

ผลกระทบของการเปลี่ยนรูปแบบอินีลลาสติกต่อสมรรถนะของมวลหน่วยปรับค่าแบบแอกทีฟ

นาย พินิต บุญยัง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0712-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF INELASTIC DEFORMATION ON PERFORMANCE OF ACTIVE TUNED MASS DAMPER

Mr. Pinit Boonyoung

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 2001


ISBN 974-03-0712-4


พินิต บุญยัง : ผลกระทบของการเปลี่ยนรูปแบบอินอีลาสติกต่อสมรรถนะของมวลหน่วงปรับค่าแบบแอคทีฟ.(EFFECTS OF INELASTIC DEFORMATION ON PERFORMANCE OF ACTIVE TUNED MASS DAMPER) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทศพล ปิ่นแก้ว, 215 หน้า. ISBN 974-03-0712-4.

โครงสร้างทางวิศวกรรมจำนวนมากประสบปัญหาเกี่ยวกับการสั่นไหว เพื่อแก้ไขปัญหาในระบบควบคุมการสั่นไหวจึงได้ถูกนำมาใช้ซึ่งระบบนี้ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแอคทีฟ(Active tuned mass damper) เป็นระบบควบคุมหนึ่งซึ่งนำมาใช้ในโครงสร้าง การออกแบบระบบนี้จะสมมติว่าโครงสร้างมีพฤติกรรมแบบอีลาสติก แม้ว่าโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหวที่รุนแรงจะมีความเสียหายและมีพฤติกรรมแบบอินอีลาสติกแล้วก็ตาม ดังนั้นการวิจัยนี้จึงศึกษาพฤติกรรมอินอีลาสติกของอาคารที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบแอคทีฟและสมรรถนะในการควบคุมการสั่นไหวของมวลหน่วงปรับค่าแบบแอคทีฟ

อาคารตัวอย่างเป็นโครงสร้างที่มีความสูง 10 ชั้น ซึ่งออกแบบรับแรงแนวดิ่งและแรงลมจะถูกวิเคราะห์ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro(1940), SCT(1985) และ Northridge(1994) โดยติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ(Passive tuned mass damper) หรือมวลหน่วงปรับค่าแบบแอคทีฟ (Active tuned mass damper) ที่ชั้นบนสุดของอาคารเพื่อลดการเปลี่ยนตำแหน่งและความเสียหายของอาคาร ประสิทธิภาพของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแอคทีฟจะเปรียบเทียบกับระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีความเร่งที่พื้นดินสูงสุดต่างๆกัน โปรแกรม IDARC V.5 จะถูกปรับปรุงเพื่อสามารถวิเคราะห์อาคารที่ติดตั้งระบบควบคุมการสั่นไหวที่ชั้นบนสุดของอาคารได้และใช้โปรแกรมดังกล่าววิเคราะห์แบบอินอีลาสติกกับอาคารตัวอย่าง

ภายใต้แรงดันด้านข้างแบบสถิตอาคารตัวอย่างสามารถต้านทานแรงด้านข้างได้ 11.5% ของน้ำหนักอาคาร ที่การเปลี่ยนตำแหน่งชั้น 10 เท่ากับ 5.06% ของความสูงอาคาร ภายใต้แผ่นดินไหวขนาดเล็กและขนาดปานกลาง การวิเคราะห์พลวัตน์แบบอินอีลาสติกพบว่ามวลหน่วงปรับค่าแบบแอคทีฟมีประสิทธิภาพมากในการลดการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้นบนสุดเมื่อเปรียบเทียบกับมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ แม้ว่าประสิทธิภาพนี้จะไม่ลดลงมากภายใต้แผ่นดินไหวที่รุนแรงแต่กลับพบว่าความเสียหายในอาคารที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบแอคทีฟมีค่ามากกว่าอาคารที่ไม่ติดตั้งระบบควบคุมและอาคารที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ สมรรถนะในการควบคุมการสั่นไหวที่ไม่พึงประสงค์เกิดมาจากการเปลี่ยนพฤติกรรมอย่างมากของอาคารและอัลกอริทึมในการควบคุมซึ่งไม่พิจารณาความเสียหายในการออกแบบนั่นเอง

