

การควบคุมการสั่นไหวของอาคารเนื่องจากแผ่นดินไหวโดยใช้มวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแยกที่ฟ



นายพิสิฐ ยิ่งมโนกิจ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-346-153-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

VIBRATION CONTROL OF BUILDINGS UNDER SEISMIC EXCITATION  
USING A SEMI-ACTIVE TUNED MASS DAMPER

Mr. Pisit Yingmanokit

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 2000

ISBN 974-346-153-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การควบคุมการสั้นไหวของอาคารเนื่องจากแผ่นดินไหวโดยใช้มวลหน่วง  
ปรับค่าแบบกึ่งแยกที่ฟ

โดย

นายพิสิฐ ยิงมโนกิจ


ภาควิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

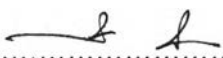
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พูลศักดิ์ เพ็ชรสุสม)

พิสิฐ ยิ้มมโนกิจ : การลดการสั่นไหวของอาคารเนื่องจากแผ่นดินไหวโดยใช้มวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟ. (VIBRATION CONTROL OF BUILDINGS UNDER SEISMIC EXCITATION USING A SEMI-ACTIVE TUNED MASS DAMPER)

อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพลปิ่นแก้ว, 91 หน้า. ISBN 974-346-153-1.

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของการใช้มวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟหนึ่งหน่วยในการลดการสั่นไหวของอาคารภายใต้การเกิดแผ่นดินไหว ในงานวิจัยได้ใช้พารามิเตอร์ของอาคารในโหมดการสั่นหลักในการวิเคราะห์การสั่นไหวแบบอิลาสติก จากการใช้มวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟพบว่าประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของโครงสร้างได้มากกว่าระบบแพสซีฟ ในขณะที่มีเสถียรภาพมากกว่าระบบแอกทีฟ เนื่องจากว่ามวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟนี้จะใช้ตัวหน่วงที่มีความสามารถในการปรับความหน่วงได้ภายในเวลาอันรวดเร็วและใช้พลังงานที่ต่ำจึงทำให้สามารถควบคุมการสั่นของมวลหน่วงปรับค่าให้เป็นอย่างดีเหมาะสม

จากผลการศึกษาทำให้ได้แนวทางในการออกแบบการควบคุมมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟตามการควบคุมแบบควอดราติกเชิงเส้นให้มีประสิทธิภาพในการลดการสั่นไหวของอาคารมากขึ้น โดยสามารถใช้ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของอัตราส่วนขยายพลศาสตร์ที่ต่ำที่สุดเป็นเกณฑ์ในการหาค่าเมตริกซ์น้ำหนักสำหรับแรงควบคุมที่เหมาะสมที่สุดกับตัวหน่วงที่ใช้ได้

นอกจากนี้งานวิจัยยังได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้มวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟในทางปฏิบัติโดยทำการทดสอบตัวหน่วงซึ่งภายในบรรจุของเหลวแม่เหล็กปรับค่าที่สามารถทำให้ตัวหน่วงสามารถปรับค่าความหน่วงได้ภายในเวลาอันสั้น จากผลการทดสอบตัวหน่วงทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งเมื่อนำมาวิเคราะห์ในเชิงตัวเลขทางคอมพิวเตอร์พบว่าตัวหน่วงดังกล่าวนี้มีความสามารถในการลดการสั่นไหวของอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพในแง่ของรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของการสั่นไหวของโครงสร้างและสามารถลดการสั่นสูงสุดของโครงสร้างได้เล็กน้อย

ภาควิชา ..... วิศวกรรมโยธา .....  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมโยธา .....  
ปีการศึกษา ..... 2543 .....

ลายมือชื่อผู้พิมพ์ ..... พสิฐ ยิ้มมโนกิจ .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... / /

## 4170441821 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: SEMI ACTIVE CONTROL / TUNED MASS DAMPER / STRUCTURAL CONTROL / VIBRATION CONTROL

MR. PISIT YINGMANOKIT : VIBRATION CONTROL OF BUILDINGS UNDER SEISMIC EXCITATION USING A SEMI-ACTIVE TUNED MASS DAMPER. (THESIS TITLE) THESIS

ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR DR. TOSPOL PINKAEW, 91 pp. ISBN 974-346-153-1.

