การควบคุมแบบเซมิแอคทีฟของผลตอบสนองไม่เชิงเส้นของอาคาร ด้วยตัวหน่วงปรับค่าได้

นายวีระสิทธิ์ ศรีสมัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5426-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SEMI-ACTIVE CONTROL OF NONLINEAR RESPONSE OF BUILDINGS BY VARIABLE DAMPERS

Mr.Weerasit Srisamai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of Master of Engineering in civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-5426-4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมแบบเซมิแอคทีฟของผลตอบสนองไม่เชิงเส้นของอาคารด้วยตัวหน่วงปรับค่าได้
โดย	นายวีระสิทธิ์ ศรีสมัย
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัศมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัศมี)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วีระสิทธิ์ ศรีสมัย : การควบคุมแบบเซมิแอคทีฟของผลตอบสนองไม่เชิงเส้นของอาคารด้วยตัวหน่วงปรับค่าได้. (SEMI-ACTIVE CONTROL OF NONLINEAR RESPONSE OF BUILDINGS BY VARIABLE DAMPERS) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.อาณัติ เรืองรัศมี, 167 หน้า
ISBN 974-17-5426-4

เมื่อเกิดแผ่นดินไหวโครงสร้างอาจจะเกิดความเสียหายขึ้นที่เสา คาน หรือ ข้อต่อซึ่งมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น ในการควบคุมความเสียหายของโครงสร้างควรใช้วิธีการควบคุมที่สามารถควบคุมพฤติกรรมไม่เชิงเส้นได้อย่างง่ายและมีประสิทธิภาพ โดยงานวิจัยนี้ได้นำเสนอรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้ (vicous-plus-variable-friction, VVF) โดยนำข้อดีของตัวหน่วงแบบหนืดและข้อดีของตัวหน่วงแบบแรงเสียดทานมาผสมกัน และได้พัฒนาตัวหน่วงปรับค่าได้ที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบ VVF โดยใช้ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก และได้ศึกษาประสิทธิผลในการลดผลตอบสนองไม่เชิงเส้นของอาคารด้วยการทดลองและวิเคราะห์เชิงตัวเลข

ในการวิจัยได้ทำการทดสอบตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กโดยให้การเคลื่อนที่แบบวัฏจักรและได้ทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กโดยจำลองเป็นชิ้นส่วนแรงเสียดทานและชิ้นส่วนความหนืดต่อขนานกัน หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบตัวหน่วงโดยให้มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน, แบบหนืด, แบบหนืดไม่เชิงเส้น และแบบ VVF พบว่าค่าแรงหน่วงที่วัดได้น้อยกว่าค่าแรงหน่วงที่สั่งจึงต้องมีการชดเชยความต่างศักย์ให้เป็นสัดส่วนกับผลต่างของแรงหน่วงพบว่าตัวหน่วงสามารถควบคุมได้รูปแบบตามที่กำหนดได้อย่างใกล้เคียงที่ความถี่ 1 Hz และเมื่อความถี่เป็น 2 Hz พบว่าแรงหน่วงมีความแตกต่างกันมากขึ้นซึ่งแสดงถึงข้อจำกัดของการใช้ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กที่ความถี่สูงๆ จากนั้นได้ทำการทดสอบแบบจำลองอาคารโครงสร้างเหล็ก 3 ชั้น กว้าง 40 cm ยาว 80 cm สูง 1 m ซึ่งมีคาบธรรมชาติของโหมด 1, 2 และ 3 เป็น 0.73, 0.25 และ 0.17 s ตามลำดับ มีการติดตั้งตัวหน่วงระหว่างฐานกับพื้นชั้น 1 ภายใต้คลื่น JMA Kobe และ คลื่น El Centro ที่ระดับความเข้มต่างๆ โดยมีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน แบบหนืด และ แบบ VVF เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการควบคุมภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20% พบว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบ VVF สามารถลดระยะเคลื่อนที่สูงสุดของชั้น 1 และ 3 ได้ 33% และ 21% ตามลำดับ ค่าความเร่งชั้น 1 และ 3 ลดลง 22% และ 14% ตามลำดับ พลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุด 6.4 N-m เมื่อเปรียบเทียบทั้งสามรูปแบบการควบคุมพบว่า รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานลดระยะเคลื่อนที่ในเสาได้ดีที่สุด ส่วนรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบ VVF ลดค่าความเร่งได้ดีใกล้เคียงกับแบบหนืด และมีการสลายพลังงานในตัวหน่วงได้ดีที่สุด

