

ความต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปราศจากความเหนียว

นายภัทรายุส ไวจรรยา



สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-547-7

ลิขสิทธิ์ของ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**SEISMIC RESISTANCE OF NON-DUCTILE REINFORCED CONCRETE BUILDINGS**



**MR. PATTARAYOOS VAIJUNYA**

**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 1999**

**ISBN 974-334-547-7**

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ความต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปราศจากความเหนียว

โดย

นายภัทรายุส ไวจรรยา

ภาควิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย เป็นส่วนหนึ่งของการ  
ศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิตศึกษา



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปิณฑุภาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



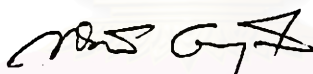
ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์)



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว)



กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาตรี)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภัทรายุส ไวจรรยา : ความต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ปราศจากความเหนียว.  
(SEISMIC RESISTANCE OF NON-DUCTILE REINFORCED CONCRETE BUILDINGS) อ. ที่  
ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว, 134 หน้า. ISBN 974-334-547-7.

แม้กรุงเทพมหานครไม่อยู่ในบริเวณที่มีโอกาสเกิดแผ่นดินไหวขนาดรุนแรง แต่ภัยคุกคามจากแผ่นดินไหว  
ระยะไกลไม่สามารถมองข้ามได้ เนื่องจากผลของชั้นดินอ่อนภายใต้กรุงเทพมหานครซึ่งมีผลในการขยายขนาดคลื่น  
แผ่นดินไหว จึงควรมีการศึกษาและเตรียมการป้องกันไว้ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมและความเสียหายของ  
อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ภายใต้แผ่นดินไหวระยะไกล และได้ศึกษาพฤติกรรม  
ของอาคารดังกล่าวเมื่อติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าไว้ที่ชั้นบน

ในงานวิจัยนี้ศึกษาอาคารความสูง 20 ชั้น ออกแบบด้วยวิธีกำลังและไม่คำนึงถึงผลเนื่องจากแผ่นดินไหว  
อาศัยข้อกำหนดของ ACI 318-95 เสริมเหล็กต่อเนื่องตลอด ใช้คลื่นแผ่นดินไหว SCT-85 และ BYK-95 กระทำกับ  
อาคารตัวอย่างโดยเปลี่ยนขนาดแรงแผ่นดินไหวเป็นค่าต่างๆ กัน นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการปรับปรุงอาคารตัวอย่าง  
ดังกล่าวด้วยมวลหน่วงปรับค่าแบบพาสซีฟ (Passive tuned mass damper) เพื่อลดการตอบสนองและความเสียหาย  
ของอาคาร ในการวิเคราะห์ความเสียหายของอาคาร ใช้คอมพิวเตอร์โปรแกรม IDARC ซึ่งสามารถวิเคราะห์  
พฤติกรรมของโครงสร้างในช่วงไม่ยืดหยุ่นได้

ผลการศึกษาพบว่าภายใต้แรงดันด้านข้างแบบสถิต อาคารตัวอย่างสามารถต้านทานแรงด้านข้างได้  
11.7% ของน้ำหนักอาคาร ที่การเปลี่ยนตำแหน่งชั้น 20 เท่ากับ 2.1% ของความสูงอาคาร และภายใต้แรงแผ่นดิน  
ไหวพบว่าเกิดการครากขึ้นก่อนในคานและที่แผ่นดินไหวขนาดรุนแรงจะมีการครากเกิดในคานโดยตลอดและเกิด  
การครากในเสาและผนัง ตามลำดับ และที่แผ่นดินไหวขนาดรุนแรงโครงสร้างมีพฤติกรรมเป็นแบบการคดเนื่องจาก  
ความเสียหายในคานทำให้การยึดรั้งจากโครงข้อแข็งลดลง สำหรับการติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าพบว่าสามารถลด  
การตอบสนองของอาคารได้ดีในกรณีแผ่นดินไหวขนาดไม่รุนแรง และประสิทธิภาพจะต่ำลงเมื่อความเสียหายเพิ่ม  
มากขึ้น อันเป็นผลเนื่องมาจากคุณสมบัติด้านพลวัตของอาคารเปลี่ยนแปลงไป มวลหน่วงปรับค่าจึงไม่สามารถ  
ทำงานได้ดี

ภาควิชา ..... วิศวกรรมโยธา ..... ลายมือชื่อนิสิต ..... ภัทรายุส ไวจรรยา  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมโยธา ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ปีการศึกษา 2542

# # 4070369221 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: R/C BUILDING / INELASTIC ANALYSIS / DAMAGE ANALYSIS / TUNED MASS DAMPER  
PATTARAYOOS VAIJUNYA : SEISMIC RESISTANCE OF NON-DUCTILE REINFORCED  
CONCRETE BUILDINGS. THESIS ADVISOR : TOSPOL PINKAEW, Ph.D. 134 pp. ISBN 974-  
334-547-7.

Although Bangkok Metropolitan is considered to be low in seismicity, but the threat from distant earthquakes cannot be overlooked due to the effect of soil amplification of ground motions caused by soft soil strata underlying Bangkok Metropolitan area. It is, therefore, worth investigating the seismic behavior of tall buildings in the region and seeking for preventive measures against failure of high-rise buildings. This research studies the behavior and damage pattern of a non-ductile reinforced concrete building under distant earthquakes. The behavior and performance of building with a passive tuned mass damper (TMD) installed on the top floor was also examined.

A 20-story reinforced concrete building designed in accordance with the ultimate strength design method (ACI 318-95) for gravity and wind load only was analyzed under the SCT-85 and BYK-95 earthquakes with varying peak ground accelerations. The passive tuned mass damper was modeled as an extra story on the top floor of the building. The IDARC program was employed to perform inelastic analyses of the building, first without tuned mass damper and then with tuned mass damper equipped.

Under the push-over analysis, the building can resist a lateral force equivalent to base shear coefficient of about 11.7% of its weight with the top displacement of 2.1% the building height. The passive tuned mass damper was found to be effective in reducing the building response and building damage only in the case of small ground motions. Its effectiveness was reduced as the damage increased due to detuning caused by the change in dynamic characteristics of the building.

ภาควิชา ..... วิศวกรรมโยธา ..... ลายมือชื่อนิสิต ..... พัทธดนย์ พงษ์สง  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมโยธา ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ปีการศึกษา 2542

## กิตติกรรมประกาศ



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จส่งลงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดีของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็น ในการวิจัยมาโดยตลอด นอกจากนั้นผู้วิจัยยังขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาติวี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) และทางบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทางด้านเงินทุนที่ใช้ในงานวิจัย

ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่กรุณาอบรมสั่งสอนมา และที่สำคัญผู้วิจัยขอขอบพระคุณคุณพ่อคุณแม่ รวมทั้งญาติที่ช่วยให้กำลังใจและผลักดันจนสามารถเป็นดังวันนี้ได้ บรรดาผองเพื่อนทุกคนที่ช่วยให้เกิดความผ่อนคลายและช่วยในการเรียนที่ดีตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ข
สารบัญ.....	ค
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 งานวิจัยในอดีต.....	2
1.2 วัตถุประสงค์.....	6
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	7
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	7
บทที่ 2 การวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว	
2.1 สมการการเคลื่อนที่ของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว.....	8
2.1.1 โครงสร้างที่มีพฤติกรรมช่วงยึดหยุ่น.....	9
2.1.2 โครงสร้างที่มีพฤติกรรมช่วงไม่ยึดหยุ่น.....	10
2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่า.....	14
2.3 ดัชนีความเสียหาย (Damage Index).....	16
บทที่ 3 แบบจำลองโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและการวิเคราะห์ความเสียหาย	
3.1 การวิเคราะห์โมเมนต์ดัดและความโค้งของหน้าตัดชิ้นส่วนอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	18
3.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของคอนกรีต.....	19
3.1.1.1 คอนกรีตที่อยู่ภายนอกเหล็กปลอก (Unconfined concrete).....	19
3.1.1.2 คอนกรีตที่อยู่ภายในเหล็กปลอก (Confined concrete).....	20
3.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กเสริมตามยาว.....	22
3.2 แบบจำลองโครงสร้างที่มีพฤติกรรมช่วงไม่ยึดหยุ่น	
3.2.1 การจำลองเสา, คาน และผนัง	
และการสร้างสมการรูปร่างเมตริกซ์ของสติฟเนส.....	28
3.2.2 การคำนวณค่าความสัมพันธ์โมเมนต์และความโค้ง	
(Moment-curvature relationship) ของหน้าตัด จากโปรแกรม IDARC.....	32

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า	
3.2.3		
แบบจำลองการกระจายพฤติกรรมแบบพลาสติกขององค์อาคาร (Spread plasticity model).....	34	
3.2.4		
แบบจำลองการเกิดการคราก (Yield penetration model).....	36	
3.2.5		
พฤติกรรมของโครงสร้างในช่วงไม่ยืดหยุ่น.....	36	
3.2.6		
วิธีการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์, IDARC2D v. 4.0.....	39	
3.3		
การวิเคราะห์ค่าความเสียหาย (Damage analysis).....	41	
บทที่ 4	อาคารตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย	
4.1	อาคารตัวอย่าง.....	43
4.2	การจำลองอาคารตัวอย่างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์.....	46
4.2.1	การจำลองอาคารตัวอย่าง.....	46
4.2.2	แบบจำลองฮีสเทเรติก (Hysteretic model).....	47
4.3	การจำลองมวลหน่วงปรับค่าติดตั้งไว้ที่ชั้นบนของอาคารตัวอย่าง.....	47
4.4	คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษา.....	50
บทที่ 5	พฤติกรรมของอาคารตัวอย่างภายใต้แผ่นดินไหว	
5.1	พฤติกรรมและรูปแบบความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้ การวิเคราะห์โดยใช้แรงดันด้านข้าง.....	53
5.2	พฤติกรรมและรูปแบบความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้แผ่นดินไหว.....	63
5.2.1	อาคารตัวอย่างภายใต้แผ่นดินไหวขนาด 0.001 เท่าของความเร่ง เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	63
5.2.2	อาคารตัวอย่างภายใต้แผ่นดินไหวขนาด 0.010 เท่าของความเร่ง เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	65
5.2.3	อาคารตัวอย่างภายใต้แผ่นดินไหวขนาด 0.050 เท่าของความเร่ง เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	66
5.2.4	อาคารตัวอย่างภายใต้แผ่นดินไหวขนาด 0.098 เท่าของความเร่ง เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	67
5.2.5	อาคารตัวอย่างภายใต้แผ่นดินไหวขนาด 0.2 เท่าของความเร่ง เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	70



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
บทที่ 6 การปรับปรุงการตอบสนองของอาคารตัวอย่างภายใต้แผ่นดินไหว ด้วยมวลหน่วงปรับค่า	
6.1 พฤติกรรมของอาคารตัวอย่างภายใต้แผ่นดินไหว.....	76
6.1.1 อาคารตัวอย่างภายใต้แผ่นดินไหวขนาด 0.001 เท่าของความเร่ง เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	76
6.1.2 อาคารตัวอย่างภายใต้แผ่นดินไหวขนาด 0.01 เท่าของความเร่ง เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	78
6.1.3 อาคารตัวอย่างภายใต้แผ่นดินไหวขนาด 0.05 เท่าของความเร่ง เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	79
6.1.4 อาคารตัวอย่างภายใต้แผ่นดินไหวขนาด 0.098 เท่าของความเร่ง เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	81
6.1.5 อาคารตัวอย่างภายใต้แผ่นดินไหวขนาด 0.2 เท่าของความเร่ง เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก.....	84
บทที่ 7 อภิปรายและวิเคราะห์ผล	
7.1 การวิเคราะห์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวกับการคืนด้วยแรงต้านข้างแบบสถิต.....	91
7.2 การเปลี่ยนตำแหน่งของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว.....	95
7.3 รูปแบบความเสียหายและค่าความเสียหายของอาคารภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว.....	97
7.4 ประสิทธิภาพของมวลหน่วงปรับค่าในการลดการตอบสนองของอาคาร.....	99
บทที่ 8 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
8.1 สรุปผล.....	105
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	106
รายการอ้างอิง.....	108
ภาคผนวก.....	111
ประวัติผู้วิจัย.....	134

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของฮีสเทอเร็ติกที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	47
ตารางที่ 5.1 การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่ชั้น 20 ภายใต้แผ่นดินไหว.....	73
ตารางที่ 5.2 การเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุด (Maximum Story Drift) ของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่น SCT-85.....	74
ตารางที่ 5.3 การเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุด (Maximum Story Drift) ของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่น BYK-95.....	75
ตารางที่ 6.1 การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่ชั้น 20 ภายใต้แผ่นดินไหว เปรียบเทียบกรณีไม่มีและมียลหน่วงปรับค่า.....	87
ตารางที่ 6.2 การเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุด (Maximum Story Drift) ของอาคารตัวอย่าง ภายใต้คลื่น SCT-85 เปรียบเทียบกรณีไม่มีและมียลหน่วงปรับค่า.....	88
ตารางที่ 6.3 การเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุด (Maximum Story Drift) ของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่น BYK-95 เปรียบเทียบกรณีไม่มีและมียลหน่วงปรับค่า.....	89
ตารางที่ 7.1 การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ของอาคารตัวอย่าง.....	90

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญญภาพ

ภาพประกอบ

หน้า

รูปที่ 1.1 ลักษณะการเสริมเหล็กรับแรงดึงในคาน.....	2
รูปที่ 2.1(ก) โครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหว.....	8
รูปที่ 2.1(ข) สมดุลของแรง.....	8
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ทั้งหมดกับการเคลื่อนที่ของพื้นดิน และการเคลื่อนที่สัมพัทธ์.....	10
รูปที่ 2.3(ก) โครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยึดหยุ่น.....	10
รูปที่ 2.3(ข) โครงสร้างที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงไม่ยึดหยุ่น.....	10
รูปที่ 2.4 แรงและการเปลี่ยนตำแหน่งสำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรม แบบยึดหยุ่นและไม่ยึดหยุ่น.....	12
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนตำแหน่ง.....	13
รูปที่ 2.6 พฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำแบบเป็นวัฏจักร.....	13
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัด.....	14
รูปที่ 2.8 โครงข้อแข็งพอร์ทอลที่ติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าไว้ที่ชั้นบน.....	14
รูปที่ 2.9 สัมประสิทธิ์การขยายการตอบสนองกับอัตราส่วนของความถี่ของแรงกับโครงสร้าง.....	15
รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสำหรับคอนกรีตที่ไม่มีผลของเหล็กปลอก.....	19
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสำหรับคอนกรีตที่คิดผลของเหล็กปลอก.....	20
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสำหรับเหล็กเสริมตามยาว.....	22
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าโมเมนต์และความโค้ง.....	23
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการคำนวณค่าแรงอัดในคอนกรีตที่อยู่ภายนอกเหล็กปลอก(Unconfined concrete).....	24
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการคำนวณค่าแรงอัดในคอนกรีตที่อยู่ภายในเหล็กปลอก(Confined concrete).....	25
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการคำนวณค่าแรงดึงในคอนกรีต.....	26
รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการคำนวณค่าแรงในเหล็กเสริมตามยาว.....	27
รูปที่ 3.9(ก) ดัชนีของความอิสระสำหรับเสา.....	29
รูปที่ 3.9(ข) ดัชนีของความอิสระสำหรับคาน.....	29
รูปที่ 3.9(ค) ดัชนีของความอิสระสำหรับผนัง.....	29
รูปที่ 3.10 หน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับการวิเคราะห์หาโมเมนต์และความโค้ง โดยวิธีแบ่งเป็นส่วนย่อย.....	32
รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดสำหรับคอนกรีต โดยไม่คำนึงผลของเหล็กปลอก.....	33
รูปที่ 3.12 การกระจายความโค้งของชิ้นส่วน (Curvature distribution).....	34
รูปที่ 3.13 แบบจำลองการกระจายพลาสติก (Spread plasticity model).....	35
รูปที่ 3.14 ความยาวระยะคราก (Yield penetration length) สำหรับชิ้นส่วน ที่มีพฤติกรรมเป็นแบบไม่ยึดหยุ่นตลอดชิ้นส่วน.....	35

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.15 แบบจำลองพฤติกรรมช่วงไม่ยืดหยุ่น (Hysteretic model).....	37
รูปที่ 4.1 รูปแปลงและรูปด้านหน้าของอาคารตัวอย่าง.....	44
รูปที่ 4.2 รายละเอียดเหล็กเสริมในชิ้นส่วนของอาคารตัวอย่าง.....	46
รูปที่ 4.3 การติดตั้งมวลหน่วงปรับค่าบนโครงข้อแข็งพอร์ทอล.....	48
รูปที่ 4.4 ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของการเปลี่ยนตำแหน่งชั้น 20 กับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง.....	49
รูปที่ 4.5 ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของการเปลี่ยนตำแหน่งชั้น 21 กับค่าสัมประสิทธิ์ความหน่วง.....	49
รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ภายใต้แรงกระทำที่ฐานรูปไซน์.....	49
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนตำแหน่งของมวลหน่วงปรับค่าเทียบกับโครงสร้างภายใต้แรงกระทำที่ฐานรูปไซน์.....	50
รูปที่ 4.8 คลื่นแผ่นดินไหวที่วัดได้ที่กรุงเม็กซิโก ปี 1985 (SCT-85 S00E).....	50
รูปที่ 4.9 คลื่นแผ่นดินไหวที่วัดได้ที่ฐานอาคารโบหยก 1 ปี 1995 (BYK-95).....	51
รูปที่ 4.10 ความถี่ของคลื่น SCT-85 S00E.....	51
รูปที่ 4.11 ความถี่ของคลื่น BYK-95.....	52
รูปที่ 5.1 แรงกระทำด้านข้างภายใต้การวิเคราะห์แบบสถิต.....	53
รูปที่ 5.2 สัมประสิทธิ์แรงเฉือนที่ฐานกับการเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ภายใต้การดันด้วยแรงด้านข้างแบบสถิต.....	54
รูปที่ 5.3 (ก) การเปลี่ยนตำแหน่งของอาคารตัวอย่างภายใต้การดันด้วยแรงด้านข้างแบบสถิต ณ จุด A (รูปที่ 5.2) การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 มีค่า 0.22% ของความสูงทั้งหมด.....	54
รูปที่ 5.3 (ข) การเปลี่ยนตำแหน่งของอาคารตัวอย่างภายใต้การดันด้วยแรงด้านข้างแบบสถิต ณ จุด B (รูปที่ 5.2) การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 มีค่า 2.11% ของความสูงทั้งหมด.....	55
รูปที่ 5.4 รูปแบบความเสียหายภายใต้การดันด้วยแรงด้านข้าง ที่อัตราส่วนการเปลี่ยนตำแหน่งชั้น 20 กับความสูงอาคารตัวอย่าง.....	61
รูปที่ 5.5 ค่าความเสียหายของชิ้นส่วนในอาคารตัวอย่าง ภายใต้การดันด้วยแรงด้านข้าง.....	62
รูปที่ 5.6(ก) การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ของอาคารตัวอย่างภายใต้ SCT-85 ขนาด 0.001g.....	63
รูปที่ 5.6(ข) การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ของอาคารตัวอย่าง ภายใต้ BYK-95 ขนาด 0.001g.....	64
รูปที่ 5.7 การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดของอาคารตัวอย่าง ภายใต้ SCT-85 ขนาด 0.001g.....	64
รูปที่ 5.8 การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดของอาคารตัวอย่าง ภายใต้ BYK-95 ขนาด 0.001g.....	64
รูปที่ 5.9 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคารตัวอย่าง ภายใต้แผ่นดินไหวขนาด 0.01 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง.....	65
รูปที่ 5.10 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคารตัวอย่าง ภายใต้แผ่นดินไหวขนาด 0.05 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง.....	67
รูปที่ 5.11(ก) การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ของอาคารตัวอย่าง ภายใต้ SCT-85 ขนาด 0.098g.....	68

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 5.11(ข) การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ของอาคารตัวอย่าง ภายใต้ BYK-95 ขนาด 0.098g.....	69
รูปที่ 5.12 การตอบสนองของอาคารตัวอย่างภายใต้ SCT-85 0.098g.....	69
รูปที่ 5.13 การตอบสนองของอาคารตัวอย่างภายใต้ BYK-95 0.098g.....	69
รูปที่ 5.14 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคารตัวอย่าง ภายใต้แผ่นดินไหวขนาด 0.098 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง.....	70
รูปที่ 5.15(ก) การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ของอาคารตัวอย่างภายใต้ SCT-85 ขนาด 0.2g.....	71
รูปที่ 5.15(ข) การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ของอาคารตัวอย่างภายใต้ BYK-95 ขนาด 0.2g.....	72
รูปที่ 5.16 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคารตัวอย่าง ภายใต้แผ่นดินไหวขนาด 0.2 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง.....	72
รูปที่ 6.1(ก) การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ของอาคารตัวอย่าง ภายใต้ SCT-85 ขนาด 0.001g เปรียบเทียบกรณีไม่มีและมิมวลหน่วงปรับค่า.....	76
รูปที่ 6.1(ข) การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ของอาคารตัวอย่าง ภายใต้ BYK-95 ขนาด 0.001g เปรียบเทียบกรณีไม่มีและมิมวลหน่วงปรับค่า.....	77
รูปที่ 6.2 การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดของอาคารตัวอย่าง ภายใต้ SCT-85 ขนาด 0.001g เปรียบเทียบกรณีไม่มีและมิมวลหน่วงปรับค่า.....	77
รูปที่ 6.3 การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดของอาคารตัวอย่าง ภายใต้ BYK-95 ขนาด 0.001g เปรียบเทียบกรณีไม่มีและมิมวลหน่วงปรับค่า.....	77
รูปที่ 6.4 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคารตัวอย่างที่มีมวลหน่วงปรับค่า ภายใต้แผ่นดินไหวขนาด 0.01 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง.....	78
รูปที่ 6.5(ก) การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ของอาคารตัวอย่าง ภายใต้ SCT-85 ขนาด 0.05g เปรียบเทียบกรณีไม่มีและมิมวลหน่วงปรับค่า.....	80
รูปที่ 6.5(ข) การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ของอาคารตัวอย่าง ภายใต้ BYK-95 ขนาด 0.05g เปรียบเทียบกรณีไม่มีและมิมวลหน่วงปรับค่า.....	80
รูปที่ 6.6 การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดของอาคารตัวอย่าง ภายใต้ SCT-85 ขนาด 0.05g เปรียบเทียบกรณีไม่มีและมิมวลหน่วงปรับค่า.....	80
รูปที่ 6.7 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคารตัวอย่างที่มีมวลหน่วงปรับค่า ภายใต้แผ่นดินไหวขนาด 0.05 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง.....	81
รูปที่ 6.8(ก) การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ของอาคารตัวอย่าง ภายใต้ SCT-85 ขนาด 0.098g เปรียบเทียบกรณีไม่มีและมิมวลหน่วงปรับค่า.....	82
รูปที่ 6.8(ข) การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ของอาคารตัวอย่าง ภายใต้ BYK-95 ขนาด 0.098g เปรียบเทียบกรณีไม่มีและมิมวลหน่วงปรับค่า.....	82

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 6.9 การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดของอาคารตัวอย่าง ภายใต้ SCT-85 ขนาด 0.098g เปรียบเทียบกรณีไม่มีและมิมวลหน่วงปรับค่า.....	82
รูปที่ 6.10 การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดของอาคารตัวอย่าง ภายใต้ BYK-95 ขนาด 0.098g เปรียบเทียบกรณีไม่มีและมิมวลหน่วงปรับค่า.....	83
รูปที่ 6.11 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคารตัวอย่างที่มีมวลหน่วงปรับค่า ภายใต้แผ่นดินไหวขนาด 0.098 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง.....	83
รูปที่ 6.12(ก) การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ของอาคารตัวอย่าง ภายใต้ SCT-85 ขนาด 0.2g เปรียบเทียบกรณีไม่มีและมิมวลหน่วงปรับค่า.....	84
รูปที่ 6.12(ข) การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 ของอาคารตัวอย่าง ภายใต้ BYK-95 ขนาด 0.2g เปรียบเทียบกรณีไม่มีและมิมวลหน่วงปรับค่า.....	84
รูปที่ 6.13 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคารตัวอย่างที่มีมวลหน่วงปรับค่า ภายใต้แผ่นดินไหวขนาด 0.2 เท่าของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง.....	85
รูปที่ 6.14 ค่าความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้แผ่นดินไหว.....	86
รูปที่ 7.1 การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้นต่างๆ จากการวิเคราะห์ด้วยแรงแผ่นดินไหวขนาด 0.01 เท่า ของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก และการวิเคราะห์แบบสถิต.....	91
รูปที่ 7.2 การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้นต่างๆ จากการวิเคราะห์ด้วยแรงแผ่นดินไหวขนาด 0.1 เท่า ของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก และการวิเคราะห์แบบสถิต.....	92
รูปที่ 7.3 ค่าความเสียหายที่การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว SCT-85.....	93
รูปที่ 7.4 ค่าความเสียหายที่การเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว BYK-95.....	93
รูปที่ 7.5 การกระจายโมเมนต์ในชิ้นส่วน.....	94
รูปที่ 7.6 พฤติกรรมการรับแรงด้านข้างของโครงข้อแข็งกับผนัง.....	96
รูปที่ 7.7 การกระจายโมเมนต์ในชิ้นส่วนแนวตั้ง.....	98
รูปที่ 7.8 อัตราส่วนการเปลี่ยนตำแหน่งสูงสุดที่ชั้น 20 ของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว.....	100
รูปที่ 7.9 อัตราส่วนค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของการเปลี่ยนตำแหน่ง (Root mean square of displacement) ของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว.....	101
รูปที่ 7.10 ความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว.....	102
รูปที่ 7.11 การเปลี่ยนตำแหน่งที่ชั้น 20 กับการเปลี่ยนตำแหน่งสัมพัทธ์ของมวลหน่วงปรับค่า ภายใต้ SCT-85.....	103