This research studies the effectiveness of a semi-active tuned mass damper (STMD) for vibration reduction of buildings induced by seismic excitations. This study assumes that the structure is vibrated in the first mode within its elastic range. It is found that the STMD can be more effective in reducing the vibration of the structure than the passive tuned mass damper (TMD) while it is more reliable than the active tuned mass damper (ATMD). Since the STMD can abruptly adjust its damping property, it makes the auxiliary mass move in the proper way.

To design an appropriate control algorithm for the STMD, the use of the minimum of root-mean-square of dynamic amplification factor is considered for finding the optimum weight matrix of control force. The best weight matrix of control force gives the best control algorithm for STMD.

Finally, the study investigates the possibility of using a magnetorheological damper, which can adjust its damping property in a very short time, to be the adjustable damper in the STMD. From the test results, the mathematical model of damper, which can be used in computer simulation, is obtained. The simulations of the building with STMD under various ground excitations are performed. The results indicate that the STMD can significantly reduce the root-mean-square displacement but slightly reduce the peak displacement of the structure over those of the traditional TMD.

Department ..... CIVIL ENGINEERING .....  
Concentration ..... CIVIL ENGINEERING .....  
Academic year ..... 2000 .....

Student's signature ..... *Pisit Yingmanokit* .....  
Advisor's signature ..... *Tospol Pinkaew* .....

## กิตติกรรมประกาศ

ทำวิจัยของกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าให้ความรู้, คำแนะนำ, แง่คิด และให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยเป็นอันมาก

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พูลศักดิ์ เพียรสุขสม ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์พร้อมทั้งให้คำแนะนำและแง่คิดที่เป็นประโยชน์ในการทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์มากขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ของผู้วิจัยที่ส่งเสริมให้ผู้วิจัยได้มีโอกาสทางการศึกษาและเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยในการศึกษามาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) และทางบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเงินทุนที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณพี่สม นึกและพี่วรพงษ์ที่สอนใช้เครื่องมือและให้คำแนะนำในการทดสอบ

ขอขอบคุณรุ่นพี่และเพื่อนๆที่ห้องอุโมงค์ลมที่ให้คำแนะนำ, คำปรึกษาและความช่วยเหลือต่างๆตลอดการวิจัย

ขอขอบคุณทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยทำงานวิจัยนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขออุทิศคุณประโยชน์ที่เกิดขึ้นจากการวิจัยในครั้งนี้ให้แก่ผู้ด้อยโอกาสทางการศึกษาทุกคน

## สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
สัญลักษณ์.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของการวิจัย.....	1
1.2 งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	7
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	7
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	8
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	8
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 ระบบมวลห้วงปรับค่าแบบแพสซีฟ.....	9
2.2 ระบบมวลห้วงปรับค่าแบบแพสซีฟหลายหน่วย.....	13
2.3 ระบบมวลห้วงปรับค่าแบบแอกทีฟ.....	15
2.4 ระบบมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟ.....	18
บทที่ 3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการลดการสั่นไหวของโครงสร้างโดยใช้ ระบบมวลห้วงปรับค่าแบบแพสซีฟ, มวลห้วงปรับค่าแบบแพสซีฟหลาย หน่วยและมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟ.....	22
3.1 กรณีลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวที่เป็นฮาร์โมนิก.....	24
3.2 กรณีลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวที่ตรวจวัดได้ในอดีต.....	31

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
บทที่ 4 การเพิ่มประสิทธิภาพของมวลหน่วยปรับค่าแบบกึ่งแยกที่ฟโดยพิจารณาผล ของพารามิเตอร์ต่างๆ.....	38
4.1 อิทธิพลของค่า $R$ ต่อประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วยปรับค่าแบบกึ่ง แยกที่ฟ.....	38
4.2 อิทธิพลของช่วงการปรับค่าความหน่วงต่อประสิทธิภาพของระบบมวล หน่วยปรับค่าแบบกึ่งแยกที่ฟ.....	40
บทที่ 5 การทดสอบเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติของตัวหน่วงตัวอย่าง.....	45
5.1 หลักการทำงานของตัวหน่วงที่เลือกใช้เป็นตัวอย่งในการศึกษา.....	46
5.2 การทดสอบหาคณสมบัติของตัวหน่วงที่บรรจุของเหลวแม่เหล็กปรับค่า.....	47
5.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวหน่วงที่ใช้ในการศึกษา.....	56
บทที่ 6 การตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วยปรับค่าแบบกึ่งแยกที่ฟโดย ใช้ตัวหน่วงที่บรรจุของเหลวแม่เหล็กปรับค่า.....	61
6.1 กรณีลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวที่เป็นฮาร์โมนิก.....	62
6.2 กรณีลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวที่ตรวจวัดได้ในอดีต.....	68
บทที่ 7 บทสรุป.....	76
7.1 สรุปผล.....	76
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	78
รายการอ้างอิง.....	79
ภาคผนวก.....	81
ประวัติผู้วิจัย.....	91



## สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 3.1	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบ แพลลีฟ.....	22
ตารางที่ 3.2	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบ แพลลีฟหลายหน่วย.....	23
ตารางที่ 3.3	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบ แอกทีฟ.....	24
ตารางที่ 3.4	แสดงขนาดของการสั่นไหวของโครงสร้างในกรณีต่างๆ.....	26
ตารางที่ 3.5	แสดงผลต่างเฟสระหว่างแรงหน่วงของมวลหน่วงและแรงหน่วงของ โครงสร้าง.....	30
ตารางที่ 3.6	แสดงค่าอัตราส่วนระหว่างแรงหน่วงจากระบบมวลหน่วงและแรง หน่วงของโครงสร้าง.....	30
ตารางที่ 3.7	แสดงขนาดของการสั่นไหวของโครงสร้างในกรณีต่างๆ.....	34
ตารางที่ 6.1	แสดงขนาดของการสั่นไหวของโครงสร้างในกรณีต่างๆ.....	64
ตารางที่ 6.2	แสดงขนาดของการสั่นไหวของโครงสร้างในกรณีต่างๆ.....	69

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงลักษณะของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ.....	3
รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองของวิธีการแบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ.....	9
รูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพอิสระของโครงสร้าง.....	9
รูปที่ 2.3 แสดงแผนภาพอิสระของมวลหน่วง.....	10
รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การขยายผลศาสตร์และอัตราส่วนความถี่ของแรงต่อโครงสร้าง โดยกำหนดความถี่ของมวลหน่วงไว้้อย่างเหมาะสม.....	12
รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การขยายผลศาสตร์และอัตราส่วนความถี่ของมวลหน่วงต่อโครงสร้าง โดยกำหนดความถี่ของแรงเท่ากับความถี่ของโครงสร้าง.....	13
รูปที่ 2.6 แสดงประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟหลายหน่วยที่ใช้จำนวนมวลหน่วง 5 หน่วย โดยใช้ค่าอัตราส่วนความถี่ของมวลหน่วงมีค่า 1 และ 6 เปอร์เซนต์ของค่าอัตราส่วนความถี่วิกฤติ.....	15
รูปที่ 2.7 แสดงแบบจำลองของวิธีการแบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟ.....	15
รูปที่ 2.8 แสดงแผนผังขั้นตอนการทำงานในระบบควบคุมแบบแอกทีฟ.....	17
รูปที่ 2.9 แสดงแบบจำลองของวิธีการแบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟ.....	18
รูปที่ 2.10 แสดงแผนภาพอิสระของโครงสร้างและมวลหน่วงในวิธีการควบคุมแบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟ.....	19
รูปที่ 3.1 แสดงการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวที่มีค่าความเร่งสูงสุดเท่ากับ 20 gals ค่าความถี่ของคลื่นเท่ากับค่าความถี่ของโครงสร้าง ในกรณีที่โครงสร้างยังไม่ได้ถูกควบคุม, ควบคุมด้วยมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟหนึ่งหน่วย, หลายหน่วย และมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟ.....	25
รูปที่ 3.2 แสดงการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวที่มีค่าความเร่งสูงสุดเท่ากับ 20 gals ค่าความถี่ของคลื่นเท่ากับค่าความถี่ 0.94 เท่าของความถี่ของโครงสร้าง ในกรณีที่โครงสร้างยังไม่ได้ถูกควบคุม และถูกควบคุมด้วยมวลหน่วงปรับค่าแบบต่างๆ.....	25

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.3 แสดงการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวที่มีค่าความเร่งสูงสุดเท่ากับ 20 gals ค่าความถี่ของคลื่น 0.90 เท่าของความถี่ของโครงสร้าง ในกรณีที่โครงสร้างยังไม่ได้ถูกควบคุมและถูกควบคุมด้วยมวลหน่วงปรับค่าแบบต่างๆ.....	25
รูปที่ 3.4 แสดงผลรวมของพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างและมวลหน่วงปรับค่าระบบต่างๆในกรณีที่ความถี่ของสัญญาณแผ่นดินไหวมีค่าเท่ากับค่าความถี่ของโครงสร้าง.....	26
รูปที่ 3.5 แสดงผลรวมของพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างและมวลหน่วงปรับค่าระบบต่างๆในกรณีที่ความถี่ของสัญญาณแผ่นดินไหวมีค่า 0.94 เท่าของความถี่ของโครงสร้าง.....	27
รูปที่ 3.6 แสดงผลรวมของพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างและมวลหน่วงปรับค่าระบบต่างๆในกรณีที่ความถี่ของสัญญาณแผ่นดินไหวมีค่า 0.90 เท่าของความถี่ของโครงสร้าง.....	27
รูปที่ 3.7 แสดงเทอมของแรงหน่วงของโครงสร้างเทียบกับแรงหน่วงที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากแรงปฏิกิริยาเนื่องจากการสั่นไหวของมวลหน่วงในกรณีของการควบคุมโครงสร้างด้วยมวลหน่วงระบบต่างๆ ในกรณีที่ความถี่ของสัญญาณแผ่นดินไหวมีค่าเท่ากับค่าความถี่ของโครงสร้าง.....	28
รูปที่ 3.8 แสดงเทอมของแรงหน่วงของโครงสร้างเทียบกับแรงหน่วงที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากแรงปฏิกิริยาเนื่องจากการสั่นไหวของมวลหน่วงในกรณีของการควบคุมโครงสร้างด้วยมวลหน่วงระบบต่างๆ ในกรณีที่ความถี่ของสัญญาณแผ่นดินไหวมีค่า 0.94 เท่าของความถี่ของโครงสร้าง.....	29
รูปที่ 3.9 แสดงเทอมของแรงหน่วงของโครงสร้างเทียบกับแรงหน่วงที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากแรงปฏิกิริยาเนื่องจากการสั่นไหวของมวลหน่วงในกรณีของการควบคุมโครงสร้างด้วยมวลหน่วงระบบต่างๆ ในกรณีที่ความถี่ของสัญญาณแผ่นดินไหวมีค่า 0.90 เท่าของความถี่ของโครงสร้าง.....	29
รูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การขยายผลศาสตร์และอัตราส่วนความถี่ของมวลหน่วงต่อโครงสร้างในกรณีที่โครงสร้างยังไม่ได้ถูกควบคุมด้วยมวลหน่วงปรับค่าแบบต่างๆ.....	31

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นที่กรุงเทพมหานครและรูปแสดงสเปกตรัมของคลื่นสัญญาณ.....	32
รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นที่กรุงเม็กซิโกและรูปแสดงสเปกตรัมของคลื่นสัญญาณ.....	32
รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวเอลเซินโทรและรูปแสดงสเปกตรัมของคลื่นสัญญาณ.....	32
รูปที่ 3.14 แสดงการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้ลักษณะสัญญาณแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นที่กรุงเทพมหานครกรณีที่โครงสร้างยังไม่ได้ถูกควบคุมและถูกควบคุมด้วยมวลหน่วงแบบต่างๆ.....	33
รูปที่ 3.15 แสดงการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้ลักษณะสัญญาณแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นที่กรุงเม็กซิโกกรณีที่โครงสร้างยังไม่ได้ถูกควบคุมและถูกควบคุมด้วยมวลหน่วงแบบต่างๆ.....	33
รูปที่ 3.16 แสดงการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้ลักษณะสัญญาณแผ่นดินไหวเอลเซินโทรกรณีที่โครงสร้างยังไม่ได้ถูกควบคุมและถูกควบคุมด้วยมวลหน่วงแบบต่างๆ.....	33
รูปที่ 3.17 แสดงผลรวมของพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างและมวลหน่วงปรับค่าระบบต่างๆในกรณีที่ใช้ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดที่กรุงเทพมหานคร.....	35
รูปที่ 3.18 แสดงผลรวมของพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างและมวลหน่วงปรับค่าระบบต่างๆในกรณีที่ใช้ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดที่กรุงเม็กซิโก.....	35
รูปที่ 3.19 แสดงผลรวมของพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างและมวลหน่วงปรับค่าระบบต่างๆในกรณีที่ใช้ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวเอลเซินโทร.....	36
รูปที่ 3.20 แสดงเทอมของแรงหน่วงของโครงสร้างเทียบกับแรงหน่วงที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากแรงปฏิกิริยาเนื่องจากการสั่นไหวของมวลหน่วงในกรณีของการควบคุมโครงสร้างด้วยมวลหน่วงระบบต่างๆ ในกรณีที่ใช้ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดที่กรุงเทพมหานคร.....	36

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.21 แสดงเทอมของแรงหน่วงของโครงสร้างเทียบกับแรงหน่วงที่เกิดขึ้น เนื่องมาจากแรงปฏิกิริยาเนื่องจากการสั่นไหวของมวลหน่วงในกรณี ของการควบคุมโครงสร้างด้วยมวลหน่วงระบบต่างๆ ในกรณีที่ใช้ ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดที่กรุงเม็กซิโก.....	37
รูปที่ 3.22 แสดงเทอมของแรงหน่วงของโครงสร้างเทียบกับแรงหน่วงที่เกิดขึ้น เนื่องมาจากแรงปฏิกิริยาเนื่องจากการสั่นไหวของมวลหน่วงในกรณี ของการควบคุมโครงสร้างด้วยมวลหน่วงระบบต่างๆ ในกรณีที่ใช้ ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวเฮลเซ็นโทร.....	37
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การขยายผลศาสตร์และ อัตราส่วนความถี่ของแรงต่อโครงสร้างในกรณีที่ควบคุมด้วยมวลหน่วง ปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟที่เลือกค่า $R$ ค่าต่างๆ.....	39
รูปที่ 4.2 แสดงการหาค่า $R$ ที่เหมาะสมโดยการพิจารณาค่า $R$ ที่ทำให้ค่ารากที่ สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของสัมประสิทธิ์การขยายทางพลศาสตร์มี ค่าต่ำที่สุด.....	40
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การขยายผลศาสตร์และ อัตราส่วนความถี่ของแรงต่อโครงสร้างในกรณีที่ควบคุมด้วยมวลหน่วง ปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟที่มีค่าต่ำสุดของความหน่วงที่ปรับได้เท่ากัน (0 % ของอัตราส่วนความหน่วงวิกฤติ) แต่ค่ามากที่สุดมีค่าแตกต่างกัน.....	41
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การขยายผลศาสตร์และ อัตราส่วนความถี่ของแรงต่อโครงสร้างในกรณีที่ควบคุมด้วยมวลหน่วง ปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟที่มีค่าต่ำสุดของความหน่วงที่ปรับได้เท่ากัน (5 % ของอัตราส่วนความหน่วงวิกฤติ) แต่ค่ามากที่สุดมีค่าแตกต่างกัน.....	41
รูปที่ 4.5 แสดงประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงปรับค่าที่เลือกค่า $R$ ค่าต่างๆ โดยที่ตัวหน่วงมีค่าต่ำสุดของความหน่วงที่สามารถปรับค่าได้เท่ากัน (0 % ของอัตราส่วนความหน่วงวิกฤติ).....	42
รูปที่ 4.6 แสดงประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงปรับค่าที่เลือกค่า $R$ ค่าต่างๆ โดยที่ตัวหน่วงมีค่าต่ำสุดของความหน่วงที่สามารถปรับค่าได้เท่ากัน (5 % ของอัตราส่วนความหน่วงวิกฤติ).....	43

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.7 แสดงประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงปรับค่าที่เลือกค่า $R$ ค่าต่างๆ โดยที่ตัวหน่วงมีค่าต่ำสุดของความหน่วงที่สามารถปรับค่าได้เท่ากัน (10 %ของอัตราส่วนความหน่วงวิกฤติ).....	43
รูปที่ 4.8 แสดงประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงปรับค่าที่เลือกค่า $R$ ค่าต่างๆ โดยที่ช่วงความสามารถในการปรับค่าความหน่วงของตัวหน่วงมีค่าแตกต่างกัน.....	44
รูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบ กึ่งแอกทีฟเมื่อเลือกใช้ตัวหน่วงที่มีช่วงความสามารถในการปรับค่าต่างกัน โดยใช้ค่า $R$ ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละกรณี.....	44
รูปที่ 5.1 แสดงแบบจำลองการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก.....	45
รูปที่ 5.2 แสดงการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของตัวหน่วง.....	46
รูปที่ 5.3 แสดงลักษณะภายในของตัวหน่วงที่บรรจุของเหลวแม่เหล็กปรับค่าไว้ภายใน.....	47
รูปที่ 5.4 แสดงแผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบและการเก็บข้อมูล.....	47
รูปที่ 5.5 แสดงตัวหน่วงที่บรรจุของเหลวแม่เหล็กปรับค่าไว้ภายใน (Magneto-rheological damper).....	48
รูปที่ 5.6 แสดงเครื่องป้อนไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับป้อนไฟฟ้าเข้าสู่ตัวหน่วง (DC. Power supply).....	49
รูปที่ 5.7 แสดงเครื่องออกแรง (Actuator).....	48
รูปที่ 5.8 แสดงแอลวีดีที (LVDT).....	50
รูปที่ 5.9 แสดงหน่วยวัดแรง (Load cell).....	50
รูปที่ 5.10 แสดงเครื่องเก็บข้อมูล (Data logger).....	51
รูปที่ 5.11 แสดงการติดตั้งตัวหน่วงและแอลวีดีทีเข้ากับเครื่องออกแรง.....	52
รูปที่ 5.12 แสดงแผนการควบคุมเครื่องออกแรงซึ่งใช้สำหรับควบคุมความถี่และแอมพลิจูดของการยืดหดตัวหน่วง.....	52
รูปที่ 5.13 แสดงตัวอย่างข้อมูลแรงและระยะการยืดหดของตัวหน่วงที่ได้จากการทดสอบ.....	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 5.14 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงที่เกิดขึ้นในตัวหน่วงและอัตรายึดหดตัวของตัวหน่วงที่ความถี่ต่างกัน (0.3 Hz และ 0.5 Hz) เมื่อป้อนความต่างศักย์ค่าต่างๆ.....	55
รูปที่ 5.15 แสดงข้อมูลการทดสอบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์เข้าสู่ตัวหน่วง.....	55
รูปที่ 5.16 แสดงภาพขยายข้อมูลการทดสอบในช่วงเวลา 98.5 ถึง 99.5 วินาที.....	56
รูปที่ 5.17 แสดงแบบจำลองของตัวหน่วง.....	57
รูปที่ 5.18 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการยึดหดตัวของตัวหน่วงและแรงที่เกิดขึ้นในตัวหน่วงจากการทดสอบสำหรับค่าความต่างศักย์ต่างๆที่ป้อนเข้าสู่ตัวหน่วง.....	58
รูปที่ 5.19 แสดงค่าการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กับข้อมูลที่ได้จากการทดสอบที่ค่าความต่างศักย์ที่ป้อนให้แก่ตัวหน่วง 0, 1, 2, 3, 5 และ 10 โวลท์.....	60
รูปที่ 5.20 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงที่เกิดขึ้นในตัวหน่วงจากผลทดสอบกับค่าแรงที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	60
รูปที่ 6.1 แสดงแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟที่ใช้ตัวหน่วงปรับค่า.....	61
รูปที่ 6.2 แสดงการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวที่มีค่าความเร่งสูงสุดเท่ากับ 0.01 gal ค่าความถี่ของคลื่นมีค่าเท่ากับของความถี่ของโครงสร้าง ในกรณีที่โครงสร้างยังไม่ได้ถูกควบคุมและถูกควบคุมด้วยมวลหน่วงปรับค่าแบบต่างๆ.....	62
รูปที่ 6.3 แสดงการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวที่มีค่าความเร่งสูงสุดเท่ากับ 0.01 gal ค่าความถี่ของคลื่นมีค่า 0.94 เท่าของความถี่ของโครงสร้าง ในกรณีที่โครงสร้างยังไม่ได้ถูกควบคุมและถูกควบคุมด้วยมวลหน่วงปรับค่าแบบต่างๆ.....	63
รูปที่ 6.4 แสดงการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้สัญญาณแผ่นดินไหวที่มีค่าความเร่งสูงสุดเท่ากับ 0.01 gal ค่าความถี่ของคลื่นมีค่า 0.90 เท่าของความถี่ของโครงสร้าง ในกรณีที่โครงสร้างยังไม่ได้ถูกควบคุมและถูกควบคุมด้วยมวลหน่วงปรับค่าแบบต่างๆ.....	63

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 6.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการใช้ตัวหน่วงที่ศึกษาในระบบมวล หน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟ.....	65
รูปที่ 6.6 แสดงประสิทธิภาพของการใช้ตัวหน่วงที่มีค่าแรงสูงสุด 20 กิโลนิวตัน ในระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟ.....	66
รูปที่ 6.7 แสดงการเลือกใช้ตัวหน่วงขนาดไม่เหมาะสมกับค่าความเร่งที่เกิดขึ้นที่ ฐาน.....	67
รูปที่ 6.8 แสดงการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้ลักษณะสัญญาณแผ่นดินไหวที่ เกิดขึ้นที่กรุงเทพมหานครกรณีที่โครงสร้างยังไม่ได้ถูกควบคุมและถูก ควบคุมด้วยมวลหน่วงแบบต่างๆ.....	68
รูปที่ 6.9 แสดงการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้ลักษณะสัญญาณแผ่นดินไหวที่ เกิดขึ้นที่กรุงเม็กซิโกกรณีที่โครงสร้างยังไม่ได้ถูกควบคุมและถูกควบ คุมด้วยมวลหน่วงแบบต่างๆ.....	68
รูปที่ 6.10 แสดงการสั่นไหวของโครงสร้างภายใต้ลักษณะสัญญาณแผ่นดินไหว เอลเซินโทรกรณีที่โครงสร้างยังไม่ได้ถูกควบคุมและถูกควบคุมด้วย มวลหน่วงแบบต่างๆ.....	69
รูปที่ 6.11 แสดงค่าแรงที่ต้องการใช้ในการควบคุมและค่าแรงที่ตัวหน่วงปรับค่า สามารถทำได้ในระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟทางทฤษฎีและ ระบบที่ใช้ตัวหน่วงที่บรรจของเหลวแม่เหล็กปรับค่าในกรณีที่ใช้ลักษณะ คลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นที่กรุงเทพมหานครความเร่งสูงสุด 20 gals.....	70
รูปที่ 6.12 แสดงค่าแรงที่ต้องการใช้ในการควบคุมและค่าแรงที่ตัวหน่วงปรับค่า สามารถทำได้ในระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟทางทฤษฎี และระบบที่ใช้ตัวหน่วงที่บรรจของเหลวแม่เหล็กปรับค่าในกรณีที่ใช้ ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นที่กรุงเม็กซิโกความเร่งสูงสุด 20 gals.....	70
รูปที่ 6.13 แสดงค่าแรงที่ต้องการใช้ในการควบคุมและค่าแรงที่ตัวหน่วงปรับค่า สามารถทำได้ในระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟทางทฤษฎี และระบบที่ใช้ตัวหน่วงที่บรรจของเหลวแม่เหล็กปรับค่าในกรณีที่ใช้ ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวเอลเซินโทรความเร่งสูงสุด 20 gals.....	71



สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 6.14 แสดงผลรวมของพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างและมวลห้วงปรับค่าแบบต่างๆในกรณีที่ใช้ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นที่กรุงเทพมหานคร.....	72
รูปที่ 6.15 แสดงผลรวมของพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างและมวลห้วงปรับค่าแบบต่างๆในกรณีที่ใช้ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นที่กรุงเม็กซิโก.....	72
รูปที่ 6.16 แสดงผลรวมของพลังงานศักย์และพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างและมวลห้วงปรับค่าแบบต่างๆในกรณีที่ใช้ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวเอลเซินโทร.....	73
รูปที่ 6.17 แสดงเทอมของค่าแรงห้วงของโครงสร้างเทียบกับแรงห้วงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงปฏิกิริยาของมวลห้วงในกรณีที่ใช้ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นที่กรุงเทพมหานคร.....	74
รูปที่ 6.18 แสดงเทอมของค่าแรงห้วงของโครงสร้างเทียบกับแรงห้วงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงปฏิกิริยาของมวลห้วงในกรณีที่ใช้ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นที่กรุงเม็กซิโก.....	74
รูปที่ 6.19 แสดงเทอมของค่าแรงห้วงของโครงสร้างเทียบกับแรงห้วงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงปฏิกิริยาของมวลห้วงในกรณีที่ใช้ลักษณะคลื่นแผ่นดินไหวเอลเซินโทร.....	75
รูป ผ.1 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมกับคำตอบแม่นยำกรณีที่ยังไม่มีการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้าง.....	89
รูป ผ.2 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมกรณีที่ยังไม่มีการควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างกับกรณีที่ควบคุมด้วยมวลห้วงปรับค่าแบบแพสส์ฟหนึ่งหน่วยและหลายหน่วยที่ใช้มวลห้วงมีมวลน้อย.....	89
รูป ผ.3 แสดงการเปรียบเทียบสมดุลทางพลศาสตร์ของแรงภายนอกและแรงภายใน.....	90
รูป ผ.4 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมกรณีที่ควบคุมการสั่นไหวของโครงสร้างด้วยมวลห้วงปรับค่าแบบแพสส์ฟหนึ่งหน่วยและมวลห้วงปรับค่าแบบกึ่งแอกทีฟที่มีช่วงการปรับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วงของกรณีแบบแพสส์ฟ.....	90

## สัญลักษณ์

$c$	=	สัมประสิทธิ์ความหน่วง
$c_d$	=	สัมประสิทธิ์ความหน่วงของตัวหน่วง
$c_{d,max}$	=	สัมประสิทธิ์ความหน่วงสูงสุดที่ตัวหน่วงปรับได้
$c_{d,min}$	=	สัมประสิทธิ์ความหน่วงต่ำสุดที่ตัวหน่วงปรับได้
$c_s$	=	สัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้าง
$C$	=	เมตริกซ์ความหน่วง
$F$	=	แรงที่เกิดขึ้นในตัวหน่วงปรับค่า
$F_d$	=	แรงภายนอกที่กระทำต่อมวลหน่วง
$F_s$	=	แรงภายนอกที่กระทำต่อโครงสร้าง
$F_y$	=	แรงที่จุดครากของตัวหน่วงเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น
$F$	=	เมตริกซ์แรง
$G$	=	เมตริกซ์ผลในการควบคุมแบบควอดราติกเชิงเส้น
$J$	=	ดัชนีคุณภาพ
$k_d$	=	สติฟเนสของสปริง
$k_s$	=	สติฟเนสของโครงสร้าง
$K$	=	เมตริกซ์สติฟเนส
$m_d$	=	มวลของมวลหน่วง
$m_s$	=	มวลของโครงสร้าง
$M$	=	เมตริกซ์มวล
$P$	=	เมตริกซ์คำตอบที่ได้จากสมการวิกกาติ
$Q$	=	เมตริกซ์น้ำหนักของการตอบสนองของโครงสร้าง
$R$	=	สัมประสิทธิ์การขยายทางพลศาสตร์
$R$	=	เมตริกซ์น้ำหนักของพลังงานที่ในการควบคุมการสั่นไหว
$u$	=	แรงที่ต้องการใช้ในการควบคุมระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟ
$V$	=	ความต่างศักย์ที่ป้อนสู่ตัวหน่วงปรับค่า
$x$	=	ระยะการยืดหดของตัวหน่วงปรับค่า
$X$	=	เมตริกซ์ระยะการสั่นไหวและความเร็วของโครงสร้างและมวลหน่วง
$y_d$	=	ระยะการสั่นไหวของมวลหน่วงเทียบกับโครงสร้าง
$y_s$	=	ระยะการสั่นไหวของโครงสร้างเทียบกับฐาน

## สัญลักษณ์ (ต่อ)

๓

$y_{ss}$	=	ระยะเวลาสั้นไหวที่สภาวะคงตัว
$y_{st}$	=	ระยะเวลาเคลื่อนตัวสถิต
$\ddot{y}_g$	=	ความเร่งการสั้นไหวที่ฐาน
$Y$	=	เมตริกระยะเวลาสั้นไหวของโครงสร้างและมวลห้วง
$\alpha$	=	อัตราส่วนความถี่ของมวลห้วงต่อความถี่ของโครงสร้าง
$\beta$	=	อัตราส่วนความถี่ของสัญญาณแผ่นดินไหวต่อความถี่ของโครงสร้าง
$\dot{\gamma}$	=	อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉือน
$\eta$	=	สัมประสิทธิ์ความหนืดของของเหลวแม่เหล็กปรับค่า
$\omega$	=	อัตราเร็วเชิงมุมของสัญญาณแผ่นดินไหว
$\omega_d$	=	อัตราเร็วเชิงมุมของมวลห้วง
$\omega_s$	=	อัตราเร็วเชิงมุมของโครงสร้าง
$\xi_d$	=	อัตราส่วนความหน่วงของมวลห้วง
$\xi_s$	=	อัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้าง
$\tau$	=	ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในของเหลวแม่เหล็กปรับค่า
$\tau_{y(field)}$	=	ความเค้นเฉือนครากซึ่งขึ้นกับค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในของเหลวแม่เหล็กปรับค่า