จากการวิเคราะห์อาคารมาตรฐานสูง 3 ชั้น ซึ่งมีคาบธรรมชาติของ 3 โหมดแรกคือ 1.01 0.33 และ 0.17 s และมีการติดตั้งตัวหน่วงระหว่างฐานกับพื้นชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆ ภายใต้คลื่น JMA Kobe และ El Centro ที่ระดับความเข้มต่างๆกัน เนื่องจากโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณไม่รองรับคำสั่งที่จำเป็นสำหรับการควบคุมแรงหน่วงแบบ VVF จึงใช้รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นแทนซึ่งมีลักษณะคล้ายกัน เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการควบคุมภายใต้คลื่น JMA Kobe พบว่ารูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นสามารถลดระยะเคลื่อนที่สูงสุดของชั้น 1 และ 3 ได้ 47% และ 22% ตามลำดับ ความเร่งของชั้น 1 และ 3 ลดลง 28% และ 8% ตามลำดับ พลังงานที่สลายในตัวหน่วง 4.2 MN-m จากการเปรียบเทียบทั้งสามรูปแบบการควบคุมพบว่า รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานมีแนวโน้มลดระยะเคลื่อนที่ได้ดี แบบหนืดลดค่าความเร่งสูงสุดได้ดีที่สุด ส่วนแบบหนืดไม่เชิงเส้นลดระยะเคลื่อนที่สูงสุดได้ดีกว่าแบบหนืด และลดค่าความเร่งสูงสุดได้ดีกว่าแบบเสียดทาน นอกจากนี้มีการสลายพลังงานในตัวหน่วงได้สูงสุด ซึ่งผลการวิเคราะห์มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดสอบ

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ปีการศึกษา 2546

##4470551421 : MAJOR CIVIL ENGINEERING
KEY WORDS : SEMI-ACTIVE CONTROL / VARIABLE DAMPER / MR DAMPER
MR.WEERASIT SRISAMAI : SEMI-ACTIVE CONTROL OF NONLINEAR RESPONSE OF BUILDINGS BY VARIABLE DAMPERS. THESIS ADVISOR : DR.ANAT RUANGRASSAMEE, 167 pp,
ISBN 974-17-5426-4

During earthquakes, structures may suffer damage in columns, beams, or joints. They exhibit nonlinear response. In controlling the nonlinear response of structures, simple but robust control algorithms are required. In this study, the viscous-plus-variable-friction (VVF) damping force algorithm is proposed by taking advantages of typical viscous and friction dampers. The variable damper with the VVF damping force algorithm is developed by using a magneto-rheological (MR) damper and its effectiveness in reduced nonlinear response of a case study building is investigated by a series of shaking table tests and analyses.

In this study, cyclic loading tests of a MR damper are conducted. The mathematical model of the MR damper is friction and viscous elements connected in parallel. Using the model, the MR damper is controlled to generate viscous, friction, nonlinear viscous, and VVF damping force algorithms under sinusoidal excitations. It is found that the measured force is less than the commanded force. To solve the problem, the voltage applied to the current driver is set proportional to the difference between the measured and commanded forces. It is found that the damping force can be accurately controlled under the excitation frequency of 1 Hz. For the excitation frequency of 2 Hz, some discrepancies occur. This may limit the application of a MR damper at a high frequency. Subsequently, the MR damper is installed in the first story of a three-story model building with a width of 0.4 m, a length of 0.8 m, and a height of 1.0 m. The natural periods of the first, second, and third modes are 0.73, 0.25, and 0.17 s, respectively. The model building is subjected JMA Kobe and El Centro records with various intensities and it is controlled by friction, viscous and VVF damping force algorithms. Comparing with the uncontrolled case under the JMA Kobe record with an intensity of 20%, the VVF damping force algorithm reduced the peak displacements of the 1st and 3rd floors by 33% and 21%, respectively, while the peak accelerations of the 1st and 3rd floors are reduced by 22% and 14%, respectively. The peak energy dissipation of damper is 6.4 N-m. When comparing three damping force algorithms, it is found that the friction damping force algorithm gives maximum reduction of peak displacements while the VVF damping force algorithm gives maximum reduction of peak accelerations and gives maximum energy dissipation of the MR damper.

The analysis of a benchmark three-story building is conducted. The natural periods of the 1st, 2nd and 3rd mode are 1.01, 0.33, and 0.17 s, respectively. Variable dampers are installed between the base and the 1st floor. The building is subjected to the JMA Kobe and El Centro records. Since the VVF damping force algorithm cannot be included in the analytical module, a nonlinear viscous damping force algorithm is considered instead. Comparing with the uncontrolled case under the JMA Kobe record, the nonlinear viscous damping force algorithm can reduce the peak displacements of the 1st and 3rd floors by 47% and 22%, respectively, and reduced the peak accelerations of the 1st and 3rd floors by 28% and 8%, respectively. The peak energy dissipation of damper is 4.2 MN-m. From the comparision of three damping force algorithms, it is found that the friction damping force algorithm gives maximum reduction of peak displacements while the viscous one gives the maximum reduction of peak accelerations. The nonlinear viscous damping force algorithm not only reduces displacements more than the viscous damping force algorithm but also reduces accelerations more than the friction damping force algorithm. It has maximum energy dissipation of dampers. The trend is close to the experimental results.

Department CIVIL ENGINEERING. Student's signature Weerasit Srisamai
Field of study CIVIL ENGINEERING. Advisor's signature Anat Ruangrassamee
Academic year 2003.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดีของ อาจารย์ ดร.อาณัติ เรืองรัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างมากในงานวิจัยในครั้งนี้มาโดยตลอด รวมถึงการตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย ซึ่งข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในพระคุณของอาจารย์เป็นอย่างยิ่งจึงใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ ในฐานะประธานกรรมการสอบ และ รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว ในฐานะกรรมการสอบ ที่ได้ให้ความกรุณาให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อยสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำหรับเงินสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอใคร่ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่กรุณาอบรมสั่งสอน และที่สำคัญผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา รวมถึงญาติพี่น้องทุกคนที่คอยให้กำลังใจ รวมทั้งรุ่นพี่และรุ่นน้องทุกท่านที่คอยให้กำลังใจและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนความช่วยเหลือในทุกๆด้านจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ..... ช
สารบัญตาราง..... ฎ
สารบัญรูป..... ฏ
บทที่ 1 บทนำ..... 1
1.1 ความเป็นมา..... 1
1.2 งานวิจัยในอดีต..... 2
1.3 วัตถุประสงค์..... 5
1.4 ขอบเขตการศึกษา..... 6
1.5 สมมติฐาน..... 6
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... 7
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....10
2.1 ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กและอุปกรณ์ของเหลวแม่เหล็ก.....10
2.2 สมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหว..... 11
2.2.1 โครงสร้างที่มีพฤติกรรมยืดหยุ่นเชิงเส้น..... 13
2.2.2 โครงสร้างที่มีพฤติกรรมไม่ยืดหยุ่น..... 13
2.3 ระบบหลายระดับขั้นความเสรีที่มีพฤติกรรมไม่เชิงเส้น..... 14
บทที่ 3 การพัฒนาตัวหน่วงปรับค่าได้ด้วยตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก..... 21
3.1 การทดสอบพฤติกรรมของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก
โดยให้การเคลื่อนที่แบบวัฏจักร..... 22
3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก..... 23
3.3 การทดสอบพฤติกรรมของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก
โดยควบคุมให้มีแรงหน่วงในรูปแบบต่างๆ..... 24
3.3.1 ลักษณะของรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆ..... 24

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบของรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบต่างๆ 25
3.4 ผลการทดสอบ 25
3.4.1 ผลของค่าพารามิเตอร์ *k* ที่มีต่อรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆ 26
3.4.2 การแก้ปัญหาในส่วนที่แรงหน่วงที่ได้มากกว่าค่าแรงที่สั่งในช่วงที่ความเร็วต่ำ 27
3.5 สรุปผลการทดสอบ 29
บทที่ 4 การทดสอบแบบจำลองอาคารที่ติดตั้งตัวหน่วงปรับค่าได้ 47
4.1 แบบจำลองอาคาร 47
4.1.1 การหาค่าคาบธรรมชาติของแบบจำลองอาคาร 48
4.1.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 48
4.1.3 การคำนวณหาค่าแรงต้านในเสา 49
4.2 การทดสอบแบบจำลองอาคารที่ติดตั้งตัวหน่วงภายใต้การเคลื่อนที่ที่ฐาน 50
4.3 ผลตอบสนองของแบบจำลองอาคาร 51
4.3.1 กรณีที่ไม่มีการควบคุม 51
4.3.2 กรณีที่มีการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน 51
4.3.3 กรณีที่มีการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด 52
4.3.4 กรณีที่มีการควบคุมแรงหน่วงแบบ VVF 53
4.4 ผลตอบสนองสูงสุดของแบบจำลองอาคาร 53
4.4.1 ผลตอบสนองสูงสุดของแบบจำลองอาคารภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe 53
4.4.2 ผลตอบสนองสูงสุดของแบบจำลองอาคารภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro 55
4.5 สรุปผลการทดลอง 56
บทที่ 5 การวิเคราะห์อาคารมาตรฐานที่ควบคุมด้วยตัวหน่วงปรับค่าได้ 86
5.1 แบบจำลองในการวิเคราะห์ 86

