

การประเมินความสูญเสียจากแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพมหานคร



นายเอกลักษณ์ แสงวโรตม์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

SEISMIC LOSS ASSESSMENT OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS IN BANGKOK

Mr. Ekkaluk Sawaengwarot



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประเมินความสูญเสียจากแผ่นดินไหวของอาคาร

คอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพมหานคร

โดย

นายเอกลักษณ์ แสงวโรดม

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ แสนจันทร์ชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ภู่วโรดม)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เอกลักษณ์ แสงวโรตม์ : การประเมินความสูญเสียจากแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพมหานคร. (SEISMIC LOSS ASSESSMENT OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS IN BANGKOK) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว, 172 หน้า.

อาคารที่ก่อสร้างขึ้นในเขตกรุงเทพมหานครนั้น มีทั้งอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวและอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ทั้งนี้เพราะเริ่มมีกฎหมายบังคับเมื่อปี พ.ศ. 2550 ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะทำการศึกษาเปรียบเทียบความเสียหายของอาคารสูง 4 ชั้นและ 10 ชั้นที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวที่มีโครงสร้างแบบโครงต้านแรงคัตแบบมีความเหนียวจำกัด และที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวที่มีโครงสร้างแบบโครงต้านแรงคัตคอนกรีตเสริมเหล็กแบบธรรมดา โดยพิจารณาแรงกระทำของแผ่นดินไหวซึ่งมีระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% และ 20% ในรอบ 50 ปี โดยใช้วิธีการวิเคราะห์หาผลตอบสนองแบบพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นด้วยโปรแกรม Perform-3D แล้วนำไปประเมินความเสียหายในรูปแบบของราคาค่าซ่อมแซมอาคารด้วยโปรแกรม PACT ผลการวิเคราะห์แสดงด้วยอัตราส่วนระหว่างมูลค่าความเสียหายของอาคารกับมูลค่าค่ารื้อย้ายอาคารแล้วสร้างใหม่ และอัตราส่วนระหว่างมูลค่าความเสียหายที่ประหยัดได้เมื่อออกแบบอาคารรับแผ่นดินไหว (Benefit, B) กับค่าก่อสร้างที่เพิ่มขึ้นสำหรับอาคารรับแรงแผ่นดินไหว (Cost, C)

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราส่วนระหว่างมูลค่าความเสียหายของอาคารกับค่ารื้อย้ายอาคารแล้วสร้างใหม่ สำหรับอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวมีค่ามากกว่าอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อแผ่นดินไหวมีความรุนแรงมากขึ้นค่าอัตราส่วนดังกล่าวของอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวพบว่ามีค่ามากถึง 1.0 นั่นคืออาคารมีแนวโน้มที่จะเสียหายรุนแรงหรือใกล้วิบัติจนการซ่อมแซมอาคารไม่คุ้มค่า ส่วนผลการประเมินอัตราส่วน B/C พบว่าอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวจะเริ่มมีความคุ้มค่า หากเกิดแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงในระดับซึ่งมีโอกาสการเกิดซ้ำต่ำกว่า 5% ใน 50 ปีเท่านั้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2556

# # 5470567821 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: SEISMIC LOSS ASSESSMENT / RC BUILDING / SEISMIC PERFORMANCE / INELASTIC STRUCTURES

EKKALUK SAWAENGWAROT: SEISMIC LOSS ASSESSMENT OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS IN BANGKOK. ADVISOR: ASSOC. PROF. TOSPOL PINKAEW, Ph.D., 172 pp.

Due to the fact that the earthquake design regulation for Bangkok was enforced in 2007, there are two types of existing buildings in Bangkok, i.e. non-seismic and seismic designed buildings. Therefore, this research aims to study and compare the losses of both types of buildings. The 4-story and 10-story R/C apartment buildings with and without seismic design were considered. The buildings with seismic design are the intermediate moment resisting frames (IMRF). While those without seismic design are the ordinary moment resisting frames (OMF). To assess the losses of the structures, the inelastic dynamic analysis under earthquake ground motions with 5% and 20% probabilities of exceedance of all buildings is conducted using the Perform 3D program. Then, the monetary losses are forecasted by PACT program based on obtained inelastic responses. Results are presented in term of the ratio of repair cost to replacement cost (LR ratio) and benefit to cost ratio (B/C ratio).

The obtained results revealed that the ratios of repair cost to replacement cost of the buildings without seismic design are significantly higher than those of the buildings with seismic design, especially under stronger earthquakes in which the ratio may reach 1.0. This situation implies that the buildings without seismic design are subjected to very severe damage or nearly collapse so that the building repair seems impractical. The benefit-cost ratio was estimated to evaluate the worth of seismic design for building. It seems that the building with seismic design provides advantage whenever a strong earthquake with 5% (or less) probabilities of exceedance occurs.

Department: Civil Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2013

## กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำงานวิจัยนี้ ข้าพเจ้านายเอกลักษณ์ แสวงวโรตม์ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล ปิ่นแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำ ทฤษฎีต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษา อีกทั้งยังช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสิ้น สมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เสนจินทร์ณีไชย ประธานกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ภู่วโรตม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจทานแก้ไขให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ นายจุลชิน เฉินบำรุง และนายธนพล ถ้ำแก้ว ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลการวิเคราะห์มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ร่วมถึงญาติพี่น้องที่อบรมเลี้ยงดูและให้กำลังใจข้าพเจ้าในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	1
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ผลงานวิจัยที่ผ่านมาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินความเสียหายเชิงตัวเงินของอาคารเนื่องมาจากแผ่นดินไหว.....	4
2.2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	14
2.2.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ASCE/SEI 41-13.....	14
2.2.1.1 โครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กระบบ คาน-เสา.....	15
2.2.1.2 การเพิ่มความแข็งแกร่งของสติฟเนสหลังจากขึ้นส่วนเกิดการคราก (Post-Yield Hardening Stiffness).....	18
2.2.2 ระเบียบวิธีการประเมินความสูญเสีย (Loss Assessment Methodology).....	19
2.2.2.1 การสร้างแบบจำลองทางสมรรถนะของอาคาร (Assemble Building Performance Model).....	20
2.2.2.2 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของอาคาร (Analyze Building Response).....	21
2.2.2.3 การคำนวณสมรรถนะ (Calculate Performance).....	21
2.2.3 สภาพความเสียหายและความบอบบาง (Damage State and Fragilities).....	22
2.2.4 ฟังก์ชันผลลัพธ์ (Consequence Function).....	25

บทที่ 3 อาคารตัวอย่างและคลื่นแผ่นดินไหว.....	27
3.1 อาคารตัวอย่าง.....	27
3.1.1 อาคารตัวอย่างที่ไม่ได้มีการออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว .....	27
3.1.2 อาคารตัวอย่างที่มีการออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว .....	31
3.2 การสร้างแบบจำลองของอาคารตัวอย่างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนอง .....	37
3.2.1 แบบจำลองเชิงเส้นของอาคารตัวอย่าง.....	38
3.2.2 การสร้างแบบจำลองของชิ้นส่วนคาน.....	40
3.2.3 การสร้างแบบจำลองของชิ้นส่วนเสา .....	45
3.2.4 แบบจำลองของอาคารตัวอย่าง .....	49
3.3 คลื่นแผ่นดินไหว .....	51
3.3.1 เหตุการณ์แผ่นดินไหว Nenana mountain – Alaska.....	53
3.3.2 เหตุการณ์แผ่นดินไหว Chi-Chi-Taiwan04 .....	58
3.3.3 เหตุการณ์แผ่นดินไหว Kocaeli- Turkey.....	58
3.3.4 เหตุการณ์แผ่นดินไหว Hector Mine .....	60
3.3.5 เหตุการณ์แผ่นดินไหว Landers, California .....	61
3.3.6 เหตุการณ์แผ่นดินไหว Tabas, Iran .....	66
3.3.7 เหตุการณ์แผ่นดินไหว Strofades, Greece.....	67
3.3.8 เหตุการณ์แผ่นดินไหว Duzce 1, Turkey .....	68
บทที่ 4 ผลตอบสนองของอาคารและการวิเคราะห์หาความเสียหาย .....	71
4.1 ผลตอบสนองของอาคาร .....	71
4.1.1 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ....	72
4.1.2 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งมีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว.....	77
4.1.3 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น ซึ่งไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว .....	82
4.1.4 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นซึ่งมีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว.....	87
4.2 การวิเคราะห์หาความเสียหาย .....	93
4.2.1 ข้อมูลราคาและลักษณะทางกายภาพของอาคารตัวอย่าง .....	93
4.2.2 กลุ่มสมรรถนะ (Performance Group).....	97



4.2.3 การใส่ข้อมูลผลการวิเคราะห์ในโปรแกรม PACT.....	100
บทที่ 5 ความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้แรงกระทำของแผ่นดินไหว .....	102
5.1 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้น .....	103
5.2 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น.....	108
5.3 พิจารณาความสมเหตุสมผลของมูลค่าความเสียหายของอาคารตัวอย่าง .....	113
5.4 เปรียบเทียบความเสียหายและความคุ้มค่าของการก่อสร้างอาคารรับแรงแผ่นดินไหว .....	115
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	118
รายการอ้างอิง .....	121
ภาคผนวก ก การออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหว.....	123
ภาคผนวก ข พารามิเตอร์และกำลังในการรับแรงสำหรับสร้างแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วน .....	127
ข.1 แบบจำลองไม่เชิงเส้นของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว	127
ข.2 แบบจำลองไม่เชิงเส้นของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว....	130
ข.3 แบบจำลองไม่เชิงเส้นของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว .....	133
ข.4 แบบจำลองไม่เชิงเส้นของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว .	139
ภาคผนวก ค ผลตอบสนองของอาคาร.....	144
ค.1 ผลตอบสนองอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว .....	144
ค.2 ผลตอบสนองอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว .....	149
ค.3 ผลตอบสนองของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว .....	154
ค.4 ผลตอบสนองของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว.....	163
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	172

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดของเหล็กเสริมตามขวางเพื่อใช้ในการจัดกลุ่มชิ้นส่วนของโครงสร้าง (ASCE, 2014).....	16
ตารางที่ 2.2 พารามิเตอร์ของการสร้างแบบจำลองชิ้นส่วนคานสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไม่เชิงเส้น (ASCE, 2013) .....	16
ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์ของการสร้างแบบจำลองชิ้นส่วนเสาสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไม่เชิงเส้น (ASCE, 2013) .....	17
ตารางที่ 3.1 ขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนเสาและรายละเอียดเหล็กเสริมของอาคารที่พักอาศัยสูง 4 ชั้น ไม่ได้ ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว .....	29
ตารางที่ 3.2 ขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนคานของอาคารที่พักอาศัยสูง 4 ชั้น ไม่ได้ ออกแบบรับแรง แผ่นดินไหว .....	30
ตารางที่ 3.3 ขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนเสาและรายละเอียดเหล็กเสริมของอาคารที่พักอาศัยสูง 10 ชั้น ไม่ได้ ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว.....	30
ตารางที่ 3.4 ขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนคานของอาคารที่พักอาศัยสูง 10 ชั้น ไม่ได้ ออกแบบรับแรง แผ่นดินไหว .....	31
ตารางที่ 3.5 ขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนเสาและรายละเอียดเหล็กเสริมของอาคารที่พักอาศัยสูง 4 ชั้น ที่มี การออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว .....	34
ตารางที่ 3.6 ขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนคานของอาคารที่พักอาศัยสูง 4 ชั้น ที่มีการออกแบบรับแรง แผ่นดินไหว .....	35
ตารางที่ 3.7 ขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนเสาและรายละเอียดเหล็กเสริมของอาคารที่พักอาศัยสูง 10 ชั้น ที่มี การออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว .....	35
ตารางที่ 3.8 ขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนคานของอาคารที่พักอาศัยสูง 10 ชั้น ที่มีการออกแบบรับแรง แผ่นดินไหว .....	36
ตารางที่ 3.9 แรงเฉือนที่ฐาน (base shear) ที่ใช้ในการออกแบบอาคาร .....	37
ตารางที่ 3.10 อัตราส่วนระหว่างค่ากำลังของวัสดุที่ได้จากการทดสอบกับค่ากำลังของวัสดุที่ระบุ....	38
ตารางที่ 3.11 คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้น.....	49
ตารางที่ 3.12 คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น.....	50
ตารางที่ 3.13 รายละเอียดของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์จากฐานข้อมูลของ PEER .....	52
ตารางที่ 3.14 รายละเอียดของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์จากฐานข้อมูลของโปรแกรม REXEL .....	53
ตารางที่ 3.15 ตัวคูณปรับค่า (Scale Factor) ความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์ Nenana mountain.....	57
ตารางที่ 3.16 ตัวคูณปรับค่า (Scale Factor) ความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์ Chi-Chi-Taiwan04 .....	58

ตารางที่ 3.17 ตัวคูณปรับค่า (Scale Factor) ความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์ Kocaeli- Turkey.....	60
ตารางที่ 3.18 ตัวคูณปรับค่า (Scale Factor) ความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์ Hector Mine .....	61
ตารางที่ 3.19 ตัวคูณปรับค่า (Scale Factor) ความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์ Landers, California .....	66
ตารางที่ 3.20 ตัวคูณปรับค่า (Scale Factor) ความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์ Tabas, Iran.....	67
ตารางที่ 3.21 ตัวคูณปรับค่า (Scale Factor) ความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์ Strofades, Greece.....	68
ตารางที่ 3.22 ตัวคูณปรับค่า (Scale Factor) ความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์ Duzce 1, Turkey .....	70
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวภายใต้แรงกระทำของคลื่นแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี.....	75
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวภายใต้แรงกระทำของคลื่นแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี.....	76
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวภายใต้คลื่นแรงกระทำของแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี.....	80
ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวภายใต้แรงกระทำของคลื่นแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี.....	81
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นซึ่งไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวภายใต้แรงกระทำของคลื่นแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี.....	85
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นซึ่งไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวภายใต้แรงกระทำของคลื่นแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี.....	86
ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นซึ่งออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวภายใต้แรงกระทำของคลื่นแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี.....	90
ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวภายใต้แรงกระทำของคลื่นแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี.....	91
ตารางที่ 4.9 ราคาค่าก่อสร้างอาคารอยู่อาศัยสูง 4 ชั้นในเมืองซานฟรานซิสโก ทางตอนเหนือของรัฐแคลิฟอร์เนีย (reedconstructiondata, 2013 : online).....	94
ตารางที่ 4.10 ราคาค่าก่อสร้างอาคารอยู่อาศัยสูง 10 ชั้นในเมืองซานฟรานซิสโก ทางตอนเหนือของรัฐแคลิฟอร์เนีย (reedconstructiondata, 2013 : online).....	94
ตารางที่ 4.11 ราคาค่าก่อสร้างอาคารอยู่อาศัยสูง 4 ชั้นและ 10 ชั้นในประเทศไทย (สมาคมผู้ประเมินค่าทรัพย์สินแห่งประเทศไทย, 2556).....	95
ตารางที่ 4.12 ค่าปรับแก้ราคาของอาคารตัวอย่าง.....	96
ตารางที่ 4.13 ค่าประมาณการราคาก่อสร้างและค่าร้อยละย้ายอาคารตัวอย่าง.....	96

ตารางที่ 4.14 กลุ่มฟังก์ชันความแบบบางของรอยต่อคาน-เสา (FEMA P-58, 2012) .....	98
ตารางที่ 5.1 รายละเอียดความเสียหายอาคารตัวอย่างซึ่งออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 4 ชั้นภายใต้แรงกระทำของคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี (Realization 764).....	114
ตารางที่ 5.2 ราคาค่าซ่อมแซมกำแพงอิฐมอญ (scgexperience, 2012 : online).....	115
ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบมูลค่าความเสียหายของอาคารตัวอย่างซึ่งออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 4 ชั้นภายใต้แรงกระทำของคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PACT กับมูลค่าความเสียหายที่คิดราคาตามข้อมูลวัสดุและค่าแรงในประเทศไทย.....	115
ตารางที่ 5.4 จะต้องพิจารณาค่าอัตราส่วนระหว่างมูลค่าความเสียหายของอาคารกับมูลค่าค่าร้อยละอาคารและสร้างใหม่.....	116
ตารางที่ 5.5 ค่าอัตราส่วนมูลค่าความเสียหายที่ลดลงเมื่อก่อสร้างอาคารตามมาตรฐานอาคารรับแรงแผ่นดินไหวต่อค่าก่อสร้างที่เพิ่มขึ้นสำหรับอาคารรับแรงแผ่นดินไหว (B/C ratio).....	117
ตารางที่ ก.1 ผลการวิเคราะห์แรงเฉือนที่ฐานเบื้องต้นด้วยวิธีพลศาสตร์เชิงเส้น .....	123
ตารางที่ ก.2 ผลการวิเคราะห์แรงเฉือนที่ฐานด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าและค่าปรับแก้ความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหว .....	124
ตารางที่ ก.3 รายละเอียดแรงที่ใช้ในการออกแบบอาคารที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว .....	125
ตารางที่ ก.4 การออกแบบเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัดของอาคารที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว .....	125
ตารางที่ ก.5 การออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือนของอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว .....	126
ตารางที่ ข.1 พารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชั้นส่วนคานอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี.....	127
ตารางที่ ข.2 พารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชั้นส่วนคานอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี.....	127
ตารางที่ ข.3 พารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชั้นส่วนเสาอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี.....	128
ตารางที่ ข.4 พารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชั้นส่วนเสาอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี.....	129
ตารางที่ ข.5 ค่ากำลังในการรับแรงสำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชั้นส่วนคานอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว.....	129
ตารางที่ ข.6 ค่ากำลังในการรับแรงสำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชั้นส่วนเสาอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว.....	130







ตารางที่ ค.28 ค่าความเร่งในแต่ละชั้นในทิศทาง H1 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว.....	163
ตารางที่ ค.29 ค่าความเร่งในแต่ละชั้นในทิศทาง H2 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว.....	164
ตารางที่ ค.30 ค่าความเร่งในแต่ละชั้นในทิศทาง H1 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว.....	165
ตารางที่ ค.31 ค่าความเร่งในแต่ละชั้นในทิศทาง H2 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว .....	166
ตารางที่ ค.32 เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นทาง H1 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว .....	167
ตารางที่ ค.33 เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นทิศทาง H2 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว	168
ตารางที่ ค.34 เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นทิศทาง H1 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว...	169
ตารางที่ ค.35 เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นทิศทาง H2 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว...	170
ตารางที่ ค.36 ค่าเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ค้ำสูงสุดอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว .....	171



## สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบความเสียหายของอาคารสูง 12 ชั้นมีโครงสร้างแบบ Space Frame (ซ้าย) และ Perimeter Frame (ขวา)(Steiner และคณะ ,2007) .....	5
รูปที่ 2.2 แพลนและรูปด้านของอาคารตัวอย่าง Perimeter-Frame (Goulet และคณะ ,2007) .....	6
รูปที่ 2.3 แพลนอาคารตัวอย่างที่จะทำการศึกษา (Yeow และคณะ ,2012).....	8
รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบราคาค่าซ่อมแซมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำของแผ่นดินไหวระดับรอบการเกิดซ้ำ 500 ปี (ซ้าย) และรอบการเกิดซ้ำ 2500 ปี (ขวา) (Yeow และคณะ ,2012) .....	8
รูปที่ 2.5 ค่าผลตอบแทนของอาคารซึ่งแสดงด้วยค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุด (ซ้าย) และความเร่งสูงสุดในแต่ละชั้นอาคาร (ขวา) (Ramirez และคณะ ,2012).....	9
รูปที่ 2.6 เปอร์เซ็นต์ความสูญเสียของอาคารตัวอย่างที่ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว DBE (Ramirez และคณะ ,2012).....	10
รูปที่ 2.7 ผลการวิเคราะห์ความสูญเสียของอาคาร (Byeon ,2012) .....	11
รูปที่ 2.8 อาคารตัวอย่างสูง 5 ชั้นที่ได้รับการเสริมกำลัง 3 แบบ (Parvini และ Banazadeh ,2012) .....	11
รูปที่ 2.9 ผลการประเมินความเสียหายของอาคารเพื่อใช้ในการตัดสินใจของเจ้าของอาคาร (Parvini และ Banazadeh ,2012) .....	12
รูปที่ 2.10 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Mayes และคณะ ,2013).....	13
รูปที่ 2.11 ราคาค่าซ่อมแซมของอาคารพาณิชย์ (บน) และอาคารปฏิบัติการ (ล่าง) (Mayes และคณะ ,2013).....	14
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเสียรูปในชิ้นส่วนอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (ASCE, 2014) .....	18
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปแบบ Trilinear (CSI, 2011).....	19
รูปที่ 2.14 ขั้นตอนระเบียบวิธีการในการประเมินความสูญเสียของ FEMA P-58.....	20
รูปที่ 2.15 ตัวอย่างกลุ่มของความบอบบาง (ATC, 2012).....	21
รูปที่ 2.16 ขั้นตอนในการประเมินสมรรถนะของโปรแกรม PACT .....	22
รูปที่ 2.17 ฟังก์ชันความบอบบาง (Fragility Function) (บน) และ การประเมินความเป็นไปได้ของสภาพความเสียหาย (ล่าง) (ATC, 2012) .....	23
รูปที่ 2.18 ตัวอย่างของฟังก์ชันผลลัพธ์ของราคาและค่าซ่อมแซม (ATC, 2012) .....	26
รูปที่ 3.1 แพลนของอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว .....	28
รูปที่ 3.2 รูปด้านของอาคารสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว (B4).....	28
รูปที่ 3.3 รูปด้านของอาคารสูง 10 ชั้นที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว (B10) .....	29
รูปที่ 3.4 แพลนของอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว .....	32
รูปที่ 3.5 รูปด้านของอาคารสูง 4 ชั้นที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว (B4E) .....	32
รูปที่ 3.6 รูปด้านของอาคารสูง 10 ชั้นที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว (B10E).....	33

รูปที่ 3.7 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับออกแบบพื้นที่ในโซน 5 ของพื้นที่ในกรุงเทพ ที่ระบุไว้ใน มยผ.-1302 .....	33
รูปที่ 3.8 แสดงรายละเอียดของเหล็กเสริมในคานตามมาตรฐาน มยผ.-1301 .....	36
รูปที่ 3.9 แสดงรายละเอียดของเหล็กเสริมในเสาตามมาตรฐาน มยผ.-1301 .....	37
รูปที่ 3.10 แบบจำลองเชิงเส้นของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นในโปรแกรม ETABS.....	38
รูปที่ 3.11 แบบจำลองเชิงเส้นของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นในโปรแกรม ETABS.....	39
รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปแบบ trilinear .....	42
รูปที่ 3.13 การรวมองค์ประกอบชิ้นส่วน (Compound Section) ของคานในโปรแกรม Perform-3D .....	42
รูปที่ 3.14 คุณสมบัติของหน้าตัดชิ้นส่วนแบบอิลาสติกของคานในโปรแกรม Perform-3D.....	43
รูปที่ 3.15 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปของข้อหมุนพลาสติกสำหรับชิ้นส่วน คานในโปรแกรม Perform-3D.....	43
รูปที่ 3.16 คุณสมบัติการสูญเสียกำลังของข้อหมุนพลาสติกสำหรับชิ้นส่วนคานในโปรแกรม Perform- 3D.....	44
รูปที่ 3.17 คุณสมบัติค่ากำลังการต้านแรงเฉือนสำหรับชิ้นส่วนคานในโปรแกรม Perform-3D.....	44
รูปที่ 3.18 กราฟเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ (P-M diagram/ interaction diagram) เพื่อใช้ในการสร้าง แบบจำลองในโปรแกรม Perform-3D.....	46
รูปที่ 3.19 การรวมองค์ประกอบชิ้นส่วน (Compound Section) ของเสาในโปรแกรม Perform-3D .....	46
รูปที่ 3.20 คุณสมบัติของหน้าตัดชิ้นส่วนแบบอิลาสติกของเสาในโปรแกรม Perform-3D .....	47
รูปที่ 3.21 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปของข้อหมุนพลาสติกสำหรับชิ้นส่วนเสา ในโปรแกรม Perform-3D.....	47
รูปที่ 3.22 แผนภูมิเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับชิ้นส่วนเสาในโปรแกรม Perform-3D.....	48
รูปที่ 3.23 คุณสมบัติการสูญเสียกำลังของข้อหมุนพลาสติกสำหรับชิ้นส่วนเสาในโปรแกรม Perform- 3D.....	48
รูปที่ 3.24 คุณสมบัติค่ากำลังการต้านแรงเฉือนสำหรับชิ้นส่วนเสาในโปรแกรม Perform-3D .....	49
รูปที่ 3.25 แบบจำลองของอาคารพักอาศัยสูง 4 ชั้น ในโปรแกรม Perform-3D .....	50
รูปที่ 3.26 แบบจำลองของอาคารพักอาศัยสูง 10 ชั้น ในโปรแกรม Perform-3D .....	50
รูปที่ 3.27 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 2060.....	53
รูปที่ 3.28 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 2064.....	54
รูปที่ 3.29 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 2065.....	54
รูปที่ 3.30 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 2067.....	55
รูปที่ 3.31 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 2070.....	55
รูปที่ 3.32 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 2079.....	56
รูปที่ 3.33 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 2081.....	56
รูปที่ 3.34 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 2088.....	57



รูปที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยความเร่งในแต่ละชั้นของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นซึ่งไม่ได้มีการออกแบบรับแรง  
แผ่นดินไหว ..... 83

รูปที่ 4.11 ค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นหลังคาภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1167)ระดับความ  
รุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปีของอาคารสูง 10 ชั้นซึ่งไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว.. 84

รูปที่ 4.12 ค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นหลังคาภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1167)ระดับความ  
รุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปีของอาคารสูง 10 ชั้นซึ่งไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว.... 84

รูปที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นซึ่งมีการ  
ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ..... 87

รูปที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยความเร่งในแต่ละชั้นของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นซึ่งมีการออกแบบรับแรง  
แผ่นดินไหว ..... 88

รูปที่ 4.15 ค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นหลังคาภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1167)ระดับความ  
รุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปีของอาคารสูง 10 ชั้นซึ่งออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ..... 89

รูปที่ 4.16 ค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นหลังคาภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1167)ระดับความ  
รุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปีของอาคารสูง 10 ชั้นซึ่งออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ..... 89

รูปที่ 4.17 ค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นหลังคาภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1156) ระดับความ  
รุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปีของอาคารสูง 10 ชั้นออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวเลือก  
องค์ประกอบในแนวราบของคลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่าความเร่งที่ผิวดินสูงสุดกระทำกับแกนอ่อน (H2) 92

รูปที่ 4.18 ค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นหลังคาภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1156) ระดับความ  
รุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปีของอาคารสูง 10 ชั้นออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวเลือก  
องค์ประกอบในแนวราบของคลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่าความเร่งที่ผิวดินสูงสุดกระทำกับแกนแข็ง (H1) 92

รูปที่ 4.19 ราคาคร่าวๆอาคารที่พักอาคารสูง 4-7 ชั้นในเมืองซานฟรานซิสโก (buildingjournal,  
2014 : online)..... 95

รูปที่ 4.20 ราคาคร่าวๆอาคารที่พักอาคารสูง 8-24 ชั้นในเมืองซานฟรานซิสโก (buildingjournal,  
2014 : online)..... 95

รูปที่ 4.21 การใส่ค่าปรับแก้ราคาในโปรแกรม PACT ..... 96

รูปที่ 4.22 การใส่ข้อมูลทางกายภาพของอาคารในโปรแกรม PACT ..... 97

รูปที่ 4.23 แสดงฟังก์ชันความบอบบางของชิ้นส่วนในทิศทางที่ 1 (H1) ..... 99

รูปที่ 4.24 แสดงฟังก์ชันความบอบบางของชิ้นส่วนในทิศทางที่ 2 (H2) ..... 99

รูปที่ 4.25 แสดงฟังก์ชันความบอบบางของชิ้นส่วนแบบไร้ทิศทาง ..... 100

รูปที่ 4.26 ข้อมูลค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นในโปรแกรม PACT ..... 100

รูปที่ 4.27 ข้อมูลค่าการความเร่งของแต่ละชั้นในโปรแกรม PACT..... 101

รูปที่ 4.28 ข้อมูลค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ในโปรแกรม PACT ..... 101

รูปที่ 5.1 ตัวอย่างการประเมินความเสียหายภายใต้แรงกระทำของแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มี  
โอกาสเกิดขึ้น 20% ในรอบ 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้มีการออกแบบรับแรง  
แผ่นดินไหวด้วยโปรแกรม PACT ใน Realization ที่ 108..... 102

รูปที่ 5.2 ตัวอย่างการประเมินความเสียหายของชิ้นส่วนกำแพงอิฐมอญ..... 103



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แผ่นดินไหวคือปรากฏการณ์สั่นสะเทือนของพื้นผิวโลกซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ แม้ว่าในปัจจุบันจะมีความพยายามที่จะพยากรณ์แผ่นดินไหวว่าจะเกิดขึ้นเมื่อใดและความรุนแรงเท่าใด แต่ก็ยังคงไม่ประสบความสำเร็จ จึงยังไม่มีผู้ใดที่จะสามารถพยากรณ์การเกิดแผ่นดินไหวได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ดังนั้นสิ่งที่สามารถทำได้ในการเผชิญกับแผ่นดินไหวคือการเตรียมพร้อมป้องกัน ไม่ว่าจะเป็นการศึกษารอยเลื่อนต่างๆ การแบ่งเขตของแผ่นดินไหวและการออกกฎหมายเพื่อให้อาคารและสิ่งก่อสร้างต่างๆสามารถต้านทานแผ่นดินไหวได้ตามความเหมาะสมของพื้นที่ต่างๆ

เนื่องจากกรุงเทพฯนั้นตั้งอยู่บนชั้นดินอ่อน หากเกิดแผ่นดินไหวในเขตจังหวัดใกล้เคียงเช่น รอยเลื่อนศรีสวัสดิ์และรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ โดยความรุนแรงที่เกิดขึ้นอาจมีค่าถึงระดับ 6-7 ริคเตอร์ ซึ่งความรุนแรงในระดับดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างอาคารและนำไปสู่การสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินได้ กฎกระทรวงจึงบังคับให้อาคารในเขตกรุงเทพมหานครต้องออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว แต่ถึงอย่างนั้นก็ยังมียังคงมีอาคารที่ไม่ได้ออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวอยู่มาก ในปัจจุบันมีมาตรฐานสำหรับการประเมินสมรรถนะของอาคารเช่น มาตรฐาน ASCE 41 แต่ก็ก็เป็นเพียงการประเมินความเสียหายของอาคารในเชิงวิศวกรรมเท่านั้น ไม่สามารถบอกถึงมูลค่าความเสียหายหรือค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมทำให้เจ้าของอาคารไม่สามารถตัดสินใจหรือวางแผนปรับปรุงอาคารได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นที่มาของการศึกษานี้ โดยจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาพฤติกรรมและความเสียหายเมื่อเกิดแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งที่ออกแบบและไม่ได้ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหวตามหลักการของ FEMA P-58 เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีอินอีลาสติกเชิงเวลา โดยความเสียหายที่ได้จะแสดงในรูปของตัวเงินและความสูญเสียต่อชีวิตร่างกายของผู้ใช้

### 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษามูลค่าความเสียหายของอาคารในกรุงเทพมหานครภายใต้แรงแผ่นดินไหว

1.2.2 ศึกษาเปรียบเทียบมูลค่าความเสียหายของอาคารที่ออกแบบและไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 อาคารที่ไม่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวจะออกแบบตามมาตรฐาน ACI 318 ส่วนอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวจะออกแบบตามมาตรฐาน มยผ.1302 โดยใช้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบสำหรับพื้นที่โซน 5 ในแอ่งกรุงเทพมหานคร

1.3.2 ทำการประเมินความเสียหายของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 4 อาคารได้แก่ อาคารที่ ออกแบบและไม่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ความสูง 4 ชั้น และ 10 ชั้น เนื่องจากเป็นอาคารหอพักที่ พบมากในเขตกรุงเทพมหานคร

1.3.3 แบบจำลองของอาคารไม่คิดผลของกำแพงอิฐก่อ

1.3.4 ใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในอดีตจากฐานข้อมูลของ PEER และโปรแกรม REXEL ซึ่งมี รูปแบบสเปกตรัมใกล้เคียงกับสเปกตรัมออกแบบ

1.3.5 ชั้นส่วนและฟังก์ชันความบอบบางสำหรับการประเมินมูลค่าความเสียหายของอาคารใช้ จากฐานข้อมูลของสหรัฐอเมริกา

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมและความเสียหายเชิงเปรียบเทียบของอาคารที่ถูกออกแบบและ ไม่ได้ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว

1.4.2 ทำให้ทราบถึงมูลค่าความเสียหายของอาคารที่ถูกออกแบบและไม่ได้ออกแบบให้รับแรง แผ่นดินไหว

1.4.3 ข้อมูลมูลค่าความเสียหายของอาคารจะมีประโยชน์ในการวางแผนปรับปรุงและใช้สอย อาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ทบทวนงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เป็นความรู้พื้นฐานและก่อให้เกิดแนวคิดใน การทำวิจัย โดยทำการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการประเมินความเสียหายของอาคารภายใต้แรง กระทำของแผ่นดินไหว โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไม่เชิงเส้น

1.5.2 ศึกษาหลักเกณฑ์ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามมาตรฐาน ASCE/SEI 41- 13 และวิธีการสร้างแบบจำลองรวมไปถึงการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีอินอีลาสติกเชิงเวลาโดยใช้ โปรแกรม PERFORM-3D

1.5.3 ศึกษาวิธีการประเมินความเสียหายของโครงสร้างด้วยโปรแกรม PACT

1.5.4 ออกแบบอาคารที่ไม่รับแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐาน ACI 318 และอาคารที่รับแรง แผ่นดินไหวตามมาตรฐาน มยผ.1302 โดยใช้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ สำหรับพื้นที่โซน 5 ในแอ่งกรุงเทพฯ

1.5.5 เลือกคลื่นที่จะใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร โดยเลือกตามความรุนแรงที่สามารถ เกิดขึ้นได้ในเขตกรุงเทพมหานคร และทำการปรับขนาดให้สอดคล้องกับค่าความเร่งตอบสนองเชิง สเปกตรัมสำหรับการออกแบบพื้นที่โซน 5 ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพฯ

1.5.6 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอาคารที่ออกแบบด้วยโปรแกรม PERFORM-3D

1.5.7 ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีอินอีลาสติกเชิงเวลา โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่เลือกในขั้นตอนที่ 5 แล้วทำการประเมินความเสียหายเชิงกายภาพของอาคาร

1.5.8 นำผลการตอบสนองของอาคารที่ได้จากการวิเคราะห์มาประเมินหามูลค่าความเสียหาย ด้วยโปรแกรม PACT

1.5.9 เปรียบเทียบมูลค่าความเสียหายของอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวกับอาคารที่ถูกออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว

1.5.10 อภิปรายผลการศึกษาและสรุปผลการวิจัย

1.5.11 จัดทำวิทยานิพนธ์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



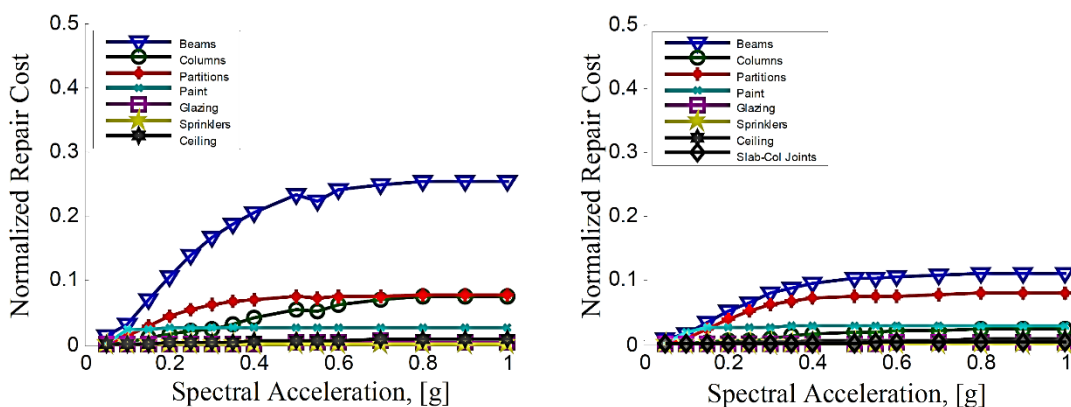
## บทที่ 2

### ผลงานวิจัยที่ผ่านมาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินความเสียหายเชิงตัวเงินของอาคารเนื่องมาจากแผ่นดินไหว

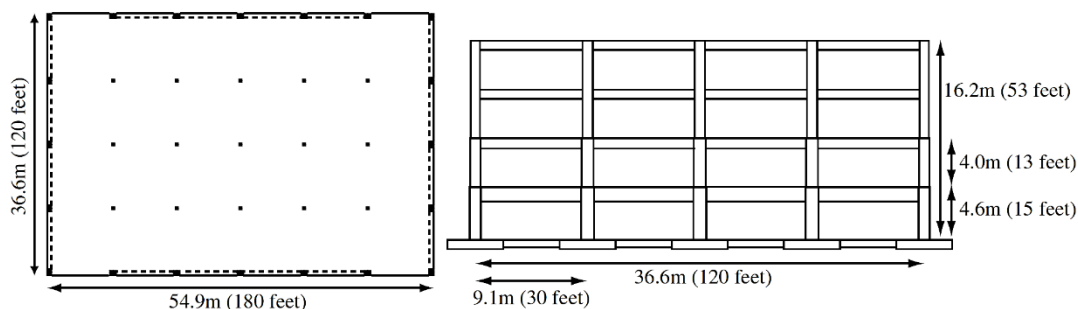
ในอดีตที่ผ่านมา อาคารส่วนใหญ่ถูกบังคับให้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐานต่างๆ แต่การที่จะสามารถยืนยันได้ว่าอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสามารถต้านทานแผ่นดินไหวได้จริงหรือไม่นั้นไม่มีใครสามารถทราบได้จนกว่าจะเกิดแผ่นดินไหวขึ้นจริง ดังนั้นจึงได้มีแนวคิดที่จะสร้างมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมและประเมินสมรรถนะของอาคารต่างๆ ได้แก่ ข้อเสนอแนะของ FEMA 356 ซึ่งมีการใช้อย่างแพร่หลาย และหลังจากนั้นก็เกิดมาตรฐานใหม่คือ ASCE 41 ซึ่งถูกนำมาใช้แทนที่ข้อเสนอแนะของ FEMA 356 จะเห็นได้ว่าการประเมินสมรรถนะของอาคารนั้น ASCE 41 จะแบ่งสมรรถนะของอาคารเป็นระดับต่างๆได้แก่ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level : IO), ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (Life Safety : LS) และระดับเกือบพังทลาย (Collapse Prevention : CP) ซึ่งเป็นการกำหนดระดับสมรรถนะตามความรุนแรงของความเสียหายทางกายภาพของโครงสร้าง แต่การที่บุคคลทั่วไปจะสามารถเข้าใจถึงความหมายของระดับสมรรถนะต่างๆนั้นเป็นไปได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการคิดวิธีการประเมินสมรรถนะของอาคารรูปแบบใหม่ขึ้นมาโดยพิจารณาเป็นความเสียหายในด้านราคาของค่าซ่อมแซม และความเสียหายต่อชีวิต เป็นต้น ซึ่งเป็นรูปแบบที่เป็นประโยชน์ในทางปฏิบัติมากกว่า

Steiner และคณะ (2007) ได้ศึกษาการประเมินความเสียหายของอาคารในรูปแบบของมูลค่าที่ต้องใช้ในการซ่อมแซม โดยอาคารดังกล่าวเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสมัยใหม่จำนวน 50 ตัวอย่าง โดยมีความสูง 1, 2, 4, 8 12 และ 20 ชั้น ซึ่งทั้งระบบโครงสร้างแบบ Perimeter Frame และ Space Frame อาคารตัวอย่างถูกออกแบบแตกต่างกันคือออกแบบตามมาตรฐานแผ่นดินไหว ASCE7-02 และออกแบบโดยไม่สอดคล้องกับมาตรฐานแผ่นดินไหว อาคารทั้งหมดตั้งอยู่ใน Los Angeles ในการประเมินอาคารนั้นใช้โปรแกรม Matlab ซึ่งมีการเขียนคำสั่งในการประเมินความเสียหายโดย Mitrani-Reiser (2007) ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวนั้นคำนวณตามวิธีการ Performance Based Earthquake Engineering (PBEE) โดยมีวิธีการทำงาน 6 ขั้นตอนคือ ประเมินค่าร้อยละและสร้างอาคารใหม่ รวบรวมค่าผลตอบแทนของอาคาร ประเมินความเสียหายของชิ้นส่วน กำหนดราคา ค่าซ่อมแซมและสุดท้ายคือการหาค่ากลางของค่าซ่อมแซม ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์แล้วได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นตัวอย่างค่าซ่อมแซมของอาคารสูง 4 ชั้น จะเห็นได้ว่าสำหรับโครงสร้างแบบ Space frame ความเสียหายส่วนใหญ่จะเกิดจากคาน แต่เมื่อพิจารณา Perimeter frame ความเสียหายที่เกิดขึ้นมาจาก 3 ชิ้นส่วนได้แก่ คาน ผนังกั้นและการทาสี ซึ่งจากผลการศึกษาทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังนี้ การประเมินเชิงตัวเงินทำให้เห็นถึงความรุนแรงของความเสียหายที่แตกต่างกันได้ชัดเจนกว่าเชิงกายภาพ และเมื่อพิจารณาชนิดของโครงสร้างจะเห็นได้ว่า Perimeter frame มีความเสียหายน้อยกว่า Space frame เนื่องจากจำนวนของคานที่มีน้อยกว่า



รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบความเสียหายของอาคารสูง 12 ชั้นมีโครงสร้างแบบ Space Frame (ซ้าย) และ Perimeter Frame (ขวา)(Steiner และคณะ ,2007)

Goulet และ คณะ (2007) ได้ศึกษาการประเมินสมรรถนะของอาคารโครงตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งสมรรถนะดังกล่าวจะถูกแสดงด้วยความเสียหายทางด้านเศรษฐกิจและความปลอดภัยจากการพังทลายของอาคาร โดยอาคารดังกล่าวเป็นอาคารสูง 4 ชั้น ออกแบบตามมาตรฐาน IBC-2003 ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงแปลนและรูปด้านของ Perimeter frame และในส่วนของ Moment frame มีลักษณะคล้ายกันแต่จะมีชิ้นส่วนของโครงต้านแรงตัดในทุกๆเส้นตาราง (grid line) และเพื่อที่จะแสดงการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการออกแบบ จึงได้ใช้ตัวอย่าง 8 อาคารโดยในแต่ละอาคารจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้าง ค่ากำลังของคาน อัตราส่วนเสาแข็ง-คานอ่อน และตัวแปรอื่นๆ คลื่นแผ่นดินไหวที่จะใช้ในการวิเคราะห์จะเลือกจากระดับความรุนแรง 7 ระดับ ในการสร้างแบบจำลองนั้นเพื่อที่จะศึกษาพฤติกรรมให้ครอบคลุมจึงได้สร้างแบบจำลอง 2 แบบได้แก่ แบบไฟเบอร์ และแบบข้อหมุนพลาสติก โดยใช้โปรแกรม OpenSees ในการวิเคราะห์เพื่อหาผลตอบสนองของอาคารและประเมินความสูญเสียโดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งมีการเขียนคำสั่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ไว้แล้วโดย Mitrani-Reiser โดยข้อมูลที่ต้องใส่ในโปรแกรมมีดังนี้คือ ฐานข้อมูลฟังก์ชันความบอบบาง (Fragility Database) และการแจกแจงของราคา (Cost Distribution), ตารางของชิ้นส่วนซึ่งจะเกิดความเสียหาย และความรุนแรงและผลของการวิเคราะห์โครงสร้าง โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความเสียหายและความสูญเสียจะแสดงในรูปแบบของความน่าจะเป็นในการเกิดของแต่ละสภาพความเสียหาย (Damage State) สำหรับทุกชิ้นส่วนของโครงสร้างที่สามารถเกิดความเสียหายได้ และตัวแปรบางส่วนที่ช่วยในการตัดสินใจ (decision variables, DVs) ซึ่งได้แก่ค่าซ่อมแซมของอาคารและความเสี่ยงต่อการทำให้เกิดอันตรายต่อชีวิต



รูปที่ 2.2 แพลนและรูปด้านของอาคารตัวอย่าง Perimeter-Frame (Goulet และคณะ ,2007)

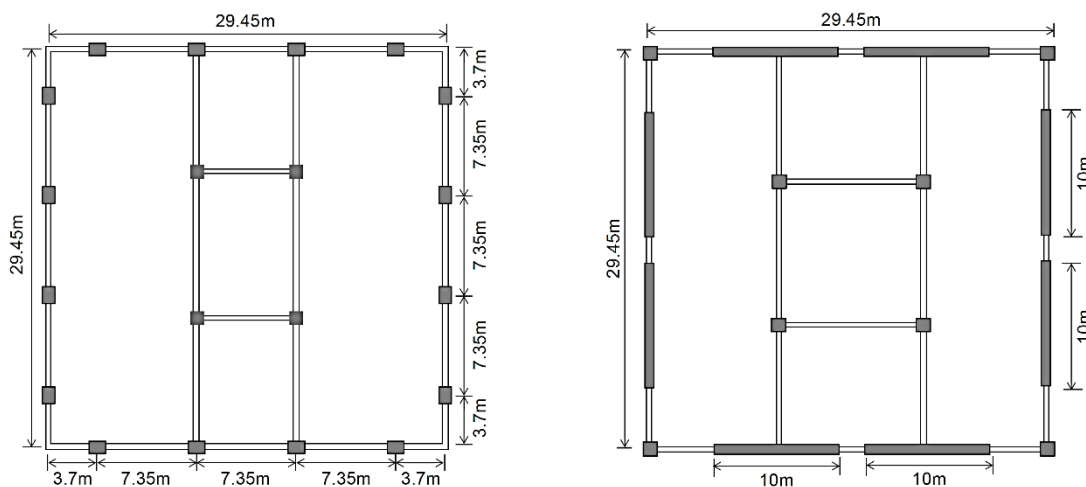
จากผลการศึกษาที่พบว่าความสูญเสียทางเศรษฐกิจส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นกับอาคารนั้นมาจากราคาค่าซ่อมแซมของผนังกัน (Partition), ชั้นส่วนของโครงสร้างและงานทาสี การประมาณค่าสตีฟเนสเริ่มต้นของชั้นส่วนของโครงสร้างมีผลอย่างมากต่อความสูญเสียที่คาดหวัง โดยแบบจำลองที่ใช้เป็นฐานในการเปรียบเทียบซึ่งเป็นแบบจำลองแบบไฟเบอร์มีค่าความสูญเสีย 0.75% ของค่าร้อยละแล้วสร้างอาคารใหม่ เมื่อพิจารณาอาคารที่มีการออกแบบเหมือนกันเมื่อใช้แบบจำลองข้อหมุนพลาสติกด้วยสตีฟเนสผ่านจุดครากความสูญเสียที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ 1.1% ของค่าร้อยละแล้วสร้างอาคารใหม่ แต่เมื่อให้ค่าสตีฟเนสเท่ากับ 60% และ 40% ของการครากความสูญเสียที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็น 0.9% และ 0.6% ของค่าร้อยละและสร้างอาคารใหม่ตามลำดับ ซึ่งนั่นแสดงให้เห็นว่าหากใช้แบบจำลองแบบข้อหมุนพลาสติกในการวิเคราะห์นั้นจำเป็นต้องปรับแก้ค่าสตีฟเนสของข้อหมุนพลาสติกกับผลการทดลองให้สอดคล้องกันเพื่อให้ได้แบบจำลองที่ดี ความสูญเสียที่เปลี่ยนไปยังสามารถเกิดขึ้นได้จากตัวเลือกอื่น ๆ ในการจำลองโครงสร้างเช่นหากไม่พิจารณาค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตโดยสมมติให้คอนกรีตมีการแตกร้าวเริ่มต้นแล้วความสูญเสียจะเพิ่มขึ้น 40% และถ้าไม่พิจารณาชั้นส่วนของแบบจำลองในแนวตั้ง (Gravity Frame) กล่าวคือจะไม่คิดผลของค่ากำลังและสตีฟเนสของชั้นส่วนนั้นๆ พบว่าความสูญเสียที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้น 20% และเมื่อพิจารณาแบบจำลองที่ออกแบบโดยอัตราส่วนของเสาแข็ง-คานอ่อนไม่เป็นไปตามที่มาตรฐานระบุพบว่าค่าความสูญเสียเพิ่มขึ้น 70%

Woo (2011) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบความคุ้มค่าของอาคารที่มีฐานแบบยึดแน่น (fixed base), ฐานแบบแยกตัว (base isolated) และสุดท้ายคืออาคารที่มีการติดตั้งอุปกรณ์แยกตัวไว้ที่เสาชั้น 1 (isolators placed on the 1st story columns) เพื่อให้เจ้าของอาคารสามารถที่จะตัดสินใจได้ว่าควรเลือกอาคารแบบใดหากต้องสร้างอยู่ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงในการเกิดแผ่นดินไหว เนื่องจากอาคารแบบฐานแยกมีราคาก่อสร้างค่อนข้างสูง โดยอาคารดังกล่าวนี้เป็นอาคารสำนักงานออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า (Equivalent Lateral Force Method) โดย Forell-Elsesser Engineers :ซึ่งอาคารตัวอย่างนั้นมีความสูง 3 ชั้น ในการวิเคราะห์อาคารเพื่อหาผลตอบสนองใช้โปรแกรม OPENSEES แบบจำลองโครงสร้างโมเมนต์ดัดแบบแรกจะเป็นแบบโครงสร้างดัดที่มีความเหนียวพิเศษซึ่งมีฐานยึดแน่น (fixed base special moment resisting frame, SMRF) และอีกสองแบบจำลองที่เหลือเป็นโครงสร้างดัดที่มีความเหนียวจำกัดที่สามารถแยกตัวได้ (isolated Intermediate Moment Resisting Frame, IMRF) ซึ่งประกอบด้วยแบบฐานแยกตัวและแบบมีอุปกรณ์แยกตัวที่เสา

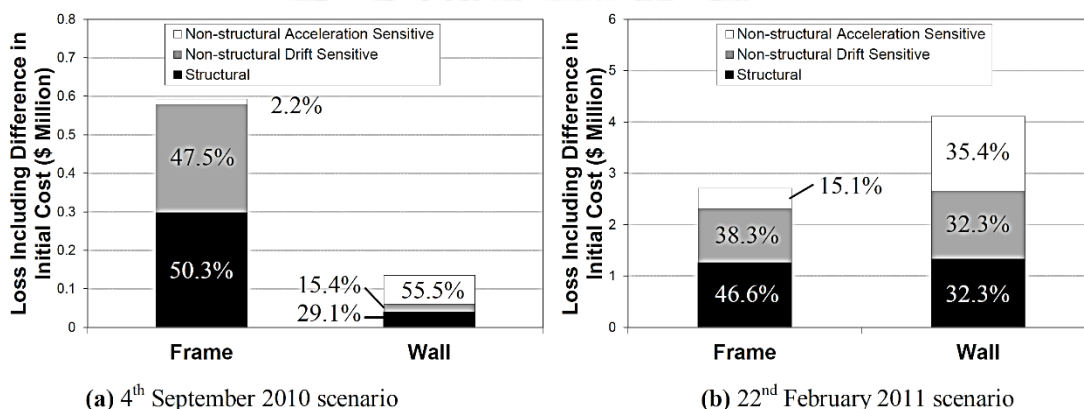
ชั้น 1 โดยคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นมีเพียงคลื่นเดียวคือคลื่นแผ่นดินไหวจากระยะไกล Northridge ซึ่งใช้ระดับความรุนแรงแผ่นดินไหวขนาดสูงสุดที่คาดว่าจะเกิดขึ้น (maximum credible earthquake, MCE) โดยหนึ่งในเหตุผลหลักที่ใช้คลื่นแผ่นดินไหวนี้ เนื่องจากเป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่าความเร่งสูงสุดของพื้นดิน (peak ground acceleration, PGA) เท่ากับ 1.21g และเหตุผลอื่นๆรองลงมาคือคลื่นดังกล่าวมีค่าความละเอียดของช่วงเวลา (time step) ค่อนข้างน้อยซึ่งมีผลดีกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีอินทิเกรตเชิงเวลา ในการประเมินความสูญเสียของอาคารนั้น ในขั้นต้นได้มีการเลือกใช้โปรแกรม PACT II ซึ่งถูกพัฒนาโดย ATC และโปรแกรม Matlab ซึ่งมีการเขียนโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ความสูญเสียไว้แล้วโดย Dr.Judith Mitrani-Reiser โดยทั้งสองโปรแกรมมีวัตถุประสงค์ในการประเมินความเสียหายแบบเดียวกัน แต่จากการวิเคราะห์ขั้นต้นเนื่องจากโปรแกรม PACT II เป็นโปรแกรมที่กำลังอยู่ในขั้นตอนการพัฒนาจึงยังไม่สมบูรณ์ดีนัก อย่างเช่นเส้นโค้งความบอบบาง (Fragility Curve) ยังไม่รองรับทุกชั้นส่วนสำหรับอาคารแบบฐานแยก ทำให้เมื่อประเมินความเสียหายออกมาแล้วนั้น ได้ค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริงค่อนข้างมากต่างกับ Matlab ซึ่งเป็นโปรแกรมที่เปิดให้มีการแก้คำสั่งได้และมีความยืดหยุ่นมากกว่าทำให้สามารถเพิ่มข้อมูลของชั้นส่วนได้เยอะกว่า อย่างไรก็ตามในแง่ของการใช้งานนั้น โปรแกรม PACT เป็นโปรแกรมที่สามารถใช้งานได้ง่ายและสะดวกมากกว่า Matlab

จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Matlab พบว่าอาคารระบบฐานแบบแยกตัว (base isolated) และอาคารที่มีการติดตั้งอุปกรณ์แยกตัวไว้ที่เสาชั้น 1 (isolators placed on the 1st story columns) สามารถใช้เป็นตัวเลือกในการก่อสร้างได้เนื่องจากเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นมีค่า 0.80% และ 0.88% ตามลำดับซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับอาคารแบบฐานยึดแน่นพบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นมากถึง 3.50% การเปรียบเทียบระหว่างระบบแยกตัวทั้งสองพบว่าความเสียหายของอาคารแบบฐานแยกตัวมีค่าน้อยกว่าความเสียหายของอาคารที่มีการติดตั้งอุปกรณ์แยกตัวไว้ที่เสาชั้น 1 มากถึง 28% อย่างไรก็ตามข้อสรุปดังกล่าวยังคงมีข้อจำกัดเนื่องจากคลื่นที่ใช้ในการวิเคราะห์มีเพียงคลื่นเดียว และด้วยข้อจำกัดของโปรแกรม PACT ในเวลานั้นยังไม่สมบูรณ์จึงยังไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบได้

Yeow และคณะ (2012) ได้ทำการวิเคราะห์ความยั่งยืนของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 หลังที่มีระบบแตกต่างกันได้แก่ Frame Structure และ Wall Structure ดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยทั้งสองอาคารนี้ถูกออกแบบด้วยมาตรฐานเดียวกันและสมมติให้ตั้งอยู่ใน Christchurch ประเทศนิวซีแลนด์ จะทำการประเมินความสูญเสียโดยตรงที่เกิดจากคลื่นแผ่นดินไหว 2 ขนาดได้แก่แผ่นดินไหวที่มีระดับความรุนแรงที่รอบการเกิดซ้ำ 500 ปี (4 Sep 2010) และ 2500 ปี (22 Feb 2011) โดยในการวิเคราะห์นั้นจะใช้โปรแกรม Ruaumoko-2D วิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์เชิงเวลา (Dynamic Time-History) และใช้เส้นโค้งความบอบบาง (Fragility Curve) จากโปรแกรม Seismic Loss Assessment Tool, SLAT เพื่อหาความเสียหายของอาคาร โดยผลการวิเคราะห์จะแสดงในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ของค่าซ่อมแซมต่อค่าก่อสร้างอาคาร

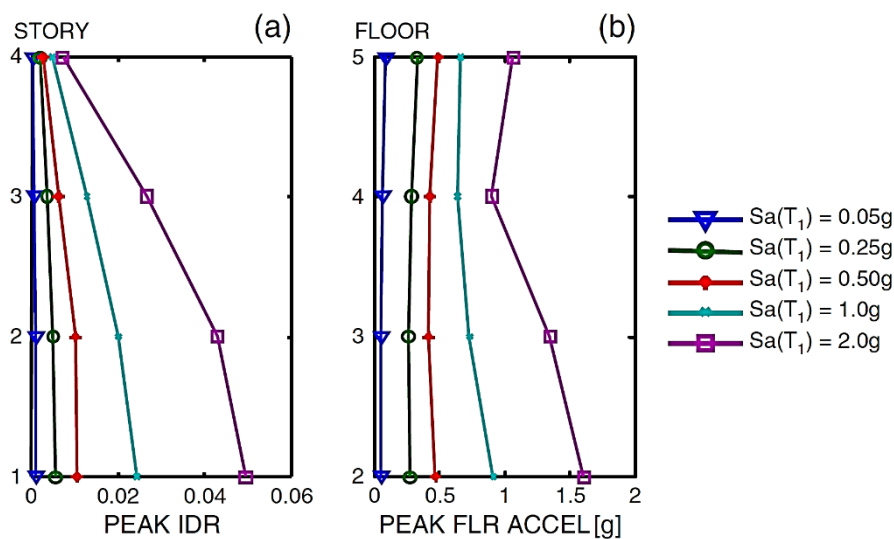


รูปที่ 2.3 แพลนอาคารตัวอย่างที่จะทำการศึกษา (Yeow และคณะ ,2012)



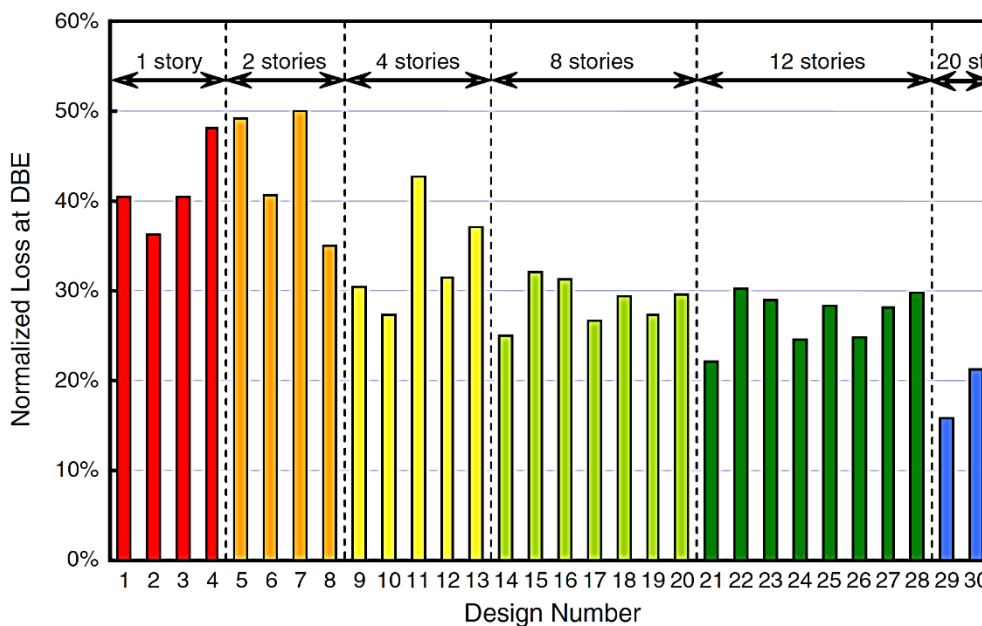
รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบราคาซ่อมแซมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำของแผ่นดินไหวระดับรอบการเกิดซ้ำ 500 ปี (ซ้าย) และรอบการเกิดซ้ำ 2500 ปี (ขวา) (Yeow และคณะ ,2012)

จากผลการศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคารพบว่า ความเสียหายนั้นมีค่าเปลี่ยนแปลงตามขนาดความรุนแรงของแผ่นดินไหว ดังในรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบความเสียหายภายใต้แรงกระทำของแผ่นดินไหวทั้ง 2 ระดับความรุนแรงในอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระบบแตกต่างกันจากรูปที่ 2.4 (ซ้าย) คือความเสียหายที่เกิดจากแผ่นดินไหวระดับรอบการเกิดซ้ำ 500 ปี จะเห็นได้ว่า Wall Structure จะมีความเสียหายที่น้อยกว่า Frame Structure โดยความเสียหายส่วนใหญ่ที่เกิดใน Wall Structure นั้นจะเกิดจากความเร่งในโครงสร้าง ซึ่งมีค่า 55.5% ของความเสียหายทั้งหมด ในขณะที่ Frame Structure มีความเสียหายจากส่วนนี้เพียงแค่ 2.2% ของความเสียหายทั้งหมด และเมื่อพิจารณาความเสียหายที่เกิดจากแผ่นดินไหวระดับรอบการเกิดซ้ำ 2500 ปี ในรูปที่ 2.4 (ขวา) พบว่า Frame Structure มีความเสียหายโดยรวมน้อยกว่า Wall Structure โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นมากที่สุดใน Wall Structure เกิดจากความเร่งที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง ซึ่งจากผลของความเสียหายที่เกิดขึ้นภายใต้แผ่นดินไหวทั้งสองความรุนแรงสรุปได้ว่า ไม่สามารถยืนยันได้ว่าระบบโครงสร้างหนึ่งๆ จะเกิดความเสียหายที่น้อยกว่าระบบโครงสร้างอื่นภายใต้แรงกระทำของแผ่นดินไหวในทุกระดับ



รูปที่ 2.5 ค่าผลตอบสนองของอาคารซึ่งแสดงด้วยค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุด (ซ้าย) และความเร่งสูงสุดในแต่ละชั้นอาคาร (ขวา) (Ramirez และคณะ ,2012)

Ramirez และ คณะ (2012) ได้ทำการศึกษาราคาค่าใช้จ่ายที่คาดว่าจะต้องใช้ในการซ่อมแซมความเสียหายที่เกิดจากแผ่นดินไหวของอาคารตัวอย่างโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 30 อาคารซึ่งมีความสูงอยู่ระหว่าง 1 ถึง 20 ชั้นโดยอาคารดังกล่าวได้ถูกสมมติให้ตั้งอยู่ใน Los Angeles โดยเป็นพื้นที่ที่มีระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวสูงตามแผนที่ที่ระบุใน International Building Code อาคารทั้งหมดถูกออกแบบตามมาตรฐาน IBC-2003 ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับมาตรฐาน ACI และ ASCE ในการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวนั้นจะอยู่บนพื้นฐานของความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวในระดับแผ่นดินไหวสูงสุดที่พิจารณา (Maximum Consider Earthquake, MCE) โดยใช้วิธีแรงสถิตเทียบเท่า (Equivalent Lateral Force Method, ELF) ซึ่งระบบของโครงสร้างที่สอดคล้องกับมาตรฐานการออกแบบจะเป็นระบบโครงสร้างที่มีความเหนียวพิเศษ (Special Moment Frames, SMF) ค่า Engineering Demand Parameter (EDP) และความน่าจะเป็นของการพังทลายของในแต่ละโครงสร้าง ได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม OPENSEES โดยวิเคราะห์แบบจำลองแบบ 2 มิติ คานและเสาถูกจำลองด้วยชิ้นส่วนที่มีข้อหมุนพลาสติก แบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นสำหรับโครงสร้างดัดคอนกรีตเสริมเหล็ก ทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธี incremental dynamic analysis (IDA) ซึ่งจะทำให้ได้ค่า EDP และความน่าจะเป็นของการพังทลายดังแสดงในรูปที่ 2.5 และเพื่อเป็นการเปรียบเทียบความเสียหายของอาคารอย่างเหมาะสม ได้ปรับความรุนแรงของแผ่นดินไหวมาที่ระดับออกแบบ (DBE) ซึ่งมีค่าเป็น 2 ใน 3 เท่าของแผ่นดินไหวระดับสูงสุดที่พิจารณาและแสดงค่าความเสียหายเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าร้อยละอาคารแล้วสร้างใหม่



รูปที่ 2.6 เปอร์เซ็นต์ความสูญเสียของอาคารตัวอย่างที่ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว DBE (Ramirez และคณะ ,2012)

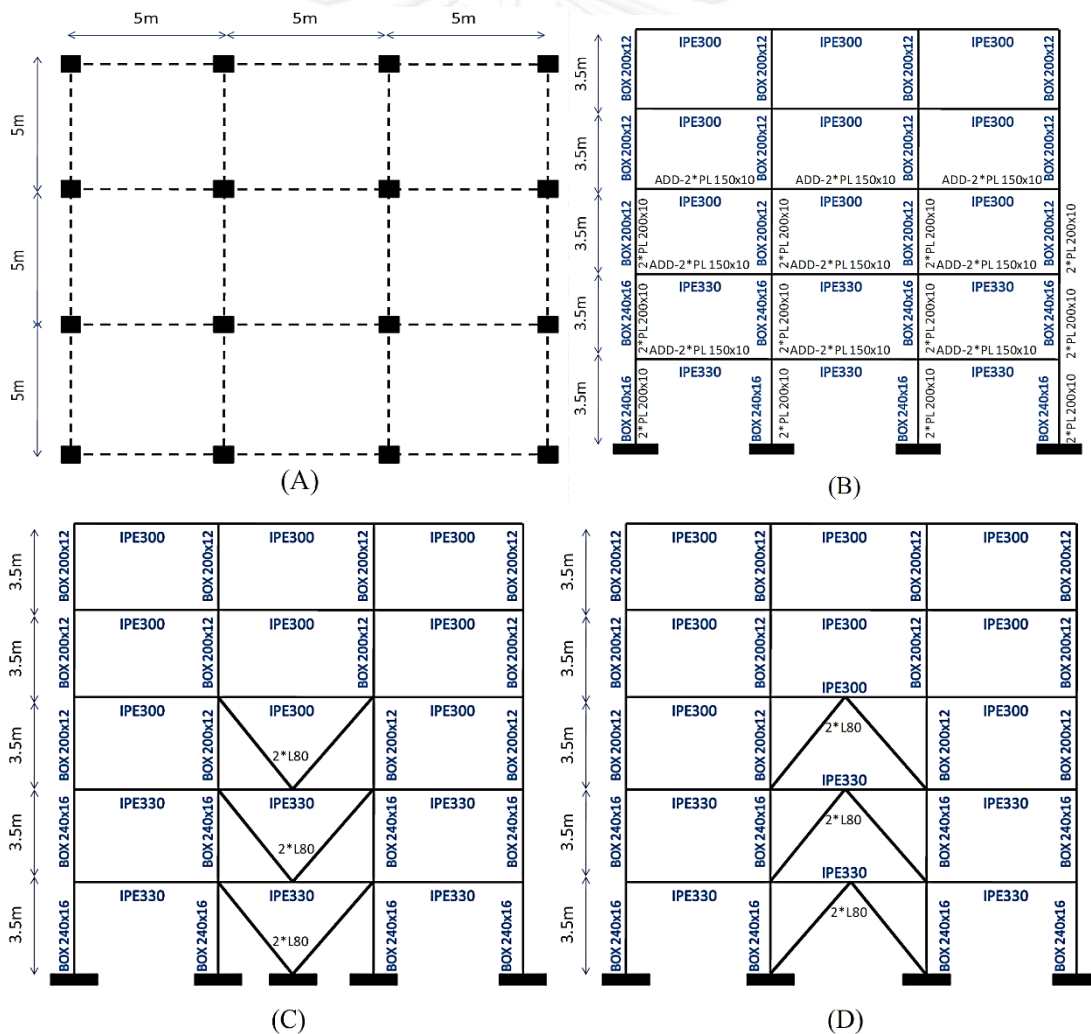
จากผลการวิเคราะห์พบว่าอาคารที่มีความเสียหายน้อยที่สุดนั้นคืออาคารสูง 20 ชั้น (Perimeter Frame #29) ซึ่งมีค่าความเสียหาย 16% และอาคารที่มีความเสียหายมากที่สุดคืออาคาร 2 ชั้น (Space Frame #7) โดยมีความเสียหาย 50% ค่าเฉลี่ยของความเสียหายของอาคารตัวอย่างทั้ง 30 อาคารคือ 32% ของค่าร้อยละอาคารและสร้างใหม่ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการออกแบบด้วยมาตรฐานดังกล่าวมีความปลอดภัย โดยมีโอกาสที่อาคารจะเกิดการพังทลายค่อนข้างน้อยที่ระดับแผ่นดิน DBE และความเสียหายที่เกิดขึ้นมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมประมาณ 1 ใน 3 ของค่าร้อยละอาคารและสร้างใหม่

Byeon (2012) ได้ทำการศึกษาความคุ้มค่าของอาคารโครงสร้างทั่วไปซึ่งมีความสูง 5 ชั้นตั้งอยู่ในประเทศเกาหลีโดยมีรูปแบบของโครงสร้าง 3 แบบได้แก่ บ้านอยู่อาศัยรวมที่มีโครงสร้างแบบอิฐก่อ (masonry structure of multi-family house), บ้านอยู่อาศัยรวมที่มีโครงสร้างแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก (reinforced concrete structure of multi-family house), โรงงานที่มีโครงสร้างแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก (reinforced concrete structure of neighborhood facility) ซึ่งอาคารทั้ง 3 เป็นอาคารที่มีอยู่แล้ว สำหรับในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของอาคารนั้นจะวิเคราะห์ด้วยวิธีไม่เชิงเส้น (nonlinear analysis) ด้วยโปรแกรม PERFORM-3D ในส่วนของความเสียหายจะใช้วิธีของ Byeon (2000) ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณตามชิ้นส่วน (component based methodology) ซึ่งชิ้นส่วนเหล่านั้นประกอบด้วยเสา, คานและผนังกัน เป็นต้น ซึ่งเกณฑ์ในการเลือกชิ้นส่วนนั้นขึ้นอยู่กับฟังก์ชันที่ระบุถึงความเสียหายของชิ้นส่วน และฟังก์ชันความเสียหายนั้นก็ได้อาจมาจากข้อมูลจากการทดลองและงานวิจัยต่างๆ ซึ่งสำหรับอาคารในเกาหลีจะมีข้อมูลของค่าต่างๆที่ใช้ในการสร้างเส้นโค้งความบอบบาง (fragility curve) ซึ่งพัฒนาโดย National Disaster Management Institute (NDMI) ซึ่งจุดประสงค์ในการหาความเสียหายของอาคารเหล่านี้ก็เพื่อที่จะเปรียบเทียบความคุ้มค่าในการเสริมกำลังของ

อาคาร โดยจะทำการหาอัตราส่วนระหว่างความเสียหายของอาคารก่อนและหลังเสริมกำลัง (Benefit, B) กับราคาที่ใช้ในการเสริมกำลัง (Cost, C) ซึ่งจากผลการทดลองแสดงในรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่า การเสริมกำลังมีความคุ้มค่าสำหรับอาคารทั้ง 3 รูปแบบ

Building Type	Expected loss of Before-Retrofit Bldg.	Expected loss of After-Retrofit Bldg.	Benefit	Cost	B/C
Masonry Structure of Multi-family House	45,506,000	5,875,000	39,631,000	21,260,000	1.86
Reinforced Concrete Structure of Multi-family House	99,524,000	6,343,000	93,181,000	28,590,000	3.26
Reinforced Concrete Structure of Neighborhood Facility	273,558,000	59,449,000	214,109,000	50,400,000	4.25

รูปที่ 2.7 ผลการวิเคราะห์ความสูญเสียของอาคาร (Byeon ,2012)



รูปที่ 2.8 อาคารตัวอย่างสูง 5 ชั้นที่ได้รับการเสริมกำลัง 3 แบบ (Parvini และ Banazadeh ,2012)



Parvini และ Banazadeh (2012) ได้ประเมินความสูญเสียของอาคารที่ได้รับการเสริมกำลังว่าการเสริมกำลังแบบใดให้ความคุ้มค่ามากที่สุด โดยอาคารดังกล่าวเป็นอาคารสูง 5 ชั้นตั้งอยู่ใน Tehran และมีการเสริมกำลัง 3 แบบดังแสดงในรูปที่ 2.8 อาคารถูกสร้างด้วยแบบจำลอง 2 มิติ โดยใช้โปรแกรม OPENSEES และวิเคราะห์ด้วยวิธีไม่เชิงเส้น ในการหาความเสียหายและความสูญเสียในงานวิจัยใช้ตามวิธีของโครงการ ATC-58 โดยหาความเสียหายของชิ้นส่วนที่เป็นโครงสร้างและไม่เป็นโครงสร้างโดยใช้ค่าความเร่งในแต่ละชั้นและการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ ผลการศึกษาพบว่า การเสริมกำลังด้วยวิธีที่ 2 (Alternative-2) นั้นให้ความคุ้มค่าในเรื่องราคามากที่สุด ถึงแม้ว่าวิธีที่ 1 จะมีความสูญเสียน้อยกว่า (AL) แต่เมื่อพิจารณาราคาที่ใช้ในการเสริมกำลัง ( $C_R$ ) ซึ่งค่าค่อนข้างมากจึงไม่คุ้มที่จะเลือกวิธีนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดย  $\lambda_{collapse}$  คือความเป็นไปได้ของการพังทลาย และ  $t_{cr}$  คือ ระยะเวลาที่การเสริมกำลังจะมีความคุ้มค่า

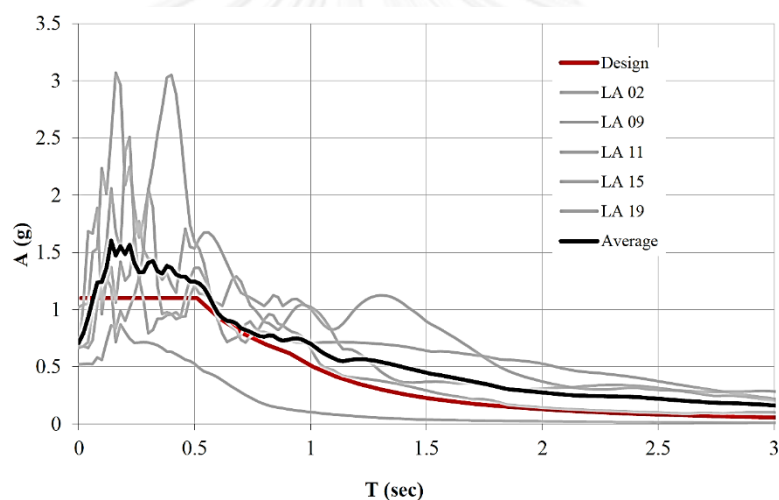
Cases	Primary	Alternative-1	Alternative-2	Alternative-3
$\lambda_{collapse} \times 10^{-4}$	1.03	0.9618	0.8416	1.113
CMR	2.385	2.483	2.837	2.473
$C_R$ (\$USD)	-	14000	10000	10000
AL (\$USD)	2223.1	1083.565	1257.027	1376.487
$t_{cr}$ ( $\lambda=7\%$ )	-	28 years	19 years	25 years
Best Choice			Alternative-2	

รูปที่ 2.9 ผลการประเมินความเสียหายของอาคารเพื่อใช้ในการตัดสินใจของเจ้าของอาคาร (Parvini และ Banazadeh ,2012)

Mayes และคณะ (2013) ได้ศึกษาการประเมินความเสียหายของอาคารพานิชย์และอาคารปฏิบัติการสูง 3 ชั้นที่มีระบบของโครงสร้างแตกต่างกัน ได้แก่ โครงคด (Moment Frame, MF) โครงยึดรั้งไร้การโก่งเดาะ (Buckling Restrained Braced Frame, BRBF) โครงข้อหมุนรับแรงดัดที่ติดตั้งตัวหน่วง (Viscously Damped Moment Frame, MF), โครงสร้างระบบกำแพงรับแรงเฉือนแบบอัดแรงซึ่งทำจากไม้และมีตัวหน่วงกันการสั่นสะเทือนที่ฐาน (Pres-Lam Coupled Shear wall, Pres-Lam CWs), กำแพงรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็กหล่อในที่ (cast-in-place reinforce concrete shear wall, Conc. SW) และระบบโครงยึดรั้งแบบฐานแยกตัว (Base Isolated Braced Frame, BI) โดยอาคารแต่ละระบบจะใช้ผังแบบเดียวกันและแต่ละชั้นสูง 4 เมตร แบบจำลองของอาคารทั้งหมดนอกเหนือจากอาคารระบบ Pres-Lam CWs จะถูกออกแบบตามมาตรฐาน 1997 Uniform Building Code (UBC-1997) และจะทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม PERFORM-3D โดยวิธีประวัติเวลาไม่เชิงเส้น (Non-linear time history) ในส่วนของโครงสร้างระบบ Pres-lam Coupled-wall ออกแบบตามคู่มือฉบับร่างที่นำเสนอโดย University of Canterbury (UC, 2012) และใช้โปรแกรม SAP2000 ในการวิเคราะห์ ในแต่ละแบบจำลองที่ทำการวิเคราะห์นั้น จะใช้คลื่นแผ่นดินไหวทั้งหมด 15 ชุดซึ่งถูกพัฒนาให้ใช้สำหรับเมือง Los Angeles โดยแบ่งความรุนแรงออกเป็น 3 กลุ่มได้แก่ ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 50% ในรอบ 50 ปี (คาบการเกิดซ้ำ 72 ปี) ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 10% ในรอบ 50 ปี (คาบการเกิดซ้ำ 475 ปี) ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 2% ในรอบ 50 ปี (คาบการเกิดซ้ำ 2500 ปี) โดยในรูปที่ 2.10 จะแสดงการตอบสนองเชิงสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหวที่มีคาบการเกิดซ้ำ 475 ปี ในการหาความสูญเสียของ

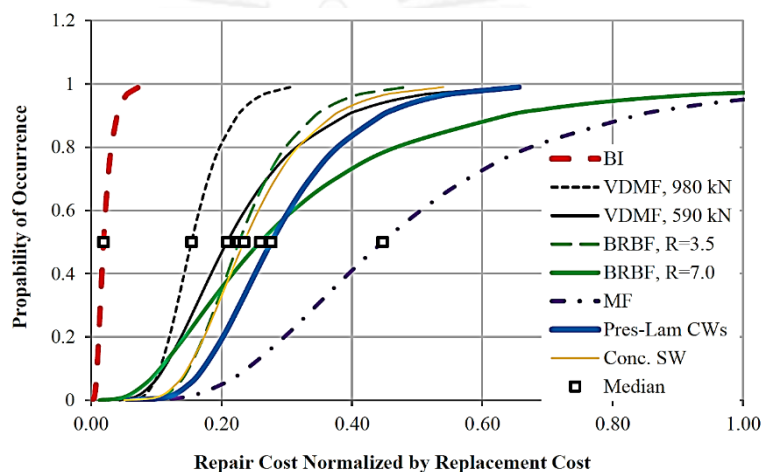
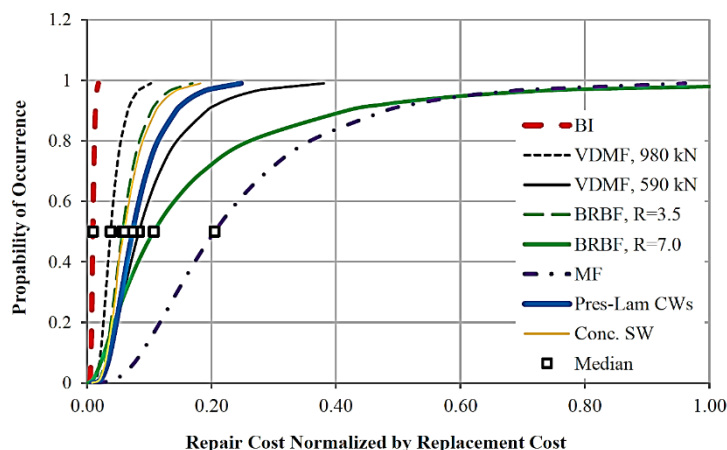
อาคารนั้นใช้วิธีการที่ระบุใน FEMA P-58 เพื่อที่จะประเมินค่าความน่าจะเป็นของชิ้นส่วนโครงสร้างหรือไม่ใช้โครงสร้างที่เกิดความเสียหายจากแผ่นดินไหว โดยกระบวนการในการประเมินตาม FEMA P-58 ประกอบด้วย 5 กระบวนการด้วยกัน อันดับแรกคือสร้างแบบจำลองทางสมรรถนะโดยการรวบรวมข้อมูลทั้งหมดในการประเมินความเสี่ยง หลังจากนั้นเลือกคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการประเมินในขั้นตอนที่สามทำการวิเคราะห์อาคารเพื่อหาผลตอบสนองเช่นค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์และความเร่งในแต่ละชั้น หลังจากนั้นทำการสร้างเส้นโค้งการพังทลายของอาคาร และในขั้นตอนสุดท้ายทำการคำนวณสมรรถนะของอาคาร ซึ่ง FEMA P-58 นั้นได้เสนอโปรแกรม PACT เพื่อช่วยในการคำนวณดังกล่าว

ผลการวิเคราะห์พบว่าระบบโครงสร้างแบบฐานแยกตัวมีสมรรถนะที่ดีที่สุดทั้งในอาคารสำนักงานและอาคารปฏิบัติการ ส่วนระบบโครงสร้างดัดเหล็กมีค่าสมรรถนะที่ด้อยที่สุดเมื่อพิจารณาจากราคาค่าซ่อมแซมดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์ (Mayes และคณะ, 2013)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าการประเมินความเสียหายในรูปแบบใหม่นั้นเริ่มเป็นที่นิยมอย่างมาก นักวิจัยจึงเริ่มพัฒนาโปรแกรมเพื่อช่วยในการคำนวณขึ้นมาเช่นเดียวกับ FEMA ได้เริ่มที่จะพัฒนาการออกแบบโครงสร้างที่มีสถานะเหมาะสมกับสถานะการใช้งาน (Performance-Based Design) โดยได้ร่วมกับ Applied Technology Council (ATC) ดำเนินโครงการ FEMA P-58 และพัฒนาโปรแกรม PACT ขึ้นมาโดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาการประเมินสมรรถนะของอาคารให้มีความถูกต้องมากขึ้น, แก้ไขตัวบ่งชี้สมรรถนะของอาคารที่แต่เดิมแยกเป็นระดับสมรรถนะให้เป็นตัวแปรที่เข้าใจง่ายเพื่อให้เจ้าของอาคารสามารถตัดสินใจได้ดียิ่งขึ้น, สร้างผลิตภัณฑ์สำหรับการประเมินสมรรถนะของทั้งอาคารที่สร้างใหม่และอาคารเก่า, พัฒนาการหาความเสียหายของชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (Nonstructural)



รูปที่ 2.11 ราคาซ่อมแซมของอาคารพาณิชย์ (บน) และอาคารปฏิบัติการ (ล่าง) (Mayes และคณะ, 2013)

เทคนิคพื้นฐานของการประเมินสมรรถนะนั้นถูกพัฒนาโดยนักวิจัยของ PEER ในช่วงปี 1997-2010 ใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็นทำนายผลที่เกิดจากแผ่นดินไหวในรูปแบบของคนเจ็บคนตาย ค่าซ่อมแซม และเวลาที่ใช้ในการซ่อมแซม ซึ่งในการคำนวณสมรรถนะของอาคารภายใต้แรงแผ่นดินไหวจะคำนวณโดยการอินทิเกรตหลายชั้น แต่การที่จะได้คำตอบแบบตายตัวจากการอินทิเกรตนั้นเป็นเรื่องที่ยากแม้ว่าจะเป็นเพียงโครงสร้างทั่วไป ในปี 2004 ได้มีการใช้ประโยชน์ของหลักการมอนติคาร์โล (Monte Carlo) เพื่อใช้ในการจัดการการอินทิเกรตผลตอบแทนของอาคารที่ได้จากการวิเคราะห์ที่จำกัดซึ่งมีการแจกแจงทางสถิติ

## 2.2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ASCE/SEI 41-13

ตามมาตรฐาน ASCE/SEI 41-13 ได้กล่าวถึงวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างไว้ 4 วิธีได้แก่ วิธีสถิตเชิงเส้น (linear static procedure, LSP), วิธีพลศาสตร์เชิงเส้น (linear dynamic procedure,

LDP), วิธีสถิตไม่เชิงเส้น (nonlinear static procedure, NSP) และ วิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (nonlinear dynamic procedure, NDP) ซึ่งการที่จะเลือกว่าต้องใช้วิธีใดในการวิเคราะห์นั้นขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของโครงสร้างและความถูกต้องที่ต้องการ

วิธีการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น (LSP และ LDP) จะให้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารภายใต้แรงแผ่นดินไหวในเชิงอนุรักษ์ (conservative) ซึ่งบ่อยครั้งนั้น จะไม่ค่อยแม่นยำ เนื่องจากผลตอบแทนของอาคารภายใต้แผ่นดินไหวโดยทั่วไปจะไม่เป็นแบบเชิงเส้น ส่งผลให้วิธีการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (NSP และ NDP) จึงมีความเหมาะสมและให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำถูกต้องกว่า วิธีการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นนั้นเหมาะกับโครงสร้างทุกรูปแบบ ซึ่งวิธีการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นนั้นจะรวมถึงการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นประวัติเวลา (Non-Linear Time History) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่จะให้ผลตอบแทนเชิงอินอีลาสติกซึ่งได้จากการวิเคราะห์แผ่นดินไหวแบบประวัติเวลา เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีสถิตไม่เชิงเส้นนั้น วิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นจะให้ความถูกต้องที่สูงกว่าเนื่องจากคิดผลของโหมตการสั่นที่สูงกว่าและยังเป็นวิธีการที่จะหาค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดจากการวิเคราะห์แผ่นดินไหวที่กำหนดโดยตรง ไม่จำเป็นที่จะต้องประมาณค่าผลการตอบสนองดังกล่าวบนพื้นฐานความสัมพันธ์ทั่วไป

เมื่อเลือกวิธีการวิเคราะห์แบบวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (NDP) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์อาคาร การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นส่วนแต่ละชั้นส่วนของอาคารที่ถูกกระทำด้วยการสั่นของแผ่นดินไหวซึ่งก็คือคลื่นแผ่นดินไหวแบบประวัติเวลาจะต้องรวมคุณสมบัติ แรง-การเสียรูป แบบไม่เชิงเส้น เพื่อให้ได้แรงและการเคลื่อนตัว โดยหลักการในสร้างแบบจำลองและหลักเกณฑ์ในการยอมรับของการวิเคราะห์แบบวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นจะคล้ายกับวิธีสถิตไม่เชิงเส้นต่างกันเพียงแค่ว่า วิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นค่าการเคลื่อนตัวที่ออกแบบจะไม่ใช้การเคลื่อนตัวเป้าหมายแต่จะคำนวณโดยตรงจากการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวแบบประวัติเวลา

### 2.2.1.1 โครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กระบบ คาน-เสา

ในการกำหนดว่าโครงสร้างที่จะทำการวิเคราะห์เป็นโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็ก คาน-เสา หรือไม่นั้น จะต้องพิจารณาข้อกำหนดได้แก่ ชั้นส่วนของโครงดัดจะต้องประกอบด้วยคาน(มีหรือไม่มีพื้นที่ได้) เสาและรอยต่อของชั้นส่วนดังกล่าว, คานและเสาจะต้องเป็นเนื้อเดียวกัน(monolithic) กล่าวคือสามารถถ่ายเทโมเมนต์ระหว่างทั้งสองชั้นส่วนได้ และเหล็กเสริมหลักที่ใช้ในการรับแรงด้านข้างจะต้องเป็นแบบไม่อัดแรง (Nonprestressed)

แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ชั้นส่วนโครง คาน-เสา ควรแสดงด้วยค่ากำลัง(Strength), สติฟเนส (Stiffness), และความสามารถในการเสียรูปของคาน, เสา, รอยต่อคาน-เสา และชั้นส่วนอื่นๆ ของโครงดัด สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี NDP ชั้นส่วนแต่ละชั้นส่วนจะต้องถูกจำลองให้มีพฤติกรรมภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร (hysteretic behavior) โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูป (Generalized load-Deformation Relation) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 จะเห็นว่าระหว่างจุด A ไป B ชั้นส่วนมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นและหลังจากจุด B นั้นวัสดุยังคงมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นแต่จะเป็นช่วงที่มีการสูญเสียสติฟเนสทำให้ความชันมีค่าลดลง โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 10% ของความชันในช่วงแรก หลังจากถึงจุด C ชั้นส่วนมีการสูญเสียค่ากำลังการต้านทานแรงด้านข้างอย่างทันทีจนถึง D

และมีค่ากำลังคองที่จนถึงจุด E ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กระบบคานเสาต้องเป็นไปตาม ตารางที่ 2.1 ถึง 2.3

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดของเหล็กเสริมตามขวางเพื่อใช้ในการจัดกลุ่มชิ้นส่วนของโครงสร้าง (ASCE, 2014)

Shear Capacity Ratio	ACI 318 Conforming Seismic Details with 135-Degree Hooks	Closed Hoops with 90-Degree Hooks	Other (Including Lap-Spliced Transverse Reinforcement)
$V_p/V_o \leq 0.6$	i <sup>a</sup>	ii	ii
$1.0 \geq V_p/V_o > 0.6$	ii	ii	iii
$V_p/V_o > 1.0$	iii	iii	iii

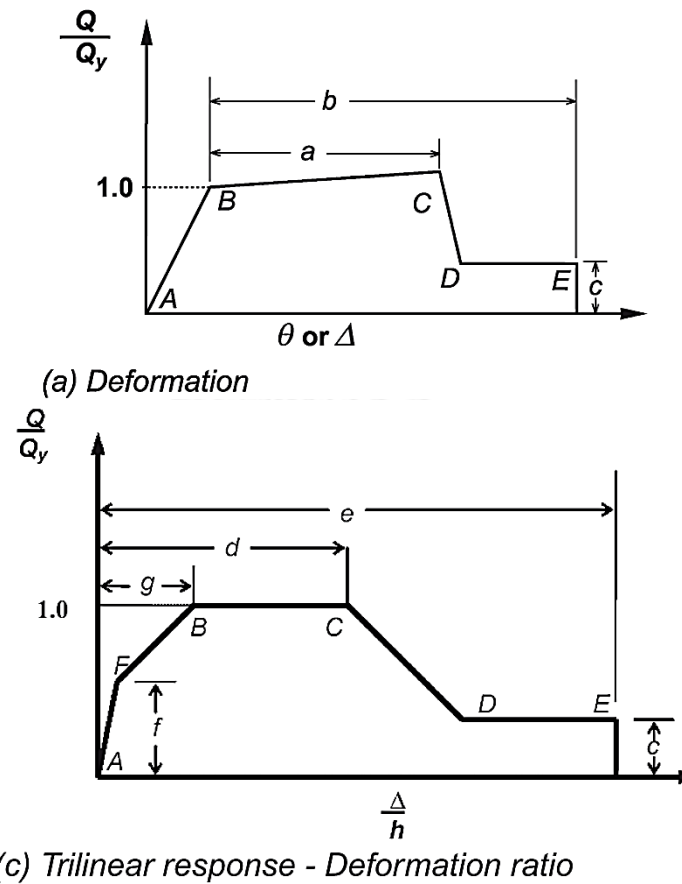
<sup>a</sup>To qualify for condition i, a column should have  $A_s/b_w s \geq 0.002$  and  $s/d \leq 0.5$  within flexural plastic hinge region. Otherwise, the column is assigned to condition ii.

ตารางที่ 2.2 พารามิเตอร์ของการสร้างแบบจำลองชิ้นส่วนคานสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไม่เชิงเส้น (ASCE, 2013)

Conditions	Modeling Parameters <sup>a</sup>		
	Plastic Rotations Angle (radians)		Residual Strength Ratio
	a	b	c
Condition i. Beams controlled by flexure <sup>b</sup>			
$\rho - \rho'$	Transverse reinforcement <sup>c</sup>	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$ <sup>d</sup>	
$\rho_{bal}$			
$\leq 0.0$	C	$\leq 3$ (0.25)	0.025
$\leq 0.0$	C	$\geq 6$ (0.5)	0.02
$\geq 0.5$	C	$\leq 3$ (0.25)	0.02
$\geq 0.5$	C	$\geq 6$ (0.5)	0.015
$\leq 0.0$	NC	$\leq 3$ (0.25)	0.02
$\leq 0.0$	NC	$\geq 6$ (0.5)	0.01
$\geq 0.5$	NC	$\leq 3$ (0.25)	0.01
$\geq 0.5$	NC	$\geq 6$ (0.5)	0.005
Condition ii. Beams controlled by shear <sup>b</sup>			
Stirrup spacing $\leq d/2$			0.0030
Stirrup spacing $> d/2$			0.0030
Condition iii. Beams controlled by inadequate development or splicing along the span <sup>b</sup>			
Stirrup spacing $\leq d/2$			0.0030
Stirrup spacing $> d/2$			0.0030
Condition iv. Beams controlled by inadequate embedment into beam-column joint <sup>b</sup>			
			0.015

ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์ของการสร้างแบบจำลองชิ้นส่วนเสาสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไม่เชิงเส้น (ASCE, 2013)

Conditions		Modeling Parameters <sup>a</sup>		
		Plastic Rotations Angle (radians)		Residual Strength Ratio
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Condition i. <sup>b</sup>				
$\frac{P}{A_g f'_c}$ <sup>c</sup>	$\rho = \frac{A_v}{b_w s}$			
≤0.1	≥0.006	0.035	0.060	0.2
≥0.6	≥0.006	0.010	0.010	0.0
≤0.1	=0.002	0.027	0.034	0.2
≥0.6	=0.002	0.005	0.005	0.0
Condition ii. <sup>b</sup>				
$\frac{P}{A_g f'_c}$ <sup>c</sup>	$\rho = \frac{A_v}{b_w s}$	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$ <sup>d</sup>		
≤0.1	≥0.006	≤3 (0.25)	0.032	0.060
≤0.1	≥0.006	≥6 (0.5)	0.025	0.060
≥0.6	≥0.006	≤3 (0.25)	0.010	0.010
≥0.6	≥0.006	≥6 (0.5)	0.008	0.008
≤0.1	≤0.0005	≤3 (0.25)	0.012	0.012
≤0.1	≤0.0005	≥6 (0.5)	0.006	0.006
≥0.6	≤0.0005	≤3 (0.25)	0.004	0.004
≥0.6	≤0.0005	≥6 (0.5)	0.0	0.0
Condition iii. <sup>b</sup>				
$\frac{P}{A_g f'_c}$ <sup>c</sup>	$\rho = \frac{A_v}{b_w s}$			
≤0.1	≥0.006	0.0	0.060	0.0
≥0.6	≥0.006	0.0	0.008	0.0
≤0.1	≤0.0005	0.0	0.006	0.0
≥0.6	≤0.0005	0.0	0.0	0.0
Condition iv. Columns controlled by inadequate development or splicing along the clear height <sup>b</sup>				
$\frac{P}{A_g f'_c}$ <sup>c</sup>	$\rho = \frac{A_v}{b_w s}$			
≤0.1	≥0.006	0.0	0.060	0.4
≥0.6	≥0.006	0.0	0.008	0.4
≤0.1	≤0.0005	0.0	0.006	0.2
≥0.6	≤0.0005	0.0	0.0	0.0

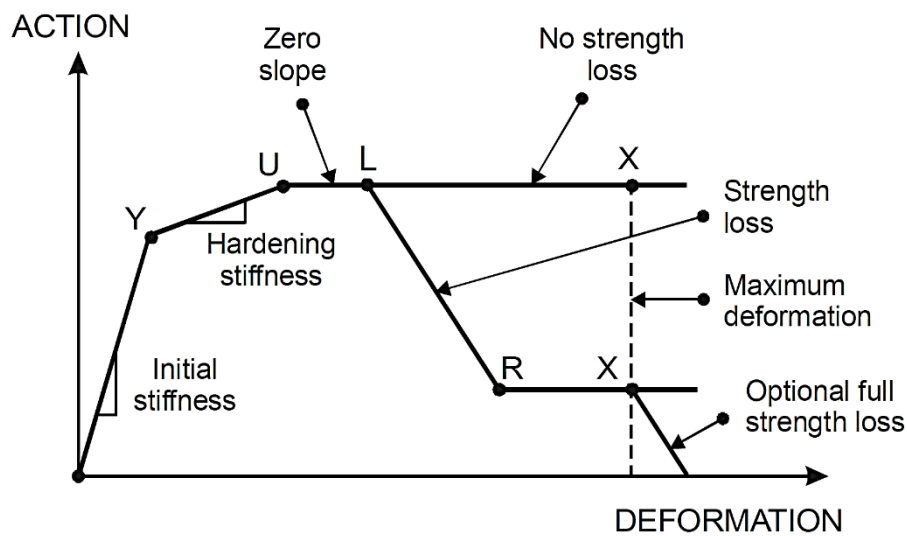


รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับการเสียรูปในชิ้นส่วนอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (ASCE, 2014)

### 2.2.1.2 การเพิ่มความแข็งแรงของสติฟเนสหลังจากชิ้นส่วนเกิดการคราก (Post-Yield Hardening Stiffness)

เนื่องจากการสร้างแบบจำลองของชิ้นส่วนของโครงสร้างในงานวิจัยนี้จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูป (F-D Relationship) เป็นแบบ Trilinear โดยคิดผลของการสูญเสียค่ากำลัง (Strength Loss) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งแม้ว่าค่าตัวแปรต่างๆส่วนใหญ่จะระบุไว้ในมาตรฐาน ASCE/SEI 41-13 แต่ยังคงมีบางส่วนที่ไม่ได้มีการระบุไว้อย่างเช่นค่าการเพิ่มความแข็งแรงของสติฟเนส (Hardening Stiffness )

ค่าการเพิ่มความแข็งแรงของสติฟเนส (hardening stiffness ) ซึ่งจะเกิดขึ้นหลังจากชิ้นส่วนเกิดการครากไปแล้วจะถูกระบุโดยค่าอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์สูงสุด (maximum moment capacity) กับโมเมนต์ที่จุดคราก (yield moment capacity) โดย Haselton (2007) ได้ศึกษาพบว่าค่าดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับค่าแรงต่อกำลังของวัสดุดังสมการที่ 2.1



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปแบบ Trilinear (CSI, 2011)

โดยที่;

- Y คือ ตำแหน่งที่ชิ้นส่วนเกิดการร้าวหรือเป็นตำแหน่งที่เริ่มเกิดพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น
- U คือ ตำแหน่งที่ระบุถึงค่ากำลังสูงสุดของชิ้นส่วน
- L คือ ตำแหน่งที่ระบุถึงขีดจำกัดความเหนียวของชิ้นส่วน (ductile limit) หรือเป็นตำแหน่งที่ชิ้นส่วนเกิดการสูญเสียกำลัง (strength loss)
- X คือ ตำแหน่งที่จะทำการหยุดวิเคราะห์เมื่อค่าการเสียรูปของชิ้นส่วนถึงค่านี้

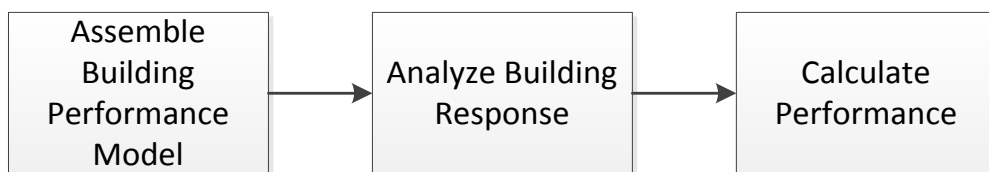
$$M_c / M_y = (1.25)(0.89)^{P/A_g f'_c} (0.91)^{0.01 f'_c} \quad (2.1)$$

โดยที่;  $f'_c$  มีหน่วย MPa

## 2.2.2 ระเบียบวิธีการประเมินความสูญเสีย (Loss Assessment Methodology)

ค่าประสิทธิภาพนั้น (performance measure) หมายถึงค่าที่แสดงจำนวนผลลัพธ์ของการตอบสนองของอาคารเมื่อเกิดแผ่นดินไหวในรูปแบบของสิ่งที่มีความหมายต่อการตัดสินใจของเจ้าของอาคาร ซึ่งตามหลักการของ FEMA P-58 ค่าต่างๆเหล่านั้นจะแสดงด้วยค่าความเสียหายต่อชีวิตผู้ใช้ ราคาซ่อมแซม เวลาที่ใช้ในการซ่อมแซมและการตีประกาศว่าอาคารไม่ปลอดภัยต่อการใช้งาน ซึ่งด้วยเหตุผลบางประการ การที่จะทำนายค่าของผลกระทบต่างๆเหล่านี้ให้ถูกต้องนั้นเป็นเรื่องที่ไม่สามารถทำได้ ด้วยเหตุนี้ระเบียบวิธีการในการประเมินจึงแสดงสมรรถนะของอาคารในรูปแบบของความเป็นไปได้โดยพิจารณาผลของความไม่แน่นอนต่างๆ ซึ่งขั้นตอนของระเบียบวิธีการนั้นแสดงในรูปที่ 2.14





รูปที่ 2.14 ขั้นตอนระเบียบวิธีการในการประเมินความสูญเสียของ FEMA P-58

### 2.2.2.1 การสร้างแบบจำลองทางสมรรถนะของอาคาร (Assemble Building Performance Model)

แบบจำลองทางสมรรถนะของอาคารคือการจัดการข้อมูลที่รวบรวมมาและมีความสำคัญในการหาผลกระทบต่ออาคารอันเนื่องมาจากการสั่นของแผ่นดินไหวซึ่งข้อมูลเหล่านั้นประกอบด้วย

2.2.2.1.1 ข้อมูลพื้นฐาน (Basic Building Data) ซึ่งได้แก่ขนาดของอาคาร ราคาซื้อขายแล้วสร้างทดแทนใหม่ และเวลาที่ใช้ในการซื้อขายแล้วสร้างทดแทนใหม่

2.2.2.1.2 ระบบของโครงสร้างและรายละเอียด (Structural systems and Detail) ประกอบด้วยจำนวนและตำแหน่งของส่วนประกอบของโครงสร้างทั้งหมดที่สามารถวัดความต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้หรือสามารถเกิดความเสียหายจากการตอบสนองของอาคารและผลการตอบสนองที่กระทำต่อชิ้นส่วนเหล่านั้นเมื่อเกิดแผ่นดินไหว

2.2.2.1.3 ระบบที่ไม่ใช่โครงสร้าง, ส่วนประกอบและสิ่งของที่อยู่ภายในอาคาร (Nonstructural systems, Component and Contents) ประกอบด้วยส่วนประกอบของอาคารทั้งหมดที่ไม่ได้รับแรงแผ่นดินไหวแต่สามารถเกิดความเสียหายจากผลการตอบสนองของอาคารต่อการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวได้

2.2.2.1.4 ผู้อยู่อาศัย (Occupancy) คือการกระจายตัวของคนในอาคารและความไม่แน่นอนในการกระจายตัวนี้ด้วยเวลาต่างๆ การจัดหมวดหมู่ของผู้อยู่อาศัยเป็นสิ่งที่สำคัญในการใช้ประเมินสมรรถนะของอาคาร โดยมี 2 พังก์ชันที่สำคัญสำหรับผู้อยู่อาศัยโดยอย่างแรกคือสร้างแบบจำลองของประชากร (Population Model) นั่นคือจำนวนของประชากรในช่วงเวลาต่างๆของวันและจำนวนของประชากรในวันต่างๆของปีซึ่งจะนำไปใช้ประเมินจำนวนของคนที่ยึดและตายและอย่างที่สองคือการกำหนดการประมาณขั้นพื้นฐานของสิ่งของว่ามีจำนวนเท่าใด ซึ่งในความจริงแล้วได้มีการจัดเตรียมค่าดังกล่าวไว้แล้วสำหรับอาคารบางชนิดได้แก่ อาคารสำนักงาน โรงพยาบาล และโรงเรียน เป็นต้น

2.2.2.1.5 กลุ่มของความฟังก์ชันความบอบบางและสมรรถนะ (Fragility and Performance Groups) โดยกลุ่มของความฟังก์ชันความบอบบาง (Fragility Groups) คือการรวบรวมองค์ประกอบและระบบที่เหมือนกันอาทิเช่น การก่อสร้าง การรับความเสียหายและลำดับความเสียหายที่เหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 2.15 ในส่วนของกลุ่มสมรรถนะ (Performance Groups) เป็นส่วนย่อยของกลุ่มความบอบบาง โดยกลุ่มสมรรถนะคือสมาชิกของกลุ่มความบอบบางที่สมมติให้มีการรับผลตอบสนองที่เกิดจากแผ่นดินไหวที่เท่ากันเช่นการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ความเร่งของชั้น เป็นต้น

Fragility Classification Number	Description	Demand Parameter
B1035.001	Structural steel moment connections	Story drift ratio parallel to frame
B2022.001	Exterior curtain walls	Story drift ratio parallel to wall
C1011.001	Interior wall partitions	Story drift ratio parallel to wall
C3032.001	Suspended ceilings	Floor acceleration
D1014.011	Traction elevators	Peak ground acceleration
D3031.000	Chillers	Floor acceleration
E2022.001	Modular office workstations	Floor acceleration
E2022.112	Filing cabinets	Floor velocity

รูปที่ 2.15 ตัวอย่างกลุ่มของความบอบบาง (ATC, 2012)

2.2.2.1.6 ฟังก์ชันความบอบบาง (Fragility Function) คือการกระจายตัวทางสถิติที่ใช้วัดเงื่อนไขความน่าจะเป็นของการเกิดสภาพความเสียหาย โดยในวิธีการนี้ฟังก์ชันความบอบบางถูกสมมติให้เป็นการแจกแจงแบบล็อกปกติ (Lognormal Distributions)

2.2.2.1.7 สภาพความเสียหาย (Damage States) คืออาคารหรือส่วนประกอบของอาคารที่เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากแผ่นดินไหวซึ่งความเสียหายดังกล่าวจะเกิดขึ้นและเพิ่มขึ้นเมื่อผลตอบสนองมากขึ้น ซึ่งในวิธีการประเมินนี้นอกจากจะใช้ช่วงต่อเนื่องของความเป็นได้ของสภาพความเสียหายแล้ว ในแต่ละกลุ่มความบอบบางยังได้แบ่งออกเป็นช่วงของสภาพความเสียหายอีกด้วย

### 2.2.2.2 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของอาคาร (Analyze Building Response)

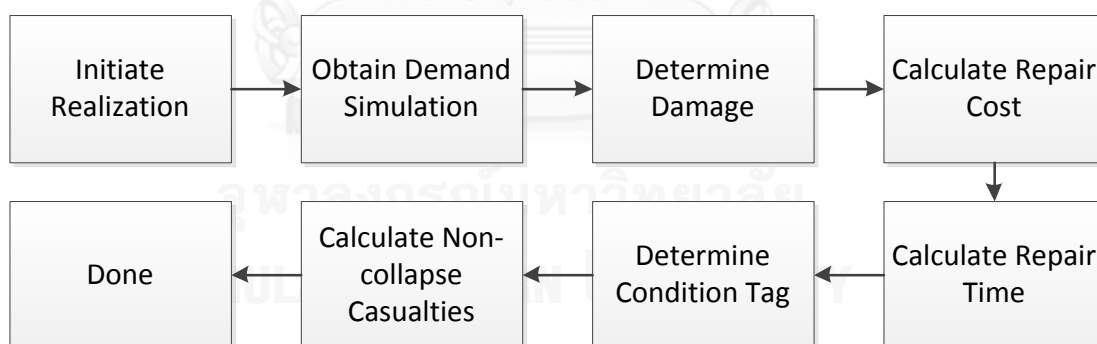
การวิเคราะห์โครงสร้างนั้นถูกใช้เพื่อหาผลตอบสนองของอาคารภายใต้แรงกระทำของแผ่นดินไหว อาทิเช่น ค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์และความเร่งในแต่ละชั้นของอาคาร เป็นต้น เพื่อจะใช้ค่าเหล่านี้ในการประเมินความสูญเสียที่เกิดจากแผ่นดินไหวซึ่ง FEMA P-58 ได้แนะนำ 2 วิธีการวิเคราะห์เพื่อใช้ในการหาผลตอบสนองได้แก่ การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นประวัติเวลา (Nonlinear Response-History Analysis) และการวิเคราะห์อย่างง่าย (simplified analysis)

### 2.2.2.3 การคำนวณสมรรถนะ (Calculate Performance)

ในการที่จะคำนวณสมรรถนะนั้นหลักการมอนติคาร์โล (Monte Carlo) จะใช้เพื่อหาความแปรปรวนในผลของสมรรถนะของอาคารสำหรับคลื่นแผ่นดินไหวที่ระดับความรุนแรงนั้นๆ ซึ่งนั้นรวมถึงการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวจำนวนมากในแต่ละระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่ต้องการ โดยมีคุณสมบัติของแบบจำลองการวิเคราะห์ที่แตกต่างกันซึ่งจะใช้ตัวแปรความไม่แน่นอนของแบบจำลอง (Modeling Uncertainty) การวิเคราะห์แบบจำลองซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วนโครงสร้างและไม่เป็นโครงสร้างนั้นจะสามารถคำนวณความเสียหายของแต่ละชั้นส่วนที่เกิดขึ้นได้ ผลของการวิเคราะห์ในแต่ละครั้งจะแสดงให้เห็นถึงความน่าจะเป็นของหนึ่งสภาพความเสียหาย

และผลของการวิเคราะห์จำนวนมากก็จะทำให้ได้ผลของการกระจายตัวของความน่าจะเป็นในการเกิดสภาพความเสียหายนั้นๆ ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้สามารถประเมินราคาค่าซ่อมแซม จำนวนคนเจ็บคนตายและผลลัพธ์อื่นๆ ที่เกิดเนื่องจากแผ่นดินไหวได้ แต่ในปัจจุบันวิธีการดังกล่าวนี้ยังไม่สามารถทำได้ เนื่องจากข้อจำกัดบางอย่างในการวิเคราะห์เช่นจำนวนของคลื่นแผ่นดินไหวที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์ยังมีไม่มากพอและจะต้องใช้เวลาค่อนข้างมากในการประเมินแต่ละครั้ง เป็นต้น ดังนั้นในกระบวนการที่จะหาความเสียหายของอาคารนั้น จะใช้จำนวนของผลการวิเคราะห์อาคารซึ่งมีไม่มากนักเพื่อประมาณค่ากลางของตัวแปรผลตอบสนองนั้นๆ อาทิเช่นการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ค่าความเร่งและความเร็วของแต่ละชั้น เป็นต้น ซึ่งค่ากลางนี้จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของผลการกระจายตัวโดยอยู่บนพื้นฐานของความไม่แน่นอนของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการหาผลตอบสนองของอาคาร ซึ่งแม้ว่าวิธีการนี้จะเป็นวิธีการทางอ้อมและขาดความแม่นยำในการวิเคราะห์เพื่อหาการกระจายตัวที่เหมาะสม แต่ก็ถือว่าเป็นวิธีการมีประสิทธิภาพและเหมาะสมมากที่สุดในเวลานี้

ในวิธีการของมอนติคาร์โลที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะของอาคารนั้น ผลของความเป็นไปได้ที่เกิดจากแผ่นดินไหวซึ่งรวมถึงชุดของผลตอบสนอง ความเสียหายและสมรรถนะของผลลัพธ์ จะอยู่ในรูปของ realization โดยในการที่จะสร้าง realization นั้นจะต้องหาการกระจายตัวทางสถิติของผลตอบสนองของการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อที่จะนำการกระจายตัวดังกล่าวมาสร้างชุดของผลตอบสนองที่เป็นไปได้สำหรับความรุนแรงของแผ่นดินไหวนั้นๆ ขึ้นมาใหม่ ซึ่งวิธีการดังกล่าวเรียกว่าการจำลอง (simulations) ซึ่งในการจำลอง 1 ครั้ง (ผลตอบสนองของโครงสร้าง 1 ชุด) จะใช้สำหรับ 1 realization ซึ่งจะให้ผลของความเป็นไปได้ของสภาพความเสียหาย 1 ชุด เท่านั้น ดังนั้นในแต่ละการประเมินความเสียหายของโครงสร้างจะจำลองผลตอบสนองที่ชุดนั้นขึ้นอยู่กับความถูกต้องที่การ โดยขั้นตอนในการประเมินของโปรแกรม PACT นั้นแสดงดังรูปที่ 2.16



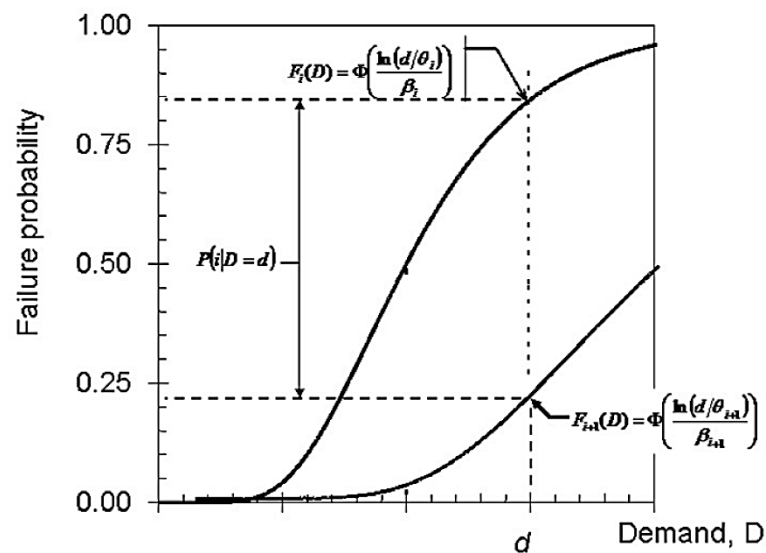
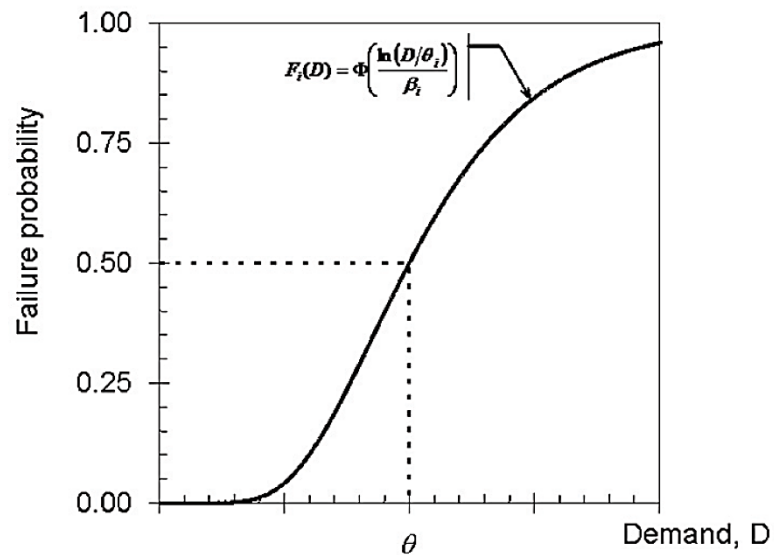
รูปที่ 2.16 ขั้นตอนในการประเมินสมรรถนะของโปรแกรม PACT

### 2.2.3 สภาพความเสียหายและความบอบบาง (Damage State and Fragilities)

ฟังก์ชันความบอบบาง (fragility function) คือการกระจายตัวของความน่าจะเป็นเพื่อหาความเป็นไปได้ว่าชิ้นส่วนหรือระบบนั้นๆ จะเกิดความเสียหายจากตัวแปรการตอบสนองที่ระบุเช่นค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (story drift) หรือค่าความเร่งในแต่ละชั้น (floor acceleration) เป็นต้น ในที่นี้ฟังก์ชันความบอบบางจะอยู่ในรูปของการแจกแจงล็อกปกติสะสม (Lognormal Cumulative Distribution) มีค่ามัธยฐาน,  $\theta$  และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของล็อกปกติ (Lognormal Standard

Deviation) หรือการกระจายตัว (Dispersion),  $\beta$  ซึ่งรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของฟังก์ชันความบอบบางเป็นไปดังสมการที่ 2.2

$$F_i(D) = \Phi\left(\frac{\ln(D/\theta_i)}{\beta_i}\right) \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.17 ฟังก์ชันความบอบบาง (Fragility Function) (บน) และ การประเมินความเป็นไปได้ของสภาพความเสียหาย (ล่าง) (ATC, 2012)

รูปที่ 2.17 (บน) แสดงถึงรูปแบบทั่วไปของล็อกปรกติฟังก์ชันความบอบบาง (Lognormal Fragility Function) เมื่อพล็อตให้อยู่ในรูปแบบของการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution)

และรูปที่ 2.17 (ล่าง) แสดงการหาความเป็นไปได้ที่ชั้นส่วนนั้นๆจะเกิดสภาพความเสียหายแบบ “ i ” ที่ระดับของตัวแปรตอบสนอง,d

โดยที่:

$F_i(D)$  คือ เงื่อนไขความเป็นไปได้ที่ชั้นส่วนนั้นๆจะได้รับความเสียหายแบบสภาพความเสียหาย “ i ” หรือความรุนแรงของความเสียหายในรูปแบบฟังก์ชันของตัวแปรการตอบสนอง, D

$\Phi$  แสดงถึงการแจกแจงแบบปกติสะสม (Standard normal cumulative distribution function)

$\theta_i$  คือ ค่ามัธยฐานของการแจกแจงความน่าจะเป็น

$\beta_i$  คือ ลอการิทึมของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ค่าการกระจายตัว,  $\beta$  แสดงถึงความไม่แน่นอนของตัวแปรการตอบสนอง, D ที่ทำให้เริ่มเกิดสภาพความเสียหายต่อชั้นส่วนซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3 โดยที่  $\beta_r$  แสดงถึงตัวแปรสุ่มที่สังเกตได้จากการทดสอบและ  $\beta_u$  แสดงถึงความไม่แน่นอนของการทดสอบไม่ว่าจะเป็นการติดตั้งหรือการให้แรงกระทำ

$$\beta = \sqrt{\beta_r + \beta_u} \quad (2.3)$$

ฟังก์ชันความบอบบาง (fragility function) สามารถที่จะสร้างขึ้นได้จากข้อมูลที่เหมาะสมของการทดสอบพฤติกรรมของชั้นส่วนที่สนใจเมื่อมีการเปลี่ยนค่าตัวแปรการตอบสนอง ซึ่ง FEMA 461 ได้นำเสนอระเบียบวิธีการในการทดสอบและวิธีการเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ แต่เนื่องจากการทดสอบนั้นมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างมากและใช้เวลานาน ปัจจุบันข้อมูลสมบูรณที่ได้จากการทดสอบจึงมีไม่มากนัก ดังนั้นจึงมีการนำเสนอวิธีการที่จะหาค่ามัธยฐาน,  $\theta$  และการกระจายตัว,  $\beta$  สำหรับ ความบอบบางภายใต้เงื่อนไขของข้อมูลที่มี 5 แบบ ดังนี้

2.2.3.1 ข้อมูลผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจริง (Actual Demand Data) เมื่อมีข้อมูลที่ได้จากการทดสอบและในแต่ละการทดสอบของชั้นตัวอย่างนั้น สภาพความเสียหายของชั้นส่วนสามารถระบุได้จากค่าตัวแปรการตอบสนอง,d ค่ามัธยฐานของตัวแปรการตอบสนองในแต่ละสภาพความเสียหาย

2.2.3.2 ข้อมูลผลตอบสนองที่มีข้อจำกัด (Bounding Demand Data) เมื่อมีข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง แต่สภาพความเสียหายที่สนใจเกิดขึ้นกับบางตัวอย่างที่ทำการทดสอบเท่านั้น กล่าวคือบางตัวอย่างที่ทำการทดสอบอาจไม่เกิดความเสียหายเลยหรือบางครั้งตัวอย่างนั้นอาจวิบัติพังทลายก่อนที่จะวัดสภาพความเสียหายได้ ซึ่งในการที่จะสร้างฟังก์ชันความบอบบางในแต่ละตัวอย่างที่ “i” นั้นจำเป็นต้องทราบค่าของตัวแปรการตอบสนองสูงสุด,  $d_i$  ที่ตัวอย่างนั้นถูกกระทำหรือไม่ก็ตัวอย่างนั้นต้องเกิดสภาพความเสียหายที่เราสนใจ

2.2.3.3 ข้อมูลผลตอบแทนที่สามารถทำได้ (Capable Demand Data) เมื่อมีข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง แต่ทุกตัวอย่างที่ทำการทดสอบไม่เกิดสภาพความเสียหายที่สนใจ ซึ่งในการที่จะสร้างฟังก์ชันความบอบบางในแต่ละตัวอย่างที่ “i” นั้นจำเป็นต้องทราบค่าของตัวแปรการตอบสนองสูงสุด,  $d_i$  ที่ตัวอย่างนั้นถูกกระทำ หรือไม่ก็ต้องรู้ความเสียหายที่เกิดกับตัวอย่างนั้นๆ

2.2.3.4 ข้อมูลผลจอบสนองจากการคำนวณ (Derivation) มี 2 วิธีการที่ใช้ในการหาค่า Fragility Parameter ซึ่งวิธีแรกคือ การคำนวณแบบเดี่ยว(Single Calculation) ของกำลังที่คาดว่าจะรับได้(Probable Capacity) กับค่าเริ่มต้นของลอการิทึมส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Default value of logarithmic standard deviation) สำหรับวิธีที่สองคือการใช้มอนติ-คาร์โล (Monte Carlo) เพื่อวิเคราะห์หาผลของความแปรผันของกำลังวัสดุ, คุณภาพของการก่อสร้าง และตัวแปรต่างๆที่ได้จากการสุ่ม

2.2.3.5 ความเห็นของผู้เชี่ยวชาญ (Expert Opinion) เมื่อไม่มีข้อมูลของการทดสอบที่สามารถใช้ได้และการวิเคราะห์ชิ้นส่วนก็ไม่สามารถทำได้เช่นกัน จำเป็นที่ต้องใช้ข้อเสนอแนะของบุคคลซึ่งมีความรู้และมีประสบการณ์ ซึ่งจะทราบถึงระดับของผลตอบแทนที่ทำให้เกิดสภาพความเสียหายได้

## 2.2.4 ฟังก์ชันผลลัพธ์ (Consequence Function)

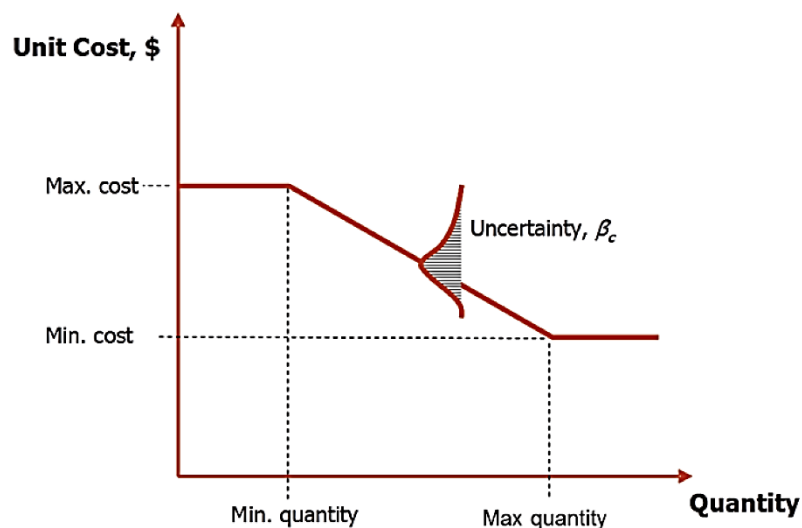
ฟังก์ชันผลลัพธ์สำหรับเปลี่ยนความเสียหายของชิ้นส่วนหรือของอาคารให้อยู่ในรูปแบบของค่าสมรรถนะได้แก่ ค่าซ่อมแซม, เวลาที่ใช้ในการซ่อมแซม, ความน่าจะเป็นของการติดประกาศว่าอาคารไม่ปลอดภัย และจำนวนคนเจ็บและตาย ซึ่งในแต่ละขั้นตอนในการประเมินสมรรถนะนั้นจะเกิดความไม่แน่นอน (uncertainties) จากแปลงสภาพความเสียหายสู่ผลลัพธ์ ซึ่งฟังก์ชันผลลัพธ์ได้แสดงให้เห็นถึงความไม่แน่นอนนี้ในรูปแบบของการแจกแจงความน่าจะเป็นของผลลัพธ์ของแต่ละสภาพความเสียหาย ในแต่ละข้อกำหนดของความบอบบาง (fragility specification) จะรวมฟังก์ชันผลลัพธ์สำหรับแต่ละสภาพความเสียหายและแต่ละค่าสมรรถนะ

ฟังก์ชันผลลัพธ์ของค่าซ่อมแซมและเวลาที่ใช้ในการซ่อมที่นำเสนอในโปรแกรม PACT นั้นได้ถูกพัฒนาโดยผู้เชี่ยวชาญด้านการประมาณราคาโดยดูจากสภาพความเสียหาย ค่าซ่อมแซมและเวลาที่พัฒนาขึ้นนั้นยังรวมถึงการพิจารณาบางงานที่สามารถทำได้พร้อมกัน เช่นการรื้อนั่งร้านกับการจัดการกับเศษของชิ้นส่วนที่เสียหายเป็นต้น ค่าของ  $10^{th}$ ,  $50^{th}$  และ  $90^{th}$  เปอร์เซ็นไทล์ได้ถูกใช้เพื่อประมาณค่าไม่แน่นอน (uncertainty) ที่เกิดขึ้น และเพื่อให้ง่ายสำหรับการใช้โปรแกรม PACT ฟังก์ชันผลลัพธ์สามารถผลลัพธ์สามารถสร้างได้ทั้งรูปแบบการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ (normal probability distribution) และการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบล็อกปกติ (lognormal probability distribution)

เมื่ออาคารไม่ได้พังทลาย บางชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหายอาจก่อให้เกิดการบาดเจ็บล้มตายได้ในแต่ละสภาพความเสียหายการที่จะคำนวณไม่ว่าจะเป็นจำนวนคนเจ็บหรือคนตายนั้นสามารถทำได้ และการที่จะคำนวณได้นั้นจำเป็นต้องมีการประมาณการพื้นที่ผลกระทบ (Impacted area) ซึ่งก็คือพื้นที่ของชิ้นอยู่ติดกับชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหายในการที่จะมีความเสี่ยงของการบาดเจ็บเกิดขึ้น ความน่าจะเป็นของการบาดเจ็บร้ายแรงหรือการตายในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบคาดว่าจะขึ้นอยู่กับ

น้ำหนักของขึ้น สถานที่ติดตั้ง และการตัดสินใจ ซึ่งแบบจำลองประชากร (Population Model) ใช้เพื่อแสดงจำนวนของคนในช่วงเวลาต่างๆ

ในการที่จะคำนวณราคาค่าก่อสร้างนั้นจะต้องพิจารณาถึงปริมาณที่ต้องการซ่อมแซมด้วย เมื่อมีปริมาณการซ่อมแซมงานที่มีลักษณะเดียวกันมากจะมีผลต่อราคาซ่อมแซมเช่นค่าขนย้ายเรื่องจักร ซึ่งจะสามารถลดราคาค่าซ่อมแซมต่อหน่วยได้ ในแต่ละสภาพความเสียหายฟังก์ชันผลลัพธ์จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างของฟังก์ชันผลลัพธ์ของราคาและค่าซ่อมแซม (ATC, 2012)

โดย;

- Lower quantity คือ ปริมาณการซ่อมแซมของสภาพความเสียหายชนิดนั้นๆที่มีค่าน้อยกว่าค่านี้จะไม่มีการพิจารณาส่วนลดของราคาจากกระบวนการก่อสร้าง
- Maximum Cost คือ ราคาซ่อมแซมต่อหน่วยของสภาพความเสียหายนั้นๆซึ่งไม่พิจารณาผลของปริมาณการซ่อมแซม
- Upper quantity คือ ปริมาณการซ่อมแซมมากที่สุดที่จะเริ่มไม่คิดผลของส่วนลดราคาจากการก่อสร้าง
- Minimum Cost คือ ราคาซ่อมแซมต่อหน่วยต่ำสุดของสภาพความเสียหายนั้นๆ เมื่อพิจารณาทุกความเป็นไปได้เพื่อปรับลดราคาแล้ว
- Dispersion คือ ความไม่แน่นอนของราคาต่อหน่วย

### บทที่ 3

## อาคารตัวอย่างและคลื่นแผ่นดินไหว

### 3.1 อาคารตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมและความเสียหายของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กระหว่างอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวและอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว โดยอาคารตัวอย่างมีทั้งหมด 4 อาคารและถูกสมมติให้ตั้งอยู่ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร ซึ่งประกอบไปด้วย อาคารพักอาศัยสูง 4 ชั้นโดยไม่ได้ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว (B4) อาคารพักอาศัยสูง 4 ชั้นโดยออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว (B4E) อาคารพักอาศัยสูง 10 ชั้นโดยไม่ได้ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว (B10) และอาคารพักอาศัยสูง 10 ชั้นโดยออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว (B10E) สำหรับอาคารที่ไม่ได้ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหวนั้นจะออกแบบตามมาตรฐาน ACI-318 และคิดผลของแรงลมตามกฎกระทรวงฉบับที่ 6 ในส่วนอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวจะพิจารณาผลของแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐาน มยผ. 1302 เพิ่มเติมจากอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ซึ่งการออกแบบในลักษณะดังกล่าวเป็นการออกแบบอาคารส่วนมากที่ก่อสร้างในเขตกรุงเทพมหานคร

#### 3.1.1 อาคารตัวอย่างที่ไม่ได้มีการออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว

อาคารที่ไม่ได้ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหวเป็นอาคารพักอาศัยสูง 4 ชั้น (B4) และ 10 ชั้น (B10) มีระบบโครงสร้างแบบโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบธรรมดา (ordinary RC moment resisting frame, OMF) มีความสูงชั้นละ 3 เมตร ทั้ง 2 อาคารมีแปลนแบบเดียวกัน โดยมีคานจำนวน 5 ช่วงในแนว H1 และมีคาน 3 ช่วงในแนว H2 ในส่วนของตัวอาคารจะกว้าง 12 เมตร ยาว 20 เมตร โดยรูปแปลนและรูปด้านของอาคารตัวอย่างทั้ง 2 อาคารแสดงในรูปที่ 3.1 ถึง 3.3 อาคารทั้ง 2 ได้ถูกออกแบบตามมาตรฐาน ACI-318 และใช้ผลรวมแรงตามกฎกระทรวงฉบับที่ 6 ดังสมการที่ 3.1 ถึง 3.3 ในการออกแบบใช้น้ำหนักบรรทุกจร 200 กก./ม.<sup>2</sup> มีผนังก่ออิฐมวลเบาคึ่งแผ่นกั้นระหว่างห้องและรอบตัวอาคารน้ำหนัก 180 กก./ม.<sup>2</sup> พื้นของอาคารเป็นแผ่นพื้นสำเร็จรูป หน่วยแรงลมนีค่าเท่ากับ 80 กิโลกรัมต่อตารางเมตร สำหรับอาคารสูง 4 ชั้นและ 120 กิโลกรัมต่อตารางเมตรสำหรับอาคารสูง 10 ชั้น กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ( $f_c'$ ) มีค่าเท่ากับ 240 กก./ชม.<sup>2</sup> ใช้เหล็กข้ออ้อยที่มีกำลังคราก ( $f_y$ ) เท่ากับ 4,000 กก./ชม.<sup>2</sup> และใช้เหล็กกลมที่มีกำลังคราก ( $f_{yt}$ ) เท่ากับ 2,400 กก./ชม.<sup>2</sup> โดยรายละเอียดหน้าตัดและเหล็กเสริมของชิ้นส่วนของอาคารแสดงในตารางที่ 3.1-3.4

$$1.7DL + 2.0LL \quad (3.1)$$

$$0.75(1.7DL + 2.0LL + 2.0WL) \quad (3.2)$$

$$0.9DL + 1.3WL \quad (3.3)$$

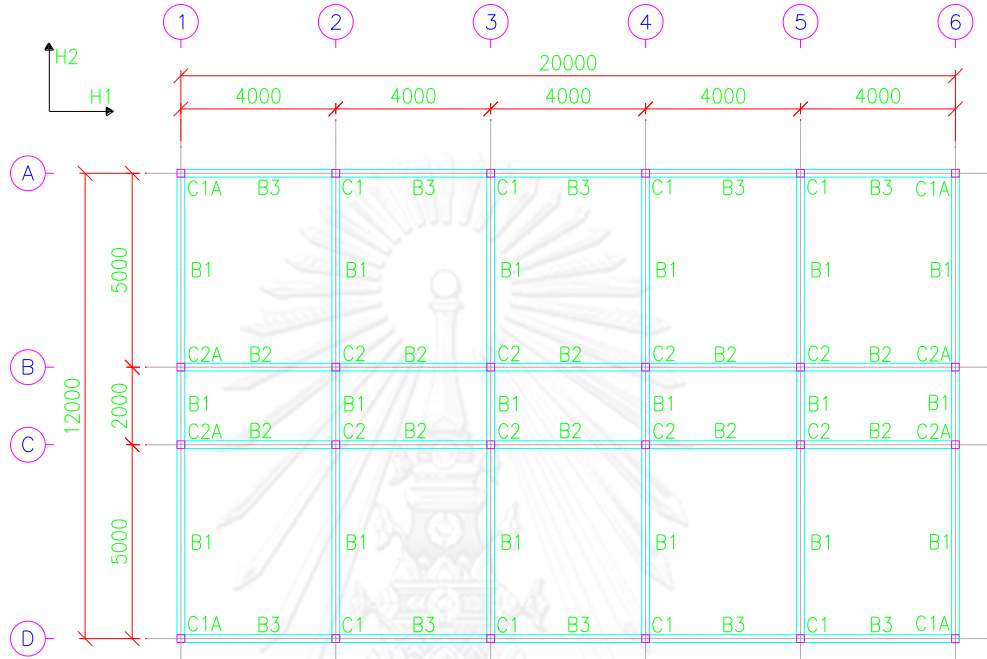


โดยที่;

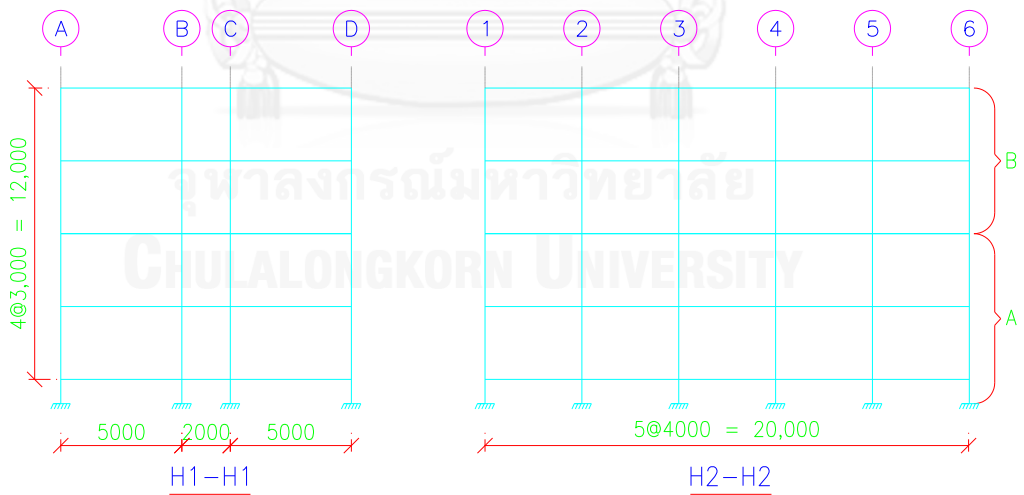
*DL* คือ น้ำหนักบรรทุกคงที่ของอาคาร

*LL* คือ น้ำหนักบรรทุกจร

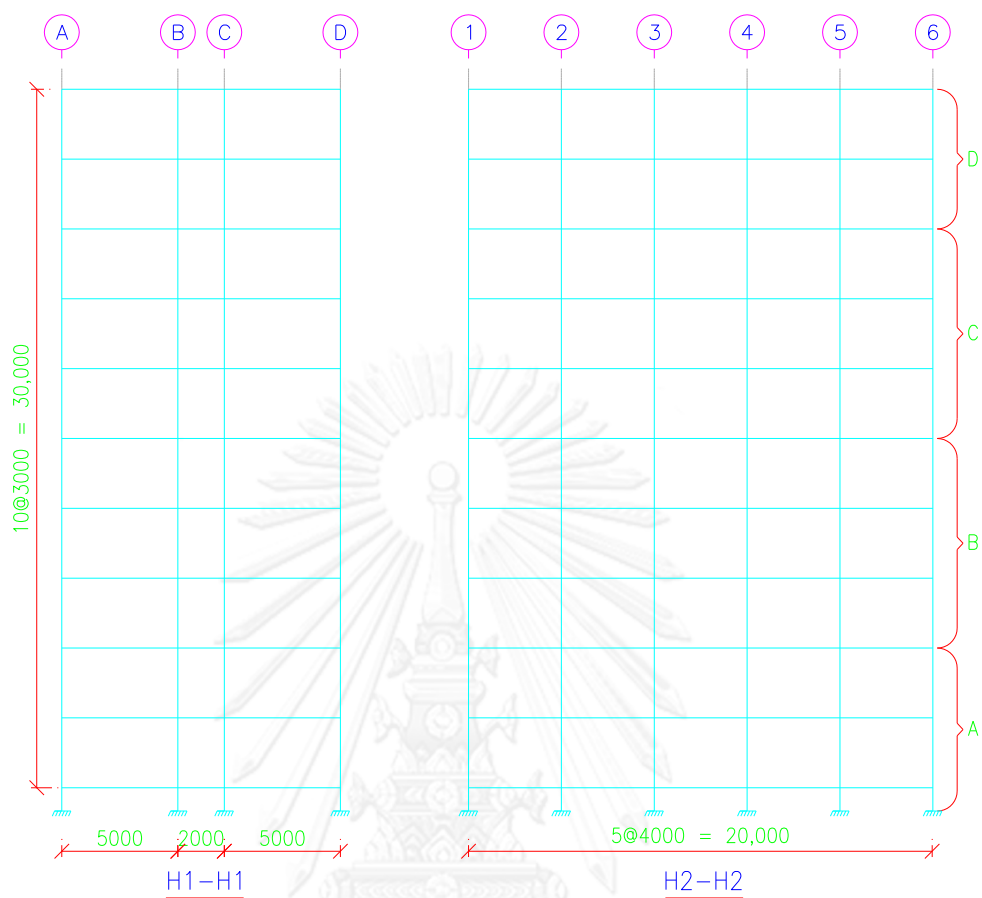
*WL* คือ แรงลม



รูปที่ 3.1 แพลนของอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 3.2 รูปด้านของอาคารสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว (B4)



รูปที่ 3.3 รูปด้านของอาคารสูง 10 ชั้นที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว (B10)

ตารางที่ 3.1 ขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนเสาและรายละเอียดเหล็กเสริมของอาคารที่พักอาศัยสูง 4 ชั้น ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

เสา	ช่วงชั้น	หน้าตัด (cm. x cm.)	จำนวนเหล็ก เสริม	เหล็กเสริม (%)	จำนวนเหล็กปลอก
C1	Base - 3	30x30	8-DB20	2.79	RB9@300mm
	3 - Roof	25x25	8-DB20	4.02	RB9@250mm
C1A	Base - 3	30x30	8-DB20	2.79	RB9@300mm
	3 - Roof	25x25	8-DB20	4.02	RB9@250mm
C2	Base - 3	30x30	8-DB16	1.79	RB9@300mm
	3 - Roof	25x25	8-DB16	2.57	RB9@250mm
C2A	Base - 3	30x30	8-DB16	1.79	RB9@300mm
	3 - Roof	25x25	8-DB16	2.57	RB9@250mm

ตารางที่ 3.2 ขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนคานของอาคารที่พักอาศัยสูง 4 ชั้น ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

คาน	ช่วงชั้น	หน้าตัด (cm. x cm.)
B1	Base - Roof	20x40
B2	Base - Roof	20x40
B2	Base - Roof	20x40

ตารางที่ 3.3 ขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนเสาและรายละเอียดเหล็กเสริมของอาคารที่พักอาศัยสูง 10 ชั้น ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

เสา	ช่วงชั้น	หน้าตัด (cm x cm)	จำนวนเหล็ก เสริม	เหล็กเสริม (%)	จำนวนเหล็กปลอก
C1	Base - 3	40x40	8-DB25	2.45	RB9@400mm
	3 - 6	35x35	8-DB20	2.05	RB9@350mm
	6 - 9	30x30	8-DB20	2.79	RB9@300mm
	9 - Roof	25x25	8-DB20	4.02	RB9@250mm
C1A	Base - 3	40x40	8-DB25	2.45	RB9@400mm
	3 - 6	35x35	8-DB20	2.05	RB9@350mm
	6 - 9	30x30	8-DB20	2.79	RB9@300mm
	9 - Roof	25x25	8-DB20	4.02	RB9@250mm
C2	Base - 3	40x40	12-DB25	3.68	RB9@400mm
	3 - 6	35x35	8-DB25	3.21	RB9@350mm
	6 - 9	30x30	8-DB20	2.79	RB9@300mm
	9 - Roof	25x25	8-DB16	2.57	RB9@250mm
C2A	Base - 3	40x40	12-DB25	3.68	RB9@400mm
	3 - 6	35x35	8-DB25	3.21	RB9@350mm
	6 - 9	30x30	8-DB20	2.79	RB9@300mm
	9 - Roof	25x25	8-DB16	2.57	RB9@250mm

ตารางที่ 3.4 ขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนคานของอาคารที่พักอาศัยสูง 10 ชั้น ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

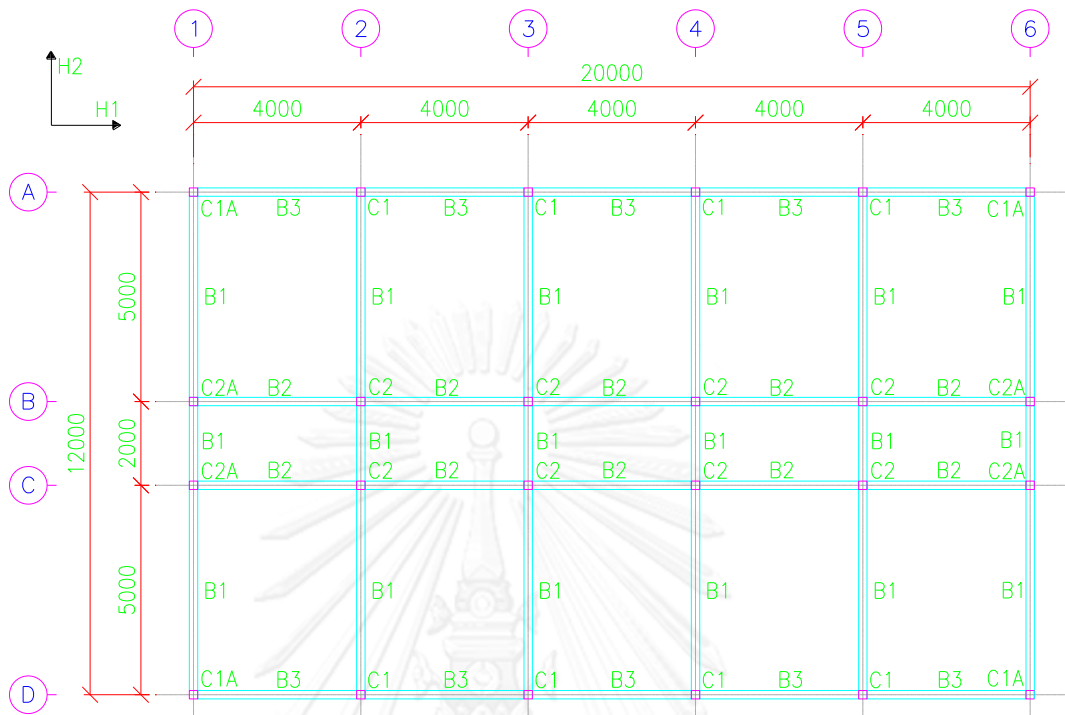
คาน	ช่วงชั้น	หน้าตัด (cmx cm)
B1	Base - Roof	20x40
B2	Base - Roof	20x40
B3	Base - Roof	20x40

### 3.1.2 อาคารตัวอย่างที่มีการออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว

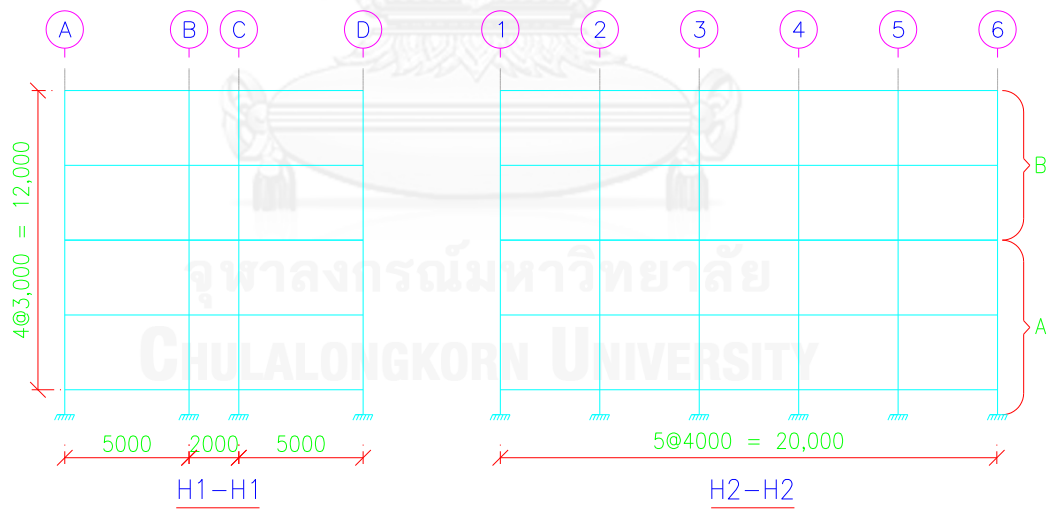
เพื่อที่จะทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมและความเสียหายระหว่างอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวและอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวนั้น อาคารตัวอย่างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวจึงมีทั้งหมด 2 อาคารเช่นเดียวกัน คืออาคารพักอาศัยสูง 4 ชั้น (B4E) และ 10 ชั้น (B10E) ลักษณะรูปแปลนของอาคารจะเหมือนกันกับอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวดังแสดงในรูปที่ 3.4-3.6 ในการออกแบบนั้นจะออกแบบตามมาตรฐาน ACI-318 ใช้ผลรวมแรงตามกฎกระทรวงฉบับที่ 6 ดังสมการที่ 3.1 ถึง 3.3 และคิดผลของแผ่นดินไหวตามมาตรฐาน มยผ. 1302 ดังสมการที่ 3.4 และ 3.5 ใช้น้ำหนักบรรทุกจรเท่ากับ 200 กก./ม.<sup>2</sup> มีผนังก่ออิฐมวลเบาครึ่งแผ่นกั้นระหว่างห้องและรอบตัวอาคารน้ำหนัก 180 กก./ม.<sup>2</sup> พื้นของอาคารเป็นแผ่นพื้นสำเร็จรูป กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ( $f'_c$ ) มีค่าเท่ากับ 240 กก./ชม.<sup>2</sup> ใช้เหล็กข้ออ้อยที่มีกำลังคราก ( $f_y$ ) เท่ากับ 4,000 กก./ชม.<sup>2</sup> และใช้เหล็กกลมที่มีกำลังคราก ( $f_y$ ) เท่ากับ 2,400 กก./ชม.<sup>2</sup>

ในการออกแบบเพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐาน มยผ. 1302 งานวิจัยนี้จะออกแบบโดยใช้วิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด (Modal Response Spectrum Analysis) โดยใช้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับออกแบบพื้นที่ในโซน 5 ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพดังแสดงในรูปที่ 3.7 และกำหนดระบบโครงสร้างของอาคารเป็นแบบโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวจำกัด (Ductile RC Moment-Resisting Frame with Limited Ductility/ Intermediate RC Moment Resisting Frame) ซึ่งมีค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (response modification factor, R) เท่ากับ 5 และให้ตัวประกอบความสำคัญ (Important Factor, I) มีค่าเท่ากับ 1.25

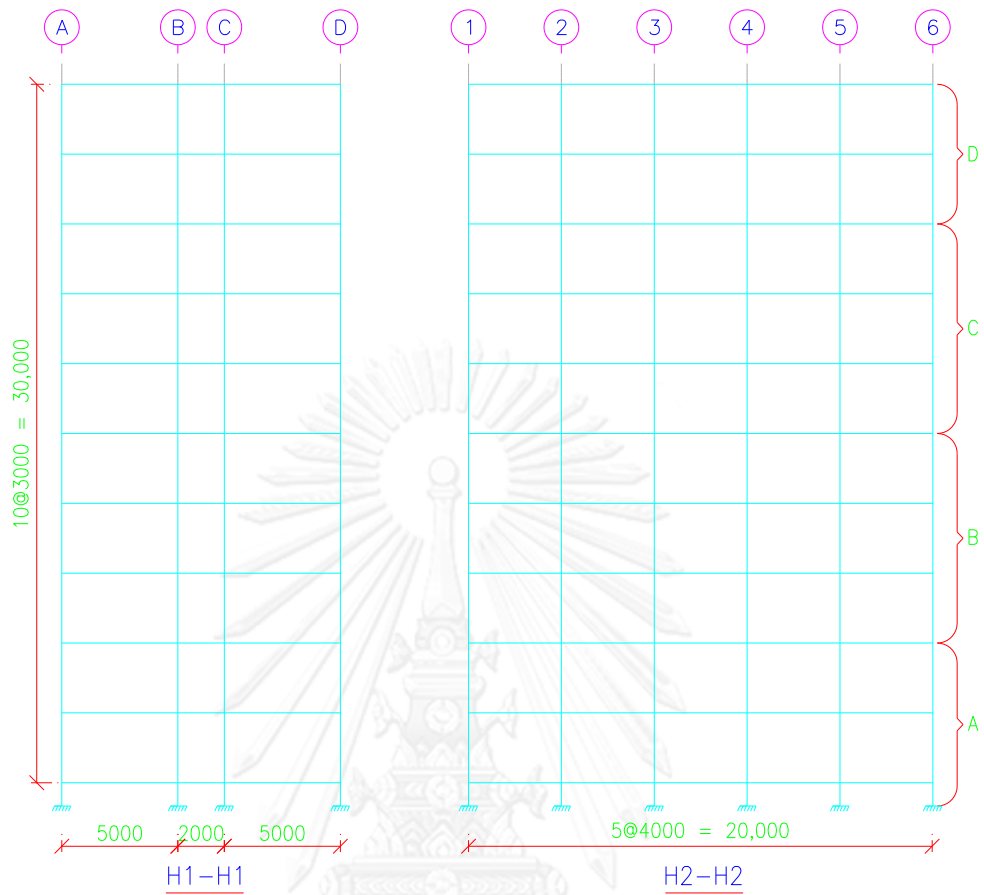
อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าในการออกแบบอาคารตัวอย่างจะใช้วิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมด แต่มาตรฐาน มยผ.-1302 ก็ได้มีข้อกำหนดไว้ว่าหากค่าแรงเฉือนที่ฐานจากการวิเคราะห์ (Modal Base Shear,  $V_t$ ) มีค่าน้อยกว่า 85% ของค่าแรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear,  $V$ ) ที่ได้จากวิธีแรงสถิตเทียบเท่า (Equivalent Lateral Force Procedure) จะต้องทำการปรับเพิ่มค่าแรงภายในจากวิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโหมดโดยคูณเพิ่มด้วยค่า  $0.85V/V_t$  ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์แบบแรงสถิตเทียบเท่าเพื่อนำค่าแรงเฉือนที่ได้มาเปรียบเทียบกับ



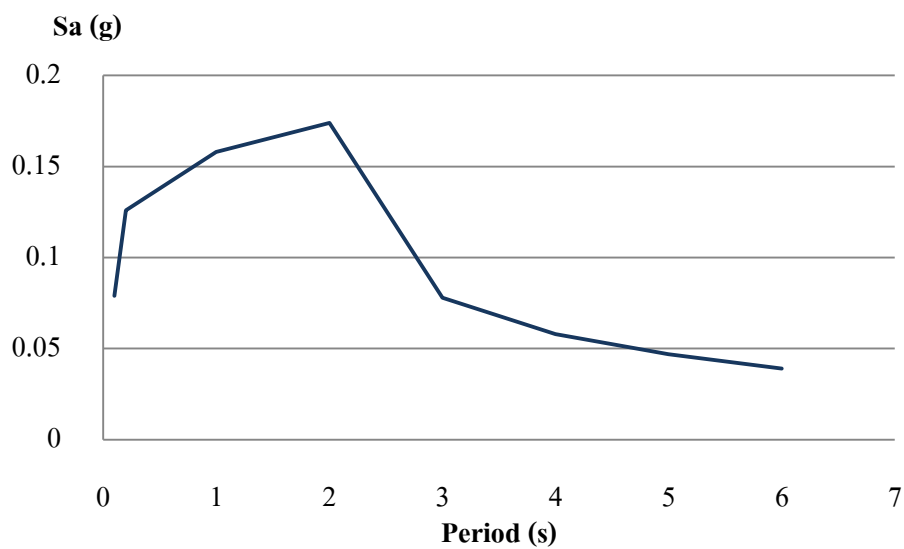
รูปที่ 3.4 แพลนของอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 3.5 รูปด้านของอาคารสูง 4 ชั้นที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว (B4E)



รูปที่ 3.6 รูปด้านของอาคารสูง 10 ชั้นที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว (B10E)



รูปที่ 3.7 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับออกแบบพื้นที่โนโซน 5 ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพฯ ที่ระบุไว้ใน มยผ.-1302

$$1.0DL+1.0LL+1.0EQ \quad (3.4)$$

$$0.9DL+1.0EQ \quad (3.5)$$

โดยที่;

$EQ$  คือ แรงของแผ่นดินไหว

สำหรับอาคารที่ออกแบบให้มีความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวนั้นจะมีรายละเอียดของเหล็กเสริมต่างกับอาคารที่ไม่ได้รับการออกแบบให้ต้านทานแผ่นดินไหว เนื่องจากอาคารที่ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหวจะถูกกำหนดพฤติกรรมให้มีความเหนียวซึ่งขึ้นอยู่กับระบบโครงสร้างอาคารหรือค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง ดังนั้นในการใส่รายละเอียดเหล็กเสริมจึงจำเป็นที่จะต้องทำให้อาคารดังกล่าวมีพฤติกรรมเป็นไปตามที่ระบุ ซึ่งข้อกำหนดเกี่ยวกับการให้รายละเอียดเหล็กเสริมนั้นได้ระบุในมาตรฐาน มยผ.-1301 ดังแสดงในรูปที่ 3.8 สำหรับคานนั้นเหล็กปลอกในช่วงที่มีความเสี่ยง (Critical Zone) จะต้องมีระยะเรียงไม่น้อยกว่า  $S_1$  โดยระยะเรียง  $S_1$  ต้องมีค่าไม่มากกว่าค่าต่อไปนี้ได้แก่ 1 ใน 4 ของความลึกประสิทธิภาพ, 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมตามยาวที่มีขนาดเล็กที่สุด, 24 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอกและ 300 มิลลิเมตร สำหรับในส่วนของรายละเอียดเหล็กเสริมในเสาซึ่งแสดงในรูปที่ 3.9 กำหนดให้ช่วงที่มีความเสี่ยง (Critical Zone, L) ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าค่าดังต่อไปนี้คือ  $H/6$ ,  $C_1$  และ 500 มิลลิเมตร โดยในช่วงดังกล่าวระยะเรียงของเหล็กปลอกต้องมีค่าไม่เกิน  $S_0$  ซึ่ง  $S_0$  ต้องมีค่าไม่มากกว่าค่าดังต่อไปนี้ได้แก่ 8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมตามยาวที่มีขนาดเล็กที่สุด, 24 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กปลอก,  $C_2/2$  และ 300 มิลลิเมตร โดยรายละเอียดหน้าตัดและเหล็กเสริมของชิ้นส่วนของอาคารแสดงในตารางที่ 3.5-3.8

ตารางที่ 3.5 ขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนเสาและรายละเอียดเหล็กเสริมของอาคารที่פקอาศัยสูง 4 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

เสา	ช่วงชั้น	หน้าตัด (cm.xcm.)	จำนวน เหล็กเสริม	เหล็กเสริม (%)	จำนวนเหล็กปลอก	
					Cri. Zone	Nor. Zone
C1	Base - 3	30x30	8-DB20	2.79	RB9@150mm	RB9@300mm
	3 - Roof	25x25	8-DB20	4.02	RB9@100mm	RB9@250mm
C1A	Base - 3	30x30	8-DB20	2.79	RB9@150mm	RB9@300mm
	3 - Roof	25x25	8-DB20	4.02	RB9@100mm	RB9@250mm
C2	Base - 3	30x30	8-DB16	1.79	RB9@150mm	RB9@300mm
	3 - Roof	25x25	8-DB16	2.57	RB9@100mm	RB9@250mm
C2A	Base - 3	30x30	8-DB16	1.79	RB9@150mm	RB9@300mm
	3 - Roof	25x25	8-DB16	2.57	RB9@100mm	RB9@250mm

ตารางที่ 3.6 ขนาดหน้าตัดชั้นส่วนคานของอาคารที่พักอาศัยสูง 4 ชั้น ที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

คาน	ช่วงชั้น	หน้าตัด (cm. x cm.)	จำนวนเหล็กปลอก	
			Cri. Zone	Nor. Zone
B1	Base - Roof	20x40	RB9@90mm.	RB9@150mm.
B2	Base - Roof	20x40	RB9@90mm.	RB9@150mm.
B3	Base - Roof	20x40	RB9@90mm.	RB9@90mm.

ตารางที่ 3.7 ขนาดหน้าตัดชั้นส่วนเสาและรายละเอียดเหล็กเสริมของอาคารที่พักอาศัยสูง 10 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

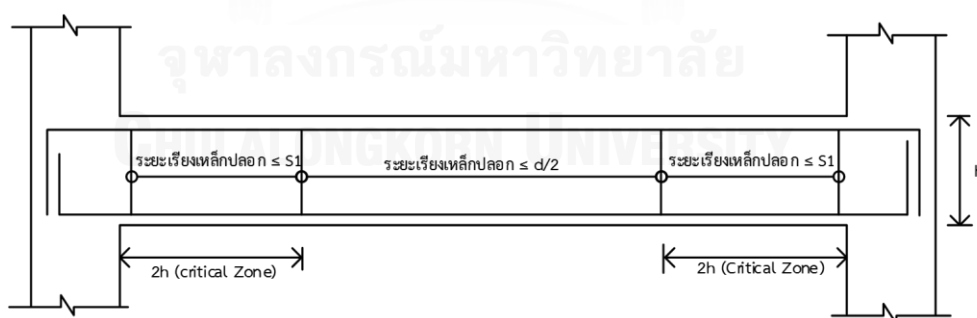
เสา	ช่วงชั้น	หน้าตัด (cmxcm)	จำนวน เหล็กเสริม	เหล็กเสริม (%)	จำนวนเหล็กปลอก	
					Cri. Zone	Nor. Zone
C1	Base - 3	40x40	8-DB25	2.45	RB9@200mm	RB9@400mm
	3 - 6	35x35	8-DB20	2.05	RB9@150mm	RB9@350mm
	6 - 9	30x30	8-DB20	2.79	RB9@150mm	RB9@300mm
	9 - Roof	25x25	8-DB20	4.02	RB9@100mm	RB9@250mm
C1A	Base - 3	40x40	8-DB25	2.45	RB9@200mm	RB9@400mm
	3 - 6	35x35	8-DB20	2.05	RB9@150mm	RB9@350mm
	6 - 9	30x30	8-DB20	2.79	RB9@150mm	RB9@300mm
	9 - Roof	25x25	8-DB20	4.02	RB9@100mm	RB9@250mm
C2	Base - 3	40x40	12-DB25	3.68	RB9@200mm	RB9@400mm
	3 - 6	35x35	8-DB25	3.21	RB9@150mm	RB9@350mm
	6 - 9	30x30	8-DB20	2.79	RB9@150mm	RB9@300mm
	9 - Roof	25x25	8-DB16	2.57	RB9@100mm	RB9@250mm
C2A	Base - 3	40x40	12-DB25	3.68	RB9@200mm	RB9@400mm
	3 - 6	35x35	8-DB25	3.21	RB9@150mm	RB9@350mm
	6 - 9	30x30	8-DB20	2.79	RB9@150mm	RB9@300mm
	9 - Roof	25x25	8-DB16	2.57	RB9@100mm	RB9@250mm



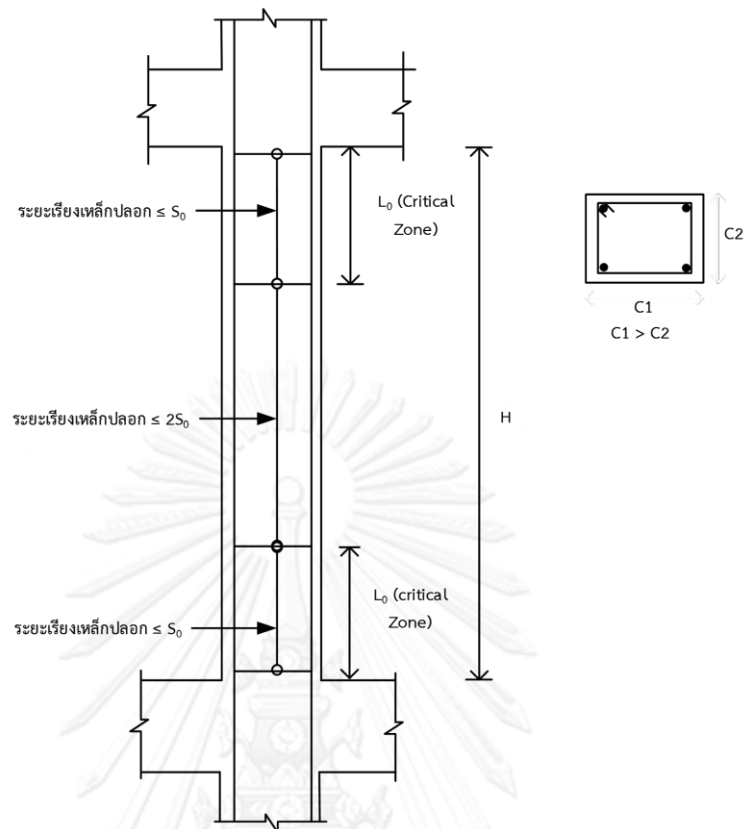
ตารางที่ 3.8 ขนาดหน้าตัดชิ้นส่วนคานของอาคารที่พักอาศัยสูง 10 ชั้น ที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

คาน	ช่วงชั้น	หน้าตัด (cm. x cm.)	จำนวนเหล็กปลอก	
			Cri. Zone	Nor. Zone
B1	Base - Roof	20x40	RB9@90mm.	RB9@90mm.
B2	Base - Roof	20x40	RB9@90mm.	RB9@150mm.
B3	Base - Roof	20x40	RB9@90mm.	RB9@90mm.

จากรายละเอียดของอาคารตัวอย่างทั้ง 4 อาคารแสดงให้เห็นว่าเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัดในเสาของอาคารมีจำนวนเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าแรงที่ใช้ในการออกแบบมีความแตกต่างกันไม่มากนัก ซึ่งจะเห็นได้จากข้อมูลในตารางที่ 3.9 สำหรับอาคารสูง 4 ชั้น แม้ว่าค่าแรงเฉือนที่ฐานจากผลของแรงแผ่นดินไหวจะมีค่ามากกว่าผลของแรงลมแต่เมื่อพิจารณาผลของการรวมแรงตามกฎกระทรวงฉบับที่ 6 ซึ่งมีค่ามากถึง 1.5 เท่าของแรงลมที่แสดงในตารางที่ 3.9 ทำให้ค่าแรงที่ใช้ในการออกแบบไม่แตกต่างกันมาก เช่นเดียวกับอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น เมื่อพิจารณาผลของการรวมแรงตามกฎกระทรวงฉบับที่ 6 ค่าแรงลมมีค่ามากกว่าแรงแผ่นดินไหว ดังนั้นในการออกแบบแรงในชิ้นส่วนจึงใช้แรงภายในที่ได้จากผลของแรงลมในการออกแบบ อย่างไรก็ตามแม้ว่าเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัดจะมีปริมาณเท่ากัน แต่ในส่วนของเหล็กเสริมรับแรงเฉือนซึ่งอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวถูกกำหนดให้มีระบบโครงสร้างแบบโครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวจำกัด จำเป็นที่ต้องมีรายละเอียดของเหล็กปลอกตามมาตรฐานการออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหว ดังนั้นในช่วงบริเวณที่ปลายเสาจะมีระยะเรียงของเหล็กปลอกน้อยกว่าอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 3.8 แสดงรายละเอียดของเหล็กเสริมในคานตามมาตรฐาน มยผ.-1301



รูปที่ 3.9 แสดงรายละเอียดของเหล็กเสริมในเสาตามมาตรฐาน มยผ.-1301

ตารางที่ 3.9 แรงเฉือนที่ฐาน (base shear) ที่ใช้ในการออกแบบอาคาร

Model	earthquake base shear (tons)	wind base shear (tons)
อาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้น	32	20
อาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น	86	72

### 3.2 การสร้างแบบจำลองของอาคารตัวอย่างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลตอบสนอง

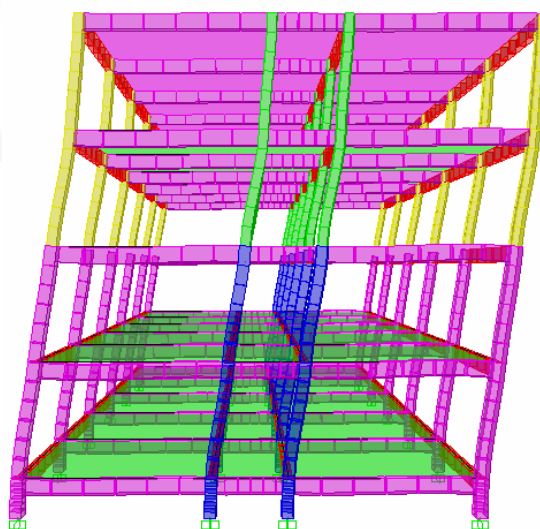
ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการวิเคราะห์แบบวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Dynamic Procedure) ซึ่งถือว่าเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ให้ผลได้ถูกต้องมากที่สุด ชั้นส่วนเสาและคานจะถูกจำลองให้มีพฤติกรรมอินอีลาสติก โดยในการวิเคราะห์เพื่อหาผลตอบสนองนั้นจะวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม PERFORM-3D และเนื่องจากในการหาผลตอบสนองและความเสียหายของอาคารตัวอย่างนั้นจะต้องพิจารณากำลังของชั้นส่วนที่สามารถเกิดขึ้นจริง กล่าวคือค่ากำลังของวัสดุจะต้องเป็นค่ากำลังของวัสดุนั้นจริงๆ ไม่ใช่ค่ากำลังที่ระบุจากการออกแบบ โดยสถาบันวิจัยและให้คำปรึกษาแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (2552) ได้ทำการวิจัยและพบว่าค่ากำลังของวัสดุที่ได้จากการทดสอบจริงมีค่ามากกว่าค่ากำลังที่ระบุโดยแสดงในตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 อัตราส่วนระหว่างค่ากำลังของวัสดุที่ได้จากการทดสอบกับค่ากำลังของวัสดุที่ระบุ

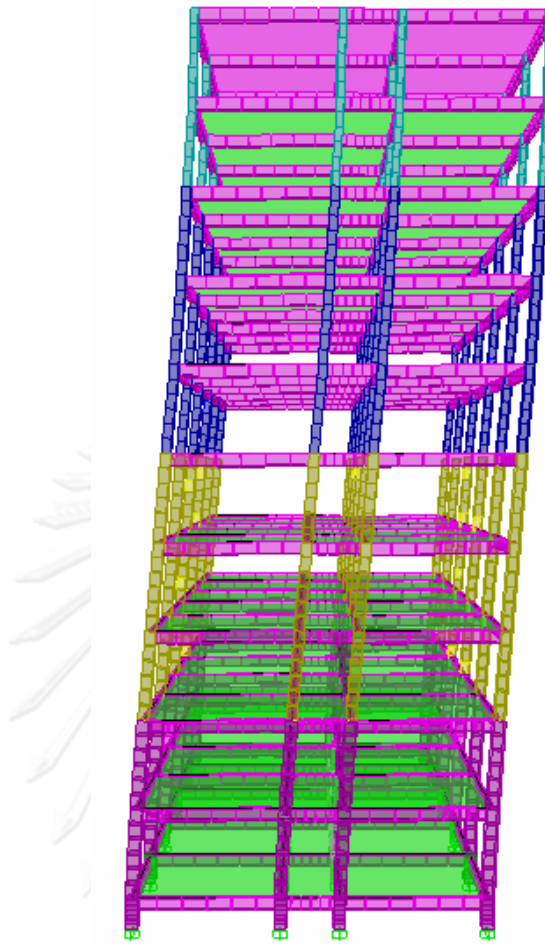
กำลังของวัสดุ	ค่ากำลังของวัสดุที่ได้จากการทดสอบ/ ค่ากำลังของวัสดุที่ระบุ
กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ( $f'_c$ เท่ากับ 240 ksc )	1.41
กำลังครากของเหล็กข้ออ้อย ( $f_y$ เท่ากับ 4000 ksc)	1.25
และใช้กำลังครากเหล็กกลม ( $f_y$ เท่ากับ 2400 ksc)	1.40

### 3.2.1 แบบจำลองเชิงเส้นของอาคารตัวอย่าง

แม้ว่าในการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างโดยวิธีไม่เชิงเส้นนั้นจะใช้โปรแกรม Perform-3D แต่ตามมาตรฐาน ASCE/SEI 41-13 ได้ระบุไว้ว่าค่าพารามิเตอร์ต่างๆในตารางที่ 2.1 และ 2.2 จะต้องใช้แรงกระทำในแนวแกน (Axial Force) และแรงเฉือน (Shear Force) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี อีลาสติกในการระบุค่า ดังนั้นก่อนที่จะสร้างแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นจะต้องสร้างแบบจำลองแบบเชิงเส้นก่อนเพื่อหาค่าแรงภายในดังกล่าว โดยจะทำการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Etabs ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และ 3.11 และวิเคราะห์หาแรงภายในโดยใช้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับออกแบบพื้นที่ในโซน 5 ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพที่ระบุไว้ใน มยผ.-1302 ที่ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% และ 20% ในรอบ 50 ปี (5% and 20% probability of exceedance in 50 years) โดยหลังจากได้แรงภายในของแต่ละชั้นส่วนเรียบร้อยแล้ว จึงนำไปหาอัตราส่วนในสมการที่ 3.6 ถึง 3.9 เพื่อใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆในการสร้างแบบจำลองของชิ้นส่วนในโปรแกรม Perform-3D



รูปที่ 3.10 แบบจำลองเชิงเส้นของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นในโปรแกรม ETABS



รูปที่ 3.11 แบบจำลองเชิงเส้นของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นในโปรแกรม ETABS

$$r = \frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}} \quad (3.6)$$

$$v = \frac{V}{b_w d f'_c} \quad (3.7)$$

$$\rho_c = \frac{A_v}{b_w s} \quad (3.8)$$

$$f = \frac{P}{A_g f'_c} \quad (3.9)$$

โดยที่;

$V$  คือ แรงเฉือนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์เชิงเส้น

$P$  คือ แรงในแนวแกนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์เชิงเส้น

$\rho$	คือ ค่าอัตราส่วนของเหล็กเสริมรับแรงดึง
$\rho'$	คือ ค่าอัตราส่วนของเหล็กเสริมรับแรงอัด
$\rho_{bal}$	คือ ค่าอัตราส่วนของเหล็กเสริมที่สภาวะสมดุล
$b_w$	คือ ความกว้างของชิ้นส่วน
$d$	คือ ความลึกของชิ้นส่วน
$A_g$	คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วน
$A_s$	คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กปลอก
$s$	คือ ระยะเรียงเหล็กปลอก
$f'_c$	คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

### 3.2.2 การสร้างแบบจำลองของชิ้นส่วนคาน

ในการสร้างแบบจำลองของชิ้นส่วนคานความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูป (F-D Relationship) ของข้อหมุนพลาสติกเป็นแบบ Trilinear ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยคิดผลการสูญเสียกำลัง (Strength Loss) แต่ไม่คิดผลการเสื่อมถอยแบบวัฏจักร (Cyclic Degradation) ในการสร้างแบบจำลองของชิ้นส่วนคานของอาคารตัวอย่างทั้ง 4 ในโปรแกรม PERFORM-3D นั้นจะแบ่งกลุ่มตามชนิดของคานได้แก่ B1, B1A และ B2 ซึ่งเป็นการจัดกลุ่มคานตามความยาวและตามขนาดของแรงภายใน โดยแบบจำลองนั้นมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งจะเห็นว่าชิ้นส่วนของคานนั้นจะประกอบไปด้วยชิ้นส่วนที่เป็นอีลาสติก พื้นที่รอยต่อแข็งเกร็ง (Rigid End Zone) และข้อหมุนพลาสติก โดยการใส่คุณสมบัติของหน้าตัดที่เป็นอีลาสติกจะแสดงในรูปที่ 3.14 ซึ่งจะประกอบไปด้วยค่าความกว้างของหน้าตัดคาน, พื้นที่ของหน้าตัด, ค่าโมดูลัสของยัง (Young's Modulus) และค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) เป็นต้น ในส่วนของคุณสมบัติของข้อหมุนพลาสติกแสดงในรูปที่ 3.14-3.16 ซึ่งประกอบไปด้วยความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปและคุณสมบัติการสูญเสียกำลังจะเป็นส่วนที่กำหนดพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนคาน ค่ากำลังในการรับแรง (FU) จะถูกระบุด้วยค่ากำลังการรับโมเมนต์ดัดที่ปลายคาน โดยจะต้องพิจารณาทั้งกำลังการรับโมเมนต์ลบ (เหล็กเสริมบนที่ปลายคาน) และโมเมนต์บวก (เหล็กเสริมล่างที่ปลายคาน) เนื่องจากภายใต้แรงกระทำของแผ่นดินไหวการโยกตัวของอาคารจะทำให้ที่ปลายของชิ้นส่วนสามารถเกิดโมเมนต์บวกหรือโมเมนต์ลบก็ได้ สำหรับค่ากำลังการรับโมเมนต์ดัดนั้นจะคำนวณได้จากดงสมการที่ 3.10 และ 3.11 ในส่วนของกำลังการรับแรงเฉือนของหน้าตัดคานที่ระบุไว้ในโปรแกรม Perform-3D นั้น เพื่อที่จะตรวจสอบว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนเกินกว่ากำลังการรับแรงเฉือนหรือไม่ดังแสดงในรูปที่ 3.17 โดยสามารถคำนวณกำลังการรับแรงเฉือนได้จากสมการที่ 3.12-3.14 และกำหนดตำแหน่งการวัดแรงเฉือนไว้ที่ปลายของชิ้นส่วนคานเนื่องจากเป็นตำแหน่งที่แรงเฉือนมีค่ามากที่สุด ซึ่งพารามิเตอร์และค่ากำลังสำหรับการสร้างแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนคานได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข

$$M_n = A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (3.10)$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c' b} \quad (3.11)$$

$$V_n = V_c + V_s \quad (3.12)$$

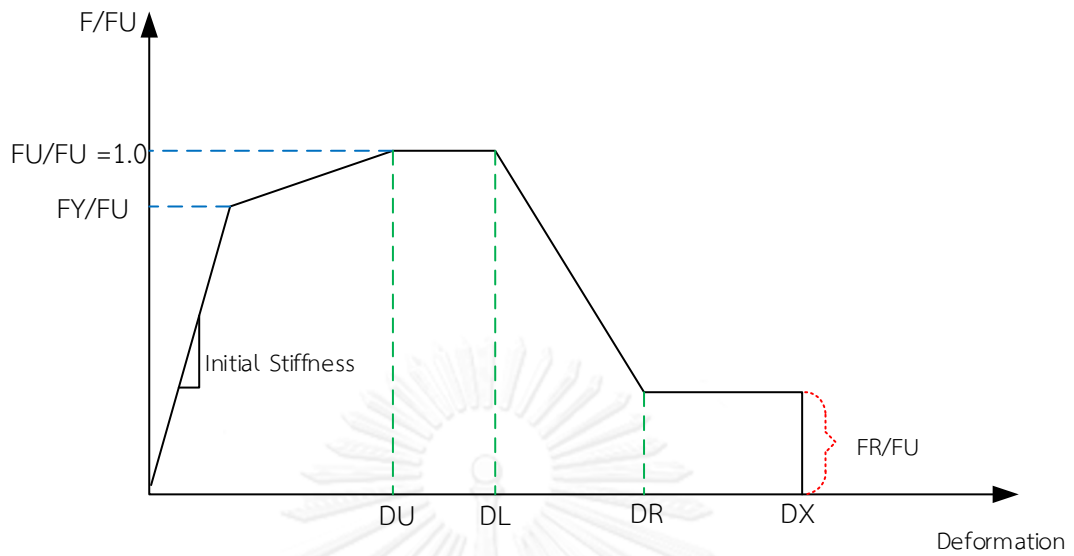
$$V_c = 0.53 \sqrt{f_c'} b d \quad (3.13)$$

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} \quad (3.14)$$

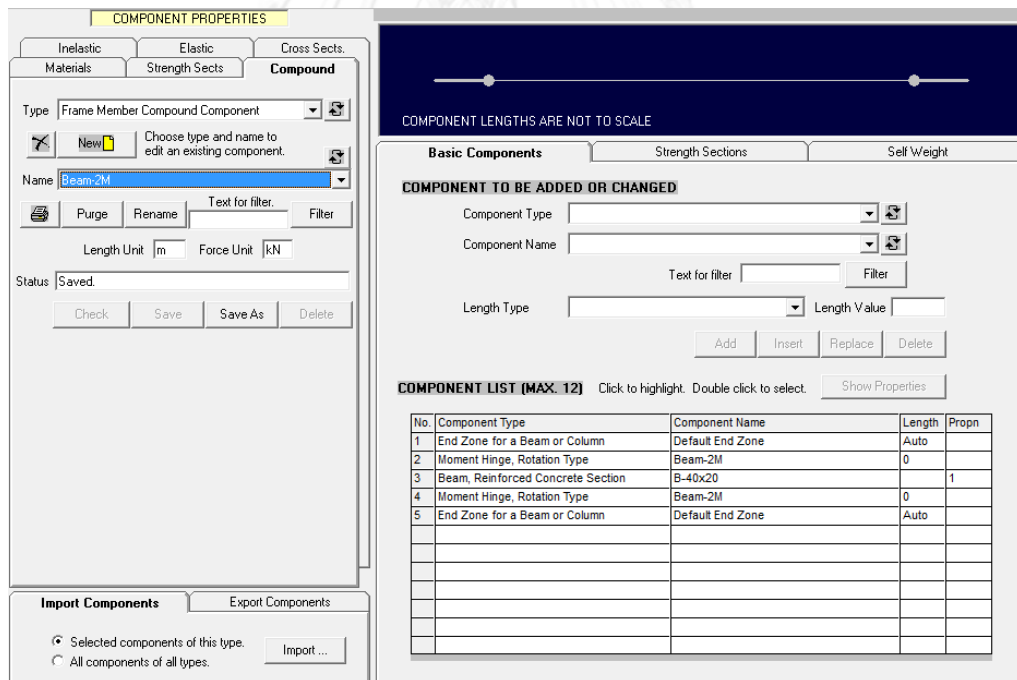
โดยที่:

$M_n$	คือ ค่ากำลังการรับโมเมนต์ดัดของคาน
$V_n$	คือ ค่ากำลังการรับแรงเฉือนของหน้าตัด
$V_c$	คือ ค่ากำลังการรับแรงเฉือนของคอนกรีต
$V_s$	คือ ค่ากำลังการรับแรงเฉือนของเหล็กปลอก
$A_s$	คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมหลัก
$A_v$	คือ พื้นที่หน้าตัดเหล็กปลอก
$f_y$	คือ กำลังครากของเหล็กเสริมหลัก
$f_{yt}$	คือ กำลังครากของเหล็กปลอก
$f_c'$	คือ กำลังอัดประลัยของคอนกรีต
$d$	คือ ความลึกประสิทธิผล
$b$	คือ ความกว้างของหน้าตัด
$s$	คือ ระยะเรียงเหล็กปลอก

พบว่าชิ้นส่วนคาน B1 และ B2 ของแบบจำลองอาคารตัวอย่างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวมีรายละเอียดของเหล็กปลอกบริเวณที่ปลายของคานไม่สอดคล้อง (NC) กับรายละเอียดเหล็กเสริมของชิ้นส่วนที่มีความเหนียวในมาตรฐาน ASCE 41-13 ดังนั้นจึงทำให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่จะกำหนดพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นของข้อหมุนพลาสติกมีค่าน้อยกว่าอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว กล่าวคือเมื่อแรงในชิ้นส่วนมีค่าเกินกว่ากำลังระบุและเริ่มมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น ชิ้นส่วนดังกล่าวของอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวจะมีค่าการให้ตัวที่น้อยกว่า และเกิดการวิบัติเนื่องจากการสูญเสียกำลังในการรับแรงเร็วกว่าชิ้นส่วนคานของอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปแบบ trilinear



รูปที่ 3.13 การรวมองค์ประกอบชิ้นส่วน (Compound Section) ของคานในโปรแกรม Perform-3D

**COMPONENT PROPERTIES**

Materials | Strength Sects | Compound

Inelastic | Elastic | **Cross Sects.**

Type: Beam, Reinforced Concrete Section

Name: B-40x20

Length Unit: m | Force Unit: kN

Status: Saved

Check | Save | Save As | Delete

Symmetry:  Yes  No

---

**Dimensions and Stiffness** | Inelastic Strength | Elastic Strength

Shape and Dimensions

Section Shape: Rectangle

B: .2 | D: .4

To calculate the section properties for the above dimensions, press this button. If you wish, you can edit the properties after they have been calculated. Calculate

Section Stiffness

Axial Area	.08	Torsional Inertia	7.7772E-04
Shear Area along Axis 2	.066664	Bending Inertia about Axis 2	.00008
Shear Area along Axis 3	.066664	Bending Inertia about Axis 3	.00032

Shear area = 0 means no shear deformation.

Material Stiffness

Young's Modulus: 2.742258E+07 | Poisson's Ratio: .2 | Shear Modulus: 1.1426E+07

---

Import Components | Export Components

Selected components of this type. Import ...

All components of all types.

รูปที่ 3.14 คุณสมบัติของหน้าตัดชิ้นส่วนแบบอีลาสติกของคานในโปรแกรม Perform-3D

**COMPONENT PROPERTIES**

Materials | Strength Sects | Compound

Inelastic | Elastic | Cross Sects.

Type: Moment Hinge, Rotation Type

Name: Beam-5m

Length Unit: m | Force Unit: kN

Status: Saved

Close Graph | Plot Loops | Save As | Delete

Shape of Relationship:  E-P-P  Trilinear

Use Cross Section:  Yes  No

Symmetry:  Yes  No

Deformation Capacities:  Yes  No

Strength Loss:  Yes  No

Cyclic Degradation:  None  YULPX  YX+3

Upper/Lower Bounds:  Yes  No

---

Deformation Capacities | Cyclic Degradation | Upper/Lower Bounds

Section and Dimensions | **Basic F-D Relationship** | Strength Loss

**F = hinge moment. D = hinge rotation.**

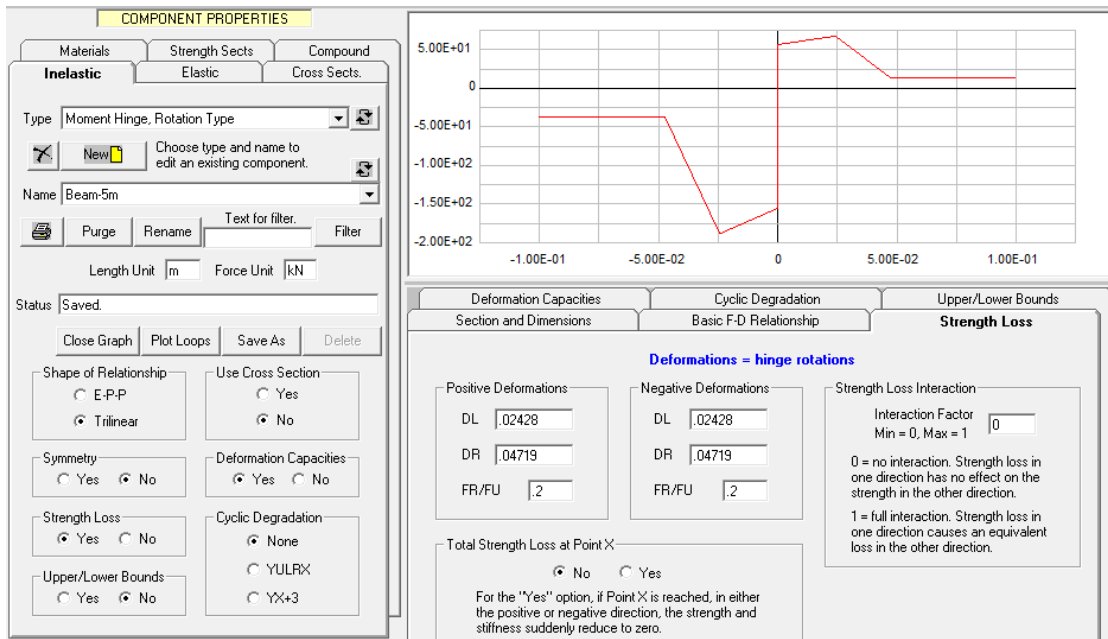
Axis 2 | Axis 1

Bending is about Axis 3. Positive moment is compression on the +2 side.

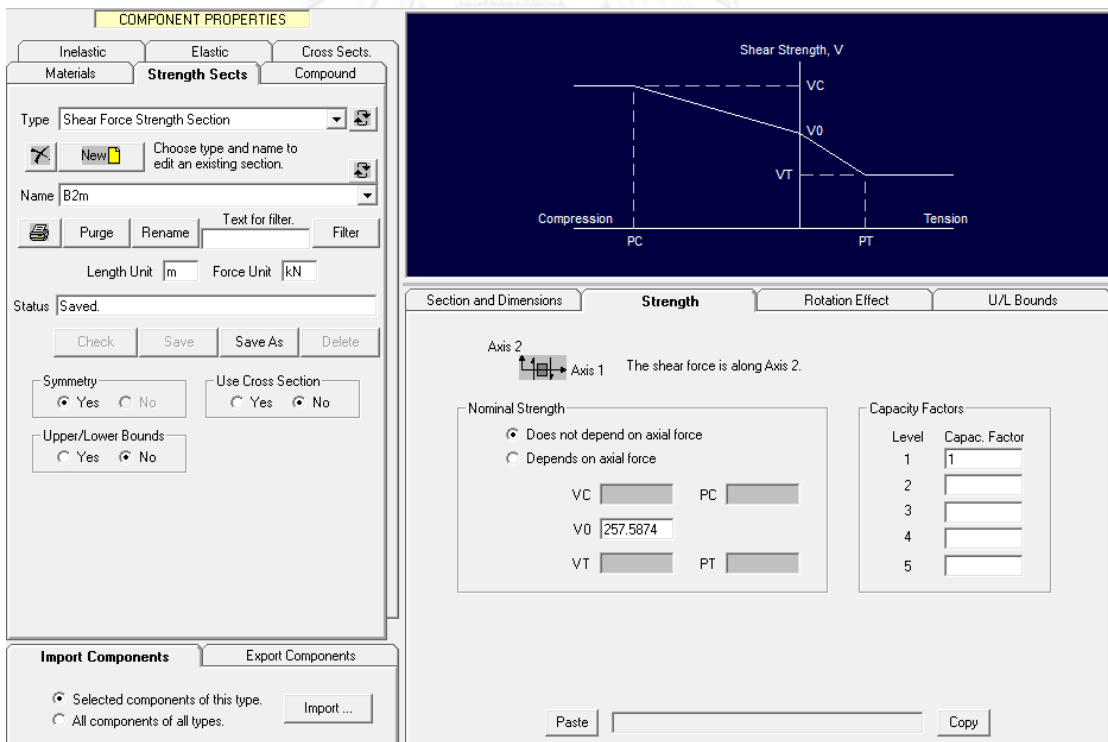
Positive Actions	Negative Actions
FY: 55.804	FY: 155.48
FU: 67.56	FU: 188.24
Positive Deformations	Negative Deformations
DU: .02404	DU: .02404
DX: .1	DX: .1

รูปที่ 3.15 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปของข้อหมุนพลาสติกสำหรับชิ้นส่วนคานในโปรแกรม Perform-3D





รูปที่ 3.16 คุณสมบัติการสูญเสียกำลังของข้อหมุนพลาสติกสำหรับชิ้นส่วนคานในโปรแกรม Perform-3D



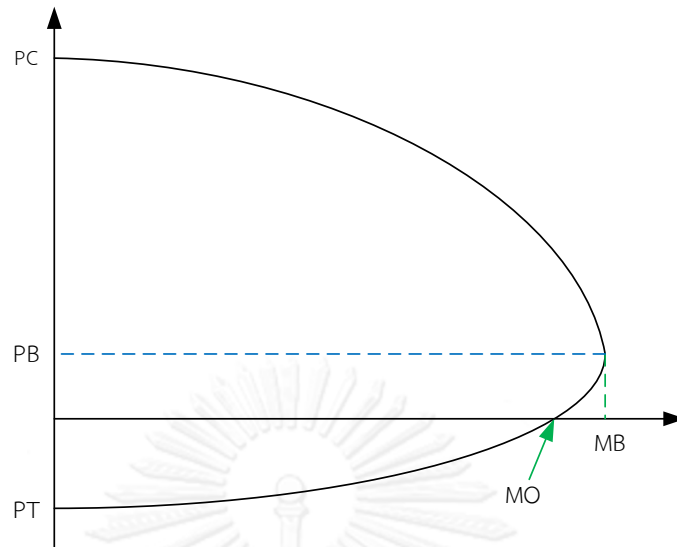
รูปที่ 3.17 คุณสมบัติค่ากำลังการต้านแรงเฉือนสำหรับชิ้นส่วนคานในโปรแกรม Perform-3D

### 3.2.3 การสร้างแบบจำลองของชิ้นส่วนเสา

ในการสร้างแบบจำลองของเสาในโปรแกรม Perform-3D นั้นก็ใช้หลักการเช่นเดียวกันกับการสร้างแบบจำลองของชิ้นส่วนคาน นั่นคือจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูป (F-D Relationship) ของข้อหมุนพลาสติกเป็นแบบ Trilinear ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยคิดผลการสูญเสียกำลัง (Strength Loss) แต่ไม่คิดผลการเสื่อมถอยแบบวัฏจักร (Cyclic Degradation) กำลังการรับแรงในแนวแกนและโมเมนต์ดัดใช้ความสัมพันธ์ของกราฟเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ (P-M diagram/ interaction diagram) ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ซึ่งค่าพารามิเตอร์และกำลังในการรับแรงของชิ้นส่วนเสาได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข ในการสร้างแบบจำลองของเสาใน Perform-3D นั้นจะค่อนข้างแตกต่างในเรื่องของการจัดกลุ่ม โดยการจัดกลุ่มจะแยกออกเป็นชั้นและแต่ละชั้นจะมีเสาแบ่งไปอีก 4 กลุ่ม ได้แก่ C1, C1A, C2 และ C2A เนื่องจากการจะได้มาซึ่งค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ASCE/SEI 41-13 จำเป็นที่จะต้องทราบค่าแรงกระทำในแนวแกนของเสาแต่ละต้น (Axial Force) ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์เชิงเส้นในหัวข้อที่ 3.2.1 กล่าวคือในแต่ละชั้นจะมีแรงภายในในแนวแกนที่ไม่เท่ากัน และในชั้นเดียวกันเสาที่อยู่คนละตำแหน่งก็จะมีแรงกระทำไม่เท่ากันอีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจำเป็นต้องจัดกลุ่มของเสาเป็นลักษณะดังที่กล่าวมา

องค์ประกอบของชิ้นส่วนเสาจะประกอบไปด้วยชิ้นส่วนที่เป็นอีลาสติก พื้นที่รอยต่อแข็งเกร็ง (Rigid End Zone) และข้อหมุนพลาสติกดังแสดงในรูปที่ 3.19 สำหรับรูปที่ 3.20 เป็นรายละเอียดข้อมูลของค่าคุณสมบัติหน้าตัดเสาในโปรแกรม Perform-3D เช่นขนาดของหน้าตัด โมเมนต์ความเฉื่อย พื้นที่หน้าตัดและค่าโมดูลัสของยัง เป็นต้น ในการให้ค่าคุณสมบัติของข้อหมุนพลาสติกนั้น ค่าต่างๆส่วนใหญ่จะได้จากข้อกำหนดในมาตรฐาน ASCE/SEI 41-13 โดยคุณสมบัติของข้อหมุนพลาสติกในโปรแกรม Perform-3D ได้แสดงในรูปที่ 3.21-3.23 นอกเหนือจากที่กล่าวมานั้นสิ่งที่สำคัญที่มากสำหรับการสร้างแบบจำลองเสานั้นก็คือ กำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัด (shear strength section) ซึ่งกำลังรับแรงเฉือนของเสานั้นเกิดจากความสามารถในการรับแรงเฉือนของคอนกรีตรวมกับเหล็กโดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.12-3.14 เช่นเดียวกับคาน ในการตรวจสอบแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนว่ามีค่าเกินกว่ากำลังการรับแรงเฉือนหรือไม่นั้น มีตำแหน่งในการตรวจสอบแรงเฉือนของเสาที่กึ่งกลางชิ้นส่วน ทั้งนี้เนื่องจากแรงเฉือนในเสาจะมีค่าเท่ากันหมดทั้งชิ้นส่วน

การสร้างแบบจำลองของชิ้นส่วนเสาของอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวและอาคารที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวซึ่งถูกกำหนดด้วยความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปแบบ trilinear แม้ว่าจะมีกำลังในการรับแรงดัดที่เท่ากัน แต่ในการสร้างแบบจำลองนั้นค่ากำลังในการรับแรงไม่ได้เป็นตัวกำหนดความสัมพันธ์แบบ trilinear เพียงอย่างเดียว ปริมาณการเสริมเหล็กปลอกนั้นก็มีความสำคัญเช่นเดียวกัน ซึ่งมีจะผลอย่างมากต่อการเสียรูปของชิ้นส่วนซึ่งถูกระบุด้วยค่า  $DU$ ,  $DL$  และค่า  $DR$  ในภาคผนวก ข จะพบว่าอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวมีค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมากกว่าอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวเนื่องจากปริมาณเหล็กปลอกบริเวณที่ปลายชิ้นส่วนมีปริมาณมากกว่า ซึ่งเป็นไปตามที่ระบุในมาตรฐานแผ่นดินไหว เนื่องจากผู้ออกแบบมีความคาดหวังให้อาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวมีความเหนียวหรือความสามารถในการเคลื่อนตัวได้ดีกว่าอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 3.18 กราฟเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ (P-M diagram/ interaction diagram) เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Perform-3D

**COMPONENT PROPERTIES**

Inelastic Materials | Elastic Strength Sects | Cross Sects. **Compound**

Type: Frame Member Compound Component

Name: C1-40x40-1st-I

Length Unit: m | Force Unit: kN

Status: Saved

**Basic Components** | Strength Sections | Self Weight

**COMPONENT TO BE ADDED OR CHANGED**

Component Type: [Dropdown]

Component Name: [Dropdown]

Length Type: [Dropdown] | Length Value: [Input]

[Add] [Insert] [Replace] [Delete]

**COMPONENT LIST (MAX. 12)** Click to highlight. Double click to select. [Show Properties]

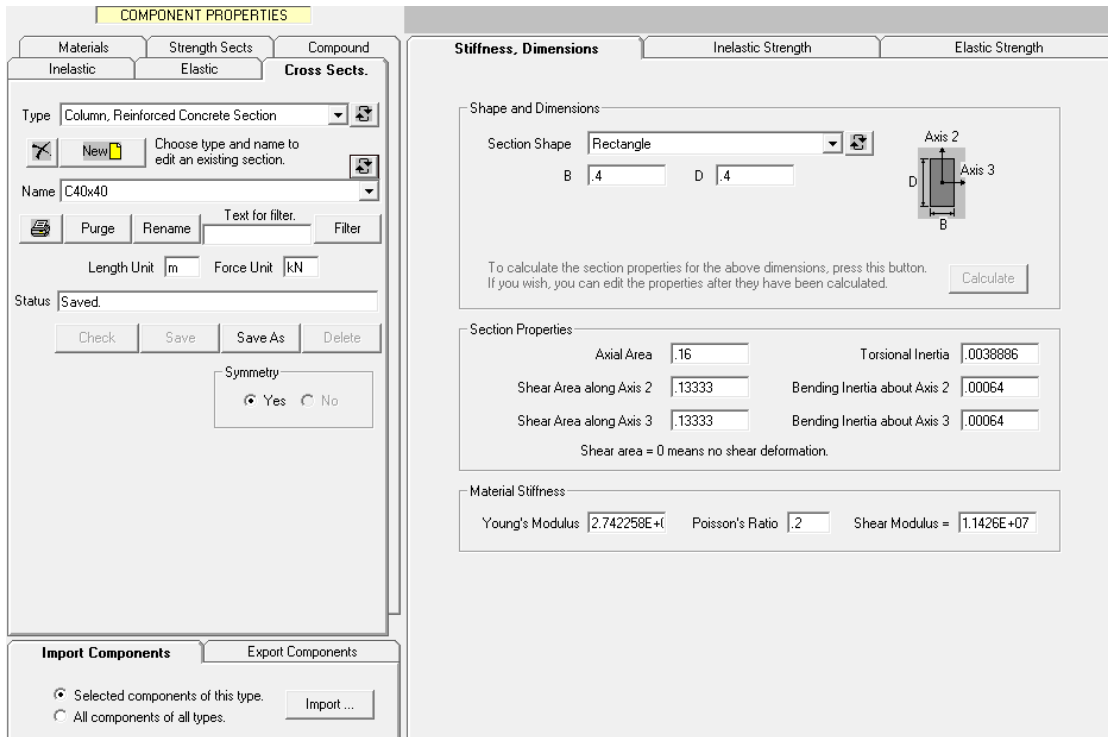
No.	Component Type	Component Name	Length	Propn
1	End Zone for a Beam or Column	Default End Zone	Auto	
2	P-M2-M3 Hinge, Concrete Rotation Type	C1-40x40-1st-I	0	
3	Column, Reinforced Concrete Section	C40x40		1
4	P-M2-M3 Hinge, Concrete Rotation Type	C1-40x40-1st-I	0	
5	End Zone for a Beam or Column	Default End Zone	Auto	

**Import Components** | Export Components

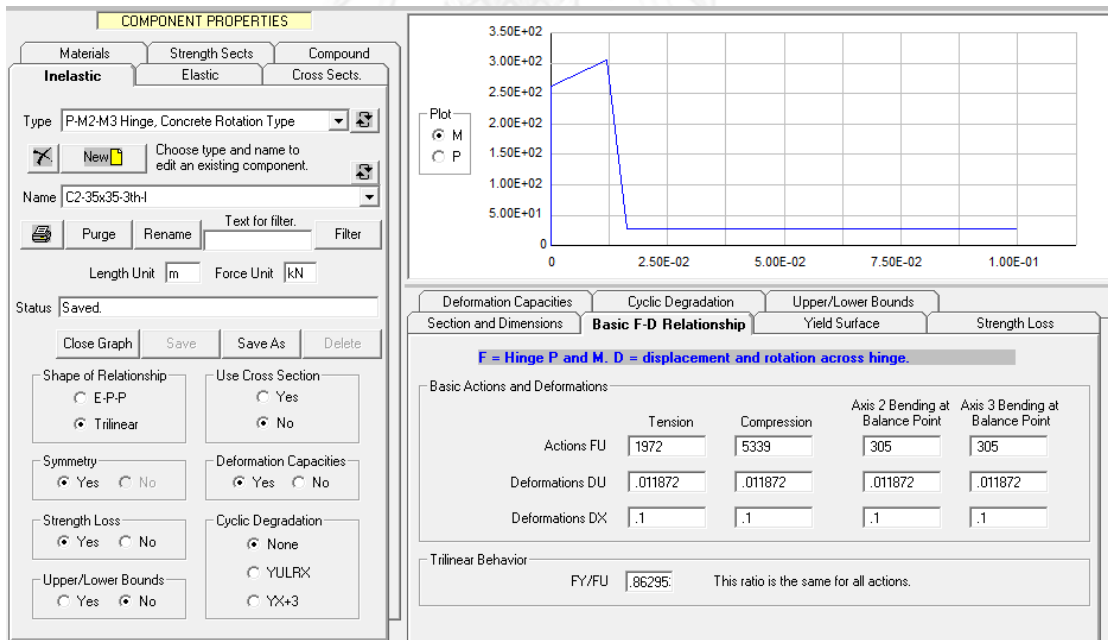
Selected components of this type. [Import ...]

All components of all types.

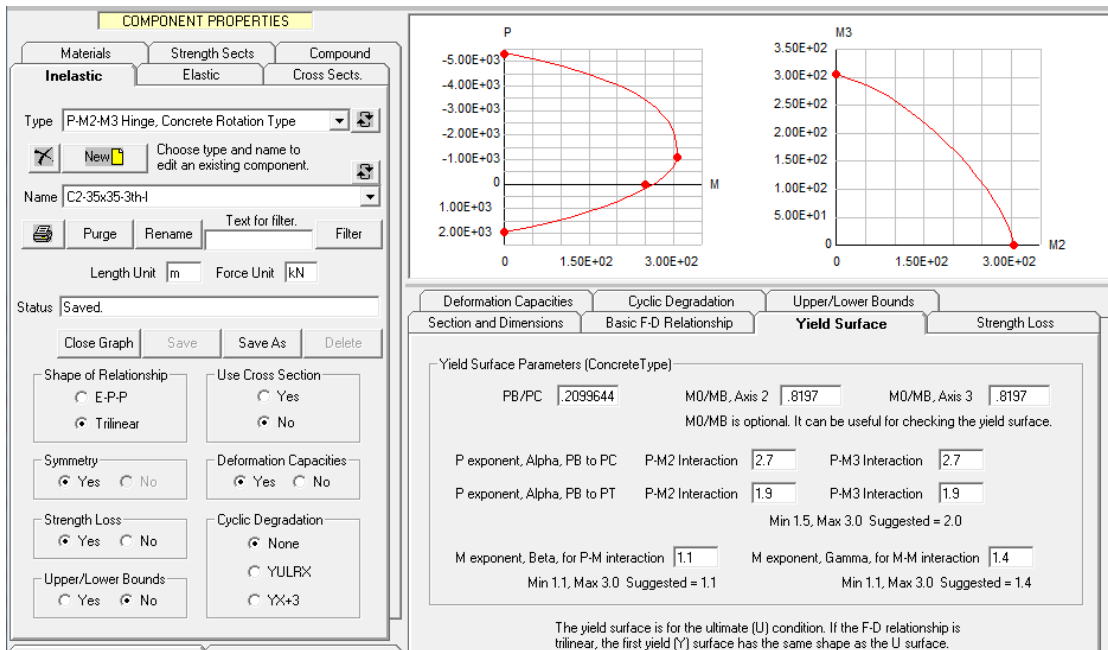
รูปที่ 3.19 การรวมองค์ประกอบชิ้นส่วน (Compound Section) ของเสาในโปรแกรม Perform-3D



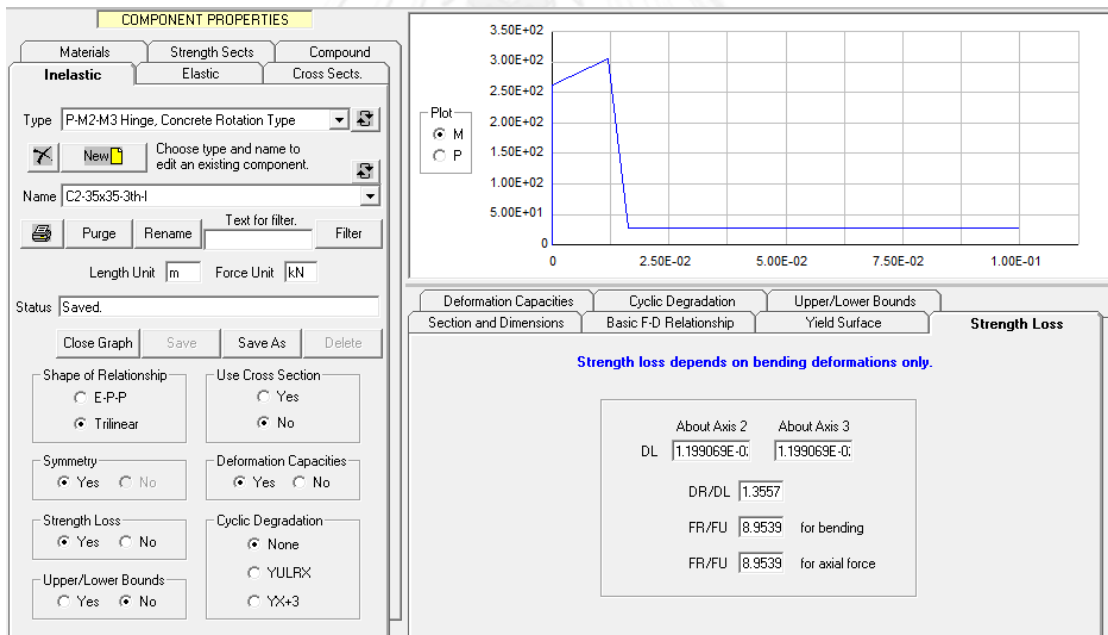
รูปที่ 3.20 คุณสมบัติของหน้าตัดชิ้นส่วนแบบอีลาสติกของเสาในโปรแกรม Perform-3D



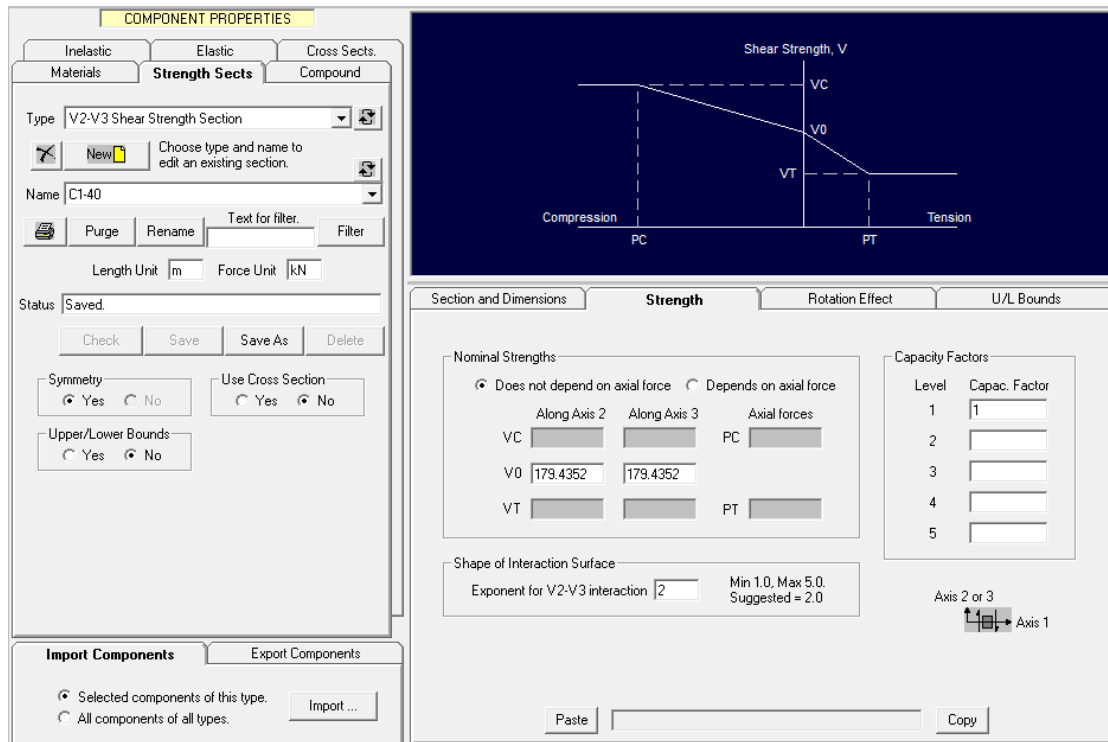
รูปที่ 3.21 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปของข้อหมุนพลาสติกสำหรับชิ้นส่วนเสาในโปรแกรม Perform-3D



รูปที่ 3.22 แผนภูมิเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์สำหรับชิ้นส่วนเสาในโปรแกรม Perform-3D



รูปที่ 3.23 คุณสมบัติการสูญเสียกำลังของข้อหมุนพลาสติกสำหรับชิ้นส่วนเสาในโปรแกรม Perform-



รูปที่ 3.24 คุณสมบัติค่ากำลังการต้านแรงเฉือนสำหรับชิ้นส่วนเสาในโปรแกรม Perform-3D

### 3.2.4 แบบจำลองของอาคารตัวอย่าง

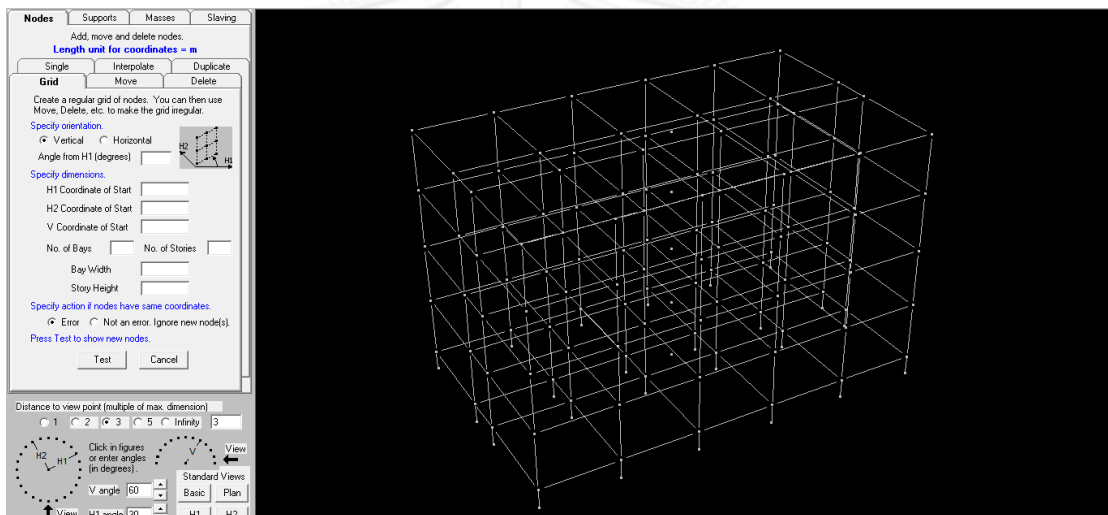
เมื่อทำการกำหนดคุณสมบัติของชิ้นส่วนต่างๆของแบบจำลองเรียบร้อยแล้ว จึงทำการสร้างแบบจำลองของอาคารดังแสดงในรูปที่ 3.25 และ 3.26 ซึ่งค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคารตัวอย่างได้แสดงในตารางที่ 3.11 และ 3.12 โดยมีค่าคาบการสั่นไหวโหมดแรกซึ่งเป็นการสั่นไหวในทิศ H2 เท่ากับ 1.32 วินาทีสำหรับแบบจำลองอาคารพักอาศัย 4 ชั้น (T4) และมีค่าเท่ากับ 2.68 วินาทีสำหรับแบบจำลองอาคารพักอาศัย 10 ชั้น (T10) ซึ่งค่าคาบการสั่นไหวโหมดแรกของอาคารนั้นจะมีความสำคัญมากในการปรับค่าความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหว

ตารางที่ 3.11 คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้น

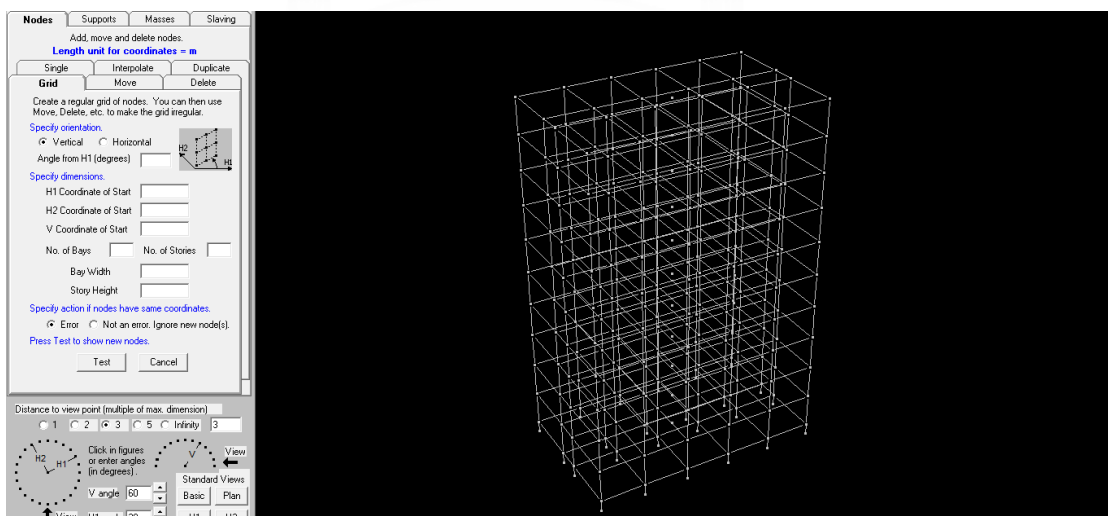
โหมด	ทิศทาง	คาบการสั่นไหว (วินาที)	Mass participation (%)	
			H1	H2
1	H2	1.322	0	68.21
2	H1	1.301	68.73	0
3	Twist	1.064	0	0

ตารางที่ 3.12 คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น

โหมด	ทิศทาง	คาบการสั่นไหว (วินาที)	Mass participation (%)	
			H1	H2
1	H2	2.68	0	69.5
2	H1	2.639	71.05	0
3	Twist	2.136	0	0



รูปที่ 3.25 แบบจำลองของอาคารพักอาศัยสูง 4 ชั้น ในโปรแกรม Perform-3D



รูปที่ 3.26 แบบจำลองของอาคารพักอาศัยสูง 10 ชั้น ในโปรแกรม Perform-3D

### 3.3 คลื่นแผ่นดินไหว

ตามมาตรฐาน ASCE/SEI 41-13 ได้ระบุไว้ว่าในการเลือกคลื่นแผ่นดินไหวเพื่อใช้ในการวิเคราะห์นั้นจะต้องเลือกคลื่นแผ่นดินไหวให้เหมาะสมกับพื้นที่พิจารณา และสำหรับในการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองแบบ 3 มิตินั้น จะต้องใช้คลื่นแผ่นดินไหวอย่างน้อย 3 คู่คลื่น โดยในแต่ละคู่จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบในแนวราบได้แก่แนวตั้งฉากกับรอยเลื่อน (fault-normal direction, FN) และแนวขนานกับรอยเลื่อน (fault-parallel direction, FP) และใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% และ 20% ในรอบ 50 ปี (5% and 20% probability of exceedance in 50 years) หรือรอบการเกิดซ้ำ (return period) 975 และ 225 ปี ตามลำดับ ซึ่งเป็นระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASCE/SEI 41-13 สำหรับการวิเคราะห์สมรรถนะเป้าหมายพื้นฐานของอาคารที่มีอยู่เดิม (basic performance objective for existing buildings, BPOE)

ในงานวิจัยนี้จะใช้คลื่นแผ่นดินไหวจากฐานข้อมูลของ PEER และโปรแกรม REXEL โดยพิจารณาคัดเลือกจากขนาดโมเมนต์ (moment magnitude, Mw), ประเภทของชั้นดินและระยะจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตรวจวัด (distance, R) ให้สอดคล้องกับพื้นที่ในเขตกรุงเทพมหานครมากที่สุด โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวทั้งหมด 26 คู่คลื่นจาก 8 เหตุการณ์ ซึ่งในแต่ละชุดคลื่นแผ่นดินไหวจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบในแนวราบทั้ง 2 ทิศทาง หลังจากนั้นจึงคำนวณหาสเปกตรัม SRSS ซึ่งเป็นค่ารากที่สองของผลรวมของค่ายกกำลังสอง (Square Root of Sum of Squares) ของสเปกตรัมทั้งสองทิศทางนั้นโดยใช้อัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 5% (damping ratio) แล้วนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของ มยผ.-1302 ให้ได้ระดับความรุนแรงที่กำหนด โดยมาตรฐาน ASCE/SEI 41-13 ระบุว่าที่ทุกคาบการสั่นระหว่าง  $0.2T$  ถึง  $1.5T$  ค่าเฉลี่ยของสเปกตรัม SRSS ของคลื่นแผ่นดินไหวที่จะนำมาวิเคราะห์ต้องมีค่าเกินกว่าสเปกตรัมเป้าหมาย โดยที่  $T$  คือคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารตัวอย่าง ( $T_4$  สำหรับอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นและ  $T_{10}$  สำหรับอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น) ซึ่งรายละเอียดของคลื่นแผ่นดินไหวที่จะใช้วิเคราะห์แสดงในตารางที่ 3.13 และ 3.14



ตารางที่ 3.13 รายละเอียดของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์จากฐานข้อมูลของ PEER

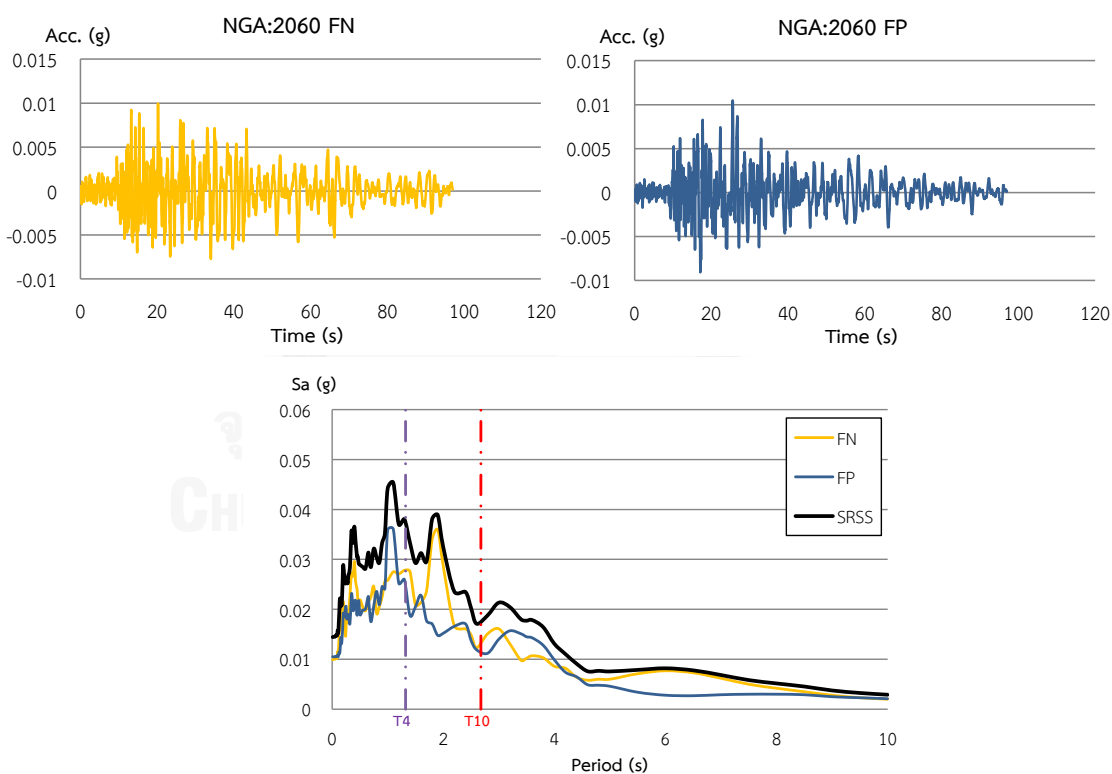
NGA no.	Event	Year	Station	Mw	R (km)	V <sub>s30</sub> (m/s)
2060	Nenana Mountain-Alaska	2002	Achorage International Airport	6.7	272.9	279.4
2064			Achorage-K2-04	6.7	273.7	279.4
2065			Achorage-K2-05	6.7	269.6	284
2067			Achorage-K2-07	6.7	275.3	270
2070			Achorage-K2-10	6.7	277.4	269
2079			Achorage-K2-19	6.7	271.9	191.3
2081			Achorage-K2-21	6.7	275.2	279.4
2088			Achorage-DOI Off. Of Aircraft	6.7	272.9	274.5
2729	Chi-Chi-Taiwan04	1999	CHY066	6.2	94.3	212
1156	Kocaeli- Turkey	1999	Kutahya	7.51	145.1	274.5
1167			Canakkale	7.51	266.2	274.5
1765	Hector Mine	1999	Arleta-Nordhoff Fire	7.13	193.8	297.7
1781			Fillmore Pac Bell	7.13	232.7	271.4
833	Landers, California	1992	Anaheim - W Ball Rd	7.28	144.9	234.9
844			Burbank - N Buena Vista	7.28	157.9	271.4
849			Covina - W Badillo	7.28	128.1	271.4
856			Fountain Valley - Euclid	7.28	146.9	270.2
861			Huntington Bch - Waikiki	7.28	156	234.9
873			LA - W 70th St	7.28	164	294.2
878			Lakewood - Del Amo Blvd	7.28	157.4	234.9
896			Tustin - E Sycamore	7.28	136.7	234.9

ตารางที่ 3.14 รายละเอียดของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์จากฐานข้อมูลของโปรแกรม REXEL

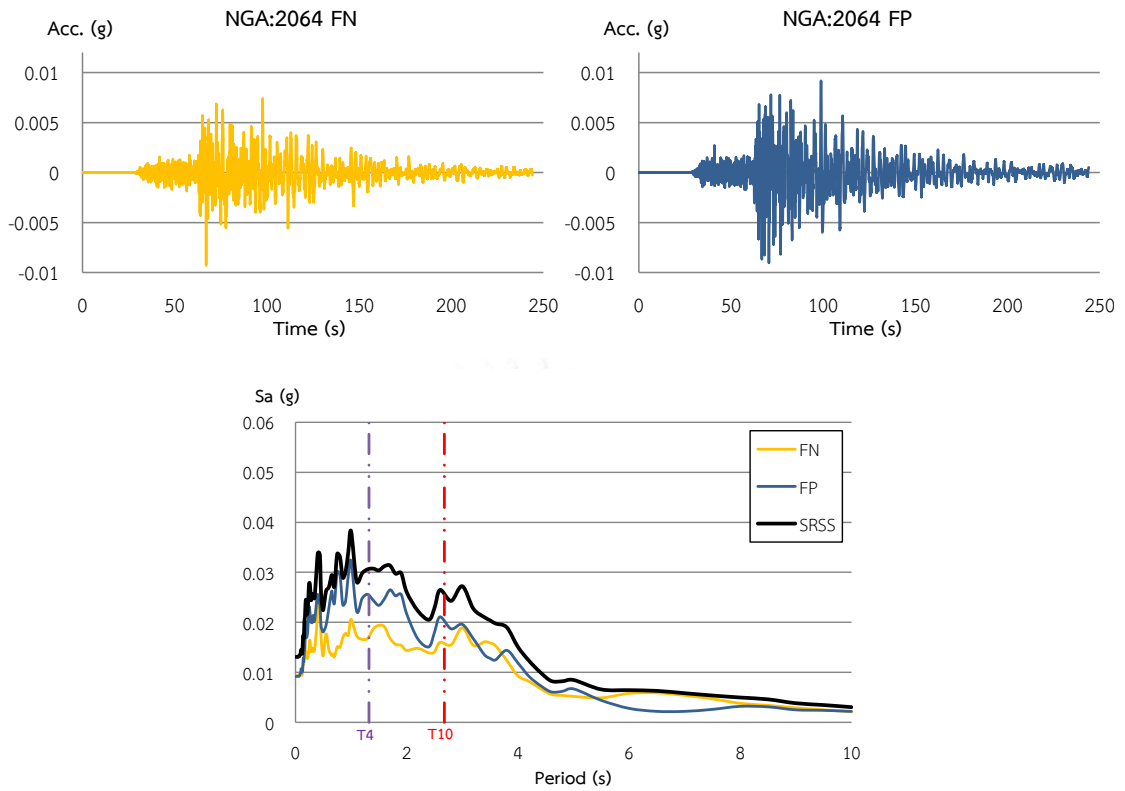
Wave ID.	Event	Year	Station	Mw	R (km)	Site Class
184	Tabas Iran	1978	ST56	7.3	241	B
5816	Strofades, Greece	1997	ST163	6.6	134	B
3716	Duzce 1 Turkey	1999	ST774	7.2	151	B
3718			ST766	7.2	268	B
3722			ST779	7.2	198	B

### 3.3.1 เหตุการณ์แผ่นดินไหว Nenana mountain – Alaska

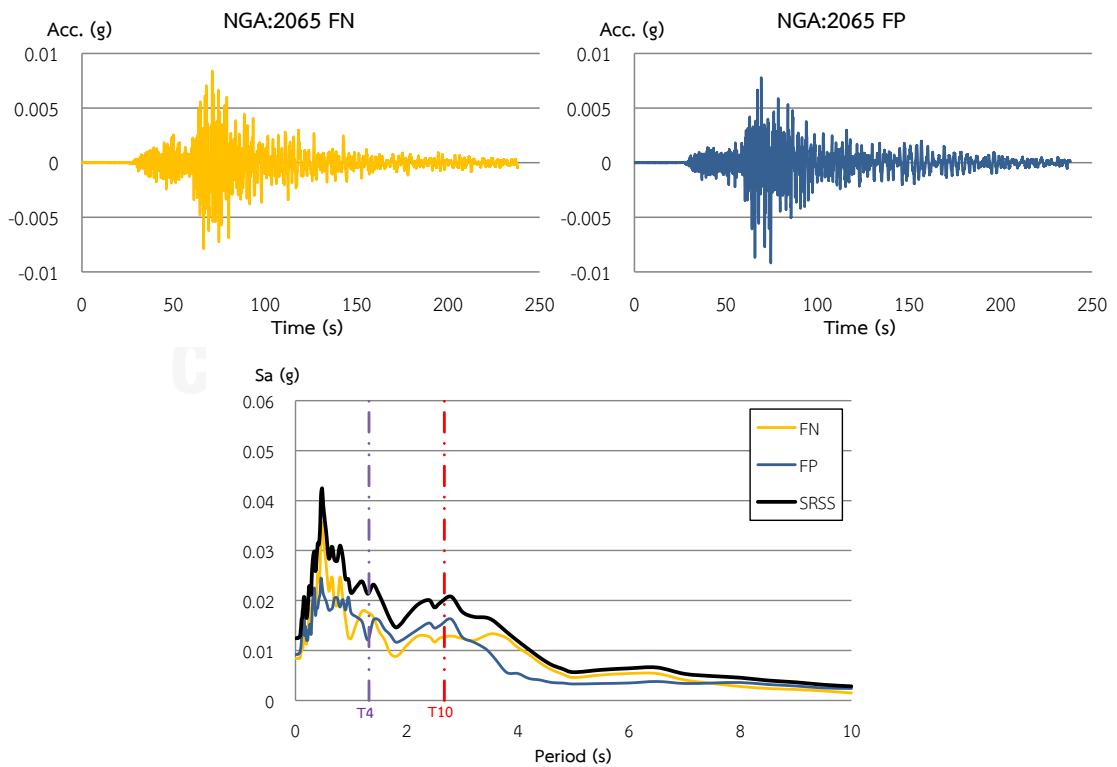
เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดจากรอยเลื่อน Denali เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 2002 มีความรุนแรงของแผ่นดินไหว 6.7 ริกเตอร์ ซึ่งในการวิจัยนี้จะใช้คลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์ดังกล่าว 8 คู่คลื่นจาก 8 สถานี ดังแสดงในรูปที่ 3.27 ถึง 3.34 และใช้ตัวคูณปรับค่าดังแสดงในตารางที่ 3.15



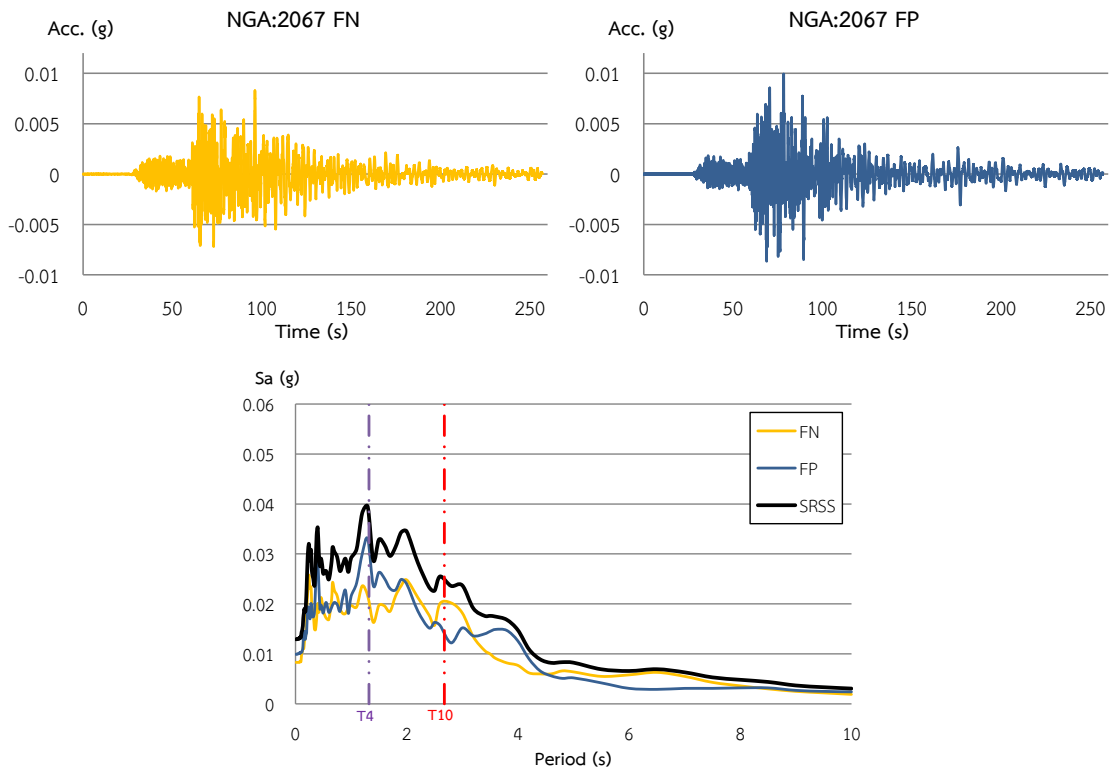
รูปที่ 3.27 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 2060



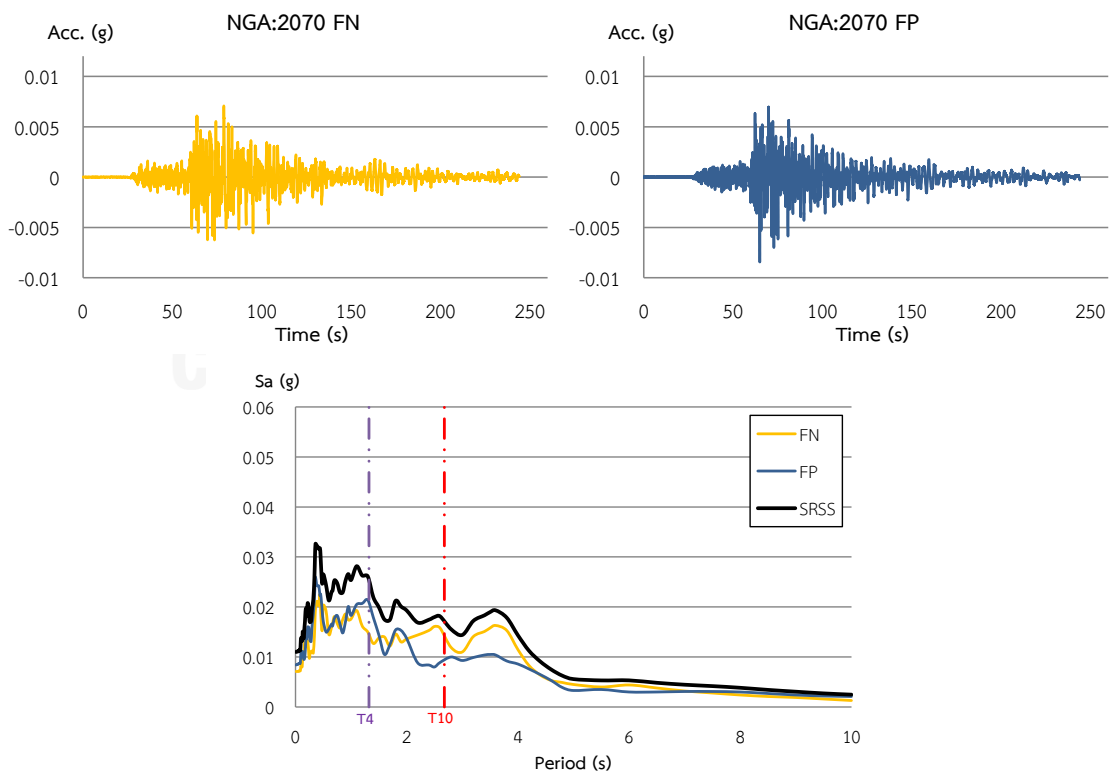
รูปที่ 3.28 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 2064



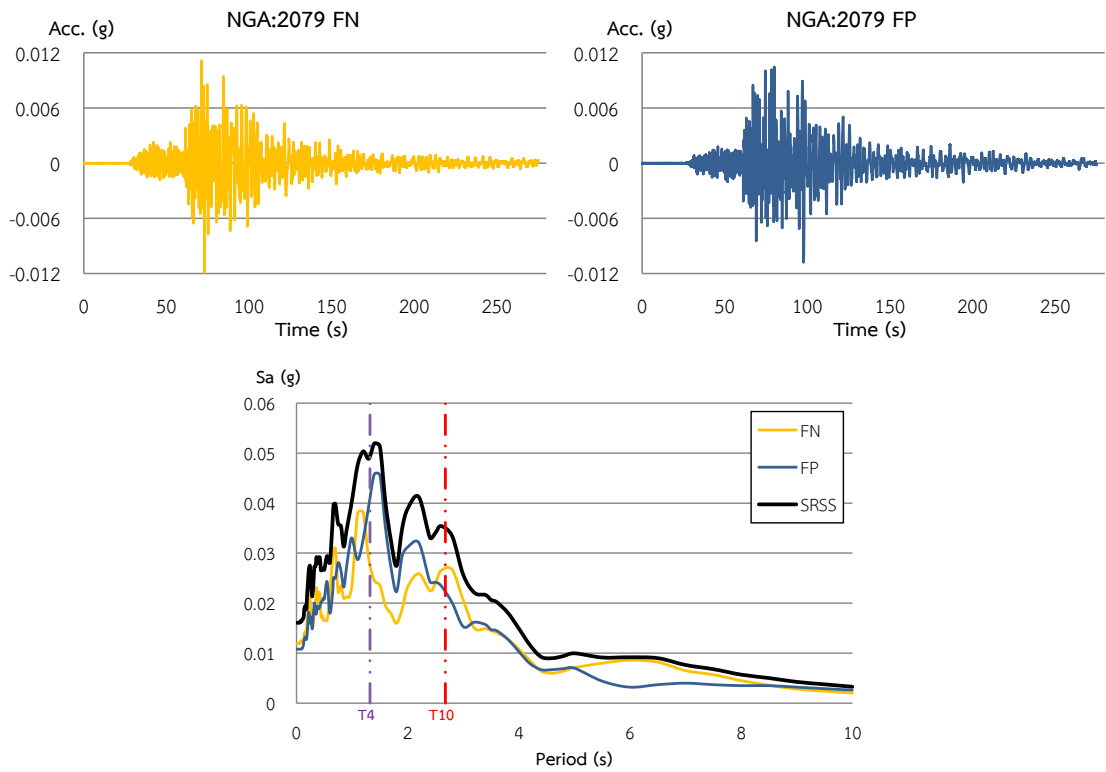
รูปที่ 3.29 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 2065



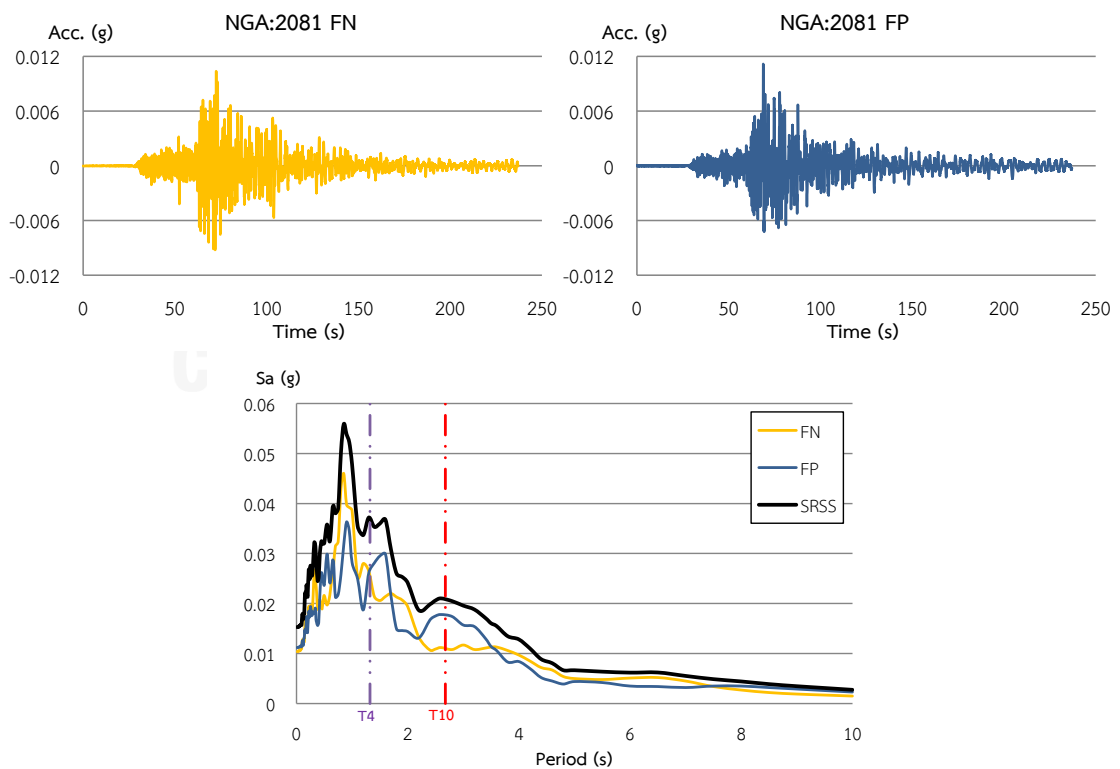
รูปที่ 3.30 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 2067



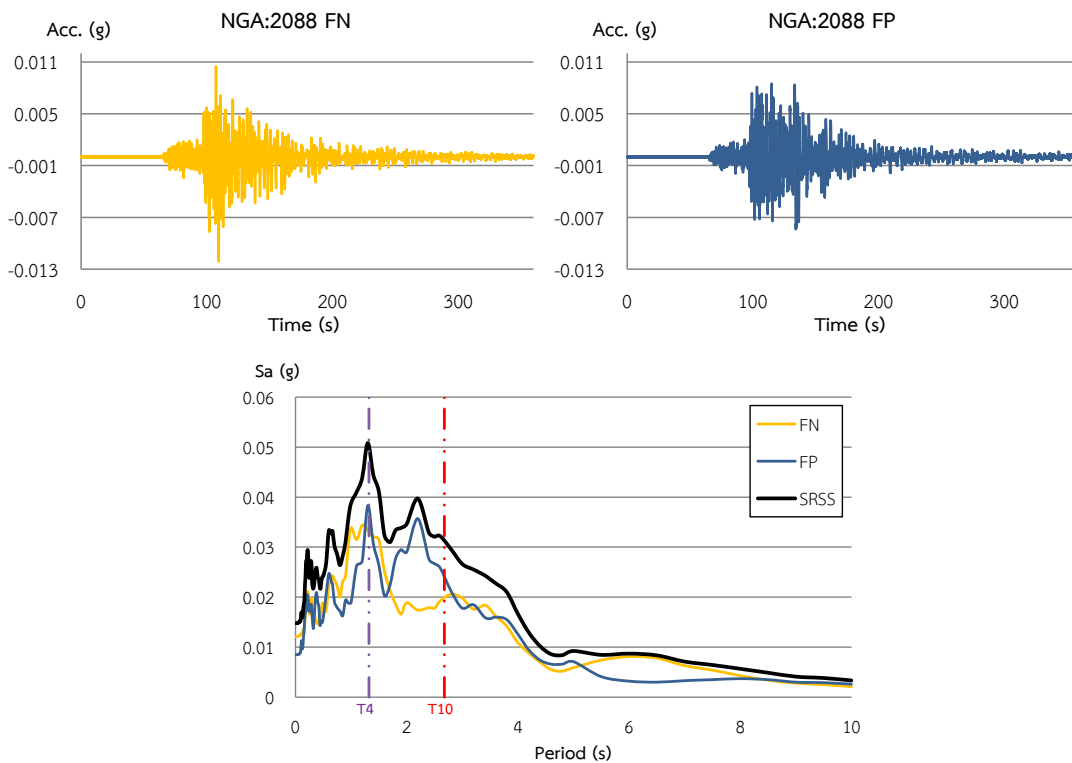
รูปที่ 3.31 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 2070



รูปที่ 3.32 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 2079



รูปที่ 3.33 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 2081



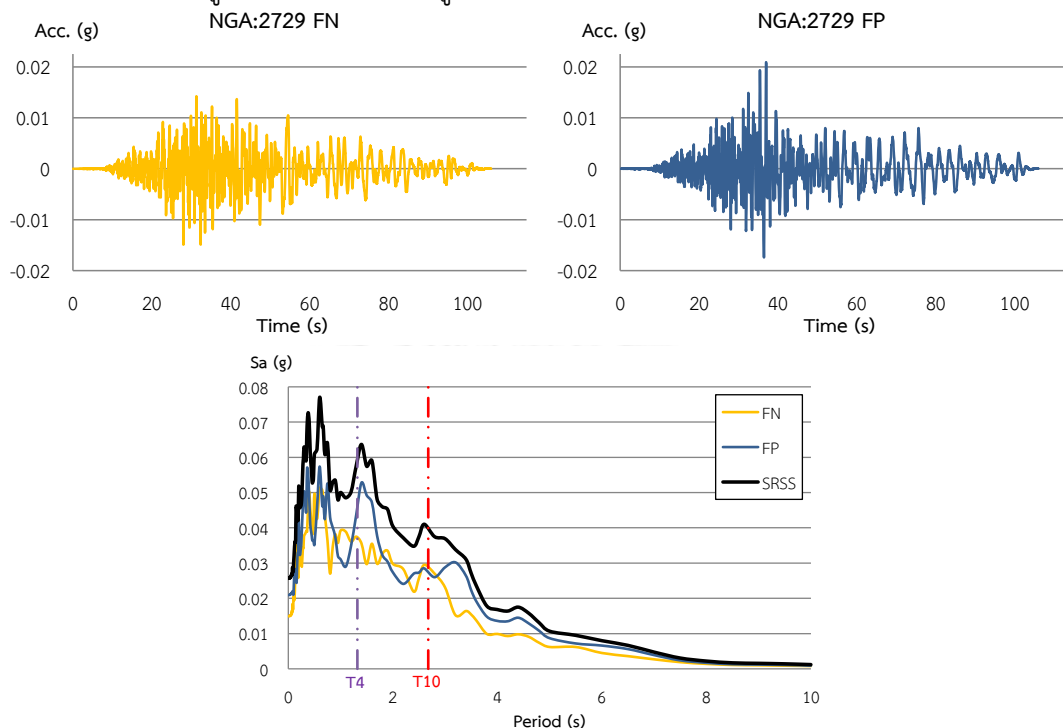
รูปที่ 3.34 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 2088

ตารางที่ 3.15 ตัวคูณปรับค่า (Scale Factor) ความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์ Nenana mountain

NGA no.	Station	Scale Factor			
		4 <sup>th</sup> Floor Building		10 <sup>th</sup> Floor Building	
		5%in50yr	20%in50yr	5%in50yr	20%in50yr
2060	Achorage International Airport	8.75	3.20	8.75	3.20
2064	Achorage-K2-04	9.20	3.37	9.20	3.37
2065	Achorage-K2-05	15.4	5.71	15.4	5.71
2067	Achorage-K2-07	7.59	2.90	7.59	2.90
2070	Achorage-K2-10	12.69	4.70	12.69	4.70
2079	Achorage-K2-19	8.18	3.03	8.18	3.03
2081	Achorage-K2-21	11.02	4.04	11.02	4.04
2088	Achorage-DOI Off. Of Aircraft	8.00	3.10	8.00	3.10

### 3.3.2 เหตุการณ์แผ่นดินไหว Chi-Chi-Taiwan04

เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดจากรอยเลื่อน Chelongpu เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1999 ที่ประเทศไต้หวัน มีความรุนแรงของแผ่นดินไหว 6.2 ริกเตอร์ ในงานวิจัยนี้จะใช้คลื่นแผ่นดินไหวจากสถานี CHY066 ดังแสดงในรูปที่ 3.35 และใช้ตัวคูณปรับค่าดังแสดงในตารางที่ 3.16



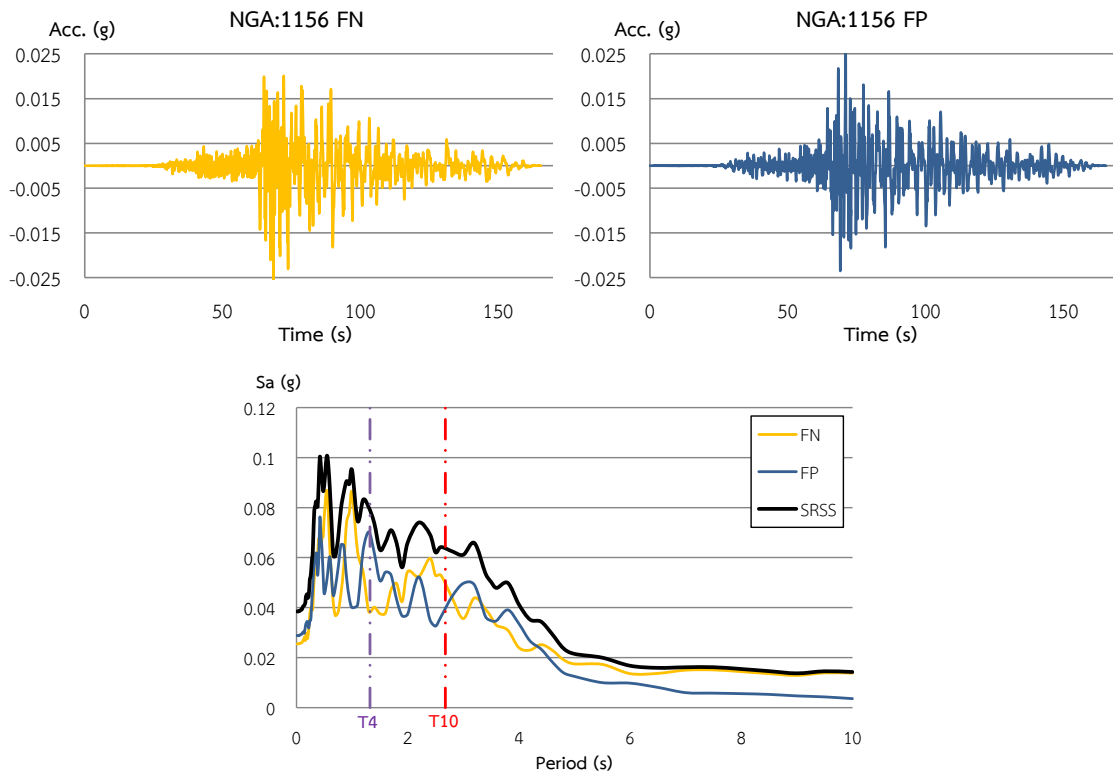
รูปที่ 3.35 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 2729

ตารางที่ 3.16 ตัวคูณปรับค่า (Scale Factor) ความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์ Chi-Chi-Taiwan04

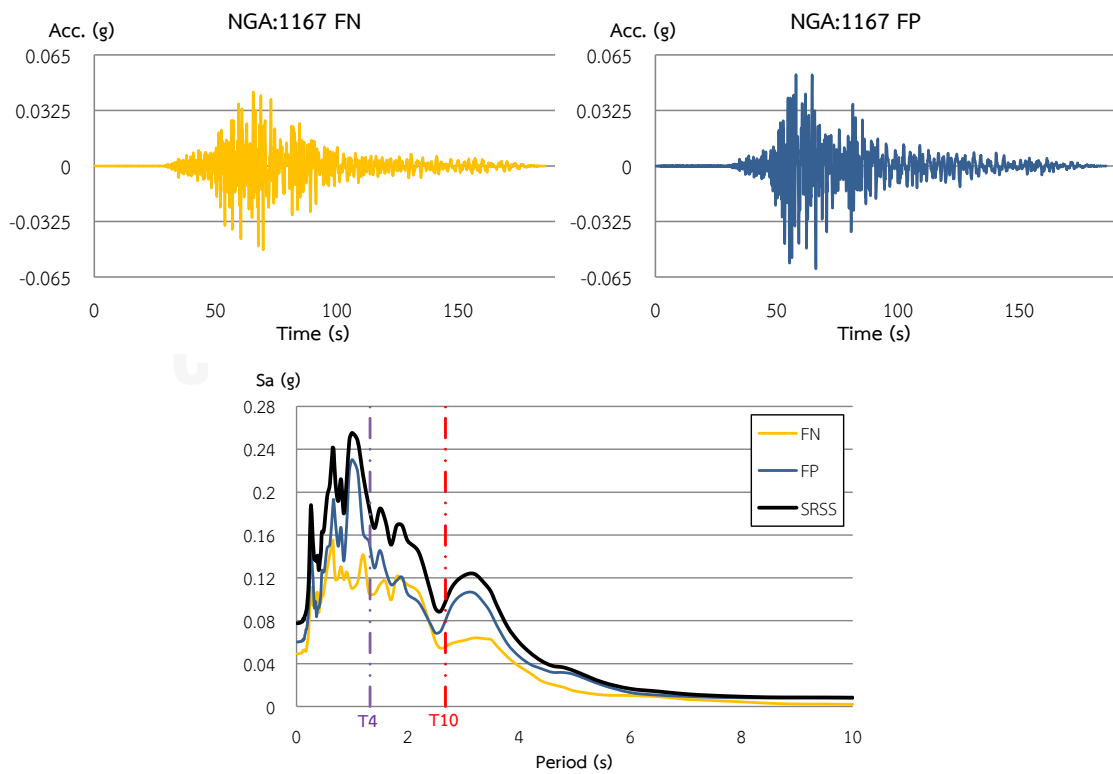
NGA no.	Station	Scale Factor			
		4 <sup>th</sup> Floor Building		10 <sup>th</sup> Floor Building	
		5%in50yr	20%in50yr	5%in50yr	20%in50yr
2729	CHY066	5.69	2.10	5.69	2.10

### 3.3.3 เหตุการณ์แผ่นดินไหว Kocaeli- Turkey

เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1999 มีความรุนแรงของแผ่นดินไหว 7.13 ริกเตอร์ ในงานวิจัยนี้จะใช้คลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์นี้ 2 คู่คลื่นจาก 2 สถานี ดังแสดงในรูปที่ 3.36 และ 3.37 และใช้ตัวคูณปรับค่าดังแสดงในตารางที่ 3.17



รูปที่ 3.36 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 1156



รูปที่ 3.37 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 1167

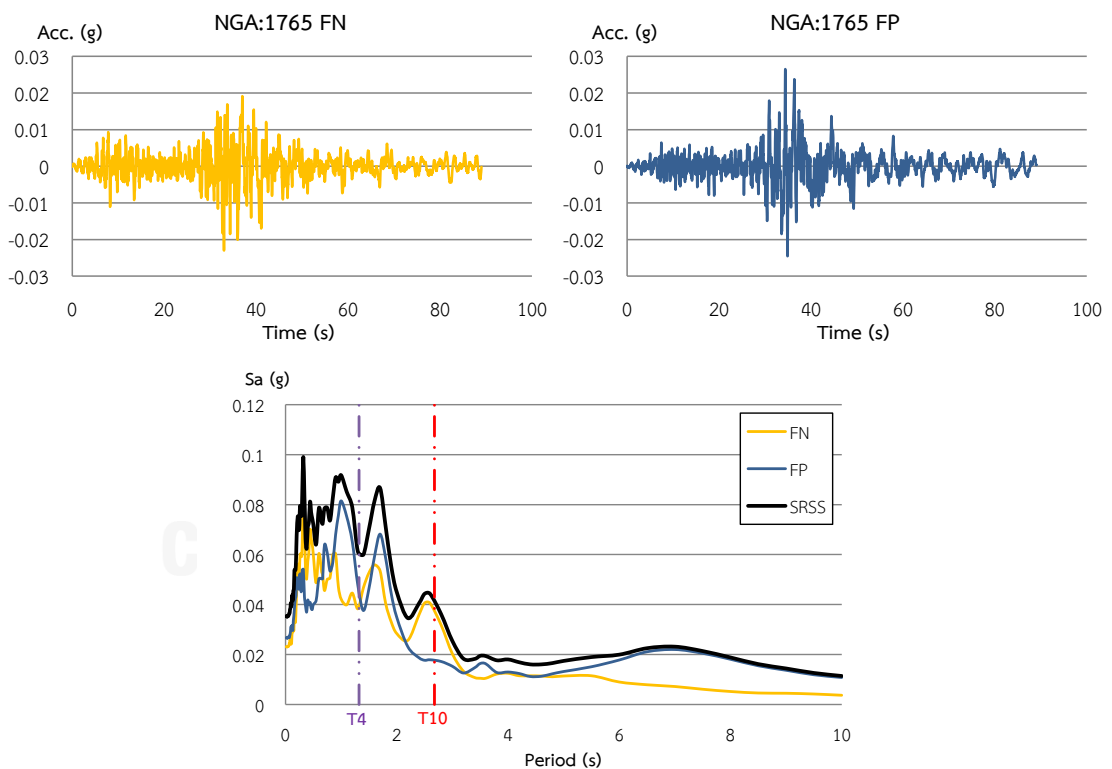


ตารางที่ 3.17 ตัวคูณปรับค่า (Scale Factor) ความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์ Kocaeli- Turkey

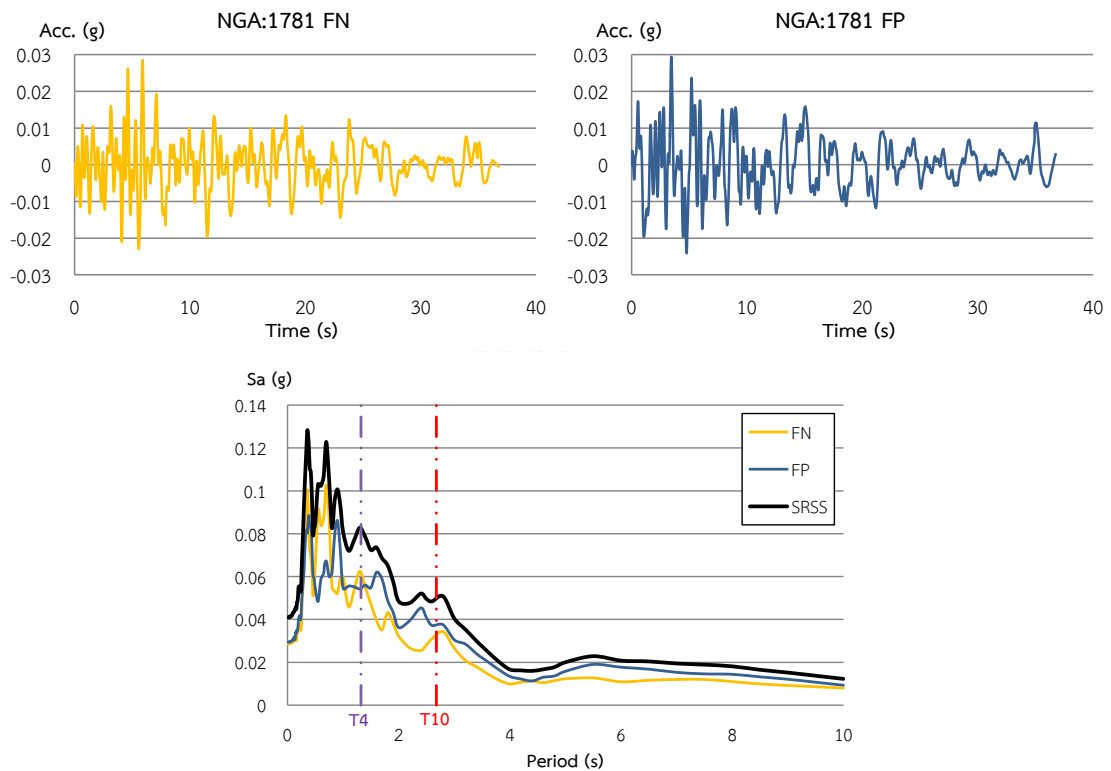
NGA no.	Station	Scale Factor			
		4 <sup>th</sup> Floor Building		10 <sup>th</sup> Floor Building	
		5%in50yr	20%in50yr	5%in50yr	20%in50yr
1156	Kutahya	4.07	1.50	4.07	1.50
1167	Canakkale	1.53	0.56	1.53	0.56

### 3.3.4 เหตุการณ์แผ่นดินไหว Hector Mine

เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1999 มีความรุนแรงของแผ่นดินไหว 7.51 ริกเตอร์ ในงานวิจัยนี้จะใช้คลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์นี้ 2 คู่คลื่นจาก 2 สถานี ดังแสดงในรูปที่ 3.38 และ 3.39 และใช้ตัวคูณปรับค่าดังแสดงในตารางที่ 3.18



รูปที่ 3.38 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 1765



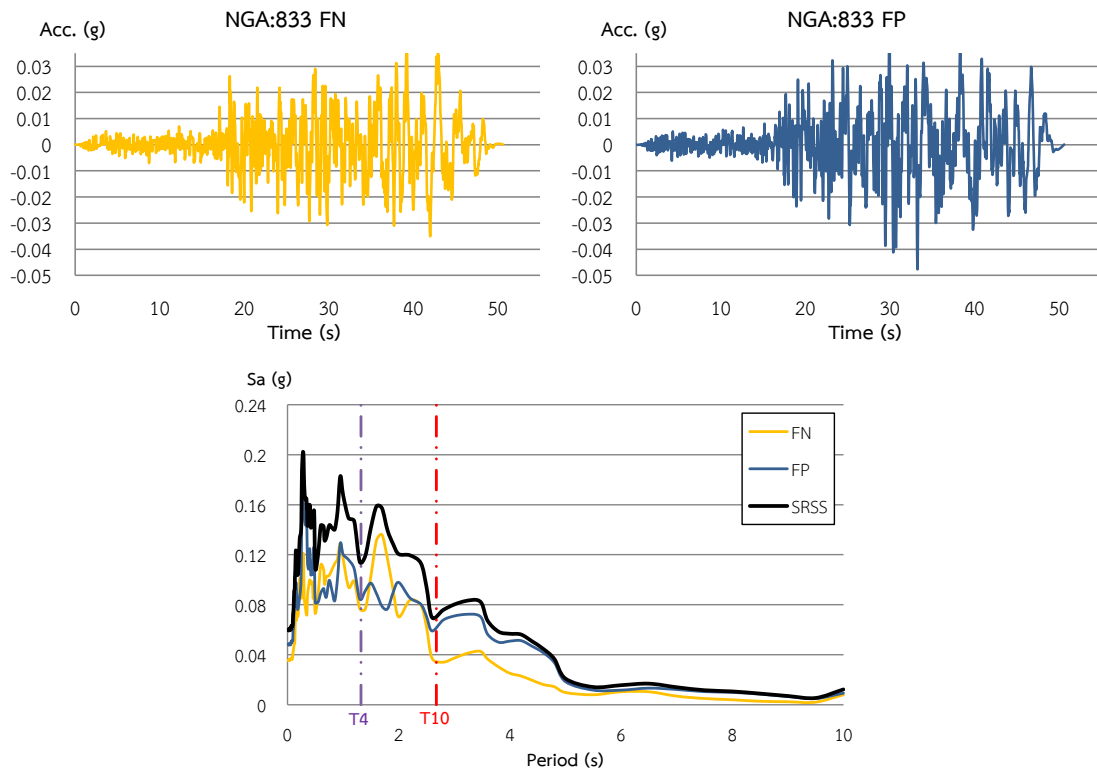
รูปที่ 3.39 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 1781

ตารางที่ 3.18 ตัวคูณปรับค่า (Scale Factor) ความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์ Hector Mine

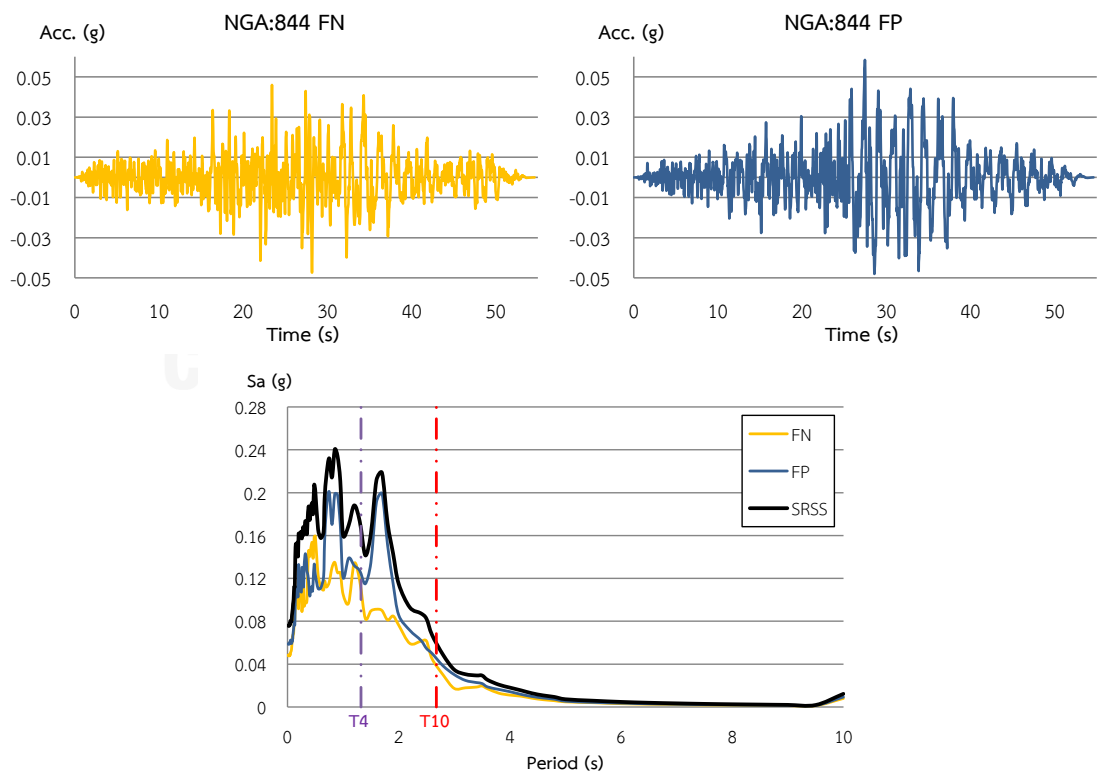
NGA no.	Station	Scale Factor			
		4 <sup>th</sup> Floor Building		10 <sup>th</sup> Floor Building	
		5%in50yr	20%in50yr	5%in50yr	20%in50yr
1765	Kutahya	5.95	2.16	5.95	2.16
1781	Canakkale	4.73	1.76	4.64	1.72

### 3.3.5 เหตุการณ์แผ่นดินไหว Landers, California

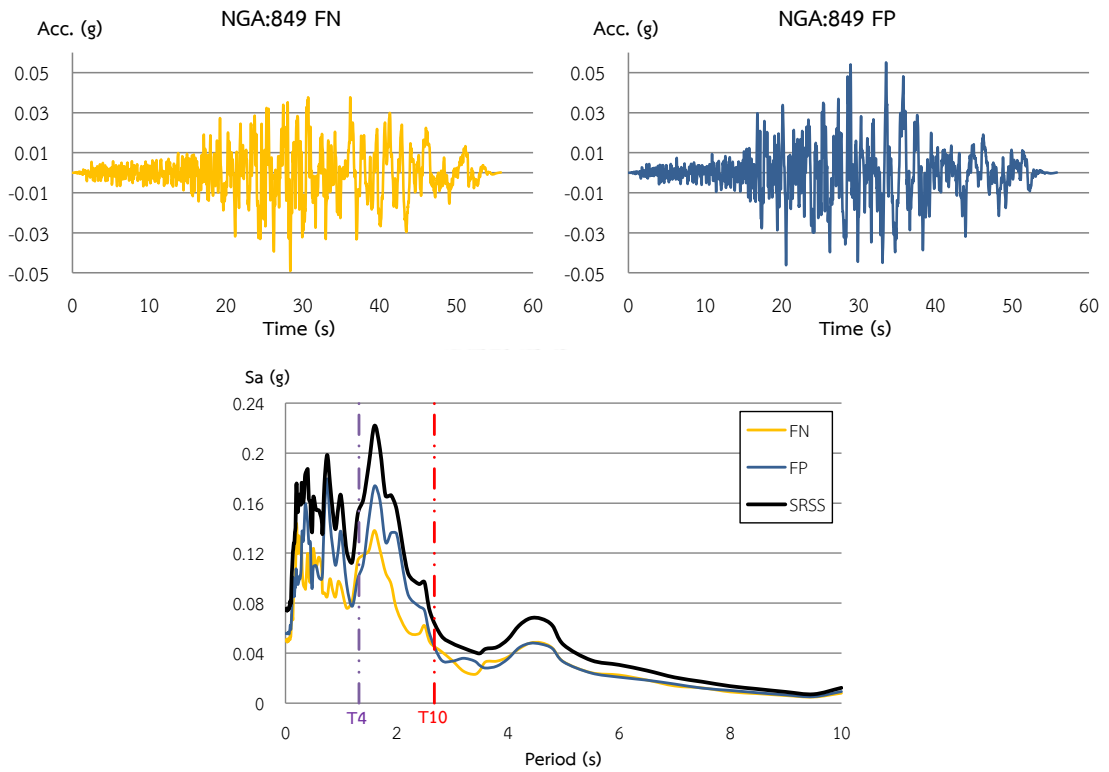
เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1992 มีความรุนแรงของแผ่นดินไหว 7.28 ริกเตอร์ ในงานวิจัยนี้จะใช้คลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์นี้ 8 คู่คลื่นจาก 8 สถานี ดังแสดงในรูปที่ 3.40 ถึง 3.47 และใช้ตัวคูณปรับค่าดังแสดงในตารางที่ 3.19



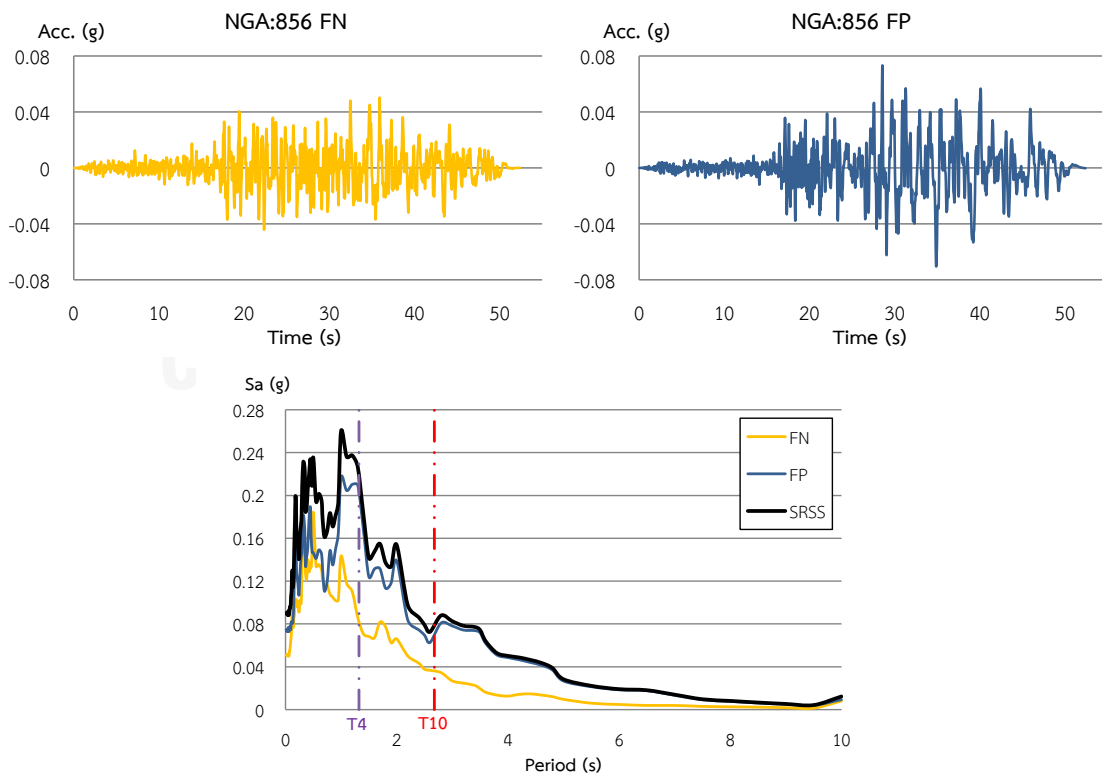
รูปที่ 3.40 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 833



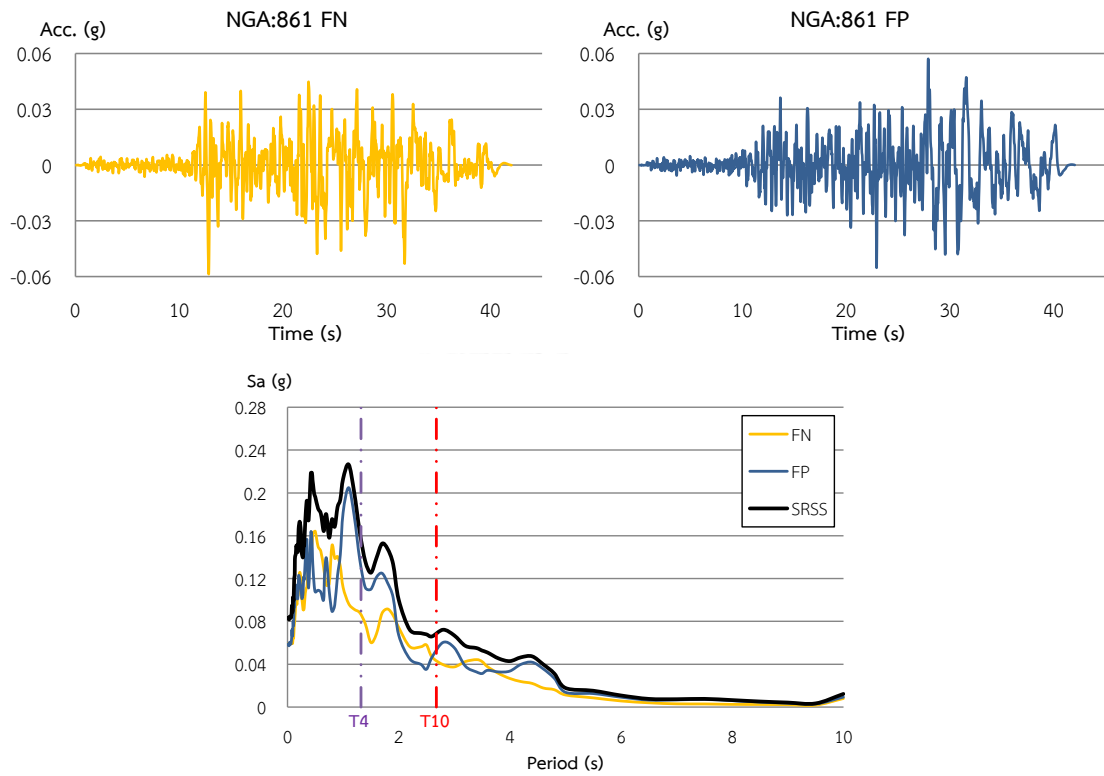
รูปที่ 3.41 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 844



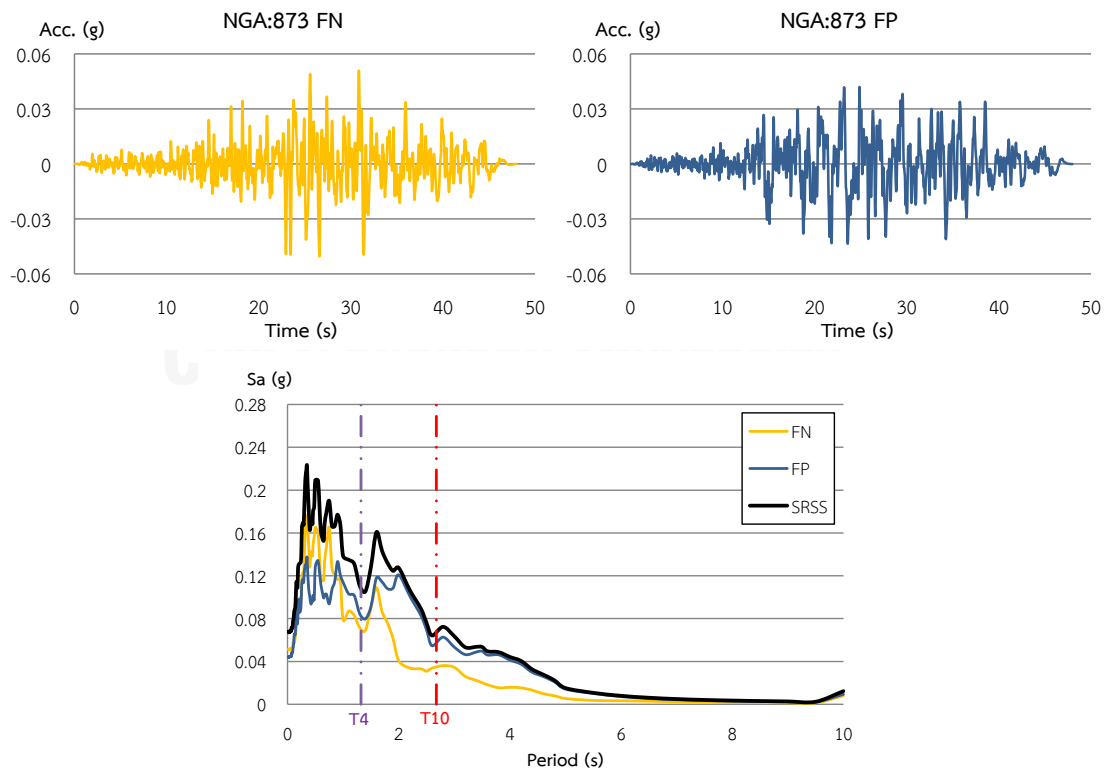
รูปที่ 3.42 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 849



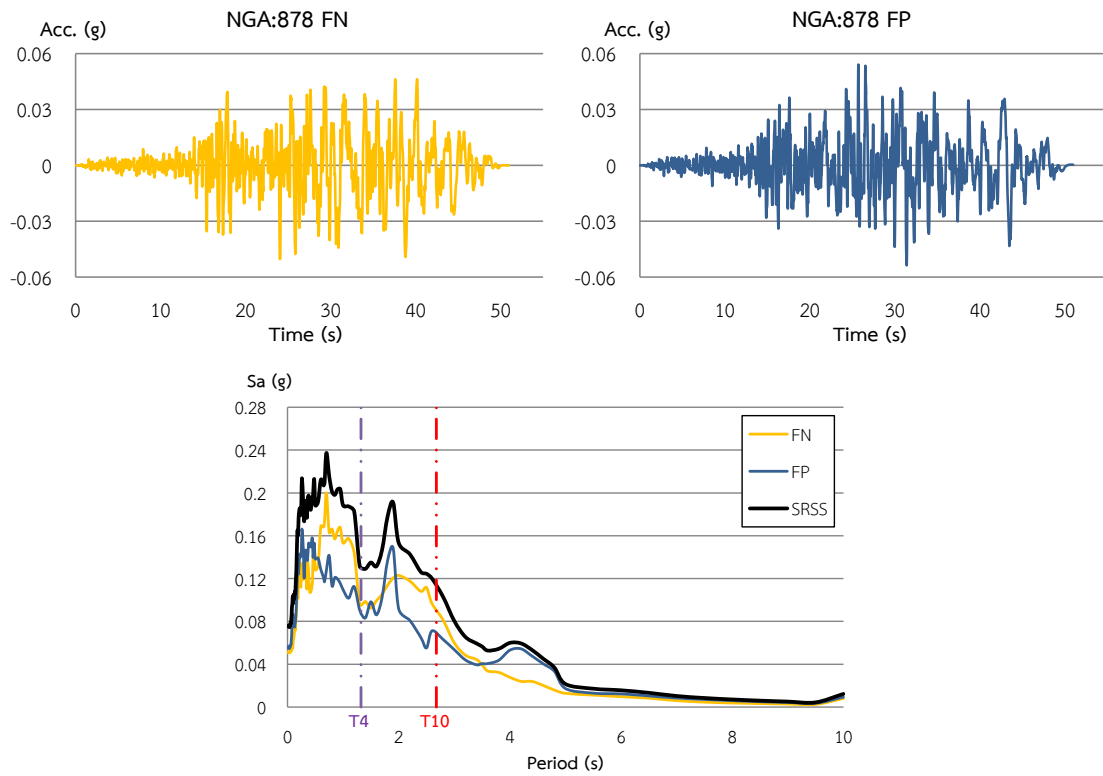
รูปที่ 3.43 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 856



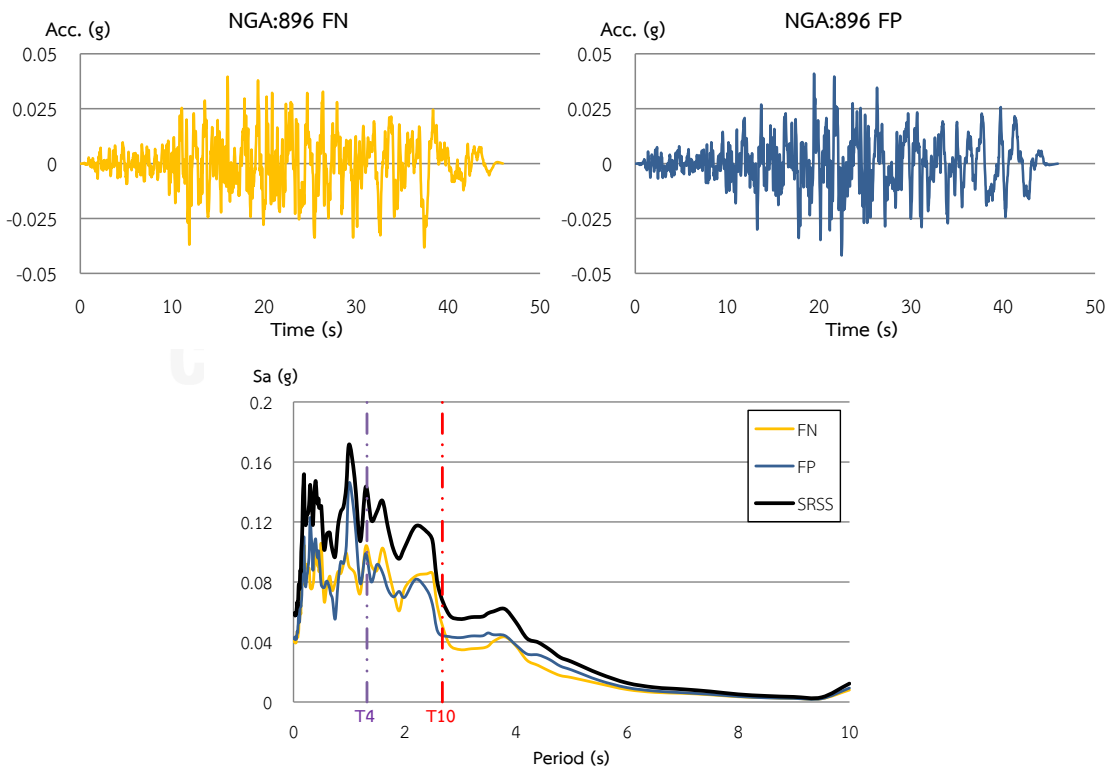
รูปที่ 3.44 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 861



รูปที่ 3.45 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 873



รูปที่ 3.46 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 878



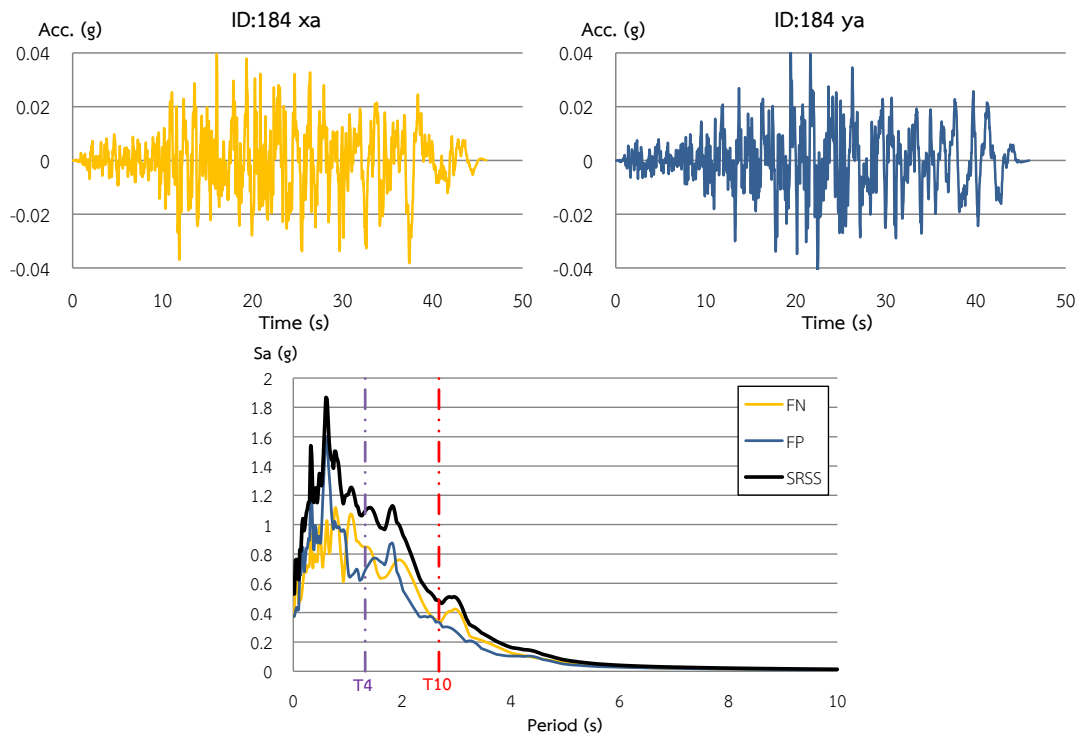
รูปที่ 3.47 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #NGA 896

ตารางที่ 3.19 ตัวคูณปรับค่า (Scale Factor) ความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์ Landers, California

NGA no.	Station	Scale Factor			
		4 <sup>th</sup> Floor Building		10 <sup>th</sup> Floor Building	
		5%in50yr	20%in50yr	5%in50yr	20%in50yr
833	Anaheim - W Ball Rd	1.88	0.71	1.82	0.70
844	Burbank - N Buena Vista	1.79	0.66	3.32	1.27
849	Covina - W Badillo	1.79	0.68	2.02	0.76
856	Fountain Valley - Euclid	1.77	0.65	1.82	0.67
861	Huntington Bch - Waikiki	2.16	0.80	2.32	0.86
873	LA - W 70th St	2.00	0.75	1.94	0.73
878	Lakewood - Del Amo Blvd	1.63	0.61	1.57	0.60
896	Tustin - E Sycamore	2.32	0.86	2.26	0.84

### 3.3.6 เหตุการณ์แผ่นดินไหว Tabas, Iran

เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1978 มีความรุนแรงของแผ่นดินไหว 7.3 ริกเตอร์ ในงานวิจัยนี้จะใช้คลื่นแผ่นดินไหวจากสถานี ST56 ดังแสดงในรูปที่ 3.48 และใช้ตัวคูณปรับค่าดังแสดงในตารางที่ 3.20



รูปที่ 3.48 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #ID 184

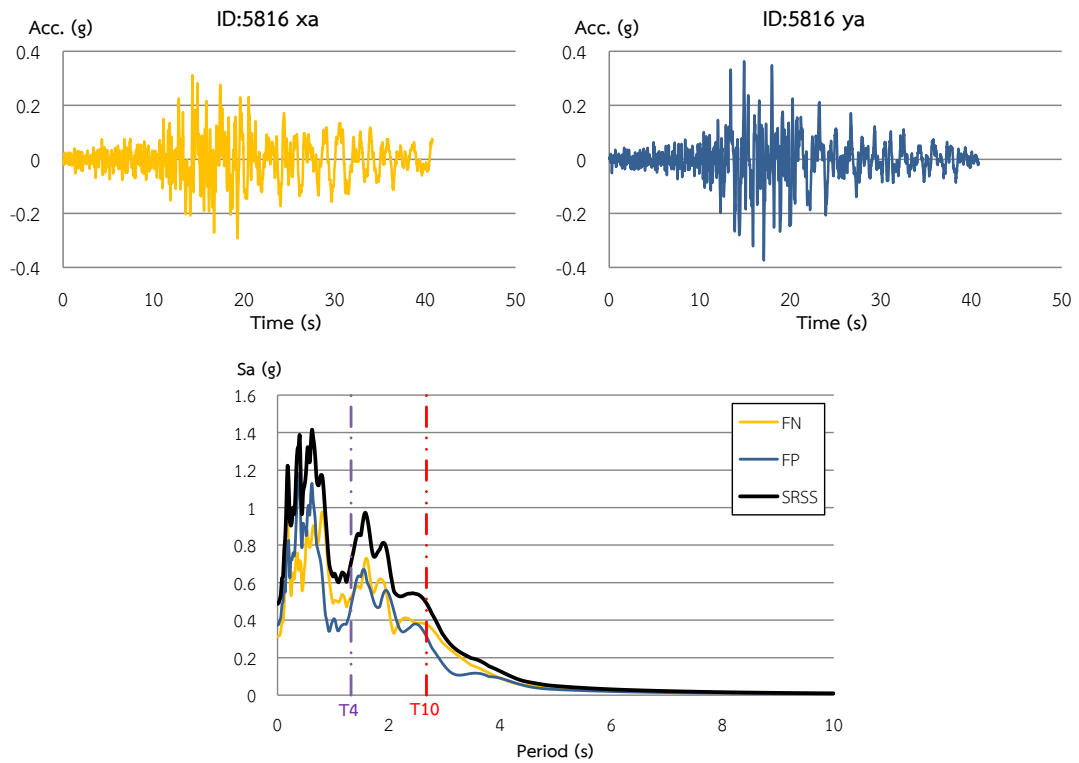
ตารางที่ 3.20 ตัวคูณปรับค่า (Scale Factor) ความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์ Tabas, Iran

NGA no.	Station	Scale Factor			
		4 <sup>th</sup> Floor Building		10 <sup>th</sup> Floor Building	
		5%in50yr	20%in50yr	5%in50yr	20%in50yr
184	ST56	0.28	0.10	0.44	0.17

### 3.3.7 เหตุการณ์แผ่นดินไหว Strofades, Greece

เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1997 มีความรุนแรงของแผ่นดินไหว 6.6 ริกเตอร์ ในงานวิจัยนี้จะใช้คลื่นแผ่นดินไหวจากสถานี ST163 ดังแสดงในรูปที่ 3.49 และใช้ตัวคูณปรับค่าดังแสดงในตารางที่ 3.21





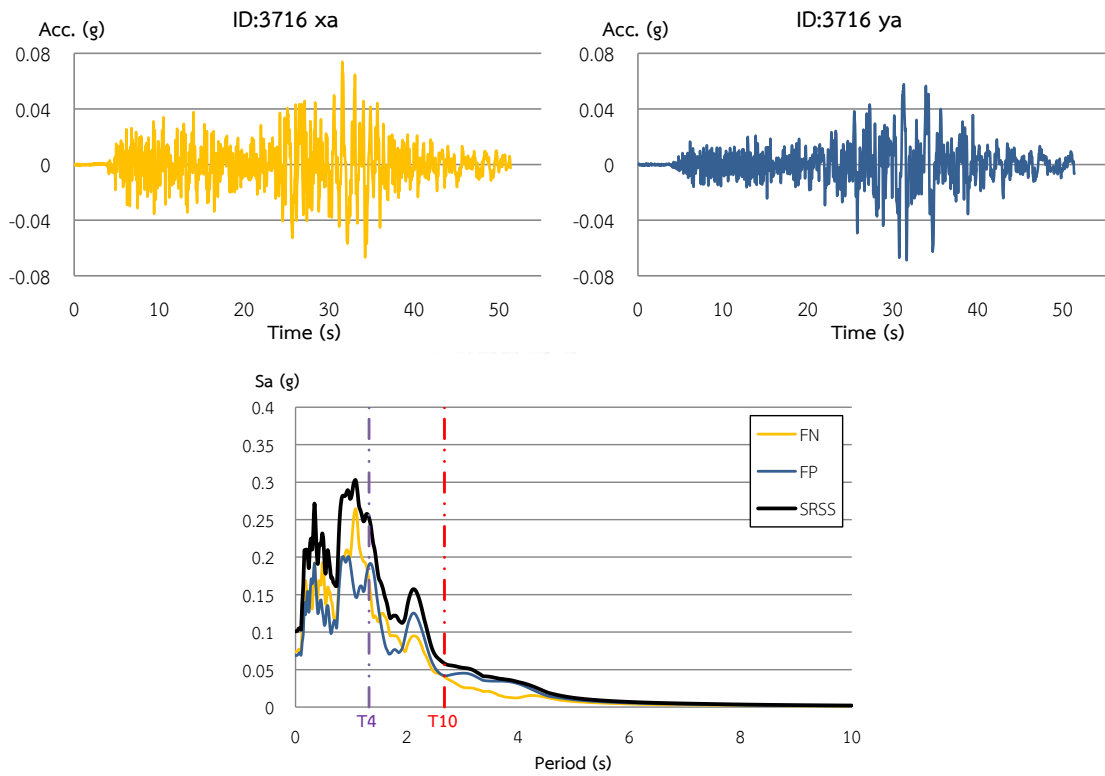
รูปที่ 3.49 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #ID 5816

ตารางที่ 3.21 ตัวคูณปรับค่า (Scale Factor) ความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์ Strofades, Greece

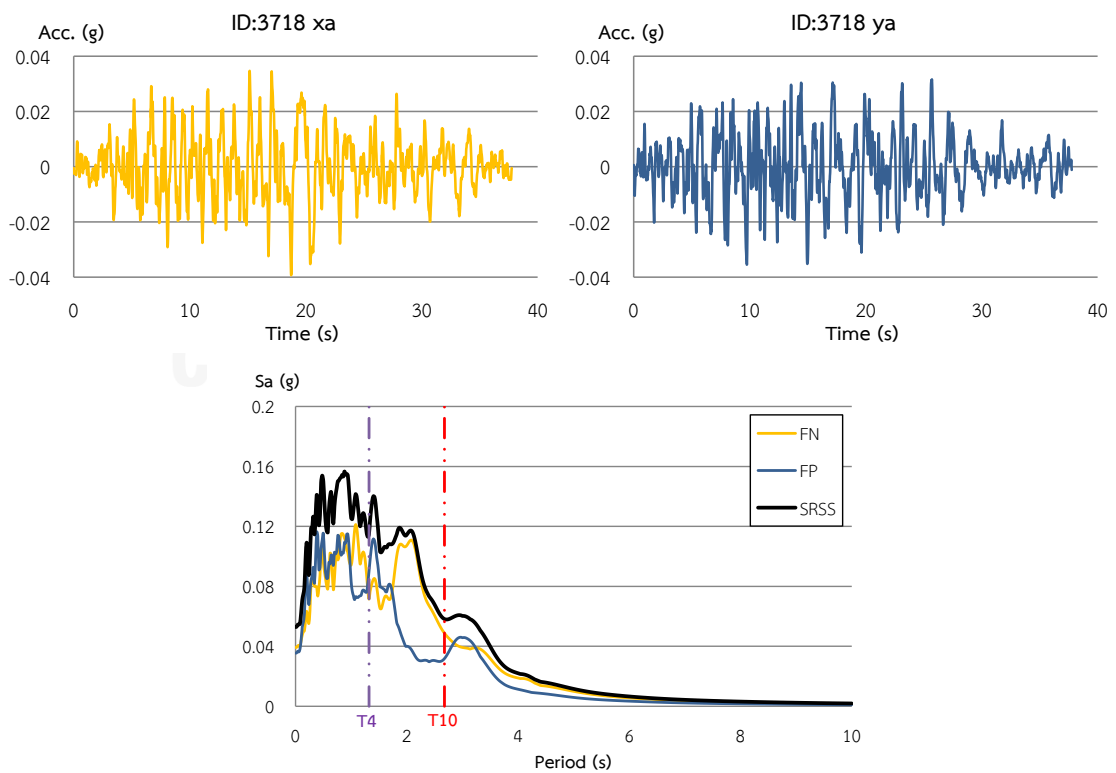
NGA no.	Station	Scale Factor			
		4 <sup>th</sup> Floor Building		10 <sup>th</sup> Floor Building	
		5%in50yr	20%in50yr	5%in50yr	20%in50yr
5816	ST163	0.38	0.14	0.56	0.21

### 3.3.8 เหตุการณ์แผ่นดินไหว Duzce 1, Turkey

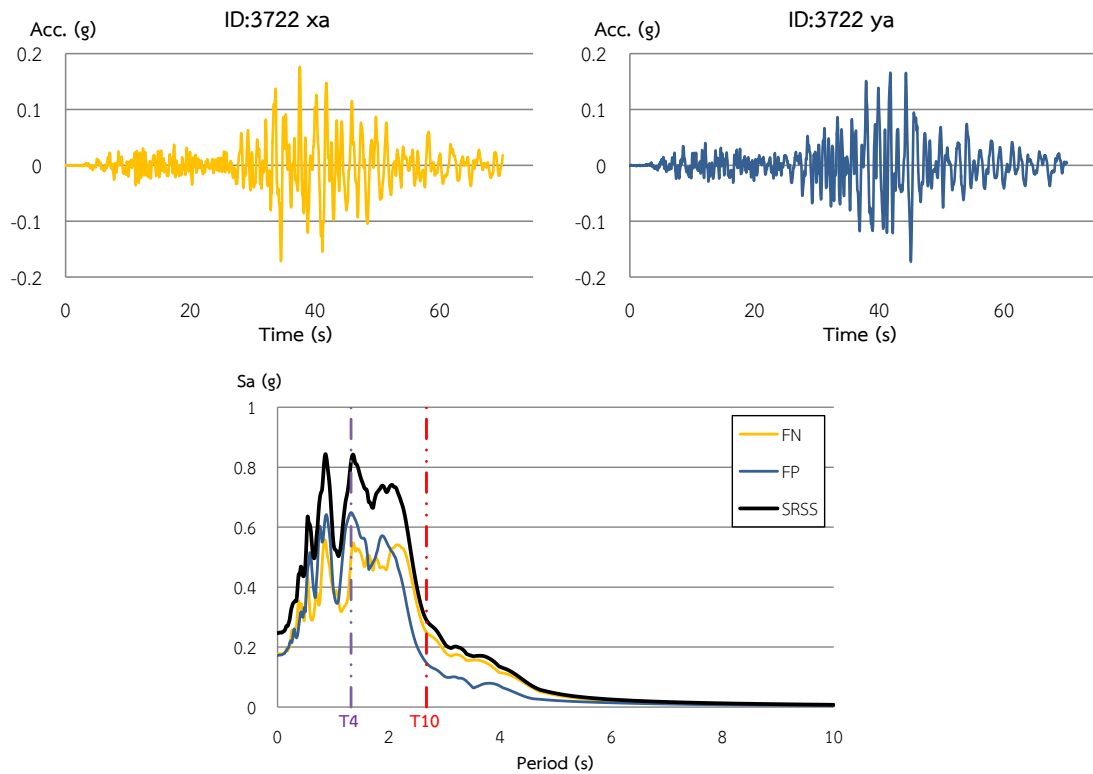
เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1999 มีความรุนแรงของแผ่นดินไหว 7.2 ริกเตอร์ ในงานวิจัยนี้จะใช้คลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์นี้ 3 คู่คลื่นจาก 3 สถานี ดังแสดงในรูปที่ 3.50 ถึง 3.52 และใช้ตัวคูณปรับค่าดังแสดงในตารางที่ 3.21



รูปที่ 3.50 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #ID 3716



รูปที่ 3.51 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #ID 3718



รูปที่ 3.52 คลื่นแผ่นดินไหวและสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหว #ID 3722

ตารางที่ 3.22 ตัวคูณปรับค่า (Scale Factor) ความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์ Duzce 1, Turkey

NGA no.	Station	Scale Factor			
		4 <sup>th</sup> Floor Building		10 <sup>th</sup> Floor Building	
		5%in50yr	20%in50yr	5%in50yr	20%in50yr
3716	ST774	1.93	0.71	2.28	0.86
3718	ST766	2.26	0.83	3.20	1.20
3722	ST779	0.44	0.18	0.54	0.20

## บทที่ 4

### ผลตอบสนองของอาคารและการวิเคราะห์หาความเสียหาย

ในการประเมินความเสียหายของอาคารนั้นในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี ซึ่งวิธีที่นิยมใช้กันค่อนข้างมากคือการประเมินตามมาตรฐาน ASCE/SEI 41-13 ซึ่งเป็นการประเมินโดยแบ่งระดับสมรรถนะของอาคารออกเป็น 3 ระดับได้แก่ ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level : IO), ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (Life Safety : LS) และระดับเกือบพังทลาย (Collapse Prevention : CP) แต่อย่างไรก็ตามการประเมินตามมาตรฐาน ASCE/SEI 41-13 เป็นเพียงประเมินอาคารตามความเสียหายทางกายภาพเท่านั้น

ในปี ค.ศ. 2006 FEMA และ ATC ได้ร่วมกันเริ่มจัดทำโครงการงานวิจัยเกี่ยวกับวิธีการประเมินความเสียหายของอาคาร และโครงการดังกล่าวก็ได้มีการจัดทำแล้วเสร็จและได้มีการตีพิมพ์เผยแพร่ในปี ค.ศ. 2012 ในชื่อ FEMA P-58 ซึ่งในโครงการดังกล่าวยังได้รวมถึงการพัฒนาโปรแกรม PACT ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการประเมินความเสียหายของอาคารอันเนื่องมาจากผลของแรงแผ่นดินไหว โดยความเสียหายดังกล่าวจะแสดงออกมาในรูปแบบของค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการซ่อมแซมอาคารนั้น

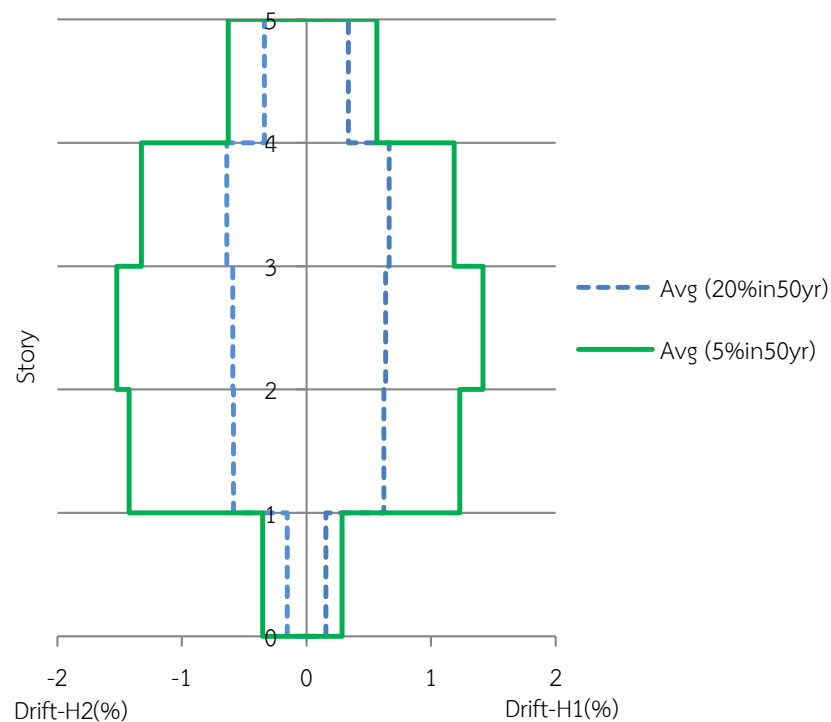
ในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม PACT ในการประเมินความเสียหายค่าซ่อมแซมของอาคารอันเนื่องมาจากแผ่นดินไหว ซึ่งข้อมูลสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นก็คือผลตอบสนองของอาคารได้แก่ ค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (story drift ratio) ค่าความเร่งในแต่ละชั้น (Floor Acceleration) และค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์คงค้าง (residual drift) ซึ่งจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์หาด้วยวิธีอื่นอีลาสติคเชิงเวลาที่ค่อนข้างยุ่งยาก

#### 4.1 ผลตอบสนองของอาคาร

ในการวิเคราะห์หาผลตอบสนองของอาคารนั้นจะใช้โปรแกรม Perform 3D โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวจากฐานข้อมูลของ PEER และโปรแกรม REXEL รวมทั้งหมด 26 คู่คลื่นต่อหนึ่งระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวดังแสดงในหัวข้อที่ 3.3 ในการวิเคราะห์จะใช้ความละเอียดของเวลา (time step,  $\Delta t$ ) เท่ากับ 0.000025 เพื่อให้ผลการวิเคราะห์เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยในระดับที่ยอมรับได้ การใช้คลื่นแผ่นดินไหวสำหรับกรวิเคราะห์แบบจำลองของอาคารตัวอย่างด้วยโปรแกรม Perform-3D นั้น จะวิเคราะห์โดยให้คลื่นแผ่นดินไหวกระทำสองทิศทาง ซึ่งจะเลือกทิศทางในแนวราบที่มีค่าความเร่งที่ผิวดิน (peak ground acceleration, PGA) มากที่สุดกระทำกับแกนอ่อนของอาคารหรือในทิศทาง H2 ผลการวิเคราะห์โดยทั่วไปที่ได้จากการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นนั้นจะประกอบไปด้วย ค่าการเคลื่อนที่ตัว, แรงในแต่ละชั้นส่วนและค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น เป็นต้น อย่างไรก็ตามฟังก์ชันความบอบบางของแต่ละชั้นส่วนโดยส่วนใหญ่จะเป็นรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น ค่าความเร่งในแต่ละชั้น หรือความเร็วในแต่ละชั้นกับความเสียหายของชั้นส่วน ดังนั้นในการวิเคราะห์เพื่อหาผลตอบสนอง จึงเลือกเฉพาะค่าที่ต้องนำไปใช้ในการประเมินความเสียหายเท่านั้น

#### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

หลังจากทำการวิเคราะห์เพื่อหาผลตอบสนองของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวโดยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นด้วยโปรแกรม Perform-3D จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.97% ที่ตำแหน่งระหว่างชั้น 3 และชั้น 4 ในทิศทาง H2 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปีโดยเกิดจากคลื่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว Landers (#NGA 856) และมีค่าเท่ากับ 2.93% ที่ตำแหน่งระหว่างชั้น 2 และ 3 ในทิศทาง H2 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปีโดยเกิดจากคลื่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว Hector Mine (#NGA 1765) เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นในรูปแบบที่ 4.1 พบว่าค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุดเกิดขึ้นที่ระหว่างชั้น 3 และ 4 สำหรับระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี และมีค่าสูงสุดที่ระหว่างชั้น 2 และชั้น 3 สำหรับระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี

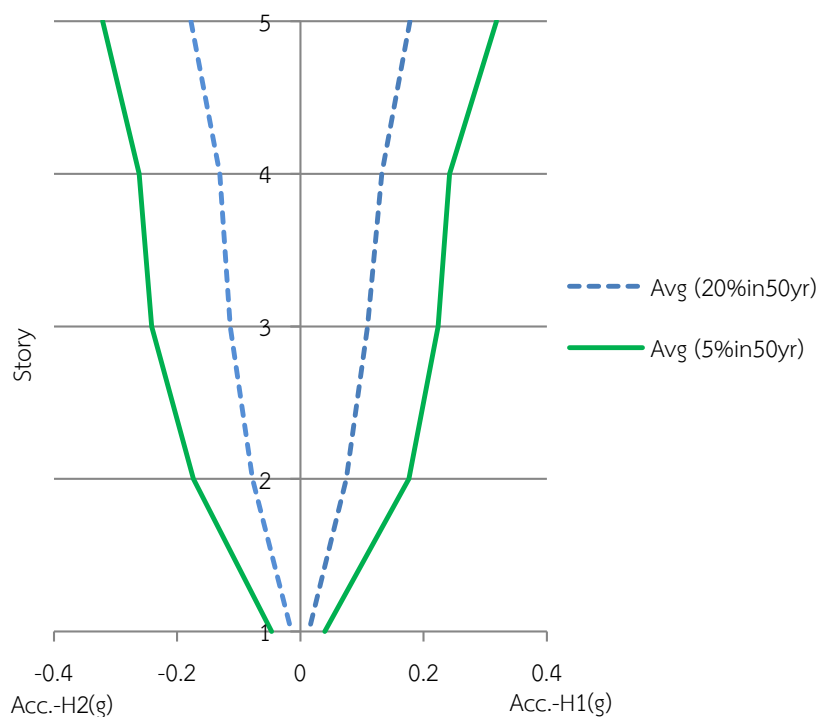


รูปที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้ ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว (B4)

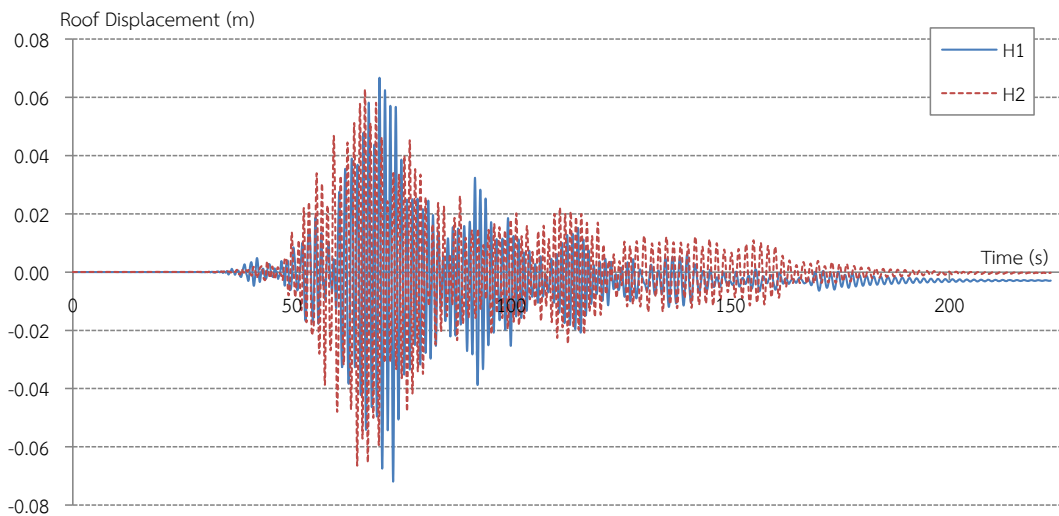
จากรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงค่าความเร่งในแต่ละชั้นนั้นพบว่ามีความถี่สูงสุดที่ชั้นหลังคา โดยมีค่าเท่ากับ 0.178g ในทิศทาง H2 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี และมีค่าเท่ากับ 0.32g ในทิศทาง H2 เช่นเดียวกัน สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ในส่วนของค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์

คงค้างพบว่ามีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.14% สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ซึ่งเกิดจากคลื่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว Landers (#NGA 861) และมีค่าเท่ากับ 1.4% สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ซึ่งเกิดจากคลื่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว Hector Mine (#NGA 1765) และจากค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นบนสุดของอาคาร

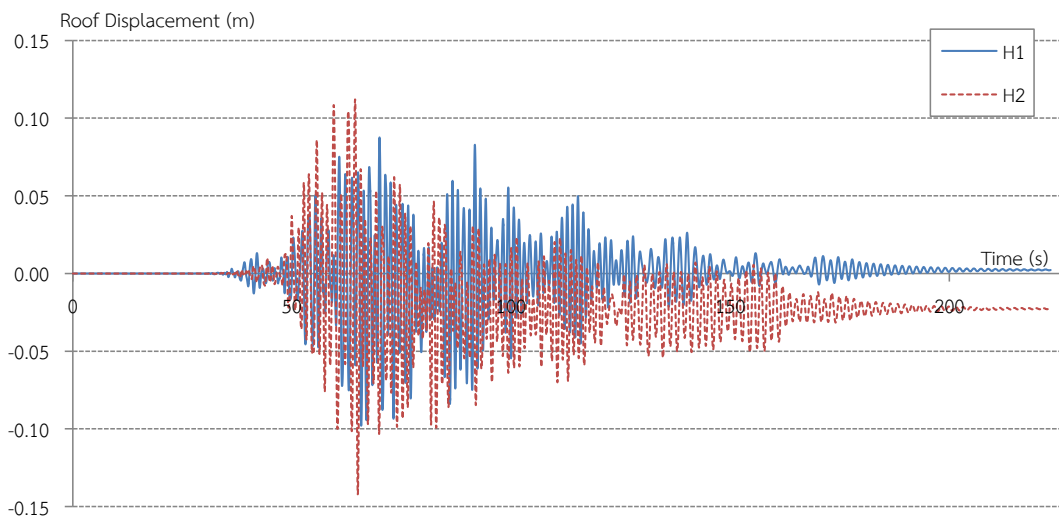
รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงตัวอย่างค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นบนสุดภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1167) จะเห็นได้ว่าเมื่อวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นบนสุดของอาคารหลังจากคลื่นแผ่นดินไหวกระทำนั้นมีแนวโน้มกลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้น แต่สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ค่าการเคลื่อนตัวมีแนวโน้มที่จะไม่กลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้นในทิศทาง H2



รูปที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยความเร่งในแต่ละชั้นของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้รับการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 4.3 ค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นหลังคาภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1167) ระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปีของอาคารสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 4.4 ค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นหลังคาภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1167) ระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปีของอาคารสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวภายใต้แรงกระทำของคลื่นแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี

No.	Earthquake No.	Peak Ground Acceleration (g)		Max Base Shear (tons)		Max Roof Displacement (m)		Max story Drift (%)		Max Floor Accerelation (g)		Max. Residual drift(%)
		H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	
1	2060	0.032	0.034	77.3	58.7	0.07	0.05	0.64	0.57	0.165	0.152	0.071
2	2064	0.031	0.031	83.1	54.5	0.07	0.05	0.75	0.50	0.198	0.111	0.072
3	2065	0.048	0.052	88	69.6	0.08	0.05	0.78	0.59	0.240	0.180	0.024
4	2067	0.024	0.029	69.6	82.5	0.07	0.08	0.70	0.80	0.175	0.183	0.042
5	2070	0.033	0.040	74.5	72.3	0.06	0.08	0.61	0.80	0.157	0.188	0.054
6	2079	0.033	0.036	92.3	71.2	0.08	0.08	0.83	0.75	0.187	0.188	0.080
7	2081	0.042	0.045	78.8	85	0.08	0.07	0.79	0.71	0.240	0.387	0.042
8	2088	0.026	0.038	80	65.4	0.08	0.06	0.75	0.61	0.190	0.132	0.020
9	2729	0.031	0.044	61.2	80.7	0.05	0.09	0.61	0.90	0.201	0.225	0.025
10	1156	0.038	0.043	71.7	85.8	0.06	0.07	0.62	0.76	0.143	0.164	0.037
11	1167	0.027	0.034	78.8	65.6	0.07	0.07	0.70	0.67	0.156	0.170	0.042
12	1765	0.050	0.057	80	63.7	0.08	0.07	0.76	0.67	0.201	0.177	0.130
13	1781	0.050	0.052	82.6	87.9	0.08	0.07	0.80	0.74	0.198	0.169	0.190
14	833	0.025	0.034	69.4	67.3	0.06	0.06	0.59	0.59	0.163	0.179	0.089
15	844	0.031	0.039	77.6	70.8	0.07	0.05	0.64	0.56	0.151	0.119	0.031
16	849	0.033	0.038	71.2	54	0.07	0.04	0.68	0.43	0.160	0.098	0.067
17	856	0.033	0.048	48.8	90	0.04	0.09	0.42	0.97	0.142	0.270	0.119
18	861	0.046	0.047	83.8	60	0.08	0.06	0.86	0.68	0.237	0.185	0.220
19	873	0.033	0.038	74.21	47.2	0.06	0.04	0.57	0.49	0.147	0.123	0.057
20	878	0.031	0.033	75	56.1	0.06	0.05	0.60	0.51	0.160	0.148	0.067
21	896	0.034	0.036	70.7	77	0.06	0.07	0.60	0.67	0.175	0.146	0.089
22	184	0.037	0.037	71.2	64	0.06	0.05	0.59	0.55	0.152	0.166	0.130
23	5816	0.044	0.052	56.2	70.4	0.05	0.05	0.56	0.54	0.163	0.178	0.054
24	3716	0.049	0.052	78.5	66.4	0.09	0.07	0.85	0.77	0.226	0.226	0.100
25	3718	0.029	0.033	71	58.7	0.06	0.05	0.55	0.53	0.126	0.151	0.059
26	3722	0.031	0.032	80	84.4	0.07	0.07	0.70	0.72	0.172	0.211	0.058

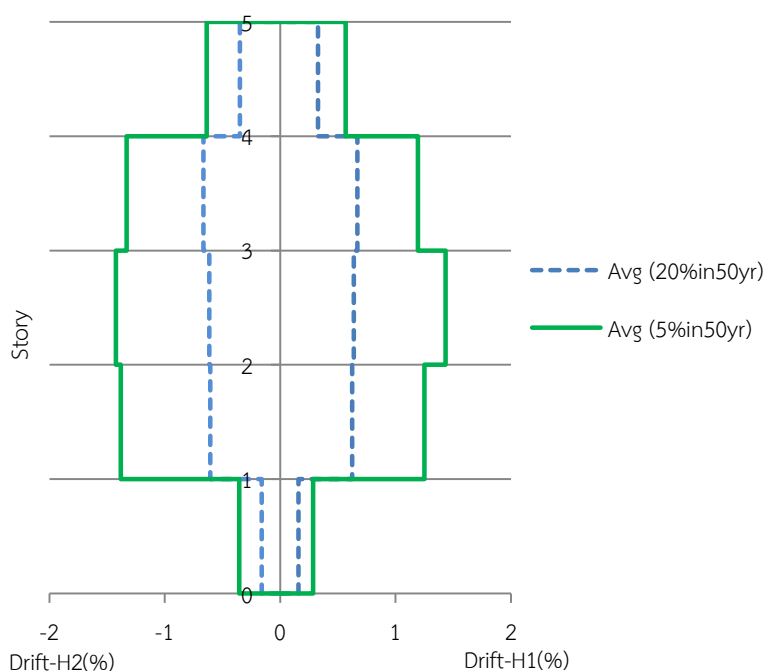


ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวภายใต้แรงกระทำของคลื่นแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี

No.	Earthquake No.	Peak Ground Acceleration (g)		Max Base Shear (tons)		Max Roof Displacement (m)		Max story Drift (%)		Max Floor Accerelation (g)		Max. Residual drift(%)
		H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	
1	2060	0.087	0.092	116	116.4	0.11	0.11	1.31	1.21	0.266	0.319	0.190
2	2064	0.084	0.085	105.2	106.1	0.12	0.09	1.39	0.97	0.294	0.220	0.133
3	2065	0.130	0.141	116	135	0.16	0.14	1.97	1.56	0.419	0.340	0.024
4	2067	0.063	0.075	109.1	126.9	0.12	0.14	1.34	1.52	0.247	0.274	0.120
5	2070	0.090	0.107	109.6	132.6	0.12	0.16	1.37	1.73	0.341	0.312	0.150
6	2079	0.088	0.097	133.5	134.9	0.17	0.16	2.20	1.81	0.301	0.287	0.380
7	2081	0.114	0.123	106.1	150	0.13	0.18	1.57	2.25	0.448	0.387	0.200
8	2088	0.068	0.097	110.8	132.1	0.03	0.07	1.51	2.07	0.329	0.282	0.618
9	2729	0.085	0.119	108.3	122.4	0.09	0.16	1.00	1.87	0.321	0.429	0.136
10	1156	0.104	0.117	119	143.9	0.12	0.15	1.37	1.70	0.337	0.308	0.420
11	1167	0.075	0.092	103.4	127.4	0.10	0.14	1.13	1.53	0.267	0.300	0.285
12	1765	0.137	0.158	136.7	166.5	0.16	0.23	1.91	2.93	0.378	0.434	0.340
13	1781	0.135	0.139	104	148.7	0.12	0.16	1.41	1.92	0.370	0.308	0.370
14	833	0.066	0.090	97.3	117.7	0.10	0.10	0.96	1.10	0.284	0.332	0.190
15	844	0.085	0.105	100.8	139.1	0.10	0.13	1.15	1.42	0.303	0.303	0.190
16	849	0.088	0.099	110.4	128.7	0.11	0.11	1.24	1.21	0.268	0.252	0.170
17	856	0.089	0.130	100	128.8	0.08	0.14	0.93	1.60	0.302	0.395	0.113
18	861	0.124	0.127	110.8	121.5	0.15	0.12	1.84	1.27	0.327	0.375	0.377
19	873	0.087	0.102	107.8	115.1	0.11	0.10	1.18	1.03	0.301	0.296	0.274
20	878	0.082	0.088	105.2	105.5	0.12	0.10	1.44	1.06	0.282	0.310	0.151
21	896	0.092	0.097	113.8	131.6	0.13	0.13	1.51	1.26	0.280	0.314	0.368
22	184	0.104	0.105	110.8	128.8	0.13	0.14	1.52	1.52	0.353	0.357	0.348
23	5816	0.119	0.142	101.8	136.5	0.10	0.13	1.27	1.36	0.328	0.333	0.327
24	3716	0.133	0.143	112.1	133.9	0.15	0.13	1.86	1.34	0.347	0.366	0.133
25	3718	0.080	0.089	105.6	135.9	0.12	0.14	1.36	1.49	0.308	0.280	0.475
26	3722	0.076	0.078	100	143	0.11	0.14	1.26	1.66	0.301	0.260	0.159

#### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งมีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

หลังจากทำการวิเคราะห์เพื่อหาผลตอบสนองของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้น ซึ่งมีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวโดยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นด้วยโปรแกรม Perform-3D จากตารางที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 1.03% ที่ตำแหน่งระหว่างชั้น 3 และชั้น 4 ในทิศทาง H2 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี โดยเกิดจากคลื่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว Landers (#NGA 856) และมีค่าเท่ากับ 2.26% ที่ตำแหน่งระหว่างชั้น 2 และ 3 ในทิศทาง H2 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี โดยเกิดจากคลื่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว Nenana (#NGA 2088) เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นในรูปที่ 4.5 พบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับอาคารตัวอย่างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว กล่าวคือค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากที่สุดเกิดขึ้นที่ระหว่างชั้น 3 และชั้น 4 สำหรับระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี และมีค่ามากที่สุดที่ระหว่างชั้น 2 และ 3 สำหรับระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี

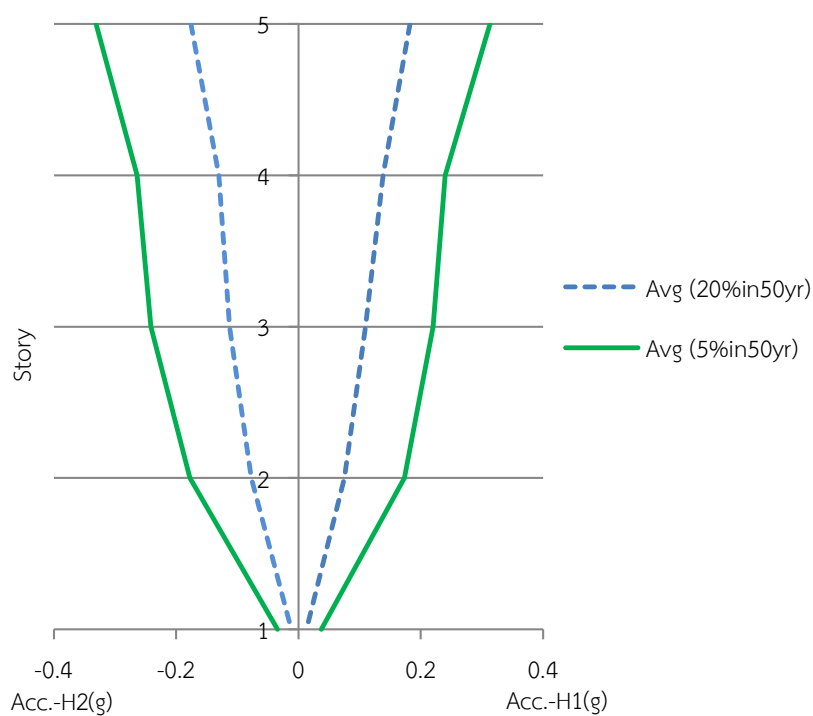


รูปที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งมีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

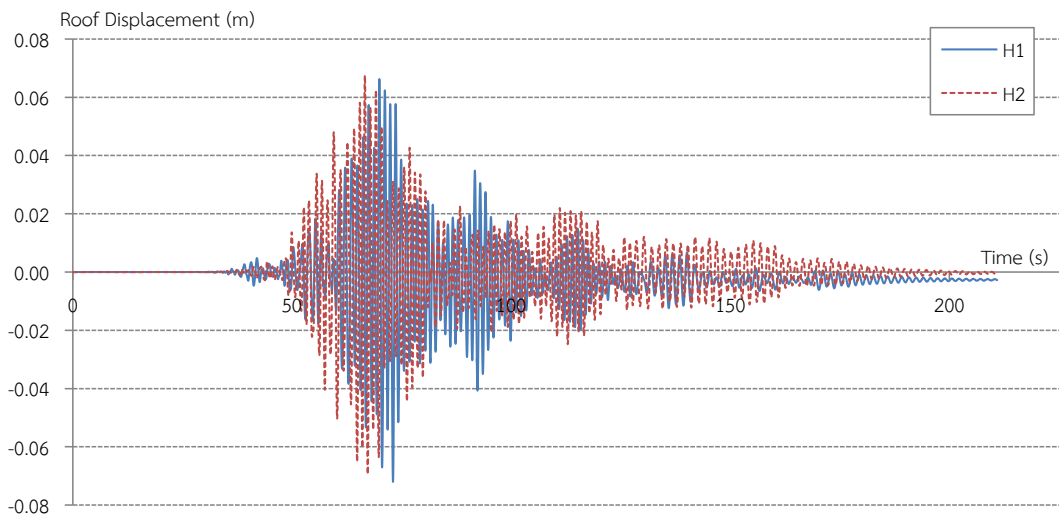
จากรูปที่ 4.6 แสดงค่าความเร่งในแต่ละชั้นนั้นพบว่ามีค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ชั้นหลังคา โดยมีค่าเท่ากับ 0.182g ในทิศทาง H2 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี และมีค่าเท่ากับ 0.33g ในทิศทาง H2 เช่นเดียวกัน สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ในส่วนของค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์

คงค้างพบว่ามีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.22% สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ซึ่งเกิดจากคลื่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว Landers (#NGA 861) และมีค่าเท่ากับ 0.62% สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ซึ่งเกิดจากคลื่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว Nenana (#NGA 2088)

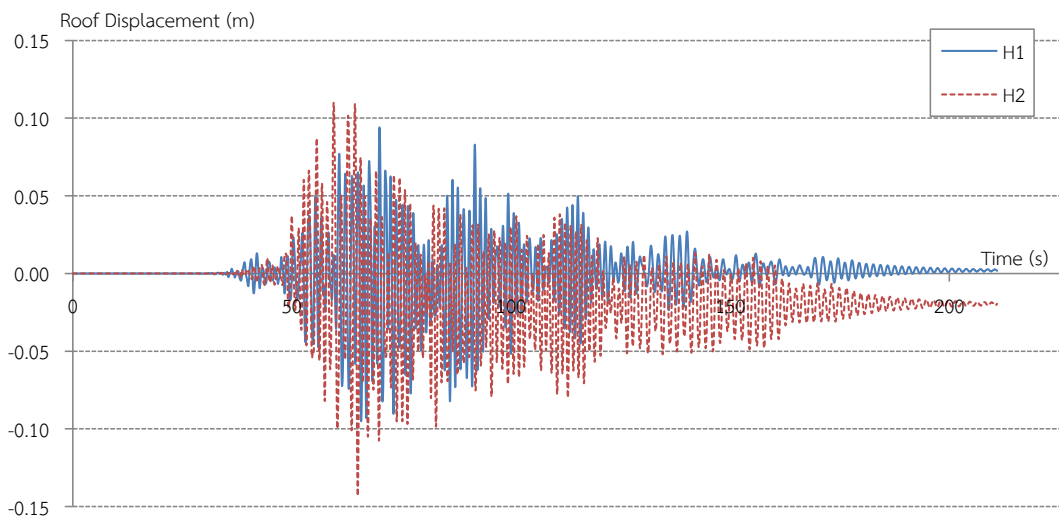
รูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงตัวอย่างค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นบนสุดภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1167) เมื่อวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นบนสุดของอาคารหลังจากคลื่นแผ่นดินไหวกระทำนั้นมีแนวโน้มกลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้น แต่สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ค่าการเคลื่อนตัวมีแนวโน้มที่จะไม่กลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้นในแนว H2



รูปที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยความเร่งในแต่ละชั้นของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งมีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 4.7 ค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นหลังคาของอาคารสูง 4 ชั้นซึ่งออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1167)ระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี



รูปที่ 4.8 ค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นหลังคาภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1167)ระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ของอาคารสูง 4 ชั้นซึ่งออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวภายใต้คลื่นแรงกระทำของแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี

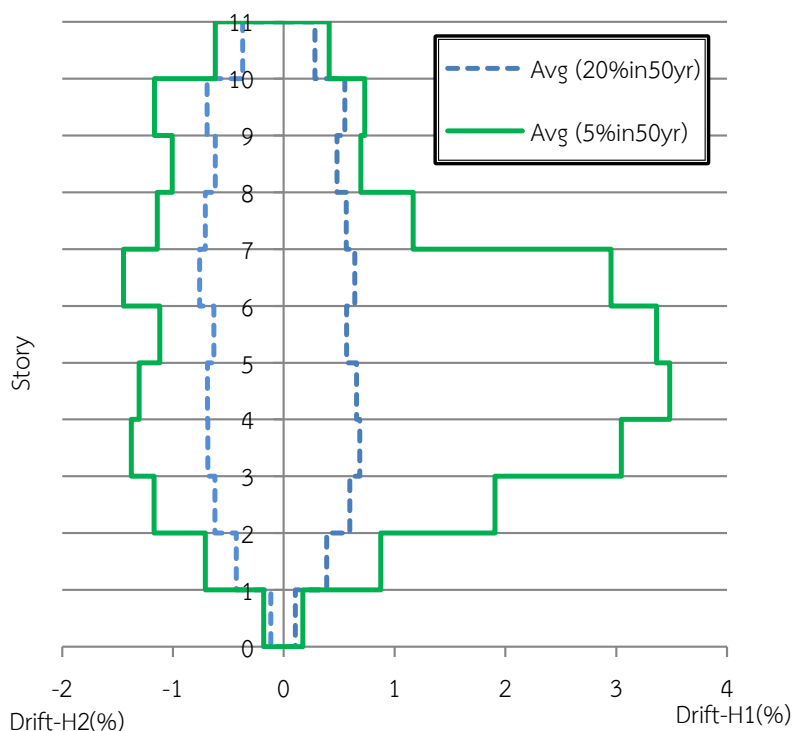
No.	Earthquake No.	Peak Ground Acceleration (g)		Max Base Shear (tons)		Max Roof Displacement (m)		Max story Drift (%)		Max Floor Accerelation (g)		Max. Residual drift(%)
		H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	
1	2060	0.032	0.034	76.7	57.3	0.07	0.06	0.63	0.59	0.171	0.162	0.031
2	2064	0.031	0.031	88.1	56.1	0.08	0.05	0.76	0.51	0.196	0.112	0.020
3	2065	0.048	0.052	90.3	71.7	0.08	0.05	0.78	0.59	0.246	0.186	0.037
4	2067	0.024	0.029	70	86	0.07	0.08	0.69	0.84	0.174	0.194	0.035
5	2070	0.033	0.040	81.3	69.1	0.08	0.06	0.84	0.61	0.235	0.148	0.020
6	2079	0.033	0.036	93	88.5	0.08	0.08	0.82	0.77	0.189	0.199	0.016
7	2081	0.042	0.045	80	86	0.08	0.07	0.80	0.69	0.240	0.199	0.036
8	2088	0.026	0.038	82	95.6	0.07	0.09	0.74	0.93	0.208	0.193	0.068
9	2729	0.031	0.044	60	85	0.05	0.09	0.60	0.93	0.199	0.231	0.017
10	1156	0.038	0.043	74.2	90	0.06	0.07	0.63	0.78	0.146	0.173	0.036
11	1167	0.027	0.034	80.2	70	0.07	0.07	0.70	0.70	0.154	0.173	0.045
12	1765	0.050	0.057	81.6	70	0.08	0.07	0.76	0.71	0.205	0.190	0.110
13	1781	0.050	0.052	84.1	88.8	0.08	0.08	0.80	0.73	0.199	0.163	0.091
14	833	0.025	0.034	68.3	70.7	0.06	0.06	0.59	0.60	0.163	0.174	0.065
15	844	0.031	0.039	78.1	70.5	0.07	0.05	0.64	0.55	0.152	0.121	0.021
16	849	0.033	0.038	71.7	56.5	0.07	0.04	0.68	0.44	0.159	0.102	0.033
17	856	0.033	0.048	47.5	95.6	0.04	0.09	0.42	1.03	0.138	0.280	0.062
18	861	0.046	0.047	83.8	64.5	0.08	0.06	0.87	0.67	0.240	0.198	0.147
19	873	0.033	0.038	73.3	46.2	0.06	0.04	0.57	0.49	0.151	0.127	0.038
20	878	0.031	0.033	76.7	60	0.06	0.05	0.61	0.55	0.165	0.151	0.040
21	896	0.034	0.036	69	80	0.05	0.07	0.58	0.69	0.172	0.145	0.044
22	184	0.037	0.037	71.5	73	0.06	0.06	0.59	0.62	0.153	0.155	0.085
23	5816	0.044	0.052	57.9	72.7	0.05	0.05	0.55	0.54	0.167	0.185	0.037
24	3716	0.049	0.052	79.5	65.6	0.09	0.07	0.85	0.82	0.229	0.234	0.063
25	3718	0.029	0.033	71	60	0.05	0.05	0.53	0.55	0.126	0.153	0.054
26	3722	0.031	0.032	80.8	87.5	0.07	0.07	0.70	0.72	0.172	0.219	0.040

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวภายใต้แรงกระทำของคลื่นแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี

No.	Earthquake No.	Peak Ground Acceleration (g)		Max Base Shear (tons)		Max Roof Displacement (m)		Max story Drift (%)		Max Floor Accerelation (g)		Max. Residual drift(%)
		H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	
1	2060	0.087	0.092	116.4	117.8	0.11	0.12	1.31	1.28	0.276	0.319	0.147
2	2064	0.084	0.085	118.6	107.8	0.16	0.10	1.86	0.96	0.306	0.233	0.138
3	2065	0.130	0.141	90	71.2	0.07	0.05	1.96	1.56	0.245	0.185	0.281
4	2067	0.063	0.075	107	138.8	0.12	0.14	1.35	1.49	0.242	0.282	0.200
5	2070	0.090	0.107	111.7	134.9	0.11	0.16	1.19	1.69	0.343	0.322	0.300
6	2079	0.088	0.097	133.5	134.5	0.17	0.16	2.14	1.79	0.304	0.294	0.522
7	2081	0.114	0.123	116.8	141.1	0.13	0.17	1.56	1.87	0.455	0.417	0.999
8	2088	0.068	0.097	116.4	141.1	0.13	0.19	1.58	2.26	0.272	0.285	0.746
9	2729	0.085	0.119	108.7	134.1	0.09	0.16	0.98	1.78	0.336	0.451	0.530
10	1156	0.104	0.117	118.6	153.8	0.12	0.15	1.41	1.74	0.334	0.345	0.329
11	1167	0.075	0.092	104	129.3	0.10	0.14	1.09	1.51	0.271	0.313	0.342
12	1765	0.137	0.158	137.2	166.5	0.17	0.17	1.96	1.88	0.400	0.425	1.400
13	1781	0.135	0.139	104	157	0.13	0.14	1.46	1.70	0.377	0.372	0.478
14	833	0.066	0.090	94.4	119.8	0.10	0.10	0.98	1.10	0.296	0.339	0.134
15	844	0.085	0.105	99.2	140.6	0.10	0.12	1.15	1.46	0.304	0.313	0.233
16	849	0.088	0.099	110	117.5	0.11	0.11	1.24	1.16	0.272	0.248	0.160
17	856	0.089	0.130	103	135.5	0.09	0.14	0.94	1.57	0.308	0.436	0.220
18	861	0.124	0.127	111	124.1	0.15	0.11	1.92	1.35	0.326	0.407	0.288
19	873	0.087	0.102	107.8	119	0.11	0.10	1.15	1.05	0.298	0.299	0.246
20	878	0.082	0.088	106.1	110	0.12	0.10	1.43	1.11	0.279	0.325	0.113
21	896	0.092	0.097	114.7	133.9	0.13	0.13	1.54	1.30	0.288	0.330	0.253
22	184	0.104	0.105	107.4	116.9	0.13	0.14	1.51	1.45	0.350	0.369	0.231
23	5816	0.119	0.142	102.9	135.7	0.10	0.13	1.24	1.30	0.323	0.320	0.327
24	3716	0.133	0.143	115.5	135.8	0.15	0.13	1.87	1.39	0.339	0.392	0.107
25	3718	0.080	0.089	106	134.5	0.12	0.13	1.36	1.42	0.314	0.302	0.366
26	3722	0.076	0.078	100.7	143.9	0.11	0.14	1.28	1.59	0.295	0.279	0.221

#### 4.1.3 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น ซึ่งไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

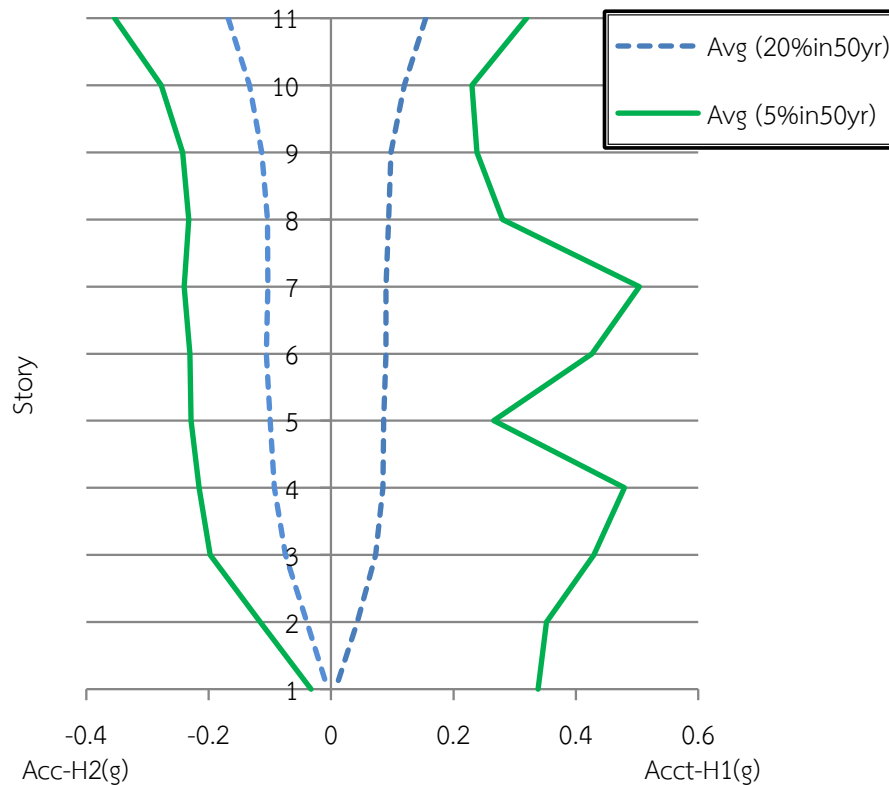
หลังจากทำการวิเคราะห์เพื่อหาผลตอบสนองของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น ซึ่งไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวโดยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นด้วยโปรแกรม Perform-3D จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี จะมีค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุดเท่ากับ 1.42% ที่ตำแหน่งระหว่างชั้น 4 และชั้น 5 ในทิศทาง H1 โดยเกิดจากคลื่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1156) แต่อาคารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปีบางส่วนมีค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงทำให้อาคารเกิดการพังทลายซึ่งมีค่ามากถึง 14.85% เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นในรูปที่ 4.9 พบว่าค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากที่สุดเกิดขึ้นที่ระหว่างชั้น 6 และชั้น 7 สำหรับระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปีและมีค่ามากที่สุดที่ระหว่างชั้น 4 และ 5 ในทิศทาง H1 สำหรับระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี



รูปที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นซึ่งไม่ได้ ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

จากรูปที่ 4.10 แสดงค่าความเร่งในแต่ละชั้นนั้นพบว่ามีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 0.5g ในทิศทาง H1 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี และมีค่าเท่ากับ 0.17g ในทิศทาง H2 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ในส่วนของค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์คงค้างสูงสุดพบว่ามีค่ามากที่สุด

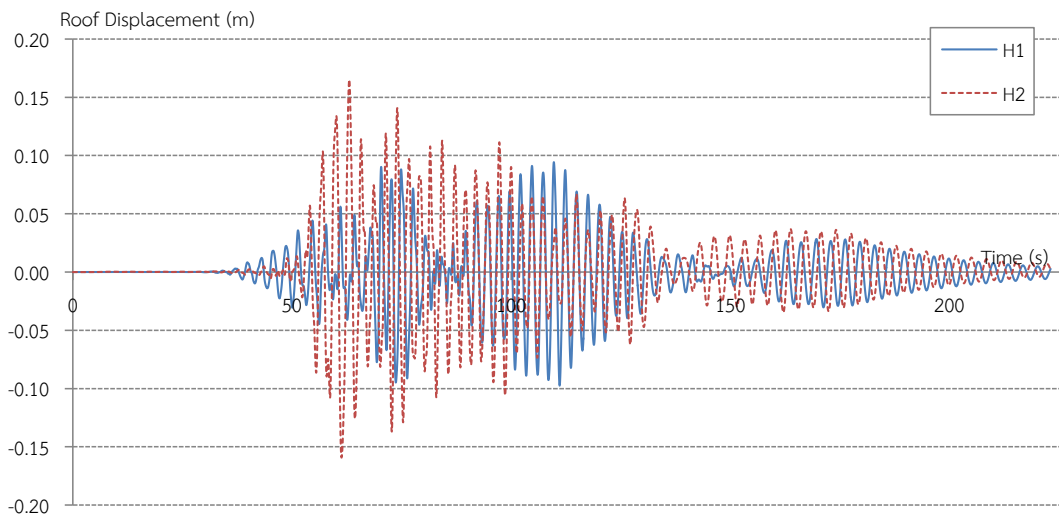
เท่ากับ 0.75% สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี โดยเกิดจากคลื่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1156) ในส่วนของการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์คงค้างสูงสุดของอาคารมีค่าสูงเนื่องจากอาคารตัวอย่างเกิดการวิบัติซึ่งมีค่ามากถึง 14.85%



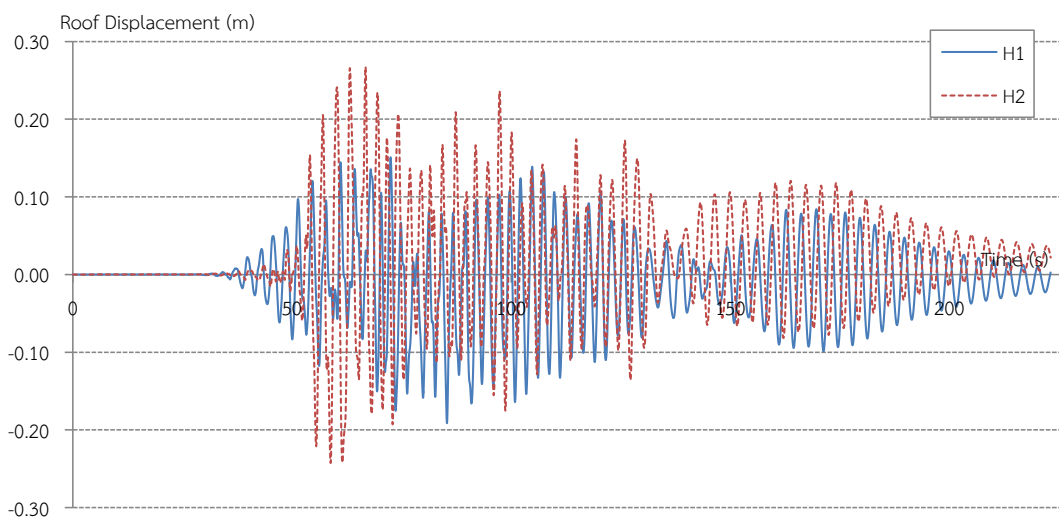
รูปที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยความเร่งในแต่ละชั้นของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นซึ่งไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

รูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงตัวอย่างค่าการเคลื่อนที่ตัวที่ชั้นบนสุดภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1167) เมื่อวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ค่าการเคลื่อนที่ตัวที่ชั้นบนสุดของอาคารหลังจากคลื่นแผ่นดินไหวกระทำนั้นมีแนวโน้มกลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้น แต่สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ค่าการเคลื่อนที่ตัวมีแนวโน้มที่จะไม่กลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้นในแนว H2





รูปที่ 4.11 ค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นหลังคาภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1167) ระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปีของอาคารสูง 10 ชั้นซึ่งไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 4.12 ค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นหลังคาภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1167) ระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปีของอาคารสูง 10 ชั้นซึ่งไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นซึ่งไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวภายใต้แรงกระทำของคลื่นแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี

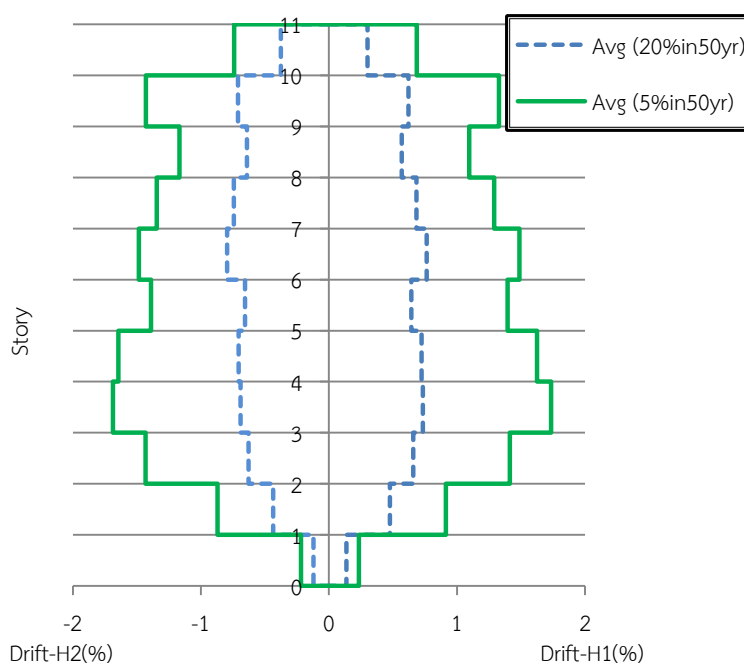
No.	Earthquake No.	Peak Ground Acceleration (g)		Max Base Shear (tons)		Max Roof Displacement (m)		Max story Drift (%)		Max Floor Accerelation (g)		Max. Residual drift(%)
		H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	
1	2060	0.032	0.034	83.8	98	0.15	0.15	0.72	0.66	0.147	0.161	0.050
2	2064	0.031	0.031	84.7	118.6	0.15	0.21	0.77	0.92	0.119	0.164	0.058
3	2065	0.048	0.052	96	147.8	0.19	0.20	1.03	1.06	0.155	0.197	0.396
4	2067	0.024	0.029	78.4	94.6	0.14	0.17	0.69	0.77	0.120	0.107	0.016
5	2070	0.033	0.040	86.6	80.4	0.17	0.13	0.99	0.62	0.197	0.137	0.160
6	2079	0.033	0.036	88.5	129.3	0.20	0.23	1.14	0.99	0.143	0.154	0.208
7	2081	0.042	0.045	86.2	125	0.12	0.22	0.61	1.01	0.167	0.188	0.121
8	2088	0.026	0.038	77.5	118.6	0.14	0.20	0.70	0.93	0.126	0.154	0.041
9	2729	0.031	0.044	85	111	0.15	0.21	0.72	0.93	0.152	0.144	0.046
10	1156	0.038	0.043	100	109.1	0.23	0.17	1.42	0.73	0.199	0.126	0.754
11	1167	0.027	0.034	74.5	118	0.10	0.17	0.47	0.81	0.109	0.139	0.035
12	1765	0.050	0.057	78.6	83.2	0.13	0.13	0.65	0.79	0.201	0.189	0.014
13	1781	0.049	0.051	91.1	125	0.17	0.23	0.80	1.00	0.173	0.166	0.166
14	833	0.025	0.033	49.4	111.3	0.07	0.14	0.33	0.66	0.101	0.135	0.000
15	844	0.060	0.074	96	107	0.14	0.21	0.77	1.15	0.185	0.306	0.100
16	849	0.037	0.042	77.3	64	0.11	0.10	0.52	0.51	0.120	0.146	0.029
17	856	0.034	0.049	63.4	96.2	0.08	0.16	0.46	0.73	0.134	0.172	0.000
18	861	0.049	0.050	86.3	100	0.14	0.15	0.81	0.74	0.211	0.181	0.128
19	873	0.032	0.037	88.3	72	0.11	0.10	0.70	0.68	0.153	0.195	0.175
20	878	0.030	0.033	78.5	99.6	0.15	0.14	0.70	0.65	0.140	0.127	0.129
21	896	0.033	0.035	77.8	83	0.13	0.11	0.60	0.58	0.126	0.139	0.010
22	184	0.063	0.064	97	107	0.15	0.15	1.01	0.81	0.201	0.225	0.122
23	5816	0.066	0.078	90	107.4	0.15	0.16	0.81	0.84	0.157	0.253	0.047
24	3716	0.059	0.064	81.3	82	0.11	0.09	0.65	0.71	0.182	0.190	0.008
25	3718	0.043	0.047	84.7	92.7	0.13	0.15	0.64	0.69	0.193	0.156	0.024
26	3722	0.034	0.035	48.1	78.1	0.07	0.14	0.33	0.71	0.102	0.125	0.000

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นซึ่งไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวภายใต้แรงกระทำของคลื่นแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี

No.	Earthquake No.	Peak Ground Acceleration (g)		Max Base Shear (tons)		Max Roof Displacement (m)		Max story Drift (%)		Max Floor Accerelation (g)		Max. Residual drift(%)
		H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	
1	2060	0.087	0.092	111.7	165	0.35	0.26	2.12	1.41	0.252	0.356	0.475
2	2064	0.084	0.085	127	166.7	2.78	0.35	6.90	2.49	1.639	0.278	6.900
3	2065	0.130	0.141	450	188.5	3.61	0.41	10.45	2.08	2.066	0.473	10.450
4	2067	0.063	0.075	100	160	0.25	0.33	1.88	1.91	0.203	0.223	0.340
5	2070	0.090	0.107	448.9	155.6	3.06	0.30	14.85	0.66	2.300	0.311	14.850
6	2079	0.088	0.097	113.8	175	0.31	0.38	2.10	2.21	0.264	0.275	0.850
7	2081	0.114	0.123	136.2	175.5	0.30	0.41	1.88	2.61	0.323	0.377	0.810
8	2088	0.068	0.097	106	180	0.20	0.30	1.58	1.57	0.235	0.271	0.125
9	2729	0.085	0.119	385.2	153	3.07	0.28	9.91	1.52	1.855	0.409	9.910
10	1156	0.104	0.117	427.5	194.9	3.42	0.36	11.24	0.88	2.344	0.307	11.240
11	1167	0.075	0.092	100	184.5	0.19	0.27	1.17	1.49	0.274	0.312	0.260
12	1765	0.137	0.158	134.5	178.1	0.22	0.25	1.58	1.86	0.443	0.391	0.800
13	1781	0.132	0.136	128.2	178.1	0.27	0.32	1.39	1.98	0.336	0.316	0.510
14	833	0.064	0.087	104.1	172.1	0.17	0.27	0.90	1.67	0.262	0.293	0.244
15	844	0.157	0.194	141.1	169.5	0.34	0.32	1.89	1.81	0.450	0.486	0.886
16	849	0.099	0.111	106.5	130.1	0.23	0.23	1.40	1.17	0.313	0.291	0.688
17	856	0.092	0.133	111.7	185.7	0.20	0.37	1.05	2.53	0.300	0.370	0.930
18	861	0.133	0.136	115.1	160	0.17	0.30	1.30	1.65	0.417	0.411	0.190
19	873	0.084	0.099	120	151.4	0.27	0.22	1.69	1.70	0.281	0.439	0.744
20	878	0.079	0.085	104.1	165	0.22	0.26	1.31	1.64	0.256	0.296	0.590
21	896	0.090	0.095	94.7	170.1	0.25	0.26	1.67	1.35	0.240	0.351	0.700
22	184	0.164	0.165	404.4	183	3.27	0.31	10.80	2.34	1.863	0.449	10.800
23	5816	0.175	0.209	127	164.1	0.20	0.26	1.38	1.38	0.331	0.497	0.265
24	3716	0.157	0.168	118.6	163	0.23	0.21	1.69	1.53	0.326	0.470	0.720
25	3718	0.113	0.126	133.1	155.3	0.21	0.32	1.26	2.23	0.310	0.404	0.708
26	3722	0.093	0.095	94.5	142.2	0.17	0.29	0.90	1.63	0.281	0.258	0.406

#### 4.1.4 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นซึ่งมีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

หลังจากทำการวิเคราะห์เพื่อหาผลตอบสนองของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น ซึ่งได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวโดยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นด้วยโปรแกรม Perform-3D จากตารางที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 1.3% ที่ตำแหน่งระหว่างชั้น 3 และชั้น 4 ในทิศทาง H1 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี โดยเกิดจากคลื่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1156) และมีค่าเท่ากับ 3.3% ที่ตำแหน่งระหว่างชั้น 4 และ 5 ในทิศทาง H1 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี โดยเกิดจากคลื่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1156)เช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นในรูปที่ 4.13 พบว่าค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์มากที่สุดเกิดขึ้นที่ระหว่างชั้น 6 และชั้น 7 สำหรับระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี และมีค่ามากที่สุดที่ระหว่างชั้น 3 และ 4 สำหรับระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี

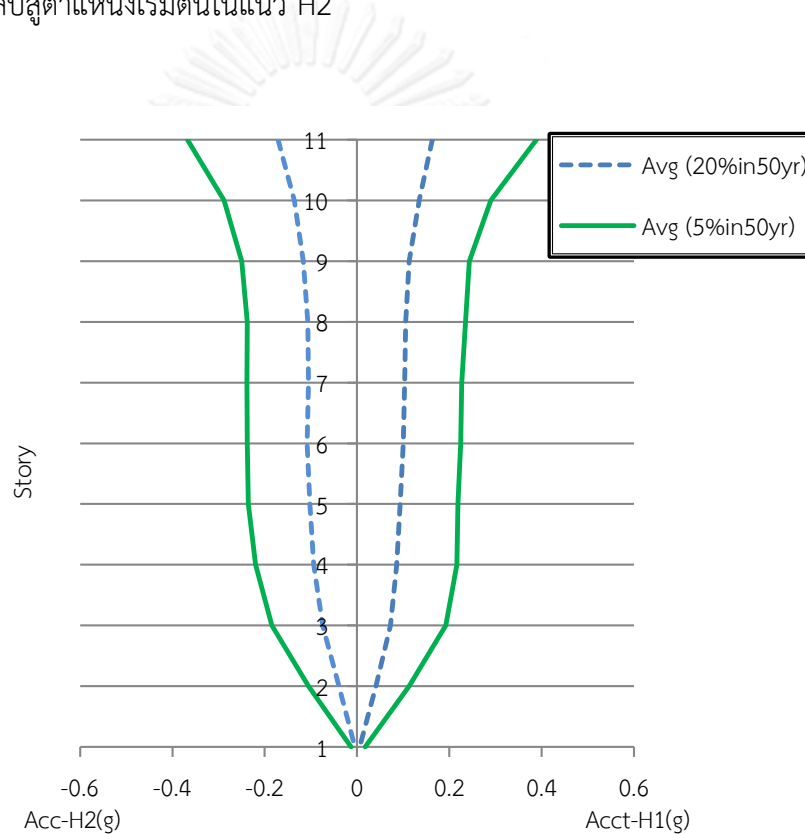


รูปที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นซึ่งมีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

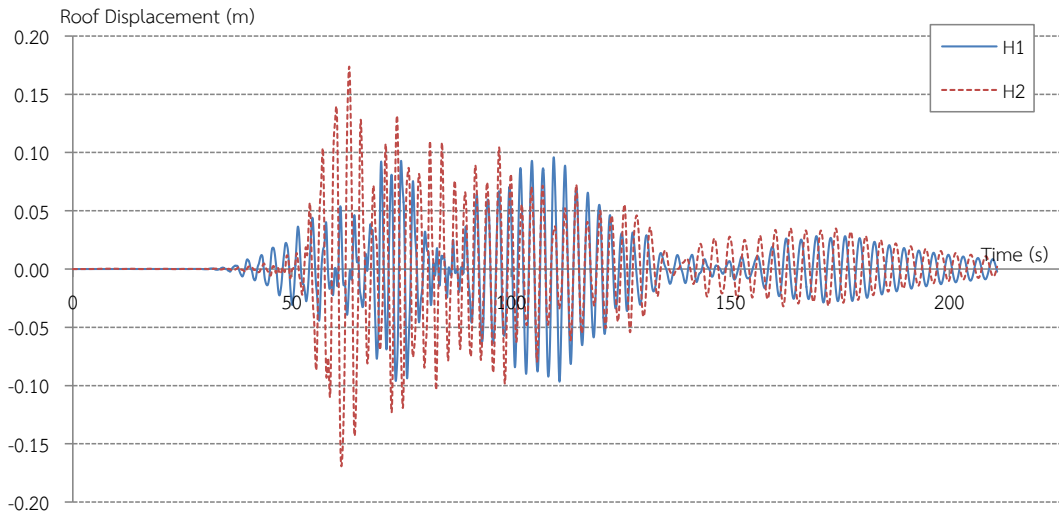
จากรูปที่ 4.14 แสดงค่าความเร่งในแต่ละชั้นนั้นพบว่ามีความสูงที่สุดที่ชั้นหลังคา โดยมีค่าเท่ากับ 0.17g ในทิศทาง H2 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปีและมีค่าเท่ากับ 0.38g ในทิศทาง H1 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ในส่วนของค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์คงค้างพบว่ามีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.16% สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มี

โอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปีซึ่งเกิดจากคลื่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1156) และมีค่าเท่ากับ 1.3% สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปีซึ่งเกิดจากคลื่นเหตุการณ์แผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1156) เช่นเดียวกัน

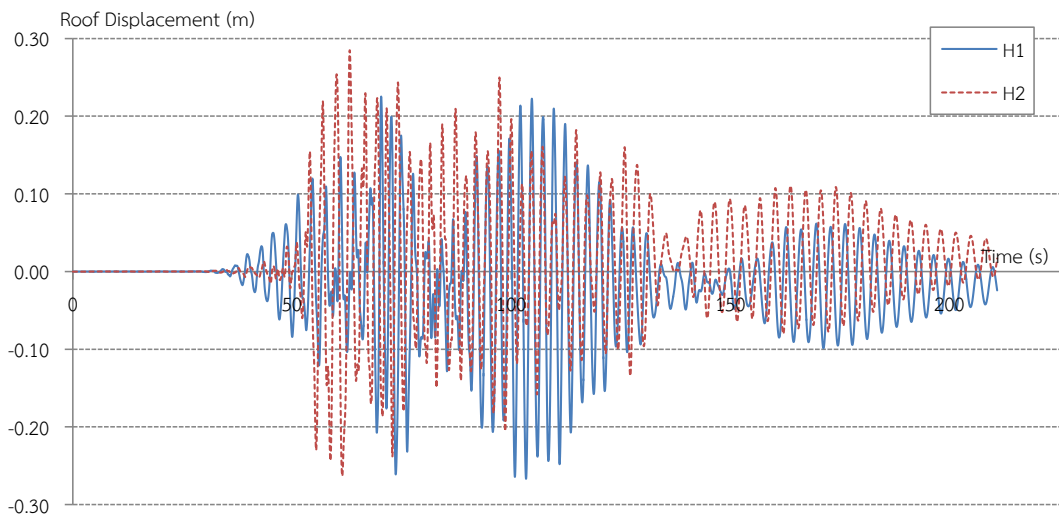
รูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงตัวอย่างค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นบนสุดภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1167) เมื่อวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นบนสุดของอาคารหลังจากคลื่นแผ่นดินไหวกระทำนั้นมีแนวโน้มกลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้น แต่สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ค่าการเคลื่อนตัวมีแนวโน้มที่จะไม่กลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้นในแนว H2



รูปที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยความเร่งในแต่ละชั้นของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นซึ่งมีการออกแบบปรับแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 4.15 ค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นหลังคาภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1167) ระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปีของอาคารสูง 10 ชั้นซึ่งออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 4.16 ค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นหลังคาภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1167) ระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปีของอาคารสูง 10 ชั้นซึ่งออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นซึ่งออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวภายใต้แรงกระทำของคลื่นแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี

No.	Earthquake No.	Peak Ground Acceleration (g)		Max Base Shear (tons)		Max Roof Displacement (m)		Max story Drift (%)		Max Floor Accerelation (g)		Max. Residual drift(%)
		H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	
1	2060	0.032	0.034	147	98	0.23	0.15	1.02	0.65	0.149	0.162	0.023
2	2064	0.031	0.031	140.3	114.3	0.22	0.18	0.94	0.82	0.123	0.107	0.030
3	2065	0.048	0.052	153.1	155.6	0.24	0.24	1.05	1.07	0.176	0.209	0.035
4	2067	0.024	0.029	99	102.7	0.15	0.18	0.66	0.80	0.094	0.107	0.000
5	2070	0.033	0.040	157.7	90	0.25	0.15	1.19	0.69	0.199	0.132	0.090
6	2079	0.033	0.036	139.6	143.7	0.23	0.26	1.05	1.16	0.163	0.188	0.085
7	2081	0.042	0.045	109.1	130	0.17	0.24	0.77	1.13	0.164	0.178	0.035
8	2088	0.026	0.038	100	129	0.13	0.23	0.62	1.04	0.164	0.154	0.000
9	2729	0.031	0.044	139.3	126.9	0.24	0.23	1.04	1.03	0.148	0.144	0.000
10	1156	0.038	0.043	158.3	114.7	0.28	0.17	1.29	0.74	0.249	0.127	0.160
11	1167	0.027	0.034	78.6	134.4	0.10	0.17	0.48	0.86	0.111	0.162	0.028
12	1765	0.050	0.057	106.1	86	0.15	0.13	0.72	0.79	0.204	0.190	0.000
13	1781	0.049	0.051	152.6	136.4	0.21	0.24	1.00	1.06	0.174	0.171	0.100
14	833	0.025	0.033	50	114.7	0.08	0.15	0.33	0.67	0.102	0.153	0.000
15	844	0.060	0.074	119	117.3	0.17	0.23	0.83	1.25	0.191	0.335	0.024
16	849	0.037	0.042	84.8	64.7	0.11	0.10	0.52	0.53	0.120	0.149	0.000
17	856	0.034	0.049	61.3	95.3	0.07	0.16	0.44	0.72	0.130	0.175	0.000
18	861	0.049	0.050	97.2	106.5	0.15	0.16	0.78	0.76	0.210	0.181	0.000
19	873	0.032	0.037	109.1	70.9	0.11	0.10	0.63	0.67	0.157	0.188	0.006
20	878	0.030	0.033	88.6	103.5	0.17	0.14	0.77	0.65	0.152	0.134	0.000
21	896	0.033	0.035	87.5	83	0.14	0.11	0.65	0.58	0.129	0.141	0.000
22	184	0.063	0.064	158.1	114.1	0.23	0.16	1.02	0.83	0.227	0.237	0.008
23	5816	0.066	0.078	152.6	120.7	0.23	0.17	1.17	0.90	0.218	0.252	0.110
24	3716	0.059	0.064	90	83.8	0.11	0.09	0.68	0.72	0.189	0.184	0.003
25	3718	0.043	0.047	107.9	98.1	0.13	0.15	0.65	0.70	0.195	0.158	0.080
26	3722	0.034	0.035	47	78.4	0.07	0.14	0.32	0.70	0.100	0.128	0.000

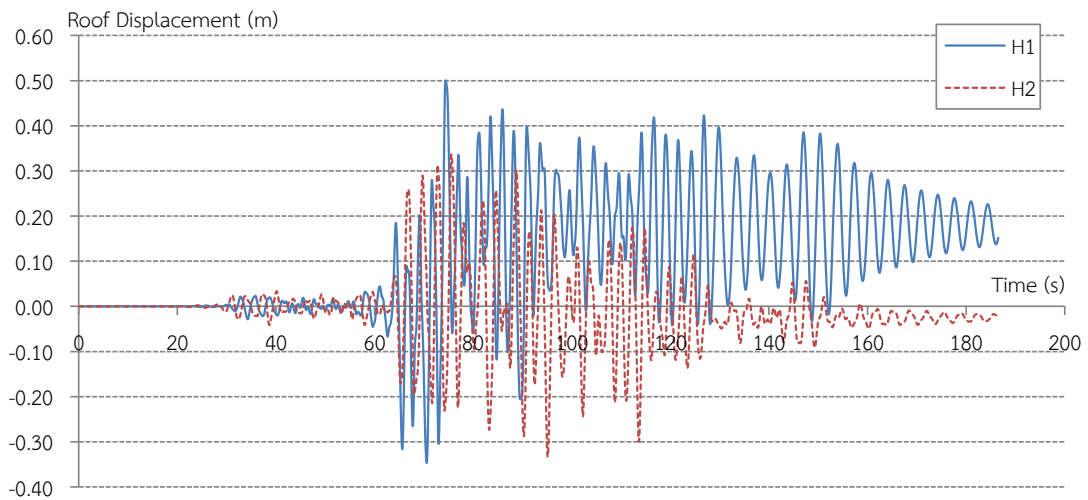
ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวภายใต้แรงกระทำของคลื่นแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดเกิน 5% ใน 50 ปี

No.	Eearthquake No.	Peak Ground Acceleration (g)		Max Base Shear (tons)		Max Roof Displacement (m)		Max story Drift (%)		Max Floor Accerelation (g)		Max. Residual drift(%)
		H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H2	
1	2060	0.087	0.092	179.5	180.6	0.36	0.29	1.78	1.40	0.395	0.356	0.220
2	2064	0.084	0.085	194	175.8	0.36	0.38	2.25	2.06	0.295	0.261	0.316
3	2065	0.130	0.141	210.5	210.5	0.39	0.47	2.50	2.93	0.404	0.491	1.240
4	2067	0.063	0.075	175.4	174.6	0.30	0.36	1.53	2.02	0.233	0.242	0.630
5	2070	0.090	0.107	218.6	167.3	0.37	0.35	2.40	1.80	0.418	0.322	0.365
6	2079	0.088	0.097	184.3	175	0.42	0.38	2.82	2.04	0.337	0.302	0.490
7	2081	0.114	0.123	200	193	0.32	0.41	1.74	2.43	0.428	0.384	0.340
8	2088	0.068	0.097	178.1	191.9	0.32	0.36	1.69	1.79	0.419	0.304	0.310
9	2729	0.085	0.119	176.8	160.7	0.34	0.34	1.95	1.73	0.351	0.320	0.110
10	1156	0.104	0.117	220	209.5	0.50	0.34	3.30	1.95	0.478	0.295	1.300
11	1167	0.075	0.092	157.4	190.9	0.27	0.28	1.48	1.54	0.292	0.311	0.200
12	1765	0.137	0.158	185.8	193.6	0.34	0.28	1.80	2.03	0.552	0.417	0.500
13	1781	0.132	0.136	192.3	193.7	0.38	0.34	1.82	1.98	0.427	0.327	0.500
14	833	0.064	0.087	131	184.3	0.20	0.27	0.86	1.62	0.269	0.318	0.167
15	844	0.157	0.194	205.2	177.4	0.32	0.35	1.74	1.97	0.494	0.519	0.470
16	849	0.099	0.111	164.9	140.8	0.30	0.23	1.64	1.19	0.320	0.325	0.500
17	856	0.092	0.133	161.7	205.5	0.20	0.36	1.22	2.43	0.348	0.397	0.481
18	861	0.133	0.136	190.5	175	0.33	0.31	1.69	1.68	0.541	0.414	0.125
19	873	0.084	0.099	186.8	155.4	0.28	0.22	1.59	1.86	0.364	0.431	0.400
20	878	0.079	0.085	176.8	180	0.33	0.28	1.72	1.64	0.324	0.291	0.457
21	896	0.090	0.095	161.9	178.1	0.34	0.29	1.60	1.41	0.323	0.366	0.400
22	184	0.164	0.165	200	198.9	0.36	0.35	2.54	2.23	0.497	0.460	0.500
23	5816	0.175	0.209	204	180	0.32	0.29	1.87	1.46	0.386	0.513	0.100
24	3716	0.157	0.168	173.6	178.7	0.26	0.21	1.57	1.69	0.446	0.462	0.290
25	3718	0.113	0.126	179.4	156.5	0.33	0.32	1.62	2.11	0.493	0.412	0.550
26	3722	0.093	0.095	129.3	155	0.18	0.30	0.87	1.60	0.274	0.307	0.350

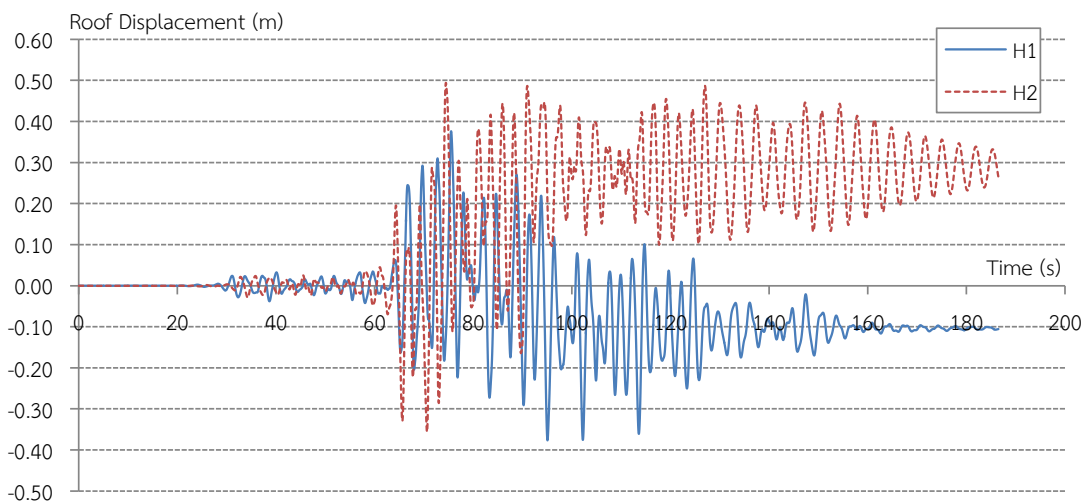
ผลการวิเคราะห์ของอาคารตัวอย่างทั้ง 4 อาคารแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งแม้ว่าจะเลือกองค์ประกอบในแนวราบของคลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่าความเร่งที่ผิวดินสูงสุด (peak ground acceleration, PGA) กระทำกับแกนอ่อนของอาคาร (H2) แต่ยังคงพบว่าผลตอบสนองของอาคารตัวอย่างบางส่วนมีค่าสูงสุดในทิศทางแกนแข็ง (H1) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ทั้งที่มีค่าความเร่งที่ผิวดินสูงสุดต่ำกว่าและเมื่อพิจารณาให้องค์ประกอบในแนวราบของคลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่าความเร่งที่ผิวดินสูงสุดกระทำกับแกนแข็งของอาคาร (H1) ดังรูปที่ 4.18 จะพบว่าผลตอบสนองของ



อาคารด้าน H2 มีค่ามากกว่าด้าน H1 ทั้งนี้เนื่องมาจากแรงที่กระทำกับอาคารที่เกิดขึ้นจริงนั้น หากพิจารณาจากค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมจะมีค่าถูกต้องมากกว่าการพิจารณาจากค่าความเร่งที่ผิวดินสูงสุด แต่เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์และในความเป็นจริงการที่จะทราบว่าองค์ประกอบในแนวราบของแผ่นดินไหวด้านใดจะกระทำกับตัวอาคารนั้นเป็นสิ่งที่ไม่สามารถคาดเดาได้ ดังนั้นจึงได้เลือกวิธีการดังกล่าวในการพิจารณาองค์ประกอบของคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำกับอาคารตัวอย่าง



รูปที่ 4.17 ค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นหลังคาภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1156) ระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปีของอาคารสูง 10 ชั้นออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวเลือกองค์ประกอบในแนวราบของคลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่าความเร่งที่ผิวดินสูงสุดกระทำกับแกนอ่อน (H2)



รูปที่ 4.18 ค่าการเคลื่อนตัวที่ชั้นหลังคาภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (#NGA 1156) ระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปีของอาคารสูง 10 ชั้นออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวเลือกองค์ประกอบในแนวราบของคลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่าความเร่งที่ผิวดินสูงสุดกระทำกับแกนแข็ง (H1)

## 4.2 การวิเคราะห์หาความเสียหาย

ในงานวิจัยนี้ความเสียหายและค่าซ่อมแซมของอาคารนั้นจะใช้โปรแกรม PACT ในการวิเคราะห์ โดยโปรแกรม PACT นั้นเป็นส่วนหนึ่งของโครงการจัดทำรายงาน FEMA P-58 โดยใช้ผลตอบสนองที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Non-linear dynamic procedure) จากโปรแกรม Perform-3D ในส่วนของวิธีการวิเคราะห์ความเสียหายนั้นจะใช้วิธีวิเคราะห์ตามระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว (intensity-based assessment) ซึ่งเป็นวิธีการประเมินสมรรถนะของอาคารโดยสมมติว่าอาคารถูกกระทำด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่ระบุ อย่างไรก็ตามในโปรแกรม PACT นั้นจะใช้ค่าเงินของประเทศสหรัฐอเมริกาตั้งนั้นในการวิเคราะห์ประเมินความเสียหายจึงต้องมีการเปลี่ยนอัตราค่าเงิน โดยจะใช้อัตราแลกเปลี่ยนเงิน 1 ดอลลาร์สหรัฐ เท่ากับ 32 บาท

### 4.2.1 ข้อมูลราคาและลักษณะทางกายภาพของอาคารตัวอย่าง

การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม PACT นอกจากผลตอบสนองของอาคารนั้น ข้อมูลที่สำคัญมากสำหรับการสร้างแบบจำลองนั้นคือราคาค่าก่อสร้างและค่าร้อยละย้ายของอาคาร แต่เนื่องจากโปรแกรม PACT นั้นจะใช้ฐานข้อมูลราคาค่าซ่อมแซมชิ้นส่วนต่างๆจากราคาค่าแรงและค่าวัสดุของพื้นที่แคลิฟอร์เนียตอนเหนือ (Northern California) ในปี ค.ศ.2011 ดังนั้นในการที่จะใช้โปรแกรมดังกล่าวในการคำนวณราคาในไทยจึงจำเป็นที่จะต้องปรับค่าอัตราส่วนราคาให้เหมาะสมกับประเทศไทยเพื่อให้ผลประเมินมูลค่าของความเสียหายที่ได้มีค่าใกล้เคียงความจริง แต่อย่างไรก็ตามการที่จะทราบสัดส่วนในการเปรียบเทียบราคานั้น จะใช้วิธีการนำข้อมูลราคาในการก่อสร้างอาคารของเมืองซานฟรานซิสโกซึ่งเป็นเมืองในพื้นที่รัฐแคลิฟอร์เนียตอนเหนือกับราคาค่าก่อสร้างอาคารในประเทศไทยซึ่งเป็นราคาประเมินค่าก่อสร้างอาคารใน พ.ศ.2556 กำหนดโดยสมาคมผู้ประเมินค่าทรัพย์สินแห่งประเทศไทย ซึ่งตารางที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าราคาค่าก่อสร้างอาคารพักอาศัยสูง 4 ชั้นมีค่าเท่ากับ 206.39 ดอลลาร์ สหรัฐต่อตารางฟุต หรือประมาณ 73,000 บาทต่อตารางเมตร และในตารางที่ 4.10 แสดงราคาค่าก่อสร้างอาคารพักอาศัยสูง 10 ชั้นมีค่าเท่ากับ 261.94 ดอลลาร์ สหรัฐต่อตารางฟุต หรือประมาณ 93,000 บาทต่อตารางเมตร ในส่วนของราคาค่าก่อสร้างอาคารในเขตกรุงเทพมหานครซึ่งแสดงในตารางที่ 4.11 พบว่าราคาค่าก่อสร้างอาคารพักอาศัยสูง 4 ชั้น และ 10 ชั้นเท่ากับ 13,120 บาทต่อตารางเมตรและ 17,130 บาทต่อตารางเมตร ตามลำดับ เนื่องจากราคาค่าก่อสร้างในประเทศไทยเป็นราคาค่าก่อสร้างอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ดังนั้นเพื่อให้การเปรียบเทียบราคามีความถูกต้องจึงต้องทำการเพิ่มราคาค่าก่อสร้าง โดยในงานวิจัยนี้สมมติให้ราคาค่าก่อสร้างอาคารที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวมีค่ามากกว่าราคาค่าก่อสร้างอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว 15% ซึ่งอัตราส่วนค่าปรับแก้ราคาค่าก่อสร้างอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นและ 10 ชั้นแสดงในตารางที่ 4.12

อย่างไรก็ตามแม้ว่าในการใช้โปรแกรม PACT นั้นจะมีความไม่สะดวกในเรื่องของราคาที่แตกต่างกันระหว่างพื้นที่ของอาคารตัวอย่างและเวลาที่ทำการประเมินสมรรถนะของตัวอย่าง ผู้พัฒนาโปรแกรมก็ได้มีการจัดทำฟังก์ชันขึ้นมารองรับให้ผู้ใช้สามารถใส่ข้อมูลในส่วนของค่าปรับแก้ราคาค่าซ่อมแซมวัสดุไว้แล้ว เช่นเดียวกันค่าร้อยละย้ายอาคารจะนำราคาค่าร้อยละย้ายของอาคารในเมือง

ซานฟรานซิสโกดังที่แสดงในรูปที่ 4.19 และ 4.20 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.16 ดอลลาร์ สหรัฐต่อตารางฟุต หรือ 410 บาทต่อตารางเมตร สำหรับอาคารพักอาศัยสูง 4 ชั้นและมีค่าเท่ากับ 1.47 ดอลลาร์สหรัฐต่อตารางฟุตหรือประมาณ 520 บาทต่อตารางเมตรสำหรับอาคารพักอาศัยสูง 10 ชั้นมาคูณด้วยค่าปรับแก้ราคาเพื่อให้เป็นราคารื้อย้ายอาคารสำหรับประเทศไทย โดยตารางที่ 4.13 แสดงรายละเอียดของค่าประมาณการราคาก่อสร้างและค่ารื้อย้ายของอาคารตัวอย่าง

สำหรับข้อมูลทางกายภาพของอาคารนั้น โปรแกรม PACT กำหนดให้ผู้ใช้ต้องระบุจำนวนชั้นซึ่งมีทั้ง 4 ชั้นและ 10 ชั้น พื้นที่ใช้สอยและความสูงในแต่ละชั้นซึ่งเท่ากับ 240 ตารางเมตรและ 3 เมตรตามลำดับสำหรับทุกอาคารตัวอย่าง โดยการใส่ข้อมูลราคาและลักษณะทางกายภาพของอาคารตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 4.21 และ 4.22 การใส่ข้อมูลในส่วนนี้ของโปรแกรมยังมีค่าตัวแปรที่ไม่ได้ระบุถึงแต่มีความสำคัญอย่างมากในการประเมินความเสียหายของอาคารนั้นคือค่าเกณฑ์ความเสียหายสิ้นเชิง (total loss threshold) ซึ่งระบุเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างความเสียหายของอาคารกับค่ารื้อย้ายอาคารและสร้างใหม่ (total replacement cost) กล่าวคือหากค่าความเสียหายมีค่าเกินกว่าค่าอัตราส่วนที่ระบุ ผลการประเมินจะพิจารณาใช้ค่ารื้อย้ายอาคารและสร้างใหม่แทนค่าความเสียหายดังกล่าว โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1

ตารางที่ 4.9 ราคาค่าก่อสร้างอาคารอยู่อาศัยสูง 4 ชั้นในเมืองซานฟรานซิสโก ทางตอนเหนือของรัฐแคลิฟอร์เนีย (reedconstructiondata, 2013 : online)

Cost Estimate (Union Labor)	% of Total	Cost Per SF
Total		\$154.31
Contractor Fees (GC,Overhead,Profit)	25%	\$38.58
Architectural Fees	7%	\$13.50
<b>Total Building Cost</b>		<b>\$206.39</b>

ตารางที่ 4.10 ราคาค่าก่อสร้างอาคารอยู่อาศัยสูง 10 ชั้นในเมืองซานฟรานซิสโก ทางตอนเหนือของรัฐแคลิฟอร์เนีย (reedconstructiondata, 2013 : online)

Cost Estimate (Union Labor)	% of Total	Cost Per SF
Total		\$197.69
Contractor Fees (GC,Overhead,Profit)	25%	\$49.42
Architectural Fees	6%	\$14.83
<b>Total Building Cost</b>		<b>\$261.94</b>

ตารางที่ 4.11 ราคาค่าก่อสร้างอาคารอยู่อาศัยสูง 4 ชั้นและ 10 ชั้นในประเทศไทย (สมาคมผู้ประเมินค่าทรัพย์สินแห่งประเทศไทย, 2556)

รายการประเภททรัพย์สินที่กำหนด ราคามาตรฐาน	ราคาที่ใช้ในปี 2556 (บาท / ตารางเมตร)
อาคารพักอาศัยไม่เกิน 5 ชั้น	13,120
อาคารพักอาศัย 6-15 ชั้น	17,130

Type of Building	Apartment 4-7 Story	
Project Location	California-San Francisco	
Type of Work	Demolition	
Cost Index	Median	
Square Feet	<input type="text" value="1.00"/>	
Subtotal		<b>1.00</b>
Overhead	<input type="text" value="10.00%"/>	0.10
Profit	<input type="text" value="5.00%"/>	0.05
Bonding	<input type="text" value="1.00%"/>	0.01
Total Budget		<b>1.16</b>
Per Square Foot		<b>1.16</b>

รูปที่ 4.19 ราคาซื้อขายอาคารที่พักอาคารสูง 4-7 ชั้นในเมืองซานฟรานซิสโก (buildingjournal, 2014 : online)

Type of Building	Apartment 8-24 Story	
Project Location	California-San Francisco	
Type of Work	Demolition	
Cost Index	Median	
Square Feet	<input type="text" value="1.00"/>	
Subtotal		<b>1.27</b>
Overhead	<input type="text" value="10.00%"/>	0.13
Profit	<input type="text" value="5.00%"/>	0.06
Bonding	<input type="text" value="1.00%"/>	0.01
Total Budget		<b>1.47</b>
Per Square Foot		<b>1.47</b>

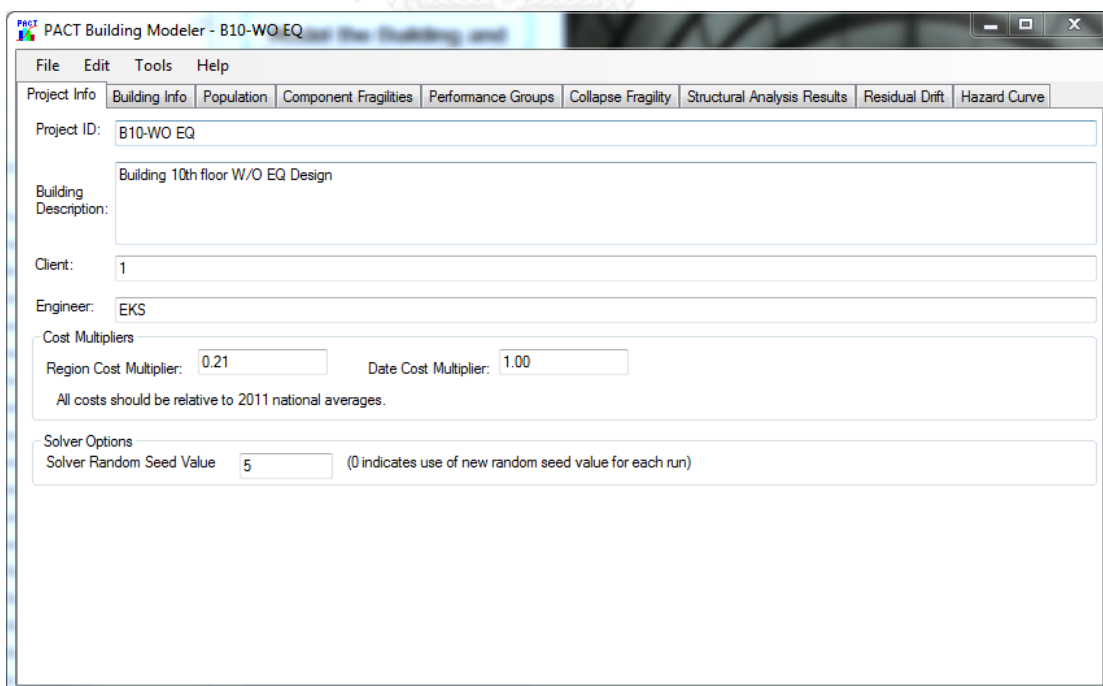
รูปที่ 4.20 ราคาซื้อขายอาคารที่พักอาคารสูง 8-24 ชั้นในเมืองซานฟรานซิสโก (buildingjournal, 2014 : online)

ตารางที่ 4.12 ค่าปรับแก้ราคาของอาคารตัวอย่าง

อาคารตัวอย่าง	ค่าปรับแก้ราคา
อาคารพักอาศัยสูง 4 ชั้น	0.209
อาคารพักอาศัยสูง 10 ชั้น	0.212

ตารางที่ 4.13 ค่าประมาณการราคาก่อสร้างและค่ารั้อย้ายอาคารตัวอย่าง

	อาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้น		อาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น	
	ไม่ออกแบปรับ แผ่นดินไหว	ออกแบปรับ แผ่นดินไหว	ไม่ออกแบปรับ แผ่นดินไหว	ออกแบปรับ แผ่นดินไหว
ค่าก่อสร้างอาคาร (฿)	12,597,000	14,487,000	41,107,000	47,277,000
ค่ารั้อย้ายอาคาร(฿)	83,000	83,000	263,000	263,000
ค่าก่อสร้างและค่ารั้อย้าย(฿)	12,680,000	14,570,000	41,370,000	47,540,000



รูปที่ 4.21 การใส่ค่าปรับแก้ราคาในโปรแกรม PACT

The screenshot shows the PACT Building Modeler - B10-WO EQ interface. The 'Number of Stories' is set to 10. The 'Total Replacement Cost (\$)' is 1,295,704. The 'Replacement Time (days)' is 550.00. The 'Total Loss Threshold (As Ratio of Total Replacement Cost)' is 1. The 'Core and Shell Replacement Cost (\$)' is 50,000. The 'Max Workers per sq. m.' is 9.290304000000002E. The 'Most Typical Defaults' section shows 'Floor Area (sq. m.): 240.00' and 'Story Height (m.): 3.00'.

Floor Num	Floor Name	Story Height (m.)	Area (sq. m.)	Height Factor	Hazmat Factor	Occupancy Factor
1	Floor 1	3.00	240.00	1	1	1
2	Floor 2	3.00	240.00	1	1	1
3	Floor 3	3.00	240.00	1	1	1
4	Floor 4	3.00	240.00	1	1	1
5	Floor 5	3.00	240.00	1	1	1
6	Floor 6	3.00	240.00	1	1	1
7	Floor 7	3.00	240.00	1	1	1
8	Floor 8	3.00	240.00	1	1	1
9	Floor 9	3.00	240.00	1	1	1
10	Floor 10	3.00	240.00	1	1	1
11	Roof	3.00	240.00	1	1	1

รูปที่ 4.22 การใส่ข้อมูลทางกายภาพของอาคารในโปรแกรม PACT

#### 4.2.2 กลุ่มสมรรถนะ (Performance Group)

ในกลุ่มสมรรถนะนั้นจะประกอบไปด้วยฟังก์ชันความบอบบางของชิ้นส่วนในแต่ละชั้น และในแต่ละชั้นนั้นยังแบ่งออกเป็น 2 ทิศทางในแนวราบและฟังก์ชันแบบไร้ทิศทาง (non-directional) อีกด้วย ซึ่งในการเลือกใช้ฟังก์ชันความบอบบางในแต่ละชั้นส่วนนั้นต้องทำการเลือกให้เหมาะสมตามชนิดของโครงสร้างที่จะทำการประเมินและข้อกำหนดที่ระบุใน FEMA P-58 โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ฟังก์ชันความบอบบางทั้งหมด 3 ชั้นส่วนได้แก่รอยต่อระหว่างคาน-เสา กำแพงอิฐมวลเบาและฝ้าเพดาน

การเลือกชนิดฟังก์ชันความบอบบางของรอยต่อระหว่างคาน-เสาของแบบจำลองนั้นต้องพิจารณาก่อนว่าอาคารดังกล่าวถูกออกแบบมาด้วยระบบอะไร ซึ่งในงานวิจัยนี้อาคารตัวอย่างได้ถูกออกแบบระบบโครงสร้าง 2 ระบบได้แก่ โครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวจำกัด (intermediate reinforced concrete moment resisting frame, IMF) สำหรับอาคารที่ออกแบบให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบธรรมดา (ordinary reinforced concrete Moment Resisting Frame, OMF) สำหรับอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว จากตารางที่ 4.14 อาคารระบบโครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวจำกัดนั้นจะมีฟังก์ชันความบอบบางระบุไว้เพียงชนิดเดียว ในส่วนของอาคารระบบโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบธรรมดานั้นจะมีการจำแนกออกไปตามโหมดการวิบัติ นอกจากนี้ฟังก์ชันของชิ้นส่วนรอยต่อยังมีการจำแนกตามขนาดของคาน แต่เนื่องจากในฐานข้อมูลนั้นไม่มีขนาดของคานที่ตรงกับอาคารตัวอย่าง จึงเลือกใช้ขนาดที่มีความใกล้เคียงมากที่สุดคือ 24x24 นิ้ว

ตารางที่ 4.14 กลุ่มฟังก์ชันความแบบบางของรอยต่อคาน-เสา (FEMA P-58, 2012)

Material/System	Construction Design Characteristics	Damage Mode, Design Configuration	Condition/Note
Reinforced Concrete Moment Frame	ACI 318 Intermediate Moment Frame (IMF)	Beam or column shear	Joint shear damage
	ACI 318 Ordinary Moment Frame (OMF)	Beam yield, weak joints	$\sum M_c/M_b > 1.2$ $P_u(col) < 0.6f'_cA_g$
		Column yield Joint shear yield	$\sum M_c/M_b < 0.8$ Beam, Col; $V_n > V_e$
		Beam yield (Flexure or shear) Weak joints	Beam; $V_n < V_e$
		Column yield (strong joints)	$P_u(col) < 0.6f'_cA_g$ Col; $V_n < V_e$
		Weak column with high axial load (strong joints)	$P_u(col) > 0.6f'_cA_g$ Col; $V_n < V_e$

สำหรับฟังก์ชันความบอบบางของชิ้นส่วนของชิ้นส่วนอื่นๆ ได้แก่ กำแพงอิฐมวลเบาและฝ้าเพดาน จะใช้รูปแบบเดียวกันแม้ว่าระบบของโครงสร้างอาคารจะแตกต่างกัน เนื่องจากในประเทศไทยนั้น ชิ้นส่วนดังกล่าวไม่ได้มีการค้ำึงถึงผลของแผ่นดินไหว โดยกำแพงอิฐมวลเบานั้นจะใช้รูปแบบกำแพงอิฐมวลเบาแบบกรอกปูนบางส่วน (partially grouted) และมีโหมดการวิบัติด้วยแรงเฉือน ในส่วนของฝ้าเพดานได้เลือกฝ้าที่มีการยึดในแนวตั้งเท่านั้น โดยข้อมูลของฟังก์ชันความเสียหายแสดงในรูปที่ 4.23 ถึง 4.25

PACT Building Modeler - B10 W EQ

File Edit Tools Help

Project Info Building Info Population Component Fragilities Performance Groups Collapse Fragility Structural Analysis Results Residual Drift Hazard Curve

Direction:  Direction 1  Direction 2  Non-Directional

Update Table

Floor 1 of 11 (Floor 1)

No.	Component Type	Performance Group Quantities	Quantity Dispersion	Fragility Correlated	Population Model	Demand Parameters
B1041.021a	ACI 318 IMF, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam one side	8.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>	None	Story Drift Ratio
B1041.021b	ACI 318 IMF, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	16.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>	None	Story Drift Ratio
B1051.001	Ordinary reinforced masonry walls with partially grouted cells, ...	26.70	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>	None	Story Drift Ratio

Add Performance Group

รูปที่ 4.23 แสดงฟังก์ชันความบอบบางของชิ้นส่วนในทิศทางที่ 1 (H1)

PACT Building Modeler - B10 W EQ

File Edit Tools Help

Project Info Building Info Population Component Fragilities Performance Groups Collapse Fragility Structural Analysis Results Residual Drift Hazard Curve

Direction:  Direction 1  Direction 2  Non-Directional

Update Table

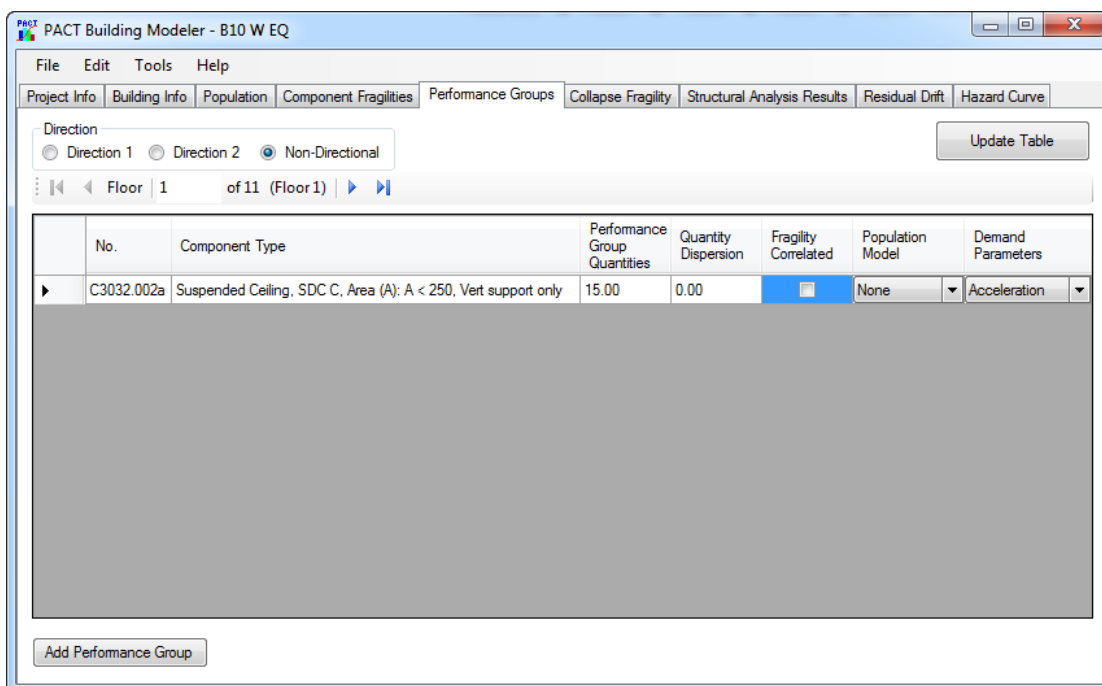
Floor 1 of 11 (Floor 1)

No.	Component Type	Performance Group Quantities	Quantity Dispersion	Fragility Correlated	Population Model	Demand Parameters
B1041.021a	ACI 318 IMF, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam one side	12.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>	None	Story Drift Ratio
B1041.021b	ACI 318 IMF, Conc Col & Bm = 24" x 24", Beam both sides	12.00	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>	None	Story Drift Ratio
B1051.001	Ordinary reinforced masonry walls with partially grouted cells, ...	21.30	0.00	<input checked="" type="checkbox"/>	None	Story Drift Ratio

Add Performance Group

รูปที่ 4.24 แสดงฟังก์ชันความบอบบางของชิ้นส่วนในทิศทางที่ 2 (H2)





รูปที่ 4.25 แสดงฟังก์ชันความบอบบางของชิ้นส่วนแบบไรทิศทาง

#### 4.2.3 การใส่ข้อมูลผลการวิเคราะห์ในโปรแกรม PACT

สำหรับการวิเคราะห์ความเสียหายของอาคารด้วยโปรแกรม PACT นั้นจะต้องใช้ค่าผลตอบแทนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นของคลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 26 คลื่นด้วยโปรแกรม Perform-3D เพื่อนำมาคิดความเสียหายจากฟังก์ชันความบอบบางของแต่ละชิ้นส่วน ซึ่งในงานวิจัยนี้ค่าผลตอบแทนที่ใช้คือ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น และความเร่งในแต่ละชั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และ 4.27

Floor/Story	EQ1	EQ2	EQ3	EQ4	EQ5	EQ6	EQ7	EQ8	EQ9	EQ10	EQ12	EQ13	EQ14	EQ15	EQ16	EQ17	EQ18	EQ19	EQ20	EQ21	EQ22	EQ23	EQ24	EQ25	EQ26	
Floor 10-Floor (rad)	0.003...	0.003...	0.001...	0.004...	0.003...	0.001...	0.002...	0.003...	0.002...	0.003...	0.000...	0.001...	0.002...	0.002...	0.002...	0.002...	0.002...	0.002...	0.002...	0.0034	0.003...	0.004...	0.003...	0.003...	0.001...	0.003...
Floor 9-10 (rad)	0.007...	0.006...	0.004...	0.009...	0.006...	0.004...	0.005...	0.006...	0.005...	0.008...	0.000...	0.003...	0.004...	0.005...	0.005...	0.007...	0.004...	0.005...	0.006...	0.007...	0.008...	0.008...	0.006...	0.00307	0.006...	
Floor 8-9 (rad)	0.005...	0.007...	0.0035	0.008...	0.006...	0.004...	0.006...	0.006...	0.005...	0.007...	0.000...	0.002...	0.004...	0.004...	0.005...	0.006...	0.00379	0.004...	0.006...	0.00718	0.00759	0.007...	0.00531	0.0025	0.00554	
Floor 7-8 (rad)	0.005...	0.009...	0.004...	0.01038	0.008...	0.005...	0.007...	0.008...	0.006...	0.009...	0.000...	0.003...	0.004...	0.005...	0.006...	0.007...	0.003...	0.005...	0.007...	0.008...	0.009...	0.008...	0.006...	0.002...	0.005...	
Floor 6-7 (rad)	0.007...	0.0104	0.004...	0.0119	0.010...	0.00652	0.009...	0.01	0.006...	0.01125	0.000...	0.003...	0.005...	0.006...	0.007...	0.00832	0.003...	0.006...	0.007...	0.00915	0.01023	0.009...	0.00634	0.003...	0.005...	
Floor 5-6 (rad)	0.006...	0.009...	0.003...	0.01	0.009...	0.005...	0.008...	0.008...	0.005...	0.009...	0.000...	0.002...	0.004...	0.00551	0.006...	0.006...	0.002...	0.004...	0.005...	0.00791	0.008...	0.009...	0.0046	0.002...	0.004...	
Floor 4-5 (rad)	0.006...	0.009...	0.004...	0.01167	0.00984	0.006...	0.009...	0.01029	0.006...	0.01129	0.001...	0.003...	0.005...	0.005...	0.006...	0.007...	0.003...	0.005...	0.004...	0.00678	0.009...	0.011...	0.00612	0.002...	0.004...	
Floor 3-4 (rad)	0.00661	0.009...	0.004...	0.0129	0.01	0.006...	0.009...	0.01052	0.006...	0.01187	0.000...	0.003...	0.005...	0.005...	0.006...	0.007...	0.003...	0.006...	0.005...	0.01	0.0098	0.01147	0.0065	0.002...	0.004...	
Floor 2-3 (rad)	0.006...	0.00832	0.004...	0.01174	0.008...	0.005...	0.008...	0.009...	0.005...	0.01053	0.000...	0.002...	0.00457	0.004...	0.005...	0.007...	0.003...	0.005...	0.005...	0.00674	0.008...	0.009...	0.006...	0.002...	0.004...	
Floor 1-2 (rad)	0.004...	0.00588	0.003...	0.007...	0.006...	0.004...	0.005...	0.006...	0.0041	0.007...	0.000...	0.002...	0.003...	0.003...	0.003...	0.005...	0.002...	0.004...	0.003...	0.006...	0.006...	0.006...	0.004...	0.001...	0.003...	

รูปที่ 4.26 ข้อมูลค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นในโปรแกรม PACT

PACT Building Modeler - B10 W EQ

File Edit Tools Help

Project Info | Building Info | Population | Component Fragilities | Performance Groups | Collapse Fragility | Structural Analysis Results | Residual Drift | Hazard Curve

Assessment Type: Scenario Intensity Analysis Type: Non-Linear Simplified (Linear) Scenario/Intensity Information: Typical Number of Demand Vectors: 26 Number of Realizations: 1000 Non-directional conversion factor: 1.2

Identify Intensity: Intensity 1 of 2 Add New Intensity Delete Intensity Load Results From CSV Save Results To CSV

Intensity ID: 20% For Collapse Only Sa (T) Median (g): 0.03

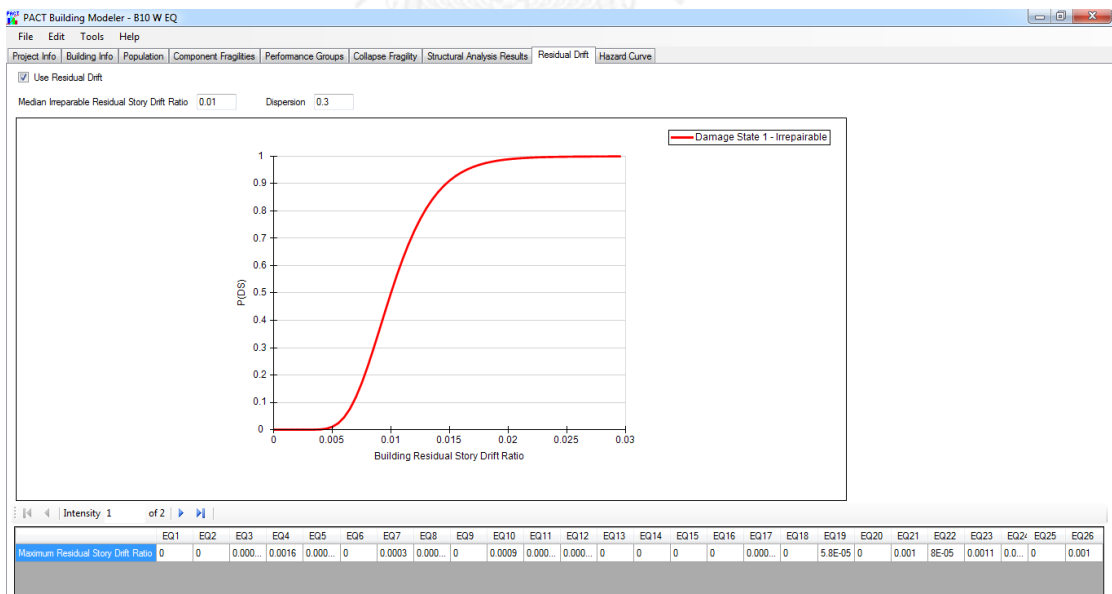
Number of Demand Vectors: 26 Modeling Dispersion  $\beta_m$ : 0 (β SD, β FA, and β FV)

Intensity Set: Direction Direction 1 Demand Type Acceleration

Floor/Story	EQ1	EQ2	EQ3	EQ4	EQ5	EQ6	EQ7	EQ8	EQ9	EQ10	EQ11	EQ12	EQ13	EQ14	EQ15	EQ16	EQ17	EQ18	EQ19	EQ20	EQ21	EQ22	EQ23	EQ24	EQ25	EQ26
Roof (g)	0.2044	0.1483	0.110	0.249	0.148	0.093	0.123	0.163	0.163	0.198	0.164	0.175	0.102	0.120	0.129	0.151	0.130	0.157	0.209	0.174	0.226	0.218	0.195	0.099	0.189	
Floor 10 (g)	0.167	0.146	0.087	0.172	0.136	0.087	0.116	0.148	0.138	0.179	0.119	0.153	0.074	0.097	0.105	0.122	0.165	0.110	0.125	0.162	0.159	0.173	0.181	0.119	0.068	0.171
Floor 9 (g)	0.122	0.136	0.081	0.153	0.119	0.080	0.105	0.127	0.094	0.153	0.087	0.143	0.058	0.082	0.101	0.098	0.153	0.067	0.099	0.128	0.124	0.146	0.156	0.114	0.072	0.126
Floor 8 (g)	0.131	0.110	0.087	0.158	0.100	0.072	0.095	0.107	0.078	0.124	0.094	0.154	0.058	0.077	0.093	0.095	0.126	0.062	0.091	0.100	0.122	0.136	0.147	0.089	0.077	0.143
Floor 7 (g)	0.1227	0.099	0.070	0.141	0.093	0.061	0.084	0.101	0.089	0.1065	0.098	0.143	0.069	0.074	0.087	0.095	0.115	0.078	0.098	0.102	0.124	0.141	0.170	0.126	0.067	0.119
Floor 6 (g)	0.122	0.089	0.061	0.1201	0.094	0.057	0.070	0.093	0.088	0.1171	0.1124	0.118	0.073	0.080	0.077	0.096	0.116	0.079	0.109	0.114	0.102	0.136	0.151	0.1356	0.067	0.133
Floor 5 (g)	0.107	0.089	0.061	0.113	0.086	0.061	0.066	0.078	0.079	0.103	0.104	0.110	0.064	0.073	0.065	0.087	0.101	0.077	0.124	0.106	0.088	0.138	0.130	0.116	0.055	0.130
Floor 4 (g)	0.120	0.078	0.061	0.110	0.080	0.054	0.0549	0.069	0.063	0.084	0.098	0.087	0.062	0.063	0.064	0.067	0.101	0.075	0.117	0.090	0.085	0.132	0.104	0.104	0.053	0.121
Floor 3 (g)	0.1168	0.066	0.045	0.087	0.072	0.039	0.039	0.053	0.042	0.061	0.075	0.075	0.053	0.060	0.051	0.072	0.091	0.069	0.086	0.082	0.088	0.102	0.115	0.087	0.037	0.111
Floor 2 (g)	0.063	0.034	0.022	0.045	0.039	0.019	0.023	0.026	0.023	0.033	0.037	0.042	0.029	0.035	0.030	0.041	0.058	0.041	0.041	0.051	0.050	0.072	0.071	0.048	0.017	0.063

รูปที่ 4.27 ข้อมูลค่าการความเร่งของแต่ละชั้นในโปรแกรม PACT

ผลการวิเคราะห์ที่สำคัญอีกอย่างคือค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ค้ำ (residual drift) ซึ่งเป็นค่าที่จะแสดงให้เห็นว่าอาคารดังกล่าวนั้นมีความปลอดภัยในการใช้งานหรือไม่หลังจากโดนแรงของแผ่นดินไหวกระทำ กล่าวคือหากค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์สูงสุดมีค่าเกินกว่าค่าที่ระบุซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดไว้เท่ากับ 1% ตามคำแนะนำของรายงาน FEMA P-58 อาคารดังกล่าวจะไม่เหมาะสมต่อการซ่อมแซมโดยจะพิจาราค่าความเสียหายเท่ากับค่าร้อยละย้ายอาคารแล้วสร้างใหม่ โดยการใส่ข้อมูลการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ค้ำแสดงดังรูปที่ 4.28 ทั้งนี้ข้อมูลผลตอบสนองของอาคารทั้งหมดนั้นได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค



รูปที่ 4.28 ข้อมูลค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ในโปรแกรม PACT

## บทที่ 5

### ความเสียหายของอาคารตัวอย่างภายใต้แรงกระทำของแผ่นดินไหว

ในการประเมินหาความเสียหายของอาคารนั้น จะใช้ผลตอบสนองจากการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Inelastic Dynamic analysis) ด้วยโปรแกรม Perform-3D ภายใต้แรงกระทำของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นจริงทั้งหมด 26 คู่คลื่น แล้วจึงนำผลดังกล่าวมาประเมินความเสียหายด้วยโปรแกรม PACT โดยใช้วิธีวิเคราะห์ตามความรุนแรงของแผ่นดินไหว (intensity-based assessment) ซึ่งทำการสร้างแบบจำลองเสมือน (Realization) ทั้งหมด 1,000 แบบเพื่อที่จะให้ผลการประเมินนั้นมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยในการดูข้อมูลความเสียหายของอาคารตัวอย่างนั้น จะพิจารณาค่ากลาง (median) ของกราฟแสดงราคาซ่อมแซมอาคารตามคำแนะนำของ FEMA P-58

	Minimum	Average	Maximum
Repair Cost	฿121,181.91 (Real #765)	฿159,823.96	฿393,602.00 (Real #351)
Repair Time	550 (Real #1)	550	550 (Real #1)
Injuries	0 (Real #1)	0	0 (Real #0)
Fatalities	0 (Real #1)	0	0 (Real #0)

รูปที่ 5.1 ตัวอย่างการประเมินความเสียหายภายใต้แรงกระทำของแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ในรอบ 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวด้วยโปรแกรม PACT ใน Realization ที่ 108

ในการประเมินความเสียหายในแต่ละ Realization นั้น โปรแกรมได้ทำการวิเคราะห์ว่าอาคารมีความเสียหายในอาคารแต่ละชั้นเท่าใด และมีชิ้นส่วนใดบ้างที่เกิดความเสียหาย ซึ่งในรูปที่ 5.1 แสดงถึงตัวอย่างการประเมินความเสียหายภายใต้แรงกระทำของแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ในรอบ 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวด้วยโปรแกรม PACT ใน Realization ที่ 108 พบว่าในชั้นที่ 1 กลุ่มของสมรรถนะ

B1051.001 ซึ่งก็คือชั้นส่วนกำแพงอิฐมอญนั้นเกิดความเสียหายจำนวน 23 ชุดจากทั้งหมด 26 ชุดในทิศทาง H1 โดยเมื่อพิจารณาผลของความเสียหายรวมทั้งหมดพบว่าใน Realization ที่ 108 อาคารตัวอย่างมีมูลค่าความเสียหายเท่ากับ 161,827 ดอลลาร์สหรัฐ หรือประมาณ 5,180,000 บาท และในรูปที่ 5.2 ซึ่งแสดงถึงการพิจารณาความเสียหายของชั้นส่วนกำแพงอิฐมอญ พบว่าค่าผลตอบแทนที่ใช้ในการประเมินความเสียหายใน Realization นี้หรือค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 0.0066 เรเดียนหรือ 0.66% และค่าผลตอบแทนดังกล่าวทำให้ชั้นส่วนเกิดสภาพความเสียหายแบบที่ 2 กล่าวคือชั้นส่วนกำแพงอิฐมอญเกิดรอยแตกในแนวทแยงขนาดใหญ่และมีการหลุดร่อนบริเวณฐานของชั้นส่วน ดังนั้นจึงต้องทำการพิจารณาหาค่าซ่อมแซมของชั้นส่วนนี้ต่อไป

State	Description	Median	Beta	Probability	Cumulative Probability	Random Number	In this Damage State?
0	No damage	0	0	0.082	0		No
1	First occurrence of major diagonal cracks. Cracks remain ...	0.002	0.86	0.101	0.918	0.771	No
2	Wide diagonal cracks with typically one or more cracks in ...	0.0033	0.77	0.816	0.816	0.771	Yes

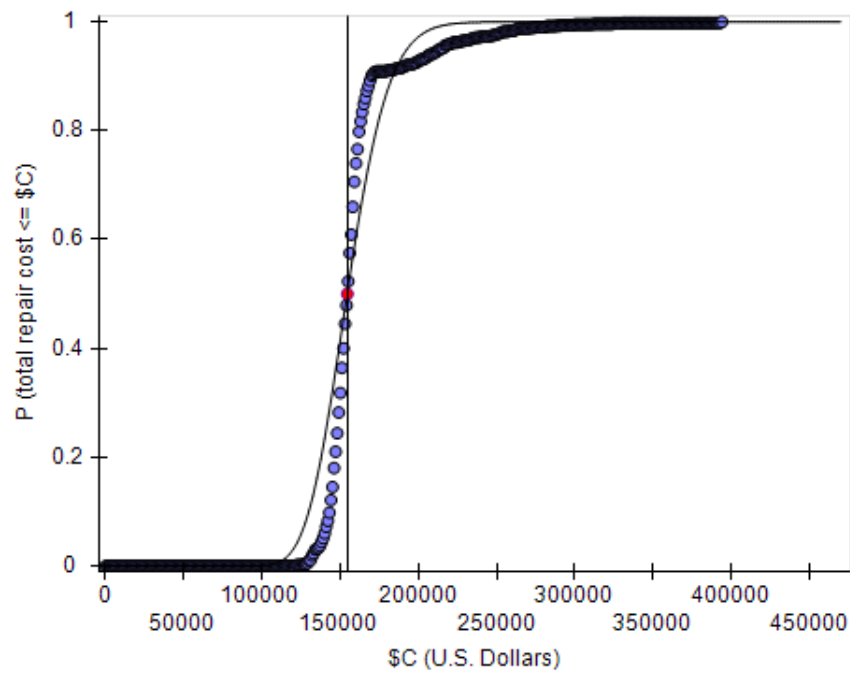
Total Cost/Unit #5,244.06 Total Time/Unit 14.27425 Unit Fatality Area 0.00 Unit Injury Area 0.00 Long Lead  Unsafe Placard?

รูปที่ 5.2 ตัวอย่างการประเมินความเสียหายของชั้นส่วนกำแพงอิฐมอญ

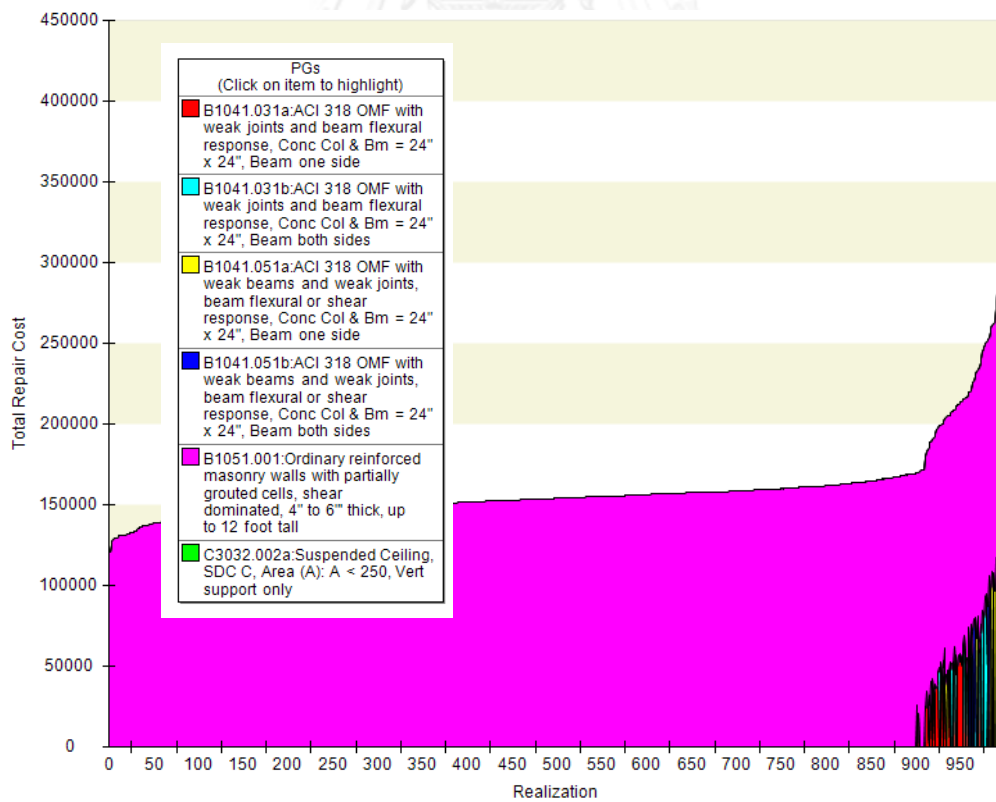
## 5.1 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้น

ในงานวิจัยนี้อาคารตัวอย่างที่มีความสูง 4 ชั้นจะออกแบบด้วย 2 ระบบโครงสร้างที่แตกต่างกัน ได้แก่ โครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวจำกัด (intermediate RC moment resisting frame, IMF) สำหรับอาคารที่ออกแบบให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวและโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบธรรมดา (ordinary RC moment resisting frame, OMF) สำหรับอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว โดยจะทำการประเมินความเสียหายภายใต้แรงกระทำของแผ่นดินไหวที่ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% และ 20% ในรอบ 50 ปี (5% and 20% probability of exceedance in 50 years) หรือรอบการเกิดซ้ำ (return period) 975 และ 225 ปีตามลำดับ

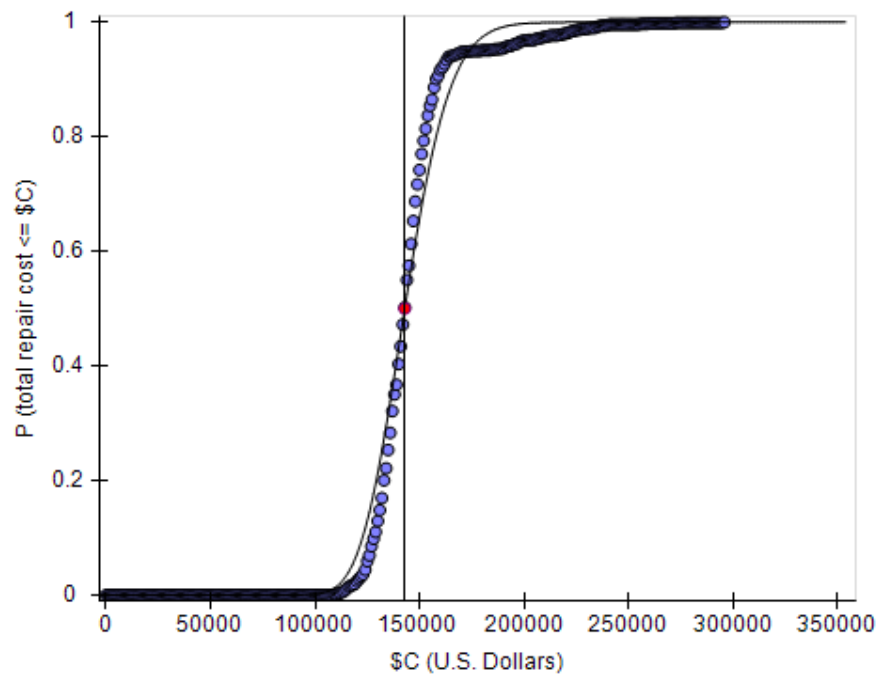
ผลการประเมินความเสียหายด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ในรอบ 50 ปีแสดงในรูปที่ 5.3 ถึง 5.6 พบว่าค่ากลางของราคาค่าซ่อมแซมอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้น ซึ่งไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวมีค่าเท่ากับ 154,477 ดอลลาร์สหรัฐ หรือประมาณ 4,940,000 บาท ในขณะที่ค่ากลางของราคาค่าซ่อมแซมอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งมีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวมีค่าเท่ากับ 142,933 ดอลลาร์สหรัฐ หรือประมาณ 4,570,000 บาท



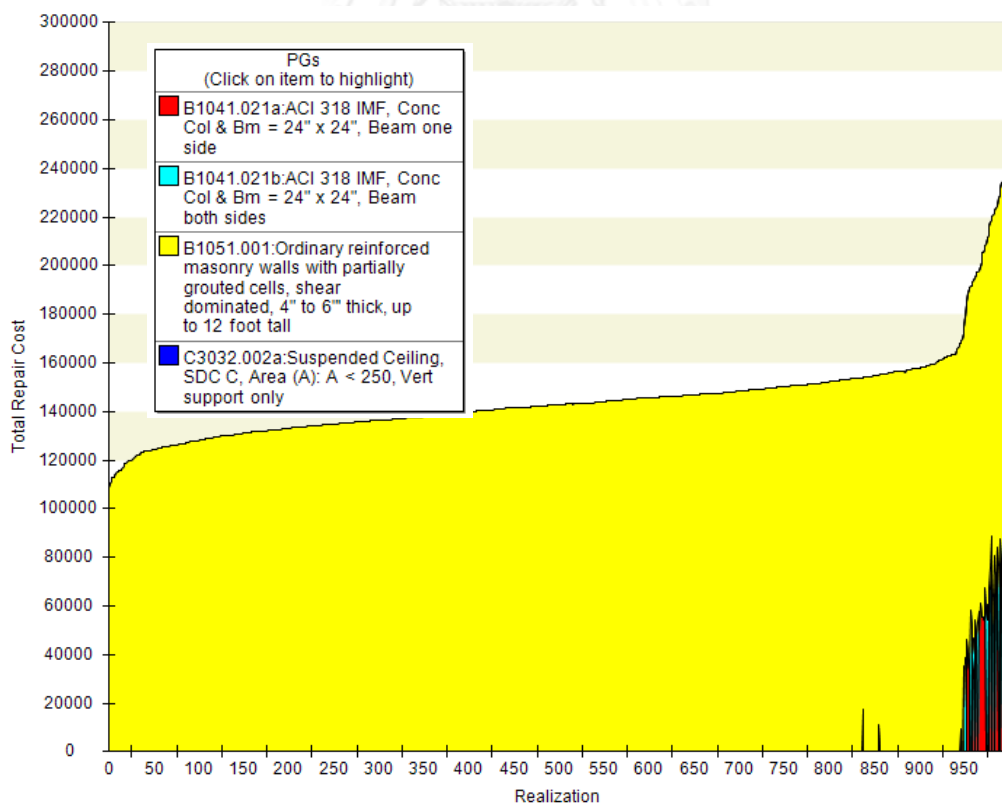
รูปที่ 5.3 ความน่าจะเป็นของราคาค่าซ่อมแซมภายใต้ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ในรอบ 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



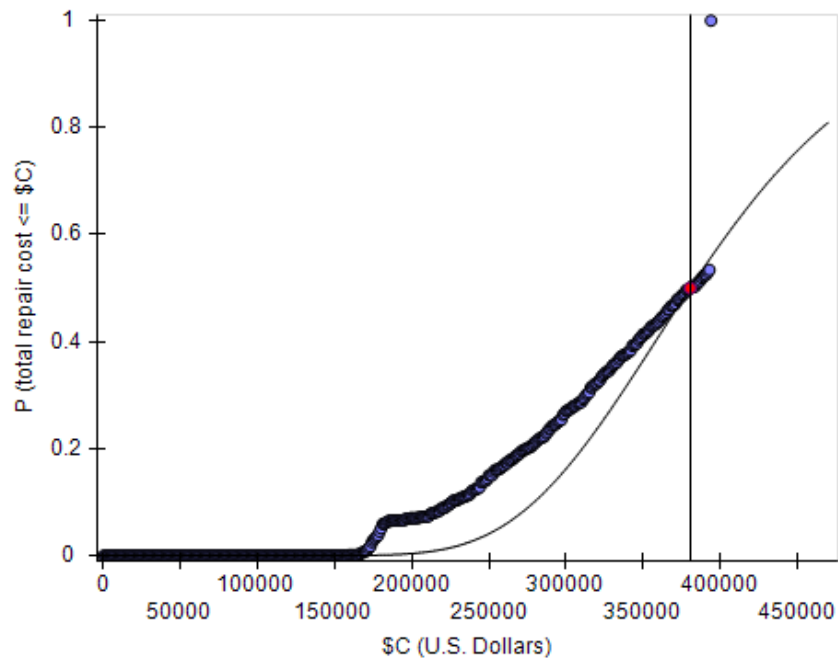
รูปที่ 5.4 มูลค่าความเสียหายภายใต้ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ในรอบ 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



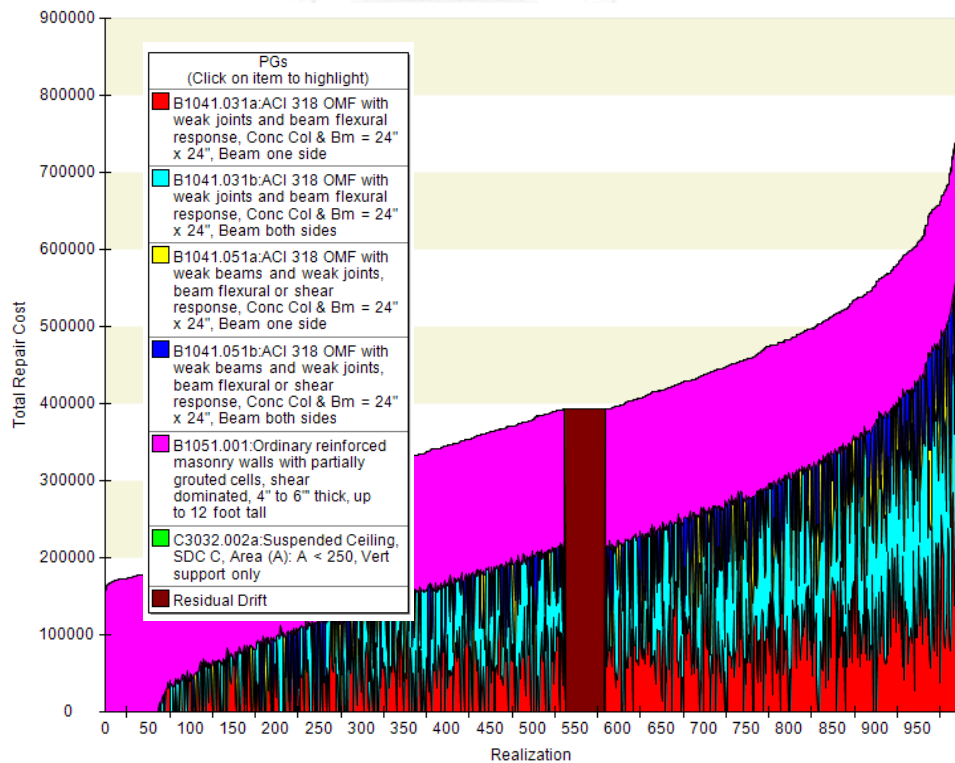
รูปที่ 5.5 ความน่าจะเป็นของราคาซ่อมแซมภายใต้ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ในรอบ 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



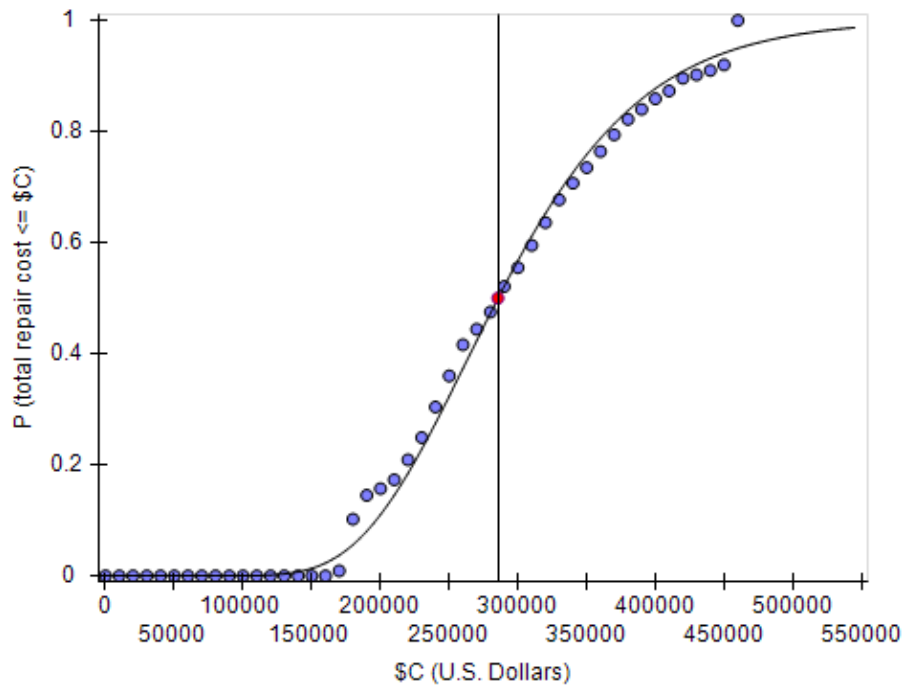
รูปที่ 5.6 มูลค่าความเสียหายภายใต้ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ในรอบ 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



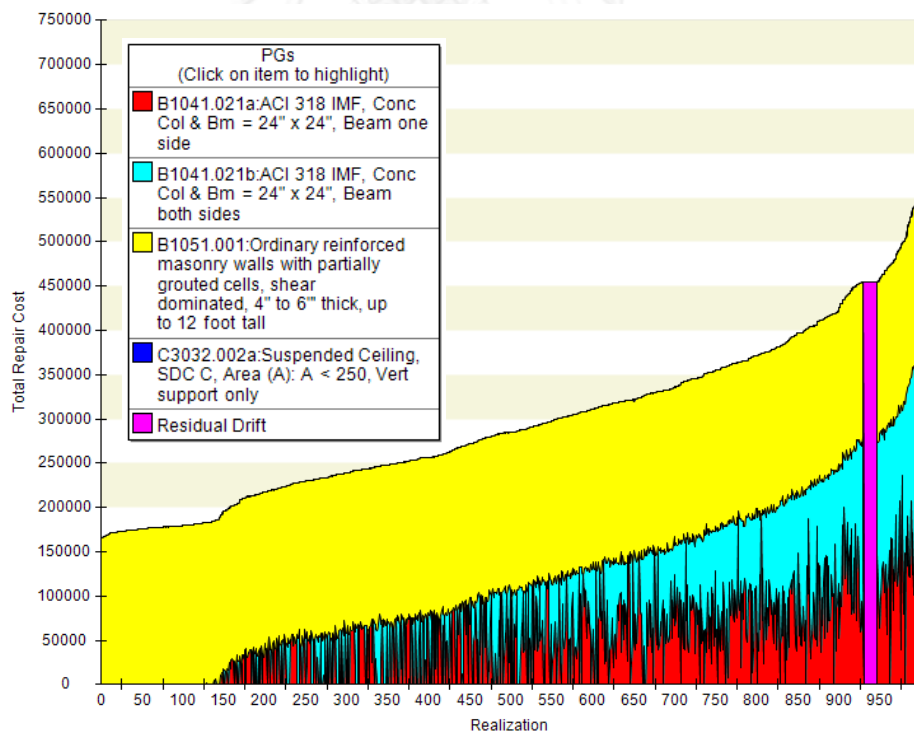
รูปที่ 5.7 ความน่าจะเป็นของราคาซ่อมแซมภายใต้ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ในรอบ 50 ปีของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 5.8 มูลค่าความเสียหายภายใต้ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ในรอบ 50 ปีของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 5.9 ความน่าจะเป็นของราคาค่าซ่อมแซมภายใต้ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ในรอบ 50 ปีของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

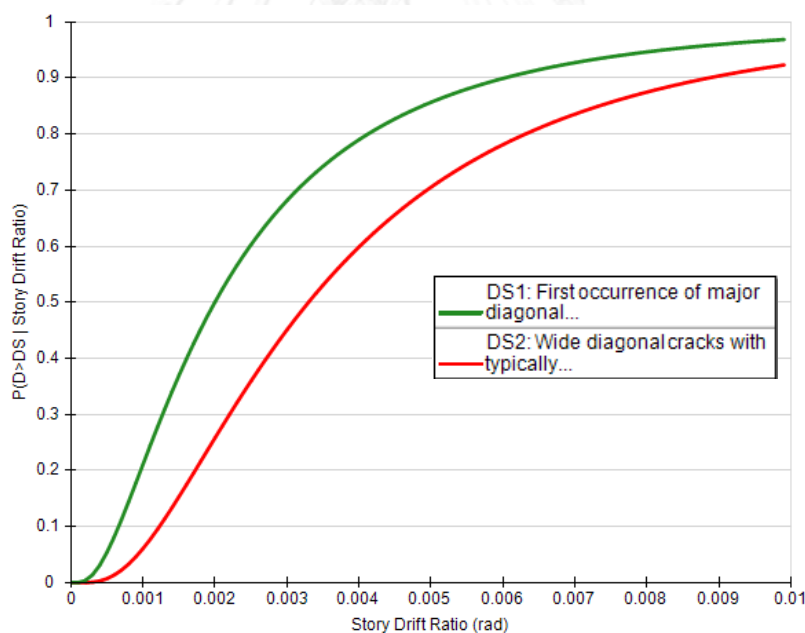


รูปที่ 5.10 มูลค่าความเสียหายภายใต้ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ในรอบ 50 ปีของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



เมื่อพิจารณาผลการประเมินความเสียหายด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ในรอบ 50 ปีซึ่งแสดงในรูปที่ 5.7 ถึง 5.10 พบว่าค่ากลางของราคาค่าซ่อมแซมอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวมีค่าเท่ากับ 380,500 ดอลลาร์สหรัฐ หรือประมาณ 12,180,000 บาท ในขณะที่ค่ากลางของราคาค่าซ่อมแซมอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งมีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวมีค่าเท่ากับ 285,434 ดอลลาร์สหรัฐ หรือประมาณ 9,130,000 บาท

พบว่าสำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ความเสียหายส่วนใหญ่ในแต่ละ Realization จะเกิดจากกำแพงอิฐมอญ โดยชั้นส่วนอื่น ๆ ยังไม่เกิดความเสียหาย เมื่อพิจารณากราฟฟังก์ชันความบอบบางของกำแพงอิฐมอญในรูปที่ 5.12 พบว่าแค่เพียงค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ 1 เรเดียนหรือเท่ากับ 1% ก็ทำให้โอกาสที่ชั้นส่วนดังกล่าวมีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายเกือบ 100% ในการวิเคราะห์ด้วยความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ผลตอบสนองได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไม่เชิงเส้นทำให้ชั้นส่วนอื่นเกิดความเสียหาย ดังนั้นจะพบว่าผลการวิเคราะห์มากกว่า 500 Realization ของอาคารที่ไม่ได้ออกแบบแผ่นดินไหวมีค่าเกินกว่าค่าร้อยละย้ายอาคารและสร้างใหม่ ในขณะที่ผลการวิเคราะห์อาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวมีปริมาณ Realization เพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่มีมูลค่าความเสียหายเกินกว่าค่าร้อยละย้ายอาคารสร้างใหม่



รูปที่ 5.11 กราฟฟังก์ชันความบอบบางของกำแพงอิฐมอญ #B1051.001

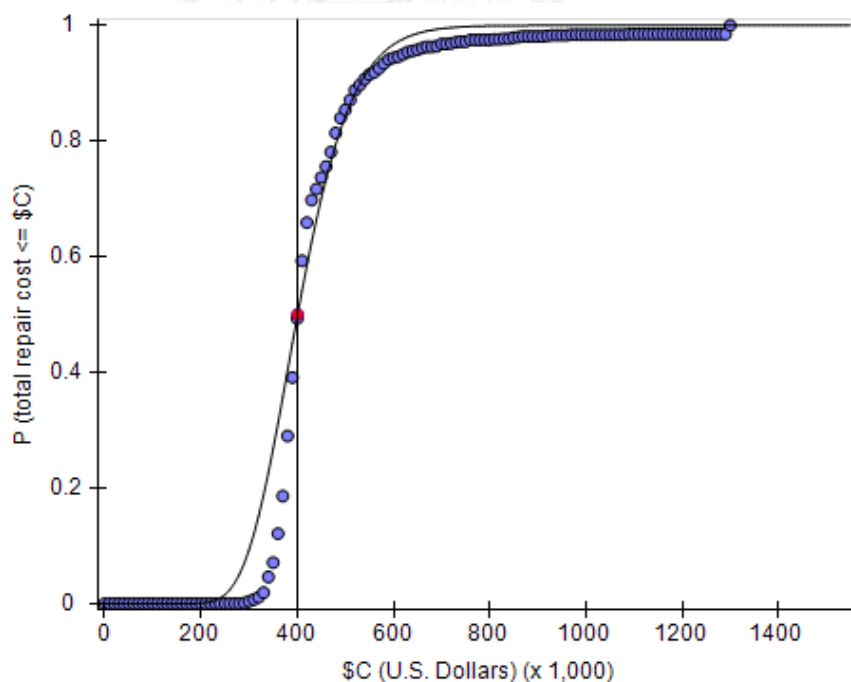
## 5.2 ความเสียหายที่เกิดขึ้นในอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น

อาคารตัวอย่างที่มีความสูง 10 ชั้นจะออกแบบด้วย 2 ระบบโครงสร้างที่แตกต่างกันได้แก่ โครงสร้างต้านแรงดัดที่มีความเหนียวจำกัด (intermediate RC moment resisting frame, IMF) สำหรับอาคารที่ออกแบบให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวและโครงสร้างต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบธรรมดา (ordinary RC moment resisting frame, OMF) สำหรับอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรง

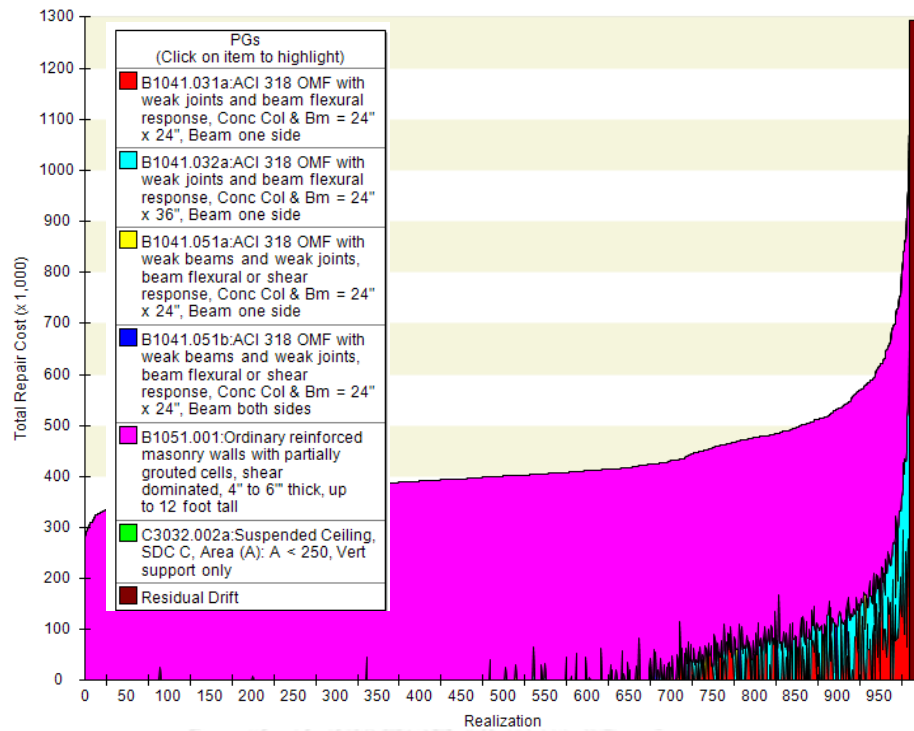
แผ่นดินไหว โดยจะทำการประเมินความเสียหายภายใต้แรงกระทำของแผ่นดินไหวที่ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% และ 20% ในรอบ 50 ปี (5% and 20% probability of exceedance in 50 years) หรือรอบการเกิดซ้ำ (return period) 975 และ 225 ปีตามลำดับ

ผลการประเมินความเสียหายด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ในรอบ 50 ปีแสดงในรูปที่ 5.12 ถึง 5.15 พบว่าค่ากลางของราคาค่าซ่อมแซมอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น ซึ่งไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวมีค่าเท่ากับ 400,700 ดอลลาร์สหรัฐ หรือประมาณ 12,820,000 บาท ในขณะที่ค่ากลางของราคาค่าซ่อมแซมอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นซึ่งมีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวมีค่าเท่ากับ 382,954 ดอลลาร์สหรัฐ หรือ 12,250,000 บาท

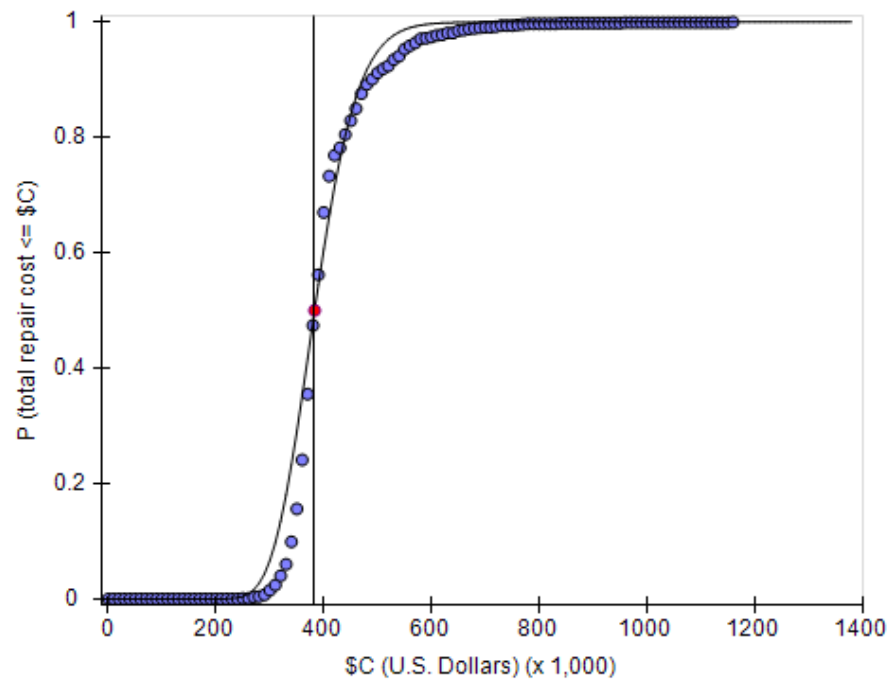
เมื่อพิจารณาผลการประเมินความเสียหายด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ในรอบ 50 ปีซึ่งแสดงในรูปที่ 5.16 ถึง 5.19 พบว่าค่ากลางของราคาค่าซ่อมแซมอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นซึ่งไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวมีค่าเท่ากับ 1,293,043 ดอลลาร์สหรัฐ หรือประมาณ 41,370,000 บาท ในขณะที่ค่ากลางของราคาค่าซ่อมแซมอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นซึ่งมีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวมีค่าเท่ากับ 806,153 ดอลลาร์สหรัฐ หรือ 25,800,000 บาท



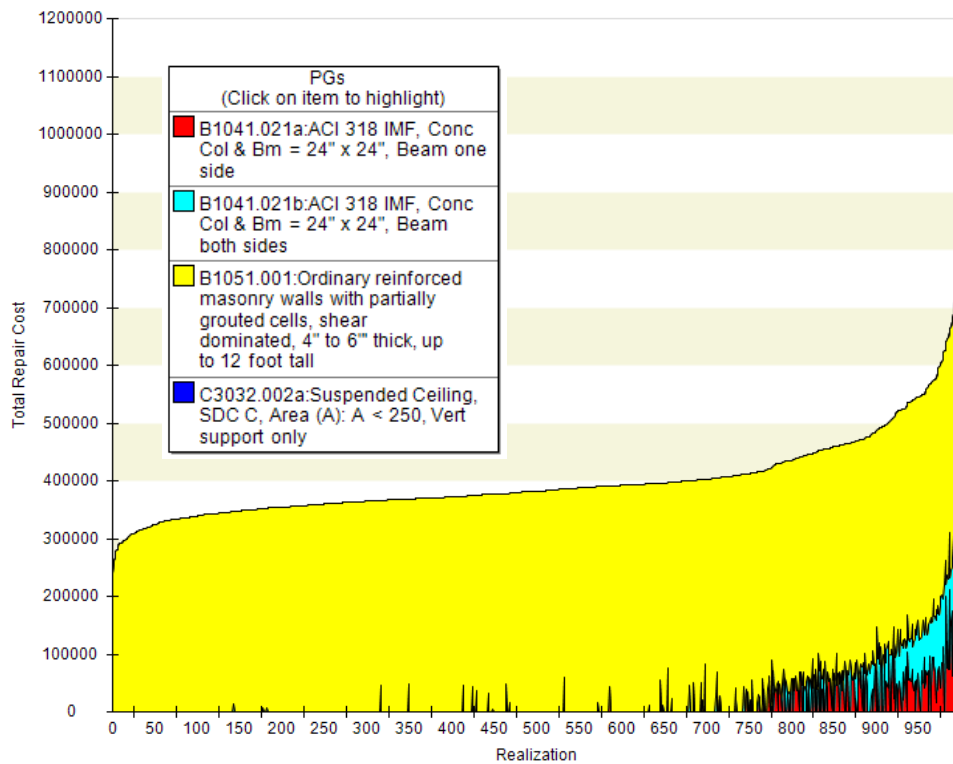
รูปที่ 5.12 ความน่าจะเป็นของราคาค่าซ่อมแซมภายใต้ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ในรอบ 50 ปีของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



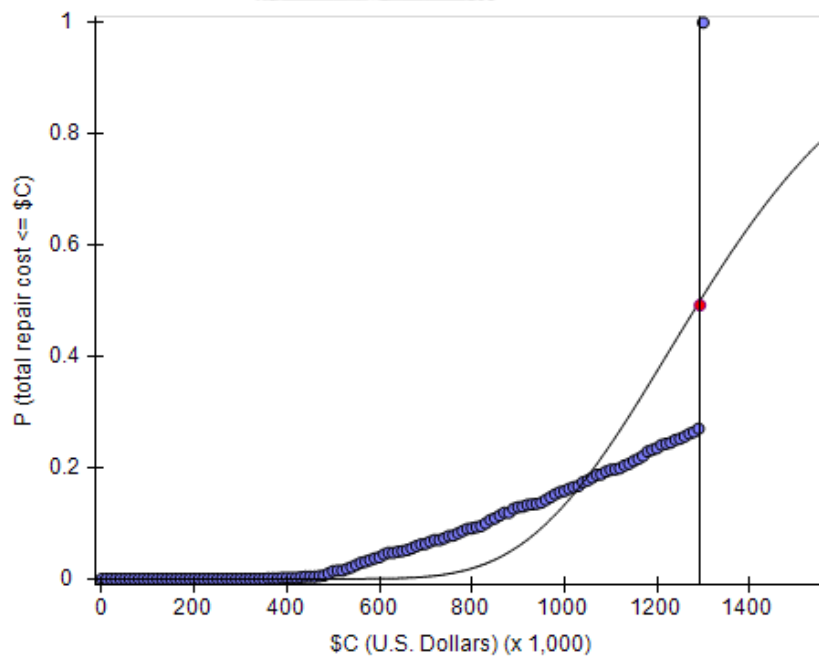
รูปที่ 5.13 มูลค่าความเสียหายในแต่ละภายใต้ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ในรอบ 50 ปีของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



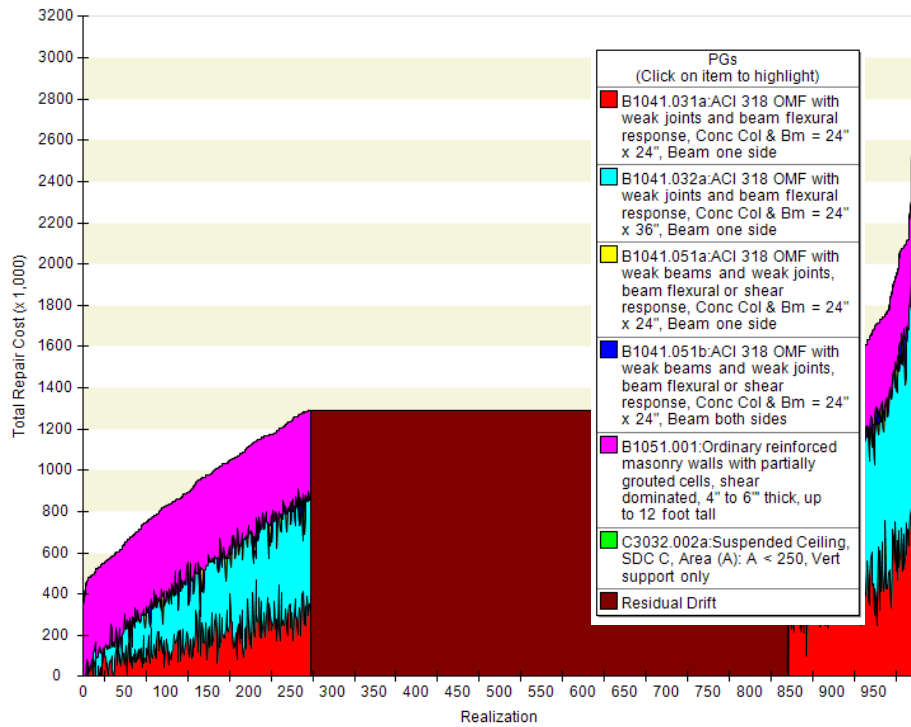
รูปที่ 5.14 ความน่าจะเป็นของราคาซ่อมแซมภายใต้ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ในรอบ 50 ปีของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



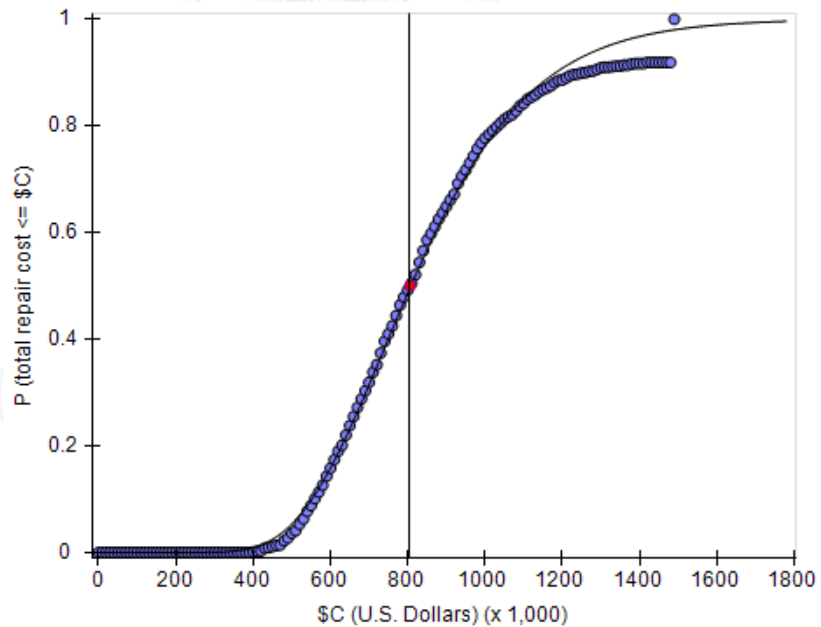
รูปที่ 5.15 มูลค่าความเสียหายภายใต้ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ในรอบ 50 ปีของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



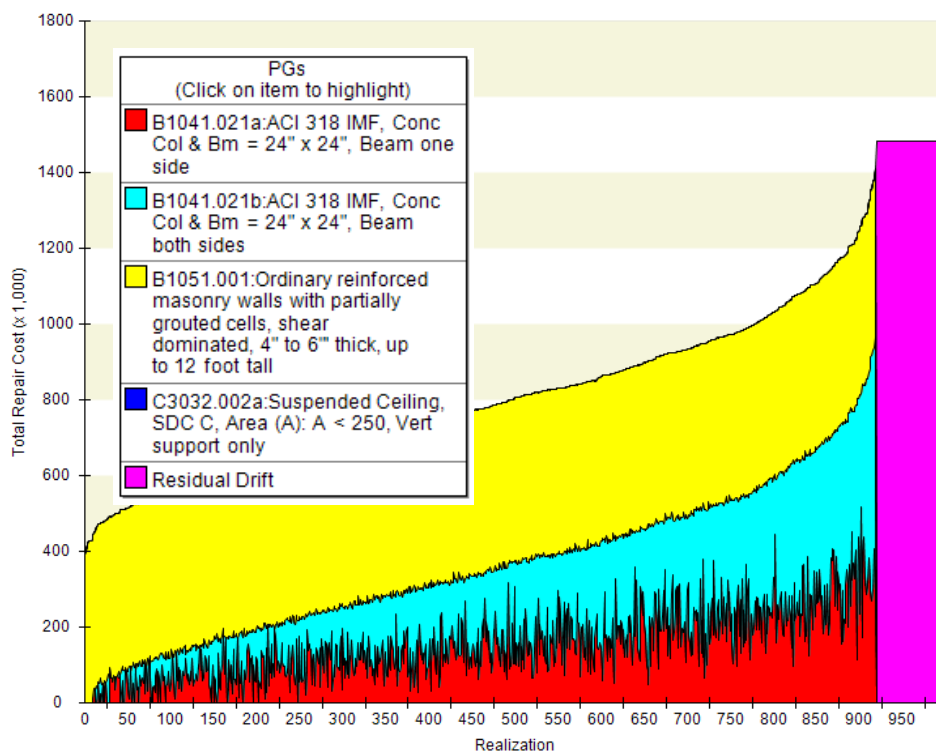
รูปที่ 5.16 ความน่าจะเป็นของราคาซ่อมแซมภายใต้ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ในรอบ 50 ปีของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 5.17 มูลค่าความเสียหายภายใต้ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ในรอบ 50 ปีของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 5.18 ความน่าจะเป็นของราคาซ่อมแซมภายใต้ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ในรอบ 50 ปีของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 5.19 มูลค่าความเสียหายภายใต้ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ในรอบ 50 ปีของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

มูลค่าความเสียหายส่วนใหญ่จากการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี เกิดจากกำแพงอิฐมอญเนื่องจากเป็นชั้นส่วนที่มีโอกาสเกิดความเสียหายได้สูง ในส่วนของการวิเคราะห์ด้วยความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี พบว่ามูลค่าความเสียหายของอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวส่วนใหญ่เกิดจากมีค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์คงค้างเกินทำให้ต้องรื้อย้ายอาคารและสร้างใหม่ซึ่งเมื่อรวมกับผลการวิเคราะห์ที่มีมูลค่าความเสียหายเกินกว่าค่ารื้อย้ายแล้วสร้างใหม่ พบว่ามีมากกว่า 700 Realization แต่ในส่วนของอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว แม้ว่าจะมีผลการวิเคราะห์เกินกว่ารื้อย้ายแล้วสร้างใหม่รวมถึงมีค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์เกินแต่ก็เป็นเพียงส่วนน้อย

### 5.3 พิจารณาความสมเหตุสมผลของมูลค่าความเสียหายของอาคารตัวอย่าง

จากผลการประเมินค่าซ่อมแซมของอาคารพบว่าอาคารตัวอย่างมีค่าซ่อมแซมค่อนข้างสูง ดังนั้นเพื่อที่จะพิจารณาความสมเหตุสมผลของราคาว่าเหมาะสมหรือไม่ จึงทำการเปรียบเทียบราคาซ่อมแซมของอาคารตัวอย่างซึ่งออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 4 ชั้นภายใต้แรงกระทำของคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PACT กับราคาซ่อมแซมในประเทศไทย

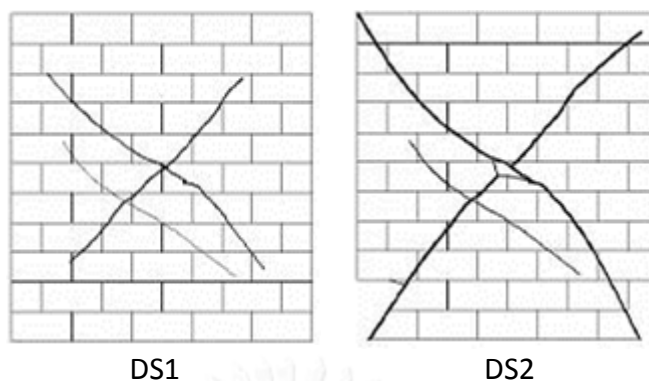
ในการพิจารณาความสมเหตุสมผลของมูลค่าความเสียหายของอาคาร จะทำการพิจารณาว่าอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวนั้นเกิดความเสียหายที่ชั้นส่วนใดบ้าง โดยพิจารณาจาก Realization ที่ 764 ซึ่งมีราคาซ่อมแซมเท่ากับค่ากลางของมูลค่าความเสียหายของ

อาคารตัวอย่างนี้ จากตารางที่ 5.1 แสดงให้ว่าชั้นส่วนที่เสียหายของอาคารคือกำแพงอิฐมอญ (B1051.001) เท่านั้น ในส่วนของรอยต่อระหว่างคาน-เสา (B1041.021a และ B1041.021b) และฝ้าเพดาน (C3032.002a) ยังไม่เกิดความเสียหาย

ในการสร้างแบบจำลองทางสมรรถนะของกำแพงอิฐมอญจะระบุปริมาณเป็นแผ่น โดย 1 แผ่น มีพื้นที่เท่ากับ 9 ตารางเมตร สำหรับความเสียหายของกำแพงอิฐมอญนั้นพบว่าเกิดสภาพความเสียหายที่ 1 (DS1) เท่ากับ 24 แผ่นหรือคิดเป็น 216 ตารางเมตรและเกิดสภาพความเสียหายที่ 2 (DS2) เท่ากับ 127 แผ่นหรือคิดเป็น 1,143 ตารางเมตร โดยรูปแบบของสภาพความเสียหายแสดงในรูปที่ 5.20 ในส่วนของการคิดราคานั้น ใช้ฐานข้อมูลค่าแรงและค่าวัสดุของ scgexperience (2012) โดยมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นต้องรวมถึงความเสียหายจากการปิดอาคารเพื่อทำการซ่อมแซม ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้มูลค่าความเสียหายดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 1.7 เท่าของค่าซ่อมแซม โดยข้อมูลเปรียบเทียบมูลค่าความเสียหายของอาคารตัวอย่างซึ่งออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 4 ชั้นภายใต้แรงกระทำของคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PACT กับมูลค่าความเสียหายที่คิดราคาตามข้อมูลวัสดุและค่าแรงในประเทศไทยแสดงดังตารางที่ 5.3 พบว่ามูลค่าความเสียหายของอาคารตัวอย่างจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PACT มีค่ามากกว่ามูลค่าความเสียหายที่คิดราคาตามข้อมูลวัสดุและค่าแรงในประเทศไทยเท่ากับ 2.6 เท่า กล่าวคือค่าซ่อมแซมที่ได้จากโปรแกรม PACT นั้นอาจมีค่าไม่สอดคล้องกับสภาพการก่อสร้างของไทยนัก ดังนั้นผลการประเมินที่ได้จึงสามารถที่จะระบุค่าซ่อมแซมที่เกิดขึ้นจริงสำหรับอาคารในเขตกรุงเทพมหานครได้โดยตรงอย่างถูกต้องใกล้เคียงจริง แต่อย่างไรก็ดีผลการประเมินดังกล่าวยังสามารถใช้ในการเปรียบเทียบความเสียหายและความคุ้มค่าในการก่อสร้างของอาคารตัวอย่างได้

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดความเสียหายอาคารตัวอย่างซึ่งออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 4 ชั้นภายใต้แรงกระทำของคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี (Realization 764)

Floor	Direction	B1041.021a	B1041.021b	C3032.002a	B1051.001 (Panel)	
					DS1	DS2
1	H1	-	-	-	3	18
	H2	-	-	-	4	15
2	H1	-	-	-	1	23
	H2	-	-	-	4	17
3	H1	-	-	-	3	22
	H2	-	-	-	1	17
4	H1	-	-	-	5	15
	H2	-	-	-	3	0
Total					24	127



รูปที่ 5.20 รูปแบบสภาพความเสียหายของกำแพงอิฐมอญที่ระบุในโปรแกรม PACT

ตารางที่ 5.2 ราคาซ่อมแซมกำแพงอิฐมอญ (scgexperience, 2012 : online)

สภาพความเสียหาย	ปริมาณความเสียหาย (ตร.ม.)	ค่าซ่อมแซม (บาท/ตร.ม.)
DS1	216	560
DS2	1,143	800

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบมูลค่าความเสียหายของอาคารตัวอย่างซึ่งออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 4 ชั้นภายใต้แรงกระทำของคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PACT กับมูลค่าความเสียหายที่คิดราคาตามข้อมูลวัสดุและค่าแรงในประเทศไทย

Model	มูลค่าความเสียหายจาก ฐานข้อมูลในประเทศไทย (บาท)	มูลค่าความเสียหายจากการ วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PACT (บาท)
B4E	1,760,000.00	4,570,000.00

#### 5.4 เปรียบเทียบความเสียหายและความคุ้มค่าของการก่อสร้างอาคารรับแรงแผ่นดินไหว

จากผลการประเมินความเสียหายในหัวข้อที่ 5.1 และ 5.2 ทำให้สามารถทราบราคาซ่อมแซมอาคารที่เกิดความเสียหายภายใต้ความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่กำหนด แต่การที่จะวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบความเสียหายระหว่างอาคารตัวอย่างได้นั้น จะใช้การพิจารณาค่าอัตราส่วนระหว่างมูลค่าความเสียหายของอาคารกับมูลค่าค่าร้อยละอาคารแล้วสร้างใหม่ (loss/replacement cost ratio, LR) ดังแสดงในตารางที่ 5.4 อาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งวิเคราะห์ด้วยความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ในรอบ 50 ปีเมื่อไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวพบว่าค่าอัตราส่วนระหว่างมูลค่าความเสียหายของอาคารกับมูลค่าค่าร้อยละอาคารแล้วสร้างใหม่มีค่าเท่ากับ 0.39 แต่เมื่อพิจารณาอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวพบว่ามีค่าลดลงเท่ากับ 0.31 เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ด้วยความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ในรอบ 50 ปีอาคารที่ได้ออกแบบรับ



แรงแผ่นดินไหวมีค่าอัตราส่วนดังกล่าวเท่ากับ 0.96 เมื่อพิจารณาอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวพบว่าค่าดังกล่าวมีค่าลดลงเท่ากับ 0.63 สำหรับอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นนั้น เมื่อวิเคราะห์ด้วยความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ในรอบ 50 ปีพบว่าค่าอัตราส่วนระหว่างมูลค่าความเสียหายของอาคารกับมูลค่าค่ารั้อย้ายอาคารแล้วสร้างใหม่มีค่าเท่ากับ 0.31 แต่เมื่อพิจารณาอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวพบว่าค่าลดลงเท่ากับ 0.26 สำหรับการวิเคราะห์ด้วยความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ในรอบ 50 ปีพบว่าค่าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 1.00 นั่นคืออาคารมีแนวโน้มที่จะเสียหายรุนแรงหรือวิบัติ แต่เมื่อพิจารณาอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวพบว่าค่าดังกล่าวมีค่าลดลงเท่ากับ 0.54

เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนระหว่างมูลค่าความเสียหายที่ลดลงเมื่อก่อสร้างอาคารตามมาตรฐานอาคารรับแรงแผ่นดินไหว (Benefit, B) กับค่าก่อสร้างที่เพิ่มขึ้นสำหรับอาคารรับแรงแผ่นดินไหว (Cost, C) จากตารางที่ 5.5 ซึ่งอาคารตัวอย่างควรจะมีค่า B/C อย่างน้อยเท่ากับ 1 จึงจะมีความคุ้มค่าในการก่อสร้าง โดยจากผลการวิเคราะห์พบว่าหากประเมินความเสียหายด้วยคลื่นแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ในรอบ 50 ปี อาคารตัวอย่าง 4 ชั้น 10 ชั้น มีค่าอัตราส่วน B/C เท่ากับ 0.2 และ 0.09 ตามลำดับ ในส่วนของการวิเคราะห์พบว่าหากประเมินความเสียหายด้วยคลื่นแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ในรอบ 50 ปี พบว่าอาคารตัวอย่าง 4 ชั้น 10 ชั้น มีค่าอัตราส่วน B/C เท่ากับ 1.61 และ 2.53 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.4 จะต้องพิจารณาค่าอัตราส่วนระหว่างมูลค่าความเสียหายของอาคารกับมูลค่าค่ารั้อย้ายอาคารและสร้างใหม่

อาคาร ตัวอย่าง	มูลค่าความเสียหาย (บาท)		มูลค่าค่ารั้อย้าย และสร้างใหม่ (บาท)	Loss/Replacement cost ratio (LR ratio)	
	20%in50yr	5%in50yr		20%in50yr	5%in50yr
B4	4,940,000	12,180,000	12,680,000	0.39	0.96
B4E	4,570,000	9,130,000	14,570,000	0.31	0.63
B10	12,820,000	41,370,000	41,370,000	0.31	1.0
B10E	12,250,000	25,800,000	47,540,000	0.26	0.54

ตารางที่ 5.5 ค่าอัตราส่วนมูลค่าความเสียหายที่ลดลงเมื่อก่อสร้างอาคารตามมาตรฐานอาคารรับแรงแผ่นดินไหวต่อค่าก่อสร้างที่เพิ่มขึ้นสำหรับอาคารรับแรงแผ่นดินไหว (B/C ratio)

อาคารตัวอย่าง	ค่าก่อสร้างที่เพิ่มขึ้น สำหรับอาคารรับ แรงแผ่นดินไหว (Additional Cost, C)	มูลค่าความเสียหายที่ลดลง เมื่อก่อสร้างอาคารตาม มาตรฐานอาคารรับแรง แผ่นดินไหว (Benefit ,B)		B/C ratio	
		20%in50yr	5%in50yr	20%in50yr	5%in50yr
4 ชั้น	1,890,000	370,000	3,050,000	0.20	1.61
10 ชั้น	6,170,000	570,000	15,580,000	0.09	2.53

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเสียหายของอาคารตัวอย่างจำนวน 4 อาคารก่อสร้างในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ได้แก่ อาคารพักอาศัยสูง 4 ชั้นโดยไม่ได้ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว (B4) อาคารพักอาศัยสูง 4 ชั้นโดยออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว (B4E) อาคารพักอาศัยสูง 10 ชั้นโดยไม่ได้ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว (B10) และอาคารพักอาศัยสูง 10 ชั้นโดยออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหว (B10E) สำหรับอาคารที่ไม่ได้ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหวนั้นจะออกแบบตามมาตรฐาน ACI-318 โดยคิดผลของน้ำหนักบรรทุก แรงลม และการรวมแรงตามกฎกระทรวงฉบับที่ 6 ส่วนอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวนั้นได้พิจารณาผลของแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐาน มยผ.1302 เพิ่มเติม ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างอาคารพบว่าเหล็กเสริมหลักที่ออกแบบไว้สำหรับอาคารไม่ได้พิจารณาผลของแผ่นดินไหวมีเพียงพอ จึงเพิ่มเติมเฉพาะเหล็กปลอกเพื่อให้ได้ระดับความเหนียวของอาคารตามเกณฑ์

ในการประเมินความเสียหายนั้น ใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวซึ่งโอกาสเกิดจะเกินค่าระบุมีเพียง 5% และ 20% ในรอบ 50 ปี (5% and 20% probability of exceedance in 50 years) ตามเกณฑ์ในมาตรฐานการวิเคราะห์ประเมินอาคาร ASCE 41 โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวทั้งหมด 26 คู่คลื่นในแต่ละระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว ซึ่งเลือกจากฐานข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวในอดีตที่มีลักษณะเชิงสเปกตรัมใกล้เคียงกับสเปกตรัมออกแบบ

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างแบบอินอีลาสติกเชิงประวัติเวลา พบว่าเมื่อเพิ่มระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวจากระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่โอกาสเกิดมีเพียง 20% ในรอบ 50 ปีเป็นระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่โอกาสเกิดมีเพียง 5% ในรอบ 50 ปี ความเสียหายของอาคารจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวที่มีระดับความรุนแรงมากกว่า แรงที่กระทำในแต่ละชั้นและแต่ละชั้นส่วนก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยส่งผลให้ผลตอบสนองของอาคารมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเมื่อพิจารณาค่าการเคลื่อนตัวของอาคารจะพบว่า เมื่อวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดเกิน 5% ในรอบ 50 ปี ค่าการเคลื่อนตัวของอาคารไม่ได้กลับสู่ตำแหน่งเดิมเนื่องจากอาคารมีพฤติกรรมแบบอินอีลาสติกและชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนของอาคารเกิดการครากแล้ว

ในการพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเสียหายทางกายภาพ พบว่าในอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวกับอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว เมื่อวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดเกิน 20% ในรอบ 50 ปี ค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากชิ้นส่วนส่วนใหญ่ของอาคารยังคงมีพฤติกรรมแบบอีลาสติก เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดเกิน 5% ในรอบ 50 ปี ค่าเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ยังคงมีค่าใกล้เคียงกันแม้ว่าจะมีชิ้นส่วนบางชิ้นส่วนเกิดการครากและอาคารเริ่มมีพฤติกรรมแบบอินอีลาสติกแต่ค่าการเสียรูปของชิ้นส่วนส่วนใหญ่ยังไม่ถึงขีดจำกัดการสูญเสียกำลัง ในส่วนของอาคารสูง 10 ชั้น พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ยังคงมีความแตกต่างกันไม่มาก สำหรับการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวระดับ

ความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ในรอบ 50 ปี แต่ในส่วนของกรณีวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ในรอบ 50 ปี ค่าเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์มีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยมีอาคารตัวอย่างบางส่วนเกิดการวิบัติ ทั้งนี้เนื่องมาจากชั้นส่วนของอาคารส่วนใหญ่เริ่มเกิดการสูญเสียกำลัง โดยเฉพาะอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวซึ่งเกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์คงค้างมากกว่าอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

จากนั้นได้ทำการประมาณค่าความเสียหายของแต่ละอาคารด้วยโปรแกรม PACT แต่เนื่องจากโปรแกรมใช้ฐานข้อมูลราคาค่าซ่อมแซมของสหรัฐอเมริกา จึงทำการพิจารณาความสมเหตุสมผลของมูลค่าความเสียหายของอาคารที่ได้ ซึ่งพบว่าโปรแกรมจะให้ค่าสูงกว่าการประมาณราคาจากฐานข้อมูลในประเทศไทยค่อนข้างมากแม้จะปรับเทียบค่าโดยใช้ฐานราคาค่าก่อสร้างที่แตกต่างกันแล้ว ดังนั้นผลการประเมินที่ได้จึงสามารถใช้ในเชิงเปรียบเทียบความเสียหายและความคุ้มค่าในการก่อสร้างของอาคารตัวอย่างเท่านั้น แต่ไม่สามารถระบุมูลค่าความเสียหายของอาคารของไทยได้อย่างถูกต้องใกล้เคียงความจริง

ในการพิจารณาเปรียบเทียบมูลค่าความเสียหายของอาคารที่ออกแบบด้วยระบบโครงสร้างที่แตกต่างกัน ได้แก่ โครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวจำกัด (intermediate RC moment resisting frame, IMF) สำหรับอาคารที่ออกแบบให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหว และ โครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบธรรมดา (ordinary RC moment resisting frame, OMF) สำหรับอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแผ่นดินไหวด้วยอัตราส่วนระหว่างมูลค่าความเสียหายของอาคารกับมูลค่าทรัพย์สินอาคารแล้วสร้างใหม่ (LC ratio) พบว่าในการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ในรอบ 50 ปี ความเสียหายระหว่างอาคารทั้ง 2 ระบบมีความแตกต่างกันไม่มาก เนื่องจากความเสียหายส่วนใหญ่เกิดจากกำแพงอิฐมวลฉนวนซึ่งเป็นชั้นส่วนโครงสร้างที่ไม่ได้พิจารณาผลของแรงแผ่นดินไหวอยู่แล้ว แต่เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหวระดับความรุนแรงที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ในรอบ 50 ปี พบว่าอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวมีค่าสูง โดยมีค่าอัตราส่วน LC สำหรับอาคารสูง 4 ชั้นและ 10 ชั้น เท่ากับ 0.94 และ 1.0 ตามลำดับ ซึ่งหมายถึงอาคารมีแนวโน้มที่จะเสียหายรุนแรงหรือวิบัติ

การพิจารณาความคุ้มค่าของการออกแบบอาคารให้สามารถต้านทานแผ่นดินไหวด้วยอัตราส่วน B/C พบว่า ในการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ค่าอัตราส่วน B/C มีค่าต่ำเนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นยังมีค่าน้อยกว่าค่าก่อสร้างที่เพิ่มสำหรับการก่อสร้างอาคารรับแรงแผ่นดินไหว แต่สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี เมื่อผลตอบสนองของอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวทำให้ชั้นส่วนรอยต่อระหว่างคานและเสาส่วนใหญ่เกิดความเสียหาย ในขณะที่อาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวเกิดความเสียหายเพียงบางส่วนเท่านั้น ทำให้อัตราส่วน B/C มีค่ามากกว่า 1 ดังนั้น ภายใต้แรงของแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรง การออกแบบอาคารเพื่อรับแรงแผ่นดินไหวย่อมมีความคุ้มค่าแม้ตามตัวอย่างที่ศึกษาจะเป็นเพียงการเพิ่มเหล็กปลอกในเสาและรอยต่อเสาคาน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความคุ้มค่าสำหรับการก่อสร้างอาคารรับแรงแผ่นดินไหวระหว่างอาคารที่มีความสูง 4 ชั้นและ 10 ชั้นจากค่าอัตราส่วน B/C พบว่าภายใต้ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี อาคารสูง 4 ชั้นมีความคุ้มค่าที่จะออกแบบรับ

แผ่นดินไหวมากกว่าอาคารสูง 10 ชั้น แต่เมื่อระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวเพิ่มขึ้น (โอกาสเกิดเกิน 5% ใน 50 ปี) ค่าอัตราส่วน B/C ของอาคารสูง 10 ชั้นกลับมีค่ามากกว่าอาคารสูง 4 ชั้น กล่าวคืออาคารสูง 10 ชั้นมีความคุ้มค่าที่จะออกแบบรับแผ่นดินไหวมากกว่าอาคารสูง 4 ชั้น

แม้ว่าโปรแกรม PACT นั้นจะเป็นโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์ความเสียหายในรูปแบบของมูลค่าซ่อมแซมอาคาร ซึ่งในปัจจุบันโปรแกรมที่สามารถทำงานได้เช่นเดียวกันนั้นมีน้อย แต่อย่างไรก็ตามการนำโปรแกรมดังกล่าวมาใช้งานในสภาพการก่อสร้างที่ต่างกันยังอาจต้องมีการพัฒนาปรับปรุงเพิ่มเติม เนื่องจากฐานข้อมูลของโปรแกรมยังไม่ครอบคลุมชนิดของชิ้นส่วนต่างๆ ของอาคารในประเทศไทยมากพอ อาทิเช่นขนาดและชนิดของรอยต่อคาน เป็นต้น และรวมถึงราคาค่าซ่อมแซมของชิ้นส่วนต่างๆ ทำให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ อาจไม่ครอบคลุมกรณีต่างๆ อย่างเพียงพอ

แม้ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าหากเกิดแผ่นดินไหวรุนแรงการออกแบบอาคารให้สามารถรับแรงแผ่นดินไหวนั้น มีความคุ้มค่าในแง่เศรษฐศาสตร์แต่ก็เป็นเพียงการประเมินทางการเงินเท่านั้น อย่างไรก็ตามการออกแบบแผ่นดินไหวนั้น ย่อมมีประโยชน์อย่างมากหากพิจารณาในแง่ของความปลอดภัยของชีวิตผู้อยู่อาศัยประกอบด้วย

## รายการอ้างอิง

- ACI. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI318). American Concrete Institute, 2008.
- ASCE. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-13). Reston, Virginia, American Society of Civil Engineers 2014.
- Performance Assessment Calculation Tool (PACT) Version 2.9.65. Applied Technology Council, LA.
- ATC. *Seismic Performance Assessment of Buildings, Prepared by the Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency*. Washington, DC: Applied Technology Council 2012, Report Number P-58.
- Byeon, J.S. "Economic on Seismic Rehabilitation of Existing Low-Rise Building in Korea." In *15th World Conference in Earthquake Engineering*. Portugal, 2012.
- Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3d Structure (Perform3D) Version 4.0. Computer Structures, Inc, Berkeley, CA.
- Computer Structures, Inc. *User's Guide: Perform 3d Version 4.0*. Berkeley, CA, 2008.
- Goulet, C. A., et al. "Evaluation of the Seismic Performance of a Code-Conforming Reinforced-Concrete Frame Building—from Seismic Hazard to Collapse Safety and Economic Losses." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 36, no. 13 (2007): 1973-1997.
- Haselton, C.B. *Beam-Column Element Model Calibrated for Predicting Flexural Response Leading to Global Collapse of Rc Frame Buildings*. 2007, PEER Report 2007/03.
- Mayes, R., et al. "Performance Based Design of Building to Assess Damage Downtime and Implement a Rating System." *Bulletin of The New Zealand Society for Earthquake Engineering* 46, (2013): 40-55.

Parvini sani, H. and M. Banazadeh. "Decision Analysis for Seismic Retrofit Based on Loss Estimation." In *15th World conference in Earthquake Engineering*. Portugal, 2012.

Ramirez, C. M., et al. "Expected Earthquake Damage and Repair Costs in Reinforced Concrete Frame Buildings." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 41, no. 11 (2012): 1455-1475.

Steiner, J.L., G.G. Deierlein and C.M. Ramirez. "Loss Estimation on Moment Resisting, Reinforced Concrete Buildings." In *2007 Earthquake Engineering Symposium for Young Researchers*. Seattle, WA, 2007.

Woo, J. *Lowering the Initial and Lifetime Costs of Isolation in Buildings*. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER), 2011.

Yeow, T.Z., et al. "Seismic Sustainability Assessment of Structural Systems: Frame or Wall Structures?" In *15th World conference in Earthquake Engineering*. Portugal, 2012.

กรมโยธาธิการและผังเมือง. มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.-1301). กรุงเทพมหานคร, กระทรวงมหาดไทย, 2550.

กรมโยธาธิการและผังเมือง. มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.-1302). กรุงเทพมหานคร, กระทรวงมหาดไทย, 2552.

กระทรวงมหาดไทย. กฎกระทรวงฉบับที่ 6 ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 กรุงเทพมหานคร, 2527.

## ภาคผนวก ก

### การออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหว

ในการออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหวตามที่ระบุในมาตรฐาน มยผ.-1302 นั้นจะมีรายละเอียดแตกต่างจากอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวก่อนข้างเยาะ ดังนั้นในบทนี้จะแสดงรายละเอียดของการออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหวทั้ง 4 ชั้นและ 10 ชั้น

อาคารตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 2 อาคาร ได้แก่อาคารหอพักอาศัยสูง 4 ชั้นและ 10 ชั้น ซึ่งในขั้นตอนแรกจะทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์เชิงเส้นโดยใช้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับออกแบบพื้นที่ในโซน 5 ของพื้นที่ในแ่งกรุงเทพฯที่ระบุไว้ใน มยผ.-1302 และใช้ค่าปรับแก้สเปกตรัมซึ่งถูกแสดงด้วยอัตราส่วนระหว่างตัวประกอบความสำคัญ (Important Factor, I) และค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (Response Modification Factor, R) เพื่อที่จะหาค่าแรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear,  $V_{LDP}$ ) และค่าคาบโมเมนต์แรกของอาคาร (Period,  $T_{LDP}$ ) ดังแสดงในตารางที่ ก.1 พบว่าค่าคาบโมเมนต์แรกของอาคาร 4 ชั้นมีค่าเท่ากับ 1.3 วินาที และมีค่าแรงเฉือนที่ฐานเท่ากับ 27 ตัน ในส่วนของอาคาร 10 ชั้นมีค่าคาบโมเมนต์แรกเท่ากับ 2.84 วินาที และมีค่าแรงเฉือนที่ฐานเท่ากับ 101 ตัน อย่างไรก็ตามมาตรฐาน มยผ.-1302 ก็ได้มีข้อกำหนดไว้ว่าหากค่าแรงเฉือนที่ฐานที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์เชิงเส้น (Modal Base Shear,  $V_t$ ) มีค่าน้อยกว่า 85% ของค่าแรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear,  $V$ ) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า (Equivalent Lateral Force Procedure) จะต้องทำการปรับเพิ่มค่าแรงภายในจากวิธีสเปกตรัมการตอบสนองแบบโมเมนต์โดยคูณเพิ่มด้วยค่า  $0.85V/V_t$  ดังนั้นจึงต้องทำการวิเคราะห์เพื่อหาแรงเฉือนที่ฐานจากวิธีแรงสถิตเทียบเท่าด้วย ดังแสดงในตารางที่ ก.2 เพื่อที่จะคำนวณค่าปรับแก้ใหม่โดยตัวแปรต่างๆสามารถคำนวณได้จากสมการที่ ก.1 ถึง ก.3 เมื่อได้ค่าปรับแก้ใหม่แล้วจึงทำการวิเคราะห์ค่าแรงภายในด้วยวิธีพลศาสตร์เชิงเส้นอีกครั้ง และนำแรงภายในที่ได้มาคำนวณออกแบบ โดยรายละเอียดการคำนวณได้แสดงไว้ใน

ตารางที่ ก.1 ผลการวิเคราะห์แรงเฉือนที่ฐานเบื้องต้นด้วยวิธีพลศาสตร์เชิงเส้น

Building	I	R	Scale Factor (I/R)	$T_{LDP}$ (s)	$V_{LDP}$ (tons)
B4E	1.25	5	0.25	1.3	27
B10E	1.25	5	0.25	2.84	40



ตารางที่ ก.2 ผลการวิเคราะห์แรงเฉือนที่ฐานด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าและค่าปรับแก้ความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหว

Building	I	R	H (m)	$T_{cal}$ (s)	$S_a$	W (tons)	$C_s$	$V_{ELF}$	$V_{LDP}$	New Scale Factor
B4E	1.25	5	12	0.36	0.15	1,007	0.038	38	27	0.30
B10E	1.25	5	30	0.9	0.17	2,380	0.043	101	40	0.54

$$T_{cal} = T_{DLP} \leq 0.03H \quad (ก.1)$$

$$C_s = S_a \left( \frac{I}{R} \right) \quad (ก.2)$$

$$V_{ELF} = C_s W \quad (ก.3)$$

โดยที่;

- $V_{ELF}$  คือ แรงเฉือนที่ฐานอาคารจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์เชิงเส้น (ตัน)
- $V_{LDP}$  คือ แรงเฉือนที่ฐานอาคารจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า (ตัน)
- W คือ น้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผลของอาคาร
- $T_{LDP}$  คือ ค่าคาบการสั่นพื้นฐานจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์เชิงเส้น
- $T_{cal}$  คือ ค่าคาบการสั่นพื้นฐานสำหรับการคำนวณวิธีแรงสถิตเทียบเท่า
- $C_s$  คือ สัมประสิทธิ์ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหว
- $S_a$  คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ a S ที่คาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร ( $T_{cal}$ )
- I คือ ตัวประกอบความสำคัญของอาคาร
- R คือ ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง
- H คือ ความสูงของอาคาร

ตารางที่ ก.3 รายละเอียดแรงที่ใช้ในการออกแบบอาคารที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

No.	Model	Section	Mu,end tons-m	Mu+,end tons-m	Mu+,mid tons-m	Vu tons	Ru tons	b (cm)	h (cm)	Cov. (cm)	d (cm)	Le (cm)	Ag (cm <sup>2</sup> )
1	B4E	B 40x20-2m	4.62	2.7	0	6	2.75	20	40	4	36	200	800
2	B4E	B 40x20-4m	3.25	1.81	2.45	4.6	1.9	20	40	4	36	400	800
3	B4E	B 40x20-5m	8.75	0.3	6.85	12.82	6.55	20	40	4	36	500	800
4	B10E	B 40x20-2m	9.5	8.6	0.32	12.85	2.75	20	40	4	36	200	800
5	B10E	B 40x20-4m	7.6	5.78	2.5	5.2	1.9	20	40	4	36	400	800
6	B10E	B 40x20-5m	11.171	3.85	6.85	12.7	6.55	20	40	4	36	500	800

ตารางที่ ก.4 การออกแบบเหล็กเสริมรับโมเมนต์ดัดของอาคารที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

No.	Model	Section	Negative at End				Positive at End				Positive at mid									
			try no.size	As (cm <sup>2</sup> )	$\rho$ (cm <sup>2</sup> )	$\phi$ Mn a (tons)	try no.size	As (cm <sup>2</sup> )	$\rho$ (cm <sup>2</sup> )	$\phi$ Mn a (tons)	try no.size	As (cm <sup>2</sup> )	$\rho$ (cm <sup>2</sup> )	$\phi$ Mn a (tons)						
1	B4E	B 40x20-2m	2	16	4.02	0.0056	3.94	4.93	3	12	3.39	0.0047	3.33	4.19	3	12	3.39	0.0047	3.33	4.19
2	B4E	B 40x20-4m	3	12	3.39	0.0047	3.33	4.19	3	12	3.39	0.0047	3.33	4.19	3	12	3.39	0.0047	3.33	4.19
3	B4E	B 40x20-5m	3	20	9.42	0.0131	9.24	10.65	2	16	4.02	0.0056	3.94	4.93	3	16	6.03	0.0084	5.91	7.18
4	B10E	B 40x20-2m	3	20	9.42	0.0131	9.24	10.65	3	20	9.42	0.0131	9.24	10.65	3	12	3.39	0.0047	3.33	4.19
5	B10E	B 40x20-4m	3	20	9.42	0.0131	9.24	10.65	3	16	6.03	0.0084	5.91	7.18	3	12	3.39	0.0047	3.33	4.19
6	B10E	B 40x20-5m	4	20	12.57	0.0175	12.32	13.50	2	16	4.02	0.0056	3.94	4.93	3	16	6.03	0.0084	5.91	7.18

ตารางที่ ก.5 การออกแบบเหล็กเสริมรับแรงเฉือนของอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

No.	Model	Section	Ru	Sw to right			Sw to Left			Vcal	Vu	Vc	φVs	Str.	try		Av		Spacing-used (cm)		φVn
				RL	RR	tons	RL	RR	tons						no. size	cm <sup>2</sup>	Cri Zone	Out Cri	tons		
1	B4E	B 40x20-2m	4.56	1.81 D	7.31 U	1.81 D	7.31 U	1.81 D	7.31 U	7.31	7.31	5.91	2.69	Req.	1	9	1.27	9	15	11.25	
2	B4E	B 40x20-4m	2.10	0.20 D	4.00 U	0.20 D	4.00 U	0.20 D	4.00	4.60	5.91	-0.50	Not Req.	1	9	1.27	9	15	11.25		
3	B4E	B 40x20-5m	3.11	3.44 U	9.66 U	3.44 U	9.66 U	3.44 U	9.66	12.82	5.91	9.17	Req.	1	9	1.27	9	9	15.41		
4	B10E	B 40x20-2m	10.65	7.90 D	13.40 U	7.90 D	13.40 U	7.90 D	13.40	13.40	5.91	9.85	Req.	1	9	1.27	9	9	15.41		
5	B10E	B 40x20-4m	4.46	2.56 D	6.36 U	2.56 D	6.36 U	2.56 D	6.36	6.36	5.91	1.57	Req.	1	9	1.27	9	15	11.25		
6	B10E	B 40x20-5m	3.69	2.86 U	10.24 U	2.86 U	10.24 U	2.86 U	10.24	12.70	5.91	9.03	Req.	1	9	1.27	9	9	15.41		

## ภาคผนวก ข

### พารามิเตอร์และกำลังในการรับแรงสำหรับสร้างแบบจำลองแบบไม่เชิงเส้นของ ชั้นส่วน

#### ข.1 แบบจำลองไม่เชิงเส้นของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

ตารางที่ ข.1 พารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชั้นส่วนคานอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี

Type	Section	Behavior	r	v	FY/FU	DU	DL	DR	FR/FU
2 m	40x20	Negative action	0.00	2.56	0.83	0.020	0.020	0.03	0.20
		Positive action	0.00	2.56	0.83	0.020	0.020	0.03	0.20
4 m	40x20	Negative action	0.00	1.23	0.83	0.020	0.020	0.03	0.20
		Positive action	0.00	1.23	0.83	0.020	0.020	0.03	0.20
5 m	40x20	Negative action	0.30	2.32	0.83	0.022	0.022	0.04	0.20
		Positive action	-0.30	2.32	0.83	0.025	0.025	0.05	0.20

ตารางที่ ข.2 พารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชั้นส่วนคานอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี

Type	Section	Behavior	r	v	FY/FU	DU	DL	DR	FR/FU
2 m	40x20	Negative action	0.00	6.12	0.83	0.01	0.010	0.016	0.20
		Positive action	0.00	6.12	0.83	0.01	0.010	0.016	0.20
4 m	40x20	Negative action	0.00	2.52	0.83	0.020	0.020	0.03	0.20
		Positive action	0.00	2.52	0.83	0.020	0.020	0.03	0.20
5 m	40x20	Negative action	-0.30	3.22	0.83	0.022	0.022	0.04	0.20
		Positive action	0.30	3.22	0.83	0.025	0.025	0.05	0.20

ตารางที่ ข.3 พารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนเสาอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ได้ไม่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดเกิน 20% ใน 50 ปี

Floor	Type	Section	f	$\rho_c$	v	FY/FU	DU	DL	DR/DL	FR/FU
1	C1A	30x30	0.12	0.001	1.20	0.84	0.015	0.01	0.015	0.19
	C1	30x30	0.18	0.001	1.54	0.84	0.014	0.01	0.014	0.17
	C2A	30x30	0.18	0.002	2.06	0.84	0.015	0.01	0.015	0.17
	C2	30x30	0.25	0.002	2.26	0.85	0.013	0.01	0.013	0.14
2	C1A	30x30	0.10	0.001	0.92	0.84	0.015	0.02	0.015	0.20
	C1	30x30	0.14	0.001	0.98	0.84	0.015	0.01	0.015	0.18
	C2A	30x30	0.14	0.002	1.30	0.84	0.016	0.02	0.016	0.18
	C2	30x30	0.19	0.002	1.32	0.84	0.014	0.01	0.014	0.16
3	C1A	30x30	0.07	0.001	0.78	0.83	0.015	0.02	0.015	0.20
	C1	30x30	0.10	0.001	0.89	0.84	0.015	0.02	0.015	0.20
	C2A	30x30	0.09	0.002	1.30	0.84	0.017	0.02	0.017	0.20
	C2	30x30	0.13	0.002	1.34	0.84	0.016	0.02	0.016	0.19
4	C1A	25x25	0.05	0.002	0.93	0.83	0.018	0.02	0.018	0.20
	C1	25x25	0.09	0.002	1.02	0.83	0.018	0.02	0.018	0.20
	C2A	25x25	0.07	0.002	1.18	0.83	0.018	0.02	0.018	0.20
	C2	25x25	0.11	0.002	1.21	0.84	0.017	0.02	0.017	0.19
R	C1A	25x25	0.02	0.002	0.56	0.83	0.018	0.02	0.018	0.20
	C1	25x25	0.03	0.002	0.69	0.83	0.018	0.02	0.018	0.20
	C2A	25x25	0.02	0.002	0.63	0.83	0.018	0.02	0.018	0.20
	C2	25x25	0.04	0.002	0.70	0.83	0.018	0.02	0.018	0.20

ตารางที่ ข.4 พารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนเสาอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดเกิน 5% ใน 50 ปี

Floor	Type	Section	f	$\rho_c$	v	FY/FU	DU	DL	DR/DL	FR/FU
1	C1A	30x30	0.18	0.001	1.85	0.84	0.01	0.014	1.27	0.17
	C1	30x30	0.21	0.001	2.81	0.85	0.01	0.013	1.26	0.15
	C2A	30x30	0.28	0.002	4.48	0.85	0.01	0.010	1.45	0.13
	C2	30x30	0.33	0.002	4.54	0.86	0.01	0.009	1.43	0.01
2	C1A	30x30	0.14	0.001	2.06	0.84	0.01	0.015	1.28	0.18
	C1	30x30	0.17	0.001	2.47	0.84	0.01	0.014	1.28	0.17
	C2A	30x30	0.22	0.002	3.19	0.85	0.01	0.014	1.33	0.15
	C2	30x30	0.26	0.002	3.09	0.85	0.01	0.013	1.31	0.14
3	C1A	30x30	0.09	0.001	1.57	0.83	0.02	0.015	1.29	0.20
	C1	30x30	0.12	0.001	2.26	0.84	0.01	0.015	1.29	0.19
	C2A	30x30	0.14	0.002	3.10	0.84	0.02	0.016	1.35	0.19
	C2	30x30	0.17	0.002	3.04	0.84	0.01	0.015	1.34	0.17
4	C1A	25x25	0.07	0.002	1.97	0.83	0.02	0.018	1.43	0.20
	C1	25x25	0.10	0.002	2.20	0.84	0.02	0.018	1.43	0.20
	C2A	25x25	0.10	0.002	2.82	0.84	0.02	0.018	1.43	0.20
	C2	25x25	0.13	0.002	2.75	0.84	0.02	0.017	1.42	0.19
R	C1A	25x25	0.02	0.002	0.96	0.83	0.02	0.018	1.43	0.20
	C1	25x25	0.04	0.002	1.06	0.83	0.02	0.018	1.43	0.20
	C2A	25x25	0.03	0.002	1.36	0.83	0.02	0.018	1.43	0.20
	C2	25x25	0.05	0.002	1.39	0.83	0.02	0.018	1.43	0.20

ตารางที่ ข.5 ค่ากำลังในการรับแรงสำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนคานอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Type	Section	Positive action (kN)		Negative action (kN)		Shear Capacity (kN)
		FY	FU	FY	FU	
2 m	40x20	47	57	47	57	167
4 m	40x20	47	57	47	57	167
5 m	40x20	55	66	120	146	214

ตารางที่ ข.6 ค่ากำลังในการรับแรงสำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนเสาอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Floor	Type	Section	FU			PB/PC	MO/MB	Shear Capacity (kN)
			Tension (PT) (kN)	Compression (PC) (kN)	Bending at balance point (kN-m)			
1	C1A	30x30	1,258	3,787	155	0.19	0.81	99
	C1	30x30	1,258	3,787	155	0.19	0.81	99
	C2A	30x30	795	3,341	134	0.24	0.66	106
	C2	30x30	795	3,341	134	0.24	0.66	106
2	C1A	30x30	1,258	3,777	171	0.21	0.79	107
	C1	30x30	1,258	3,777	171	0.21	0.79	107
	C2A	30x30	890	3,357	144	0.27	0.64	115
	C2	30x30	890	3,357	144	0.27	0.64	115
3	C1A	30x30	1,258	3,777	171	0.21	0.79	107
	C1	30x30	1,258	3,777	171	0.21	0.79	107
	C2A	30x30	890	3,357	144	0.27	0.64	115
	C2	30x30	890	3,357	144	0.27	0.64	115
4	C1A	25x25	1,224	2,983	109	0.14	0.86	83
	C1	25x25	1,224	2,983	109	0.14	0.86	83
	C2A	25x25	782	2,543	90	0.21	0.78	83
	C2	25x25	782	2,543	90	0.21	0.78	83
R	C1A	25x25	1,224	2,983	109	0.14	0.86	83
	C1	25x25	1,224	2,983	109	0.14	0.86	83
	C2A	25x25	782	2,543	90	0.21	0.78	83
	C2	25x25	782	2,543	90	0.21	0.78	83

ข.2 แบบจำลองไม่เชิงเส้นของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

ตารางที่ ข.7 พารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนคานอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี

Type	Section	Behavior	r	v	FY/FU	DU	DL	DR	FR/FU
2 m	40x20	Negative action	0.03	2.56	0.83	0.025	0.025	0.05	0.20
		Positive action	-0.03	2.56	0.83	0.025	0.025	0.05	0.20
4 m	40x20	Negative action	0.00	1.23	0.83	0.025	0.025	0.05	0.20
		Positive action	0.00	1.23	0.83	0.025	0.025	0.05	0.20
5 m	40x20	Negative action	0.29	2.32	0.83	0.022	0.022	0.04	0.20
		Positive action	-0.29	2.32	0.83	0.025	0.025	0.05	0.20

ตารางที่ ข.8 พารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชั้นส่วนคานอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี

Type	Section	Behavior	r	v	FY/FU	DU	DL	DR	FR/FU
2 m	40x20	Positive action	0.03	6.12	0.83	0.020	0.020	0.04	0.20
		Negative action	-0.03	6.12	0.83	0.020	0.020	0.04	0.20
4 m	40x20	Positive action	0.00	2.52	0.83	0.025	0.025	0.05	0.20
		Negative action	0.00	2.52	0.83	0.025	0.025	0.05	0.20
5 m	40x20	Positive action	0.29	3.22	0.83	0.022	0.022	0.04	0.20
		Negative action	-0.29	3.22	0.83	0.025	0.025	0.05	0.20

ตารางที่ ข.9 พารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชั้นส่วนเสาอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี

Floor	Type	Section	f	$\rho_c$	v	FY/FU	DU	DL	DR/DL	FR/FU
1	C1A	30x30	0.12	0.004	1.20	0.84	0.025	0.025	1.71	0.19
	C1	30x30	0.18	0.004	1.54	0.84	0.023	0.023	1.69	0.17
	C2A	30x30	0.18	0.004	2.06	0.84	0.023	0.023	1.68	0.17
	C2	30x30	0.25	0.004	2.26	0.85	0.021	0.021	1.64	0.14
2	C1A	30x30	0.10	0.004	0.92	0.84	0.026	0.026	1.73	0.20
	C1	30x30	0.14	0.004	0.98	0.84	0.024	0.024	1.71	0.18
	C2A	30x30	0.14	0.004	1.30	0.84	0.024	0.024	1.71	0.18
	C2	30x30	0.19	0.004	1.32	0.84	0.022	0.023	1.68	0.16
3	C1A	30x30	0.07	0.004	0.78	0.83	0.026	0.026	1.73	0.20
	C1	30x30	0.10	0.004	0.89	0.84	0.026	0.026	1.73	0.20
	C2A	30x30	0.09	0.004	1.30	0.84	0.026	0.026	1.73	0.20
	C2	30x30	0.13	0.004	1.34	0.84	0.024	0.025	1.71	0.19
4	C1A	25x25	0.05	0.003	0.93	0.83	0.023	0.023	1.64	0.20
	C1	25x25	0.09	0.003	1.02	0.83	0.023	0.023	1.64	0.20
	C2A	25x25	0.07	0.005	1.18	0.83	0.029	0.029	1.80	0.20
	C2	25x25	0.11	0.005	1.21	0.84	0.028	0.028	1.79	0.19
R	C1A	25x25	0.02	0.003	0.56	0.83	0.023	0.023	1.64	0.20
	C1	25x25	0.03	0.003	0.69	0.83	0.023	0.023	1.64	0.20
	C2A	25x25	0.02	0.005	0.63	0.83	0.029	0.029	1.80	0.20
	C2	25x25	0.04	0.005	0.70	0.83	0.029	0.029	1.80	0.20



ตารางที่ ข.10 พารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนเสาอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้น ที่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดเกิน 5% ใน 50 ปี

Floor	Type	Section	f	$\rho_c$	v	FY/FU	DU	DL	DR/DL	FR/FU
1	C1A	30x30	0.18	0.004	1.85	0.84	0.023	0.023	1.69	0.17
	C1	30x30	0.21	0.004	2.81	0.85	0.022	0.022	1.66	0.15
	C2A	30x30	0.28	0.004	4.48	0.85	0.017	0.017	1.80	0.13
	C2	30x30	0.33	0.004	4.54	0.86	0.015	0.015	1.75	0.11
2	C1A	30x30	0.14	0.004	2.06	0.84	0.024	0.024	1.71	0.18
	C1	30x30	0.17	0.004	2.47	0.84	0.023	0.023	1.69	0.17
	C2A	30x30	0.22	0.004	3.19	0.85	0.021	0.021	1.68	0.15
	C2	30x30	0.26	0.004	3.09	0.85	0.020	0.020	1.64	0.14
3	C1A	30x30	0.09	0.004	1.57	0.83	0.026	0.026	1.73	0.20
	C1	30x30	0.12	0.004	2.26	0.84	0.025	0.025	1.72	0.19
	C2A	30x30	0.14	0.004	3.10	0.84	0.024	0.024	1.72	0.19
	C2	30x30	0.17	0.004	3.04	0.84	0.023	0.023	1.70	0.17
4	C1A	25x25	0.07	0.003	1.97	0.83	0.023	0.023	1.64	0.20
	C1	25x25	0.10	0.003	2.20	0.84	0.023	0.023	1.64	0.20
	C2A	25x25	0.10	0.005	2.82	0.84	0.029	0.029	1.80	0.20
	C2	25x25	0.13	0.005	2.75	0.84	0.027	0.028	1.78	0.19
R	C1A	25x25	0.02	0.003	0.96	0.83	0.023	0.023	1.64	0.20
	C1	25x25	0.04	0.003	1.06	0.83	0.023	0.023	1.64	0.20
	C2A	25x25	0.03	0.005	1.36	0.83	0.029	0.029	1.80	0.20
	C2	25x25	0.05	0.005	1.39	0.83	0.029	0.029	1.80	0.20

ตารางที่ ข.11 ค่ากำลังในการรับแรงสำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนคานอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้น ที่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Type	Section	Positive action (kN)		Negative action (kN)		Shear Capacity (kN)
		FY	FU	FY	FU	
2 m	40x20	47	57	56	68	237
4 m	40x20	47	57	56	68	237
5 m	40x20	56	68	122	147	237

ตารางที่ ข.12 ค่ากำลังในการรับแรงสำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชั้นส่วนเสาอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Floor	Type	Section	FU			PB/PC	MO/MB	Shear Capacity (kN)
			Tension (PT) (kN)	Compression (PC) (kN)	Bending at balance point (kN-m)			
1	C1A	30x30	1,258	3,787	155	0.19	0.81	105
	C1	30x30	1,258	3,787	155	0.19	0.81	105
	C2A	30x30	795	3,341	134	0.24	0.66	113
	C2	30x30	795	3,341	134	0.24	0.66	113
2	C1A	30x30	1,258	3,777	171	0.21	0.79	105
	C1	30x30	1,258	3,777	171	0.21	0.79	105
	C2A	30x30	890	3,357	144	0.27	0.64	113
	C2	30x30	890	3,357	144	0.27	0.64	113
3	C1A	30x30	1,258	3,777	171	0.21	0.79	105
	C1	30x30	1,258	3,777	171	0.21	0.79	105
	C2A	30x30	890	3,357	144	0.27	0.64	113
	C2	30x30	890	3,357	144	0.27	0.64	113
4	C1A	25x25	1,224	2,983	109	0.14	0.86	80
	C1	25x25	1,224	2,983	109	0.14	0.86	80
	C2A	25x25	782	2,543	90	0.21	0.78	81
	C2	25x25	782	2,543	90	0.21	0.78	81
R	C1A	25x25	1,224	2,983	109	0.14	0.86	80
	C1	25x25	1,224	2,983	109	0.14	0.86	80
	C2A	25x25	782	2,543	90	0.21	0.78	81
	C2	25x25	782	2,543	90	0.21	0.78	81

ข.3 แบบจำลองไม่เชิงเส้นของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

ตารางที่ ข.13 พารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชั้นส่วนคานอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดเกิน 20% ใน 50 ปี

Type	Section	Behavior	r	v	FY/FU	DU	DL	DR	FR/FU
2 m	40x20	Negative action	0.17	3.19	0.83	0.023	0.023	0.04	0.20
		Positive action	-0.17	3.19	0.83	0.021	0.021	0.04	0.20
4 m	40x20	Negative action	0.04	1.26	0.83	0.019	0.019	0.03	0.20
		Positive action	-0.04	1.26	0.83	0.016	0.016	0.02	0.20
5 m	40x20	Negative action	0.52	2.33	0.83	0.020	0.020	0.03	0.20
		Positive action	-0.52	2.33	0.83	0.025	0.025	0.05	0.20

ตารางที่ ข.14 พารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชั้นส่วนคานอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดเกิน 5% ใน 50 ปี

Type	Section	Behavior	r	v	FY/FU	DU	DL	DR	FR/FU
2 m	40x20	Negative action	0.17	7.79	0.83	0.018	0.018	0.03	0.20
		Positive action	-0.17	7.79	0.83	0.017	0.017	0.03	0.20
4 m	40x20	Negative action	0.04	2.68	0.83	0.019	0.019	0.03	0.20
		Positive action	-0.04	2.68	0.83	0.016	0.016	0.02	0.20
5 m	40x20	Negative action	0.52	3.31	0.83	0.019	0.020	0.03	0.20
		Positive action	-0.52	3.31	0.83	0.024	0.025	0.05	0.20



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข.15 พารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนเสาอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น  
ที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดเกิน  
20% ใน 50 ปี

Floor	Type	Section	f	$\rho_c$	v	FY/FU	DU	DL	DR/DL	FR/FU
1	C1A	40x40	0.17	0.001	0.70	0.84	0.012	0.012	1.10	0.17
	C1	40x40	0.23	0.001	1.43	0.85	0.011	0.011	1.09	0.15
	C2A	40x40	0.25	0.001	1.05	0.85	0.010	0.011	1.09	0.14
	C2	40x40	0.32	0.001	1.11	0.86	0.009	0.009	1.08	0.11
2	C1A	40x40	0.16	0.001	0.50	0.84	0.012	0.012	1.10	0.18
	C1	40x40	0.21	0.001	0.54	0.85	0.011	0.011	1.09	0.15
	C2A	40x40	0.23	0.001	0.76	0.85	0.011	0.011	1.09	0.15
3	C2	40x40	0.29	0.001	1.07	0.85	0.010	0.010	1.08	0.12
	C1A	40x40	0.14	0.001	0.53	0.84	0.012	0.012	1.10	0.18
	C1	40x40	0.19	0.001	0.65	0.84	0.011	0.012	1.10	0.16
	C2A	40x40	0.20	0.001	1.01	0.85	0.011	0.011	1.10	0.16
4	C2	40x40	0.26	0.001	0.88	0.85	0.010	0.010	1.09	0.14
	C1A	35x35	0.16	0.001	0.56	0.84	0.013	0.013	1.20	0.18
	C1	35x35	0.22	0.001	0.67	0.85	0.012	0.012	1.19	0.15
	C2A	35x35	0.22	0.001	0.98	0.85	0.012	0.012	1.17	0.15
5	C2	35x35	0.29	0.001	1.37	0.85	0.010	0.011	1.15	0.13
	C1A	35x35	0.14	0.001	0.63	0.84	0.014	0.014	1.21	0.19
	C1	35x35	0.19	0.001	0.72	0.84	0.013	0.013	1.20	0.16
	C2A	35x35	0.18	0.001	1.06	0.84	0.012	0.013	1.17	0.17
6	C2	35x35	0.24	0.001	0.99	0.85	0.011	0.011	1.16	0.14
	C1A	35x35	0.11	0.001	0.58	0.84	0.014	0.014	1.21	0.19
	C1	35x35	0.16	0.001	0.66	0.84	0.013	0.013	1.20	0.18
	C2A	35x35	0.15	0.001	0.98	0.84	0.013	0.013	1.18	0.18
7	C2	35x35	0.20	0.001	1.02	0.85	0.012	0.012	1.17	0.16
	C1A	30x30	0.12	0.001	0.75	0.84	0.015	0.015	1.29	0.19
	C1	30x30	0.17	0.001	0.83	0.84	0.014	0.014	1.27	0.17
	C2A	30x30	0.15	0.001	1.06	0.84	0.014	0.014	1.28	0.18
8	C2	30x30	0.22	0.001	1.08	0.85	0.013	0.013	1.26	0.15
	C1A	30x30	0.09	0.001	0.70	0.83	0.015	0.015	1.29	0.20
	C1	30x30	0.13	0.001	0.79	0.84	0.015	0.015	1.28	0.19
	C2A	30x30	0.12	0.001	0.96	0.84	0.015	0.015	1.29	0.19
9	C2	30x30	0.16	0.001	1.00	0.84	0.014	0.014	1.28	0.17
	C1A	30x30	0.06	0.001	0.65	0.83	0.015	0.015	1.29	0.20
	C1	30x30	0.10	0.001	0.76	0.84	0.015	0.015	1.29	0.20
	C2A	30x30	0.08	0.001	0.82	0.83	0.015	0.015	1.29	0.20
10	C2	30x30	0.12	0.001	0.88	0.84	0.015	0.015	1.29	0.19
	C1A	25x25	0.05	0.002	0.73	0.83	0.018	0.018	1.43	0.20
	C1	25x25	0.08	0.002	0.83	0.83	0.018	0.018	1.43	0.20
	C2A	25x25	0.07	0.002	0.76	0.83	0.018	0.018	1.43	0.20
R	C2	25x25	0.11	0.002	0.81	0.84	0.017	0.018	1.43	0.20
	C1A	25x25	0.02	0.002	0.52	0.83	0.018	0.018	1.43	0.20
	C1	25x25	0.03	0.002	0.65	0.83	0.018	0.018	1.43	0.20
	C2A	25x25	0.03	0.002	0.42	0.83	0.018	0.018	1.43	0.20
	C2	25x25	0.04	0.002	0.50	0.83	0.018	0.018	1.43	0.20

ตารางที่ ข.16 พารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนเสาอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น  
ที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดเกิน  
5% ใน 50 ปี

Floor	Type	Section	f	$\rho_c$	v	FY/FU	DU	DL	DR/DL	FR/FU
1	C1A	40x40	0.24	0.001	0.93	0.85	0.011	0.011	1.09	0.14
	C1	40x40	0.28	0.001	2.15	0.85	0.010	0.010	1.09	0.13
	C2A	40x40	0.39	0.001	1.85	0.86	0.008	0.008	1.07	0.08
	C2	40x40	0.45	0.001	1.72	0.87	0.007	0.007	1.06	0.06
2	C1A	40x40	0.23	0.001	0.91	0.85	0.011	0.011	1.09	0.15
	C1	40x40	0.26	0.001	1.20	0.85	0.010	0.010	1.09	0.13
	C2A	40x40	0.36	0.001	1.56	0.86	0.009	0.009	1.07	0.10
	C2	40x40	0.41	0.001	2.12	0.87	0.008	0.008	1.06	0.08
3	C1A	40x40	0.20	0.001	0.92	0.85	0.011	0.011	1.10	0.16
	C1	40x40	0.23	0.001	1.48	0.85	0.011	0.011	1.09	0.15
	C2A	40x40	0.30	0.001	2.07	0.86	0.010	0.010	1.08	0.12
	C2	40x40	0.35	0.001	1.72	0.86	0.009	0.009	1.08	0.10
4	C1A	35x35	0.22	0.001	0.98	0.85	0.012	0.012	1.19	0.15
	C1	35x35	0.26	0.001	1.51	0.85	0.011	0.011	1.18	0.13
	C2A	35x35	0.32	0.001	2.01	0.86	0.010	0.010	1.14	0.11
	C2	35x35	0.38	0.001	2.69	0.86	0.009	0.009	1.13	0.09
5	C1A	35x35	0.19	0.001	1.12	0.84	0.013	0.013	1.20	0.16
	C1	35x35	0.23	0.001	1.63	0.85	0.012	0.012	1.19	0.15
	C2A	35x35	0.26	0.001	2.17	0.85	0.011	0.011	1.16	0.13
	C2	35x35	0.30	0.001	1.94	0.86	0.010	0.010	1.15	0.12
6	C1A	35x35	0.15	0.001	0.96	0.84	0.013	0.013	1.21	0.18
	C1	35x35	0.19	0.001	1.47	0.84	0.013	0.013	1.20	0.16
	C2A	35x35	0.20	0.001	1.99	0.85	0.012	0.012	1.17	0.16
	C2	35x35	0.24	0.001	1.95	0.85	0.011	0.011	1.16	0.14
7	C1A	30x30	0.16	0.001	1.34	0.84	0.014	0.014	1.28	0.17
	C1	30x30	0.20	0.001	1.70	0.85	0.013	0.013	1.27	0.16
	C2A	30x30	0.20	0.001	2.16	0.85	0.013	0.013	1.27	0.16
	C2	30x30	0.25	0.001	2.09	0.85	0.012	0.012	1.25	0.14
8	C1A	30x30	0.12	0.001	1.17	0.84	0.015	0.015	1.29	0.19
	C1	30x30	0.16	0.001	1.48	0.84	0.014	0.014	1.28	0.18
	C2A	30x30	0.14	0.001	1.91	0.84	0.014	0.014	1.28	0.18
	C2	30x30	0.19	0.001	1.87	0.84	0.014	0.014	1.27	0.16
9	C1A	30x30	0.08	0.001	1.01	0.83	0.015	0.015	1.29	0.20
	C1	30x30	0.11	0.001	1.21	0.84	0.015	0.015	1.29	0.20
	C2A	30x30	0.10	0.001	1.58	0.84	0.015	0.015	1.29	0.20
	C2	30x30	0.13	0.001	1.57	0.84	0.015	0.015	1.28	0.19
10	C1A	25x25	0.06	0.002	1.19	0.83	0.018	0.018	1.43	0.20
	C1	25x25	0.09	0.002	1.23	0.83	0.018	0.018	1.43	0.20
	C2A	25x25	0.08	0.002	1.44	0.83	0.018	0.018	1.43	0.20
	C2	25x25	0.11	0.002	1.43	0.84	0.017	0.017	1.43	0.19
R	C1A	25x25	0.02	0.002	0.71	0.83	0.018	0.018	1.43	0.20
	C1	25x25	0.03	0.002	0.80	0.83	0.018	0.018	1.43	0.20
	C2A	25x25	0.03	0.002	0.68	0.83	0.018	0.018	1.43	0.20
	C2	25x25	0.05	0.002	0.73	0.83	0.018	0.018	1.43	0.20

ตารางที่ ข.17 ค่ากำลังในการรับแรงสำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนคานอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Type	Section	Positive action (kN)		Negative action (kN)		Shear Capacity (kN)
		FY	FU	FY	FU	
2 m	40x20	82	100	121	146	214
4 m	40x20	47	57	55	66	167
5 m	40x20	55	66	145	176	216



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข.18 ค่ากำลังในการรับแรงสำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนเสาอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Floor	Type	Section	FU			PB/PC	MO/MB	Shear Capacity (kN)
			Tension (PT) (kN)	Compression (PC) (kN)	Bending at balance point (kN-m)			
1	C1A	40x40	1,985	6,430	392	0.23	0.74	160
	C1	40x40	1,985	6,430	392	0.23	0.74	160
	C2A	40x40	2,923	7,418	465	0.19	0.84	160
	C2	40x40	2,923	7,418	465	0.19	0.84	160
2	C1A	40x40	1,969	6,461	417	0.25	0.72	170
	C1	40x40	1,969	6,461	417	0.25	0.72	170
	C2A	40x40	2,923	7,400	496	0.20	0.83	170
	C2	40x40	2,923	7,400	496	0.20	0.83	170
3	C1A	40x40	1,963	6,461	417	0.25	0.72	170
	C1	40x40	1,963	6,461	417	0.25	0.72	170
	C2A	40x40	2,923	7,264	496	0.20	0.83	170
	C2	40x40	2,923	7,264	496	0.20	0.83	170
4	C1A	35x35	1,260	4,714	251	0.27	0.68	143
	C1	35x35	1,260	4,714	251	0.27	0.68	143
	C2A	35x35	1,972	5,339	305	0.21	0.82	136
	C2	35x35	1,972	5,339	305	0.21	0.82	136
5	C1A	35x35	1,260	4,714	251	0.27	0.68	143
	C1	35x35	1,260	4,714	251	0.27	0.68	143
	C2A	35x35	1,972	5,339	305	0.21	0.82	136
	C2	35x35	1,972	5,339	305	0.21	0.82	136
6	C1A	35x35	1,260	4,714	251	0.27	0.68	143
	C1	35x35	1,260	4,714	251	0.27	0.68	143
	C2A	35x35	1,972	5,339	305	0.21	0.82	136
	C2	35x35	1,972	5,339	305	0.21	0.82	136
7	C1A	30x30	1,268	3,787	173	0.21	0.79	107
	C1	30x30	1,268	3,787	173	0.21	0.79	107
	C2A	30x30	1,278	3,777	171	0.20	0.80	107
	C2	30x30	1,278	3,777	171	0.20	0.80	107
8	C1A	30x30	1,268	3,787	173	0.21	0.79	107
	C1	30x30	1,268	3,787	173	0.21	0.79	107
	C2A	30x30	1,278	3,777	171	0.20	0.80	107
	C2	30x30	1,278	3,777	171	0.20	0.80	107
9	C1A	30x30	1,268	3,787	173	0.21	0.79	107
	C1	30x30	1,268	3,787	173	0.21	0.79	107
	C2A	30x30	1,278	3,777	171	0.20	0.80	107
	C2	30x30	1,278	3,777	171	0.20	0.80	107
10	C1A	25x25	1,247	2,976	109	0.14	0.86	82
	C1	25x25	1,247	2,976	109	0.14	0.86	82
	C2A	25x25	796	2,564	90	0.20	0.78	83
	C2	25x25	796	2,564	90	0.20	0.78	83
R	C1A	25x25	1,247	2,976	109	0.14	0.86	82
	C1	25x25	1,247	2,976	109	0.14	0.86	82
	C2A	25x25	796	2,564	90	0.20	0.78	83
	C2	25x25	796	2,564	90	0.20	0.78	83

#### ข.4 แบบจำลองไม่เชิงเส้นของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

ตารางที่ ข.19 พารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชั้นส่วนคานอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดเกิน 20% ใน 50 ปี

Type	Section	Behavior	r	v	FY/FU	DU	DL	DR	FR/FU
2 m	40x20	Negative action	0.00	3.19	0.83	0.025	0.025	0.05	0.20
		Positive action	0.00	3.19	0.83	0.025	0.025	0.05	0.20
4 m	40x20	Negative action	0.18	1.26	0.83	0.023	0.023	0.04	0.20
		Positive action	-0.18	1.26	0.83	0.025	0.025	0.05	0.20
5 m	40x20	Negative action	0.44	2.33	0.83	0.021	0.021	0.03	0.20
		Positive action	-0.44	2.33	0.83	0.025	0.025	0.05	0.20

ตารางที่ ข.20 พารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชั้นส่วนคานอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดเกิน 5% ใน 50 ปี

Type	Section	Behavior	r	v	FY/FU	DU	DL	DR	FR/FU
2 m	40x20	Negative action	0.00	7.79	0.83	0.020	0.020	0.04	0.20
		Positive action	0.00	7.79	0.83	0.020	0.020	0.04	0.20
4 m	40x20	Negative action	0.18	2.68	0.83	0.023	0.023	0.04	0.20
		Positive action	-0.18	2.68	0.83	0.025	0.025	0.05	0.20
5 m	40x20	Negative action	0.44	3.31	0.83	0.020	0.020	0.03	0.20
		Positive action	-0.44	3.31	0.83	0.024	0.025	0.05	0.20



ตารางที่ ข.21 พารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนเสาอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น  
ที่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดเกิน  
20% ใน 50 ปี

Floor	Type	Section	f	$\rho_c$	v	FY/FU	DU	DL	DR/DL	FR/FU
1	C1A	40x40	0.17	0.002	0.70	0.84	0.014	0.015	1.32	0.17
	C1	40x40	0.23	0.002	1.43	0.85	0.013	0.013	1.30	0.15
	C2A	40x40	0.25	0.002	1.05	0.85	0.013	0.013	1.29	0.14
	C2	40x40	0.32	0.002	1.11	0.86	0.011	0.011	1.26	0.11
2	C1A	40x40	0.16	0.002	0.50	0.84	0.015	0.015	1.32	0.18
	C1	40x40	0.21	0.002	0.54	0.85	0.013	0.014	1.30	0.15
	C2A	40x40	0.23	0.002	0.76	0.85	0.013	0.013	1.30	0.15
3	C2	40x40	0.29	0.002	1.07	0.85	0.012	0.012	1.28	0.12
	C1A	40x40	0.14	0.002	0.53	0.84	0.015	0.015	1.32	0.18
	C1	40x40	0.19	0.002	0.65	0.84	0.014	0.014	1.31	0.16
	C2A	40x40	0.20	0.002	1.01	0.85	0.014	0.014	1.31	0.16
4	C2	40x40	0.26	0.002	0.88	0.85	0.013	0.013	1.29	0.14
	C1A	35x35	0.16	0.002	0.56	0.84	0.017	0.018	1.48	0.18
	C1	35x35	0.22	0.002	0.67	0.85	0.016	0.016	1.45	0.15
	C2A	35x35	0.22	0.002	0.98	0.85	0.016	0.016	1.45	0.15
5	C2	35x35	0.29	0.002	1.37	0.85	0.014	0.014	1.42	0.13
	C1A	35x35	0.14	0.002	0.63	0.84	0.018	0.018	1.49	0.19
	C1	35x35	0.19	0.002	0.72	0.84	0.017	0.017	1.47	0.16
	C2A	35x35	0.18	0.002	1.06	0.84	0.017	0.017	1.47	0.17
6	C2	35x35	0.24	0.002	0.99	0.85	0.015	0.016	1.44	0.14
	C1A	35x35	0.11	0.002	0.58	0.84	0.019	0.019	1.50	0.20
	C1	35x35	0.16	0.002	0.66	0.84	0.018	0.018	1.48	0.18
	C2A	35x35	0.15	0.002	0.98	0.84	0.018	0.018	1.48	0.18
7	C2	35x35	0.20	0.002	1.02	0.85	0.016	0.017	1.46	0.16
	C1A	30x30	0.12	0.003	0.75	0.84	0.020	0.020	1.56	0.19
	C1	30x30	0.17	0.003	0.83	0.84	0.018	0.019	1.53	0.17
	C2A	30x30	0.15	0.003	1.06	0.84	0.019	0.019	1.54	0.18
8	C2	30x30	0.22	0.003	1.08	0.85	0.017	0.017	1.51	0.15
	C1A	30x30	0.09	0.003	0.70	0.83	0.020	0.021	1.56	0.20
	C1	30x30	0.13	0.003	0.79	0.84	0.020	0.020	1.55	0.19
	C2A	30x30	0.12	0.003	0.96	0.84	0.020	0.020	1.56	0.19
9	C2	30x30	0.16	0.003	1.00	0.84	0.019	0.019	1.54	0.17
	C1A	30x30	0.06	0.003	0.65	0.83	0.020	0.021	1.56	0.20
	C1	30x30	0.10	0.003	0.76	0.84	0.020	0.021	1.56	0.20
	C2A	30x30	0.08	0.003	0.82	0.83	0.020	0.021	1.56	0.20
10	C2	30x30	0.12	0.003	0.88	0.84	0.020	0.020	1.56	0.19
	C1A	25x25	0.05	0.005	0.73	0.83	0.029	0.029	1.80	0.20
	C1	25x25	0.08	0.005	0.83	0.83	0.029	0.029	1.80	0.20
	C2A	25x25	0.07	0.005	0.76	0.83	0.029	0.029	1.80	0.20
R	C2	25x25	0.11	0.005	0.81	0.84	0.028	0.029	1.79	0.20
	C1A	25x25	0.02	0.005	0.52	0.83	0.029	0.029	1.80	0.20
	C1	25x25	0.03	0.005	0.65	0.83	0.029	0.029	1.80	0.20
	C2A	25x25	0.03	0.005	0.42	0.83	0.029	0.029	1.80	0.20
	C2	25x25	0.04	0.005	0.50	0.83	0.029	0.029	1.80	0.20

ตารางที่ ข.22 พารามิเตอร์สำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชั้นส่วนเสาอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น  
ที่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว สำหรับการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดเกิน  
5% ใน 50 ปี

Floor	Type	Section	f	$\rho_c$	v	FY/FU	DU	DL	DR/DL	FR/FU
1	C1A	40x40	0.24	0.002	0.93	0.85	0.013	0.013	1.29	0.14
	C1	40x40	0.28	0.002	2.15	0.85	0.012	0.012	1.28	0.13
	C2A	40x40	0.39	0.002	1.85	0.86	0.010	0.010	1.23	0.08
	C2	40x40	0.45	0.002	1.72	0.87	0.009	0.009	1.19	0.06
2	C1A	40x40	0.23	0.002	0.91	0.85	0.013	0.013	1.30	0.15
	C1	40x40	0.26	0.002	1.20	0.85	0.012	0.013	1.29	0.14
	C2A	40x40	0.36	0.002	1.56	0.86	0.010	0.011	1.25	0.10
	C2	40x40	0.41	0.002	2.12	0.87	0.009	0.009	1.22	0.08
3	C1A	40x40	0.20	0.002	0.92	0.85	0.014	0.014	1.31	0.16
	C1	40x40	0.23	0.002	1.48	0.85	0.013	0.013	1.30	0.15
	C2A	40x40	0.30	0.002	2.07	0.86	0.012	0.012	1.27	0.12
	C2	40x40	0.35	0.002	1.72	0.86	0.011	0.011	1.25	0.10
4	C1A	35x35	0.22	0.002	0.98	0.85	0.016	0.016	1.45	0.15
	C1	35x35	0.26	0.002	1.51	0.85	0.015	0.015	1.43	0.13
	C2A	35x35	0.32	0.002	2.01	0.86	0.013	0.013	1.39	0.11
	C2	35x35	0.38	0.002	2.69	0.86	0.012	0.012	1.36	0.09
5	C1A	35x35	0.19	0.002	1.12	0.84	0.017	0.017	1.47	0.17
	C1	35x35	0.23	0.002	1.63	0.85	0.016	0.016	1.45	0.15
	C2A	35x35	0.26	0.002	2.17	0.85	0.015	0.015	1.43	0.14
	C2	35x35	0.30	0.002	1.94	0.86	0.014	0.014	1.41	0.12
6	C1A	35x35	0.15	0.002	0.96	0.84	0.018	0.018	1.48	0.18
	C1	35x35	0.19	0.002	1.47	0.84	0.017	0.017	1.47	0.16
	C2A	35x35	0.20	0.002	1.99	0.85	0.016	0.017	1.46	0.16
	C2	35x35	0.24	0.002	1.95	0.85	0.015	0.015	1.44	0.14
7	C1A	30x30	0.16	0.003	1.34	0.84	0.019	0.019	1.54	0.18
	C1	30x30	0.20	0.003	1.70	0.85	0.018	0.018	1.52	0.16
	C2A	30x30	0.20	0.003	2.16	0.85	0.018	0.018	1.52	0.16
	C2	30x30	0.25	0.003	2.09	0.85	0.016	0.016	1.49	0.14
8	C1A	30x30	0.12	0.003	1.17	0.84	0.020	0.020	1.56	0.19
	C1	30x30	0.16	0.003	1.48	0.84	0.019	0.019	1.54	0.18
	C2A	30x30	0.14	0.003	1.91	0.84	0.019	0.019	1.55	0.18
	C2	30x30	0.19	0.003	1.87	0.84	0.018	0.018	1.53	0.17
9	C1A	30x30	0.08	0.003	1.01	0.83	0.020	0.021	1.56	0.20
	C1	30x30	0.11	0.003	1.21	0.84	0.020	0.020	1.56	0.20
	C2A	30x30	0.10	0.003	1.58	0.84	0.020	0.021	1.56	0.20
	C2	30x30	0.13	0.003	1.57	0.84	0.020	0.020	1.55	0.19
10	C1A	25x25	0.06	0.003	1.19	0.83	0.023	0.023	1.64	0.20
	C1	25x25	0.09	0.003	1.23	0.83	0.023	0.023	1.64	0.20
	C2A	25x25	0.08	0.005	1.44	0.83	0.029	0.029	1.80	0.20
	C2	25x25	0.11	0.005	1.43	0.84	0.028	0.028	1.79	0.19
R	C1A	25x25	0.02	0.005	0.71	0.83	0.029	0.029	1.80	0.20
	C1	25x25	0.03	0.005	0.80	0.83	0.029	0.029	1.80	0.20
	C2A	25x25	0.03	0.005	0.68	0.83	0.029	0.029	1.80	0.20
	C2	25x25	0.05	0.005	0.73	0.83	0.029	0.029	1.80	0.20

ตารางที่ ข.23 ค่ากำลังในการรับแรงสำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนคานอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Type	Section	Positive action (kN)		Negative action (kN)		Shear Capacity (kN)
		FY	FU	FY	FU	
2 m	40x20	122	147	122	147	258
4 m	40x20	82	99	122	147	237
5 m	40x20	56	68	155	188	237



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข.24 ค่ากำลังในการรับแรงสำหรับสร้างแบบจำลองไม่เชิงเส้นของชิ้นส่วนเสาอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Floor	Type	Section	FU			PB/PC	MO/MB	Shear Capacity (kN)
			Tension (PT) (kN)	Compression (PC) (kN)	Bending at balance point (kN-m)			
1	C1A	40x40	1,985	6,430	392	0.23	0.74	179
	C1	40x40	1,985	6,430	392	0.23	0.74	179
	C2A	40x40	2,923	7,418	465	0.19	0.84	179
	C2	40x40	2,923	7,418	465	0.19	0.84	179
2	C1A	40x40	1,969	6,461	417	0.25	0.72	179
	C1	40x40	1,969	6,461	417	0.25	0.72	179
	C2A	40x40	2,923	7,400	496	0.20	0.83	179
	C2	40x40	2,923	7,400	496	0.20	0.83	179
3	C1A	40x40	1,963	6,461	417	0.25	0.72	179
	C1	40x40	1,963	6,461	417	0.25	0.72	179
	C2A	40x40	2,923	7,264	496	0.20	0.83	179
	C2	40x40	2,923	7,264	496	0.20	0.83	179
4	C1A	35x35	1,260	4,714	251	0.27	0.68	140
	C1	35x35	1,260	4,714	251	0.27	0.68	140
	C2A	35x35	1,972	5,339	305	0.21	0.82	139
	C2	35x35	1,972	5,339	305	0.21	0.82	139
5	C1A	35x35	1,260	4,714	251	0.27	0.68	140
	C1	35x35	1,260	4,714	251	0.27	0.68	140
	C2A	35x35	1,972	5,339	305	0.21	0.82	139
	C2	35x35	1,972	5,339	305	0.21	0.82	139
6	C1A	35x35	1,260	4,714	251	0.27	0.68	140
	C1	35x35	1,260	4,714	251	0.27	0.68	140
	C2A	35x35	1,972	5,339	305	0.21	0.82	139
	C2	35x35	1,972	5,339	305	0.21	0.82	139
7	C1A	30x30	1,268	3,787	173	0.21	0.79	105
	C1	30x30	1,268	3,787	173	0.21	0.79	105
	C2A	30x30	1,278	3,777	171	0.20	0.80	105
	C2	30x30	1,278	3,777	171	0.20	0.80	105
8	C1A	30x30	1,268	3,787	173	0.21	0.79	105
	C1	30x30	1,268	3,787	173	0.21	0.79	105
	C2A	30x30	1,278	3,777	171	0.20	0.80	105
	C2	30x30	1,278	3,777	171	0.20	0.80	105
9	C1A	30x30	1,268	3,787	173	0.21	0.79	105
	C1	30x30	1,268	3,787	173	0.21	0.79	105
	C2A	30x30	1,278	3,777	171	0.20	0.80	105
	C2	30x30	1,278	3,777	171	0.20	0.80	105
10	C1A	25x25	1,247	2,976	109	0.14	0.86	80
	C1	25x25	1,247	2,976	109	0.14	0.86	80
	C2A	25x25	796	2,564	90	0.20	0.78	81
	C2	25x25	796	2,564	90	0.20	0.78	81
R	C1A	25x25	1,247	2,976	109	0.14	0.86	80
	C1	25x25	1,247	2,976	109	0.14	0.86	80
	C2A	25x25	796	2,564	90	0.20	0.78	81
	C2	25x25	796	2,564	90	0.20	0.78	81

## ภาคผนวก ค

### ผลตอบสนองของอาคาร

การประเมินความสูญเสียของอาคารด้วยโปรแกรม PACT เส้นโค้งความบอบบาง (Fragility curve) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นที่ชั้นส่วนนั้นๆจะเกิดความเสียหายกับค่าผลตอบสนองของแต่ละชั้นส่วน โดยในแต่ละเส้นโค้งความบอบบางของชั้นส่วนจะใช้ค่าผลตอบสนองของอาคารที่แตกต่างกัน

#### ค.1 ผลตอบสนองอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

ตารางที่ ค.1 ค่าความเร่งในแต่ละชั้นในทิศทาง H1 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story					Earthquake No.	Story				
	1	2	3	4	R		1	2	3	4	R
2060	0.01	0.06	0.09	0.12	0.16	833	0.01	0.06	0.10	0.14	0.16
2064	0.03	0.07	0.11	0.14	0.20	844	0.01	0.07	0.09	0.14	0.15
2065	0.01	0.10	0.14	0.18	0.24	849	0.01	0.05	0.08	0.12	0.16
2067	0.01	0.05	0.09	0.12	0.17	856	0.01	0.07	0.10	0.09	0.14
2070	0.01	0.08	0.11	0.01	0.16	861	0.01	0.10	0.13	0.17	0.24
2079	0.03	0.08	0.12	0.14	0.19	873	0.01	0.06	0.09	0.12	0.15
2081	0.02	0.09	0.13	0.19	0.24	878	0.01	0.07	0.11	0.12	0.16
2088	0.01	0.07	0.10	0.14	0.19	896	0.01	0.09	0.10	0.13	0.17
2729	0.01	0.09	0.13	0.13	0.20	184	0.05	0.07	0.10	0.12	0.15
1156	0.01	0.06	0.09	0.11	0.14	5816	0.02	0.08	0.09	0.13	0.16
1167	0.01	0.06	0.11	0.13	0.16	3716	0.02	0.10	0.15	0.17	0.23
1765	0.01	0.10	0.13	0.16	0.20	3718	0.01	0.06	0.11	0.12	0.13
1781	0.01	0.07	0.13	0.16	0.20	3722	0.01	0.07	0.11	0.13	0.17

ตารางที่ ค.2 ค่าความเร่งในแต่ละชั้นทิศทาง H2 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story					Earthquake No.	Story				
	1	2	3	4	R		1	2	3	4	R
2060	0.01	0.07	0.09	0.11	0.15	833	0.01	0.08	0.11	0.14	0.18
2064	0.01	0.04	0.06	0.09	0.11	844	0.01	0.07	0.10	0.10	0.12
2065	0.01	0.08	0.11	0.13	0.18	849	0.01	0.07	0.09	0.10	0.10
2067	0.01	0.08	0.12	0.13	0.18	856	0.02	0.12	0.14	0.19	0.27
2070	0.01	0.07	0.12	0.15	0.19	861	0.01	0.08	0.12	0.13	0.18
2079	0.01	0.07	0.12	0.14	0.19	873	0.01	0.07	0.09	0.09	0.12
2081	0.09	0.15	0.23	0.24	0.39	878	0.01	0.09	0.12	0.11	0.15
2088	0.02	0.06	0.08	0.11	0.13	896	0.01	0.06	0.10	0.13	0.15
2729	0.02	0.08	0.12	0.16	0.22	184	0.02	0.10	0.13	0.12	0.17
1156	0.01	0.09	0.14	0.13	0.16	5816	0.02	0.09	0.13	0.13	0.18
1167	0.01	0.06	0.09	0.13	0.17	3716	0.01	0.09	0.15	0.16	0.23
1765	0.01	0.06	0.09	0.14	0.18	3718	0.01	0.05	0.08	0.10	0.15
1781	0.01	0.07	0.10	0.13	0.17	3722	0.02	0.10	0.13	0.12	0.21

ตารางที่ ค.3 ค่าความเร่งในแต่ละชั้นทิศทาง H1 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story					Earthquake No.	Story				
	1	2	3	4	R		1	2	3	4	R
2060	0.03	0.15	0.19	0.24	0.28	833	0.03	0.14	0.19	0.23	0.30
2064	0.04	0.16	0.20	0.23	0.31	844	0.04	0.18	0.19	0.25	0.30
2065	0.01	0.09	0.14	0.17	0.24	849	0.03	0.17	0.20	0.22	0.27
2067	0.03	0.11	0.16	0.22	0.24	856	0.03	0.16	0.22	0.21	0.31
2070	0.03	0.21	0.30	0.23	0.34	861	0.03	0.27	0.32	0.28	0.33
2079	0.05	0.18	0.19	0.27	0.30	873	0.03	0.13	0.18	0.21	0.30
2081	0.05	0.26	0.24	0.34	0.46	878	0.03	0.16	0.22	0.23	0.28
2088	0.03	0.14	0.21	0.22	0.27	896	0.04	0.18	0.25	0.25	0.29
2729	0.03	0.18	0.25	0.22	0.34	184	0.14	0.18	0.23	0.24	0.35
1156	0.03	0.17	0.23	0.22	0.33	5816	0.05	0.21	0.21	0.29	0.32
1167	0.03	0.13	0.17	0.21	0.27	3716	0.04	0.20	0.27	0.34	0.33
1765	0.05	0.26	0.27	0.26	0.40	3718	0.04	0.17	0.26	0.23	0.31
1781	0.04	0.20	0.25	0.24	0.38	3722	0.03	0.14	0.19	0.22	0.30

ตารางที่ ค.4 ค่าความเร่งในแต่ละชั้นทิศทาง H2 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story					Earthquake No.	Story				
	1	2	3	4	R		1	2	3	4	R
2060	0.03	0.16	0.20	0.24	0.32	833	0.02	0.18	0.23	0.25	0.34
2064	0.02	0.12	0.16	0.18	0.23	844	0.04	0.18	0.22	0.26	0.31
2065	0.01	0.08	0.12	0.13	0.19	849	0.03	0.20	0.23	0.24	0.25
2067	0.03	0.16	0.22	0.23	0.28	856	0.05	0.20	0.34	0.37	0.44
2070	0.04	0.18	0.29	0.26	0.32	861	0.04	0.20	0.30	0.24	0.41
2079	0.03	0.15	0.23	0.27	0.29	873	0.03	0.18	0.23	0.25	0.30
2081	0.05	0.16	0.23	0.25	0.42	878	0.03	0.21	0.28	0.25	0.32
2088	0.03	0.16	0.21	0.28	0.28	896	0.03	0.17	0.25	0.24	0.33
2729	0.04	0.24	0.26	0.27	0.45	184	0.05	0.23	0.25	0.28	0.37
1156	0.04	0.22	0.28	0.26	0.34	5816	0.05	0.25	0.26	0.32	0.32
1167	0.02	0.15	0.22	0.26	0.31	3716	0.04	0.18	0.29	0.31	0.39
1765	0.05	0.17	0.30	0.41	0.43	3718	0.03	0.13	0.21	0.24	0.30
1781	0.03	0.20	0.24	0.29	0.37	3722	0.03	0.16	0.24	0.25	0.28

ตารางที่ ค.5 เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นทาง H1 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story				Earthquake No.	Story			
	1-2	2-3	3-4	4-R		1-2	2-3	3-4	4-R
2060	0.62	0.61	0.64	0.31	833	0.54	0.53	0.59	0.29
2064	0.68	0.69	0.75	0.37	844	0.64	0.64	0.61	0.31
2065	0.67	0.72	0.78	0.45	849	0.58	0.60	0.68	0.33
2067	0.59	0.63	0.70	0.35	856	0.37	0.36	0.42	0.24
2070	0.61	0.59	0.60	0.31	861	0.77	0.86	0.83	0.45
2079	0.83	0.80	0.75	0.37	873	0.56	0.55	0.57	0.29
2081	0.70	0.75	0.79	0.44	878	0.57	0.57	0.60	0.28
2088	0.68	0.74	0.75	0.36	896	0.54	0.50	0.60	0.32
2729	0.46	0.44	0.61	0.35	184	0.56	0.56	0.59	0.29
1156	0.58	0.60	0.62	0.29	5816	0.44	0.45	0.56	0.27
1167	0.66	0.68	0.70	0.32	3716	0.77	0.85	0.84	0.44
1765	0.72	0.76	0.74	0.37	3718	0.55	0.52	0.53	0.24
1781	0.77	0.80	0.70	0.36	3722	0.70	0.69	0.68	0.34

ตารางที่ ค.6 เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นทาง H2 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดเกิน 20% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story				Earthquake No.	Story			
	1-2	2-3	3-4	4-R		1-2	2-3	3-4	4-R
2060	0.51	0.51	0.57	0.31	833	0.57	0.54	0.59	0.35
2064	0.43	0.45	0.50	0.24	844	0.56	0.53	0.48	0.26
2065	0.56	0.50	0.59	0.31	849	0.40	0.40	0.43	0.22
2067	0.73	0.75	0.80	0.42	856	0.80	0.81	0.97	0.52
2070	0.64	0.69	0.80	0.38	861	0.50	0.56	0.68	0.37
2079	0.74	0.75	0.73	0.34	873	0.36	0.39	0.49	0.27
2081	0.71	0.69	0.66	0.35	878	0.44	0.41	0.51	0.30
2088	0.53	0.56	0.61	0.28	896	0.65	0.67	0.67	0.31
2729	0.71	0.79	0.90	0.46	184	0.52	0.49	0.55	0.33
1156	0.76	0.72	0.61	0.32	5816	0.54	0.50	0.51	0.33
1167	0.57	0.61	0.67	0.34	3716	0.56	0.61	0.77	0.43
1765	0.57	0.61	0.67	0.33	3718	0.45	0.45	0.53	0.30
1781	0.74	0.72	0.72	0.35	3722	0.72	0.66	0.63	0.37

ตารางที่ ค.7 เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นทาง H1 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดเกิน 5% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story				Earthquake No.	Story			
	1-2	2-3	3-4	4-R		1-2	2-3	3-4	4-R
2060	1.30	1.31	1.13	0.52	833	1.30	1.31	1.13	0.52
2064	1.16	1.39	1.08	0.51	844	1.16	1.39	1.08	0.51
2065	1.60	1.97	1.33	0.72	849	1.60	1.97	1.33	0.72
2067	1.24	1.34	1.14	0.49	856	1.24	1.34	1.14	0.49
2070	1.14	1.37	1.11	0.62	861	1.14	1.37	1.11	0.62
2079	1.83	2.20	1.64	0.55	873	1.83	2.20	1.64	0.55
2081	1.38	1.57	1.31	0.65	878	1.38	1.57	1.31	0.65
2088	1.36	1.51	1.14	0.59	896	1.36	1.51	1.14	0.59
2729	0.97	1.00	0.96	0.58	184	0.97	1.00	0.96	0.58
1156	1.25	1.37	1.11	0.67	5816	1.25	1.37	1.11	0.67
1167	1.01	1.13	0.95	0.45	3716	1.01	1.13	0.95	0.45
1765	1.66	1.91	1.59	0.63	3718	1.66	1.91	1.59	0.63
1781	1.25	1.41	1.41	0.75	3722	1.25	1.41	1.41	0.75



ตารางที่ ค.8 เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นทาง H2 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดเกิน 5% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story				Earthquake No.	Story			
	1-2	2-3	3-4	4-R		1-2	2-3	3-4	4-R
2060	1.13	1.11	1.21	0.58	833	1.10	1.06	1.03	0.61
2064	0.97	0.96	0.91	0.45	844	1.42	1.39	1.25	0.55
2065	1.28	1.31	1.56	0.69	849	1.17	1.21	1.07	0.54
2067	1.47	1.52	1.27	0.62	856	1.48	1.60	1.41	0.68
2070	1.65	1.73	1.65	0.66	861	1.19	1.17	1.27	0.71
2079	1.57	1.81	1.38	0.57	873	1.00	0.98	1.03	0.56
2081	1.98	2.25	1.58	0.65	878	0.89	0.90	1.06	0.65
2088	1.65	2.07	1.47	0.63	896	1.26	1.26	1.17	0.59
2729	1.58	1.87	1.55	0.84	184	1.45	1.52	1.41	0.63
1156	1.70	1.66	1.32	0.63	5816	1.21	1.36	1.34	0.70
1167	1.33	1.53	1.45	0.63	3716	1.21	1.34	1.32	0.69
1765	2.38	2.93	2.02	0.68	3718	1.44	1.49	1.20	0.58
1781	1.92	1.89	1.26	0.67	3722	1.60	1.66	1.27	0.57

ตารางที่ ค.9 ค่าเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ค้ำสูงสุดอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake no.	20%in50yr	5%in50yr	Earthquake no.	20%in50yr	5%in50yr
2060	0.07	0.19	833	0.09	0.19
2064	0.07	0.13	844	0.03	0.19
2065	0.02	0.02	849	0.07	0.17
2067	0.04	0.12	856	0.12	0.11
2070	0.05	0.15	861	0.22	0.38
2079	0.08	0.38	873	0.06	0.27
2081	0.04	0.20	878	0.07	0.15
2088	0.02	0.62	896	0.09	0.37
2729	0.03	0.14	184	0.13	0.35
1156	0.04	0.42	5816	0.05	0.33
1167	0.04	0.29	3716	0.10	0.13
1765	0.13	0.34	3718	0.06	0.47
1781	0.19	0.37	3722	0.06	0.16

## ค.2 ผลตอบสนองอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

ตารางที่ ค.10 ค่าความเร่งในแต่ละชั้นในทิศทาง H1 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story					Earthquake No.	Story				
	1	2	3	4	R		1	2	3	4	R
2060	0.01	0.06	0.10	0.13	0.17	833	0.01	0.06	0.10	0.14	0.16
2064	0.01	0.07	0.11	0.14	0.20	844	0.01	0.07	0.09	0.14	0.15
2065	0.01	0.09	0.14	0.17	0.25	849	0.01	0.05	0.08	0.12	0.16
2067	0.01	0.05	0.09	0.12	0.17	856	0.01	0.07	0.10	0.09	0.14
2070	0.01	0.08	0.13	0.15	0.23	861	0.01	0.10	0.13	0.17	0.24
2079	0.01	0.08	0.11	0.15	0.19	873	0.01	0.06	0.09	0.12	0.15
2081	0.01	0.09	0.13	0.19	0.24	878	0.01	0.07	0.11	0.13	0.16
2088	0.01	0.09	0.11	0.14	0.21	896	0.01	0.09	0.10	0.13	0.17
2729	0.01	0.09	0.13	0.13	0.20	184	0.05	0.07	0.10	0.12	0.15
1156	0.01	0.06	0.09	0.11	0.15	5816	0.02	0.08	0.09	0.13	0.17
1167	0.01	0.06	0.11	0.13	0.15	3716	0.02	0.10	0.14	0.17	0.23
1765	0.01	0.10	0.13	0.16	0.20	3718	0.01	0.06	0.10	0.11	0.13
1781	0.01	0.07	0.13	0.16	0.20	3722	0.01	0.06	0.11	0.13	0.17

ตารางที่ ค.11 ค่าความเร่งในแต่ละชั้นในทิศทาง H2 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story					Earthquake No.	Story				
	1	2	3	4	R		1	2	3	4	R
2060	0.01	0.07	0.10	0.12	0.16	833	0.01	0.08	0.11	0.15	0.17
2064	0.00	0.04	0.06	0.09	0.11	844	0.01	0.06	0.10	0.10	0.12
2065	0.01	0.08	0.12	0.13	0.19	849	0.01	0.08	0.09	0.09	0.10
2067	0.01	0.08	0.12	0.14	0.19	856	0.02	0.12	0.14	0.20	0.28
2070	0.01	0.08	0.11	0.11	0.15	861	0.01	0.08	0.13	0.13	0.20
2079	0.01	0.08	0.12	0.15	0.20	873	0.01	0.07	0.09	0.09	0.13
2081	0.01	0.07	0.13	0.14	0.20	878	0.01	0.09	0.13	0.11	0.15
2088	0.01	0.07	0.12	0.17	0.19	896	0.01	0.06	0.10	0.13	0.14
2729	0.02	0.08	0.12	0.16	0.23	184	0.05	0.07	0.10	0.12	0.16
1156	0.01	0.10	0.15	0.13	0.17	5816	0.02	0.09	0.13	0.13	0.18
1167	0.01	0.06	0.09	0.14	0.17	3716	0.01	0.10	0.15	0.16	0.23
1765	0.01	0.07	0.10	0.14	0.19	3718	0.01	0.05	0.08	0.10	0.15
1781	0.01	0.06	0.10	0.13	0.16	3722	0.02	0.10	0.12	0.12	0.22

ตารางที่ ค.12 ค่าความเร่งในแต่ละชั้นในทิศทาง H1 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story					Earthquake No.	Story				
	1	2	3	4	R		1	2	3	4	R
2060	0.03	0.15	0.19	0.24	0.28	833	0.03	0.14	0.19	0.23	0.30
2064	0.04	0.16	0.20	0.23	0.31	844	0.04	0.18	0.19	0.25	0.30
2065	0.01	0.09	0.14	0.17	0.24	849	0.03	0.17	0.20	0.22	0.27
2067	0.03	0.11	0.16	0.22	0.24	856	0.03	0.16	0.22	0.21	0.31
2070	0.03	0.21	0.30	0.23	0.34	861	0.03	0.27	0.32	0.28	0.33
2079	0.05	0.18	0.19	0.27	0.30	873	0.03	0.13	0.18	0.21	0.30
2081	0.05	0.26	0.24	0.34	0.46	878	0.03	0.16	0.22	0.23	0.28
2088	0.03	0.14	0.21	0.22	0.27	896	0.04	0.18	0.25	0.25	0.29
2729	0.03	0.18	0.25	0.22	0.34	184	0.14	0.18	0.23	0.24	0.35
1156	0.03	0.17	0.23	0.22	0.33	5816	0.05	0.21	0.21	0.29	0.32
1167	0.03	0.13	0.17	0.21	0.27	3716	0.04	0.20	0.27	0.34	0.33
1765	0.05	0.26	0.27	0.26	0.40	3718	0.04	0.17	0.26	0.23	0.31
1781	0.04	0.20	0.25	0.24	0.38	3722	0.03	0.14	0.19	0.22	0.30

ตารางที่ ค.13 ค่าความเร่งในแต่ละชั้นในทิศทาง H2 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story					Earthquake No.	Story				
	1	2	3	4	R		1	2	3	4	R
2060	0.03	0.16	0.20	0.24	0.32	833	0.02	0.18	0.23	0.25	0.34
2064	0.02	0.12	0.16	0.18	0.23	844	0.04	0.18	0.22	0.26	0.31
2065	0.01	0.08	0.12	0.13	0.19	849	0.03	0.20	0.23	0.24	0.25
2067	0.03	0.16	0.22	0.23	0.28	856	0.05	0.20	0.34	0.37	0.44
2070	0.04	0.18	0.29	0.26	0.32	861	0.04	0.20	0.30	0.24	0.41
2079	0.03	0.15	0.23	0.27	0.29	873	0.03	0.18	0.23	0.25	0.30
2081	0.05	0.16	0.23	0.25	0.42	878	0.03	0.21	0.28	0.25	0.32
2088	0.03	0.16	0.21	0.28	0.28	896	0.03	0.17	0.25	0.24	0.33
2729	0.04	0.24	0.26	0.27	0.45	184	0.05	0.23	0.25	0.28	0.37
1156	0.04	0.22	0.28	0.26	0.34	5816	0.05	0.25	0.26	0.32	0.32
1167	0.02	0.15	0.22	0.26	0.31	3716	0.04	0.18	0.29	0.31	0.39
1765	0.05	0.17	0.30	0.41	0.43	3718	0.03	0.13	0.21	0.24	0.30
1781	0.03	0.20	0.24	0.29	0.37	3722	0.03	0.16	0.24	0.25	0.28

ตารางที่ ค.14 เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นทาง H1 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่มีการออกแบบปรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story				Earthquake No.	Story			
	1-2	2-3	3-4	4-R		1-2	2-3	3-4	4-R
2060	0.62	0.61	0.63	0.30	833	0.54	0.53	0.59	0.29
2064	0.76	0.76	0.74	0.36	844	0.64	0.64	0.62	0.31
2065	0.66	0.70	0.78	0.45	849	0.57	0.60	0.68	0.33
2067	0.59	0.63	0.69	0.35	856	0.36	0.36	0.42	0.23
2070	0.65	0.72	0.84	0.42	861	0.77	0.87	0.83	0.45
2079	0.82	0.78	0.74	0.34	873	0.57	0.56	0.57	0.03
2081	0.70	0.74	0.80	0.44	878	0.58	0.59	0.61	0.29
2088	0.67	0.69	0.74	0.39	896	0.52	0.50	0.58	0.32
2729	0.45	0.43	0.60	0.34	184	0.56	0.55	0.59	0.28
1156	0.60	0.60	0.63	0.30	5816	0.44	0.44	0.55	0.27
1167	0.66	0.68	0.70	0.32	3716	0.78	0.85	0.84	0.44
1765	0.72	0.76	0.74	0.38	3718	0.53	0.49	0.50	0.24
1781	0.77	0.80	0.70	0.36	3722	0.70	0.68	0.67	0.34

ตารางที่ ค.15 เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นทาง H2 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่มีการออกแบบปรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story				Earthquake No.	Story			
	1-2	2-3	3-4	4-R		1-2	2-3	3-4	4-R
2060	0.53	0.53	0.59	0.33	833	0.60	0.58	0.59	0.34
2064	0.45	0.46	0.51	0.24	844	0.55	0.54	0.49	0.26
2065	0.57	0.52	0.59	0.32	849	0.39	0.39	0.44	0.21
2067	0.75	0.69	0.84	0.44	856	0.85	0.87	1.03	0.55
2070	0.58	0.59	0.61	0.31	861	0.53	0.55	0.67	0.38
2079	0.77	0.77	0.76	0.37	873	0.35	0.38	0.49	0.27
2081	0.69	0.67	0.66	0.35	878	0.47	0.44	0.55	0.31
2088	0.87	0.91	0.93	0.44	896	0.67	0.68	0.69	0.33
2729	0.74	0.81	0.93	0.47	184	0.58	0.59	0.62	0.32
1156	0.78	0.73	0.63	0.34	5816	0.54	0.51	0.52	0.34
1167	0.59	0.63	0.70	0.36	3716	0.44	0.64	0.82	0.46
1765	0.59	0.64	0.71	0.36	3718	0.45	0.45	0.55	0.30
1781	0.73	0.73	0.73	0.31	3722	0.72	0.67	0.65	0.38

ตารางที่ ค.16 เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นทาง H1 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่มีการออกแบบปรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story				Earthquake No.	Story			
	1-2	2-3	3-4	4-R		1-2	2-3	3-4	4-R
2060	1.31	1.31	1.15	0.52	833	0.83	0.98	0.94	0.47
2064	1.73	1.86	1.26	0.52	844	1.15	1.12	0.98	0.56
2065	1.61	1.96	1.31	0.73	849	1.24	1.18	1.07	0.54
2067	1.23	1.35	1.13	0.48	856	0.94	0.90	0.86	0.51
2070	1.03	1.19	1.07	0.62	861	1.36	1.92	1.46	0.58
2079	1.79	2.14	1.62	0.56	873	1.00	1.15	1.02	0.47
2081	1.37	1.56	1.35	0.65	878	1.27	1.43	1.30	0.52
2088	1.28	1.58	1.20	0.52	896	1.24	1.54	1.37	0.57
2729	0.98	0.96	0.96	0.59	184	1.34	1.51	1.06	0.60
1156	1.30	1.41	1.12	0.66	5816	1.05	1.24	1.05	0.55
1167	0.99	1.09	0.91	0.45	3716	1.24	1.87	1.61	0.55
1765	1.77	1.96	1.54	0.67	3718	1.20	1.36	1.19	0.60
1781	1.21	1.46	1.43	0.78	3722	1.07	1.28	1.11	0.53

ตารางที่ ค.17 เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นทาง H2 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นที่มีการออกแบบปรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story				Earthquake No.	Story			
	1-2	2-3	3-4	4-R		1-2	2-3	3-4	4-R
2060	1.14	1.16	1.28	0.60	833	1.05	1.04	1.10	0.63
2064	0.95	0.94	0.96	0.49	844	1.46	1.29	1.20	0.58
2065	1.29	1.30	1.56	0.72	849	1.13	1.16	1.03	0.52
2067	1.46	1.49	1.28	0.15	856	1.43	1.52	1.57	0.77
2070	1.56	1.69	1.65	0.68	861	1.19	1.13	1.35	0.77
2079	1.55	1.79	1.39	0.59	873	1.00	0.98	1.05	0.60
2081	1.87	1.87	1.41	0.71	878	0.92	0.95	1.11	0.68
2088	1.84	2.26	1.64	0.67	896	1.24	1.30	1.17	0.60
2729	1.59	1.78	1.55	0.87	184	1.40	1.45	1.39	0.68
1156	1.74	1.62	1.39	0.70	5816	1.17	1.10	1.30	0.69
1167	1.32	1.51	1.48	0.64	3716	1.17	1.27	1.39	0.71
1765	1.74	1.88	1.65	0.72	3718	1.42	1.40	1.24	0.62
1781	1.70	1.56	1.25	0.65	3722	1.59	1.58	1.23	0.55

ตารางที่ ค.18 ค่าเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ค้ำสูงสุดอาคารตัวอย่างสูง 4 ชั้นซึ่งไม่ได้มีการ  
ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake no.	20%in50yr	5%in50yr	Earthquake no.	20%in50yr	5%in50yr
2060	0.03	0.15	833	0.07	0.13
2064	0.02	0.14	844	0.02	0.23
2065	0.04	0.28	849	0.03	0.16
2067	0.03	0.20	856	0.06	0.22
2070	0.02	0.30	861	0.15	0.29
2079	0.02	0.52	873	0.04	0.25
2081	0.04	1.00	878	0.04	0.11
2088	0.07	0.75	896	0.04	0.25
2729	0.02	0.53	184	0.09	0.23
1156	0.04	0.33	5816	0.04	0.33
1167	0.05	0.34	3716	0.06	0.11
1765	0.11	1.40	3718	0.05	0.37
1781	0.09	0.48	3722	0.04	0.22

### ค.3 ผลตอบสนองของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

ตารางที่ ค.19 ค่าความเร่งในแต่ละชั้นในทิศทาง H1 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	R
2060	0.02	0.11	0.17	0.18	0.20	0.21	0.15	0.15	0.19	0.19	0.25
2064	0.15	0.55	0.28	1.64	0.77	1.37	1.59	0.60	0.27	0.20	0.31
2065	1.90	1.23	1.20	2.07	0.47	1.55	1.47	0.67	0.48	0.29	0.40
2067	0.01	0.07	0.11	0.15	0.16	0.14	0.14	0.12	0.13	0.16	0.20
2070	1.54	1.60	2.30	1.34	0.40	1.53	1.83	0.62	0.40	0.25	0.29
2079	0.04	0.08	0.13	0.15	0.19	0.18	0.22	0.19	0.19	0.21	0.26
2081	0.03	0.10	0.19	0.23	0.22	0.21	0.19	0.19	0.18	0.25	0.32
2088	0.01	0.06	0.11	0.12	0.12	0.14	0.17	0.19	0.18	0.17	0.23
2729	1.85	1.20	0.85	0.47	0.41	0.42	1.04	0.32	0.29	0.22	0.33
1156	1.16	1.66	2.34	1.52	0.48	1.51	1.48	0.62	0.53	0.32	0.45
1167	0.01	0.06	0.11	0.15	0.15	0.17	0.17	0.16	0.16	0.20	0.27
1765	0.02	0.14	0.24	0.27	0.24	0.23	0.22	0.22	0.27	0.26	0.44
1781	0.01	0.10	0.18	0.19	0.17	0.20	0.22	0.19	0.19	0.20	0.34
833	0.01	0.08	0.12	0.13	0.15	0.16	0.15	0.14	0.13	0.16	0.26
844	0.02	0.16	0.25	0.27	0.23	0.22	0.24	0.29	0.26	0.26	0.45
849	0.01	0.09	0.16	0.16	0.16	0.17	0.17	0.15	0.19	0.20	0.31
856	0.01	0.11	0.19	0.19	0.19	0.19	0.17	0.16	0.17	0.20	0.30
861	0.02	0.14	0.20	0.17	0.20	0.22	0.17	0.21	0.24	0.28	0.42
873	0.02	0.11	0.15	0.14	0.17	0.18	0.17	0.16	0.20	0.19	0.28
878	0.01	0.07	0.13	0.17	0.14	0.18	0.18	0.20	0.16	0.22	0.26
896	0.01	0.08	0.13	0.17	0.18	0.18	0.16	0.16	0.16	0.22	0.24
184	1.86	0.95	0.85	1.70	0.67	0.84	1.80	0.65	0.30	0.31	0.44
5816	0.04	0.13	0.25	0.23	0.24	0.26	0.28	0.24	0.27	0.28	0.33
3716	0.02	0.12	0.21	0.26	0.27	0.27	0.30	0.28	0.27	0.28	0.33
3718	0.02	0.10	0.18	0.23	0.21	0.21	0.22	0.19	0.20	0.22	0.31
3722	0.01	0.06	0.12	0.15	0.15	0.16	0.18	0.20	0.17	0.22	0.28

ตารางที่ ค.20 ค่าความเร่งในแต่ละชั้นในทิศทาง H2 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	R
2060	0.01	0.07	0.13	0.19	0.22	0.21	0.17	0.17	0.20	0.26	0.36
2064	0.04	0.16	0.28	0.19	0.18	0.19	0.25	0.19	0.20	0.19	0.26
2065	0.07	0.15	0.20	0.22	0.22	0.24	0.26	0.26	0.26	0.34	0.47
2067	0.01	0.07	0.12	0.12	0.14	0.15	0.16	0.16	0.16	0.20	0.22
2070	0.10	0.12	0.21	0.23	0.19	0.23	0.16	0.17	0.22	0.28	0.31
2079	0.02	0.09	0.13	0.14	0.15	0.14	0.19	0.18	0.23	0.23	0.27
2081	0.02	0.11	0.19	0.22	0.24	0.23	0.19	0.22	0.22	0.27	0.38
2088	0.02	0.08	0.13	0.15	0.16	0.17	0.19	0.16	0.17	0.24	0.27
2729	0.03	0.15	0.23	0.18	0.20	0.22	0.41	0.25	0.26	0.24	0.32
1156	0.22	0.16	0.29	0.16	0.18	0.21	0.18	0.20	0.20	0.21	0.31
1167	0.01	0.09	0.15	0.19	0.24	0.24	0.24	0.20	0.21	0.23	0.31
1765	0.02	0.10	0.22	0.28	0.31	0.30	0.27	0.23	0.29	0.34	0.39
1781	0.01	0.09	0.19	0.24	0.21	0.22	0.24	0.26	0.26	0.27	0.32
833	0.01	0.10	0.19	0.22	0.20	0.19	0.19	0.15	0.19	0.28	0.29
844	0.02	0.13	0.19	0.24	0.38	0.36	0.36	0.35	0.32	0.37	0.49
849	0.01	0.10	0.19	0.24	0.22	0.27	0.24	0.25	0.23	0.26	0.29
856	0.02	0.09	0.16	0.21	0.21	0.21	0.19	0.23	0.25	0.27	0.37
861	0.01	0.13	0.20	0.23	0.26	0.26	0.28	0.23	0.24	0.31	0.41
873	0.02	0.15	0.24	0.23	0.26	0.24	0.21	0.25	0.24	0.30	0.44
878	0.01	0.10	0.16	0.20	0.20	0.19	0.19	0.18	0.22	0.24	0.30
896	0.01	0.10	0.15	0.17	0.17	0.18	0.20	0.20	0.22	0.27	0.35
184	0.10	0.15	0.24	0.28	0.30	0.30	0.36	0.39	0.31	0.34	0.45
5816	0.02	0.17	0.34	0.41	0.34	0.29	0.33	0.43	0.50	0.30	0.48
3716	0.02	0.19	0.31	0.35	0.34	0.31	0.32	0.28	0.28	0.41	0.47
3718	0.01	0.10	0.18	0.21	0.23	0.25	0.25	0.24	0.22	0.30	0.40
3722	0.01	0.06	0.10	0.13	0.17	0.20	0.20	0.19	0.20	0.25	0.26



ตารางที่ ค.21 ค่าความเร่งในแต่ละชั้นในทิศทาง H1 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	R
2060	0.01	0.04	0.07	0.08	0.08	0.09	0.08	0.08	0.10	0.11	0.15
2064	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.10	0.12
2065	0.01	0.05	0.09	0.13	0.14	0.12	0.11	0.11	0.10	0.11	0.16
2067	0.00	0.03	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.10	0.12
2070	0.01	0.05	0.08	0.10	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.15	0.20
2079	0.02	0.03	0.05	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.11	0.14
2081	0.01	0.04	0.08	0.10	0.10	0.11	0.09	0.09	0.09	0.12	0.17
2088	0.00	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.12	0.13
2729	0.00	0.03	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.12	0.15
1156	0.01	0.06	0.09	0.11	0.10	0.09	0.09	0.10	0.11	0.14	0.20
1167	0.00	0.02	0.04	0.06	0.06	0.06	0.07	0.09	0.08	0.08	0.11
1765	0.01	0.06	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12	0.13	0.12	0.16	0.20
1781	0.01	0.05	0.09	0.09	0.08	0.09	0.08	0.09	0.10	0.14	0.17
833	0.00	0.03	0.05	0.06	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.07	0.10
844	0.01	0.06	0.09	0.10	0.10	0.10	0.12	0.14	0.13	0.14	0.19
849	0.00	0.04	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.07	0.08	0.09	0.12
856	0.00	0.04	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.06	0.07	0.11	0.13
861	0.01	0.05	0.08	0.08	0.10	0.11	0.09	0.09	0.11	0.15	0.21
873	0.01	0.04	0.07	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.10	0.12	0.15
878	0.00	0.04	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11	0.14
896	0.00	0.03	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.10	0.13
184	0.03	0.06	0.08	0.11	0.13	0.12	0.13	0.12	0.13	0.16	0.20
5816	0.01	0.07	0.11	0.10	0.09	0.11	0.11	0.14	0.14	0.14	0.16
3716	0.01	0.06	0.11	0.12	0.12	0.13	0.12	0.14	0.12	0.17	0.18
3718	0.00	0.05	0.08	0.09	0.09	0.09	0.11	0.09	0.12	0.12	0.19
3722	0.00	0.02	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.07	0.07	0.10

ตารางที่ ค.22 ค่าความเร่งในแต่ละชั้นในทิศทาง H2 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	R
2060	0.00	0.03	0.07	0.09	0.09	0.09	0.08	0.07	0.09	0.13	0.16
2064	0.00	0.02	0.04	0.06	0.07	0.07	0.09	0.09	0.10	0.14	0.16
2065	0.01	0.05	0.09	0.11	0.10	0.10	0.11	0.11	0.13	0.16	0.20
2067	0.00	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07	0.09	0.10	0.10	0.11
2070	0.01	0.04	0.08	0.09	0.08	0.09	0.06	0.07	0.08	0.12	0.14
2079	0.01	0.03	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.09	0.11	0.13	0.15
2081	0.01	0.04	0.08	0.11	0.12	0.11	0.09	0.10	0.12	0.15	0.19
2088	0.01	0.03	0.05	0.07	0.08	0.09	0.08	0.08	0.10	0.14	0.15
2729	0.00	0.03	0.05	0.06	0.07	0.07	0.07	0.09	0.09	0.12	0.14
1156	0.00	0.03	0.06	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.11	0.09	0.13
1167	0.01	0.03	0.07	0.09	0.11	0.11	0.11	0.09	0.09	0.12	0.14
1765	0.00	0.04	0.10	0.13	0.14	0.13	0.11	0.09	0.11	0.13	0.19
1781	0.00	0.04	0.07	0.10	0.11	0.12	0.12	0.12	0.15	0.14	0.17
833	0.00	0.04	0.07	0.09	0.08	0.09	0.08	0.10	0.09	0.12	0.13
844	0.01	0.05	0.10	0.12	0.17	0.19	0.16	0.16	0.16	0.24	0.31
849	0.00	0.04	0.08	0.10	0.09	0.11	0.10	0.10	0.10	0.11	0.15
856	0.00	0.03	0.06	0.08	0.08	0.09	0.08	0.09	0.10	0.13	0.17
861	0.00	0.04	0.08	0.11	0.13	0.13	0.13	0.11	0.12	0.14	0.18
873	0.00	0.05	0.09	0.10	0.10	0.09	0.10	0.11	0.11	0.12	0.19
878	0.00	0.03	0.06	0.08	0.11	0.11	0.10	0.08	0.09	0.10	0.13
896	0.00	0.04	0.06	0.08	0.09	0.10	0.08	0.08	0.11	0.10	0.14
184	0.01	0.06	0.10	0.11	0.13	0.16	0.16	0.18	0.15	0.19	0.22
5816	0.01	0.07	0.14	0.16	0.14	0.12	0.15	0.18	0.20	0.16	0.25
3716	0.01	0.07	0.12	0.14	0.15	0.15	0.14	0.12	0.13	0.15	0.19
3718	0.00	0.04	0.07	0.09	0.10	0.11	0.11	0.11	0.10	0.13	0.16
3722	0.00	0.02	0.04	0.05	0.06	0.08	0.08	0.08	0.11	0.12	0.13

ตารางที่ ค.23 เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นทาง H1 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story									
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-R
2060	0.40	0.62	0.72	0.69	0.57	0.64	0.57	0.49	0.57	0.31
2064	0.41	0.65	0.77	0.72	0.59	0.63	0.56	0.46	0.49	0.23
2065	0.56	0.88	1.03	1.00	0.87	0.80	0.61	0.52	0.62	0.30
2067	0.37	0.58	0.69	0.65	0.55	0.64	0.58	0.48	0.53	0.25
2070	0.58	0.94	0.99	0.87	0.71	0.75	0.66	0.58	0.69	0.35
2079	0.48	0.85	1.14	1.12	0.88	0.74	0.58	0.48	0.54	0.27
2081	0.37	0.52	0.61	0.58	0.45	0.61	0.60	0.53	0.59	0.30
2088	0.35	0.57	0.70	0.69	0.57	0.61	0.53	0.45	0.47	0.22
2729	0.36	0.56	0.72	0.70	0.60	0.70	0.61	0.51	0.57	0.29
1156	0.55	0.99	1.33	1.42	1.26	1.18	0.87	0.60	0.74	0.39
1167	0.30	0.42	0.47	0.45	0.38	0.47	0.41	0.34	0.39	0.19
1765	0.36	0.56	0.62	0.59	0.52	0.59	0.53	0.54	0.65	0.35
1781	0.47	0.76	0.80	0.61	0.65	0.80	0.70	0.58	0.68	0.33
833	0.21	0.29	0.31	0.31	0.27	0.33	0.30	0.28	0.32	0.18
844	0.43	0.59	0.59	0.63	0.61	0.77	0.64	0.51	0.57	0.29
849	0.31	0.46	0.52	0.50	0.44	0.50	0.47	0.39	0.42	0.22
856	0.25	0.32	0.33	0.28	0.24	0.35	0.39	0.39	0.46	0.24
861	0.36	0.49	0.51	0.51	0.59	0.81	0.72	0.57	0.65	0.34
873	0.42	0.65	0.70	0.55	0.43	0.55	0.52	0.47	0.54	0.28
878	0.33	0.49	0.62	0.70	0.63	0.64	0.56	0.46	0.52	0.26
896	0.32	0.45	0.53	0.53	0.51	0.60	0.54	0.44	0.50	0.26
184	0.56	0.90	1.01	0.87	0.64	0.83	0.77	0.60	0.65	0.31
5816	0.42	0.65	0.77	0.81	0.68	0.65	0.58	0.48	0.56	0.28
3716	0.35	0.47	0.48	0.46	0.40	0.58	0.56	0.54	0.65	0.33
3718	0.36	0.55	0.62	0.55	0.43	0.55	0.54	0.52	0.64	0.36
3722	0.19	0.26	0.27	0.28	0.27	0.33	0.29	0.26	0.31	0.16

ตารางที่ ค.24 เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นทิศทาง H2 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story									
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-R
2060	0.37	0.50	0.56	0.60	0.57	0.65	0.56	0.53	0.66	0.34
2064	0.53	0.80	0.91	0.90	0.78	0.92	0.86	0.73	0.77	0.39
2065	0.68	1.00	1.06	1.00	0.86	0.98	0.89	0.75	0.83	0.43
2067	0.39	0.58	0.67	0.71	0.67	0.77	0.68	0.55	0.56	0.28
2070	0.32	0.46	0.51	0.54	0.53	0.62	0.56	0.52	0.57	0.28
2079	0.58	0.88	0.99	0.98	0.88	0.99	0.88	0.72	0.76	0.38
2081	0.55	0.82	0.94	0.95	0.85	1.01	0.93	0.79	0.83	0.43
2088	0.51	0.74	0.81	0.80	0.74	0.93	0.85	0.71	0.73	0.37
2729	0.48	0.72	0.82	0.84	0.78	0.93	0.84	0.70	0.72	0.37
1156	0.43	0.61	0.68	0.71	0.65	0.73	0.67	0.55	0.56	0.30
1167	0.53	0.77	0.81	0.73	0.62	0.75	0.68	0.59	0.65	0.34
1765	0.32	0.44	0.48	0.48	0.45	0.57	0.54	0.59	0.79	0.45
1781	0.58	0.90	1.00	0.97	0.83	0.91	0.84	0.69	0.72	0.36
833	0.45	0.63	0.66	0.63	0.56	0.66	0.56	0.51	0.60	0.32
844	0.50	0.78	0.89	0.83	0.74	1.02	1.05	0.99	1.15	0.63
849	0.26	0.36	0.39	0.39	0.36	0.51	0.51	0.45	0.50	0.29
856	0.38	0.54	0.60	0.64	0.62	0.73	0.68	0.57	0.64	0.35
861	0.39	0.54	0.60	0.66	0.64	0.74	0.61	0.57	0.70	0.38
873	0.27	0.34	0.33	0.33	0.39	0.54	0.47	0.45	0.68	0.41
878	0.40	0.57	0.65	0.63	0.55	0.64	0.55	0.45	0.47	0.27
896	0.32	0.44	0.48	0.49	0.45	0.58	0.57	0.48	0.56	0.31
184	0.44	0.65	0.78	0.81	0.68	0.73	0.72	0.65	0.79	0.47
5816	0.46	0.65	0.66	0.74	0.71	0.84	0.81	0.65	0.70	0.45
3716	0.33	0.44	0.40	0.36	0.34	0.56	0.69	0.67	0.71	0.37
3718	0.38	0.57	0.65	0.68	0.61	0.69	0.67	0.61	0.68	0.34
3722	0.30	0.43	0.49	0.52	0.53	0.71	0.68	0.58	0.61	0.30

ตารางที่ ค.25 เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นทิศทาง H1 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story									
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-R
2060	0.73	1.24	1.81	2.12	2.09	1.87	1.29	0.92	1.04	0.53
2064	0.89	2.85	5.35	6.90	6.73	4.89	0.21	0.01	0.01	0.01
2065	1.90	5.27	8.73	10.45	9.51	7.59	0.55	0.28	0.10	0.08
2067	0.65	1.19	1.73	1.88	1.48	0.90	0.81	0.71	0.77	0.41
2070	2.50	6.31	13.98	14.59	14.85	12.83	3.11	0.09	0.46	0.26
2079	0.78	1.37	1.94	2.10	1.87	1.42	0.99	0.87	0.87	0.48
2081	1.09	1.88	1.84	1.63	1.40	1.41	1.37	1.10	1.11	0.58
2088	0.77	1.41	1.58	1.31	1.20	1.04	0.81	0.71	0.75	0.39
2729	0.87	3.14	6.78	9.36	9.91	9.09	2.14	0.22	0.18	0.06
1156	2.10	5.53	9.67	11.24	10.08	7.11	0.23	0.65	0.28	0.02
1167	0.63	1.03	1.17	1.15	0.93	0.95	1.03	0.76	0.85	0.46
1765	0.68	1.29	1.58	1.47	1.26	1.28	1.12	0.82	0.91	0.64
1781	0.75	1.09	1.34	1.39	1.33	1.33	0.90	0.68	0.82	0.57
833	0.51	0.74	0.72	0.79	0.86	0.90	0.77	0.66	0.77	0.47
844	0.84	1.57	1.80	1.81	1.88	1.89	1.38	0.99	1.01	0.63
849	0.54	0.93	1.27	1.40	1.20	0.97	0.89	0.71	0.96	0.51
856	0.51	0.80	0.97	0.82	0.69	0.98	1.05	0.83	0.86	0.51
861	0.70	1.19	1.30	1.10	0.94	1.06	1.09	0.78	0.93	0.58
873	0.74	1.37	1.69	1.65	1.46	1.27	1.08	0.76	0.82	0.46
878	0.66	1.13	1.26	1.18	1.17	1.31	1.27	0.98	0.85	0.47
896	0.58	0.96	1.08	1.27	1.60	1.67	1.22	0.83	0.82	0.47
184	1.08	3.70	7.29	9.95	10.80	10.75	3.12	0.52	0.10	0.04
5816	0.70	1.14	1.25	1.38	1.21	1.21	1.00	0.75	0.96	0.55
3716	0.63	1.09	1.57	1.69	1.15	0.92	0.90	0.78	1.06	0.52
3718	0.57	0.81	0.84	1.08	1.09	1.25	1.26	1.07	0.93	0.53
3722	0.37	0.52	0.70	0.86	0.84	0.90	0.80	0.64	0.82	0.44

ตารางที่ ค.26 เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นทิศทาง H2 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นไม่ได้มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story									
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-R
2060	0.82	1.24	1.26	1.20	1.05	1.36	1.41	1.16	1.34	0.74
2064	0.61	0.97	1.24	1.29	1.25	2.49	0.79	0.80	0.66	0.31
2065	0.02	0.45	0.68	0.27	0.25	2.08	0.76	0.83	1.15	0.56
2067	0.75	1.30	1.73	1.91	1.59	1.38	1.09	0.89	0.94	0.48
2070	0.10	0.12	0.29	0.18	0.19	0.24	0.35	0.45	0.66	0.36
2079	1.14	1.98	2.21	2.03	1.76	1.68	1.32	1.05	1.13	0.59
2081	0.92	1.52	2.11	2.61	2.37	2.03	1.31	1.23	1.68	0.73
2088	0.80	1.34	1.57	1.53	1.36	1.43	1.33	1.15	1.24	0.59
2729	0.37	0.52	0.56	0.55	0.51	1.52	0.70	0.61	0.57	0.33
1156	0.32	0.36	0.24	0.18	0.17	0.88	0.45	0.49	0.45	0.17
1167	0.86	1.34	1.49	1.46	1.38	1.33	1.20	1.06	1.22	0.68
1765	0.88	1.35	1.35	1.16	0.97	1.26	1.25	1.31	1.86	0.84
1781	0.89	1.47	1.94	1.98	1.45	1.67	1.53	1.10	1.15	0.64
833	0.97	1.60	1.67	1.33	0.97	1.10	1.18	1.05	1.14	0.57
844	0.78	1.27	1.69	1.81	1.56	1.80	1.63	1.43	1.57	0.91
849	0.60	0.96	1.07	1.02	0.85	1.17	1.14	1.01	1.11	0.58
856	1.16	2.20	2.53	1.96	1.39	1.37	1.35	1.13	1.30	0.74
861	0.74	1.31	1.65	1.51	1.07	1.31	1.23	1.08	1.25	0.70
873	0.61	0.80	0.80	0.76	0.99	1.39	1.19	1.03	1.70	0.93
878	0.96	1.58	1.64	1.20	1.20	1.43	1.19	0.98	1.05	0.59
896	0.70	1.09	1.27	1.27	1.09	1.35	1.24	1.02	1.18	0.67
184	0.28	0.56	0.90	0.90	1.02	2.34	1.02	0.80	0.86	0.37
5816	0.81	1.15	1.16	1.38	1.32	1.34	1.17	1.03	1.31	0.83
3716	0.73	1.06	0.96	0.75	0.74	1.20	1.44	1.39	1.53	0.89
3718	0.86	1.66	2.23	2.12	1.37	1.18	1.14	1.09	1.28	0.74
3722	0.74	1.26	1.57	1.63	1.25	1.33	1.29	1.02	1.06	0.54

ตารางที่ ค.27 ค่าเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ค้ำสูงสุดอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นซึ่งไม่ได้มีการ  
ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake no.	20%in50yr	5%in50yr	Earthquake no.	20%in50yr	5%in50yr
2060	0.05	0.48	833	0.00	0.24
2064	0.06	6.90	844	0.10	0.89
2065	0.40	10.45	849	0.03	0.69
2067	0.02	0.34	856	0.00	0.93
2070	0.16	14.85	861	0.13	0.19
2079	0.21	0.85	873	0.18	0.74
2081	0.12	0.81	878	0.13	0.59
2088	0.04	0.13	896	0.01	0.70
2729	0.05	9.91	184	0.12	10.80
1156	0.75	11.24	5816	0.05	0.27
1167	0.04	0.26	3716	0.01	0.72
1765	0.01	0.80	3718	0.02	0.71
1781	0.17	0.51	3722	0.00	0.41

#### ค.4 ผลตอบสนองของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

ตารางที่ ค.28 ค่าความเร่งในแต่ละชั้นในทิศทาง H1 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	R
2060	0.00	0.04	0.07	0.08	0.09	0.09	0.09	0.10	0.12	0.14	0.15
2064	0.00	0.02	0.04	0.05	0.07	0.07	0.08	0.10	0.11	0.12	0.12
2065	0.00	0.04	0.08	0.09	0.11	0.12	0.14	0.15	0.14	0.15	0.18
2067	0.00	0.02	0.04	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.09
2070	0.00	0.03	0.06	0.08	0.10	0.12	0.11	0.12	0.15	0.18	0.20
2079	0.00	0.03	0.05	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.13	0.15	0.16
2081	0.00	0.04	0.08	0.10	0.10	0.11	0.10	0.09	0.09	0.12	0.16
2088	0.00	0.02	0.04	0.06	0.08	0.09	0.09	0.08	0.09	0.14	0.16
2729	0.00	0.03	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.14	0.15	0.15
1156	0.00	0.05	0.09	0.11	0.11	0.12	0.14	0.16	0.15	0.17	0.25
1167	0.00	0.02	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.09	0.08	0.09	0.11
1765	0.01	0.06	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12	0.13	0.12	0.17	0.20
1781	0.00	0.05	0.09	0.09	0.09	0.10	0.12	0.12	0.12	0.16	0.17
833	0.00	0.03	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.07	0.10
844	0.01	0.06	0.09	0.10	0.10	0.12	0.12	0.13	0.15	0.17	0.19
849	0.00	0.04	0.06	0.06	0.07	0.08	0.07	0.08	0.08	0.10	0.12
856	0.00	0.04	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.06	0.07	0.11	0.13
861	0.01	0.05	0.08	0.09	0.11	0.11	0.10	0.10	0.13	0.16	0.21
873	0.00	0.04	0.09	0.12	0.12	0.11	0.10	0.09	0.10	0.13	0.16
878	0.00	0.04	0.07	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10	0.10	0.12	0.15
896	0.00	0.03	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10	0.11	0.13
184	0.03	0.07	0.10	0.13	0.14	0.14	0.14	0.14	0.15	0.17	0.23
5816	0.02	0.07	0.12	0.10	0.13	0.15	0.17	0.15	0.16	0.18	0.22
3716	0.01	0.06	0.11	0.12	0.13	0.13	0.12	0.14	0.13	0.17	0.19
3718	0.00	0.05	0.09	0.10	0.12	0.14	0.13	0.09	0.11	0.12	0.20
3722	0.00	0.02	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.07	0.07	0.10



ตารางที่ ค.29 ค่าความเร่งในแต่ละชั้นในทิศทาง H2 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	R
2060	0.00	0.03	0.07	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	0.12	0.16
2064	0.00	0.02	0.03	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.11
2065	0.01	0.04	0.08	0.10	0.10	0.10	0.11	0.13	0.13	0.18	0.21
2067	0.00	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07	0.09	0.10	0.09	0.11
2070	0.00	0.04	0.08	0.09	0.08	0.09	0.07	0.07	0.08	0.11	0.13
2079	0.01	0.03	0.06	0.08	0.09	0.09	0.10	0.12	0.13	0.16	0.19
2081	0.00	0.04	0.09	0.12	0.13	0.11	0.10	0.11	0.13	0.16	0.18
2088	0.00	0.02	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.12	0.15	0.15
2729	0.00	0.03	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.09	0.11	0.13	0.14
1156	0.00	0.03	0.06	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.11	0.09	0.13
1167	0.01	0.03	0.07	0.10	0.11	0.13	0.11	0.10	0.10	0.12	0.16
1765	0.00	0.04	0.10	0.13	0.14	0.14	0.11	0.09	0.11	0.13	0.19
1781	0.00	0.04	0.07	0.10	0.11	0.12	0.13	0.12	0.15	0.15	0.17
833	0.00	0.04	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.08	0.12	0.15
844	0.01	0.06	0.09	0.12	0.18	0.19	0.17	0.16	0.17	0.25	0.34
849	0.00	0.04	0.09	0.10	0.09	0.12	0.10	0.10	0.10	0.11	0.15
856	0.00	0.03	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.08	0.11	0.13	0.18
861	0.00	0.04	0.08	0.12	0.13	0.13	0.14	0.11	0.12	0.14	0.18
873	0.00	0.05	0.09	0.10	0.10	0.09	0.10	0.11	0.10	0.12	0.19
878	0.00	0.03	0.06	0.08	0.11	0.12	0.10	0.08	0.09	0.10	0.13
896	0.00	0.04	0.06	0.08	0.09	0.09	0.08	0.08	0.11	0.10	0.14
184	0.01	0.06	0.10	0.12	0.14	0.17	0.16	0.19	0.16	0.20	0.24
5816	0.01	0.07	0.14	0.15	0.14	0.12	0.15	0.18	0.20	0.17	0.25
3716	0.01	0.07	0.13	0.14	0.15	0.16	0.14	0.12	0.13	0.15	0.18
3718	0.00	0.04	0.07	0.09	0.11	0.12	0.12	0.11	0.11	0.13	0.16
3722	0.00	0.02	0.04	0.05	0.06	0.08	0.09	0.08	0.11	0.12	0.13

ตารางที่ ค.30 ค่าความเร่งในแต่ละชั้นในทิศทาง H1 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	R
2060	0.02	0.12	0.20	0.22	0.23	0.25	0.23	0.21	0.26	0.29	0.40
2064	0.01	0.09	0.17	0.18	0.17	0.17	0.16	0.18	0.20	0.26	0.30
2065	0.02	0.16	0.23	0.27	0.29	0.31	0.24	0.24	0.27	0.26	0.40
2067	0.01	0.08	0.14	0.15	0.16	0.15	0.15	0.15	0.16	0.19	0.23
2070	0.01	0.14	0.23	0.24	0.21	0.20	0.22	0.22	0.21	0.36	0.42
2079	0.01	0.07	0.14	0.19	0.21	0.21	0.23	0.23	0.22	0.28	0.34
2081	0.02	0.10	0.20	0.27	0.26	0.26	0.24	0.21	0.20	0.29	0.43
2088	0.01	0.08	0.10	0.15	0.17	0.19	0.20	0.19	0.26	0.31	0.42
2729	0.02	0.09	0.15	0.18	0.18	0.20	0.20	0.20	0.25	0.25	0.35
1156	0.03	0.15	0.23	0.25	0.22	0.20	0.20	0.24	0.24	0.30	0.48
1167	0.01	0.06	0.12	0.17	0.16	0.16	0.20	0.23	0.20	0.22	0.29
1765	0.02	0.17	0.32	0.33	0.29	0.27	0.33	0.32	0.33	0.41	0.55
1781	0.02	0.12	0.23	0.22	0.20	0.23	0.22	0.23	0.25	0.28	0.43
833	0.01	0.08	0.14	0.16	0.17	0.19	0.18	0.15	0.15	0.20	0.27
844	0.02	0.15	0.24	0.26	0.26	0.27	0.30	0.38	0.32	0.34	0.49
849	0.01	0.09	0.16	0.16	0.16	0.21	0.20	0.19	0.22	0.24	0.32
856	0.01	0.11	0.19	0.20	0.20	0.20	0.20	0.17	0.18	0.30	0.35
861	0.02	0.13	0.21	0.19	0.27	0.29	0.22	0.30	0.29	0.35	0.54
873	0.01	0.09	0.16	0.22	0.23	0.24	0.22	0.23	0.25	0.28	0.36
878	0.01	0.09	0.19	0.21	0.21	0.21	0.24	0.23	0.22	0.26	0.32
896	0.01	0.08	0.14	0.17	0.18	0.19	0.21	0.19	0.23	0.26	0.32
184	0.08	0.17	0.21	0.27	0.32	0.31	0.29	0.29	0.29	0.40	0.50
5816	0.04	0.19	0.31	0.28	0.22	0.27	0.27	0.33	0.33	0.32	0.39
3716	0.01	0.13	0.25	0.32	0.30	0.30	0.33	0.35	0.27	0.39	0.45
3718	0.01	0.12	0.23	0.24	0.25	0.21	0.26	0.24	0.29	0.30	0.49
3722	0.00	0.05	0.10	0.15	0.15	0.16	0.19	0.21	0.20	0.19	0.27

ตารางที่ ค.31 ค่าความเร่งในแต่ละชั้นในทิศทาง H2 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น ที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	R
2060	0.01	0.07	0.14	0.19	0.23	0.21	0.17	0.16	0.20	0.29	0.36
2064	0.01	0.08	0.12	0.13	0.15	0.15	0.15	0.16	0.18	0.18	0.26
2065	0.01	0.12	0.21	0.22	0.24	0.23	0.27	0.26	0.25	0.33	0.49
2067	0.01	0.07	0.12	0.12	0.13	0.15	0.18	0.17	0.17	0.21	0.24
2070	0.01	0.11	0.21	0.23	0.20	0.24	0.17	0.18	0.22	0.29	0.32
2079	0.01	0.08	0.13	0.13	0.16	0.20	0.20	0.19	0.23	0.26	0.30
2081	0.02	0.11	0.20	0.23	0.25	0.23	0.23	0.23	0.22	0.30	0.38
2088	0.01	0.06	0.13	0.15	0.19	0.19	0.21	0.19	0.22	0.23	0.30
2729	0.01	0.08	0.15	0.19	0.19	0.18	0.20	0.25	0.26	0.26	0.32
1156	0.01	0.09	0.15	0.18	0.20	0.21	0.20	0.18	0.21	0.21	0.29
1167	0.01	0.08	0.15	0.20	0.25	0.24	0.23	0.21	0.22	0.24	0.31
1765	0.02	0.11	0.24	0.31	0.33	0.34	0.29	0.23	0.29	0.35	0.42
1781	0.01	0.09	0.19	0.25	0.23	0.24	0.25	0.25	0.26	0.28	0.33
833	0.01	0.10	0.19	0.22	0.21	0.20	0.21	0.16	0.20	0.31	0.32
844	0.02	0.14	0.21	0.26	0.39	0.37	0.37	0.35	0.31	0.39	0.52
849	0.01	0.11	0.21	0.26	0.22	0.29	0.24	0.25	0.24	0.27	0.33
856	0.01	0.09	0.16	0.21	0.25	0.21	0.19	0.23	0.26	0.29	0.40
861	0.01	0.13	0.21	0.25	0.28	0.28	0.29	0.24	0.27	0.33	0.41
873	0.02	0.15	0.22	0.25	0.27	0.25	0.22	0.27	0.26	0.33	0.43
878	0.01	0.09	0.16	0.20	0.20	0.20	0.21	0.20	0.22	0.25	0.29
896	0.01	0.10	0.15	0.17	0.17	0.19	0.22	0.21	0.24	0.29	0.37
184	0.03	0.15	0.24	0.29	0.28	0.30	0.36	0.42	0.33	0.33	0.46
5816	0.02	0.17	0.33	0.40	0.33	0.29	0.36	0.46	0.51	0.29	0.51
3716	0.02	0.18	0.30	0.35	0.36	0.32	0.32	0.29	0.28	0.43	0.46
3718	0.01	0.10	0.18	0.21	0.24	0.27	0.27	0.24	0.24	0.30	0.41
3722	0.01	0.06	0.10	0.12	0.17	0.21	0.19	0.19	0.21	0.28	0.31

ตารางที่ ค.32 เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นทาง H1 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story									
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-R
2060	0.62	0.88	1.00	0.98	0.90	1.02	0.87	0.68	0.66	0.31
2064	0.59	0.84	0.93	0.94	0.84	0.93	0.78	0.60	0.59	0.26
2065	0.62	0.85	0.96	1.00	0.88	1.05	0.94	0.77	0.82	0.38
2067	0.40	0.55	0.61	0.61	0.57	0.66	0.55	0.42	0.40	0.18
2070	0.71	1.05	1.19	1.13	0.96	1.13	0.98	0.77	0.80	0.37
2079	0.62	0.93	1.05	1.03	0.89	1.00	0.87	0.68	0.68	0.30
2081	0.46	0.63	0.69	0.70	0.67	0.77	0.65	0.50	0.56	0.29
2088	0.41	0.57	0.62	0.60	0.50	0.61	0.61	0.53	0.59	0.28
2729	0.59	0.83	0.95	0.99	0.90	1.04	0.90	0.70	0.67	0.30
1156	0.76	1.17	1.29	1.17	1.00	1.19	1.04	0.84	0.94	0.50
1167	0.32	0.43	0.47	0.46	0.39	0.48	0.43	0.35	0.40	0.20
1765	0.46	0.62	0.66	0.63	0.60	0.70	0.62	0.56	0.72	0.36
1781	0.68	0.67	1.00	0.88	0.79	0.92	0.85	0.72	0.76	0.34
833	0.22	0.29	0.31	0.31	0.27	0.33	0.30	0.28	0.32	0.18
844	0.51	0.71	0.76	0.75	0.68	0.83	0.78	0.65	0.72	0.26
849	0.33	0.46	0.50	0.50	0.45	0.52	0.49	0.42	0.44	0.22
856	0.24	0.31	0.32	0.37	0.24	0.34	0.38	0.38	0.44	0.23
861	0.38	0.50	0.50	0.48	0.57	0.78	0.75	0.63	0.68	0.34
873	0.43	0.59	0.63	0.56	0.48	0.60	0.52	0.47	0.54	0.28
878	0.38	0.54	0.60	0.65	0.64	0.77	0.69	0.56	0.58	0.28
896	0.33	0.49	0.54	0.57	0.55	0.65	0.56	0.46	0.52	0.27
184	0.65	0.89	0.98	0.98	0.88	1.02	0.90	0.76	0.87	0.45
5816	0.67	0.98	1.15	1.17	0.94	0.95	0.87	0.74	0.81	0.39
3716	0.37	0.47	0.47	0.46	0.41	0.58	0.56	0.55	0.68	0.35
3718	0.44	0.60	0.65	0.61	0.46	0.63	0.60	0.53	0.64	0.36
3722	0.19	0.24	0.26	0.28	0.26	0.32	0.29	0.25	0.31	0.16

ตารางที่ ค.33 เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นทิศทาง H2 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 20% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น ที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story									
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-R
2060	0.36	0.49	0.56	0.59	0.56	0.65	0.56	0.53	0.65	0.35
2064	0.44	0.63	0.70	0.75	0.70	0.82	0.70	0.55	0.53	0.26
2065	0.66	0.94	1.00	1.02	0.90	1.07	1.00	0.87	0.95	0.48
2067	0.41	0.60	0.69	0.74	0.70	0.80	0.69	0.55	0.56	0.28
2070	0.35	0.48	0.53	0.55	0.56	0.69	0.62	0.52	0.57	0.28
2079	0.62	0.93	1.06	1.06	0.97	1.16	1.05	0.88	0.90	0.46
2081	0.54	0.81	0.92	0.94	0.92	1.13	1.02	0.83	0.85	0.42
2088	0.52	0.77	0.90	0.94	0.88	1.04	0.93	0.75	0.75	0.37
2729	0.54	0.79	0.90	0.92	0.87	1.03	0.92	0.74	0.75	0.37
1156	0.44	0.64	0.71	0.74	0.65	0.74	0.67	0.55	0.54	0.30
1167	0.57	0.82	0.86	0.80	0.69	0.79	0.72	0.62	0.70	0.39
1765	0.33	0.45	0.48	0.49	0.45	0.59	0.56	0.58	0.79	0.44
1781	0.60	0.92	1.04	1.04	0.89	1.06	0.96	0.78	0.81	0.40
833	0.44	0.61	0.66	0.65	0.58	0.65	0.64	0.58	0.67	0.35
844	0.52	0.79	0.89	0.85	0.80	1.10	1.15	1.07	1.25	0.70
849	0.26	0.36	0.39	0.39	0.37	0.50	0.51	0.45	0.53	0.30
856	0.37	0.52	0.57	0.62	0.60	0.72	0.68	0.56	0.63	0.34
861	0.41	0.57	0.62	0.69	0.66	0.76	0.63	0.57	0.69	0.38
873	0.26	0.34	0.33	0.33	0.39	0.53	0.46	0.44	0.67	0.40
878	0.41	0.59	0.65	0.65	0.55	0.65	0.56	0.46	0.50	0.29
896	0.32	0.44	0.47	0.48	0.45	0.58	0.56	0.49	0.56	0.30
184	0.46	0.67	0.78	0.80	0.68	0.74	0.79	0.70	0.83	0.49
5816	0.48	0.67	0.68	0.75	0.72	0.90	0.86	0.69	0.76	0.45
3716	0.33	0.45	0.41	0.35	0.33	0.55	0.69	0.67	0.72	0.37
3718	0.40	0.59	0.66	0.70	0.64	0.70	0.69	0.63	0.70	0.35
3722	0.30	0.42	0.48	0.52	0.54	0.70	0.69	0.58	0.60	0.30

ตารางที่ ค.34 เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นทิศทาง H1 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น ที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story									
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-R
2060	0.91	1.42	1.78	1.78	1.57	1.55	1.35	1.12	1.60	0.83
2064	1.19	1.93	2.25	1.99	1.38	1.46	1.37	1.16	1.25	0.59
2065	1.31	2.05	2.50	2.42	1.72	1.66	1.19	1.10	1.53	0.78
2067	0.90	1.37	1.53	1.52	1.30	1.27	1.17	1.00	1.07	0.50
2070	1.42	2.34	2.40	2.04	1.73	1.74	1.53	1.23	1.56	0.73
2079	0.92	1.81	2.59	2.82	2.27	1.85	1.30	1.03	1.24	0.61
2081	1.09	1.61	1.74	1.50	1.27	1.42	1.36	1.22	1.70	0.76
2088	0.71	1.22	1.59	1.46	1.24	1.69	1.56	1.22	1.37	0.70
2729	0.85	0.14	1.86	1.95	1.54	1.37	1.24	1.03	1.25	0.64
1156	1.32	2.34	3.16	3.30	2.90	2.34	1.71	1.42	1.80	0.89
1167	0.74	1.21	1.48	1.36	0.98	1.23	1.11	0.90	1.11	0.51
1765	0.81	1.38	1.75	1.80	1.46	1.56	1.40	1.13	1.33	0.84
1781	1.04	1.70	1.82	1.61	1.58	1.73	1.41	1.25	1.40	0.79
833	0.57	0.76	0.80	0.80	0.71	0.86	0.79	0.74	0.84	0.48
844	0.80	1.19	1.36	1.53	1.57	1.74	1.31	1.17	1.35	0.80
849	0.81	1.31	1.64	1.53	1.18	1.11	1.07	0.89	1.10	0.57
856	0.65	0.87	0.87	0.73	0.64	0.94	1.05	1.02	1.22	0.59
861	0.88	1.34	1.58	1.40	1.31	1.69	1.57	1.25	1.50	0.83
873	0.94	1.50	1.59	0.11	1.16	1.44	1.28	1.09	1.20	0.62
878	0.70	1.12	1.46	1.72	1.50	1.42	1.15	1.00	1.20	0.60
896	0.73	1.11	1.37	1.48	1.50	1.60	1.20	1.02	1.13	0.62
184	1.29	2.23	2.54	2.09	1.40	1.71	1.50	1.21	1.58	0.76
5816	1.00	1.57	1.75	1.87	1.50	1.50	1.31	1.03	1.19	0.64
3716	0.78	1.20	1.41	1.27	1.00	1.46	1.43	1.24	1.57	0.82
3718	0.89	1.40	1.61	1.43	1.20	1.46	1.41	1.31	1.62	0.90
3722	0.51	0.67	0.72	0.76	0.71	0.87	0.80	0.70	0.83	0.43

ตารางที่ ค.35 เปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นทิศทาง H2 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวที่มีโอกาสเกิดขึ้น 5% ใน 50 ปี ของอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้น ที่มีการออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake No.	Story									
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-R
2060	0.82	1.20	1.40	1.38	1.15	1.25	1.40	1.25	1.39	0.74
2064	0.87	1.57	2.03	2.06	1.68	1.61	1.23	1.01	1.10	0.59
2065	1.46	2.65	2.93	2.61	2.20	1.98	1.52	1.22	1.58	0.91
2067	0.71	1.32	1.82	2.02	1.73	1.52	1.24	1.00	1.03	0.51
2070	0.89	1.52	1.80	1.72	1.39	1.50	1.51	1.30	1.30	0.64
2079	0.94	1.56	1.97	2.04	1.80	1.74	1.39	1.18	1.26	0.66
2081	0.96	1.55	2.13	2.43	2.22	1.85	1.32	1.28	2.02	0.72
2088	0.86	1.38	1.61	1.69	1.72	1.79	1.29	1.03	1.12	0.61
2729	0.80	1.32	1.69	1.73	1.42	1.43	1.26	1.12	1.51	0.74
1156	0.86	1.48	1.86	1.95	1.54	1.52	1.39	1.17	1.36	0.76
1167	0.89	1.39	1.54	1.45	1.31	1.29	1.20	1.07	1.35	0.68
1765	0.85	1.29	1.34	1.17	0.97	1.24	1.25	1.41	2.03	0.93
1781	0.92	1.59	1.98	1.95	1.38	1.70	1.59	1.18	1.16	0.65
833	0.99	1.59	1.62	1.27	0.99	1.14	1.20	1.14	1.25	0.60
844	0.76	1.38	1.74	1.85	1.61	1.97	1.82	1.58	1.77	0.90
849	0.65	1.01	1.08	1.00	0.83	1.17	1.19	1.05	1.15	0.65
856	1.20	2.16	2.43	1.82	1.29	1.48	1.40	1.17	1.44	0.79
861	0.76	1.35	1.68	1.58	1.20	1.37	1.30	1.13	1.32	0.70
873	0.59	0.78	0.80	0.76	0.92	1.26	1.13	1.03	1.86	0.93
878	0.98	1.60	1.64	1.21	1.23	1.45	1.23	1.01	1.07	0.60
896	0.70	1.13	1.41	1.39	1.20	1.41	1.32	1.10	1.25	0.69
184	0.92	1.33	1.54	1.86	1.66	1.55	1.29	1.14	2.23	1.04
5816	0.89	1.25	1.30	1.46	1.36	1.40	1.28	1.08	1.36	0.89
3716	0.74	1.00	0.82	0.80	0.74	1.25	1.55	1.42	1.69	0.90
3718	0.85	1.62	2.11	2.00	1.38	1.25	1.24	1.14	1.37	0.75
3722	0.74	1.21	1.57	1.60	1.23	1.48	1.44	1.16	1.23	0.66

ตารางที่ ค.36 ค่าเปอร์เซ็นต์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ค้ำสูงสุดอาคารตัวอย่างสูง 10 ชั้นที่ได้มีการ  
ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

Earthquake no.	20%in50yr	5%in50yr	Earthquake no.	20%in50yr	5%in50yr
2060	0.02	0.22	833	0.00	0.17
2064	0.03	0.32	844	0.02	0.47
2065	0.04	1.24	849	0.00	0.50
2067	0.00	0.63	856	0.00	0.48
2070	0.09	0.37	861	0.00	0.13
2079	0.09	0.49	873	0.01	0.40
2081	0.04	0.34	878	0.00	0.46
2088	0.00	0.31	896	0.00	0.40
2729	0.00	0.11	184	0.01	0.50
1156	0.16	1.30	5816	0.11	0.10
1167	0.03	0.20	3716	0.00	0.29
1765	0.00	0.50	3718	0.08	0.55
1781	0.10	0.50	3722	0.00	0.35



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเอกลักษณ์ แสงวโรตม์ เกิดวันที่ 26 มกราคม พ.ศ.2531 ที่จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาในชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนบุรีรัมย์พิทยาคม และสำเร็จการศึกษาในชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนประโคนชัยพิทยาคม จากนั้นได้เข้าศึกษาในระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และจบการศึกษาเมื่อปีการศึกษา 2552 ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในภาคการศึกษาปลาย ปีการศึกษา 2554



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY