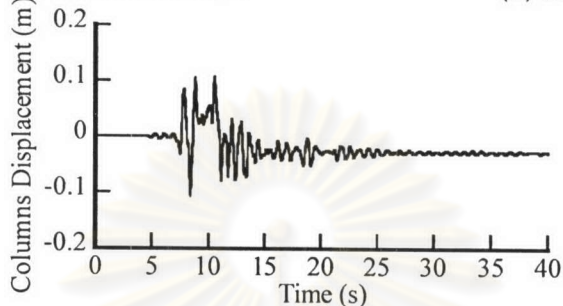
รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานที่มีค่าแรงเสียดทาน 9 MN ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง



(ก) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้น 1

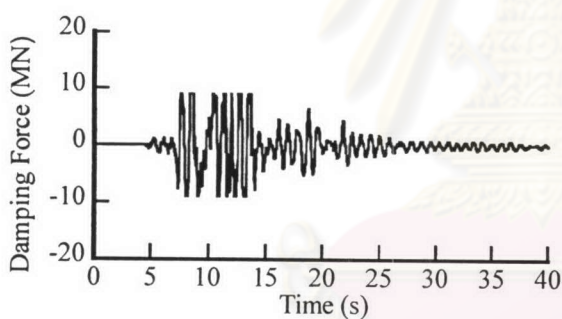


(ข) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้น 2

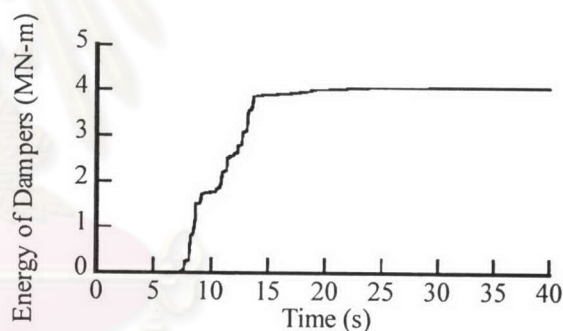


(ค) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้น 3

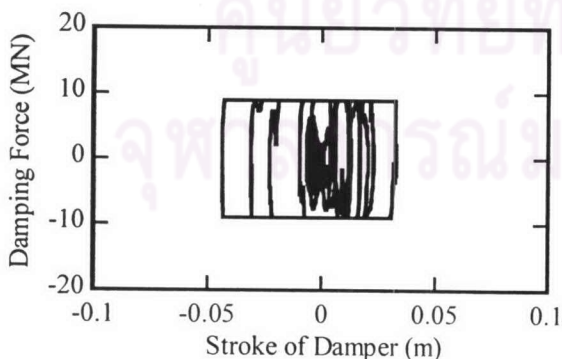
รูปที่ 5.12 ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานที่มีค่าแรงเสียดทาน 9 MN ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง



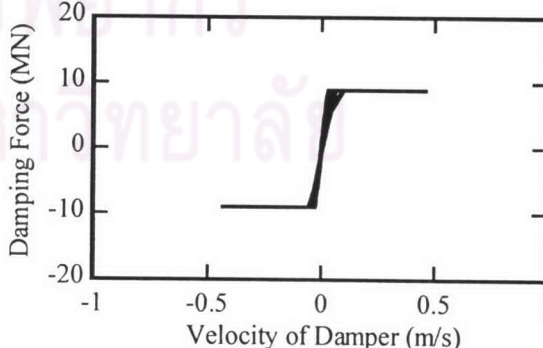
(ก) แรงหน่วง



(ข) พลังงานที่สลายในตัวหน่วง

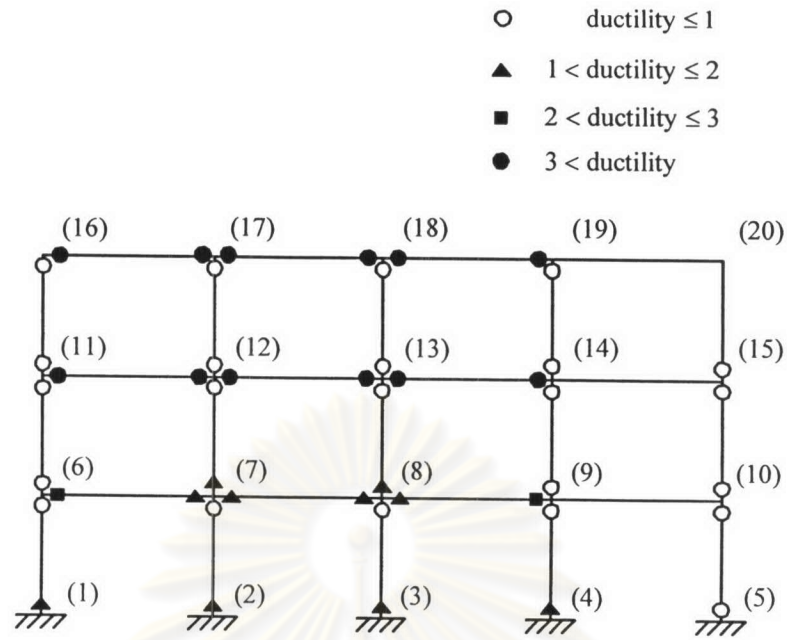


(ค) แรงหน่วงกับระยะเวลาเคลื่อนที่ของตัวหน่วง

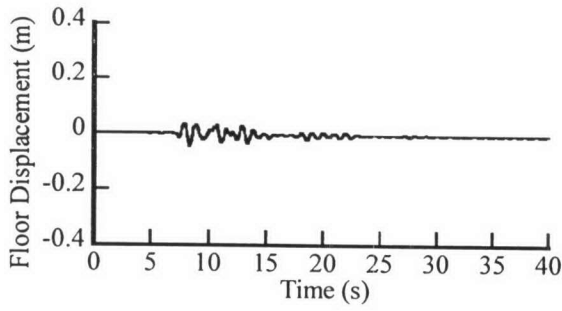


(ง) แรงหน่วงกับความเร็วของตัวหน่วง

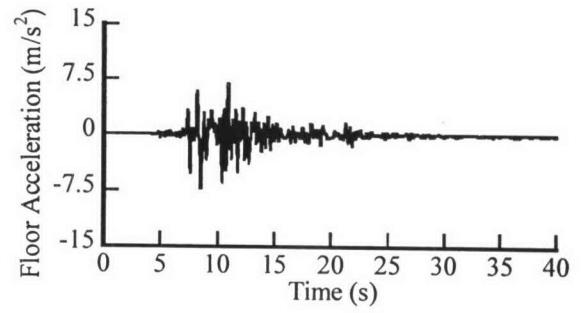
รูปที่ 5.13 ผลตอบสนองของตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานที่มีค่าแรงเสียดทาน 9 MN ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง



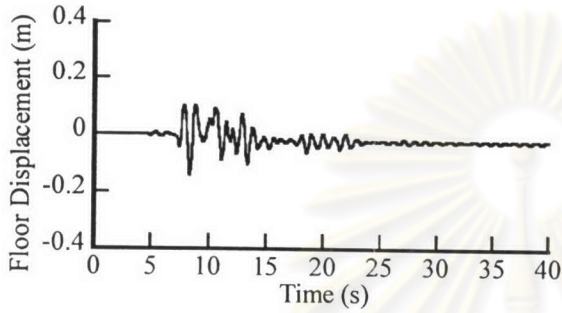
รูปที่ 5.14 ค่าความเหนียวเชิงความโค้งที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงทงแบบชนิดที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความทง 30 MN-s/m ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง



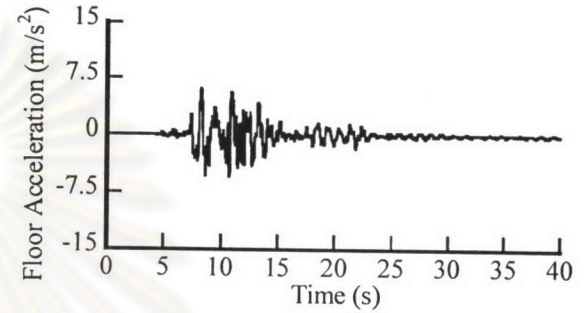
(ก) ระยะเคลื่อนที่ของชั้น 1



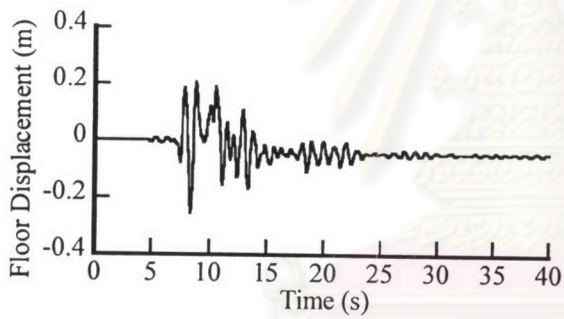
(ง) ความเร่งของชั้น 1



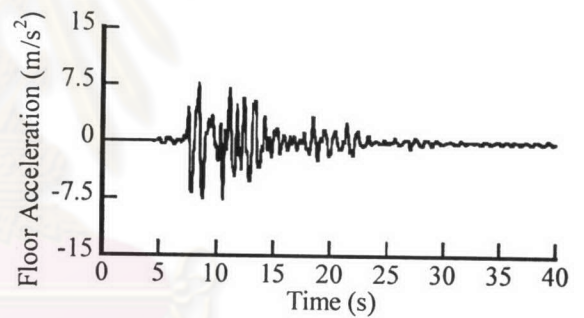
(ข) ระยะเคลื่อนที่ของชั้น 2



(จ) ความเร่งของชั้น 2

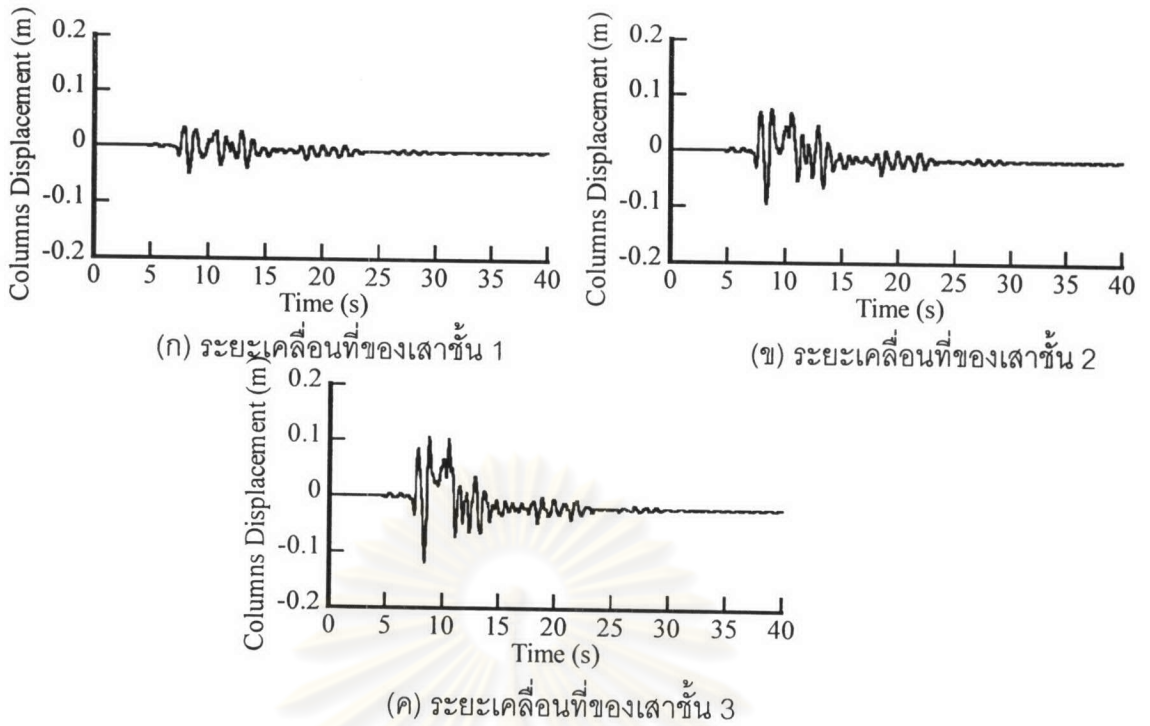


(ค) ระยะเคลื่อนที่ของชั้น 3

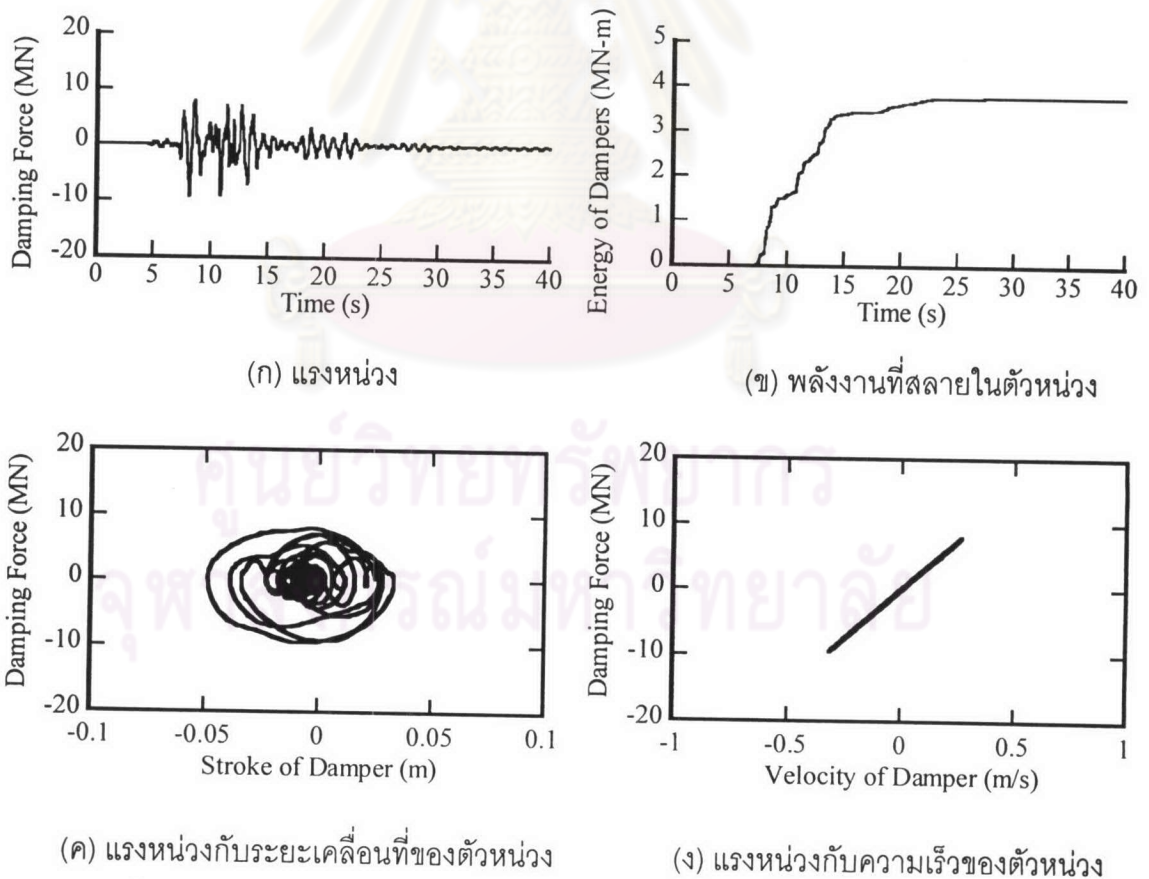


(ฉ) ความเร่งของชั้น 3

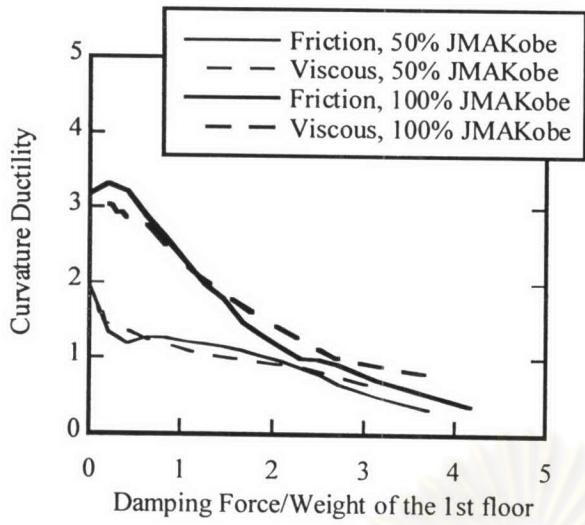
รูปที่ 5.15 ผลตอบสนองของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 30 MN-s/m ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง



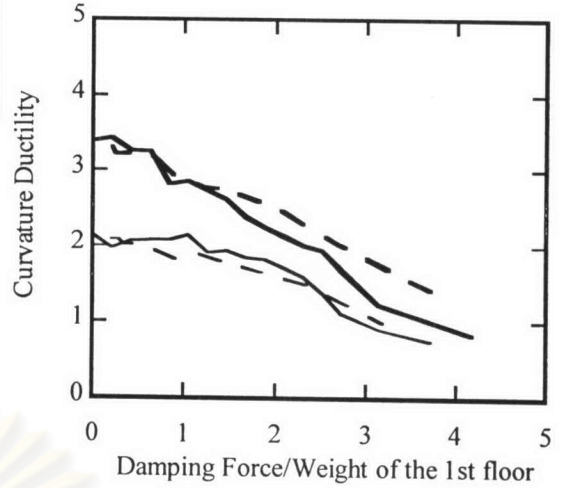
รูปที่ 5.16 ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งดที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 30 MN-s/m ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง



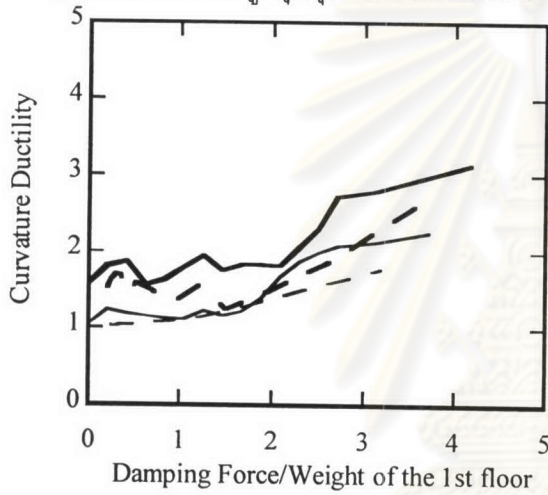
รูปที่ 5.17 ผลตอบสนองของตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนึ่งดที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 30 MN-s/m ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง



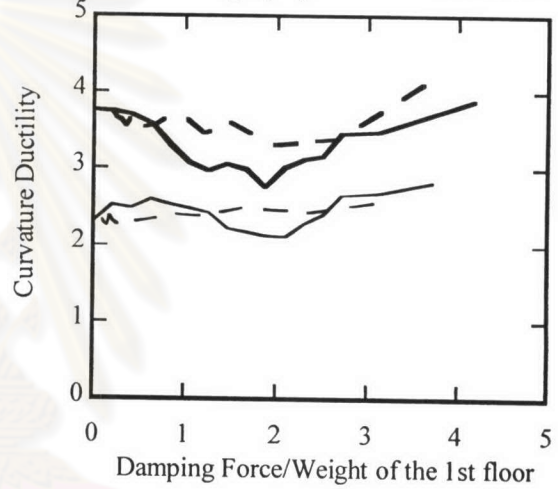
(ก) ความเหนียวสูงสุดจุดต่อ 2 ของเสาชั้น 1



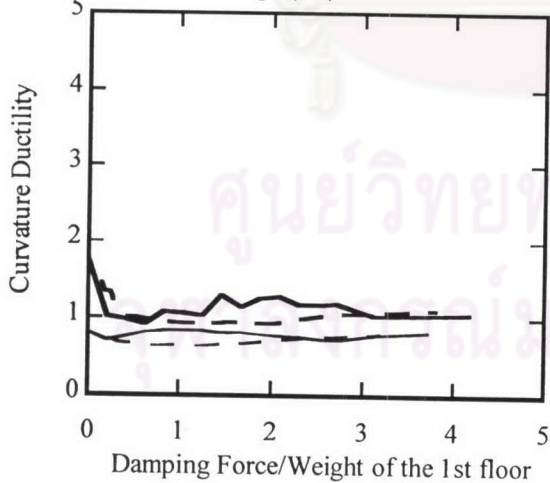
(ง) ความเหนียวสูงสุดจุดต่อ 6 ของคานชั้น 1



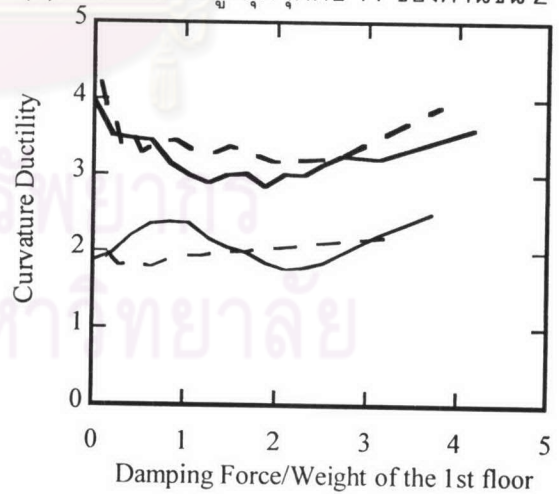
(ข) ความเหนียวสูงสุดจุดต่อ 7 ของเสาชั้น 2



(จ) ความเหนียวสูงสุดจุดต่อ 11 ของคานชั้น 2



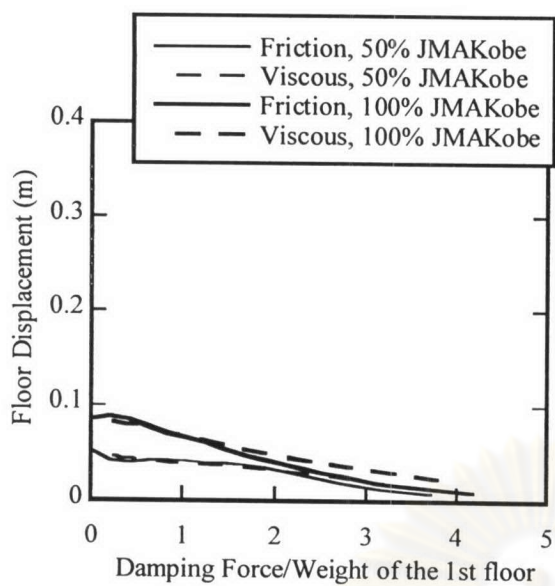
(ค) ความเหนียวสูงสุดจุดต่อ 12 ของเสาชั้น 3



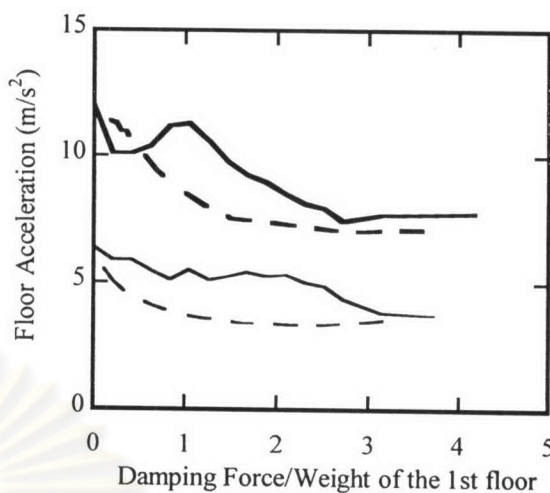
(ฉ) ความเหนียวสูงสุดจุดต่อ 16 ของคานชั้น 3

รูปที่ 5.18 ความเหนียวเชิงความโค้งสูงสุดที่ปลายของชิ้นส่วนโครงสร้างกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบพิเศษที่ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่

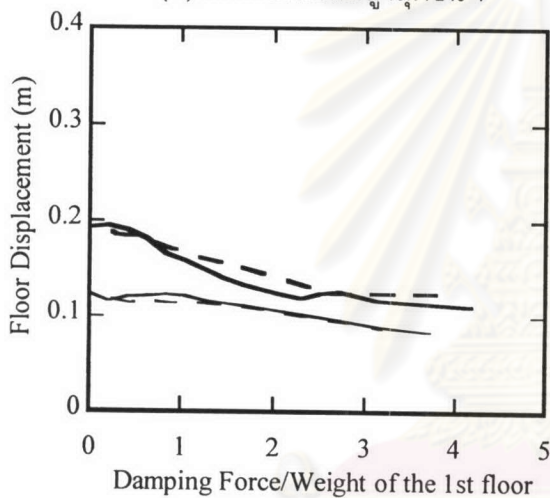
ระดับความเข้มต่างๆ



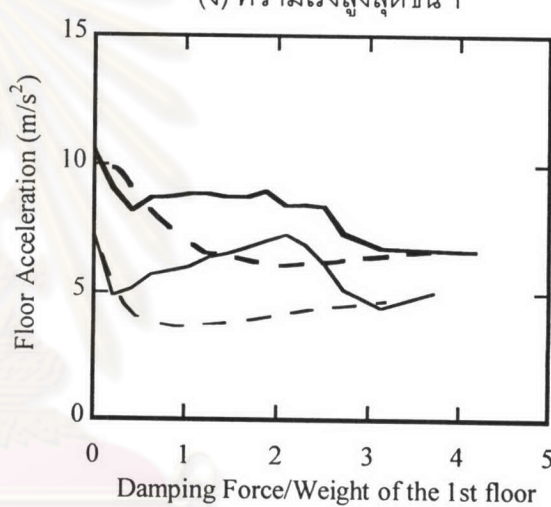
(ก) ระยะเคลื่อนที่สูงสุดชั้น 1



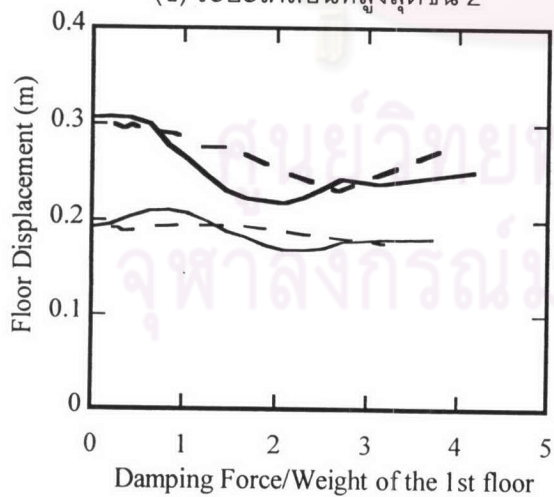
(ง) ความเร่งสูงสุดชั้น 1



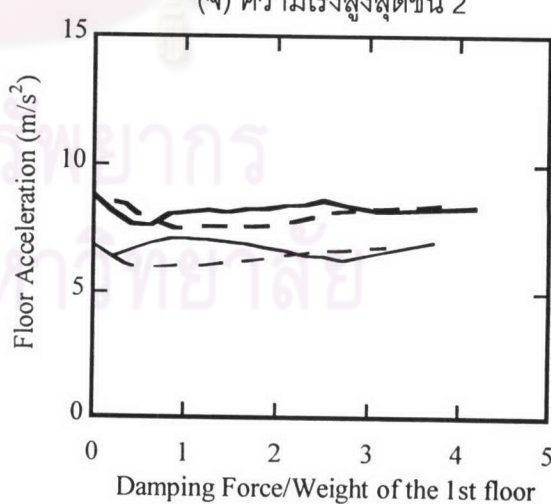
(ข) ระยะเคลื่อนที่สูงสุดชั้น 2



(จ) ความเร่งสูงสุดชั้น 2

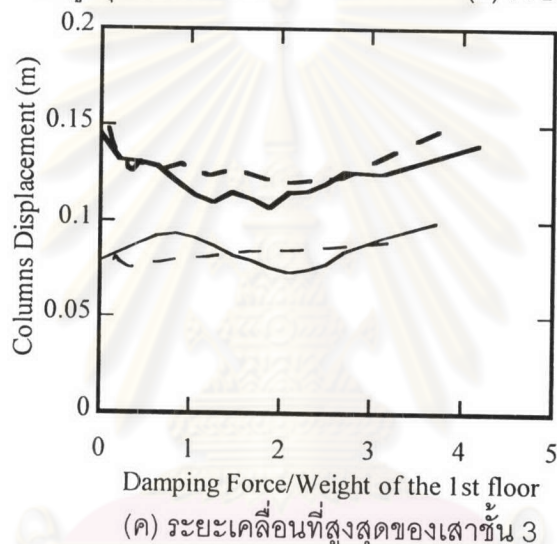
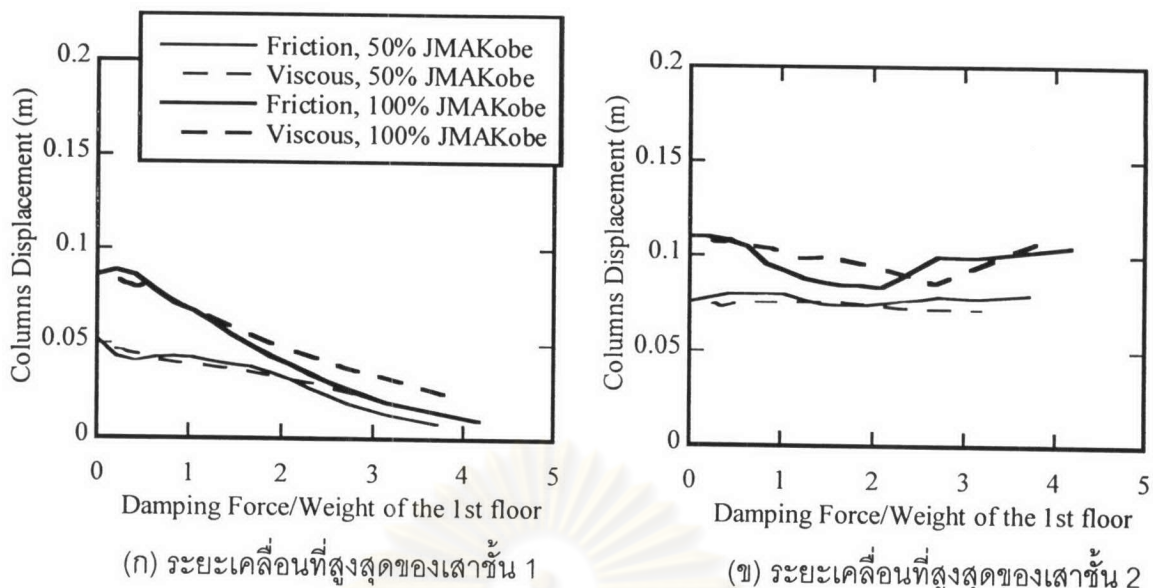


(ค) ระยะเคลื่อนที่สูงสุดชั้น 3

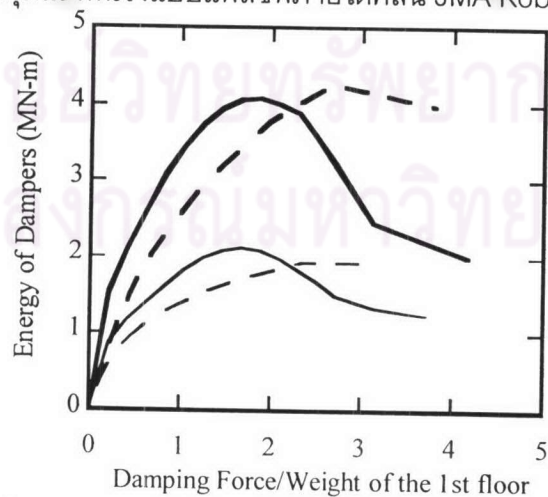


(ฉ) ความเร่งสูงสุดชั้น 3

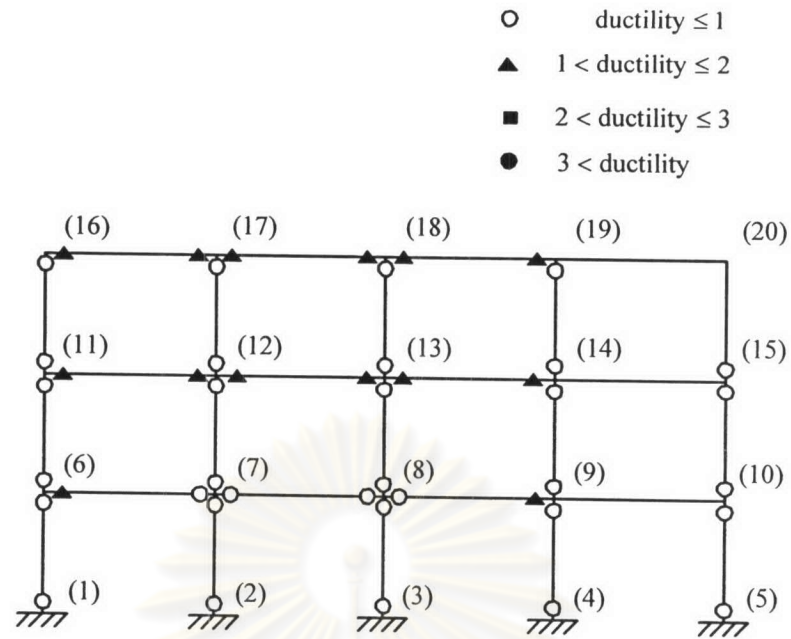
รูปที่ 5.19 ผลตอบสนองสูงสุดของชั้นต่างๆของอาคารกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบแพสซีฟภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้มต่างๆ



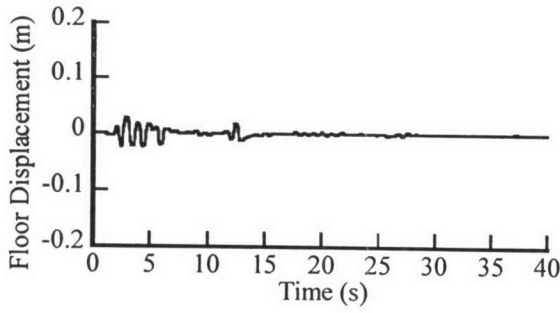
รูปที่ 5.20 ระยะเวลาเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้นต่างๆกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบแพสซีฟภายใต้คลื่น JMA Kobe ระดับความเข้มต่างๆ



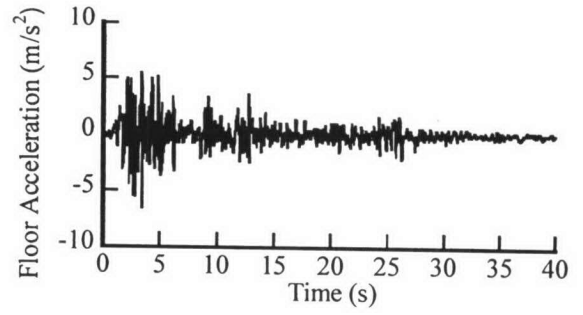
รูปที่ 5.21 พลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุดกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบแพสซีฟภายใต้คลื่น JMA Kobe ระดับความเข้มต่างๆ



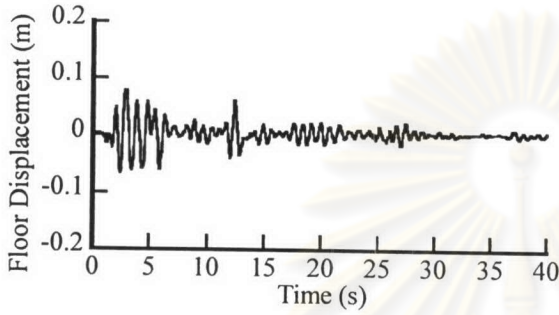
รูปที่ 5.22 ค่าความเหนียวเชิงความโค้งที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานที่มีค่าแรงเสียดทาน 6 MN ภายใต้คลื่น El Centro ขนาด 1.5 เท่าของจริง



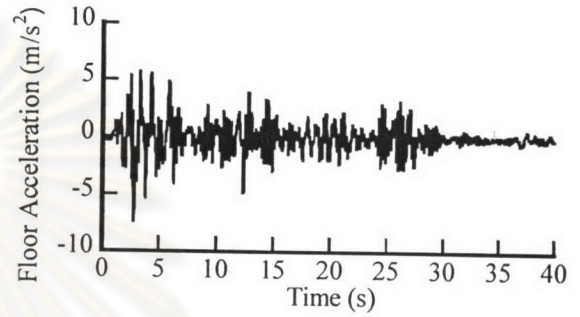
(ก) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของชั้น 1



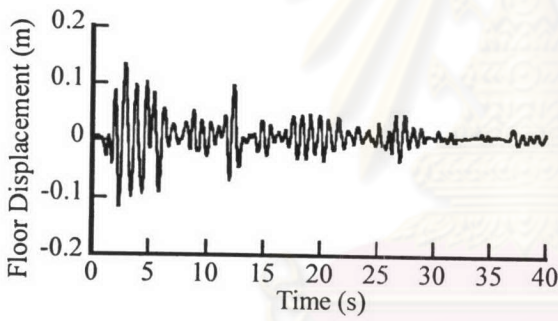
(ง) ความเร่งของชั้น 1



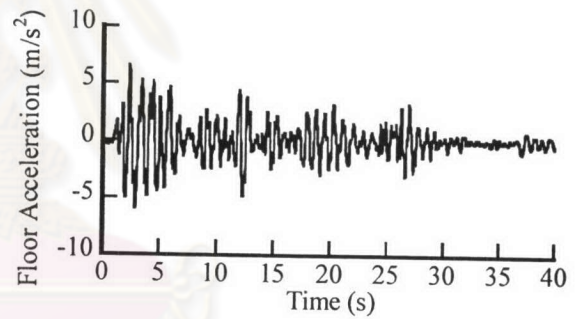
(ข) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของชั้น 2



(จ) ความเร่งของชั้น 2

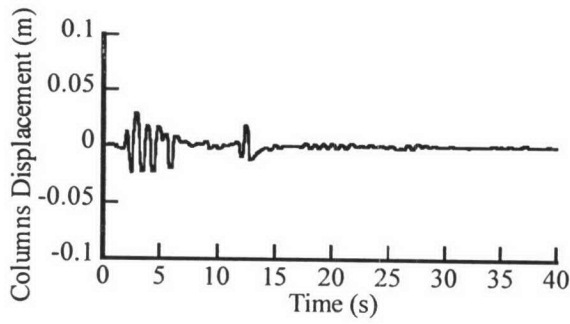


(ค) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของชั้น 3

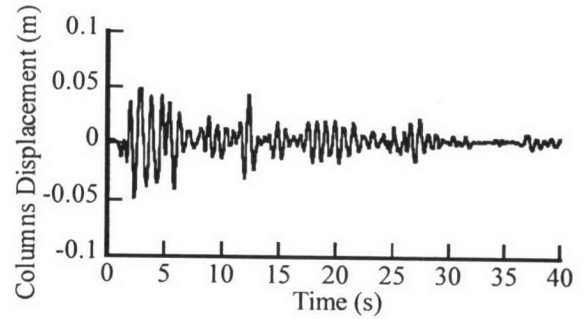


(ฉ) ความเร่งของชั้น 3

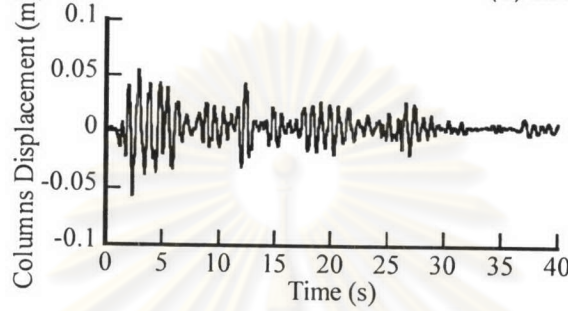
รูปที่ 5.23 ผลตอบสนองของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานที่มีค่าแรงเสียดทาน 6 MN ภายใต้คลื่น El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง



(ก) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้น 1

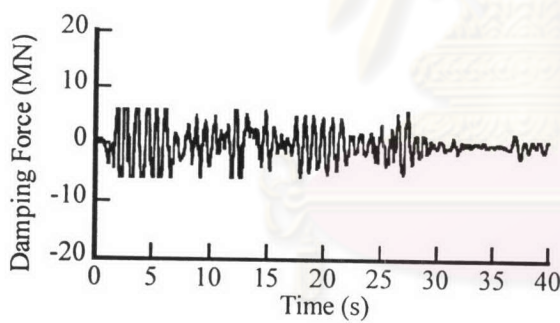


(ข) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้น 2

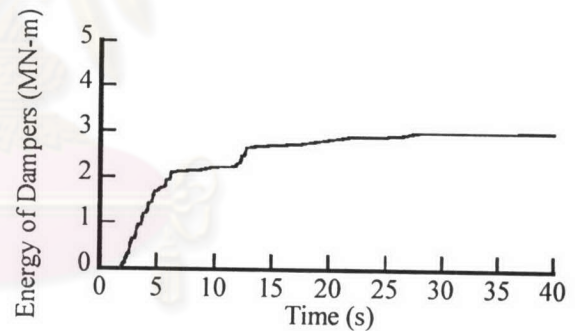


(ค) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้น 3

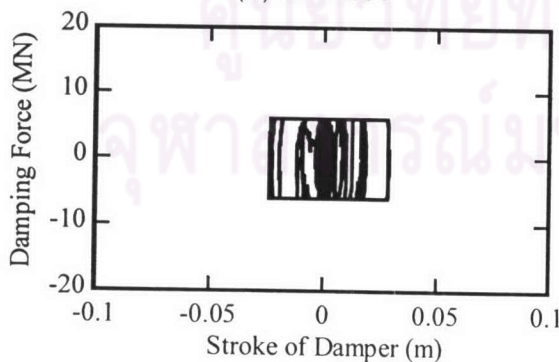
รูปที่ 5.24 ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานที่มีค่าแรงเสียดทาน 6 MN ภายใต้คลื่น El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง



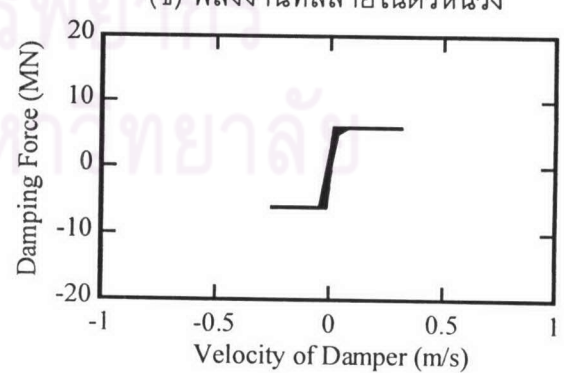
(ก) แรงหน่วง



(ข) พลังงานที่สลายในตัวหน่วง

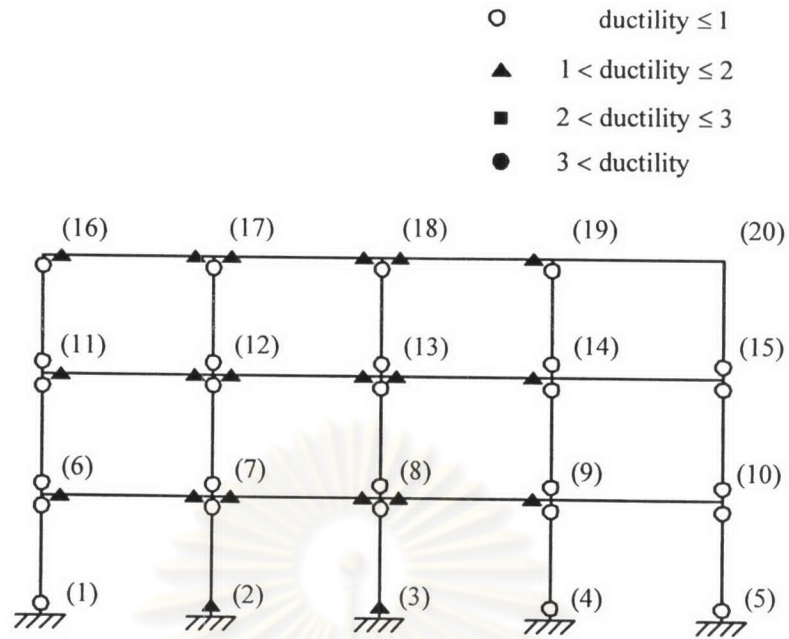


(ค) แรงหน่วงกับระยะเวลาเคลื่อนที่ของตัวหน่วง



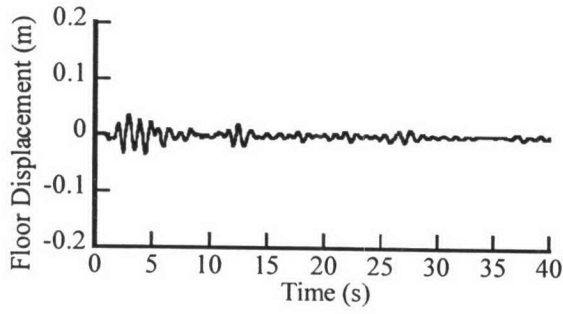
(ง) แรงหน่วงกับความเร็วของตัวหน่วง

รูปที่ 5.25 ผลตอบสนองของตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานที่มีค่าแรงเสียดทาน 6 MN ภายใต้คลื่น El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง

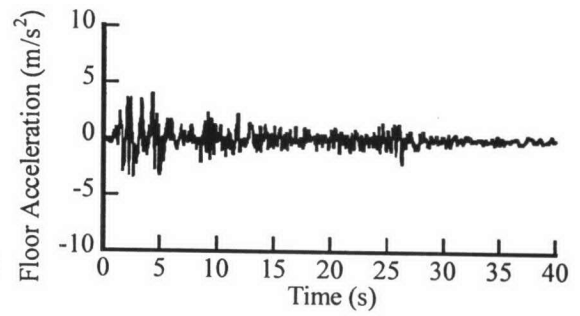


รูปที่ 5.26 ค่าความเหนียวเชิงความโค้งที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนืดที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 30 MN-s/m ภายใต้คลื่น El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง

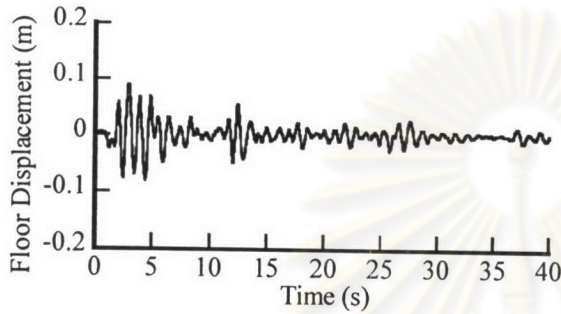
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



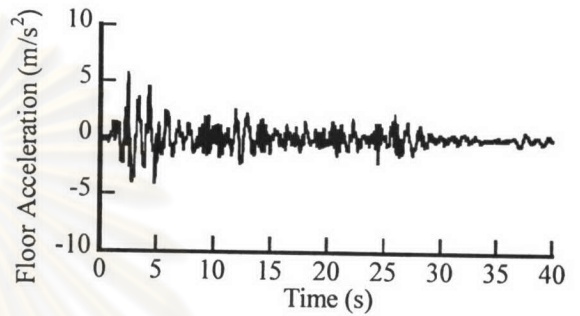
(ก) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของชั้น 1



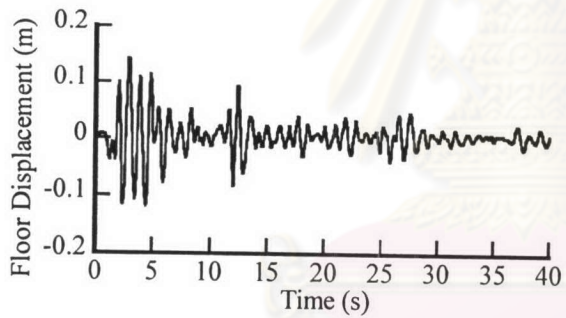
(ง) ความเร่งของชั้น 1



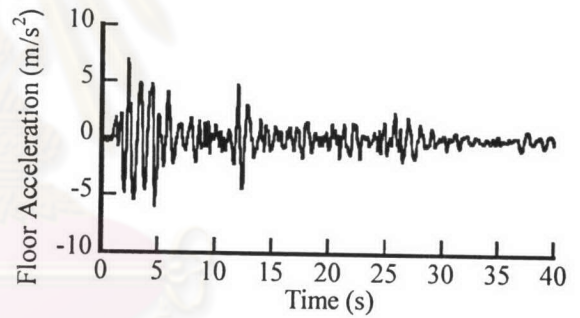
(ข) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของชั้น 2



(จ) ความเร่งของชั้น 2

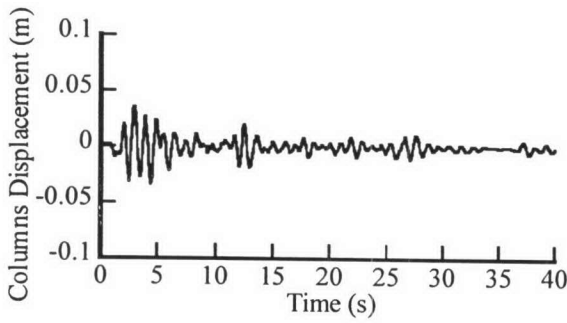


(ค) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของชั้น 3

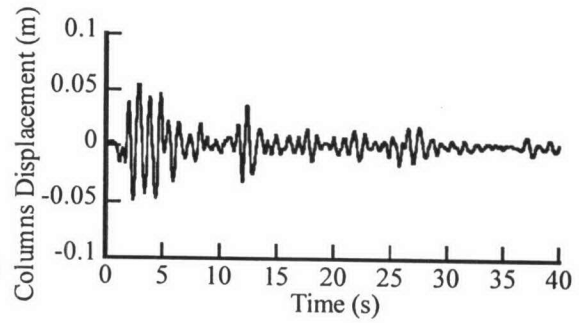


(ฉ) ความเร่งของชั้น 3

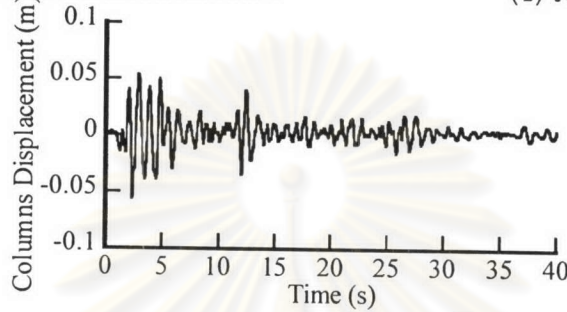
รูปที่ 5.27 ผลตอบสนองของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 30 MN-s/m ภายใต้คลื่น El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง



(ก) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้น 1

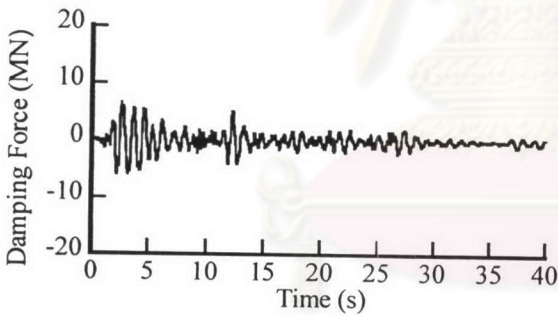


(ข) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้น 2

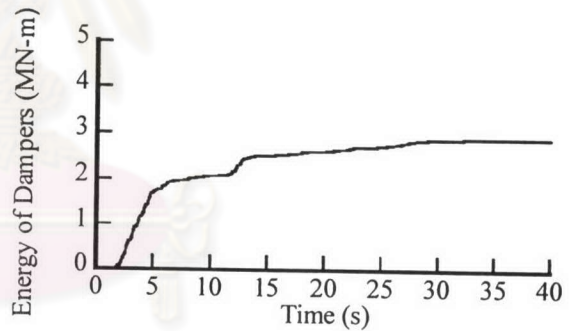


(ค) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้น 3

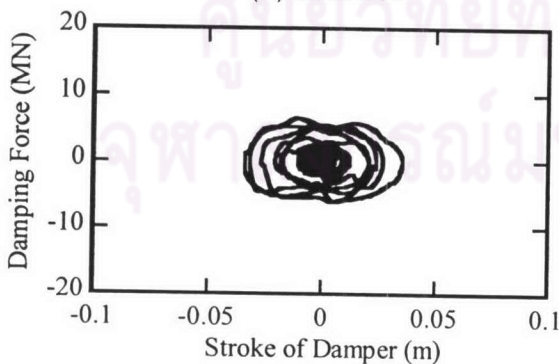
รูปที่ 5.28 ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบชนิดที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 30 MN-s/m ภายใต้คลื่น El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง



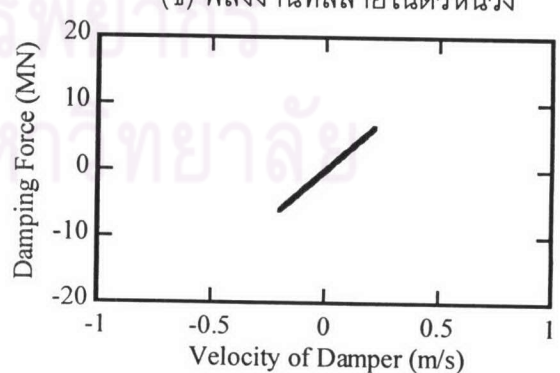
(ก) แรงหน่วง



(ข) พลังงานที่สลายในตัวหน่วง

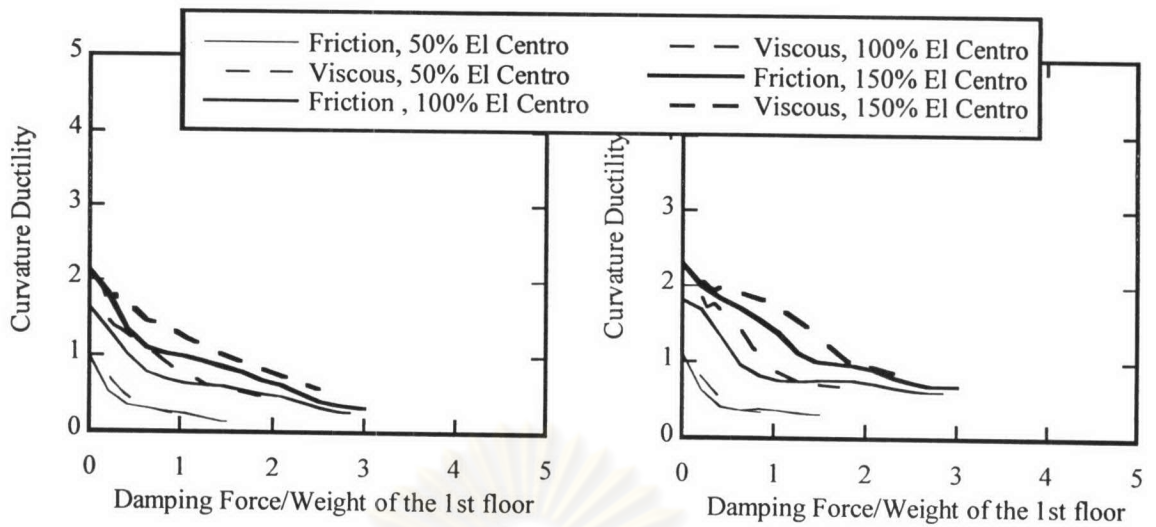


(ค) แรงหน่วงกับระยะเวลาเคลื่อนที่ของตัวหน่วง

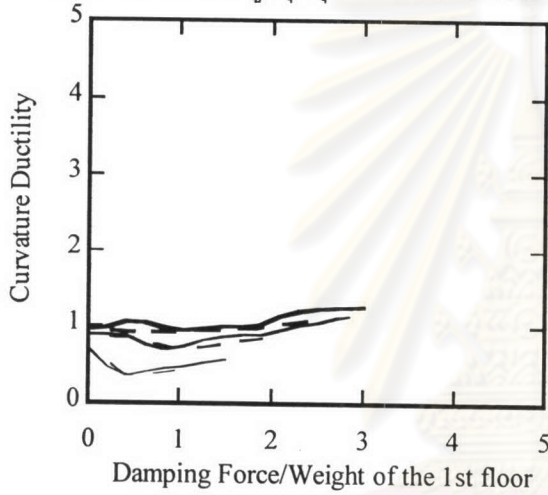


(ง) แรงหน่วงกับความเร็วของตัวหน่วง

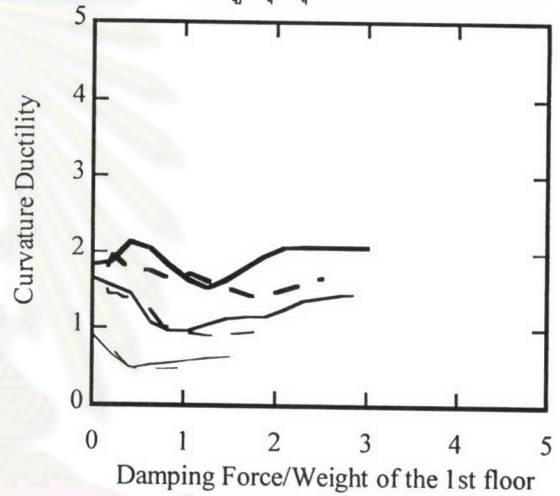
รูปที่ 5.29 ผลตอบสนองของตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบชนิดที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 30 MN-s/m ภายใต้คลื่น El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง



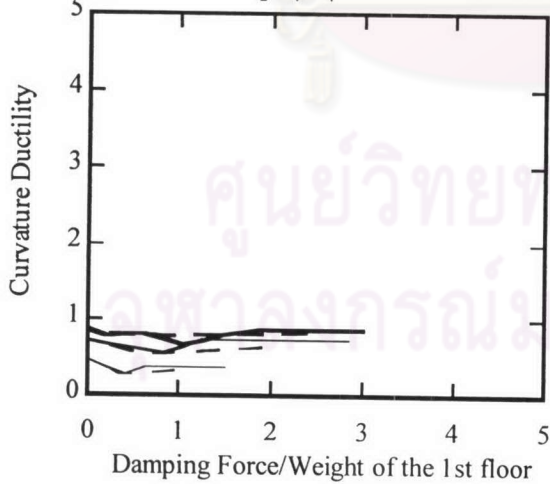
(ก) ความเหนียวสูงสุดจุดต่อ 2 ของเสาชั้น 1



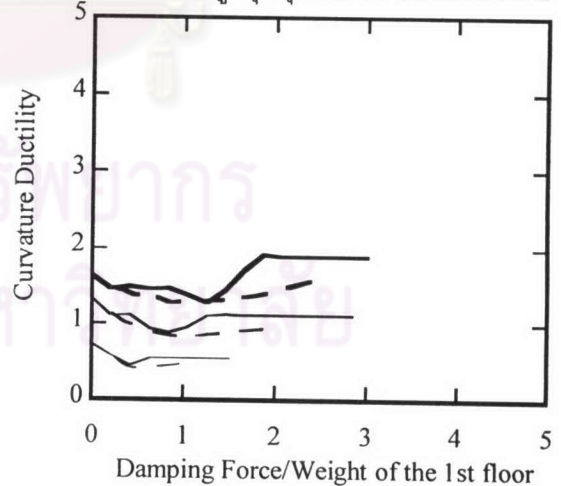
(ง) ความเหนียวสูงสุดจุดต่อ 6 ของคานชั้น 1



(ข) ความเหนียวสูงสุดจุดต่อ 7 ของเสาชั้น 2



(จ) ความเหนียวสูงสุดจุดต่อ 11 ของคานชั้น 2

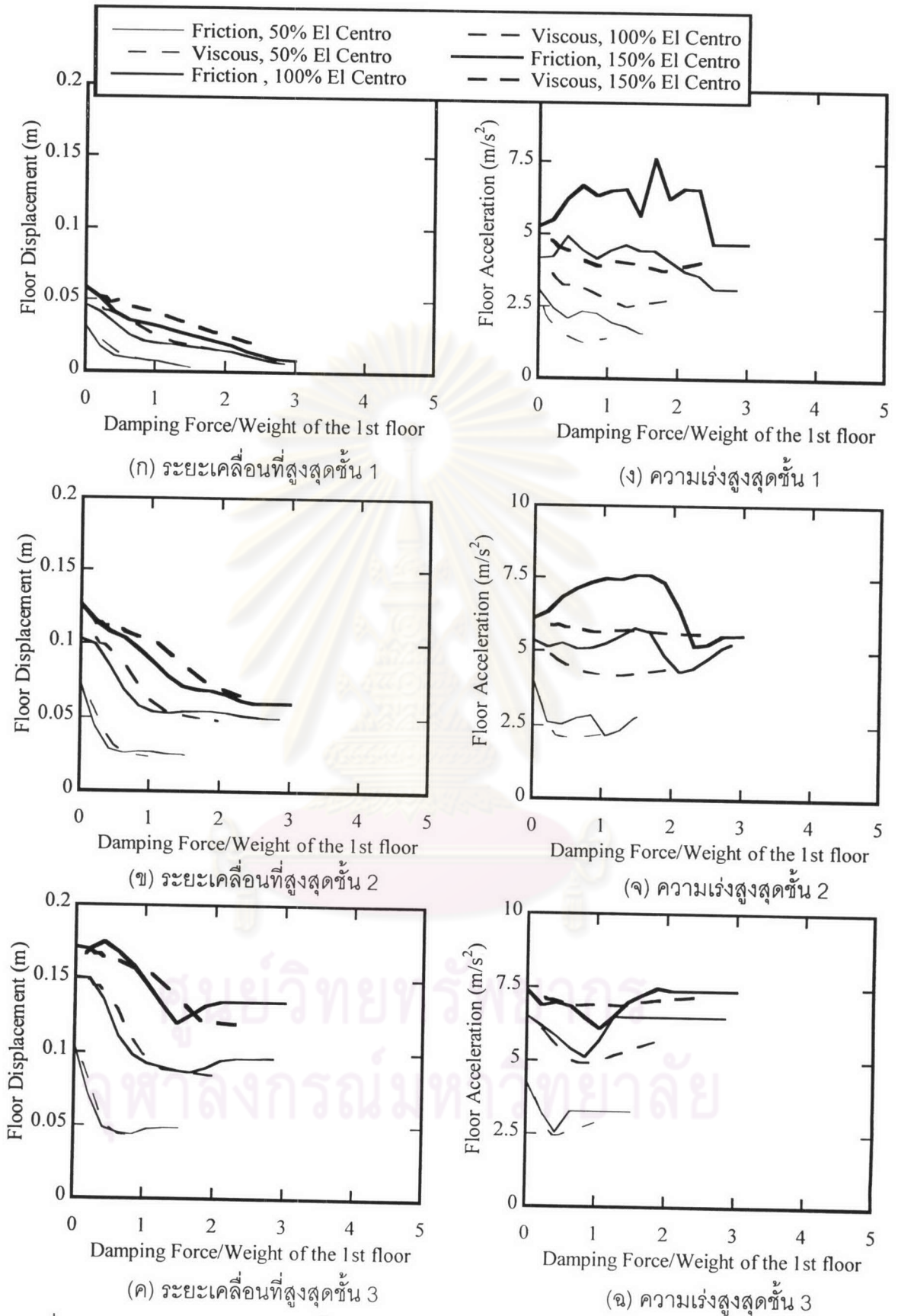


(ค) ความเหนียวสูงสุดจุดต่อ 12 ของเสาชั้น 3

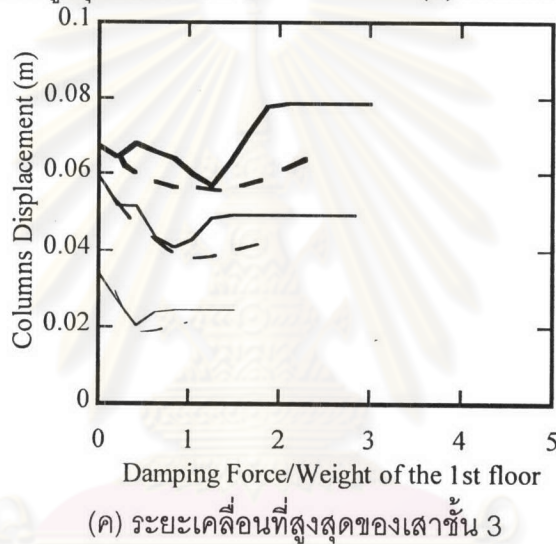
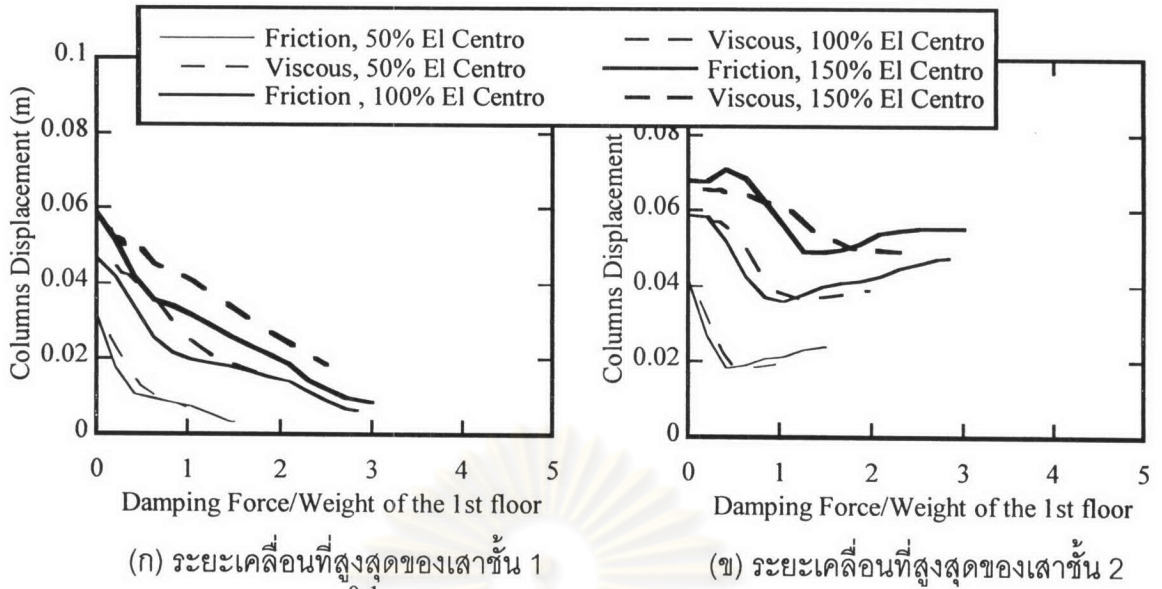
รูปที่ 5.30 ความเหนียวเชิงความโค้งสูงสุดที่ปลายของชิ้นส่วนโครงสร้างกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบพลาสติกภายใต้คลื่น El Centro ที่ระดับ

(ด) ความเหนียวสูงสุดจุดต่อ 16 ของคานชั้น 3

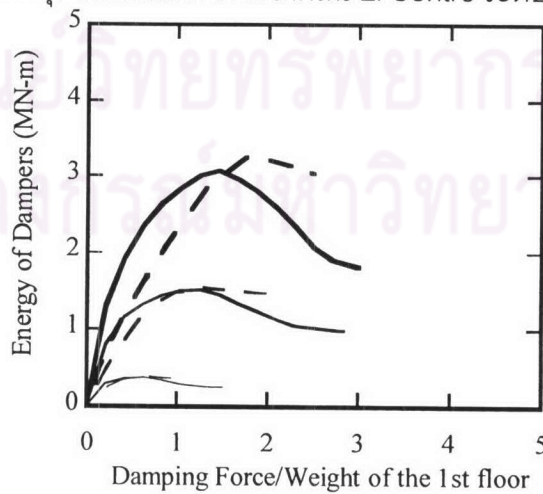
ความเข้มต่างๆ



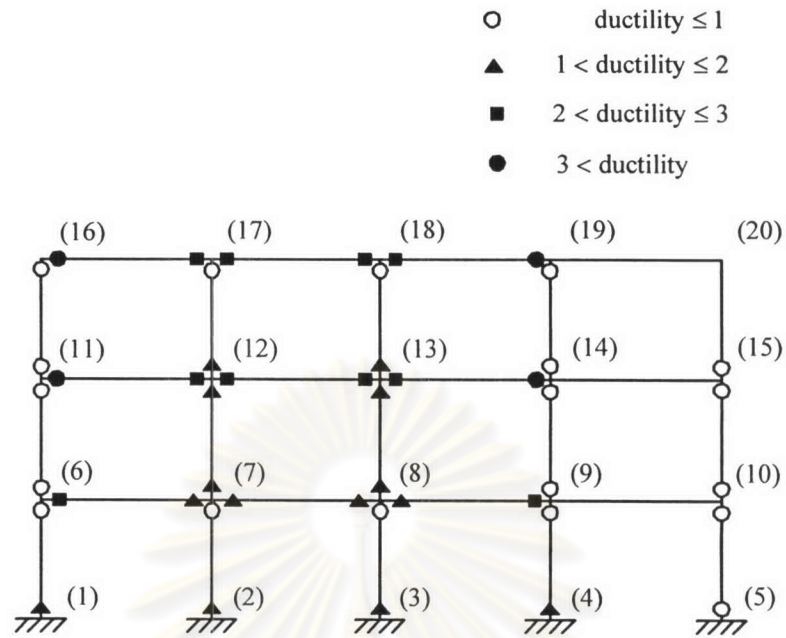
รูปที่ 5.31 ผลตอบสนองสูงสุดของชั้นต่างๆของอาคารกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแบบแพสซีฟภายใต้คลื่น El Centro ที่ระดับความเข้มต่างๆ



รูปที่ 5.32 ระยะเวลาเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้นต่างๆกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแบบแพลซีฟภายใต้คลื่น El Centro ระดับความเข้มต่างๆ

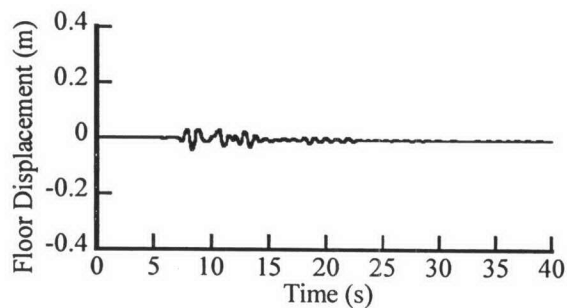


รูปที่ 5.33 พลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุดกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแบบแพลซีฟภายใต้คลื่น El Centro ระดับความเข้มต่างๆ

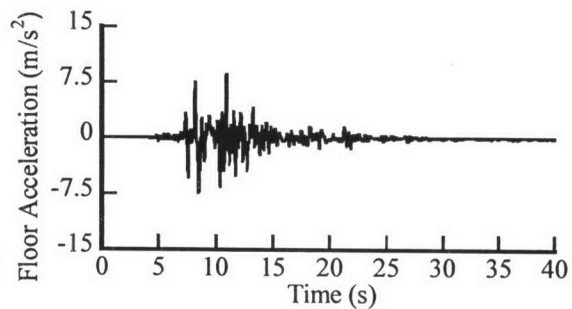


รูปที่ 5.34 ค่าความเหนียวเชิงความโค้งที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 50 MN-s/m แรงเสียดทาน 9 MN ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ขนาดเท่าของจริง

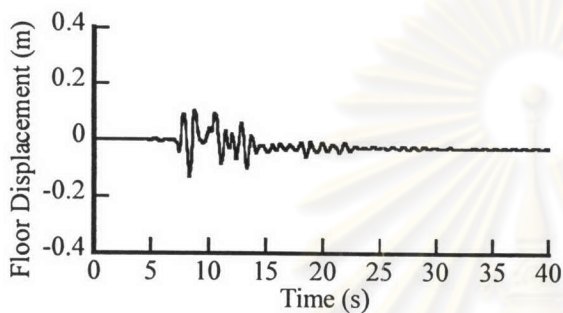
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



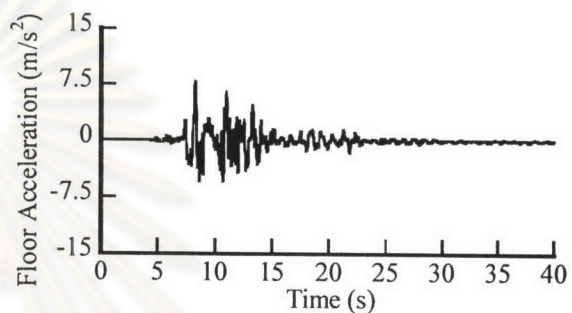
(ก) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของชั้น 1



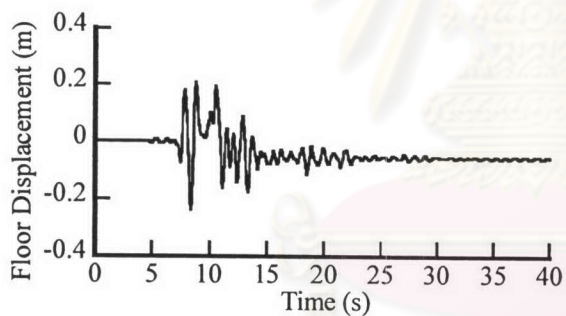
(ง) ความเร่งของชั้น 1



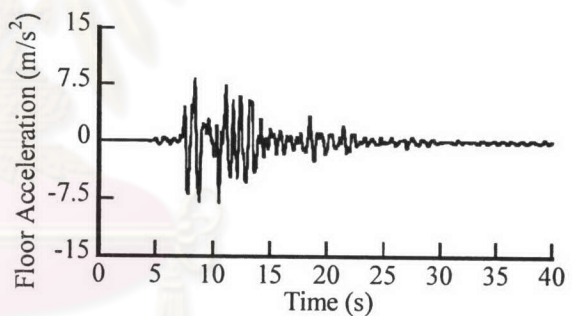
(ข) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของชั้น 2



(จ) ความเร่งของชั้น 2

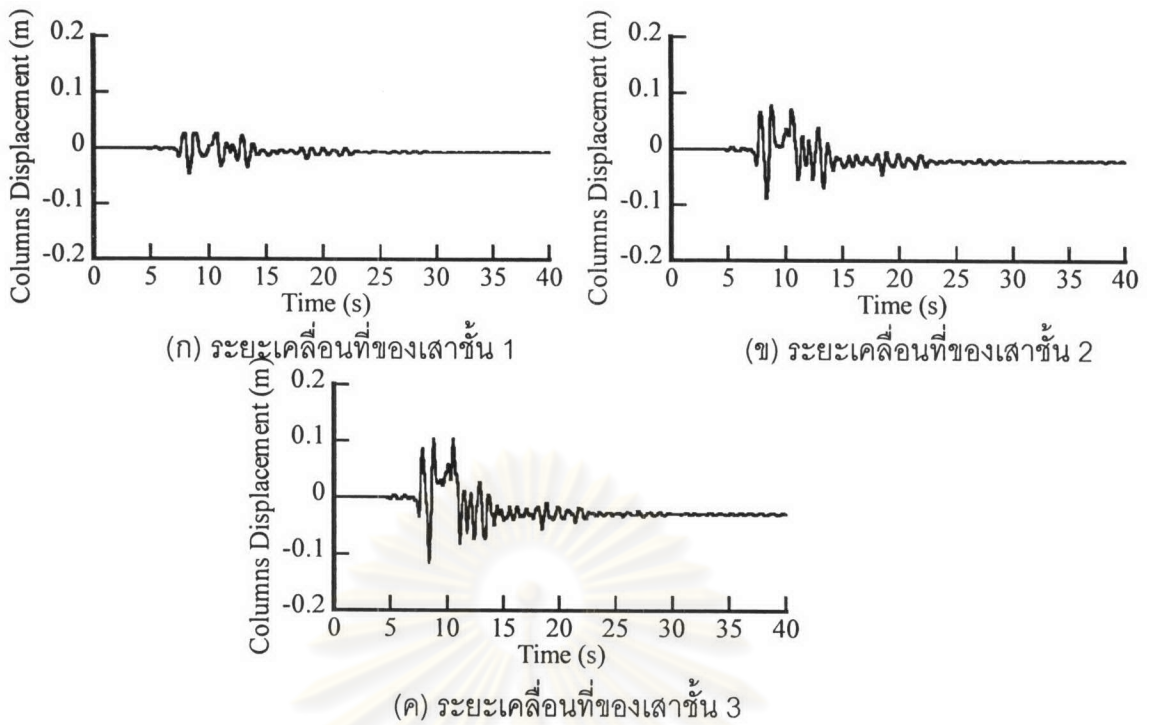


(ค) ระยะเวลาเคลื่อนที่ของชั้น 3

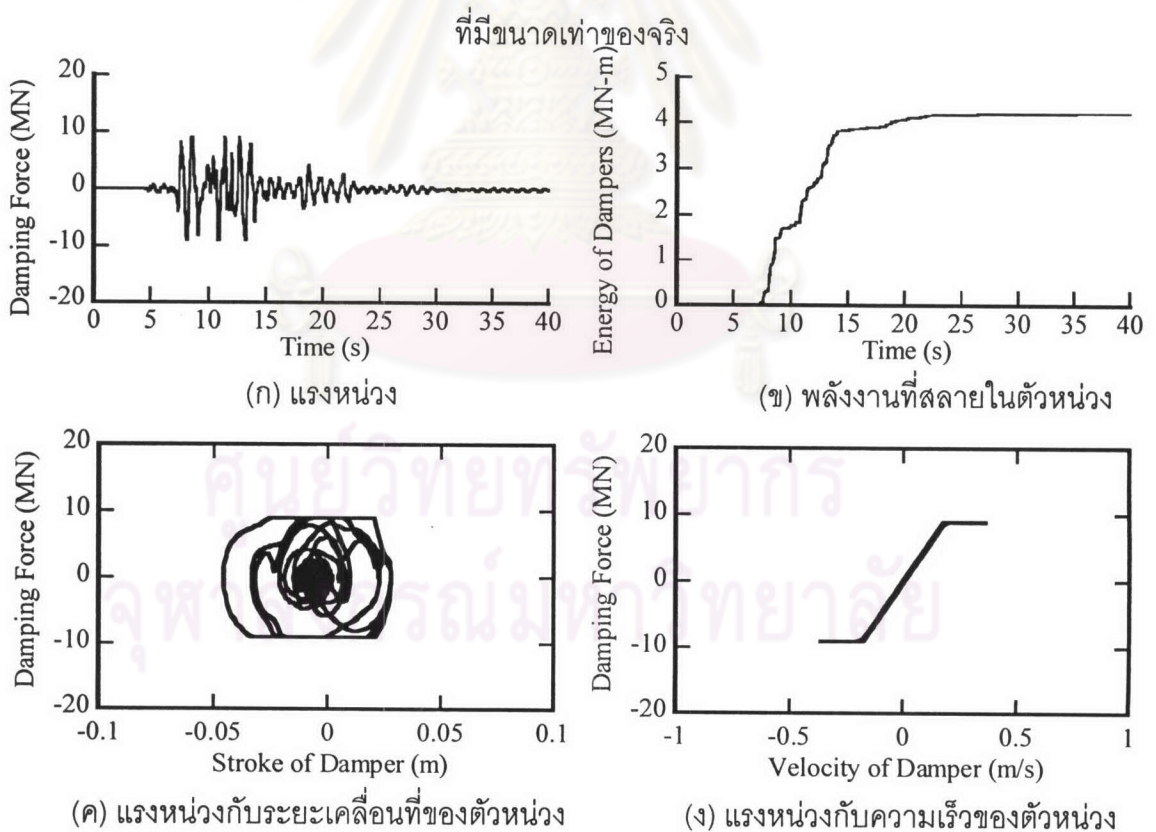


(ฉ) ความเร่งของชั้น 3

รูปที่ 5.35 ผลตอบสนองของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 50 MN-s/m แรงเสียดทาน 9 MN ภายใต้อคิลัน JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง

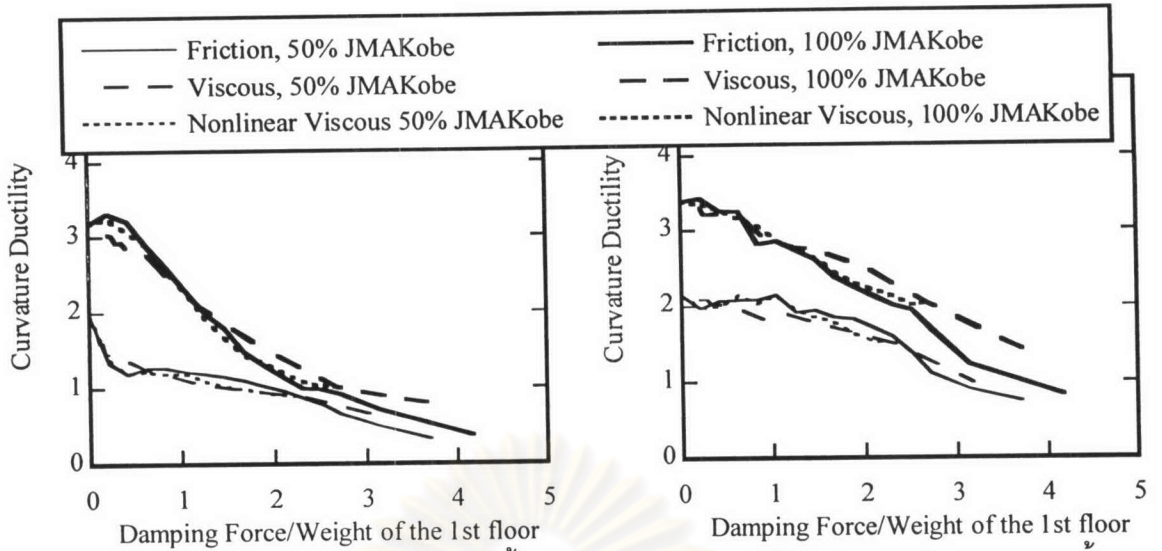


รูปที่ 5.36 ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นมีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 50 MN-s/m แรงเสียดทาน 9 MN ภายใต้คลื่น JMA Kobe



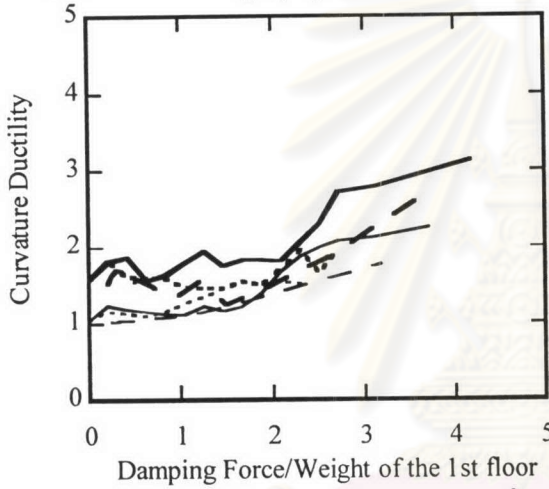
รูปที่ 5.37 ผลตอบสนองของตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นมีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 50 MN-s/m แรงเสียดทาน 9 MN ภายใต้คลื่น JMA Kobe

ที่มีขนาดเท่าของจริง

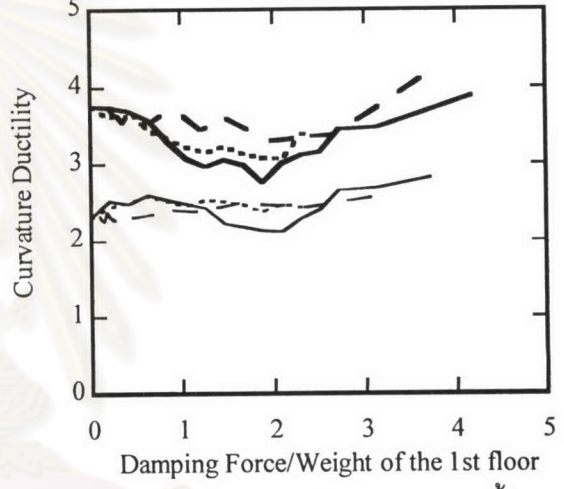


(ก) ความเหนียวสูงสุดจุดต่อ 2 ของเสาชั้น 1

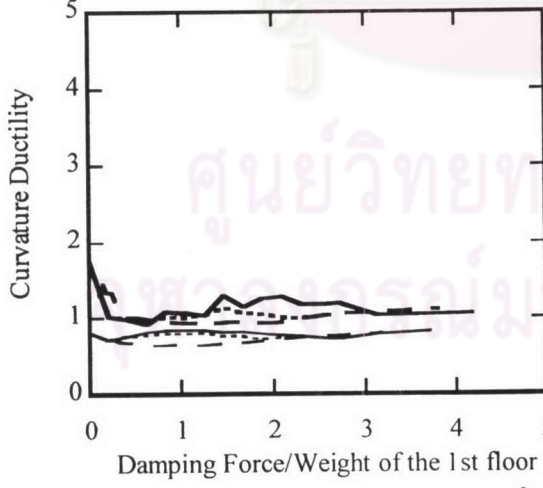
(ง) ความเหนียวสูงสุดจุดต่อ 6 ของคานชั้น 1



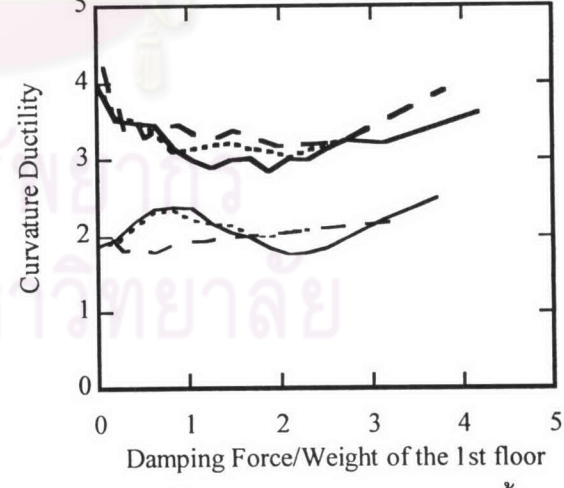
(ข) ความเหนียวสูงสุดจุดต่อ 7 ของเสาชั้น 2



(จ) ความเหนียวสูงสุดจุดต่อ 11 ของคานชั้น 2



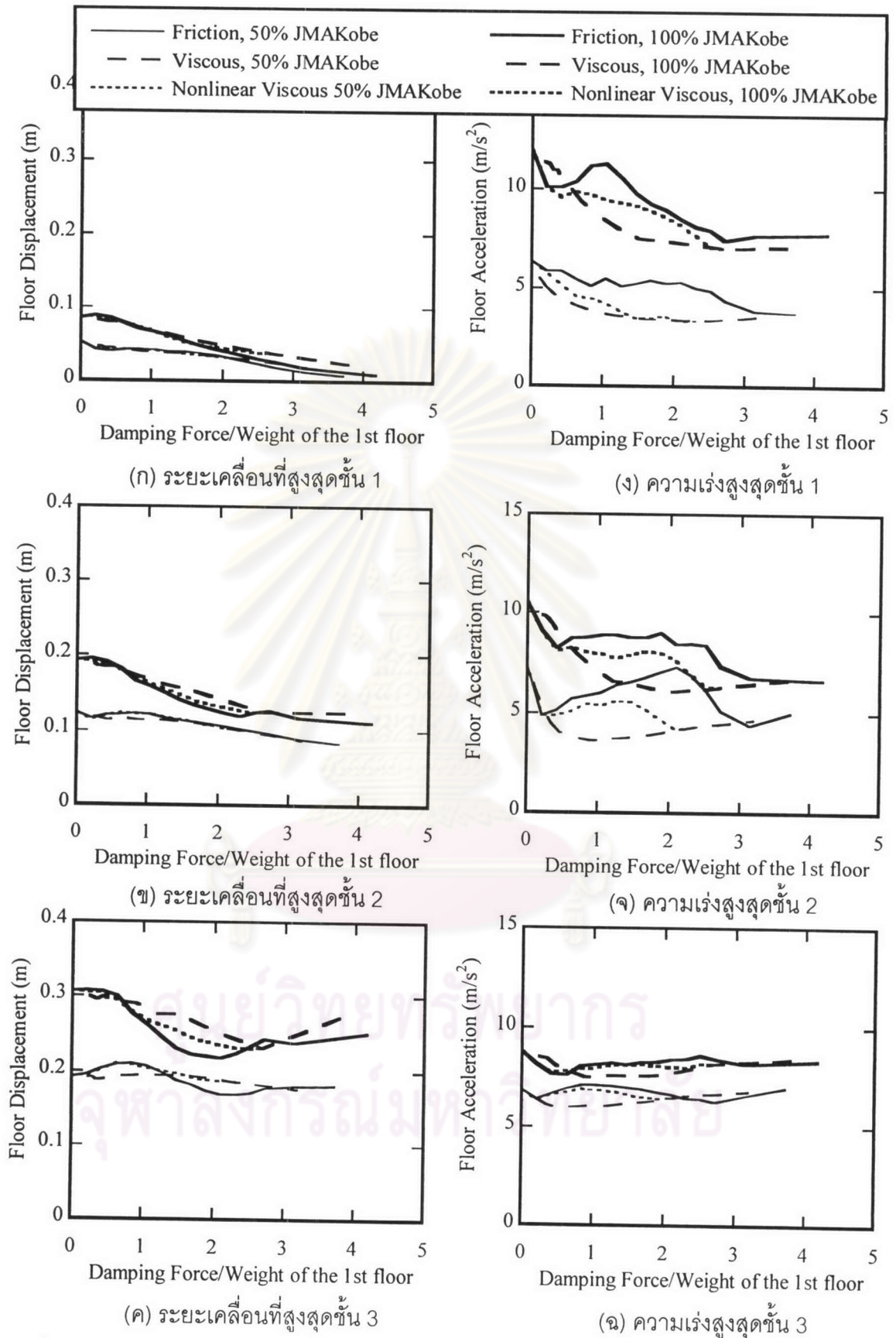
(ค) ความเหนียวสูงสุดจุดต่อ 12 ของเสาชั้น 3



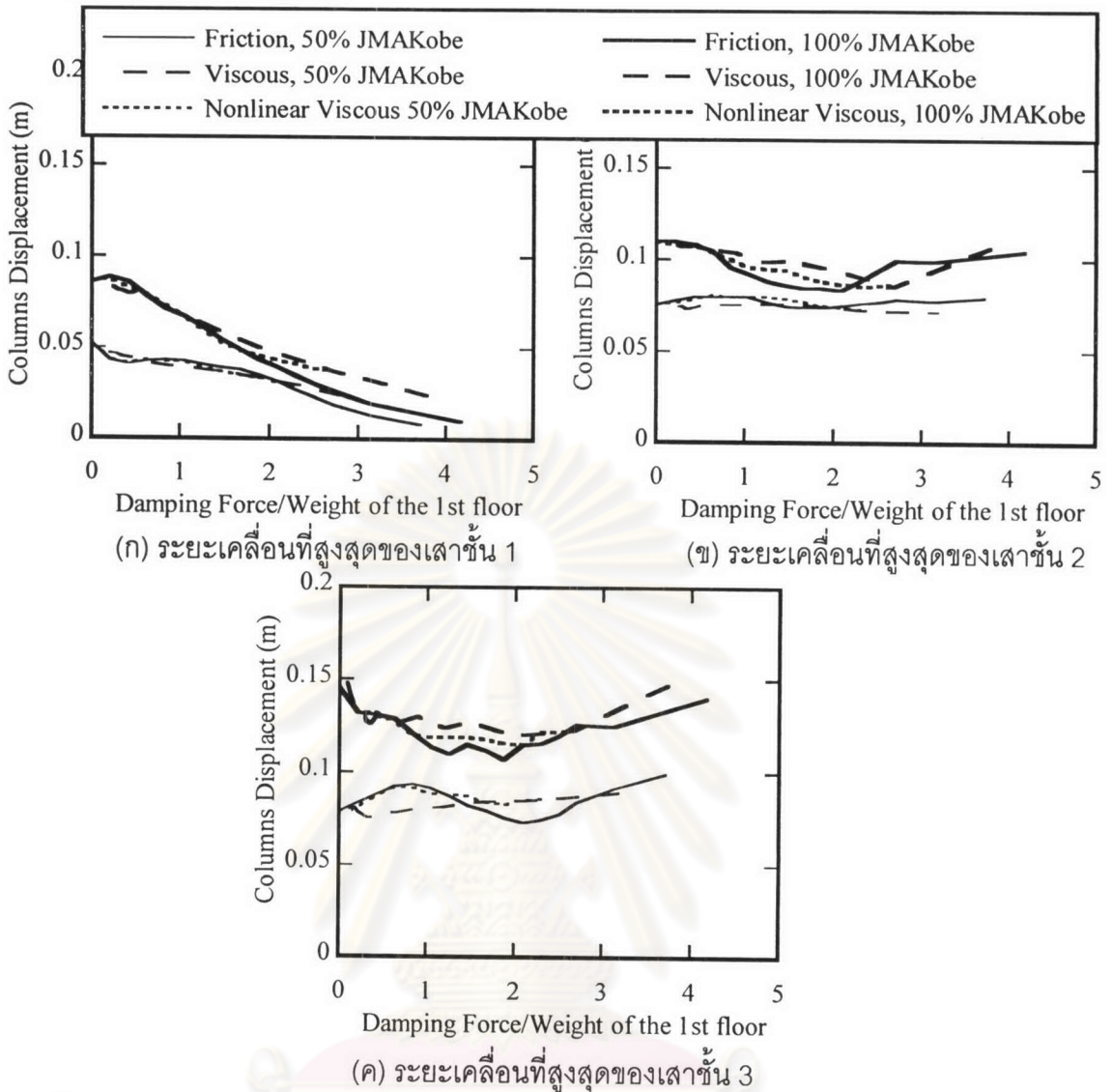
(ฉ) ความเหนียวสูงสุดจุดต่อ 16 ของคานชั้น 3

รูปที่ 5.38 ความเหนียวเชิงความโค้งสูงสุดที่ปลายของชิ้นส่วนโครงสร้างกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบต่างๆภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับ

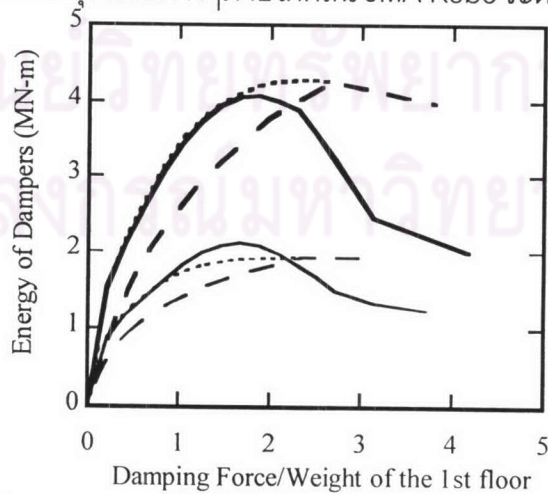
ความเข้มต่างๆ



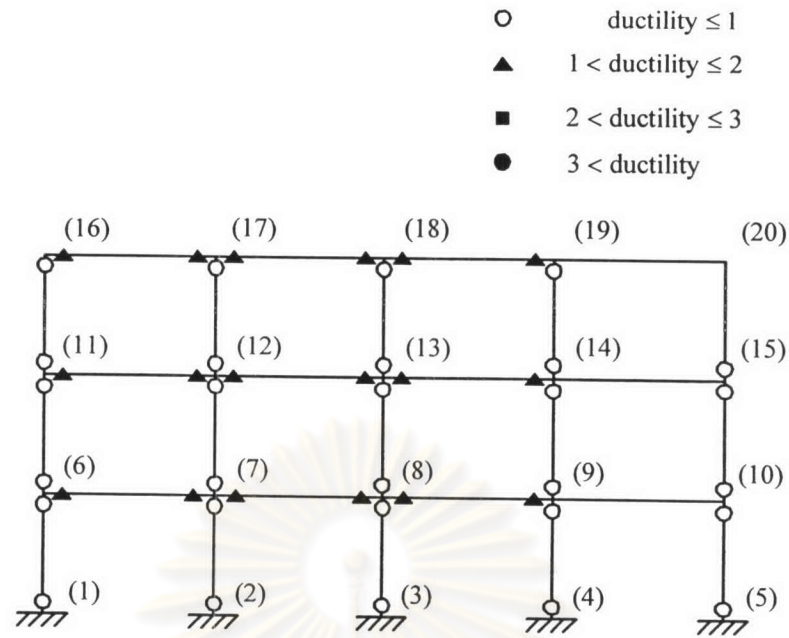
รูปที่ 5.39 ผลตอบสนองสูงสุดของชั้นต่างๆของอาคารกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบต่างๆภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้มต่างๆ



รูปที่ 5.40 ระยะเวลาเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้นต่างๆกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น JMA Kobe ระดับความเข้มต่างๆ

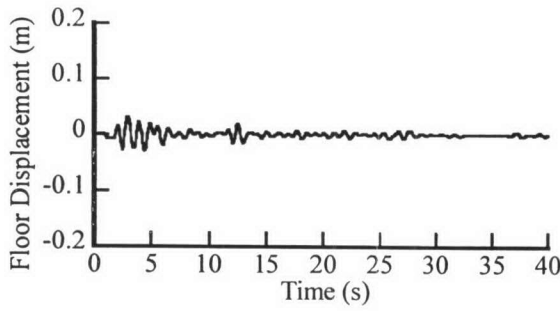


รูปที่ 5.41 พลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุดกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น JMA Kobe ระดับความเข้มต่างๆ

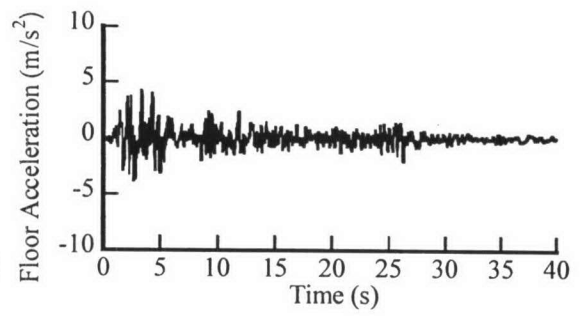


รูปที่ 5.42 ค่าความเหนียวเชิงความโค้งที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงท่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 50 MN-s/m แรงเสียดทาน 6 MN ภายได้คลื่น El Centro ขนาด 1.5 เท่าของจริง

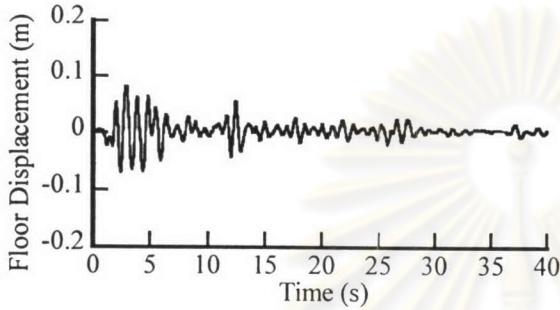
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



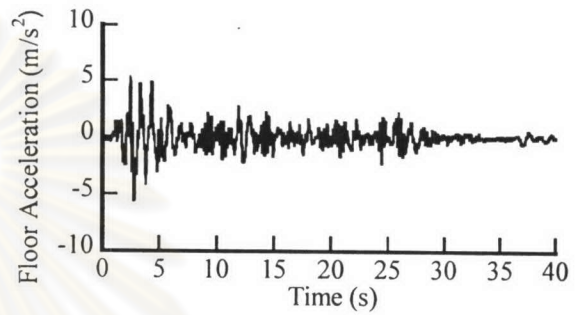
(ก) ระยะเคลื่อนที่ของชั้น 1



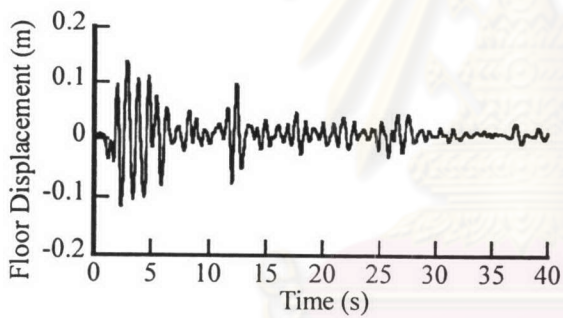
(ง) ความเร่งของชั้น 1



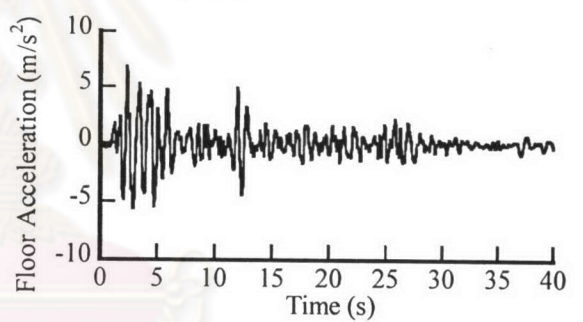
(ข) ระยะเคลื่อนที่ของชั้น 2



(จ) ความเร่งของชั้น 2

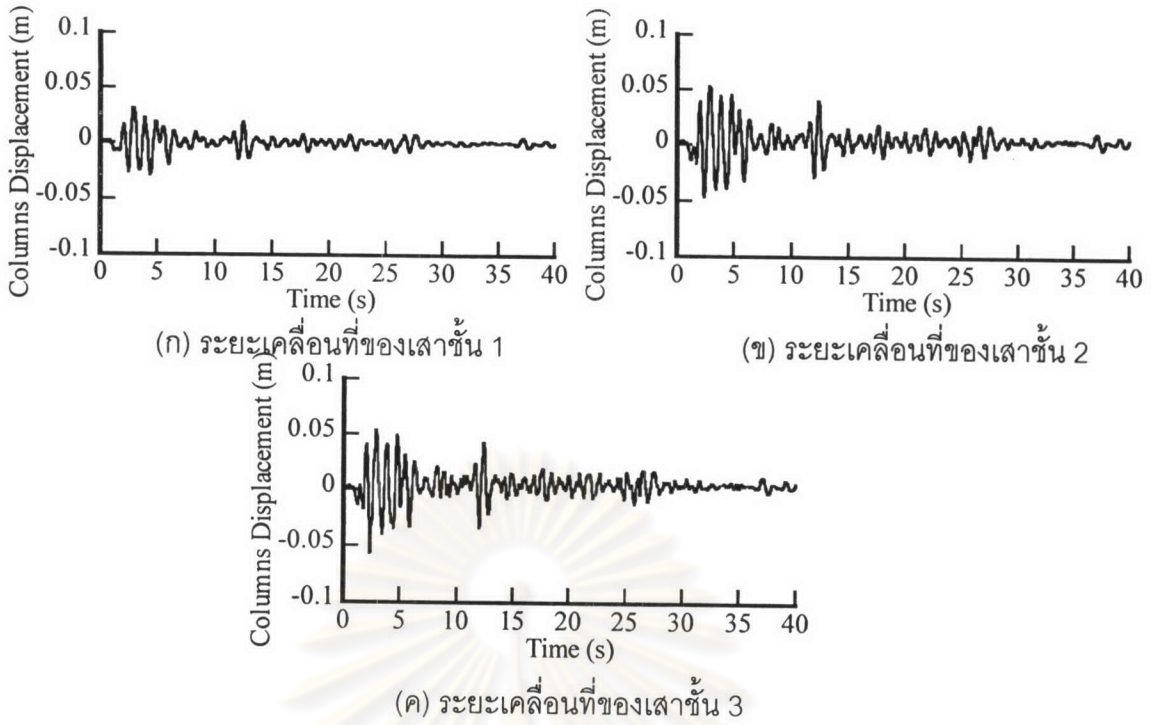


(ค) ระยะเคลื่อนที่ของชั้น 3



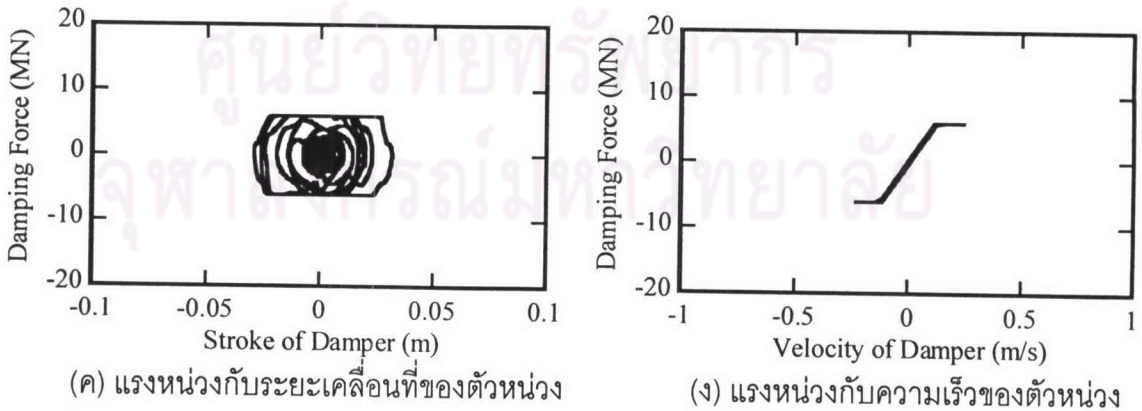
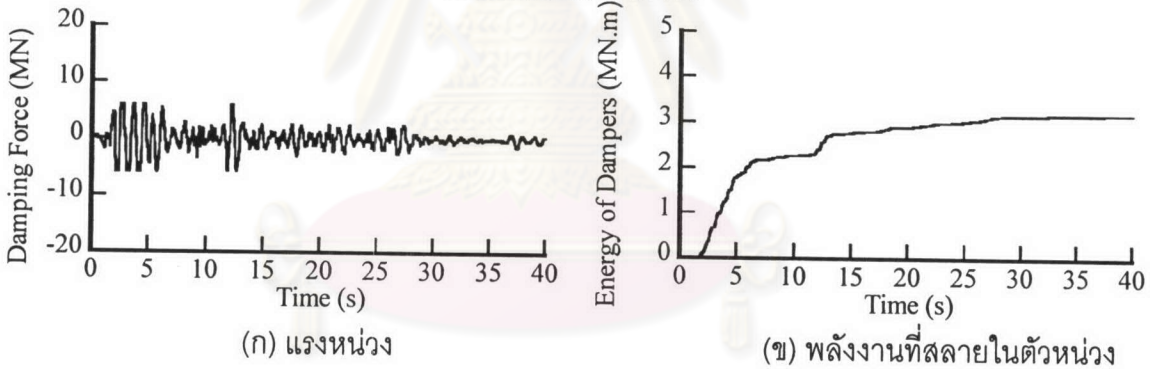
(ฉ) ความเร่งของชั้น 3

รูปที่ 5.43 ผลตอบสนองของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 50 MN-s/m แรงเสียดทาน 6 MN ภายใต้คลื่น El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง



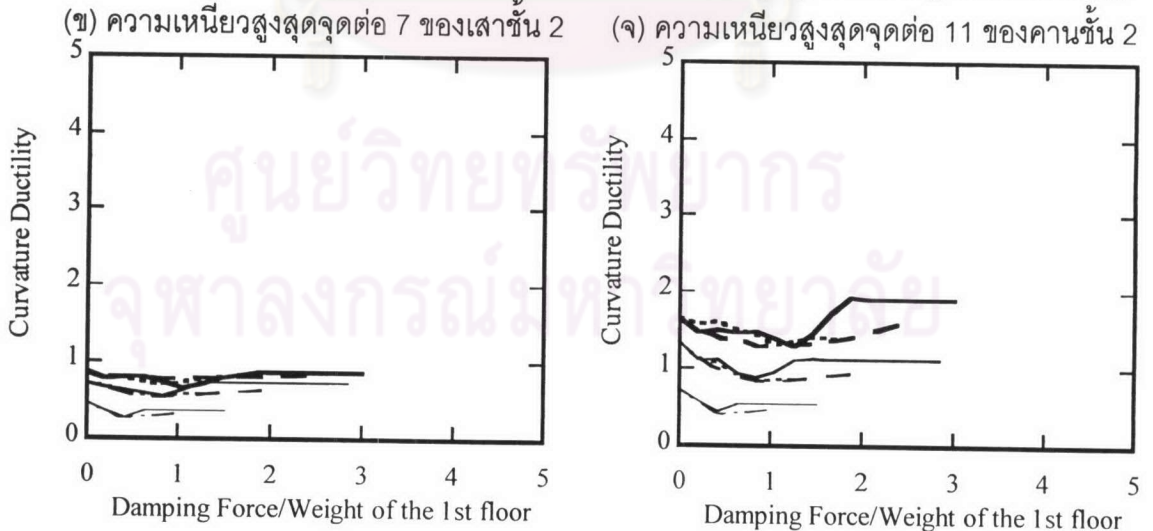
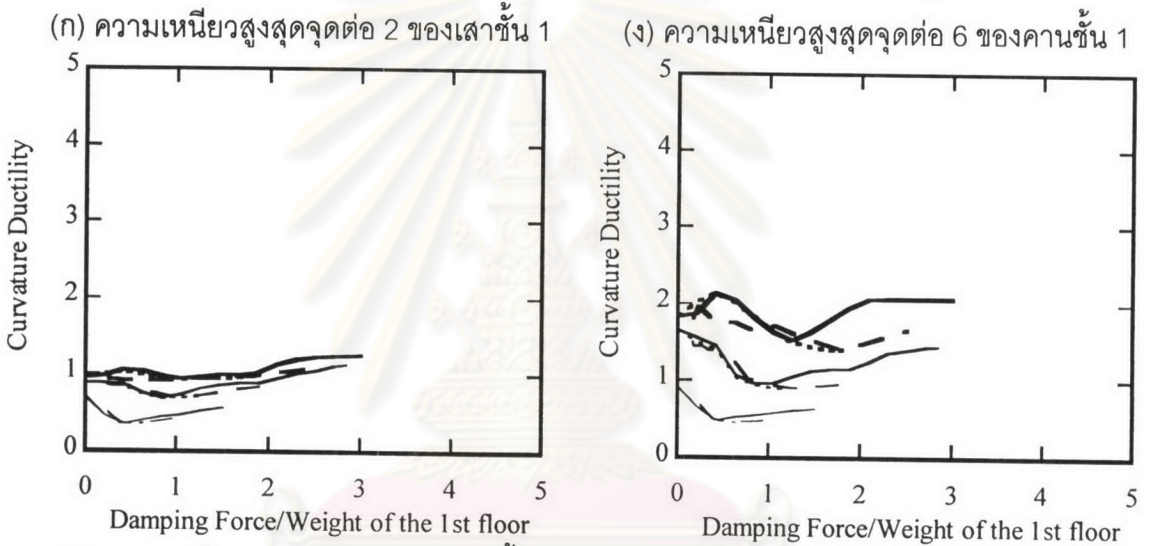
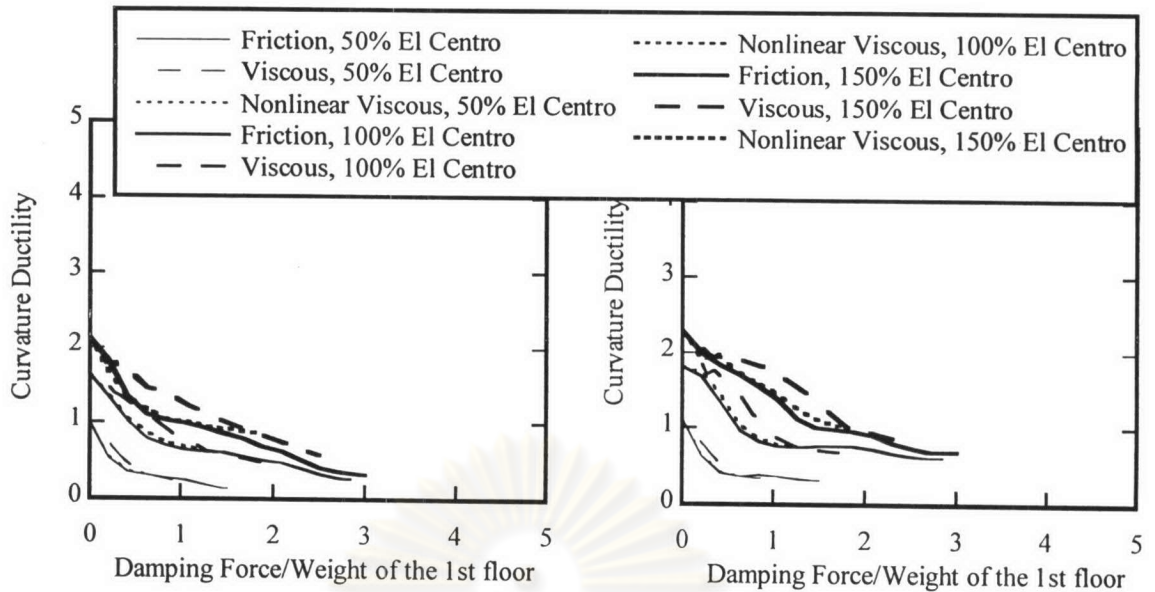
รูปที่ 5.44 ระยะเวลาเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 50 MN-s/m แรงเสียดทาน 6 MN ภายใต้คลื่น El Centro

ขนาด 1.5 เท่าของจริง

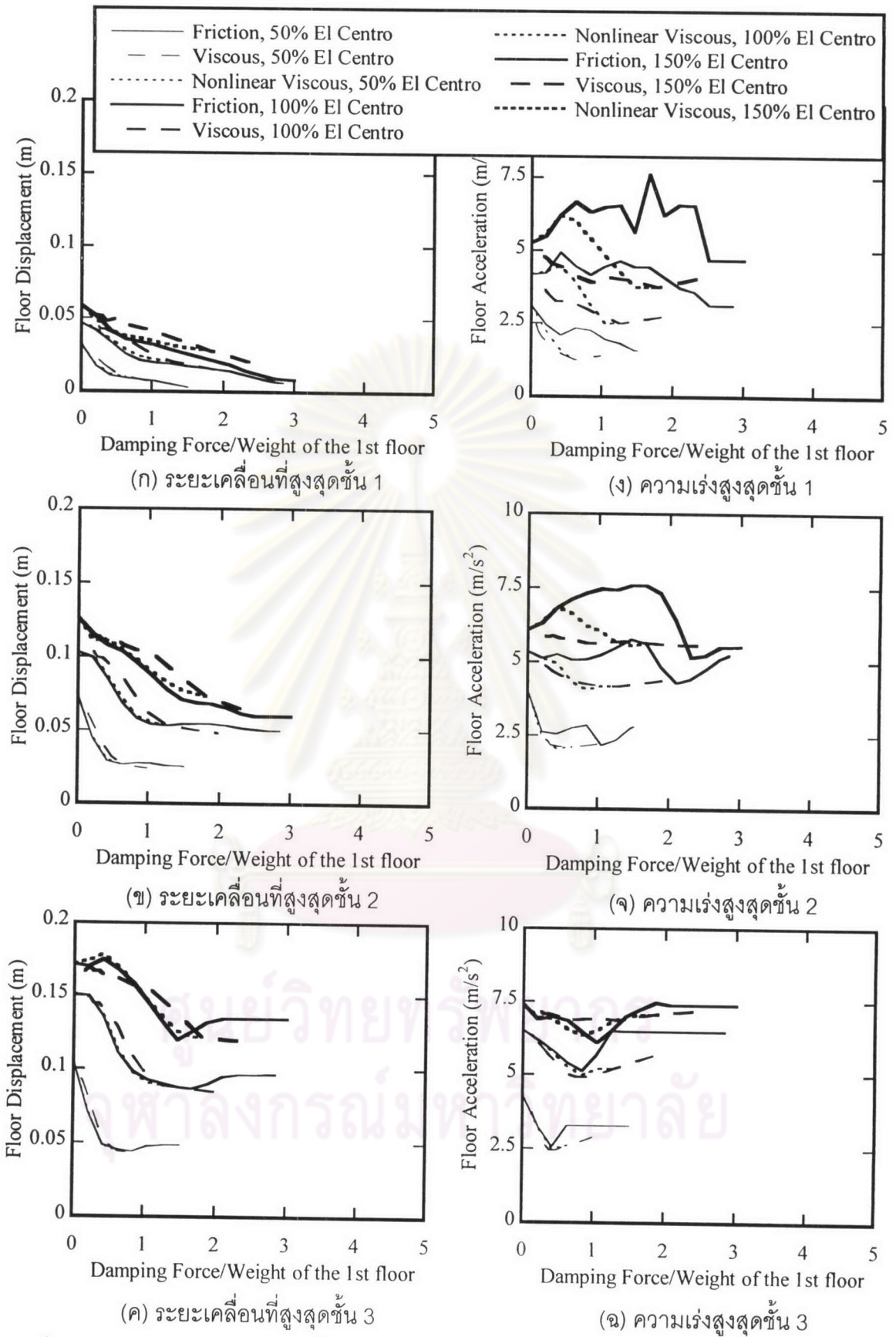


รูปที่ 5.45 ผลตอบสนองของตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 50 MN-s/m แรงเสียดทาน 6 MN ภายใต้คลื่น El Centro

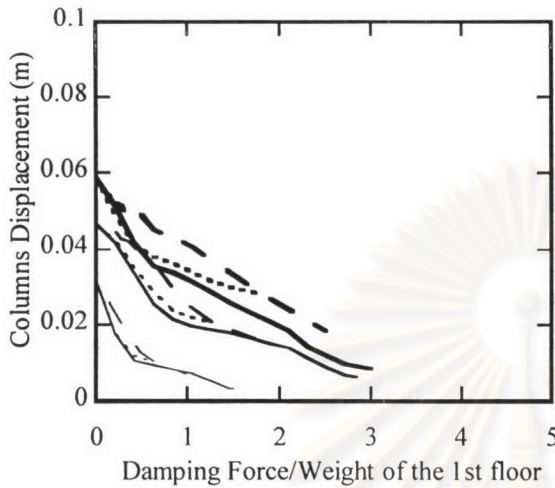
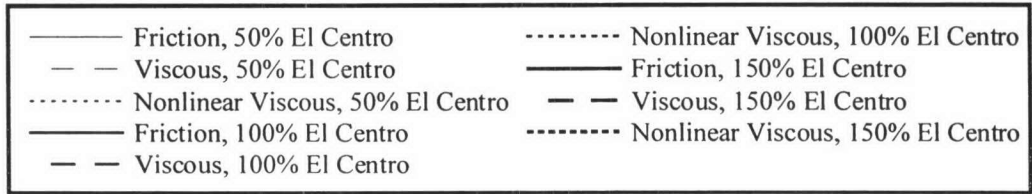
ขนาด 1.5 เท่าของจริง



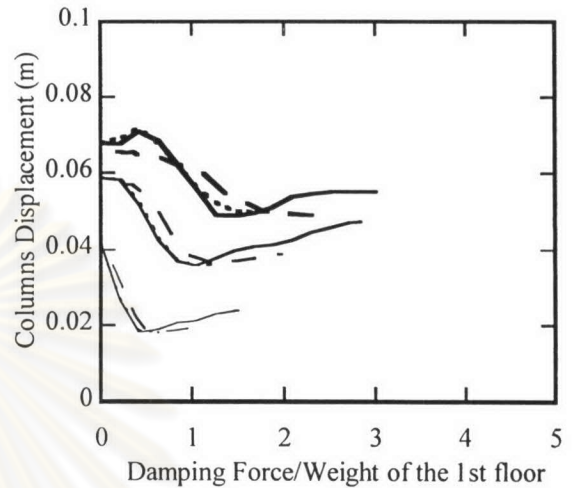
รูปที่ 5.46 ความเหนียวเชิงความโค้งสูงสุดที่ปลายของชิ้นส่วนโครงสร้างกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 มีรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น El Centro ระดับความเข้มต่างๆ



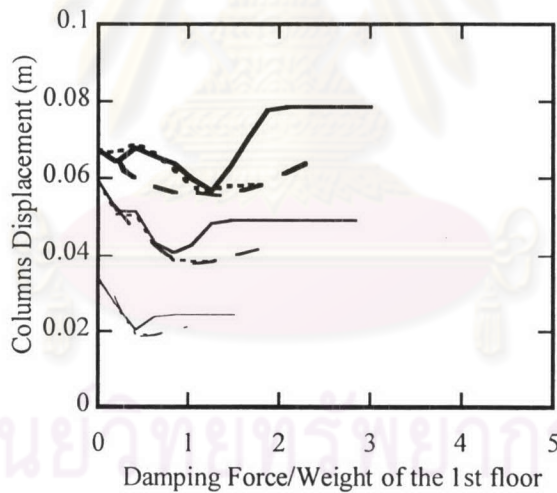
รูปที่ 5.47 ผลตอบสนองสูงสุดของชั้นต่างๆของอาคารกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น El Centro ที่ระดับความเข้มต่างๆ



(ก) ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 1

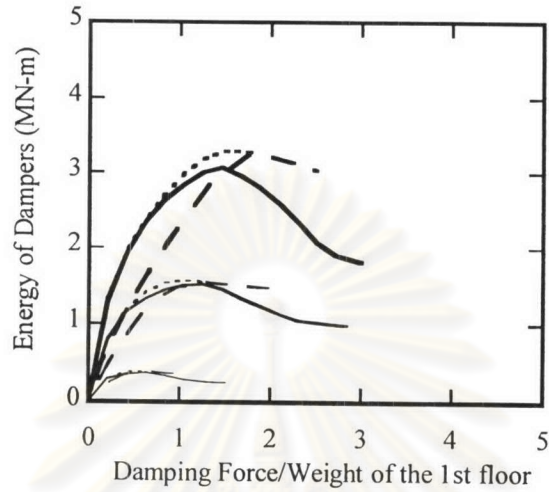
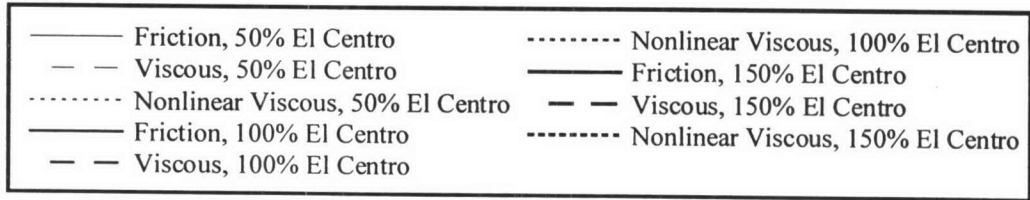


(ข) ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 2



(ค) ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้น 3

รูปที่ 5.48 ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้นต่างๆกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น El Centro ระดับความเข้มต่างๆ



รูปที่ 5.49 พลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุดกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น El Centro ระดับความเข้มต่างๆ