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.2 คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์ 87
5.3 ผลตอบสนองของอาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วง 87
5.4 ผลตอบสนองของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแบบแพสซีฟ 88
5.4.1 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน
ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMAKobe 88
5.4.2 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด
ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMAKobe 89
5.4.3 เปรียบเทียบรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบแพสซีฟ
ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMAKobe 90
5.4.4 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน
ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro 91
5.4.5 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด
ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro 92
5.4.6 เปรียบเทียบรูปแบบการควบคุมแบบแพสซีฟ
ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro 93
5.5 การควบคุมผลตอบสนองโดยตัวหน่วงปรับค่าได้ 95
5.5.1 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้น
ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMAKobe 95
5.5.2 เปรียบเทียบรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบต่างๆ
ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMAKobe 96
5.5.3 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้น
ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro 97
5.5.4 เปรียบเทียบรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบต่างๆ
ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro 98
5.6 สรุปผลการวิเคราะห์ 99
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 141

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

6.1 สรุปผลการวิจัย 141
6.2 ข้อเสนอแนะ 143
รายการอ้างอิง 144
ภาคผนวก 146
ภาคผนวก ก-1 เครื่องจำลองแผ่นดินไหว (shaking table) 147
ภาคผนวก ข-1 ผลตอบสนองของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก 150
ภาคผนวก ข-2 ผลตอบสนองของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กโดยควบคุมให้มีแรงหน่วงในรูปแบบต่างๆ 154
ภาคผนวก ข-3 ผลของการชดเชยความต่างศักย์ 159
ภาคผนวก ค-1 ผลการทดสอบแบบจำลองอาคารที่ติดตั้งตัวหน่วงปรับค่าได้ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 10% 161
ภาคผนวก ค-2 ผลการทดสอบแบบจำลองอาคารที่ติดตั้งตัวหน่วงปรับค่าได้ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 17% 162
ภาคผนวก ค-3 ผลการทดสอบแบบจำลองอาคารที่ติดตั้งตัวหน่วงปรับค่าได้ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20% 163
ภาคผนวก ค-4 ผลการทดสอบแบบจำลองอาคารที่ติดตั้งตัวหน่วงปรับค่าได้ภายใต้คลื่น El Centro ที่ระดับความเข้ม 27% 164
ภาคผนวก ค-5 ผลการทดสอบแบบจำลองอาคารที่ติดตั้งตัวหน่วงปรับค่าได้ภายใต้คลื่น El Centro ที่ระดับความเข้ม 40% 165
ภาคผนวก ค-6 ผลการทดสอบแบบจำลองอาคารที่ติดตั้งตัวหน่วงปรับค่าได้ภายใต้คลื่น El Centro ที่ระดับความเข้ม 44% 166
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 167

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 กรณีที่ทำการทดสอบพฤติกรรมของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กภายใต้การเคลื่อนที่รูปแบบ Sine..... 30
3.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆ.....31
3.3 แสดงกรณีที่ทำการทดสอบการแก้ปัญหาแรงหน่วงที่วัดได้มากกว่าค่าแรงที่สั่ง.....32
4.1 กรณีที่ทำการทดสอบ.....58

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กต้นแบบ (จาก Spencer และคณะ ค.ศ. 1996)	8
1.2	แบบจำลองตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กเสนอโดย (จาก Spencer และคณะ ค.ศ. 1996)	8
1.3	รูปจำลองการติดตั้ง (จาก Dyke และคณะ ค.ศ. 1996)	8
1.4	รูปจำลองการติดตั้ง (จาก Yi และคณะ ค.ศ. 2001)	9
2.1	การจัดเรียงตัวของอนุภาคเหล็กภายใต้สนามแม่เหล็ก	18
2.2	แบบจำลองพลาสติกของบิงแฮม (Bingham plasticity model)	18
2.3	โหมดการทำงานพื้นฐานสำหรับอุปกรณ์ของเหลวที่ควบคุมได้	19
2.4	พารามิเตอร์และแรงที่กระทำกับโครงสร้าง	19
2.5	ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ทั้งหมดกับการเคลื่อนที่ของพื้นดินและการเคลื่อนที่สัมพัทธ์	19
2.6	โครงสร้างที่ชิ้นส่วนเกิดการคราก	20
2.7	แบบจำลองแบบวัฏจักรแบบเส้นตรงสองเส้น (bilinear) สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างที่รับแรงดัด	20
2.8	แบบจำลองชิ้นส่วนโครงสร้างที่รับแรงดัด	20
3.1	ตัวหน่วงที่ใช้ในการทดสอบ	33
3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ที่ใส่เข้าไปกับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกมา	33
3.3	การติดตั้งอุปกรณ์การทดสอบ	33
3.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงหน่วงกับระยะเคลื่อนที่	34
3.5	แรงหน่วงสูงสุดกับความเร็วสูงสุด	35
3.6	แบบจำลองตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็ก	35
3.7	แรงเสียดทานกับกระแสไฟฟ้า	35
3.8	สัมประสิทธิ์ความหน่วงกับกระแสไฟฟ้า	35
3.9	รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน	35
3.10	รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด	36
3.11	รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้น	36