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนิสิต 

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

ปีการศึกษา 2544

4270460821 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: : R/C BUILDING / INELASTIC ANALYSIS / DAMAGE ANALYSIS / ACTIVE TUNED MASS DAMPER

MR. PINIT BOONYOUNG: THESIS TITLE. (EFFECTS OF INELASTIC DEFORMATION ON PERFORMANCE OF ACTIVE TUNED MASS DAMPER) THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR DR. TOSPOL PINKAEW, 215 pp. ISBN 974-03-0712-4.

Many slender structures confront with vibration problems. To suppress the vibration, various control systems have been introduced and continually improved. Active tuned mass damper is one of the systems, which is actually adopted for some structures. The design of the system assumes elastic property of the structures although they may be subject to damage and consequently exhibit inelastic behavior under strong earthquakes. Therefore, this present research studies inelastic behavior of a building installed with an active tuned mass damper and its control performance.

A 10-story reinforced concrete building designed for gravity and wind load only is analyzed under El Centro(1940), SCT(1985) and Northridge(1994) earthquakes. A conventional tuned mass damper (TMD) or an active tuned mass damper (ATMD) is installed on the top floor to reduce displacement and damage of the building. The effectiveness of the tuned mass damper and the active tuned mass damper are compared under various peak ground accelerations of the input earthquakes. The IDARC V.5 program is modified to be able to analyze a building equipped with a control system on the top floor and is employed to perform inelastic analyses of the example building.

From pushover analysis, the building can resist lateral force up to 11.5% of its weight with top floor displacement about 5.06% of its height. Based on the results from inelastic dynamic analysis, under small to moderate ground motions, the active tuned mass damper is found to be much effective in reducing the top displacement of the building than TMD . Although this effectiveness is not seriously deteriorated for strong ground motions, the damage in the building is found to be greater than those in both the uncontrolled building and the building with TMD. This undesirable control performance mainly comes from the significant change of the building characteristic and control algorithm, which does not directly take into account the damage in the design of control algorithm.

Department.....	CIVIL ENGINEERING.....	Student's signature.....	<i>P. Boonyoung</i>
Concentration.....	CIVIL ENGINEERING.....	Advisor's signature.....	<i>Tospol Pinkaew</i>
Academic year	2001.....		

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	11
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	12
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	12
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.1 สมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว.....	13
2.1.1 โครงสร้างที่มีพฤติกรรมช่วงยืดหยุ่น.....	14
2.1.2 โครงสร้างที่มีพฤติกรรมช่วงไม่ยืดหยุ่น.....	16
2.2 สมการการเคลื่อนที่ที่ใช้ในโปรแกรม IDARC.....	20
2.2.1 การสร้างสมการรูปเมตริกซ์ของสตีเฟนส.....	20
2.2.2 การจำลองการกระจายพฤติกรรมแบบพลาสติกขององค์อาคาร.....	23
2.2.3 แบบจำลองการเกิดการคราก.....	27
2.2.4 แบบจำลองฮีสเทอริติก.....	27
2.2.5 วิธีวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	30
2.2.6 ดัชนีความเสียหาย.....	32
บทที่ 3 การวิเคราะห์โครงสร้างที่มีการติดตั้งระบบควบคุมการสั่นไหว.....	35
3.1 โครงสร้างที่ไม่มีการติดตั้งระบบควบคุมการสั่นไหว.....	35
3.2 ระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ.....	36

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3 ระบบมวลห้วงแบบแอกทีฟ.....	42
3.4 ระบบมวลห้วงปรับค่าแบบแอกทีฟ.....	46
บทที่ 4 การตรวจสอบโปรแกรมที่ปรับปรุงในช่วงอีลาสติก.....	49
4.1 โครงสร้างที่ไม่มีระบบควบคุมการสั่นไหว.....	52
4.2 ระบบควบคุมการสั่นไหวแบบพาสซีฟ.....	53
4.3 ระบบควบคุมการสั่นไหวแบบแอกทีฟ.....	58
บทที่ 5 อาคารตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย.....	62
5.1 อาคารตัวอย่าง.....	62
5.2 การจำลองอาคารตัวอย่างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์.....	65
5.2.1 การจำลองอาคารตัวอย่าง.....	65
5.2.2 แบบจำลองฮิสเทอเรติก.....	66
5.3 คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษา.....	66
บทที่ 6 พฤติกรรมของอาคารตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหว.....	70
6.1 พฤติกรรมและรูปแบบความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้การวิเคราะห์โดยใช้แรงดันด้านข้าง.....	70
6.2 พฤติกรรมและรูปแบบความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหว.....	77
6.2.1 อาคารตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหว El Centro.....	77
6.2.2 อาคารตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหว Northridge.....	82
6.2.3 อาคารตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหว SCT-85.....	88
6.3 สรุปพฤติกรรมของอาคารตัวอย่าง.....	93
บทที่ 7 การปรับปรุงการตอบสนองของอาคารตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหว.....	94
7.1 การออกแบบระบบควบคุมการสั่นไหว.....	94
7.1.1 การออกแบบมวลห้วงปรับค่าแบบพาสซีฟ.....	96
7.1.2 การออกแบบมวลห้วงแบบแอกทีฟ.....	97

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
7.1.3 การออกแบบมวลทรงปรับค่าแบบแอกทีฟ.....	98
7.2 อาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Cnetro.....	99
7.2.1 อาคารตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหวขนาด 0.10 เท่าของความเร่งเนื่อง จากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	99
7.2.2 อาคารตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหวขนาด 0.25 เท่าของความเร่งเนื่อง จากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	100
7.2.3 อาคารตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหวขนาด 0.40 เท่าของความเร่งเนื่อง จากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	101
7.2.4 อาคารตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหวขนาด 0.85 เท่าของความเร่งเนื่อง จากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	102
7.3 อาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Northridge.....	111
7.3.1 อาคารตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหวขนาด 0.10 เท่าของความเร่งเนื่อง จากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	111
7.3.2 อาคารตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหวขนาด 0.25 เท่าของความเร่งเนื่อง จากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	112
7.3.3 อาคารตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหวขนาด 0.40 เท่าของความเร่งเนื่อง จากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	113
7.3.4 อาคารตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหวขนาด 0.85 เท่าของความเร่งเนื่อง จากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	114
7.4 อาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว SCT-85.....	123
7.4.1 อาคารตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหวขนาด 0.05 เท่าของความเร่งเนื่อง จากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	123
7.4.2 อาคารตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหวขนาด 0.08 เท่าของความเร่งเนื่อง จากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	124
7.4.3 อาคารตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหวขนาด 0.11 เท่าของความเร่งเนื่อง จากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	125

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
7.4.4 อาคารตัวอย่างภายใต้แรงแผ่นดินไหวขนาด 0.15 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	126
บทที่ 8 อภิปรายและวิเคราะห์ผล.....	135
8.1 ลักษณะและคุณสมบัติของอาคารตัวอย่าง.....	135
8.2 คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิจัย.....	137
8.3 ประสิทธิภาพของระบบควบคุมการสั่นไหวในการลดการตอบสนองของอาคาร.....	138
8.4 ประสิทธิภาพของระบบควบคุมการสั่นไหวในการลดความเสียหายของอาคาร.....	143
บทที่ 9 สรุปผลการวิจัย.....	154
บทที่ 10 ข้อเสนอแนะ.....	156
รายการอ้างอิง.....	157
ภาคผนวก.....	161
ประวัติผู้วิจัย.....	215

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความเสียหายของชั้นส่วนโครงสร้างที่ดัชนีความเสียหายต่างๆ	34
ตารางที่ 4.1 ค่าการเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่ใช้คลื่นแผ่นดินไหวฟังก์ชันกัมมันต์	52
ตารางที่ 4.2 ค่าความแตกต่างในการวิเคราะห์โครงสร้างที่ไม่มีการติดตั้งระบบควบคุมการสั่นไหว	53
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟที่ใช้คลื่นแผ่นดินไหวฟังก์ชันกัมมันต์	55
ตารางที่ 4.4 ค่าความแตกต่างในการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ	56
ตารางที่ 4.5 ค่าความคลาดเคลื่อนของสมการสมดุล	57
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟ	61
ตารางที่ 4.7 ค่าความแตกต่างในการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟ	61
ตารางที่ 5.1 แรงลมสำหรับอาคารตามเทศบัญญัติกรุงเทพมหานคร พ.ศ.2522	62
ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติของตัวแปรฮีสเทอเร็ติกที่ใช้ในการวิเคราะห์	66
ตารางที่ 8.1 แรงจากระบบควบคุมการสั่นไหวที่กระทำกับโครงสร้างหลัก	139
ตารางที่ 8.2 ความสามารถในการรับแรงแผ่นดินไหวที่เพิ่มขึ้นก่อนเกิดการครากในเสา	143
ตารางที่ 8.3 การเปลี่ยนตำแหน่งที่จุดครากของชั้นและค่าการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดของชั้น	145

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหวและสมมูลของแรง.....	13
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ทั้งหมดกับการเคลื่อนที่ของพื้นดินและการเคลื่อนที่สัมพัทธ์.....	15
รูปที่ 2.3 โครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่นและในช่วงไม่ยืดหยุ่น.....	15
รูปที่ 2.4 แรงและการเปลี่ยนตำแหน่งสำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น.....	17
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนตำแหน่ง.....	18
รูปที่ 2.6 พฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร.....	19
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัด.....	19
รูปที่ 2.8 ดัชนีความอิสระสำหรับชิ้นส่วนเสา และ คาน.....	21
รูปที่ 2.9 การกระจายความโค้งของชิ้นส่วน.....	24
รูปที่ 2.10 แบบจำลองการกระจายพลาสติก.....	25
รูปที่ 2.11 ความยาวระยะครากสำหรับชิ้นส่วนที่มีพฤติกรรมเป็นอินอีลาสติกตลอดทั้งชิ้นส่วน.....	25
รูปที่ 2.12 แบบจำลองฮิสเทอเร็ติกแบบ 3 ตัวแปรของ Park.....	28
รูปที่ 3.1 โครงสร้างที่มีดัชนีของความอิสระเท่ากับ 1 ภายใต้แรงแผ่นดินไหว.....	35
รูปที่ 3.2 รูปอิสระของโครงสร้างที่มีดัชนีของความอิสระเท่ากับ 1.....	35
รูปที่ 3.3 ภาพแสดงแบบจำลองของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ.....	36
รูปที่ 3.4 รูปอิสระของโครงสร้างหลักและมวลหน่วงปรับค่าแบบแพสซีฟ.....	37
รูปที่ 3.5 ลำดับขั้นตอนในการวิเคราะห์ของโปรแกรม IDARC.....	38
รูปที่ 3.6 ลำดับขั้นตอนในการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ของโปรแกรม IDARC.....	39
รูปที่ 3.7 แบบจำลองของระบบมวลหน่วงแบบแอกทีฟ.....	42
รูปที่ 3.8 แผนผังขั้นตอนการทำงานในระบบมวลหน่วงแบบแอกทีฟ.....	43
รูปที่ 3.9 รูปอิสระของโครงสร้างหลักและมวลหน่วงแบบแอกทีฟ.....	43
รูปที่ 3.10 ภาพแสดงแบบจำลองของระบบมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟ.....	46
รูปที่ 3.11 รูปอิสระของโครงสร้างหลักและมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟ.....	47
รูปที่ 4.1 โครงสร้างที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม MATLAB.....	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.2 ผลการตรวจสอบโปรแกรมโดยใช้ระบบควบคุมแบบแฟลสซีฟ.....	50
รูปที่ 4.3 โครงสร้างที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม IDARC.....	50
รูปที่ 4.4 การเคลื่อนที่ที่ชั้นบนสุดของโครงสร้าง.....	52
รูปที่ 4.5 โครงสร้างที่มีการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบแฟลสซีฟ.....	54
รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบแฟลสซีฟ.....	55
รูปที่ 4.7 แรงกระทำเทียบเท่าและค่าความคลาดเคลื่อนของสมการสมดุลของชั้นที่ 3.....	57
รูปที่ 4.8 แรงกระทำเทียบเท่าและค่าความคลาดเคลื่อนของสมการสมดุลของ มวลหน่วงปรับค่าแบบแฟลสซีฟ.....	57
รูปที่ 4.9 โครงสร้างที่มีการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟ.....	58
รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าแบบแอกทีฟ.....	60
รูปที่ 5.1 รูปแปลนและรูปด้านข้างของอาคารตัวอย่าง.....	63
รูปที่ 5.2 รายละเอียดเหล็กเสริมในชั้นส่วนของอาคารตัวอย่าง.....	65
รูปที่ 5.3 คลื่นแผ่นดินไหว El Centro ปี 1940.....	67
รูปที่ 5.4 คลื่นแผ่นดินไหว Northridge ปี 1994.....	67
รูปที่ 5.5 คลื่นแผ่นดินไหว SCT S00E ปี 1984.....	67
รูปที่ 5.6 ความถี่ของคลื่นแผ่นดินไหว El Centro.....	68
รูปที่ 5.7 ความถี่ของคลื่นแผ่นดินไหว Northridge.....	68
รูปที่ 5.8 ความถี่ของคลื่นแผ่นดินไหว SCT S00E.....	69
รูปที่ 6.1 แรงกระทำด้านข้างภายใต้การวิเคราะห์แบบสถิต.....	70
รูปที่ 6.2 สัมประสิทธิ์แรงเฉือนที่ฐานกับการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้นที่ 10 ภายใต้การ ดันด้วยแรงด้านข้างแบบสถิต.....	71
รูปที่ 6.3 การเปลี่ยนตำแหน่งของอาคารตัวอย่างภายใต้การดันด้วยแรงด้านข้าง แบบสถิต.....	72
รูปที่ 6.4 รูปแปลนและรูปด้านหน้าของอาคารตัวอย่างแสดงเสาแนว A.....	75
รูปที่ 6.5 รูปแบบความเสียหายภายใต้การดันด้วยแรงด้านข้างที่อัตราส่วนการ เปลี่ยนตำแหน่งชั้นที่ 10 กับความสูงอาคารตัวอย่าง.....	76

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 6.6 ค่าความเสียหายในเสาในแนวตัวอย่างภายใต้การดินด้วยแรงด้านข้างจน อาคารวิบัติ.....	77
รูปที่ 6.7 การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่ชั้นต่างๆของอาคารตัวอย่างภายใต้ คลื่นแผ่นดินไหว El Centro.....	79
รูปที่ 6.8 การเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างชั้นสูงสุดที่ชั้นต่างๆของอาคารตัวอย่างภายใต้ คลื่นแผ่นดินไหว El Centro.....	79
รูปที่ 6.9 รูปแบบความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro.....	80
รูปที่ 6.10 ค่าความเสียหายในเสาในแนว A ของอาคารตัวอย่างภายใต้ คลื่นแผ่นดินไหว El Centro.....	81
รูปที่ 6.11 การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่ชั้นต่างๆของอาคารตัวอย่างภายใต้ คลื่นแผ่นดินไหว Northridge.....	83
รูปที่ 6.12 การเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างชั้นสูงสุดที่ชั้นต่างๆของอาคารตัวอย่างภายใต้ คลื่นแผ่นดินไหว Northridge.....	84
รูปที่ 6.13 รูปแบบความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Northridge.....	85
รูปที่ 6.14 ค่าความเสียหายในเสาในแนว A ของอาคารตัวอย่างภายใต้ คลื่นแผ่นดินไหว Northridge.....	86
รูปที่ 6.15 การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่ชั้นต่างๆของอาคารตัวอย่างภายใต้ คลื่นแผ่นดินไหว SCT-85.....	89
รูปที่ 6.16 การเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างชั้นสูงสุดที่ชั้นต่างๆของอาคารตัวอย่างภายใต้ คลื่นแผ่นดินไหว SCT-85.....	90
รูปที่ 6.17 รูปแบบความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว SCT-85.....	91
รูปที่ 6.18 ค่าความเสียหายในเสาในแนว A ของอาคารตัวอย่างภายใต้ คลื่นแผ่นดินไหว SCT-85.....	92
รูปที่ 7.1 การออกแรงกระทำเพื่อหาค่าสตีเฟนส.....	95
รูปที่ 7.2 การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่ชั้นต่างๆของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่น แผ่นดินไหว El Centro.....	104

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 7.3 การเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างชั้นสูงสุดที่ชั้นต่างๆของอาคารตัวอย่างภายใต้ คลื่นแผ่นดินไหว El Centro.....	105
รูปที่ 7.4 รูปแบบความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro ขนาด 0.10 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	106
รูปที่ 7.5 รูปแบบความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro ขนาด 0.25 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	107
รูปที่ 7.6 รูปแบบความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro ขนาด 0.40 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	108
รูปที่ 7.7 รูปแบบความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro ขนาด 0.85 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	109
รูปที่ 7.8 ค่าความเสียหายในเสาในแนว A ของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro.....	110
รูปที่ 7.9 การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่ชั้นต่างๆของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่น แผ่นดินไหว Northridge.....	116
รูปที่ 7.10 การเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างชั้นสูงสุดที่ชั้นต่างๆของอาคารตัวอย่างภายใต้ คลื่นแผ่นดินไหว Northridge.....	117
รูปที่ 7.11 รูปแบบความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Northridge ขนาด 0.10 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	118
รูปที่ 7.12 รูปแบบความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Northridge ขนาด 0.25 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	119
รูปที่ 7.13 รูปแบบความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Northridge ขนาด 0.40 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	120
รูปที่ 7.14 รูปแบบความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Northridge ขนาด 0.85 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	121
รูปที่ 7.15 ค่าความเสียหายในเสาในแนว A ของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Northridge.....	122

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 7.16 การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่ชั้นต่างๆของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว SCT-85.....	128
รูปที่ 7.17 การเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างชั้นสูงสุดที่ชั้นต่างๆของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว SCT-85.....	129
รูปที่ 7.18 รูปแบบความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว SCT-85 ขนาด 0.10 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	130
รูปที่ 7.19 รูปแบบความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว SCT-85 ขนาด 0.25 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	131
รูปที่ 7.20 รูปแบบความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว SCT-85 ขนาด 0.40 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	132
รูปที่ 7.21 รูปแบบความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว SCT-85 ขนาด 0.85 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	133
รูปที่ 7.22 ค่าความเสียหายในเสาในแนว A ของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว SCT-85.....	134
รูปที่ 8.1 การกระจายโมเมนต์ในชั้นส่วน.....	136
รูปที่ 8.2 การลดลงของการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดชั้นที่ 10 เทียบกับอาคารที่ไม่มีระบบควบคุม.....	141
รูปที่ 8.3 การลดลงของ RMS รอบแกนการสั่นของชั้นที่ 10 เทียบกับอาคารที่ไม่มีระบบควบคุม.....	142
รูปที่ 8.4 การวิเคราะห์ด้วยแรงดันทางด้านข้างจนชั้นที่พิจารณาวิบัติ.....	148
รูปที่ 8.5 ค่าความเสียหายของอาคารภายใต้คลื่น El Centro.....	149
รูปที่ 8.6 ค่าความเสียหายของอาคารภายใต้คลื่น Northridge.....	150
รูปที่ 8.7 ค่าความเสียหายของอาคารภายใต้คลื่น SCT.....	151
รูปที่ 8.8 ค่าความเสียหายสูงสุดของอาคารในแต่ละคลื่นแผ่นดินไหว.....	152