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.12 แบบจำลองของรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้....36
3.13 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้....36
3.14 รูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทาน....37
3.15 แสดงหลักการทำงานของตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กโดยควบคุมให้มีแรงหน่วงในรูปแบบต่างๆ....37
3.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะเคลื่อนที่โดยเปรียบเทียบระหว่างแรงที่สั่งกับแรงที่วัดได้ของรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้การเคลื่อนที่แบบคลื่น Sine ที่ความถี่ 1 Hz....38
3.17 แสดงผลของค่าพารามิเตอร์ *k* ที่มีต่อการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานภายใต้การเคลื่อนที่แบบคลื่น Sine ที่ความถี่ 1 Hz....39
3.18 แสดงผลของค่าพารามิเตอร์ *k* ที่มีต่อรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบต่างๆ ภายใต้การเคลื่อนที่แบบคลื่น Sine ที่ความถี่ 1 Hz....39
3.19 แสดงผลของค่าพารามิเตอร์ *k* ที่มีต่อรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบต่างๆ ภายใต้การเคลื่อนที่แบบคลื่น Sine ที่ความถี่ 2 Hz....40
3.20 วิธีที่ไม่ต้องมีการชดเชยกระแสไฟฟ้า (*k* = 0 V/N) เมื่อความเร็วต่ำกว่า v_{k0}....41
3.21 วิธีที่ให้กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0(*current* = 0 mA) เมื่อความเร็วต่ำกว่า v_{co}....41
3.22 การลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วงของการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานเมื่อ *k* = 0.02 V/N และ *k* = 0.04 V/N ในช่วงที่ความเร็วมากกว่าความเร็วที่กำหนดภายใต้การเคลื่อนที่ที่ความถี่ 1 Hz....42
3.23 การลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วงของการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานเมื่อ *k* = 0.02 V/N และ *k* = 0.04 V/N ในช่วงที่ความเร็วมากกว่าความเร็วที่กำหนดภายใต้การเคลื่อนที่ที่ความถี่ 2 Hz....43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.24 การลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วงของการควบคุมแรงหน่วงแบบแบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้เมื่อแรงน้อยกว่าค่าแรงที่กำหนด เมื่อ k = 0.02 V/N และ k = 0.04 V/N ในช่วงที่ความเร็วมากกว่าความเร็วที่กำหนดภายใต้การเคลื่อนที่ที่ความถี่ 2 Hz....44
3.25 การลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วงของการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้โดยค่าแรงสูงสุดที่วัดได้น้อยกว่าค่าแรงที่กำหนด เมื่อ k = 0.04 V/Nในช่วงที่ความเร็วมากกว่าความเร็วที่กำหนด ภายใต้การเคลื่อนที่ที่ความถี่ 1 Hz....45
3.26 การลดผลเนื่องจากความล่าช้าของตัวหน่วงของการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้โดยค่าแรงสูงสุดที่วัดได้ถึงค่าแรงที่กำหนด เมื่อ k = 0.04 V/Nในช่วงที่ความเร็วมากกว่าความเร็วที่กำหนด ภายใต้การเคลื่อนที่ที่ความถี่ 2 Hz....46
4.1 แสดงแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบ....59
4.2 แสดงการติดตั้งตัวหน่วงของเหลวแม่เหล็กในแบบจำลอง....59
4.3 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองอาคาร....59
4.4 แสดงผลการทดสอบการสั่นอิสระ(free vibration test)....59
4.5 แสดงระยะเคลื่อนที่ของชั้นต่างๆที่ได้จากการคำนวณเมื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับ 1.75 N-s/m....60
4.6 แสดงความเร็วของชั้นต่างๆที่ได้จากการวัดระยะเคลื่อนที่แล้วคำนวณเป็นความเร็วและจากการคำนวณเมื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับ 1.75 N-s/m....61
4.7 แสดงความเร่งของชั้นต่างๆที่ได้จากการวัดและจากการคำนวณเมื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงเท่ากับ 1.75 N-s/m....62
4.8 คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe....63
4.9 คลื่นแผ่นดินไหว El Centro....64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.10 ผลตอบสนองของแบบจำลองอาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วงภายใต้
คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%.....65
4.11 พลังงานที่สลายในเสา.....66
4.12 แรงต้านในเสากับระยะการเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคาร
ที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วงภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%.....66
4.13 ผลตอบสนองของแบบจำลองอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วง
แบบเสียดทานภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%.....67
4.14 ผลตอบสนองของตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วง
แบบเสียดทานภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%.....68
4.15 พลังงานที่สลายในเสาและในตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วง
แบบเสียดทานภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%.....68
4.16 แรงต้านในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคาร
ที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานภายใต้คลื่น JMA Kobe
ที่ระดับความเข้ม 20%.....69
4.17 ผลตอบสนองของแบบจำลองอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด
ภายใต้คลื่น JMA Kobeที่ระดับความเข้ม 20%.....70
4.18 ผลตอบสนองของตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด
ภายใต้การคลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%.....71
4.19 พลังงานที่สลายในเสาและในตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด
คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%.....71
4.20 แรงต้านในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆ ของแบบจำลอง
อาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดภายใต้คลื่น JMA Kobe
ที่ระดับความเข้ม 20%.....72
4.21 ผลตอบสนองของแบบจำลองอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืด
ผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้ภายใต้การคลื่น JMA Kobe
ที่ระดับความเข้ม 20%.....73

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.22 ผลตอบสนองของตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้ภายใต้การคลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%.....74
4.23 พลังงานที่สลายในเสาและในตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้ม 20%.....74
4.24 แรงต้านในเสากับระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดผสมแบบเสียดทานที่ปรับค่าได้ภายใต้คลื่น JMA Kobeที่ระดับความเข้มต่างๆ.....75
4.25 ระยะเคลื่อนที่สูงสุดในเสาชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคารกับคุณสมบัติของตัวหน่วงที่มีการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้มต่างๆ.....76
4.26 ความเร่งสูงสุดของชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคารกับคุณสมบัติของตัวหน่วงที่มีการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้มต่างๆ.....77
4.27 พลังงานที่สลายสูงสุดในเสาชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคารกับคุณสมบัติของตัวหน่วงที่มีการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น JMA Kobeที่ระดับความเข้มต่างๆ..78
4.28 ระยะเคลื่อนที่สูงสุดในเสาชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคารกับคุณสมบัติของตัวหน่วงที่มีการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น JMA Kobeที่ระดับความเข้มต่างๆ.....79
4.29 แรงเฉือนที่ฐานสูงสุดของแบบจำลองอาคารกับคุณสมบัติของตัวหน่วงที่มีการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น JMA Kobeที่ระดับความเข้มต่างๆ.....80
4.30 ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคารกับคุณสมบัติของตัวหน่วงที่มีการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น El Centroที่ระดับความเข้มต่างๆ.....81
4.31 ความเร่งสูงสุดของชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคารกับคุณสมบัติของตัวหน่วงที่มีการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น El Centro ที่ระดับความเข้มต่างๆ.....82
4.32 พลังงานที่สลายสูงสุดในเสาชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคารกับคุณสมบัติของตัวหน่วงที่มีการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น El Centroที่ระดับความเข้มต่างๆ....83

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.33 ระยะเคลื่อนที่สูงสุดในเสาชั้นต่างๆของแบบจำลองอาคารกับคุณสมบัติของตัวหน่วง ที่มีการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น El Centroที่ระดับความเข้มต่างๆ..... 84

4.34 แรงเฉือนที่ฐานสูงสุดของแบบจำลองอาคารกับคุณสมบัติของตัวหน่วง ที่มีการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น El Centroที่ระดับความเข้มต่างๆ..... 85

5.1 โครงข้อแข็งอาคารมาตรฐาน 3 ชั้นทิศเหนือ-ใต้(จาก Y. Ohtori และคณะ ค.ศ. 2000)..... 101

5.2 คลื่นแผ่นดินไหว El Centro.....102

5.3 คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe.....103

5.4 ค่าความเหนียวเชิงความโค้งที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่ไม่มี การติดตั้งตัวหน่วงภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง.....104

5.5 ผลตอบสนองของอาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วงภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่มี ขนาดเท่าของจริง.....105

5.6 ระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆของอาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วงภายใต้ คลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง..... 106

5.7 ค่าความเหนียวเชิงความโค้งที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่ไม่มี การติดตั้งตัวหน่วงภายใต้คลื่น El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง..... 107

5.8 ผลตอบสนองของอาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วงภายใต้คลื่น El Centro ที่มี ขนาด 1.5 เท่าของจริง..... 108

5.9 ระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆของอาคารที่ไม่มีการติดตั้งตัวหน่วงภายใต้ คลื่น El Centroที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง..... 109

5.10 ค่าความเหนียวเชิงความโค้งที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่มีรูป แบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานที่มีค่าแรงเสียดทาน 9 MN ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง..... 110

5.11 ผลตอบสนองของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานที่มี ค่าแรงเสียดทาน 9 MN ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง.....111

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.12 ระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานที่มีค่าแรงเสียดทาน 9 MN ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง....112

5.13 ผลตอบสนองของตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานที่มีค่าแรงเสียดทาน 9 MN ภายใต้คลื่น JMA Kobeที่มีขนาดเท่าของจริง....112

5.14 ค่าความเหนียวเชิงความโค้งที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 30 MN-s/m ภายใต้คลื่น JMA Kobeที่มีขนาดเท่าของจริง....113

5.15 ผลตอบสนองของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 30 MN-s/m ภายใต้คลื่น JMA Kobeที่มีขนาดเท่าของจริง....114

5.16 ระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 30 MN-s/m ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง....115

5.17 ผลตอบสนองของตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 30 MN-s/m ภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่มีขนาดเท่าของจริง....115

5.18 ความเหนียวเชิงความโค้งสูงสุดที่ปลายของชิ้นส่วนโครงสร้างกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบแพสซีฟภายใต้คลื่น JMA Kobeที่ระดับความเข้มต่างๆ....116

5.19 ผลตอบสนองสูงสุดของชั้นต่างๆของอาคารกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบแพสซีฟภายใต้คลื่น JMA Kobe ระดับความเข้มต่างๆ....117

5.20 ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้นต่างๆกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบแพสซีฟภายใต้คลื่น JMA Kobe ระดับความเข้มต่างๆ....118

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.21 พลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุดกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบแพสซีฟภายใต้คลื่น JMA Kobe ระดับความเข้มต่างๆ.....118

5.22 ค่าความเหนียวเชิงความโค้งที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานที่มีค่าค่าแรงเสียดทาน 6 MN ภายใต้คลื่น El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง.....119

5.23 ผลตอบสนองของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานที่มีค่าแรงเสียดทาน 6 MN ภายใต้คลื่น El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง.....120

5.24 ระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานที่มีค่าแรงเสียดทานวง 6 MN ภายใต้คลื่น El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง.....121

5.25 ผลตอบสนองของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบเสียดทานที่มีค่าค่าแรงเสียดทานวง 6 MN ภายใต้คลื่น El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง..... 121

5.26 ค่าความเหนียวเชิงความโค้งที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 30 MN-s/m ภายใต้คลื่น El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง.....122

5.27 ผลตอบสนองของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 30 MN-s/m ภายใต้คลื่น El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง.....123

5.28 ระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 30 MN-s/m ภายใต้คลื่น El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง.....124

5.29 ผลตอบสนองของตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 30 MN-s/m ภายใต้คลื่น El Centro ที่มีขนาด 1.5 เท่าของจริง.....124

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.30 ความเหนียวเชิงความโค้งสูงสุดที่ปลายของชิ้นส่วนโครงสร้างกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแบบแพสซีฟภายใต้คลื่น El Centroที่ระดับความเข้มต่างๆ.....125

5.31 ผลตอบสนองสูงสุดของชั้นต่างๆของอาคารกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบแพสซีฟภายใต้คลื่น El Centro ที่ระดับความเข้มต่างๆ.....126

5.32 ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้นต่างๆกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแบบแพสซีฟภายใต้คลื่น El Centro ระดับความเข้มต่างๆ....127

5.33 พลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุดกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแบบแพสซีฟภายใต้คลื่น El Centro ระดับความเข้มต่างๆ....127

5.34 ค่าความเหนียวเชิงความโค้งที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 50 MN-s/m แรงเสียดทาน 9 MN ภายใต้คลื่น JMA Kobe ขนาดเท่าของจริง.....128

5.35 ผลตอบสนองของตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้น ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 50 MN-s/m แรงเสียดทาน 9 MN ภายใต้คลื่น JMA Kobe ขนาดเท่าของจริง.....129

5.36 ระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้น มีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 50 MN-s/m แรงเสียดทาน 9 MN ภายใต้คลื่น JMA Kobe ขนาดเท่าของจริง.....130

5.37 ผลตอบสนองของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้น ค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 50 MN-s/mแรงเสียดทาน 9 MN ภายใต้คลื่น JMA Kobe ขนาดเท่าของจริง.....130

5.38 ความเหนียวเชิงความโค้งสูงสุดที่ปลายของชิ้นส่วนโครงสร้างกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้มต่างๆ.....131

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.39 ผลตอบสนองสูงสุดของชั้นต่างๆของอาคารกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น JMA Kobe ที่ระดับความเข้มต่างๆ.....132
5.40 ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้นต่างๆกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น JMA Kobe ระดับความเข้มต่างๆ.....133
5.41 พลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุดกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น JMA Kobe ระดับความเข้มต่างๆ.....133
5.42 ค่าความเหนียวเชิงความโค้งที่ปลายของชิ้นส่วนต่างๆของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 50 MN-s/m แรงเสียดทาน 6 MN ภายใต้คลื่น El Centro ขนาด 1.5 เท่าของจริง.....134
5.43 ผลตอบสนองของอาคารที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 50 MN-s/mแรงเสียดทาน 6 MN ภายใต้คลื่น El Centro ขนาด 1.5 เท่าของจริง.....135
5.44 ระยะเคลื่อนที่ของเสาชั้นต่างๆที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นมีค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 50 MN-s/m แรงเสียดทาน 6 MN ภายใต้คลื่น El Centro ขนาด 1.5 เท่าของจริง.....136
5.45 ผลตอบสนองของตัวหน่วงที่มีรูปแบบการควบคุมแรงหน่วงแบบหนืดไม่เชิงเส้นค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง 50 MN-s/mแรงเสียดทาน 6 MN ภายใต้คลื่น El Centro ขนาด 1.5 เท่าของจริง.....136
5.46 ความเหนียวเชิงความโค้งสูงสุดที่ปลายของชิ้นส่วนโครงสร้างกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น El Centro ที่ระดับความเข้มต่างๆ.....137
5.47 ผลตอบสนองสูงสุดของชั้นต่างๆของอาคารกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น El Centro ที่ระดับความเข้มต่างๆ.....138

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.40 ระยะเคลื่อนที่สูงสุดของเสาชั้นต่างๆกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น El Centro ระดับความเข้มต่างๆ.....139

5.41 พลังงานที่สลายในตัวหน่วงสูงสุดกับสัดส่วนของแรงหน่วงสูงสุดต่อน้ำหนักชั้น 1 ที่มีรูปแบบการควบคุมแบบต่างๆภายใต้คลื่น El Centro ระดับความเข้มต่างๆ.....140

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย