การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น
เพื่อการประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว

นายวินัย แซ่วัน วศ.บ.(วิศวกรรมโยธา)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์
(ศ.ดร.สมชาย ชูชีพสกุล)

.... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผศ.ดร.สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์)

.... กรรมการ
(รศ.ดร.ไพบูลย์ ปัญญาคะโป)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สำนักหอสมุด
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น เพื่อการประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว
หน่วยกิต 12
ผู้เขียน นายวินัย แซ่วัน
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
คณะ วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ. 2550

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์หลักเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้นที่นิยมใช้สี่วิธีคือ วิธี Displacement Coefficient, วิธี Capacity Spectrum, วิธี Modal Pushover Analysis และวิธีการวิเคราะห์แบบใหม่เรียกว่า วิธี Energy-Based Analysis โดยใช้แบบจำลองโครงสร้างเหล็กแบบสามชั้นและเก้าชั้นเป็นตัวอย่าง โดยทำการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวห้าระดับความรุนแรง แล้วทำการเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง, ค่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้น และค่ามุมหมุนพลาสติก กับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น ผลการวิจัยพบว่า ที่ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีค่าต่ำ พฤติกรรมของโครงสร้างยังคงอยู่ในช่วงอีลาสติก การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น ทั้งสี่วิธีให้ผลที่ใกล้เคียงกันมากทั้งสี่วิธี โดยมีค่าสอดคล้องกับค่าที่ได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นโดยเฉพาะกับอาคารเหล็กสามชั้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ที่ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่มีค่าสูง พฤติกรรมของโครงสร้างจะเข้าสู่ช่วงไม่เชิงเส้น เมื่อเปรียบเทียบการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้นทั้งสี่วิธี กับการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นแล้ว วิธี Energy-Based Analysis และวิธี Modal Pushover Analysis ให้ผลใกล้เคียงมากกว่า โดยเฉพาะวิธี Modal Pushover Analysis ให้ผลค่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นและค่ามุมหมุนพลาสติกใกล้เคียงมากที่สุดเนื่องจากเป็นวิธีที่พิจารณาผลของโหมดที่สูงกว่า

คำสำคัญ : การวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น / การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ / การวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว

Thesis Title	Comparative Evaluation of Nonlinear Static Analysis Procedures for Seismic Evaluation of Structures
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Winai Saewan
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Sutat Leelataviwat
Program	Master of Engineering
Field of Study	Civil Engineering
Department	Civil Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2550

Abstract

This thesis involves a comparative study of widely used Nonlinear Static Analysis (NSA) methods for seismic evaluation of structures. The four selected methods consisted of the displacement coefficient method, the capacity spectrum method, the modal pushover analysis and a new analysis method called energy-based analysis method. The procedures were used to evaluate three story and nine story SAC steel structures under five intensity levels of ground motion. The results including floor displacements, story drifts and plastic rotation demands were compared with the results from Nonlinear Dynamic Analysis (NDA) procedures. The comparison showed that at low intensity level of ground motion where the deformation were still in the elastic range, results obtained from all four NSA procedures were almost identical to those form nonlinear dynamic analysis procedure especially for the three story steel frame used in this research. At high intensity level of ground motion where the deformations were in the inelastic range, energy-based analysis and modal pushover analysis procedures provided better results, especially the modal pushover analysis because higher modes were taken into account.

Keywords : Nonlinear Static Analysis / Comparative Evaluation / Seismic Evaluation of Structures / Displacement Coefficient Method / Capacity Spectrum Method / Energy-Based Analysis / Modal Pushover Analysis

กิตติกรรมประกาศ

ในนามของผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างมากในการแก้ปัญหาต่างๆ ระหว่างดำเนินการวิจัย จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ ศ.ดร.สมชาย ชูชีพสกุล ประธานกรรมการและอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี และ รศ.ดร. ไพบูลย์ ปัญญาคะโป อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีปทุม ที่กรุณาให้เกียรติมาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำตลอดจนข้อคิดอันเป็นประโยชน์แก่งานวิจัยนี้ ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลอีกหลายท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและมิได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของท่านดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาส นี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ซ
รายการรูปประกอบ	ฎ
รายการสัญลักษณ์	ต
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ธ
บทที่	
1. บทนำ	**1**
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	2
2. ทฤษฎีการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น	**3**
2.1 กล่าวนำ	3
2.2 วิธี Displacement Coefficient	4
2.3 วิธี Capacity Spectrum	8
2.4 วิธี Modal Pushover Analysis	16
2.5 วิธี Energy-Based Analysis	22
3. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไม่เชิงเส้นแบบต่างๆ	**27**
3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 3 ชั้น	27
3.1.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น	28
3.1.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น	30
3.1.3 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Displacement Coefficient	33

3.1.4 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Capacity Spectrum 35
3.1.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Modal Pushover Analysis 38
3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 9 ชั้น 46
3.2.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น 47
3.2.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น 50
3.2.3 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Displacement Coefficient 53
3.2.4 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Capacity Spectrum 55
3.2.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Modal Pushover Analysis 58

4. การวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy-Based Analysis 69
4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 3 ชั้น 74
4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 9 ชั้น 80

5. ผลการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบ 86
5.1 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น กับวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น 86
5.1.1 การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง , Story Drift และ Rotation Ductility ของอาคาร 3 ชั้น 86
5.1.2 การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง , Story Drift และ Rotation Ductility ของอาคาร 9 ชั้น 96
5.2 ผลการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy-Based Analysis กับวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น 114
5.2.1 การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง , Story Drift และ Rotation Ductility ของอาคาร 3 ชั้น 114
5.2.2 การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง , Story Drift และ Rotation Ductility ของอาคาร 9 ชั้น 124
5.3 การเปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก 142
5.3.1 การเปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติกของอาคาร 3 ชั้น 142
5.3.2 การเปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติกของอาคาร 9 ชั้น 145

6. สรุปผลการวิจัย **148**

6.1 สรุปผลการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น กับวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น 148

6.2 สรุปผลการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธี Energy-Based Analysis กับวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น 151

6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยต่อไปในอนาคต 152

เอกสารอ้างอิง **153**

ภาคผนวก **155**

ก ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยวิธี Displacement Coefficient Method 155

ข ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยวิธี Capacity Spectrum Method 158

ค ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยวิธี Modal Pushover Analysis 163

ง ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis 167

จ ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับงานวิจัยอ้างอิง 170

ประวัติผู้วิจัย **175**

รายการตาราง

ตาราง หน้า

2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ C_0 7

2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ C_2 7

2.3 แฟคเตอร์ปรับแก้ค่าความหน่วง κ 14

2.4 ค่า SR_A และ SR_V ต่ำสุดที่ยอมให้ใช้ได้ในสมการ 2.17 และ 2.18 14

2.5 รายละเอียดประเภทของโครงสร้าง 14

3.1 ค่ารูปร่างของโหมด (Mode Shape) สำหรับอาคาร 3 ชั้น 31

3.2 ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา (อาคาร 3 ชั้น) ด้วยวิธี Displacement Coefficient 34

3.3 ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา (อาคาร 3 ชั้น) ด้วยวิธี Capacity Spectrum 37

3.4 ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง, ค่า Story drift และค่า Rotation ductility ของแต่ละโหมด สำหรับอาคาร 3 ชั้น 44

3.5 ค่ารูปร่างของโหมด (Mode Shape) สำหรับอาคาร 9 ชั้น 50

3.6 ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา (อาคาร 9 ชั้น) ด้วยวิธี Displacement Coefficient 54

3.7 ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา (อาคาร 9 ชั้น) ด้วยวิธี Capacity Spectrum 57

3.8 ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง, ค่า Story drift และค่า Rotation ductility ของแต่ละโหมด สำหรับอาคาร 9 ชั้น 64

4.1 ค่าแฟคเตอร์ความเหนียวทางด้านพลังงาน (μ_E) ของอาคาร 3 ชั้น ที่ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคาต่างๆ 72

4.2 ค่าแฟคเตอร์ความเหนียวทางด้านพลังงาน (μ_E) ของอาคาร 9 ชั้น ที่ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคาต่างๆ 73

4.3 ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา (อาคาร 3 ชั้น) ด้วยวิธี Energy-Based Analysis โดยความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ เป็นแบบเชิงเส้น 76

4.4 ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา (อาคาร 3 ชั้น) ด้วยวิธี Energy-Based Analysis โดยความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ เป็นแบบไม่เชิงเส้น 79

4.5 ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา (อาคาร 9 ชั้น) ด้วยวิธี Energy-Based Analysis โดยความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ เป็นแบบเชิงเส้น 82

4.6 ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา (อาคาร 9 ชั้น) ด้วยวิธี Energy-Based Analysis โดยความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ เป็นแบบไม่เชิงเส้น 85

5.1 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด (Peak Floor Displacement)ระหว่างวิธี NSA กับวิธี NDA (อาคาร 3 ชั้น) 87

5.2 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด(Peak Floor Displacement / Height) ระหว่างวิธี NSA กับวิธี NDA (อาคาร 3 ชั้น) 88

5.3 เปรียบเทียบผล Peak Story Drift ระหว่างวิธี NSA กับวิธี NDA (อาคาร 3 ชั้น) 89

5.4 เปรียบเทียบผล Peak Rotation Ductility ระหว่างวิธี NSA กับวิธี NDA (อาคาร 3 ชั้น) 90

5.5 ความแตกต่างของค่า Floor Displacement ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี NSA กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 3 ชั้น 92

5.6 ความแตกต่างของค่า Story Drift ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี NSA กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 3 ชั้น 92

5.7 ความแตกต่างของค่า Rotation Ductility ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี NSA กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 3 ชั้น 93

5.8 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด (Peak Floor Displacement) ระหว่างวิธี NSA กับวิธี NDA (อาคาร 9 ชั้น) 97

5.9 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด (Peak Floor Displacement / Height) ระหว่างวิธี NSA กับวิธี NDA (อาคาร 9 ชั้น) 100

5.10 เปรียบเทียบผล Peak Story Drift ระหว่างวิธี NSA กับวิธี NDA (อาคาร 9 ชั้น) 103

5.11 เปรียบเทียบผล Peak Rotation Ductility ระหว่างวิธี NSA กับวิธี NDA (อาคาร 9 ชั้น) 106

5.12 ความแตกต่างของค่า Floor Displacement ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี NSA กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 9 ชั้น 110

5.13 ความแตกต่างของค่า Story Drift ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี NSA กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 9 ชั้น 110

5.14 ความแตกต่างของค่า Rotation Ductility ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี NSA กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 9 ชั้น 111

5.15 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด (Peak Floor Displacement)ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 3 ชั้น) 115

5.16 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด (Peak Floor Displacement / Height) ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 3 ชั้น) 116

5.17 เปรียบเทียบผล Peak Story Drift ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 3 ชั้น) 117

5.18 เปรียบเทียบผล Peak Rotation Ductility ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 3 ชั้น) 118

5.19 ความแตกต่างของค่า Floor Displacement ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy-Based Analysis กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 3 ชั้น 120

5.20 ความแตกต่างของค่า Story Drift ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy-Based Analysis กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 3 ชั้น 120

5.21 ความแตกต่างของค่า Rotation Ductility ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy-Based Analysis กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 3 ชั้น 121

5.22 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด (Peak Floor Displacement)ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 9 ชั้น) 125

5.23 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด (Peak Floor Displacement / Height) ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 9 ชั้น) 128

5.24 เปรียบเทียบผล Peak Story Drift ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 9 ชั้น) 131

5.25 เปรียบเทียบผล Peak Rotation Ductility ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 9 ชั้น) 134

5.26 ความแตกต่างของค่า Floor Displacement ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy-Based Analysis กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 9 ชั้น 138

5.27 ความแตกต่างของค่า Story Drift ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy-Based Analysis กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 9 ชั้น 138

5.28 ความแตกต่างของค่า Rotation Ductility ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy-Based Analysis กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 9 ชั้น 139

ข.1 แสดงค่า Capacity Spectrum 159

ข.2 แสดงค่า Demand Spectrum 160

ข.3 แสดงค่า Connection line 162

ค.1 แสดงผลการคำนวณค่าความสัมพันธ์ F_{si}/L_i กับ D_i สำหรับโหมดที่หนึ่ง 164

ค.2 แสดงผลการคำนวณค่าความสัมพันธ์ F_{si}/L_i กับ D_i สำหรับโหมดที่สอง 165

ค.3 แสดงผลการคำนวณค่าความสัมพันธ์ F_{si}/L_i กับ D_i สำหรับโหมดที่สาม 166

ง.1 แสดงผลการคำนวณค่า Energy Capacity Curve และค่า Energy Demand Curve 168

จ.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Nonlinear Dynamic Analysis 171

จ.2 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Modal Pushover Analysis 172

จ.3 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Displacement Coefficient 172

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	หลักการเบื้องต้นของวิธี Displacement Coefficient	4
2.2	การหาค่าสติฟเนสประสิทธิผลทางด้านข้าง	5
2.3	หลักการเบื้องต้นของวิธี Capacity Spectrum	8
2.4	การแปลงกราฟ S_a – T เป็นกราฟ S_a - S_d	10
2.5	การหาค่าความหน่วงเทียบเท่า	12
2.6	การหาสเปคตรัมผลตอบสนองแบบอินอีลาสติก	13
2.7	การหาจุดตัด Performance Point	15
2.8	การแปลงกราฟ V_b - U_{roof} เป็นกราฟ F_s – D	19
2.9	หลักการเบื้องต้นของวิธี Energy Based Analysis	22
2.10	หลักการสมดุลของพลังงาน	23
2.11	กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand	26
3.1	โครงสร้างเหล็กสูง 3 ชั้น	27
3.2	กราฟแผ่นดินไหว Elcentro, 1940 NS	28
3.3	Response History ของชั้นหลังคาอาคาร 3 ชั้นที่ระดับความรุนแรง 0.88Elcentro(Elcentro1)	29
3.4	Response History ของชั้นหลังคาอาคาร 3 ชั้นที่ระดับความรุนแรง 2.19Elcentro(Elcentro2)	29
3.5	Response History ของชั้นหลังคาอาคาร 3 ชั้นที่ระดับความรุนแรง 3.05Elcentro(Elcentro3)	29
3.6	Response History ของชั้นหลังคาอาคาร 3 ชั้นที่ระดับความรุนแรง 3.72Elcentro(Elcentro4)	30
3.7	Response History ของชั้นหลังคาอาคาร 3 ชั้นที่ระดับความรุนแรง 4.38Elcentro(Elcentro5)	30
3.8	รูปแบบของแรงตามโหมด สำหรับอาคาร 3 ชั้น	31
3.9	Pushover Curve โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 3 ชั้น	32
3.10	Pushover Curve โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 3 ชั้น	32
3.11	Pushover Curve โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 3 ชั้น	32
3.12	Elastic Response Spectrum	33
3.13	กราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 0.88 Elcentro (Elcentro 1)	35
3.14	กราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 2.19 Elcentro (Elcentro 2)	35

3.15 กราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.05 Elcentro (Elcentro 3) 36
3.16 กราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.72 Elcentro (Elcentro 4) 36
3.17 กราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.38 Elcentro (Elcentro 5) 36
3.18 กราฟ Bilinear Pushover 1 Curve โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 3 ชั้น 38
3.19 กราฟ Bilinear Pushover 2 Curve โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 3 ชั้น 38
3.20 กราฟ Bilinear Pushover 3 Curve โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 3 ชั้น 38
3.21 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 0.88 Elcentro (Elcentro 1) 39
3.22 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 0.88 Elcentro (Elcentro 1) 39
3.23 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 0.88 Elcentro (Elcentro 1) 39
3.24 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 2.19 Elcentro (Elcentro 2) 40
3.25 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 2.19 Elcentro (Elcentro 2) 40
3.26 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 2.19 Elcentro (Elcentro 2) 40
3.27 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.05 Elcentro (Elcentro 3) 41
3.28 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.05 Elcentro (Elcentro 3) 41
3.29 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.05 Elcentro (Elcentro 3) 41
3.30 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.72 Elcentro (Elcentro 4) 42
3.31 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.72 Elcentro (Elcentro 4) 42

3.32 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.72 Elcentro (Elcentro 4) 42
3.33 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.38 Elcentro (Elcentro 5) 43
3.34 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.38 Elcentro (Elcentro 5) 43
3.35 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.38 Elcentro (Elcentro 5) 43
3.36 โครงสร้างเหล็กสูง 9 ชั้น 46
3.37 Response History ของชั้นหลังคาอาคาร 9 ชั้นที่ระดับความรุนแรง 1.15Elcentro(Elcentro1) 48
3.38 Response History ของชั้นหลังคาอาคาร 9 ชั้นที่ระดับความรุนแรง 3.08Elcentro(Elcentro2) 48
3.39 Response History ของชั้นหลังคาอาคาร 9 ชั้นที่ระดับความรุนแรง 4.36Elcentro(Elcentro3) 48
3.40 Response History ของชั้นหลังคาอาคาร 9 ชั้นที่ระดับความรุนแรง 5.62Elcentro(Elcentro4) 49
3.41 Response History ของชั้นหลังคาอาคาร 9 ชั้นที่ระดับความรุนแรง 8.35Elcentro(Elcentro5) 49
3.42 รูปแบบของแรงตามโหมด สำหรับอาคาร 9 ชั้น 51
3.43 Pushover Curve โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 9 ชั้น 52
3.44 Pushover Curve โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 9 ชั้น 52
3.45 Pushover Curve โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 9 ชั้น 52
3.46 Elastic Response Spectrum 53
3.47 กราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 1.15 Elcentro (Elcentro 1) 55
3.48 กราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.08 Elcentro (Elcentro 2) 55
3.49 กราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.36 Elcentro (Elcentro 3) 56
3.50 กราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 5.62 Elcentro (Elcentro 4) 56
3.51 กราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 8.35 Elcentro (Elcentro 5) 56
3.52 กราฟ Bilinear Pushover 1 Curve ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 9 ชั้น 58

3.53 กราฟ Bilinear Pushover 1 Curve ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 9 ชั้น 58

3.54 กราฟ Bilinear Pushover 1 Curve ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 9 ชั้น 58

3.55 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 1.15 Elcentro (Elcentro 1) 59

3.56 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 1.15 Elcentro (Elcentro 1) 59

3.57 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 1.15 Elcentro (Elcentro 1) 59

3.58 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.08 Elcentro (Elcentro 2) 60

3.59 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.08 Elcentro (Elcentro 2) 60

3.60 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.08 Elcentro (Elcentro 2) 60

3.61 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.36 Elcentro (Elcentro 3) 61

3.62 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.36 Elcentro (Elcentro 3) 61

3.63 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.36 Elcentro (Elcentro 3) 61

3.64 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 5.62 Elcentro (Elcentro 4) 62

3.65 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 5.62 Elcentro (Elcentro 4) 62

3.66 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 5.62 Elcentro (Elcentro 4) 62

3.67 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 8.35 Elcentro (Elcentro 5) 63

3.68 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 8.35 Elcentro (Elcentro 5) 63

3.69 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 8.35 Elcentro (Elcentro 5) 63
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบเชิงเส้น สำหรับอาคาร 3 ชั้น 69
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบยกกำลัง สำหรับอาคาร 3 ชั้น 70
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบเชิงเส้น สำหรับอาคาร 9 ชั้น 70
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบยกกำลัง สำหรับอาคาร 9 ชั้น 70
4.5 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Linear R & μ) สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 0.88 Elcentro 74
4.6 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Linear R & μ) สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 2.19 Elcentro 74
4.7 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Linear R & μ) สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.05 Elcentro 74
4.8 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Linear R & μ) สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.72 Elcentro 75
4.9 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Linear R & μ) สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.38 Elcentro 75
4.10 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Nonlinear R & μ) สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 0.88 Elcentro 77
4.11 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Nonlinear R & μ) สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 2.19 Elcentro 77
4.12 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Nonlinear R & μ) สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.05 Elcentro 77
4.13 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Nonlinear R & μ) สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.72 Elcentro 78
4.14 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Nonlinear R & μ) สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.38 Elcentro 78
4.15 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Linear R & μ) สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 1.15 Elcentro 80
4.16 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Linear R & μ) สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.08 Elcentro 80
4.17 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Linear R & μ) สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.36 Elcentro 80

4.18 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Linear R & μ) สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 5.62 Elcentro 81

4.19 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Linear R & μ) สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 8.35 Elcentro 81

4.20 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Nonlinear R & μ) สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 1.15 Elcentro 83

4.21 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Nonlinear R & μ) สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.08 Elcentro 83

4.22 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Nonlinear R & μ) สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.36 Elcentro 83

4.23 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Nonlinear R & μ) สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 5.62 Elcentro 84

4.24 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Nonlinear R & μ) สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 8.35 Elcentro 84

5.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลระหว่างวิธี NSA กับวิธี NDA (อาคาร 3 ชั้น) 91

5.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลระหว่างวิธี NSA กับวิธี NDA (อาคาร 9 ชั้น) 109

5.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 3 ชั้น) 119

5.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 9 ชั้น) 137

5.5 เปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ของอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 0.88 Elcentro (Elcentro1) ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA 142

5.6 เปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ของอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 2.19 Elcentro (Elcentro2) ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA 143

5.7 เปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ของอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.05 Elcentro (Elcentro3) ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA 143

5.8 เปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ของอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.72 Elcentro (Elcentro4) ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA 143

5.9 เปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ของอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.38 Elcentro (Elcentro5) ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA 144

5.10 เปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ของอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 1.15 Elcentro (Elcentro1) ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA 145

5.11 เปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ของอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.08 Elcentro (Elcentro2) ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA 145

5.12 เปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ของอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.36 Elcentro (Elcentro3) ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA 146

5.13 เปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ของอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 5.62 Elcentro (Elcentro4) ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA 146

5.14 เปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก (Plastic Hinge) ของอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 8.35 Elcentro (Elcentro5) ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA 147

จ.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Nonlinear Dynamic Analysis 173

จ.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Modal Pushover Analysis 173

จ.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Displacement Coefficient 174

รายการสัญลักษณ์

A	=	แฟคเตอร์ตัวคูณเพิ่มค่าของแรงกระทำทางด้านข้าง
a_{pi}	=	ค่าความเร่งเสมือนที่จุดใดๆ
a_y	=	ค่าความเร่งเสมือนที่จุดคลาก
C_A	=	Seismic Coefficient
C_V	=	Seismic Coefficient
C_i	=	ความหน่วงของระบบโครงสร้างสำหรับโหมดที่ i
[C]	=	เมตริกซ์ของความหน่วงของโครงสร้าง
D	=	การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของระบบโครงสร้าง
D_e	=	การเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่สอดคล้องกับระบบอีลาสติก
D_i	=	การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโหมดที่ i
D_m	=	การเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของระบบโครงสร้าง
D_p	=	การเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่จุดพลังงานสมดุลย์ของระบบโครงสร้าง
D_y	=	การเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่จุดคลากของระบบโครงสร้าง
d_p	=	เป้าหมายการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ
d_{pi}	=	ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่จุดใดๆ
d_y	=	ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่จุดคลาก
E_a	=	พลังงานที่ระบบโครงสร้างดูดซับไว้
E_D	=	การกระจายพลังงานโดยความหน่วง
E_e	=	พลังงานที่ระบบโครงสร้างดูดซับไว้ในช่วงอีลาสติก
E_p	=	พลังงานที่สลายไปเนื่องจากการคลากของระบบ
E_{SO}	=	พลังงานความเครียดสะสมสูงสุด
F_{si}	=	แรงสติฟเนสภายในโครงสร้างสำหรับโหมดที่ i
{fs}	=	เวคเตอร์ของแรงสติฟเนส
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่า 9.81 เมตร/วินาที2
K	=	สติฟเนสทางด้านข้างของอาคาร
K_e	=	สติฟเนสประสิทธิผลทางด้านข้างของอาคาร
K_i	=	สติฟเนสทางด้านข้างของอาคารในช่วงอีลาสติก
L_i	=	มวลประสิทธิผลของโหมดหารด้วยแฟคเตอร์ร่วมของโหมด
M*	=	มวลประสิทธิผลของโหมด
M_i*	=	มวลประสิทธิผลของโหมดที่ i

M_i = มวลของระบบโครงสร้างสำหรับโหมดที่ i

m = มวลของระบบโครงสร้าง

[m] = เมตริกซ์ของมวลของโครงสร้าง

n = จำนวนชั้นทั้งหมด

q_i = พิกัดการเคลื่อนที่ของโหมดที่ i

$\{q\}$ = เวคเตอร์ของพิกัดการเคลื่อนที่ของโหมด

R = แฟคเตอร์ตัวคูณลดกำลังคลาก

R_i = แรงลัพธ์เนื่องจากแผ่นดินไหว

r_{io} = ค่าผลลัพธ์สูงสุดของโหมดที่ i

r_{MPA} = ค่าการรวมผลลัพธ์สูงสุดในวิธี Modal Pushover Analysis

S_a = ความเร่งเสมือน

S_v = ความเร็วเสมือน

S_d = การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ

T = คาบการแกว่ง

T_c = คาบการแกว่งตามธรรมชาติประสิทธิผล

T_i = คาบการแกว่งตามธรรมชาติในช่วงอีลาสติก

$\{u\}$ = เวคเตอร์การเคลื่นตัวทางด้านข้าง

$\{\dot{u}\}$ = เวคเตอร์ของความเร็วในการเคลื่อนตัว

$\{\ddot{u}\}$ = เวคเตอร์ของความเร่งในการเคลื่อนตัว

u_i = การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของระบบโครงสร้างที่ชั้นที่ i

$u_{roof,i}$ = การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคาของโหมดที่ i

u_g = ความเร่งที่ระดับดินเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว

u_t = การเคลื่อนตัวทางด้านข้าง

V_b = แรงเฉือนที่ฐาน

V_{bi} = แรงเฉือนที่ฐานสำหรับโหมดที่ i

V_e = แรงเฉือนที่ฐานที่สอดคล้องกับระบบอีลาสติก

V_y = แรงเฉือนที่ฐาน ณ จุดคลากของระบบโครงสร้าง

W = น้ำหนักคงที่ของอาคารรวมกับน้ำหนักจรที่เกิดขึ้นจริง

$\{1\}$ = เวคเตอร์ของเลขหนึ่ง

α = อัตราส่วนระหว่างสติฟเนสของโครงสร้างหลังการคลากต่อสติฟเนสประสิทธิผลของโครงสร้างในช่วงอีลาสติก

α_1 = สัมประสิทธิ์ของมวลของโหมดแรก

β_{eq}	=	ความหน่วงเทียบเท่า
β_O	=	ความหน่วงเนื่องจากการสลายพลังงาน
ζ_i	=	อัตราส่วนความหน่วงของโหมดที่ i
δ_t	=	เป้าหมายการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง
δ_y	=	การเคลื่อนตัวทางด้านข้าง ณ จุดคลากของระบบโครงสร้าง
δ_{roof}	=	การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา
ϕ_i	=	ค่ารูปร่างโหมดของชั้นที่ i
$\phi_{roof,i}$	=	ค่ารูปร่างของโหมดที่ i ที่ชั้นหลังคา
ϕ_{i1}	=	ค่ารูปร่างของโหมดที่หนึ่งที่ชั้นที่ i
$\phi_{roof,1}$	=	ค่ารูปร่างของโหมดที่หนึ่งที่ชั้นหลังคา
$[\phi]$	=	เมตริกซ์ของรูปร่างโหมด
$\{\phi\}_i$	=	เวคเตอร์ของรูปร่างโหมดที่ i
Γ_1	=	แฟคเตอร์ร่วมของโหมดแรก
Γ_i	=	แฟคเตอร์ร่วมของโหมดที่ i
γ	=	แฟคเตอร์อัตราส่วนของการดูดซับพลังงานระหว่างระบบอินอีลาสติกต่อระบบอีลาสติกที่สอดคล้องกัน
γ_E	=	แฟคเตอร์ γ ที่เขียนในเทอมของแฟคเตอร์ความเหนียวทางด้านพลังงาน
μ	=	แฟคเตอร์ความเหนียว
μ_E	=	แฟคเตอร์ความเหนียวทางด้านพลังงาน
ω_i	=	ความเร็วเชิงมุมของโหมดที่ i
κ	=	แฟคเตอร์ปรับค่าความหน่วง

ประมวลศัพท์และคำย่อ

Acceleration Sensitive Region	=	ช่วงของสเปคตรัมที่ค่าความเร่งตอบสนองค่อนข้างคงที่
Base Shear	=	แรงเฉือนที่ฐาน
Bilinear Pushover Curve	=	กราฟ Pushover Curve ที่ถูกแปลงให้เป็นกราฟเส้นตรงสองเส้นโดยมีจุดหักมุมเป็นจุดคลากของระบบโครงสร้าง
Capacity Curve	=	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา
Capacity Spectrum	=	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเสมือนกับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ
Coefficient	=	สัมประสิทธิ์
Corresponding Elastic System	=	ระบบเทียบเท่าอีลาสติก
Constant Acceleration Range	=	ช่วงความเร่งคงที่
Constant Velocity Range	=	ช่วงความเร็วคงที่
Control Node	=	จุดควบคุมการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง
Coupled Equations	=	ระบบสมการที่ไม่อิสระต่อกัน
Cyclic Loading	=	แรงแบบวัฏจักร
Damping	=	ความหน่วง
Demand Spectrum	=	สเปคตรัมผลตอบสนองของระบบโครงสร้างที่แสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเสมือนกับการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง
Ductility Factor	=	แฟคเตอร์ความเหนียว
Effective Fundamental Period	=	คาบการแกว่งตามธรรมชาติประสิทธิผล
Effective Modal Mass	=	มวลประสิทธิผลของโหมด
Effective Viscous Damping	=	ความหน่วงประสิทธิผล
Elastic Fundamental Period	=	คาบการแกว่งตามธรรมชาติในช่วงอีลาสติก
Elastic Response Spectrum	=	สเปคตรัมผลตอบสนองแบบอีลาสติก
Elastic Energy	=	พลังงานที่ระบบโครงสร้างดูดซับไว้ในช่วงอีลาสติก
Elcentro	=	ข้อมูลแผ่นดินไหวที่เมืองElcentro

Energy Capacity Curve = ความสามารถในการดูดซับพลังงานของโครงสร้างแสดงโดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานสะสมในโครงสร้างกับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของระบบโครงสร้าง

Energy Demand Curve = พลังงานที่เกิดจากแรงแผ่นดินไหวซึ่งแสดงโดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจากแผ่นดินไหวกับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของระบบโครงสร้าง

Energy Dissipated = การกระจายพลังงาน

Energy Dissipated by Yielding = พลังงานที่สลายไปเนื่องจากการคลากของระบบ

Energy Ductility = ความเหนียวทางด้านพลังงาน

Equivalent Single Degree of Freedom = ระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ

Equivalent Viscous Damping = ความหน่วงเทียบเท่า

First Modal Mass Coefficient = สัมประสิทธิ์ของมวลของโหมดแรก

First Modal Participation Factor = แฟคเตอร์ร่วมของโหมดแรก

Floor Displacement = การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของพื้น

Hysteretic Damping = ความหน่วงจากการสลายพลังงานจากผลของวัฏจักรแรงกระทำ

Hysteretic Loop = วัฏจักรของแรงกระทำ

Inelastic Response Spectrum = สเปคตรัมผลตอบสนองเกินขอบเขตอีลาสติก

Inelastic System = ระบบอินอีลาสติก

Linear Dynamic = พลศาสตร์เชิงเส้น

Linear Static = สถิตเชิงเส้น

Maximum Strain Energy = พลังงานความเครียดสะสมสูงสุด

Modal Load Pattern = รูปแบบของแรงตามโหมด

Modal Response Spectrum Analysis = การวิเคราะห์สเปคตรัมผลตอบสนองเชิงโหมด

Mode Shape = รูปร่างของโหมด

Modification Factor = แฟคเตอร์อัตราส่วนของการดูดซับพลังงานระหว่างระบบอินอีลาสติกต่อระบบอีลาสติกที่สอดคล้องกัน

Monotonic Loading = แรงกระทำแบบทางเดียว

Nonlinear Dynamic = พลศาสตร์ไม่เชิงเส้น

Nonlinear Dynamic Analysis = การวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น

Nonlinear Dynamic Procedure = วิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น

Nonlinear Response History Analysis = การวิเคราะห์ผลตอบสนองด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น

Nonlinear Static	=	สถิตไม่เชิงเส้น
Nonlinear Static Analysis	=	การวิเคราะห์แบบสถิตไม่เชิงเส้น
Nonlinear Static Procedure	=	วิธีสถิตไม่เชิงเส้น
Numerical Method	=	วิธีเชิงตัวเลข
P-delta Effect	=	ผลกระทบลำดับที่สองต่อแรงภายในชิ้นส่วนโครงสร้างเนื่องจากแรงกระทำตามแนวแกนและการโก่งตัวของชิ้นส่วนโครงสร้าง
Peak Floor Displacement	=	การเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด
Perfect Ductile	=	พฤติกรรมแบบเหนียวสมบูรณ์
Performance Point	=	จุดตัดระหว่างกราฟ Capacity Spectrum กับกราฟ Demand Spectrum ที่มีค่าความหน่วงเทียบเท่าสอดคล้องกันกับค่าแฟคเตอร์ความเหนียวที่จุดตัดนั้น
Pinching	=	การลดลงของพื้นที่ภายใน hysteresis loop
Plastic Hinge	=	จุดหมุนพลาสติก
Pseudo Acceleration	=	ความเร่งเสมือน
Pseudo Velocity	=	ความเร็วเสมือน
Pushover Analysis	=	การวิเคราะห์แบบ Pushover (Nonlinear Static Analysis)
Pushover Curve	=	ความสามารถในการรับแรงทางด้านข้างของโครงสร้างซึ่งแสดงโดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา
Reduced Demand Spectrum	=	Demand Spectrumที่ถูกลดค่าลงด้วยตัวคูณลดค่าสเปคตรัม
Response Acceleration	=	ความเร่งตอบสนอง
Roof Displacement	=	การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา
Rotation Ductility	=	ความเหนียวทางด้านการหมุนรอบจุดหมุนพลาสติก
Simultaneous Solving	=	การแก้ระบบสมการเชิงเส้น
Spectrum Reduction Factor	=	ตัวคูณลดค่าสเปคตรัม
Story Drift	=	ความต่างระหว่างการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของพื้นชั้นที่อยู่ถัดไปเทียบกับความสูงระหว่างชั้นนั้น
Strain Hardening	=	กำลังวัสดุที่เพิ่มขึ้นหลังจุดคลาก
Strength Ratio	=	อัตราส่วนของกำลัง
Superposition	=	การรวมผล
Target Displacement	=	เป้าหมายการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง

Target Roof Displacement	=	เป้าหมายการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา
Yield Strength Reduction Factor	=	แฟคเตอร์ตัวคูณลดกำลังคลาก
ADRS	=	Acceleration Displacement Response Spectrum
ATC	=	Applied Technology Council
FEMA	=	Federal Emergency Management Agency
GM	=	Ground Motion Multiplier
MDOF	=	Multi Degree of Freedom
NDA	=	Nonlinear Dynamic Analysis
NDP	=	Nonlinear Dynamic Procedure
NSA	=	Nonlinear Static Analysis
NSP	=	Nonlinear Static Procedure
RHA	=	Response History Analysis
SDOF	=	Single Degree of Freedom
SRSS	=	Square Root of Sum Square

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในปัจจุบัน วิศวกรโครงสร้างต้องเข้าไปเกี่ยวข้องกับการออกแบบและประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวมากขึ้น เนื่องจากภัยแผ่นดินไหวสามารถก่อให้เกิดความเสียหายได้อย่างรุนแรง ทุกวันนี้มีผู้คนเป็นจำนวนมากได้รับบาดเจ็บ สูญเสียชีวิตหรือทรัพย์สิน จากความเสียหายหรือการวิบัติของอาคารที่เป็นผลมาจากการออกแบบที่ไม่ดีพอและการประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่ไม่ถูกต้องหรือแม่นยำพอ

การประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวมีวิธีหลักอยู่ 4 วิธี คือ วิธีสถิตเชิงเส้น (Linear Static), วิธีพลศาสตร์เชิงเส้น (Linear Dynamic), วิธีสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static) และวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Dynamic) [12] วิธีหลักสองวิธีแรกจะวิเคราะห์โครงสร้างโดยสมมุติให้โครงสร้างมีพฤติกรรมการตอบสนองอยู่ในช่วงอีลาสติกและใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดเป็นแบบเชิงเส้น แต่สำหรับโครงสร้างอาคารที่ต้องรับแรงแผ่นดินไหวรุนแรงจะมีพฤติกรรมการตอบสนองเกินขอบเขตอีลาสติก การวิเคราะห์ให้ได้ผลที่ถูกต้องที่สุดจะต้องใช้วิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Dynamic Analysis) ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ผลถูกต้องแม่นยำ แต่ไม่ค่อยสะดวกในทางปฏิบัติเนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้เวลาวิเคราะห์นานและต้องการข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวจำนวนมาก

วิธีสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static Analysis) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Pushover Analysis เป็นวิธีที่สะดวกและนิยมใช้มากกว่าสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีพฤติกรรมการตอบสนองเกินขอบเขตอีลาสติก ภายใต้แรงแผ่นดินไหว [3, 13] การวิเคราะห์จะทำโดยการใส่แรงกระทำทางด้านข้างของอาคารและค่อยๆเพิ่มขนาดของแรงจนกระทั่งค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคาร มีค่าเท่ากับเป้าหมายการเคลื่อนตัวด้านข้าง (Target Displacement) ซึ่งเป็นค่าที่แทนการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดภายใต้แรงแผ่นดินไหว และมีประโยชน์ในการวิเคราะห์หาหน่วยแรงสูงสุดภายในโครงสร้าง

วิธีการหาค่าเป้าหมายการเคลื่อนตัวด้านข้าง มีหลายวิธีซึ่งให้ผลความถูกต้องแม่นยำแตกต่างกันไป สำหรับวิธีที่นำมาใช้ในการศึกษาเชิงเปรียบเทียบนี้มีอยู่ 4 วิธีคือ วิธี Displacement Coefficient, วิธี Capacity Spectrum, วิธี Modal Pushover Analysis และวิธีที่พัฒนาขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้เรียกว่าวิธี Energy Based Analysis โดยในแต่ละวิธีจะใช้แนวคิดที่ว่าผลตอบสนองของโครงสร้างหลายดีกรีความ

อิสระ (MDOF) สามารถแปลงให้สอดคล้องกับผลตอบสนองของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ (SDOF)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างโดยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น แบบ ต่างๆ

2. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย ของวิธี สถิตไม่เชิงเส้น แบบต่างๆ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. วิเคราะห์อาคารตัวอย่างโดยวิธีสถิตไม่เชิงเส้นแบบต่างๆโดยโครงสร้างที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นโครงสร้างเหล็กแบบสมมาตรสูง 3 ชั้น และ 9 ชั้น

2. การวิเคราะห์โครงสร้างเป็นแบบสองมิติ โดยไม่คำนึงถึงลักษณะคุณสมบัติของชั้นดิน ส่วนผลของ P-delta effect พิจารณาสำหรับอาคารสูง 9 ชั้นเท่านั้น

3. ใช้ข้อมูลแผ่นดินไหวมาตรฐาน (Elcentro 1940 NS) โดยใช้ตัวคูณปรับระดับความรุนแรงให้เป็นห้าระดับความรุนแรง

4. รูปแบบของแรงกระทำทางด้านข้างของอาคาร สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้นจะใช้รูปแบบของแรงตามโหมด ที่เป็นสัดส่วนเดียวกับแรง Inertia Force แต่ละชั้นของอาคาร

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาขั้นตอนการประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างโดยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static Procedure) ทั้งสี่วิธีคือ วิธี Displacement Coefficient, วิธี Capacity Spectrum, วิธี Modal Pushover Analysis และวิธี Energy Based Analysis

2. ใช้แบบจำลองอาคารโครงสร้างเหล็ก แบบ 3 ชั้น และ 9 ชั้น ทำการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวห้าระดับความรุนแรง โดยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น ทั้งสี่วิธี

3. ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้นกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Dynamic Analysis) และสรุปผล

บทที่ 2 ทฤษฎีการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น

2.1 กล่าวนำ

การออกแบบโครงสร้างเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหวในปัจจุบันได้นำเอาปรัชญาการออกแบบบนพื้นฐานของสมรรถนะ (Performance Based Design) มาใช้ [18] คำว่าการออกแบบบนพื้นฐานของสมรรถนะ คือการออกแบบโครงสร้างให้มีผลตอบสนองที่เหมาะสมสำหรับต้านทานต่อแรงแผ่นดินไหวในระดับที่ต้องการ เพื่อให้บรรลุผลในการออกแบบบนพื้นฐานของสมรรถนะจำเป็นต้องอาศัยการวิเคราะห์โครงสร้างทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นตามระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว อย่างไรก็ตามเนื่องจากการวิเคราะห์โครงสร้างแบบไม่เชิงเส้นต้องใช้เทคนิคและเวลาในการตรวจสอบผลค่อนข้างมาก ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปวิศวกรจึงใช้วิธีการวิเคราะห์แบบประมาณด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static Procedure) หรือที่เรียกว่าการวิเคราะห์แบบ Pushover Analysis วิธีสถิตไม่เชิงเส้นได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในปัจจุบันสำหรับใช้ในการออกแบบและประเมินโครงสร้างเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว [3 ,13]

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static Procedure) โครงสร้างจะถูกพิจารณาให้เป็นองค์อาคารย่อยมาต่อกัน โดยที่องค์อาคารแต่ละองค์อาคารจะมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการเสียรูปแตกต่างกันไปตามคุณลักษณะขององค์อาคารนั้นๆ จากนั้นจึงใส่แรงกระทำทางด้านข้างต่อโครงสร้างโดยค่อยๆ เพิ่มขนาดของแรงจนกระทั่งค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของอาคารมีค่าเท่ากับเป้าหมายการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Target Displacement) ที่ต้องการ ที่จุดนี้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง ค่าแรงภายในชิ้นส่วนโครงสร้าง และการเสียรูปของชิ้นส่วนโครงสร้าง จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบหรือประเมินความเสียหายของโครงสร้างต่อไป

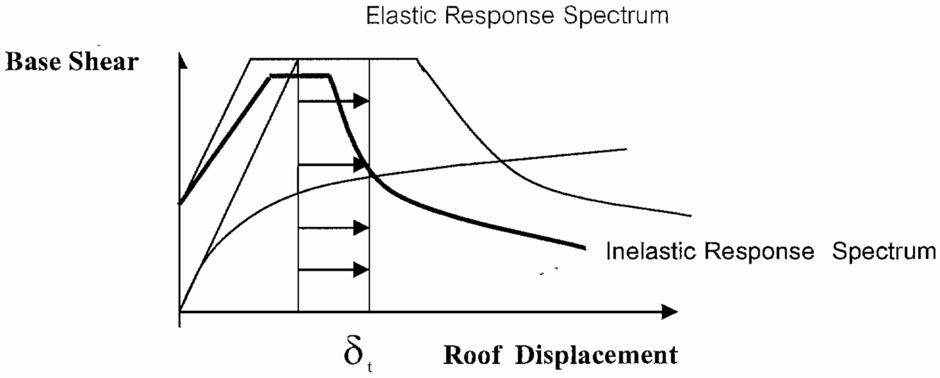
วิธีสถิตไม่เชิงเส้น ได้รับการศึกษาวิเคราะห์และนำเสนอเป็นระเบียบวิธีการวิเคราะห์หลายวิธี ซึ่งโดยส่วนมากแล้วจะใช้แนวคิดหลักคือ คุณลักษณะของโครงสร้างจะถูกกำหนดด้วยกราฟ Capacity Curve ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear) กับการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของชั้นหลังคา (Roof Displacement) กราฟ Capacity Curve ของโครงสร้างจะถูกนำไปสร้างระบบเทียบเท่าที่มีดีกรีความอิสระเท่ากับหนึ่ง (Equivalent Single Degree of Freedom System)ได้

ค่าเป้าหมายการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสามารถหาได้จากวิธีสถิตไม่เชิงเส้นต่างๆ ซึ่งจะแตกต่างกันในรายละเอียดปลีกย่อย ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ 4 วิธีคือ วิธี Displacement Coefficient , วิธี Capacity Spectrum , วิธี Modal Pushover Analysis และ วิธี Energy Based Analysis

2.2 วิธี Displacement Coefficient

ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของวิธีนี้ที่จุดควบคุม (Control Node) ของอาคารเมื่อเกิดแผ่นดินไหวเรียกว่าเป้าหมายการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Target Displacement) หาได้จากการนำค่า Spectral Acceleration(Sa) ที่คาบเวลาเดียวกันกับของโครงสร้างไปคูณกับค่าสัมประสิทธิ์(Coefficient) ต่างๆ เพื่อปรับแก้ให้ได้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดที่มีความถูกต้องใกล้เคียงกับการวิเคราะห์โดยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Dynamic Procedure) [12]

สำหรับอาคารหลายดีกรีความอิสระ (Multi Degree of Freedom) จะใช้แนวจุดศูนย์กลางมวลของชั้นหลังคาเป็นจุดควบคุมการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง หลักการของวิธี Displacement Coefficient แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หลักการเบื้องต้นของวิธี Displacement Coefficient

เป้าหมายการเคลื่อนตัวด้านข้าง (Target Displacement) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \qquad (2.1)$$

โดยที่

T_e คือ คาบการแกว่งตามธรรมชาติประสิทธิผล (Effective Fundamental Period) เนื่องจากการตอบสนองของอาคารเมื่อเกิดแผ่นดินไหวที่ทำให้อาคารเกิดพฤติกรรมตอบสนองแบบเกินขอบเขตอีลาสติก เป็นผลให้คาบการแกว่งตามธรรมชาติของอาคารเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย คาบการแกว่งตามธรรมชาติประสิทธิผล คำนวณโดยสัมพันธ์กับสติฟเนสทางด้านข้าง ซึ่งหาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐาน กับการเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ดังสมการที่ 2.2

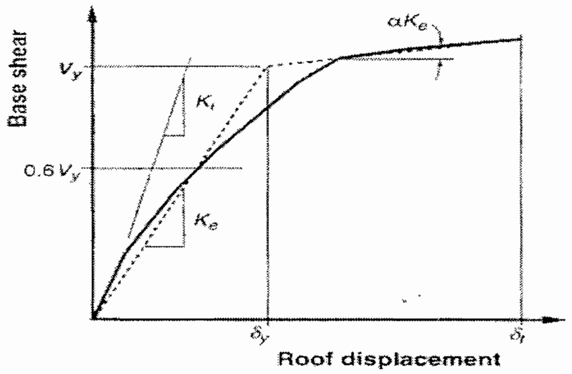
$$T_e = T_i\sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \tag{2.2}$$

โดยที่

T_i คือคาบการแกว่งตามธรรมชาติในช่วงอีลาสติก (Elastic Fundamental Period) ในทิศทางที่พิจารณา มีหน่วยเป็นวินาที

K_i คือสติฟเนสทางด้านข้างของอาคารในช่วงอีลาสติก

K_e คือสติฟเนสประสิทธิผลทางด้านข้างของอาคาร ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การหาค่าสติฟเนสประสิทธิผลทางด้านข้าง

โดยที่

S_a คือความเร่งตอบสนอง (Response Acceleration) ที่คาบการแกว่งประสิทธิผล

C_O คือสัมประสิทธิ์ปรับแก้เนื่องมาจากการนำแบบจำลองการเคลื่อนที่ของอาคาร แบบ SDOF มาใช้ประมาณการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคารแบบ MDOF ค่าสัมประสิทธิ์ C_0 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.3 หรือโดยใช้ตารางที่ 2.1

$$C_o = \Gamma_1 \phi_{1,roof} \tag{2.3}$$

โดยที่

Γ_1 คือแฟคเตอร์ร่วมของโหมดแรก (First Modal Participation Factor) คำนวณได้จากสมการที่ 2.8

$\phi_{1,roof}$ คือค่าของโหมดแรกที่ตำแหน่งชั้นหลังคา

C_1 คือสัมประสิทธิ์ปรับแก้เนื่องจากพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอาคารแบบเกินขอบเขตอีลาสติก โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของอาคารแบบอินอีลาสติกต่อการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของอาคารแบบอีลาสติก

= 1.0 เมื่อ Te > To

= (1.0 + (R-1)To/Te)/R เมื่อ Te < To

โดยที่ค่า C_1 ต้องไม่เกิน 1.5

To คือค่าคาบการแกว่ง ณ จุดที่กราฟสเปคตรัมเปลี่ยนจากช่วงความเร่งคงที่เป็นช่วงความเร็วคงที่

R คืออัตราส่วนของกำลัง (Strength Ratio) คำนวณได้จากสมการที่ 2.4

$$R = \frac{S_a}{V_y / W} \frac{1}{C_0} \tag{2.4}$$

โดยที่

S_a คือความเร่งตอบสนองที่คาบการแกว่งประสิทธิผล

V_y คือกำลังต้านทานแรงทางข้างที่จุดคราก หาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับการเคลื่อนตัวด้านข้าง ดังรูปที่ 2.2

W คือน้ำหนักคงที่ของอาคารรวมกับน้ำหนักจรที่เกิดขึ้นจริง

C_2 คือสัมประสิทธิ์ปรับแก้เนื่องจากการตอบสนองของโครงสร้างที่มีกำลังลดลงภายใต้แรงแบบวัฏจักร (Cyclic Loading) ซึ่งสามารถหาได้จากตารางที่ 2.2

C_3 คือสัมประสิทธิ์ปรับแก้เนื่องจากการโก่งของโครงสร้างจากผลของ P-Δ effect สำหรับกรณีอาคารที่ค่าสติฟเนสหลังการคลากยังเป็นบวกให้ใช้ $C_3 = 1.0$ สำหรับกรณีอื่นคำนวณได้ดังสมการที่ 2.5

$$C_3 = 1.0 + \frac{|\alpha| (R-1)^{3/2}}{T_e} \tag{2.5}$$

โดยที่

α คืออัตราส่วนระหว่างสติฟเนสของโครงสร้างหลังการคลาก ต่อสติฟเนสประสิทธิผลของโครงสร้างในช่วงอีลาสติก ดูรูปที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ C_O

จำนวนชั้นของอาคาร	สัมประสิทธิ์ปรับแก้ C_O
1	1.0
2	1.2
3	1.3
5	1.4
10 ชั้นขึ้นไป	1.5

ตารางที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ C_2

ระดับสมรรถภาพ (Performance Level)	T = 0.1 วินาที		$T_0 \geq T_0$ วินาที	
	โครงสร้างชนิดที่ 1	โครงสร้างชนิดที่ 2	โครงสร้างชนิดที่ 1	โครงสร้างชนิดที่ 2
Immediate Occupancy	1.0	1.0	1.0	1.0
Life Safety	1.3	1.0	1.1	1.0
Collapse Prevention	1.5	1.0	1.2	1.0

หมายเหตุ โครงสร้างชนิดที่ 1 หมายถึงโครงสร้างที่แรงเฉือนมากกว่า 30 เปอร์เซนต์ ที่ชั้นใดๆ ถูกต้านทานโดยชิ้นส่วนซึ่งอาจมีกำลังลดลงระหว่างรับแรงแผ่นดินไหว รวมถึงโครงสร้างแบบข้อแข็งธรรมดา, โครงสร้างยึดรั้งแบบรวมศูนย์, โครงสร้างที่จุดยึดต่อไม่แน่นเพียงพอ, โครงยึดรั้งด้วยการดึง, ผนังอิฐไม่เสริมแรง, ผนังรับแรงเฉือนวิกฤติ

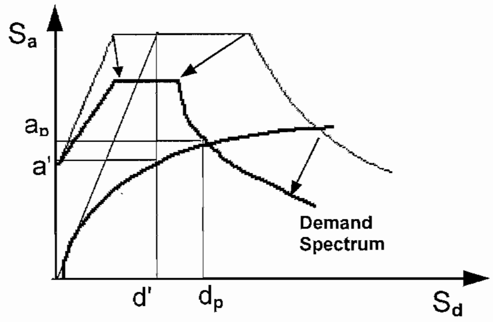
โครงสร้างชนิดที่ 2 หมายถึงโครงสร้างอื่นๆ ที่มิได้ระบุเป็นโครงสร้างชนิดที่ 1

2.3 วิธี Capacity Spectrum

หลักการของวิธี Capacity Spectrum คือการแทนที่สเปคตรัมผลตอบสนองแบบไม่เชิงเส้น (Inelastic Response Spectrum) ที่มีความหน่วง 5 เปอร์เซ็นต์ ด้วยสเปคตรัมผลตอบสนองแบบอีลาสติก (Elastic Response Spectrum) ที่มีค่าความหน่วงเท่ากับค่าความหน่วงเทียบเท่า (Equivalent Damping) ตามความสามารถในการสลายพลังงานของระบบ

การหาค่าเป้าหมายการเคลื่อนตัวทางด้านข้างเริ่มจากการแปลงกราฟ Capacity Curve ให้เป็นกราฟ Capacity Spectrum ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ แล้วแปลงสเปคตรัมผลตอบสนองแบบอีลาสติก (Elastic Response Spectrum) ให้เป็นกราฟ Demand Spectrum

กราฟ Capacity Spectrum และกราฟ Demand Spectrum จะถูกพล็อตในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเสมือนและการเคลื่อนตัวทางด้านข้างบนกราฟ ADRS (Acceleration Displacement Response Spectrum) จุดตัดระหว่างกราฟ Capacity Spectrum และกราฟ Demand Spectrum ที่มีความหน่วงที่สอดคล้องกัน เรียกว่า Performance Point ซึ่งถือเป็นค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดภายใต้แรงแผ่นดินไหวของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ หลักการของวิธี Capacity Spectrum แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 หลักการเบื้องต้นของวิธี Capacity Spectrum

ATC-40 [1] แสดงวิธีการหา Performance Point ไว้ 3 วิธี ซึ่งในงานศึกษาเชิงเปรียบเทียบนี้ จะใช้วิธีที่สอง (Procedure B) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. สร้างสเปคตรัมผลตอบสนองแบบยืดหยุ่น (ความหน่วง 5 เปอร์เซ็นต์) บนกราฟADRS
2. สร้างกลุ่มสเปคตรัมลดทอนผลตอบสนองแบบยืดหยุ่นที่มีความหน่วงอยู่ในช่วง 5 - 40 เปอร์เซ็นต์ บนกราฟเดียวกันกับข้อ 1
3. สร้าง Capacity Spectrum บนกราฟเดียวกันกับข้อ 1

4. สร้าง Bilinear Capacity Spectrum จาก Capacity Spectrum
5. คำนวณหาค่าความหน่วงประสิทธิผล (β_{eff}) สำหรับค่าการเคลื่อนตัวด้านข้าง (d_{pi}) ต่างๆ
6. พล๊อตจุด (d_{pi} , β_{eff}) ที่คำนวณได้จากข้อ 5 บนกราฟเดียวกัน
7. ลากเส้นเชื่อม (Connection line) ระหว่างจุด (d_{pi} , β_{eff}) แต่ละจุด จุดตัดระหว่าง Connection Line กับ Capacity Spectrum คือ Performance Point (d_p)

การสร้างกราฟ Capacity Spectrum

ความสามารถในการรับแรงด้านข้างของโครงสร้าง ซึ่งแสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับการเคลื่อนตัวด้านข้างของชั้นหลังคา ซึ่งเรียกว่า Capacity Curve จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเสมือน(Sa)กับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ(Sd) ซึ่งเรียกกราฟนี้ว่า กราฟCapacity Spectrum

โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างกราฟ Capacity Spectrum กับ Capacity Curve สามารถหาได้จากสมการที่ 2.6 และ 2.7

$$S_a = \frac{V_b}{W \ \alpha_1} \qquad (2.6)$$

$$S_d = \frac{\delta_{roof}}{\Gamma_1 \ \phi_{roof,1}} \qquad (2.7)$$

โดยที่

Γ_1 คือแฟคเตอร์ร่วมของโหมดแรก (First Modal Participation Factor)

$$\Gamma_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i \phi_{i1}}{\sum_{i=1}^{n} m_i \phi_{i1}^2} \qquad (2.8)$$

α_1 คือสัมประสิทธิ์ของมวลของโหมดแรก (First Modal Mass Coefficient)

$$\alpha_1 = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} m_i \phi_{i1}\right)^2}{\left(\sum_{i=1}^{n} m_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} m_i \phi_{i1}^2\right)} \qquad (2.9)$$

mi คือมวลของระดับชั้นที่ i

ϕ_{i1} คือค่าของโหมดแรกที่ระดับชั้นที่ i

n คือจำนวนชั้นทั้งหมด

V_b คือแรงเฉือนที่ฐาน

W คือน้ำหนักคงที่ของอาคารรวมกับน้ำหนักจรที่เกิดขึ้นจริง

δ_{roof} คือการเคลื่อนที่ของชั้นหลังคา

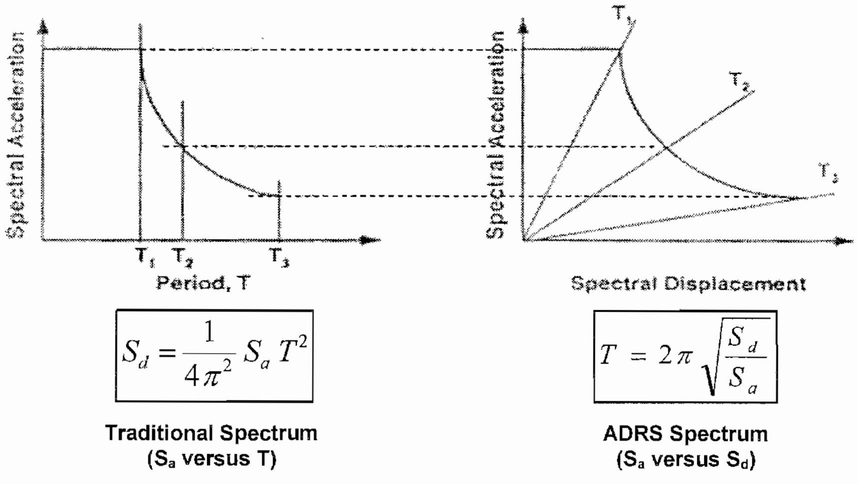
S_a คือความเร่งเสมือน

S_v คือความเร็วเสมือน

S_d คือการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ

การสร้างกราฟ Demand Spectrum

สเปคตรัมผลตอบสนองแบบอีลาสติกของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระซึ่งแสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเสมือนกับคาบการแกว่ง จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเสมือน(Sa)กับการเคลื่อนตัวด้านข้าง(Sd) ซึ่งเรียกว่า Demand Spectrum (ADRS) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การแปลงกราฟ $S_a - T$ เป็นกราฟ S_a - S_d

โดยที่ความสัมพันธ์บนจุดใดๆของเส้นกราฟ Demand Spectrum ระหว่างกราฟทั้งสองรูปแบบหาได้จากสมการที่ 2.10

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a g \tag{2.10}$$

โดยที่

T คือคาบการแกว่ง

g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่า 9.81 เมตร/วินาที^{2}

ความหน่วงเทียบเท่า (Equivalent Viscous Damping)

ความหน่วงที่เกิดขึ้นในอาคารที่มีพฤติกรรมแบบเกินขอบเขตอีลาสติกภายใต้แรงแผ่นดินไหวเป็นผลรวมของความหน่วงจากคุณลักษณะ (Inherent) ในตัวโครงสร้างกับความหน่วงจากการสลายพลังงานจากผลของวัฏจักรแรงกระทำ (Hysteretic Damping) ดังนั้นค่าความหน่วงเทียบเท่าสามารถหาได้ดังสมการที่ 2.11

$$\beta_{eq} = \beta_o + 0.05 \tag{2.11}$$

โดยที่

β_{eq} คือความหน่วงเทียบเท่า (Equivalent Viscous Damping)

β_o คือ Hysteretic Damping

0.05 คือความหน่วง 5 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากคุณลักษณะในตัวโครงสร้าง (Inherent Damping)

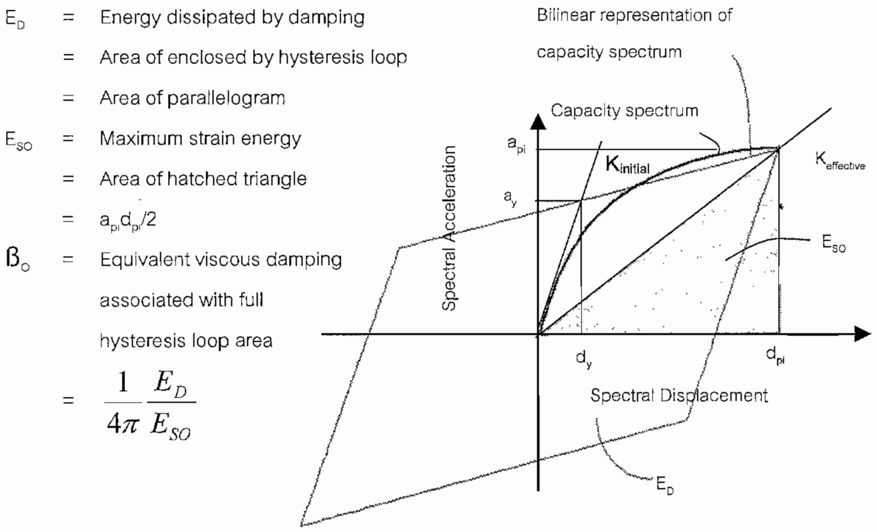
เทอม β_o สามารถคำนวณหาได้จากการเทียบกันของพลังงานที่สลายไปภายใต้แรงกระทำทิศทางเดียว (Monotonic Loading) และแรงแบบวัฏจักร (Cyclic Loading) ดังสมการที่ 2.12

$$\beta o = \frac{1}{4\pi}\frac{E_D}{E_{SO}} \tag{2.12}$$

โดยที่

E_D คือ การกระจายพลังงานโดยความหน่วง (Energy Dissipated by Damping) ดังแสดงในรูปที่ 2.5

E_{SO} คือ พลังงานความเครียดสะสมสูงสุด (Maximum Strain Energy) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การหาค่าความหน่วงเทียบเท่า

จากรูปที่ 2.5 สามารถคำนวณหาค่า E_D และ E_{SO} ได้ดังนี้

$$E_D = 4\left(a_y d_{pi} - d_y a_{pi}\right) \tag{2.13}$$

$$E_{SO} = a_{pi} d_{pi} / 2 \tag{2.14}$$

ความหน่วงประสิทธิผล (Effective Viscous Damping)

วัฏจักรของแรงกระทำ (Hysteresis Loop) ดังรูปที่ 2.5 มีความถูกต้องเหมาะสมกับอาคารที่มีพฤติกรรมแบบเหนียวสมบูรณ์ (Perfect Ductile) และมีความหน่วงเทียบเท่าน้อยกว่า 30 เปอร์เซนต์โดยประมาณ สำหรับอาคารนอกเหนือจากที่กล่าวมานี้ การนำลักษณะวัฏจักรของแรงกระทำตามรูปที่ 2.5 และสมการที่ 2.11 ไปใช้ จะทำให้ค่าความหน่วงเทียบเท่าที่ได้มีค่ามากเกินความเป็นจริงเนื่องจากผลการลดลงของพื้นที่ภายใน Hysteresis Loop ที่เรียกกันว่า Pinching

ดังนั้นแฟคเตอร์ปรับค่าความหน่วง (κ) จึงถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าความหน่วงประสิทธิผลตามสมการที่ 2.15

$$\beta_{eff} = \kappa\beta_o + 0.05 \tag{2.15}$$

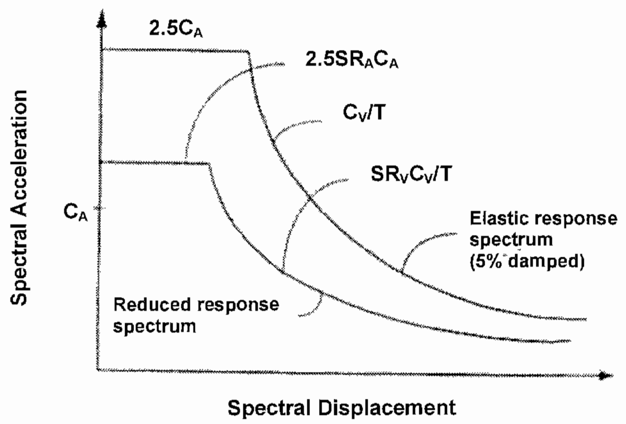
โดยที่

β_{eff} คือความหน่วงประสิทธิผล (Effective Viscous Damping)

κ คือแฟคเตอร์ปรับค่าความหน่วง (Damping Modification Factor) สามารถหาโดยใช้ตารางที่ 2.3

การสร้างกราฟ Reduce Demand Spectrum

กราฟ Reduced Demand Spectrum สามารถสร้างได้จากกราฟ Demand Spectrum โดยการใช้แฟคเตอร์ตัวคูณลดค่าสเปคตรัม (Spectrum Reduction Factor) สำหรับแปลงสเปคตรัมผลตอบสนองแบบอีลาสติกให้เป็นเสมือนสเปคตรัมผลตอบสนองแบบอินอีลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งตัวคูณลดค่าสเปคตรัมสามารถคำนวณได้ดังสมการ 2.16 และ 2.17



รูปที่ 2.6 การหาสเปคตรัมผลตอบสนองแบบอินอีลาสติก

$$SR_A = \frac{3.21 - 0.68\ \ln(\beta_{eff})}{2.12} \tag{2.16}$$

$$SR_V = \frac{2.31 - 0.41\ \ln(\beta_{eff})}{1.65} \tag{2.17}$$

โดยที่

SR_A คือแฟคเตอร์ตัวคูณลดค่าสเปคตรัมในช่วงความเร่งคงที่ (Constant Acceleration Range) ซึ่งจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่าที่แสดงในตารางที่ 2.4

SR_V คือแฟคเตอร์ตัวคูณลดค่าสเปคตรัมในช่วงความเร็วคงที่ (Constant Velocity Range) ซึ่งจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่าที่แสดงในตารางที่ 2.4

β_{eff} คือความหน่วงประสิทธิผล เป็นเปอร์เซนต์

ตารางที่ 2.3 แฟคเตอร์ปรับแก้ค่าความหน่วง κ

ประเภทโครงสร้าง	β_o (%)	κ
A	≤ 16.25	1.0
	> 16.25	$1.13 - 0.51\frac{(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}}$
B	≤ 25	0.67
	> 25	$0.845 - \frac{0.446(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}}$
C	ทุกค่า	0.33

ตารางที่ 2.4 ค่า SR_A และ SR_V ต่ำสุดที่ยอมให้ใช้ได้ในสมการ 2.17 และ 2.18

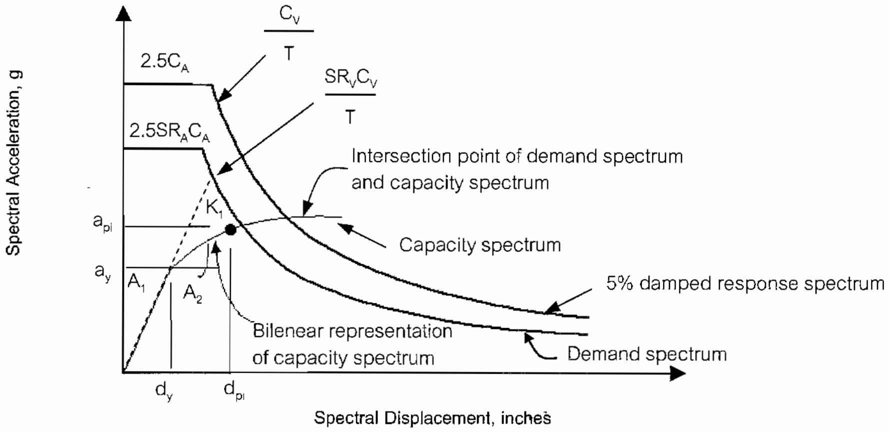
ประเภทโครงสร้าง	SR_A	SR_V
A	0.33	0.50
B	0.44	0.56
C	0.56	0.67

ตารางที่ 2.5 รายละเอียดประเภทของโครงสร้าง

คาบการสั่น	ความสามารถในการสลายพลังงานของอาคาร		
	ดี	ปานกลาง	เลว
สั้น	A	B	C
ยาว	B	C	C

จุดตัดระหว่างกราฟ Capacity Spectrum กับกราฟ Demand Spectrum

จุดตัดระหว่างกราฟ Capacity Spectrum กับกราฟ Demand Spectrum ที่มีค่าความหน่วงเทียบเท่าสอดคล้องกันกับค่าแฟคเตอร์ความเหนียวที่จุดตัดนั้น เรียกว่า Performance Point ซึ่งถือว่าเป็นค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดภายใต้แรงแผ่นดินไหวของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ ดังแสดงตามรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การหาจุดตัด Performance Point

2.4 วิธี Modal Pushover Analysis

หลักการของวิธี Modal Pushover Analysis คือการพิจารณาผลตอบสนองของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระที่โหมดต่างๆ แล้วนำผลมารวมกันเพื่อให้มีผลตอบสนองของโหมดที่สูงกว่ารวมอยู่ด้วย โดยการแปลงกราฟ Pushover ของโหมดต่างๆ ให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ แล้วใช้ความสัมพันธ์นี้ไปหาผลตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวของโหมดต่างๆ จากนั้นนำผลตอบสนองของแต่ละโหมดมารวมกันเป็นค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Modal Pushover Analysis สำหรับอาคารที่มีพฤติกรรมการตอบสนองอยู่ในช่วงอีลาสติก มาจากการวิเคราะห์สเปคตรัมผลตอบสนองเชิงโหมด (Modal Response Spectrum Analysis) ซึ่งมีพื้นฐานมาจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Modal Response Hhistory Analysis นั้นได้ถูกพัฒนาและปรับปรุงเพื่อให้สามารถใช้วิเคราะห์อาคารที่มีพฤติกรรมการตอบสนองเกินขอบเขตอีลาสติกภายใต้แรงแผ่นดินไหว โดยใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยวิธี Nonlinear Response History Analysis ร่วมกับข้อสมมติฐานบางประการ [2, 10] พื้นฐานที่มาของวิธี Modal Pushover Analysis อยู่บนพื้นฐานของวิธี Nonlinear Response Hisotry Analysis ดังนี้

หลักการของวิธี Nonlinear Response History Analysis

จากสมการการเคลื่อนที่สำหรับระบบอีลาสติกเชิงเส้น เวคเตอร์ของแรงสติฟเนส {fs} มีค่าเท่ากับ [k]{u} แต่ในระบบอินอีลาสติกที่ผลตอบสนองแบบไม่เชิงเส้น เวคเตอร์ของแรงสติฟเนสจะเป็นฟังก์ชั่นของการเคลื่อนที่ทางด้านข้างและทิศทางของความเร็ว

$$\{f_s\} = \{f_s(u, sign\ \dot{u})\} \tag{2.18}$$

แทน fs ลงในสมการการเคลื่อนที่ จะได้

$$[m]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + \{fs(u, sign\ \dot{u})\} = -[m]\{1\}\ddot{u}_g(t) \tag{2.19}$$

สมการ 2.18 และ 2.19 เป็นระบบ n สมการที่ไม่อิสระต่อกัน(Coupled Equations)เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านและการเคลื่อนที่ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงอีกต่อไปหลังจากเกิดการคลากการแก้สมการนั้นไม่สามารถคำนวณแบบแยกโหมดได้เนื่องจากพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้น และไม่สามารถใช้หลักการรวมผล (Superposition) ได้ ดังนั้นต้องใช้วิธีการแก้สมการ n สมการพร้อมกัน

(Simultaneous Solving) โดยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) จึงจะได้ผลตอบสนองของระบบไม่เชิงเส้นที่ถูกต้อง (Exact nonlinear response history analysis)

หลักการของวิธี Modal Pushover Analysis

ทฤษฎีการวิเคราะห์เชิงโหมดสำหรับระบบอีลาสติกเชิงเส้นนั้นในทางทฤษฎีไม่สามารถที่จะนำใช้กับระบบอินอีลาสติกได้ แต่ Chopra and Goel ได้พัฒนาวิธี Modal Pushover Analysis สำหรับระบบอินอีลาสติก โดยนำหลักการวิเคราะห์เชิงโหมดร่วมกับข้อสมมุติฐานบางประการเพื่อความสะดวกในการหาผลตอบสนองของระบบอินอีลาสติกดังนี้

ข้อสมมุติฐานที่ 1 คาบการแกว่งตามธรรมชาติ และเวคเตอร์รูปร่างการสั่นไหวของโหมด (Mode Shape) จะมีค่าเท่ากันทั้งในช่วงอีลาสติกและในช่วงอินอีลาสติก ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างเวคเตอร์การเคลื่อนตัวด้านข้าง u กับเวคเตอร์รูปร่างการสั่นไหวของโหมด ได้ดังสมการ

$$\{u\} = [\phi]\{q\} \tag{2.20}$$

แทนค่าของ {u} ลงในสมการการเคลื่อนที่ แล้วคูณข้างหน้าด้วย $[\phi]^T$ ตลอดสมการจะได้

$$[\phi]^T[m][\phi]\{\ddot{q}\} + [\phi]^T[c][\phi]\{\dot{q}\} + [\phi]^T\{fs(u, sign\,\dot{u})\} = -[\phi]^T[m]\{1\}\ddot{u}_g(t) \tag{2.21}$$

จากคุณสมบัติ Orthogonality of Vector จะได้

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & .. & 0 \\ 0 & 0 & M_n \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \ddot{q}_1 \\ .. \\ \ddot{q}_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 \\ 0 & .. & 0 \\ 0 & 0 & C_n \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ .. \\ \dot{q}_n \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_{s1} \\ .. \\ F_{sn} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_1(t) \\ .. \\ R_n(t) \end{Bmatrix} \tag{2.22}$$

โดยที่

$$F_{si} = F_{si}(q, sign\,\dot{q}) = \{\phi\}_i^T\{f_s(u, sign\,\dot{u})\} \tag{2.23}$$

ระบบสมการนี้ สามารถเขียนอยู่ในรูป n สมการ ที่ไม่อิสระต่อกัน ได้ดังนี้

$$M_i\ddot{q}_i + C_i\dot{q}_i + F_{si}(q, sign\,\dot{q}) = R_i(t) \tag{2.24}$$

หรือ

$$\ddot{q}_i + 2\zeta_i\omega_i\dot{q}_i + \frac{F_{si}(q, sign\,\dot{q})}{M_i} = -\Gamma_i\ddot{u}_g(t) \tag{2.25}$$

สมการที่ 2.25 ยังคงเป็นระบบ n สมการที่ไม่อิสระต่อกันเนื่องจากแรงสติฟเนส (Fsi) เป็นฟังก์ชั่นของผลรวมพิกัดการเคลื่อนที่ของทุกโหมด (q) หลังจากเกิดการคลาก

ข้อสมมุติฐานที่ 2 ผลความเกี่ยวพันกันระหว่างค่าพิกัดการเคลื่อนที่ของแต่ละโหมด (Coupling of Modal Coordinate) หลังจากเกิดการคลากสามารถละทิ้งได้

ดังนั้นจะได้ว่าแรงสติฟเนสเป็นฟังก์ชั่นของพิกัดการเคลื่อนที่ของโหมดเดียวกันเท่านั้น

$$F_{si} = F_{si}(q_i, sign\,\dot{q}_i) = \{\phi\}_i^T\{f_s(u_i, sign\,\dot{u}_i)\} \tag{2.26}$$

$$\ddot{q}_i + 2\zeta_i\omega_i\dot{q}_i + \frac{F_{si}(q_i, sign\,\dot{q}_i)}{M_i} = -\Gamma_i\ddot{u}_g(t) \tag{2.27}$$

สมการที่ 2.27 สามารถเขียนให้อยู่ในรูประบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ (SDOF) โดยแทนที่ q_i ด้วย $\Gamma_i D_i$ ได้ดังนี้

$$\ddot{D}_i + 2\zeta_i\omega_i\dot{D}_i + \frac{F_{si}}{L_i} = -\ddot{u}_g(t) \tag{2.28}$$

โดยที่

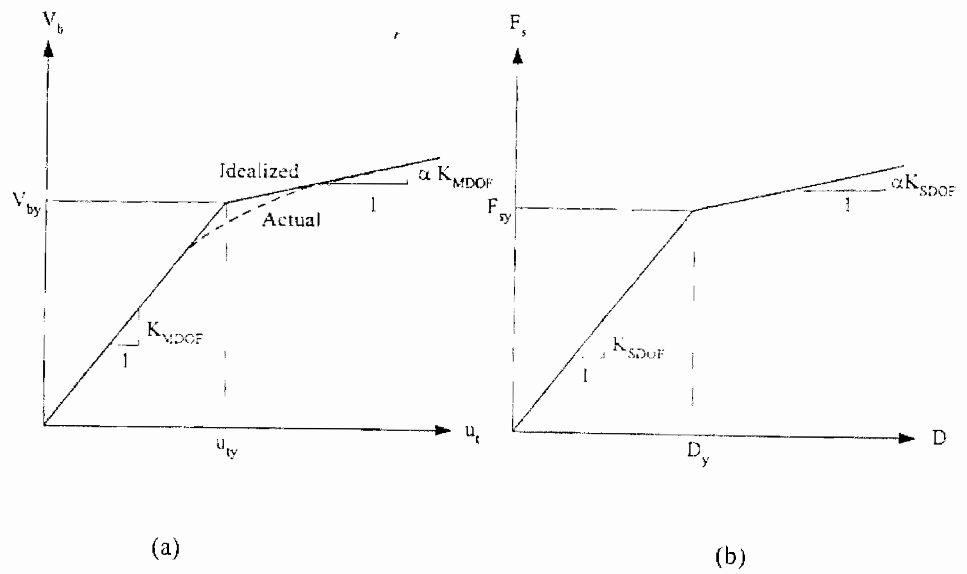
$$F_{si} = F_{si}(D_i, sign\,\dot{D}_i) = \{\phi\}_i^T\{f_s(D_i, sign\,\dot{D}_i)\} \tag{2.29}$$

และ

$$L_i = \Gamma_i M_i = \{\phi\}_i^T [m]\{1\} \tag{2.30}$$

สมการที่ 2.28 สามารถแก้โดยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ซึ่งก่อนอื่นจะต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่าง F_{si} / L_i กับ D_i

ข้อสมมุติฐานที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่และแรงกระทำ (Fs-D) ของระบบ SDOF ในแต่ละโหมดสามารถหาได้จากกราฟ Pushover Curve(V_b-u_t)ของโครงสร้างในโหมดนั้นๆ โดยกราฟ Pushover ในแต่ละโหมดสามารถแทนได้ด้วยกราฟ Bilinear เพื่อความสะดวกในการหาคุณสมบัติและความสัมพันธ์ต่างๆ



รูปที่ 2.8 การแปลงกราฟ V_b - U_{roof} เป็นกราฟ F_s - D

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของระบบ MDOF และระบบ SDOF เป็นดังนี้

$$D_i = \frac{u_{roof,i}}{\Gamma_i \phi_{roof,i}} \tag{2.31}$$

$$F_{si} = \frac{V_{bi}}{\Gamma_i} \tag{2.32}$$

โดยที่

$M_i = L_i\Gamma_i$ คือมวลประสิทธิผลของโหมด (Effective modal mass)

$$\frac{F_{si}}{L_i} = \frac{V_{bi}}{M_i^*} \tag{2.33}$$

ข้อสมมุติฐานที่ 4 ค่าผลตอบสนองรวมของระบบอินอีลาสติกสามารถใช้การรวมผลแบบระบบอีลาสติกได้โดยวิธี SRSS

$$r_{MPA} = \left(\sum_{i=1}^{n} r_{io}^2\right)^{1/2} \tag{2.35}$$

โดยที่

r_{MPA} คือค่าการรวมผลลัพธ์สูงสุดโดยวิธี SRSS

r_{io} คือค่าผลลัพธ์สูงสุดของโหมดที่ i

เป้าหมายระยะเคลื่อนตัวด้านข้างของชั้นหลังคา (Target roof displacement)

เป้าหมายระยะเคลื่อนตัวด้านข้างของชั้นหลังคา สามารถประมาณได้จากค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของระบบอินอีลาสติกแบบเทียบเท่าระบบหนึ่งดีกรีความอิสระ โดยที่ $D_{i,max}$ คำนวณได้จากการแก้สมการที่ 2.28 โดยตรง หรือหาโดยการใช้สเปคตรัมผลตอบสนองของระบบอินอีลาสติก (Inelastic Response Spectrum) ดังนั้นเป้าหมายการเคลื่อนตัวด้านข้างของชั้นหลังคาในระบบ MDOF สามารถประมาณได้ดังสมการที่ 2.34

$$u_{roof,i} = \Gamma_i \phi_{roof,i} D_{i,\max} \tag{2.34}$$

โดยที่

$u_{roof,i}$ คือการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคาของโหมดที่ i

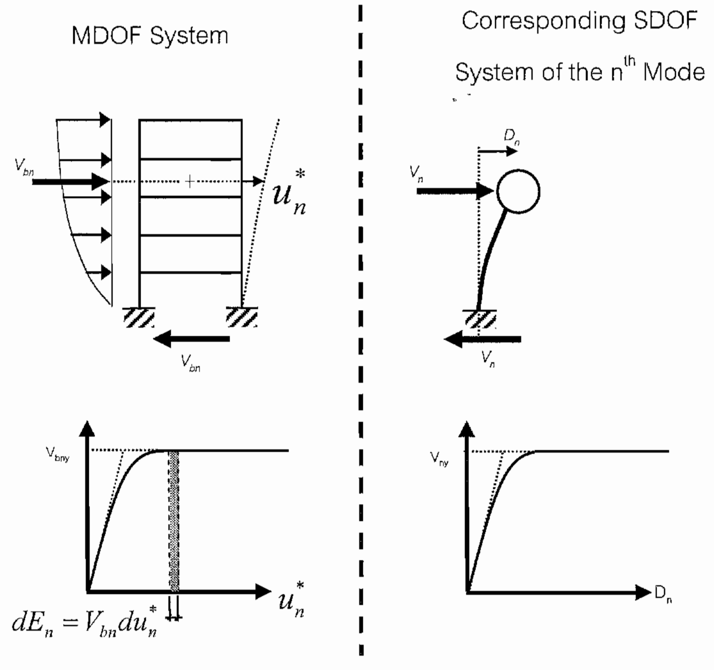
Γ_i คือแฟคเตอร์ร่วมของโหมดที่ i

$\phi_{roof,i}$ คือค่ารูปร่างของโหมดที่ i ที่ชั้นหลังคา

$D_{i,max}$ คือการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของโหมดที่ i

2.5 วิธี Energy Based Analysis

การสร้าง Pushover Curve โดยทั่วไปจะสัมพันธ์กับค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของชั้นหลังคา อย่างไรก็ตามไม่เป็นที่ชัดเจนว่าการใช้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคาจะเป็นดัชนีที่แสดงคุณลักษณะของโครงสร้างได้เหมาะสมดีหรือไม่ นอกจากนี้ในกรณีที่พฤติกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างมีโหมดที่สูงกว่าเข้ามาเกี่ยวข้อง การนำเอาค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคามาใช้เป็นดัชนีแสดงคุณลักษณะของโครงสร้าง อาจได้ผลที่ไม่ถูกต้องนัก [17] ดังนั้นวิธีพลังงานจึงถูกนำมาใช้สร้างกราฟ Capacity เพื่อหาค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ ด้วยการใช้หลักการสมดุลย์ของพลังงานในการสร้าง Energy Demand Curve และ Energy Capacity Curve ซึ่งจะสามารถหาเป้าหมายระยะการเคลื่อนตัวด้านข้าง (Target Displacement) ได้จากจุดตัดของกราฟทั้งสอง [16] หลักการเบื้องต้นของวิธี Energy Based Analysis แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 หลักการเบื้องต้นของวิธี Energy Based Analysis

หลักการสมดุลของพลังงาน (Energy Balance Concept)

ในช่วงอินอีลาสติก พลังงานที่ระบบโครงสร้างดูดซับไว้ (Absorb Energy) อาจมีค่าน้อยกว่าหรือมากกว่าพลังงานที่ระบบโครงสร้างดูดซับไว้ในช่วงอีลาสติก ขึ้นอยู่กับคาบการสั่นของระบบโครงสร้างซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการสมดุลของพลังงานได้ดังสมการที่ 2.36

$$E_e + E_p = \gamma \frac{1}{2} m S_v^2 \tag{2.36}$$

โดยที่

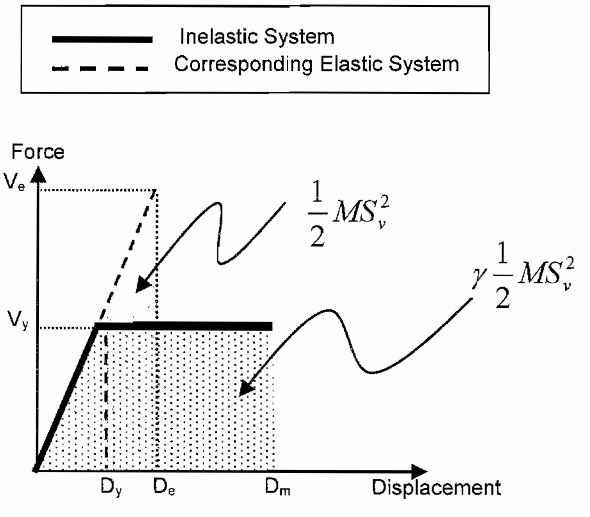
E_e คือพลังงานที่ระบบโครงสร้างดูดซับไว้ในช่วงอีลาสติก (Elastic Energy)

E_p คือพลังงานที่สลายไปเนื่องจากการคลากของระบบ (Energy Dissipate by Yielding)

γ คือแฟคเตอร์อัตราส่วนของการดูดซับพลังงานระหว่างระบบอินอีลาสติกต่อระบบอีลาสติกที่สอดคล้องกัน (Modification Factor)

S_v คือความเร็วเสมือน (Pseudo Velocity)

ค่าแฟคเตอร์อัตราส่วนของการดูดซับพลังงาน (γ) สามารถคำนวณหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของระบบอีลาสติกและระบบอินอีลาสติกดังสมการที่ 2.37 และรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 หลักการสมดุลของพลังงาน

$$\gamma = \frac{E_e + E_p}{\frac{1}{2} m S_v^2} = \frac{\frac{1}{2} V_y D_y + V_y (D_m - D_y)}{\frac{1}{2} V_e D_e}$$

$$\gamma = \frac{2\mu - 1}{R^2} \qquad (2.37)$$

โดยที่

μ คือแฟคเตอร์ความเหนียว (Ductility Factor)

= D_m / D_y

R คือ แฟคเตอร์ตัวคูณลดกำลังคลาก (Yield Strength Reduction Factor)

= $D_e / D_y = V_e / V_y$

ปกติแล้วแฟคเตอร์ตัวคูณลดกำลังคลาก (R) เป็นฟังก์ชั่นของแฟคเตอร์ความเหนียว (μ) กับคาบการแกว่ง (T) ของระบบซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง R กับ μ สามารถหาโดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของระบบโดยตรงหรืออาจหาจากสูตร (Newmark and Hall) ดังนี้

R = $(2\mu - 1)^{1/2}$ สำหรับระบบที่คาบการแกว่งสั้น (Acceleration Sensitive Region)

R = μ สำหรับระบบที่คาบการแกว่งยาว

ในระบบหลายดีกรีความอิสระ การใช้สมการซึ่งแฟคเตอร์ γ เป็นฟังก์ชั่นของแฟคเตอร์ความเหนียวทางด้านการเคลื่อนตัว (μ) และแฟคเตอร์ตัวคูณลดกำลังคลาก (R) อาจไม่ค่อยสะดวก ดังนั้นแฟคเตอร์ความเหนียวทางด้านพลังงาน (Energy Ductility , μ_E) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าการดูดซับพลังงานทั้งหมดต่อค่าการดูดซับพลังงานที่จุดคลากของระบบ สามารถนำมาใช้แทนได้ดังสมการที่ 2.38

$$\mu_E = \frac{\frac{1}{2} V_y D_y + V_y (D_m - D_y)}{\frac{1}{2} V_y D_y} = 2\mu - 1 \qquad (2.38)$$

ดังนั้นสมการที่ 2.37 สามารถเขียนในเทอมของแฟคเตอร์ความเหนียวทางด้านพลังงานได้ดังสมการที่ 2.39

$$\gamma_E = \frac{\mu_E}{R^2} \qquad (2.39)$$

Energy Capacity Curve คือเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซับพลังงานของโครงสร้าง กับการเคลื่อนตัวด้านข้างของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ ซึ่งสร้างโดยการแปลงกราฟ V_b- u เป็นกราฟ E_a-D โดยใช้สมการที่ 2.40 และ 2.41

$$E_a = E_e + E_p = \int V_b dD \tag{2.40}$$

$$D = \frac{u_{roof}}{\Gamma_1 \phi_{roof,1}} \tag{2.41}$$

Energy Demand Curve คือเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานจลน์ของระบบ กับการเคลื่อนตัวด้านข้างของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ ซึ่งสร้างจากการคำนวณค่าElastic Energy Demand โดยใช้ค่าความเร็วเสมือน(Sv) เป็นกราฟ E_a -D โดยใช้สมการที่ 2.42 และ 2.43

$$E_a = \gamma \frac{1}{2} M^* S_v^2 \tag{2.42}$$

$$D = D_m \tag{2.43}$$

โดยที่

S_V คือความเร็วเสมือน (Pseudo Velocity)

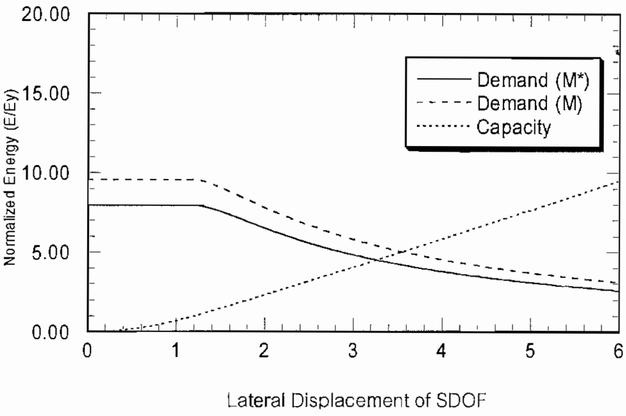
D_m การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ

γ คือแฟคเตอร์อัตราส่วนของการดูดซับพลังงานระหว่างระบบอินอีลาสติกต่อระบบอีลาสติก

M* คือมวลประสิทธิผลของโหมด (Effective Modal Mass)

$$= \frac{\left(\{\phi\}_i^T [m] \{1\}\right)^2}{\{\phi\}_i^T [m] \{\phi\}_i}$$

เป้าหมายการเคลื่อนตัวด้านข้าง (Target Displacement) สามารถหาได้โดยการใส่ Energy Capacity Curve และ Energy Demand Curve ลงบนกราฟ E_a-D ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand

ค่า *D* ที่ตรงกับจุดตัดระหว่างเส้นกราฟทั้งสอง คือ เป้าหมายการเคลื่อนตัวด้านข้างของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระที่จุดสมดุลของพลังงาน(D_p)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างที่ชั้นใดๆ ของอาคาร กับค่าการเคลื่อนตัวของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ เป็นดังสมการที่ 2.44

$$u_i = \Gamma_1 \phi_i D_p \tag{2.44}$$

จากสมการที่ 2.43 จะได้ว่าค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างสูงสุดของชั้นหลังคา (Target Roof Displacement) เป็นดังนี้

$$u_{roof,1} = \Gamma_1 \phi_{roof,1} D_p \tag{2.45}$$

โดยที่

$u_{roof,1}$ คือการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคาของโหมดที่ 1

Γ_1 คือแฟคเตอร์ร่วมของโหมดที่ 1

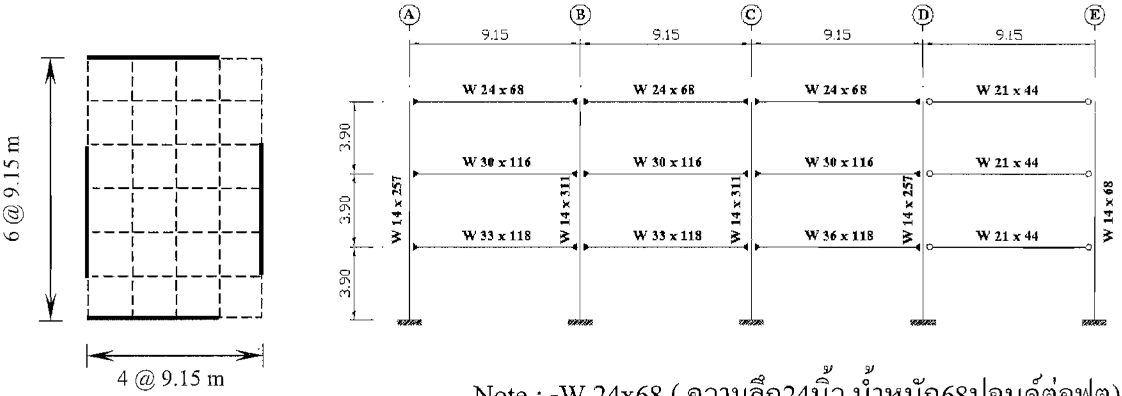
$\phi_{roof,1}$ คือค่ารูปร่างของโหมดที่ 1 ที่ชั้นหลังคา

D_p คือการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่จุดพลังงานสมดุลย์ของระบบโครงสร้าง

บทที่ 3 การวิเคราะห์ด้วยวิธีไม่เชิงเส้นแบบต่างๆ

3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 3 ชั้น

โครงสร้างเหล็กสูง 3 ชั้นและ 9 ชั้นที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นโครงสร้างเหล็กมาตรฐาน ออกแบบโดย Brandow & Johnston Associates สำหรับใช้ในโครงการ SAC Steel Project [19] โดยมีรายละเอียดโครงสร้างเหล็กสูง 3 ชั้นตามรูปที่ 3.1 มีขนาดตามแบบแปลนกว้าง 36.6 เมตร (120 ฟุต) ยาว 54.9 เมตร (180 ฟุต) สูง 11.9 เมตร (39 ฟุต) ระยะแต่ละช่วงวัดจากศูนย์กลางยาว 9.15 เมตร (30 ฟุต) ออกแบบให้โครงเฟรมรอบนอกเป็นโครงข้อแข็ง (แสดงเป็นเส้นทึบตามรูปแปลน) ทำหน้าที่ต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างโดยใช้ชิ้นส่วนหน้าตัดรูป Wide Flange Section ขนาดดังระบุในรูป 3.1 ทำการวิเคราะห์แบบสองมิติโดยใช้โครงเฟรมในทิศทางตะวันออก-ตะวันตกที่มี 4 ช่วงโดยที่ 3 ช่วงแรกเป็นโมเมนต์เฟรม ฐานของโครงสร้างเป็นแบบยึดแน่น กำลังคลากของคานทุกตัวใช้ 338 เมกกะปาสคาล (49 ksi.) กำลังคลากของเสาทุกต้นใช้ 380 เมกกะปาสคาล (55 ksi.) รับมวลครึ่งหนึ่งของทั้งอาคาร 1476.4 x 10^3 กิโลกรัม (101.12 kip-sec^2/ft.) โดยกระจายไปยังชั้นที่หนึ่ง 478.9 x 10^3 กิโลกรัม (32.80 kip-sec^2/ft.) ชั้นที่สอง 478.9 x 10^3 กิโลกรัม (32.80 kip-sec^2/ft.) และชั้นที่สาม 518.6 x 10^3 กิโลกรัม (35.52 kip-sec^2/ft.) ชิ้นส่วนโครงสร้างสมมุติให้มีพฤติกรรมแบบ อีลาสติก-พลาสติก โดยมี Strain hardening 2 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความหน่วง 5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับโหมดที่หนึ่งและโหมดที่สอง ส่วนผลกระทบเนื่องจากน้ำหนักและผลกระทบเนื่องจาก P-delta effect จะไม่นำมาพิจารณาในการวิเคราะห์โครงสร้างเหล็กสูง 3 ชั้นนี้



Note : -W 24x68 (ความลึก24นิ้ว น้ำหนัก68ปอนด์ต่อฟุต)

- ระยะที่แสดงมีหน่วยเป็นเมตร

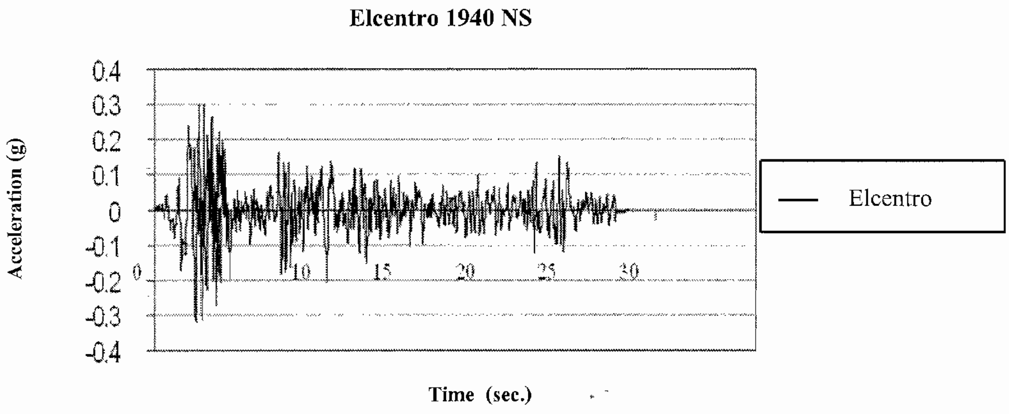
แปลน รูปด้านข้าง

รูปที่ 3.1 โครงสร้างเหล็กสูง 3 ชั้น

3.1.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Dynamic Analysis)

โครงสร้างเหล็กสูง 3 ชั้นนี้ได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม SAP2000 [11] โดยใช้ระยะศูนย์กลางถึงศูนย์กลางชิ้นส่วนเป็นหลัก

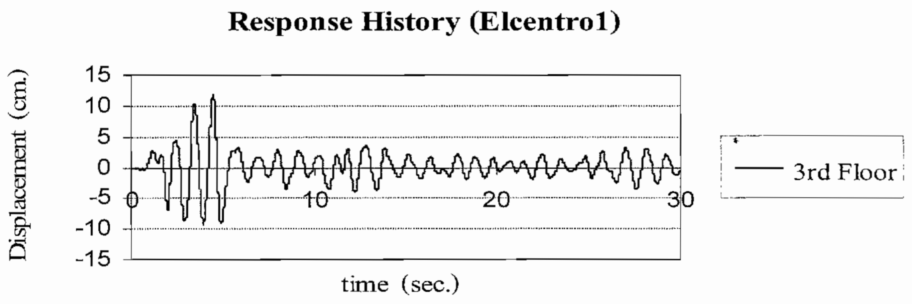
ข้อมูลแผ่นดินไหวสำหรับใช้ในการศึกษาวิจัยนี้คือ Elcentro 1940 NS[7] ดังรูปที่3.2 โดยใช้ตัวคูณปรับระดับความรุนแรงให้เป็นห้าระดับความรุนแรงคือ 0.88, 2.19, 3.05, 3.72, 4.38 เท่า สำหรับอาคารเหล็กสูง 3 ชั้น เพื่อให้ผลการเคลื่อนตัวด้านข้างของชั้นหลังคาเทียบกับความสูงอาคารอยู่ที่ 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



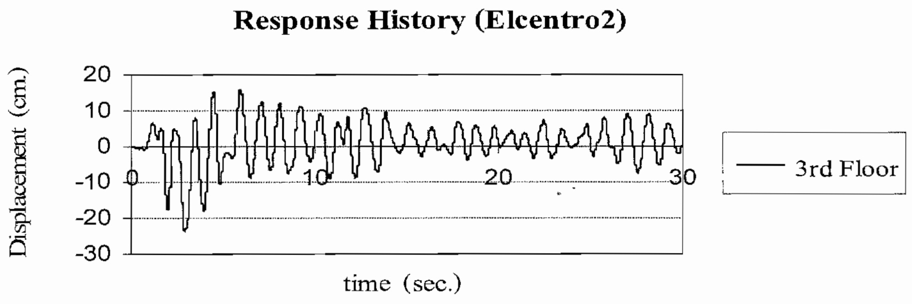
รูปที่ 3.2 กราฟแผ่นดินไหว Elcentro 1940 NS

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นโดยใช้โปรแกรม SAP2000 ได้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของชั้นหลังคาอาคาร 3 ชั้น ที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีค่าเท่ากับ 12.027, 23.744, 36.098, 47.638 และ 59.416 เซนติเมตร ตามลำดับ ผลตอบสนองการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคาอาคาร 3 ชั้นแสดงดังรูปที่ 3.3 ถึง 3.7

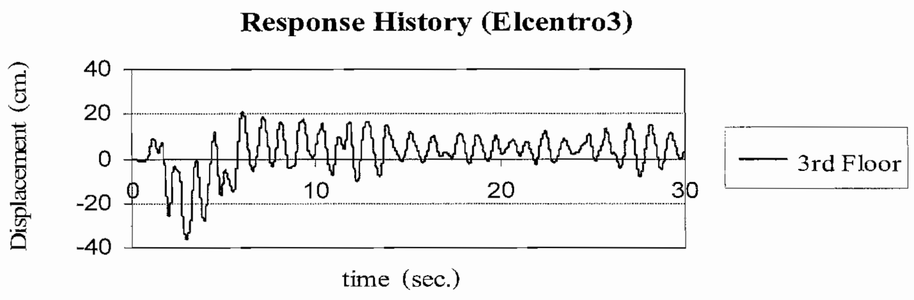
ผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด(Peak Floor Displacement)ในแต่ละชั้น , ค่าStory Drift สูงสุดในแต่ละชั้น และ ค่า Rotation Ductility สูงสุดในแต่ละชั้น จะได้นำเสนอในบทที่ 5 หัวข้อที่ 5.1.1 ในตารางที่ 5.1 ถึง 5.4 ต่อไป



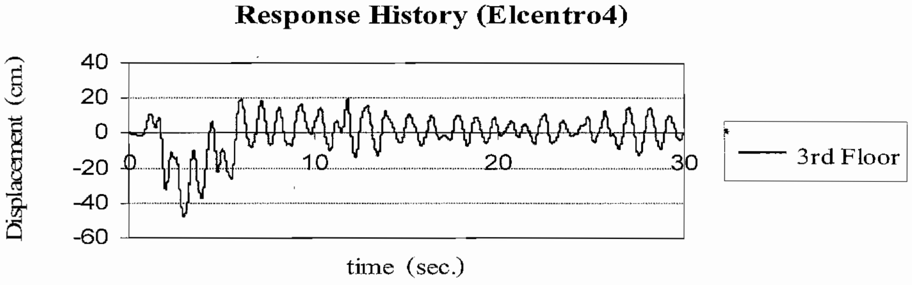
รูปที่ 3.3 Response History ของชั้นหลังคาอาคาร 3 ชั้นที่ระดับความรุนแรง 0.88 Elcentro(Elcentro1)



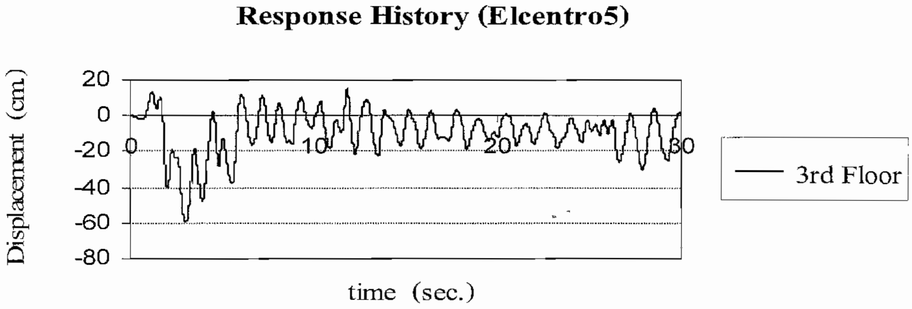
รูปที่ 3.4 Response History ของชั้นหลังคาอาคาร 3 ชั้นที่ระดับความรุนแรง 2.19 Elcentro(Elcentro2)



รูปที่ 3.5 Response History ของชั้นหลังคาอาคาร 3 ชั้นที่ระดับความรุนแรง 3.05 Elcentro(Elcentro3)



รูปที่ 3.6 Response History ของชั้นหลังคาอาคาร 3 ชั้นที่ระดับความรุนแรง 3.72 Elcentro(Elcentro4)



รูปที่ 3.7 Response History ของชั้นหลังคาอาคาร 3 ชั้นที่ระดับความรุนแรง 4.38 Elcentro(Elcentro5)

3.1.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static Analysis)

การวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 3 ชั้น ได้ค่าคาบการสั่นสำหรับสามโหมดแรกเป็น 1.073, 0.349 และ 0.188 วินาที ตามลำดับ ค่ารูปร่างของโหมด(Mode Shape)แสดงในตารางที่3.1 รูปแบบของแรงกระทำทางด้านข้างของโครงสร้างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้รูปแบบของแรงตามโหมด (Modal load pattern) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 แสดงตามรูปที่ 3.8 สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี สถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static Analysis)

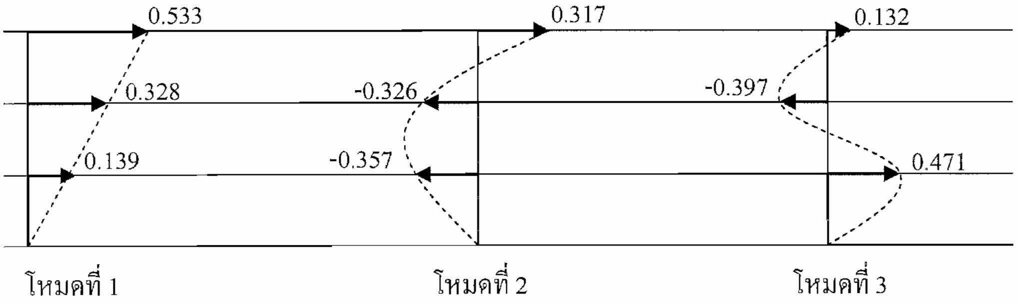
ตารางที่ 3.1 ค่ารูปร่างของโหมด (Mode Shape) สำหรับอาคาร 3 ชั้น

ชั้นที่	คาบการสั่น (วินาที)		
	โหมดที่ 1	โหมดที่ 2	โหมดที่ 3
	1.073	0.349	0.188
3	3.542	0.821	0.258
2	2.357	-0.912	-0.844
1	1.000	-1.000	1.000
G	0	0	0

$$\{f\} = A(\{\phi\}_i^T [m]\{1\}) \qquad (3.1)$$

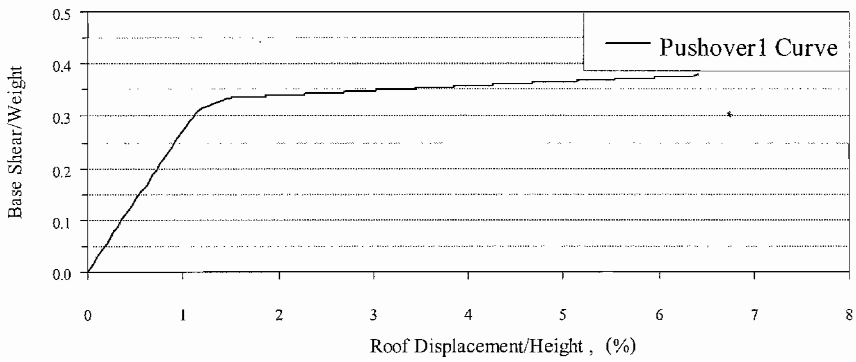
เมื่อ

A คือแฟคเตอร์ตัวคูณเพิ่มค่าของแรงกระทำทางข้าง

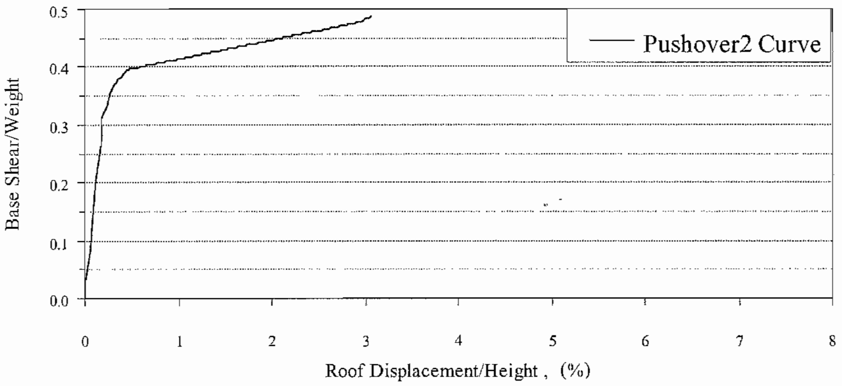


รูปที่ 3.8 รูปแบบของแรงตามโหมด สำหรับอาคาร 3 ชั้น

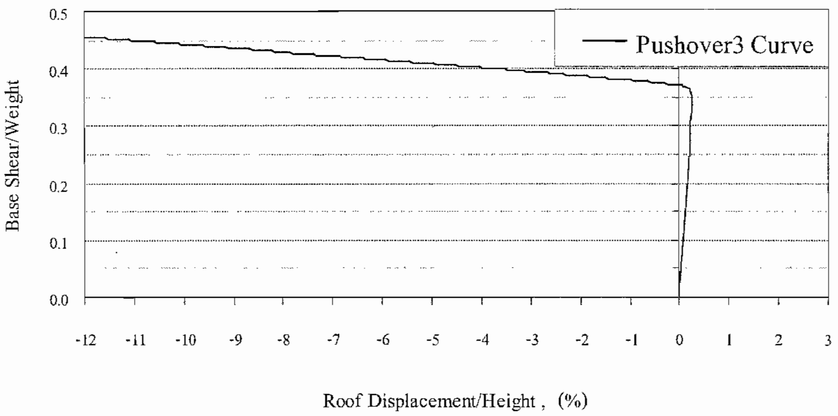
จากการวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 3 ชั้นโดยใช้รูปแบบของแรงตามโหมดทั้งสามโหมดจะได้ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานและระยะเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา หรือที่เรียกว่า Pushover Curve สำหรับโหมดที่ 1, 2 และ 3 แสดงตามรูปที่ 3.9, 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ



รูปที่ 3.9 Pushover Curve โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 3 ชั้น



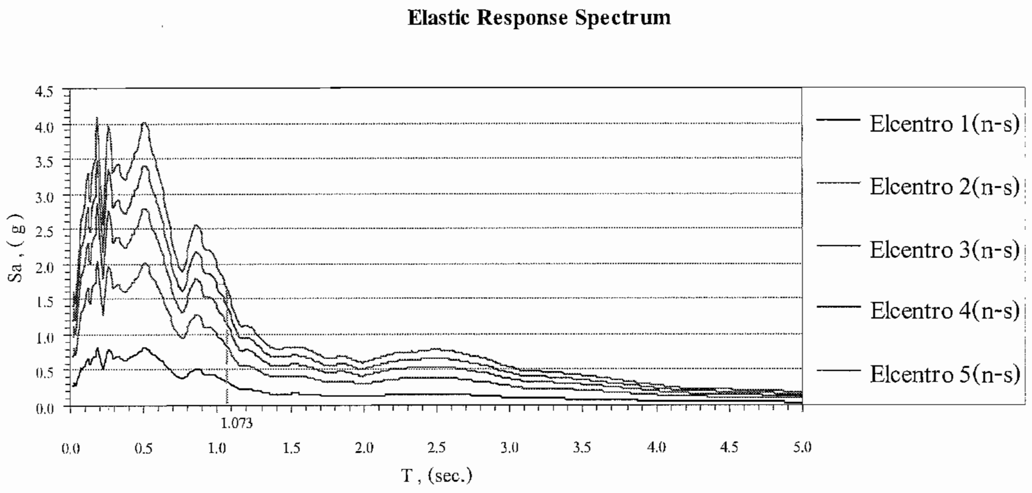
รูปที่ 3.10 Pushover Curve โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 3 ชั้น



รูปที่ 3.11 Pushover Curve โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 3 ชั้น

3.1.3 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Displacement Coefficient

การวิเคราะห์โดยวิธี Displacement Coefficient จะอาศัยกราฟ Pushover Curve ของโหมดที่หนึ่ง ตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อ2.2 และผลตอบสนองที่คาบการสั่นของโครงสร้างซึ่งได้จาก Elastic Response Spectrum เนื่องจากแรงแผ่นดินไหว Elcentro 1940 NS ทั้งห้าระดับความรุนแรงแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 Elastic Response Spectrum

เมื่อนำค่าความเร่งตอบสนอง (Response Acceleration) ที่คาบการแกว่งประสิทธิผล (Te) เท่ากับ 1.073 วินาที มีค่าเท่ากับ 0.3234 g, 0.8054 g, 1.1211 g, 1.3678 g, 1.6101 g ตามลำดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวไปคำนวณค่าเป้าหมายการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง(Target Displacement)ตามสมการที่2.1 จะได้ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคาของอาคาร 3 ชั้นที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวแสดงดังตารางที่ 3.2

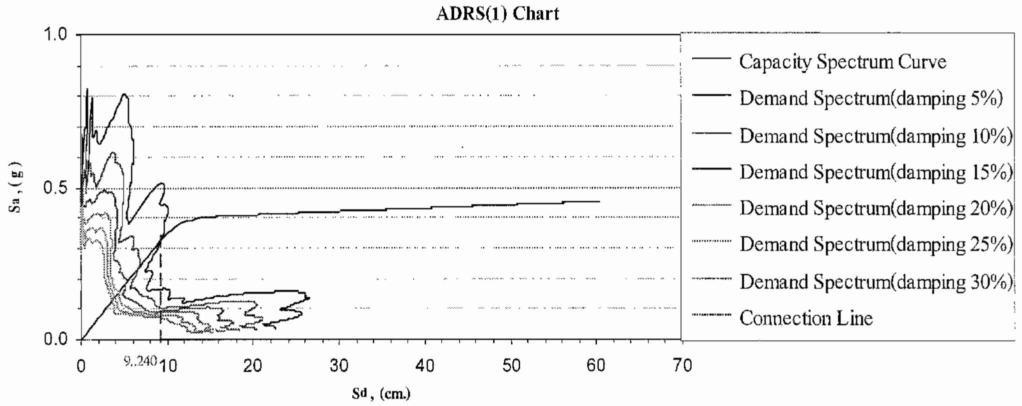
ตารางที่ 3.2 ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา (อาคาร 3 ชั้น) ด้วยวิธี Displacement Coefficient

ลำดับ	แผ่นดินไหว	C_0	C_1	C_2	C_3	S_a	T_e^*	g (cm./sec.^{2})	δ_t (cm.)
1	Elcentro 1	1.26485	1.0	1.0	1.0	0.3234	1.073	981	11.702
2	Elcentro 2	1.26485	1.0	1.0	1.0	0.8054	1.073	981	29.144
3	Elcentro 3	1.26485	1.0	1.05	1.0	1.1211	1.073	981	42.596
4	Elcentro 4	1.26485	1.0	1.10	1.0	1.3678	1.073	981	54.442
5	Elcentro 5	1.26485	1.0	1.15	1.0	1.6101	1.073	981	67.000

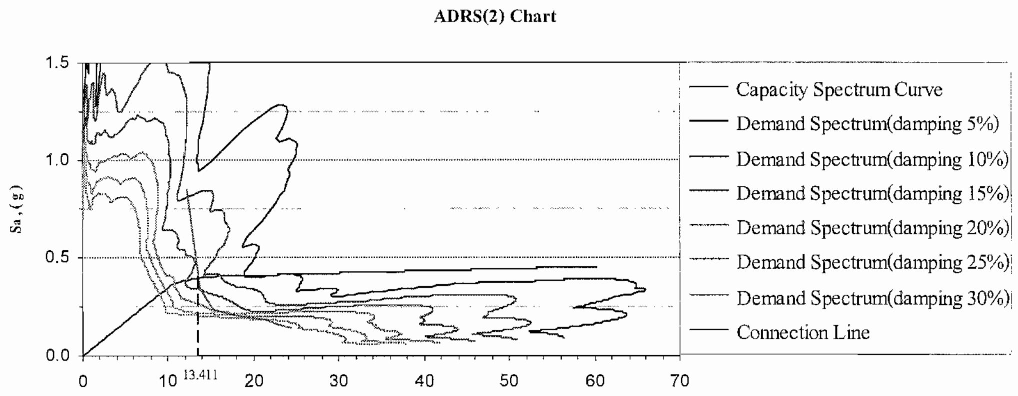
ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของชั้นหลังคาของอาคารเหล็ก 3 ชั้น ที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีค่าเท่ากับ 11.072, 29.144, 42.596, 54.442 และ 67.000 เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อได้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของชั้นหลังคาแล้วจึงจะนำผลการวิเคราะห์โครงสร้างที่ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของชั้นหลังคาไปหาค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดในแต่ละชั้น , ค่า Story Drift สูงสุด และ ค่า Rotation Ductility สูงสุดในแต่ละชั้นต่อไป ซึ่งผลการวิเคราะห์จะได้นำเสนอในบทที่ 5 หัวข้อที่ 5.1.1 ในตารางที่ 5.1 ถึง 5.4 ต่อไป

3.1.4 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Capacity Spectrum

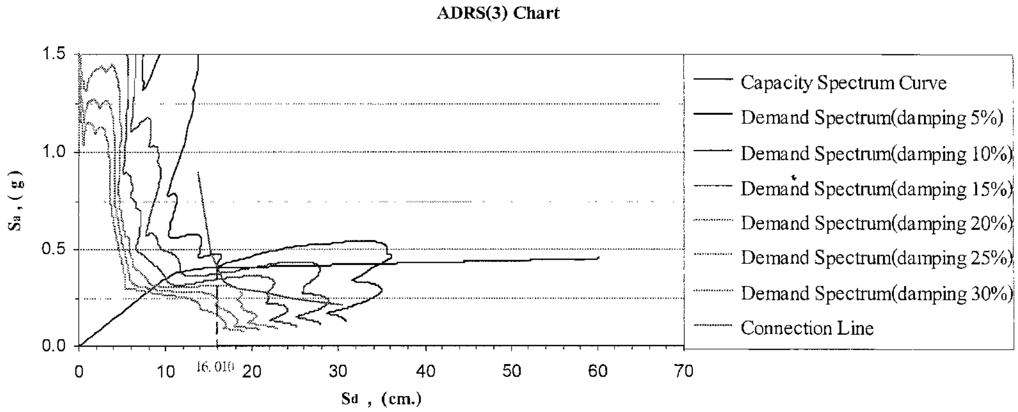
การวิเคราะห์โดยวิธีนี้จะอาศัยขั้นตอนตามที่เสนอในหัวข้อที่ 2.3 โดยค่าPerformance Point จะหาจากจุดตัดระหว่างกราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum ที่พล๊อตในรูป ความเร่งและการเคลื่อนตัวทางข้าง (Acceleration Displacement Response Spectrum , ADRS) ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวแสดงได้ดังรูปที่ 3.13, 3.14, 3.15, 3.16 และ 3.17



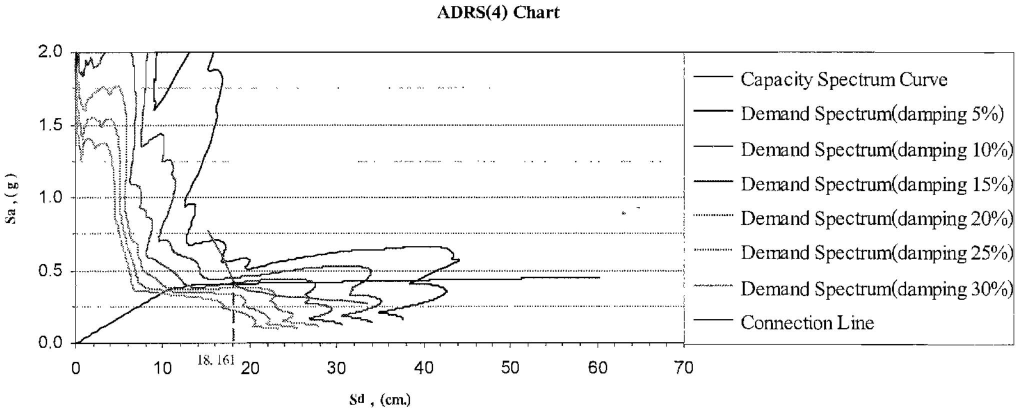
รูปที่ 3.13 กราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 0.88 Elcentro (Elcentro 1)



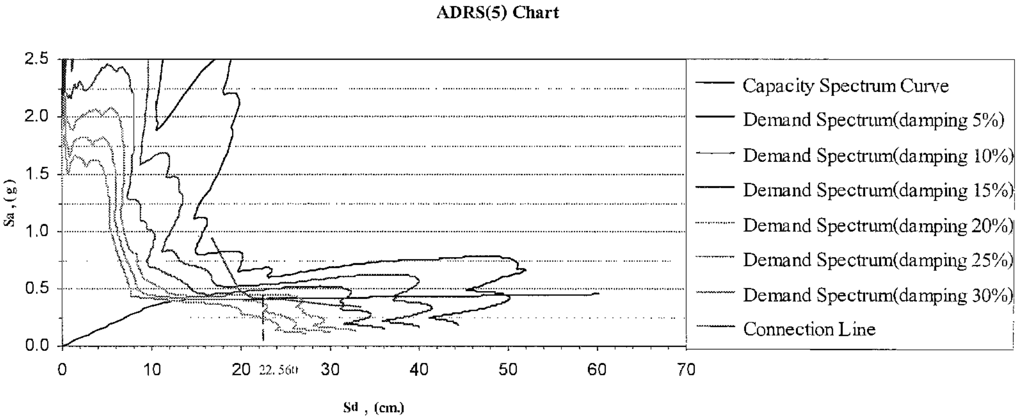
รูปที่ 3.14 กราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 2.19 Elcentro (Elcentro 2)



รูปที่ 3.15 กราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.05 Elcentro (Elcentro 3)



รูปที่ 3.16 กราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.72 Elcentro (Elcentro 4)



รูปที่ 3.17 กราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.38 Elcentro (Elcentro 5)

จากการวิเคราะห์กราฟที่แสดงในรูปที่ 3.13 ถึง 3.17 ได้ค่าการเคลื่อนตัวของระบบ SDOF เทียบเท่า ที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีค่าเท่ากับ 9.240, 13.411, 16.010, 18.161 และ 22.56 เซนติเมตร ตามลำดับซึ่งค่าการเคลื่อนตัวของ SDOF เทียบเท่าสามารถนำไปหาค่าค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคาของอาคารเหล็ก 3 ชั้นที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวได้โดยอาศัยสมการที่ 2.7 ซึ่งจะได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา (อาคาร 3 ชั้น) ด้วยวิธี Capacity Spectrum

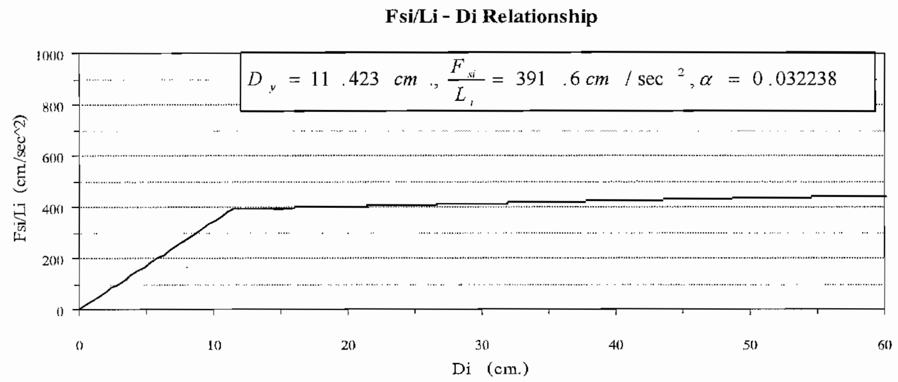
ลำดับ	แผ่นดินไหว	Performance Point (cm.)	Γ_1	$\phi_{roof,1}$	U_{roof} (cm.)
1	Elcentro 1	9.240	0.3571	3.542	11.689
2	Elcentro 2	13.411	0.3571	3.542	16.962
3	Elcentro 3	16.010	0.3571	3.542	20.249
4	Elcentro 4	18.161	0.3571	3.542	22.972
5	Elcentro 5	22.560	0.3571	3.542	28.534

ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของชั้นหลังคาของอาคารเหล็ก 3 ชั้นที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีค่าเท่ากับ 11.689, 16.962, 20.249, 22.972 และ 28.534 เซนติเมตร ตามลำดับ

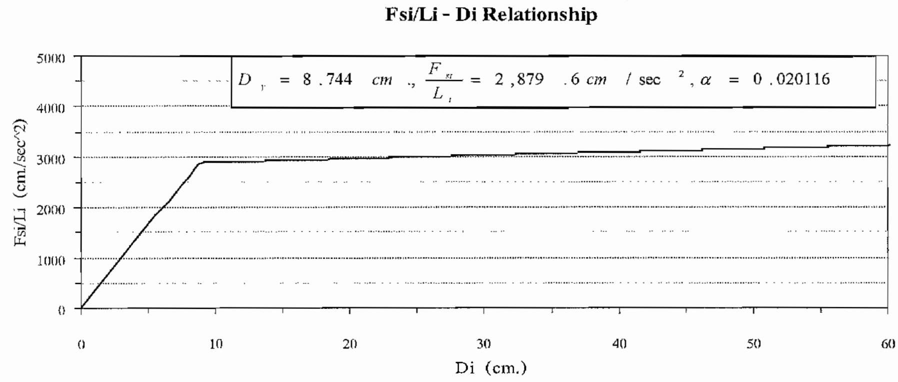
เมื่อได้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของชั้นหลังคาแล้วจึงจะนำผลการวิเคราะห์โครงสร้างที่ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของชั้นหลังคาไปหาค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดในแต่ละชั้น , ค่า Story Drift สูงสุด และ ค่า Rotation Ductility สูงสุดในแต่ละชั้นต่อไป ซึ่งผลการวิเคราะห์จะได้นำเสนอในบทที่ 5 หัวข้อที่ 5.1.1 ในตารางที่ 5.1 ถึง 5.4 ต่อไป

3.1.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Modal Pushover Analysis

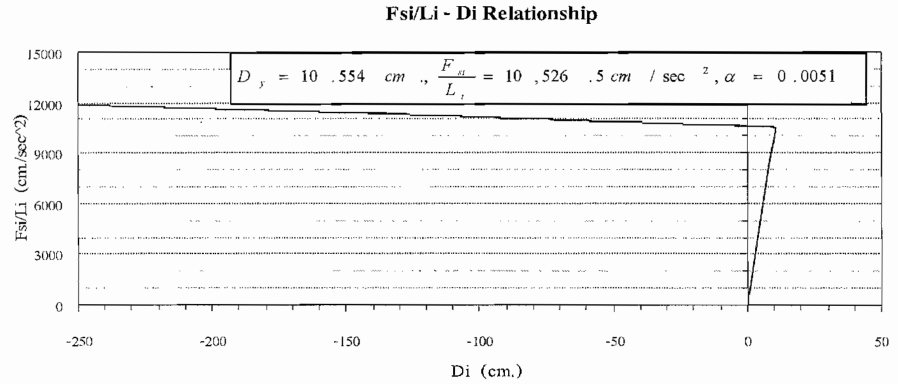
การวิเคราะห์ด้วยวิธี Modal Pushover Analysis นี้จะอาศัยกราฟ Bilinear Pushover Curve ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ (ซึ่งแปลงมาจากกราฟ Pushover Curve โดยใช้สมการที่ 2.31-2.33) ที่พล๊อตในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกระทำและการเคลื่อนที่ (Fs-D) ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระในแต่ละโหมดแสดงดังรูปที่ 3.18, 3.19 และ 3.20 ไปหาผลตอบสนองการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง



รูปที่ 3.18 กราฟ Bilinear Pushover 1 Curve โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 3 ชั้น

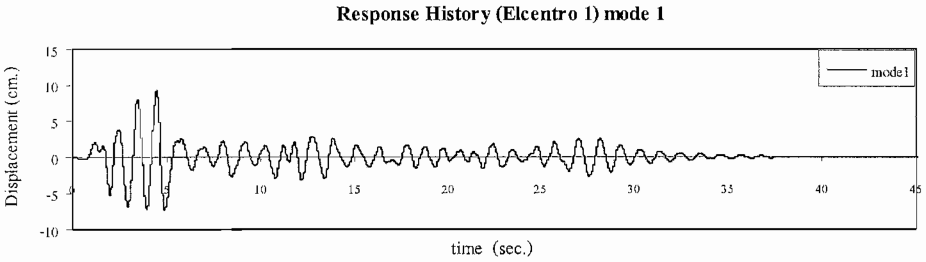


รูปที่ 3.19 กราฟ Bilinear Pushover 2 Curve โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 3 ชั้น

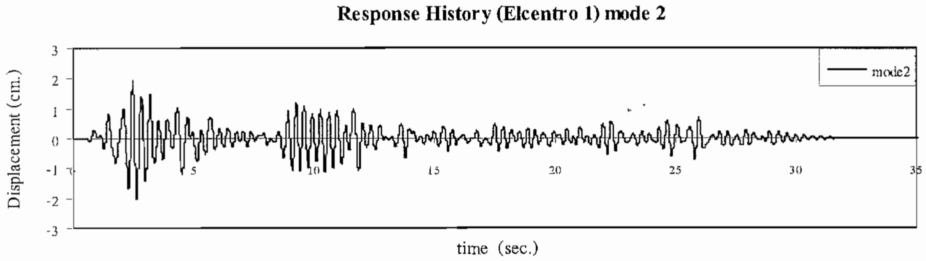


รูปที่ 3.20 กราฟ Bilinear Pushover 3 Curve โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 3 ชั้น

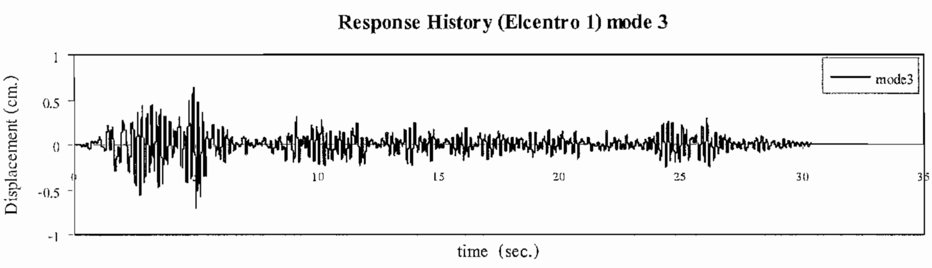
ผลตอบสนองในการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของระบบอินอีลาสติกแบบเทียบเท่าระบบหนึ่งดีกรีความอิสระของแต่ละโหมดวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม BISPEC [14] ได้ผล Response History Analysis ดังแสดงตามรูปที่ 3.21 ถึง 3.35



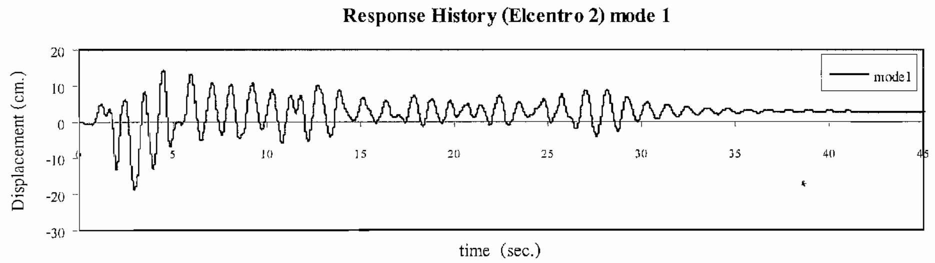
รูปที่ 3.21 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 0.88 Elcentro (Elcentro 1)



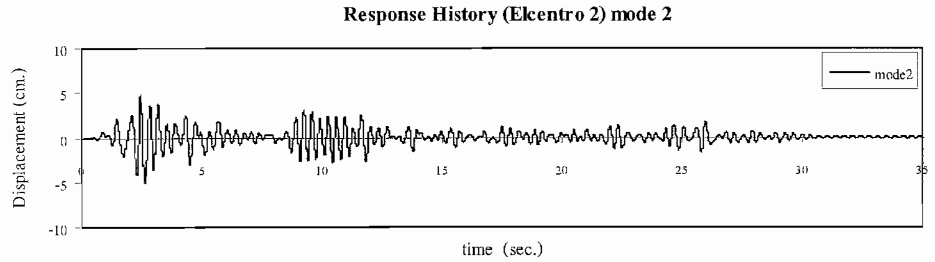
รูปที่ 3.22 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 0.88 Elcentro (Elcentro 1)



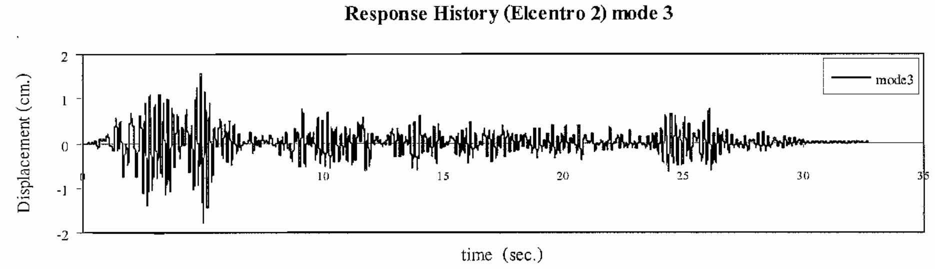
รูปที่ 3.23 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 0.88 Elcentro (Elcentro 1)



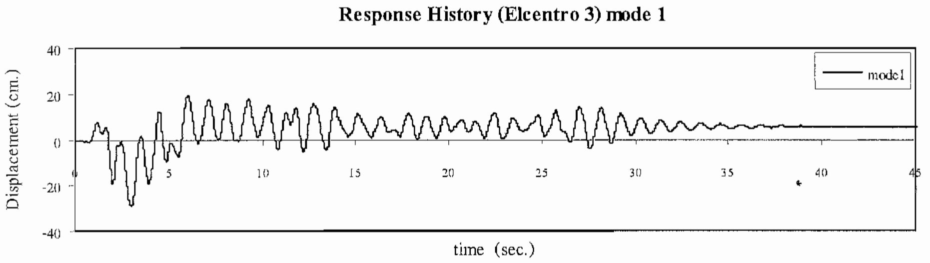
รูปที่ 3.24 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 2.19 Elcentro (Elcentro 2)



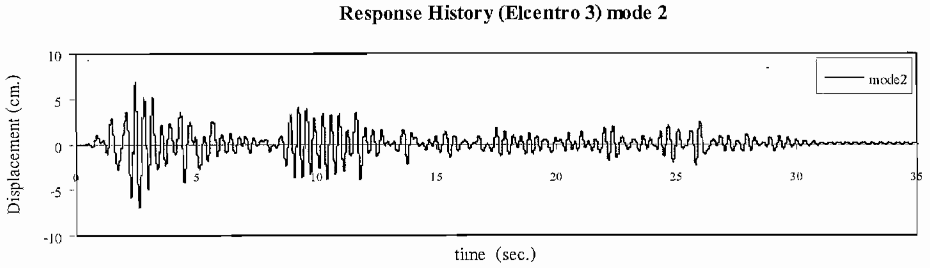
รูปที่ 3.25 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 2.19 Elcentro (Elcentro 2)



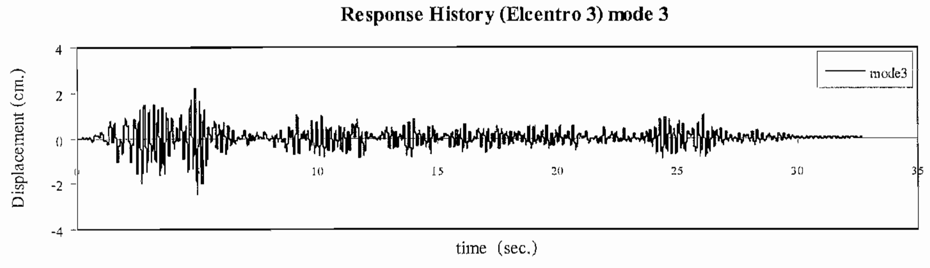
รูปที่ 3.26 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 2.19 Elcentro (Elcentro 2)



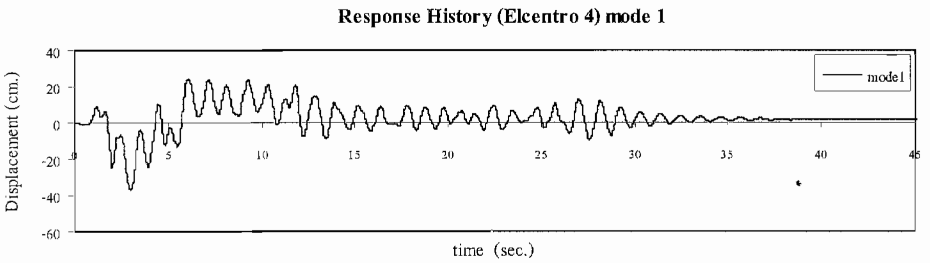
รูปที่ 3.27 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.05 Elcentro (Elcentro 3)



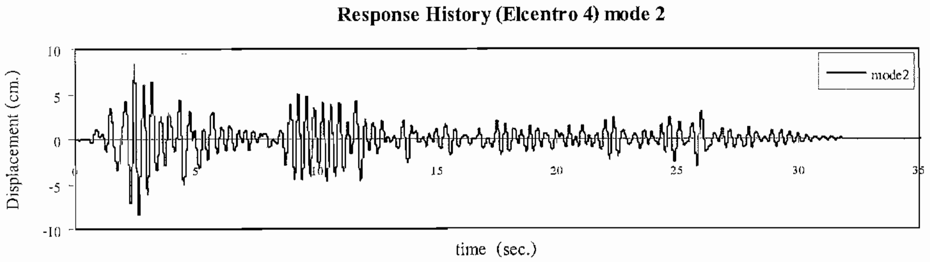
รูปที่ 3.28 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.05 Elcentro (Elcentro 3)



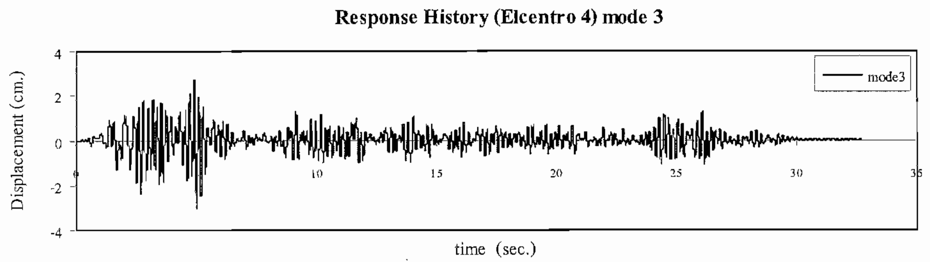
รูปที่ 3.29 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.05 Elcentro (Elcentro 3)



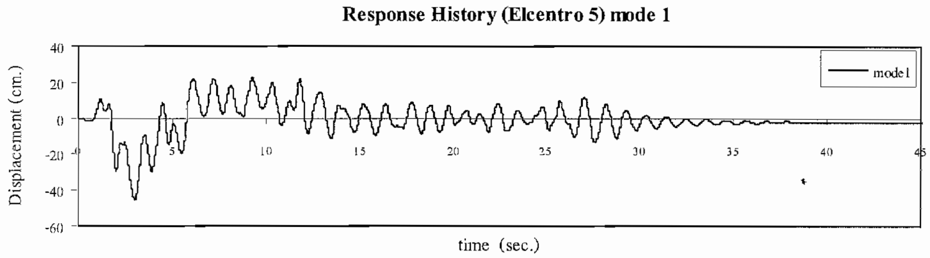
รูปที่ 3.30 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.72 Elcentro (Elcentro 4)



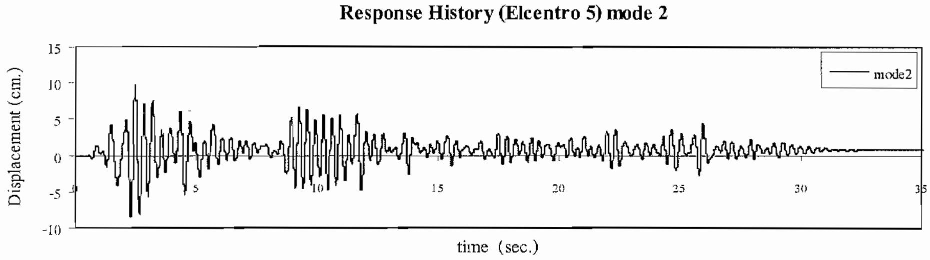
รูปที่ 3.31 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.72 Elcentro (Elcentro 4)



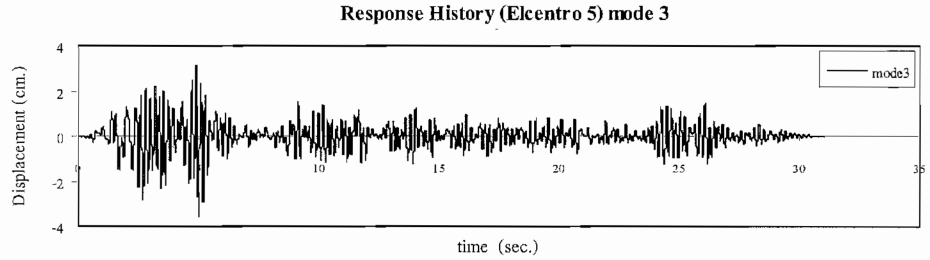
รูปที่ 3.32 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.72 Elcentro (Elcentro 4)



รูปที่ 3.33 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.38 Elcentro (Elcentro 5)



รูปที่ 3.34 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.38 Elcentro (Elcentro 5)



รูปที่ 3.35 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.38 Elcentro (Elcentro 5)

เมื่อได้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของสูงสุดของแต่ละโหมดทุกระดับความรุนแรงแล้วสามารถหาค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของชั้นหลังคาได้โดยใช้สมการที่ 2.34 และ 2.35 ในหัวข้อ 2.4 ซึ่งค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง, ค่า Story drift และค่า Rotation ductility ของแต่ละโหมดทุกชั้นแสดงในตารางที่ 3.4

ส่วนค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด, ค่า Story drift สูงสุดและค่า Rotation ductility สูงสุดของแต่ละชั้นจะได้นำเสนอในบทที่ 5 หัวข้อ 5.1.1 ในตารางที่ 5.1 ถึง 5.4 ต่อไป

ตารางที่ 3.4 ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง, ค่า Story drift และค่า Rotation ductility ของแต่ละโหมด สำหรับอาคาร 3 ชั้น

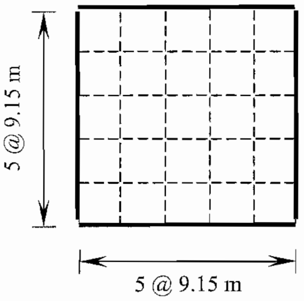
No.	Earthquake	Floor	Peak Displacement (cm.)					Peak Story Drift (%)					Rotation Ductility (μ_θ)				
			Modal Pushover Analysis Method				NDA	Modal Pushover Analysis Method				NDA	Modal Pushover Analysis Method				NDA
			Mode 1	**mode 2**	**mode 3**	**SRSS**	(cm.)	**mode 1**	**mode 2**	**mode 3**	**SRSS**	(%)	**mode 1**	**mode 2**	**mode 3**	**SRSS**	(μ_θ)
1	**Elcentro 1**	3rd	11.707	0.655	0.046	**11.725**	**12.027**	0.988	0.353	0.044	**1.051**	**1.187**	0.733	0.025	0.004	**0.733**	**0.905**
	(Scale 0.88)	2nd	7.790	-0.744	-0.130	**7.827**	**7.610**	1.131	0.017	-0.072	**1.134**	**1.164**	0.908	0.014	0.002	**0.908**	**1.002**
		1st	3.307	-0.813	0.157	**3.409**	**3.150**	0.835	-0.205	0.040	**0.860**	**0.795**	0.960	0.011	0.001	**0.960**	**0.930**
		G	0.000	0.000	0.000	**0.000**	**0.000**	0.000	0.000	0.000	**0.000**	**0.000**	0.000	1.000	2.000	**0.000**	**0.000**
2	**Elcentro 2**	3rd	23.762	1.631	0.112	**23.818**	**23.744**	1.981	0.879	0.108	**2.170**	**2.739**	1.594	0.062	0.010	**1.595**	**2.569**
	(Scale 2.19)	2nd	15.913	-1.854	-0.315	**16.024**	**15.311**	2.283	0.042	-0.177	**2.290**	**2.299**	2.277	0.035	0.004	**2.278**	**2.609**
		1st	6.868	-2.022	0.386	**7.170**	**6.401**	1.733	-0.510	0.097	**1.810**	**1.615**	2.566	0.026	0.003	**2.566**	**2.437**
		G	0.000	0.000	0.000	**0.000**	**0.000**	0.000	0.000	0.000	**0.000**	**0.000**	0.000	1.000	2.000	**0.000**	**0.000**
3	**Elcentro 3**	3rd	36.482	2.271	0.155	**36.553**	**36.098**	3.070	1.215	0.149	**3.305**	**4.006**	2.687	0.084	0.013	**2.689**	**3.882**
	(Scale 3.05)	2nd	24.318	-2.543	-0.434	**24.454**	**23.040**	3.363	0.059	-0.245	**3.373**	**3.432**	3.649	0.048	0.006	**3.650**	**4.082**
		1st	10.991	-2.776	0.536	**11.348**	**10.089**	2.774	-0.701	0.135	**2.864**	**2.546**	4.030	0.036	0.004	**4.030**	**3.778**
		G	0.000	0.000	0.000	**0.000**	**0.000**	0.000	0.000	0.000	**0.000**	**0.000**	0.000	1.000	2.000	**0.000**	**0.000**

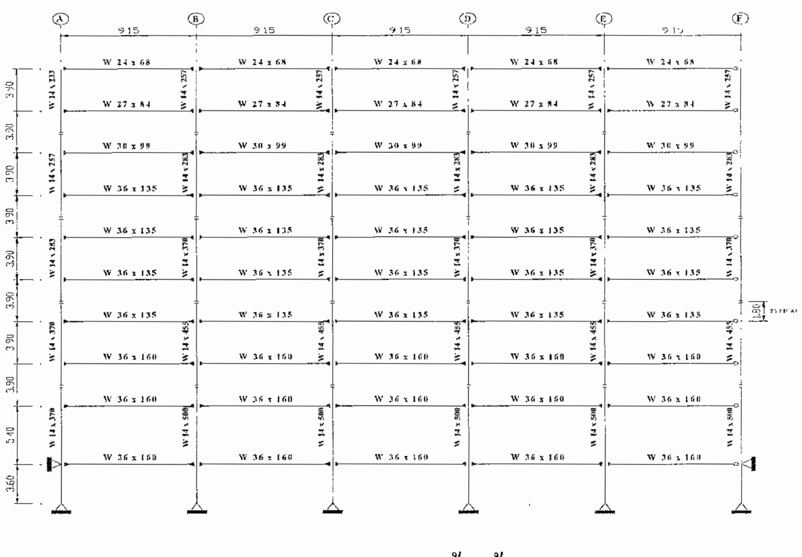
ตารางที่ 3.4 ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง, ค่า Story drift และค่า Rotation ductility ของแต่ละโหมด สำหรับอาคาร 3 ชั้น (ต่อ)

No.	Earthquake	Floor	Peak Displacement (cm.)					Peak Story Drift (%)					Rotation Ductility (μ_θ)				
			Modal Pushover Analysis Method				NDA	Modal Pushover Analysis Method				NDA	Modal Pushover Analysis Method				NDA
			Mode 1	mode 2	mode 3	SRSS	(cm.)	mode 1	mode 2	mode 3	SRSS	(%)	mode 1	mode 2	mode 3	SRSS	(μ_θ)
4	**Elcentro 4**	3^{rd}	46.855	2.769	0.191	**46.937**	**47.638**	3.951	1.388	0.183	**4.192**	**4.885**	3.572	0.085	0.017	**3.573**	**4.760**
	(Scale 3.72)	2^{nd}	31.199	-2.733	-0.536	**31.323**	**31.135**	4.242	0.074	-0.301	**4.254**	**4.515**	4.761	0.054	0.008	**4.761**	**5.240**
		1^{st}	14.389	-3.025	0.658	**14.718**	**14.054**	3.631	-0.763	0.166	**3.715**	**3.547**	5.229	0.039	0.005	**5.229**	**5.230**
		G	0.000	0.000	0.000	**0.000**	**0.000**	0.000	0.000	0.000	**0.000**	**0.000**	0.000	1.000	2.000	**0.000**	**0.000**
5	**Elcentro 5**	3^{rd}	57.305	3.254	-0.224	**57.398**	**59.416**	4.839	1.540	0.102	**5.079**	**5.630**	4.462	1.494	0.019	**4.706**	**5.452**
	(Scale 4.38)	2^{nd}	38.130	-2.847	-0.627	**38.242**	**39.855**	5.127	0.089	-0.353	**5.140**	**5.599**	5.880	0.059	0.009	**5.880**	**6.372**
		1^{st}	17.816	-3.200	0.772	**18.117**	**18.448**	4.496	-0.808	0.195	**4.572**	**4.656**	6.437	0.042	0.006	**6.437**	**6.781**
		G	0.000	0.000	0.000	**0.000**	**0.000**	0.000	0.000	0.000	**0.000**	**0.000**	0.000	1.000	2.000	**0.000**	**0.000**

3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 9 ชั้น

โครงสร้างเหล็กสูง 9 ชั้นตามรูปที่3.36 มีขนาดตามแบบแปลนกว้าง 45.75 เมตร (150 ฟุต) ยาว 45.75 เมตร (150 ฟุต) สูง 37.2 เมตร (122 ฟุต) ระยะแต่ละช่วงวัดจากศูนย์กลางยาว 9.15 เมตร (30 ฟุต) ออกแบบให้โครงเฟรมรอบนอกเป็นโครงข้อแข็ง (แสดงเป็นเส้นทึบตามรูปแปลน) ทำหน้าที่ต้านทานแรงกระทำทางด้านข้างโดยใช้ชิ้นส่วนหน้าตัดรูป Wide Flange Section ขนาดดังระบุในรูปที่ 3.36 ทำการวิเคราะห์แบบสองมิติโดยใช้โครงเฟรมที่มี 5 ช่วงเป็นโมเมนต์เฟรม ฐานของโครงสร้างเป็นแบบยึดหมุน กำลังคลากของคานทุกตัวใช้ 338 เมกกะปาสคาล (49 ksi.) กำลังคลากของเสาทุกต้นใช้ 380 เมกกะปาสคาล (55 ksi.) รับมวลครึ่งหนึ่งของทั้งอาคาร 4984.4 x 10^3 กิโลกรัม (341.4 kip-sec^2/ft.) โดยกระจายไปยังชั้นล่าง 481.8 x 10^3 กิโลกรัม (33.0 kip-sec^2/ft.) ชั้นที่หนึ่ง 503.7 x 10^3 กิโลกรัม (34.5 kip-sec^2/ft.) ชั้นที่สองถึงชั้นที่แปดชั้นละ 494.9 x 10^3 กิโลกรัม (33.9 kip-sec^2/ft.) และชั้นที่เก้า 534.4 x 10^3 กิโลกรัม (36.6 kip-sec^2/ft.) ชิ้นส่วนโครงสร้างสมมุติให้มีพฤติกรรมแบบ อีลาสติก-พลาสติก โดยมี Strain hardening 2 เปอร์เซ็นต์ มีค่าความหน่วง 5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับโหมดที่หนึ่งและโหมดที่สอง พิจารณาผลกระทบของ P-delta effect จากมวลครึ่งหนึ่งของโครงสร้างส่วนผลกระทบเนื่องจากน้ำหนักจะไม่นำมาพิจารณาในการวิเคราะห์โครงสร้างเหล็กสูง 9 ชั้นนี้





Note : -W 24x68 (ความลึก24นิ้ว น้ำหนัก68ปอนด์ต่อฟุต)

- ระยะที่แสดงมีหน่วยเป็นเมตร

แปลน รูปด้านข้าง

รูปที่ 3.36 โครงสร้างเหล็กสูง 9 ชั้น

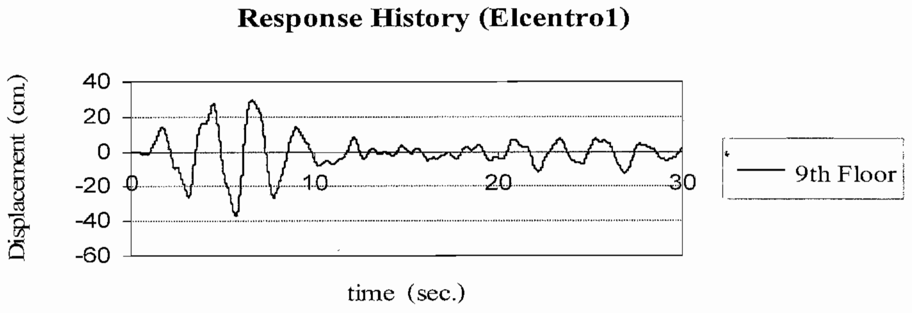
3.2.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Dynamic Analysis)

โครงสร้างเหล็กสูง 9 ชั้นนี้ได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม SAP2000 [11] โดยใช้ระยะศูนย์กลางถึงศูนย์กลางชิ้นส่วนเป็นหลัก

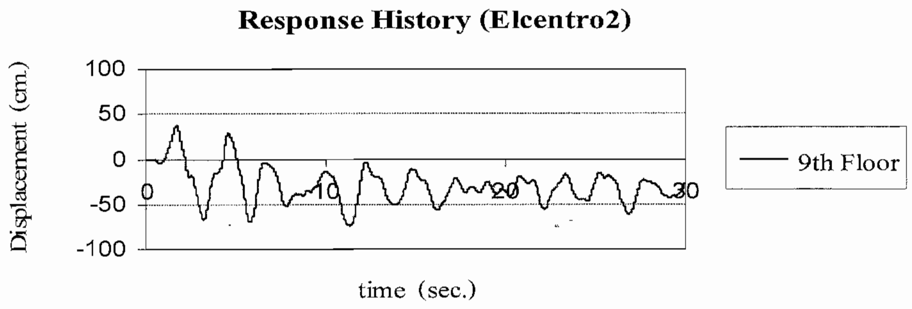
ข้อมูลแผ่นดินไหวสำหรับใช้ในการศึกษาวิจัยนี้คือ Elcentro 1940 NS [7] ดังรูปที่ 3.2 โดยใช้ตัวคูณปรับระดับความรุนแรงให้เป็นห้าระดับความรุนแรงคือ 1.15, 3.08, 4.36, 5.62, 8.35 เท่า สำหรับอาคารเหล็กสูง 9 ชั้น เพื่อให้ผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคาเทียบกับความสูงอาคารอยู่ที่ 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นโดยใช้โปรแกรม SAP2000 ได้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของชั้นหลังคาอาคาร 9 ชั้น ที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีค่าเท่ากับ 37.186, 74.294, 111.481, 146.507 และ 185.877 เซนติเมตร ตามลำดับ ผลตอบสนองการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคาอาคาร 9 ชั้นแสดงดังรูปที่ 3.37 ถึง 3.41

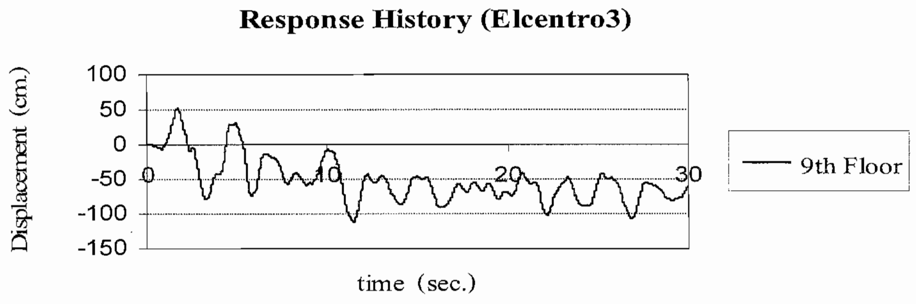
ผลการวิเคราะห์ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด (Peak Floor Displacement) ในแต่ละชั้น , ค่าStory Drift สูงสุดในแต่ละชั้น และ ค่า Rotation Ductility สูงสุดในแต่ละชั้น จะได้นำเสนอในบทที่ 5 หัวข้อที่ 5.1.2 ในตารางที่ 5.8 ถึง 5.11 ต่อไป



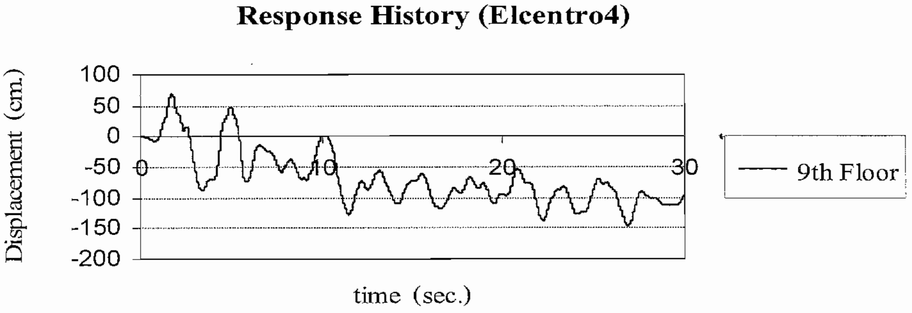
รูปที่ 3.37 Response History ของชั้นหลังคาอาคาร9 ชั้นที่ระดับความรุนแรง 1.15 Elcentro(Elcentro1)



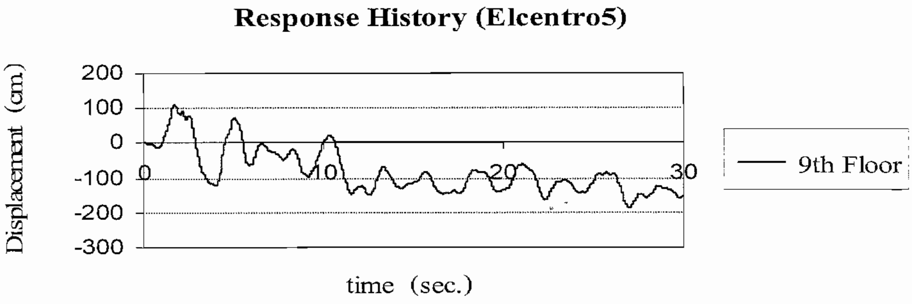
รูปที่ 3.38 Response History ของชั้นหลังคาอาคาร9 ชั้นที่ระดับความรุนแรง 3.08 Elcentro(Elcentro2)



รูปที่ 3.39 Response History ของชั้นหลังคาอาคาร9 ชั้นที่ระดับความรุนแรง 4.36 Elcentro(Elcentro3)



รูปที่ 3.40 Response History ของชั้นหลังคาอาคาร9 ชั้นที่ระดับความรุนแรง 5.62 Elcentro(Elcentro4)



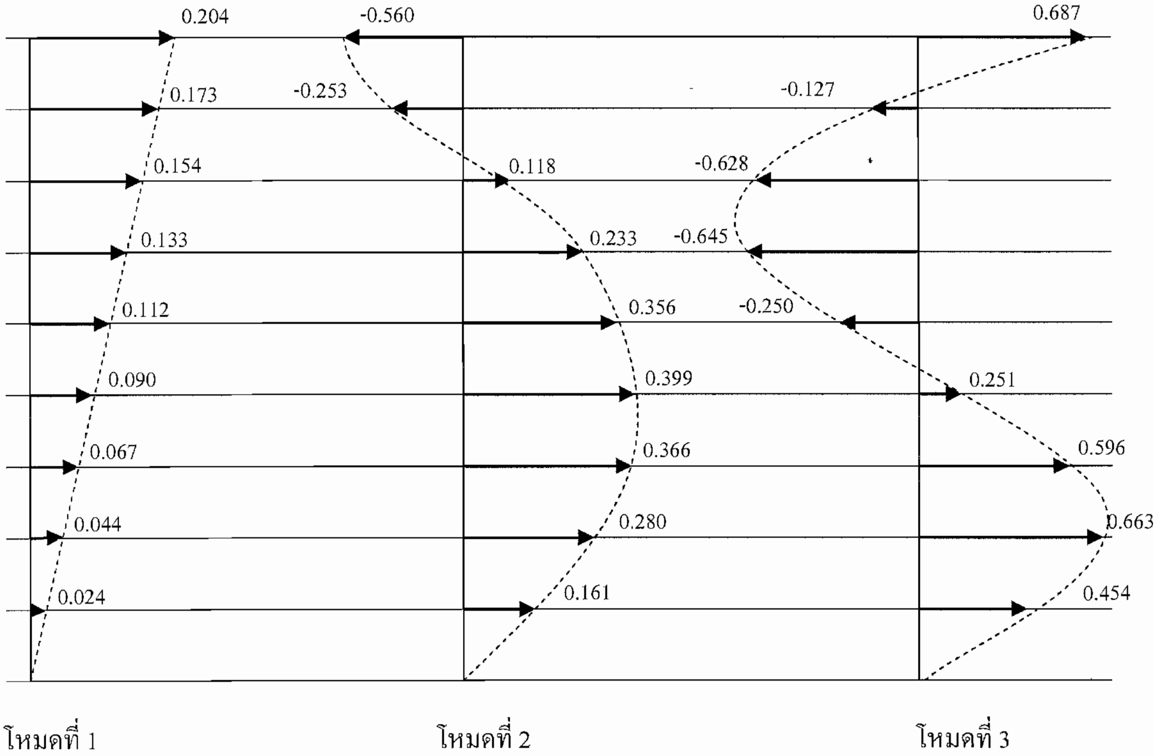
รูปที่ 3.41 Response History ของชั้นหลังคาอาคาร9 ชั้นที่ระดับความรุนแรง 8.35 Elcentro(Elcentro5)

3.2.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น(Nonlinear Static Analysis)

การวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 9 ชั้น ได้ค่าคาบการสั่นสำหรับสามโหมดแรกเป็น 2.305, 0.839 และ 0.457 วินาที ตามลำดับ ค่ารูปร่างของโหมด (Mode Shape) แสดงในตารางที่ 3.5 รูปแบบของแรงกระทำทางด้านข้างของโครงสร้างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้รูปแบบของแรงตามโหมด (Modal load pattern) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 แสดงตามรูปที่ 3.42 สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static Analysis)

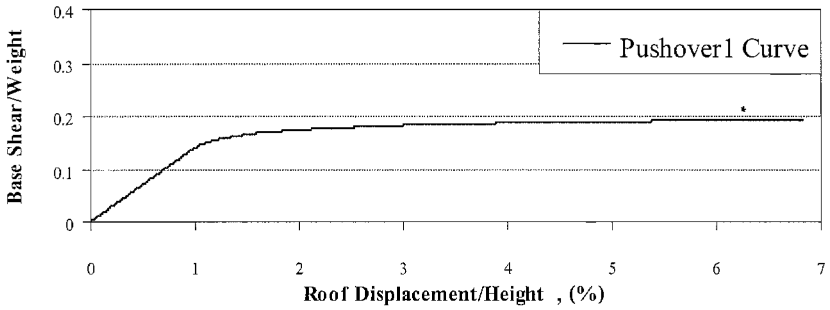
ตารางที่ 3.5 ค่ารูปร่างของโหมด (Mode Shape) สำหรับอาคาร 9 ชั้น

ชั้นที่	คาบการสั่น (วินาที)		
	โหมดที่ 1	โหมดที่ 2	โหมดที่ 3
	2.305	0.839	0.457
9	8.180	-3.287	1.427
8	7.476	-1.602	-0.285
7	6.636	0.116	-1.408
6	5.742	1.478	-1.447
5	4.826	2.256	-0.562
4	3.865	2.529	0.563
3	2.878	2.319	1.336
2	1.916	1.772	1.487
1	1.000	1.000	1.000
G	0	0	0

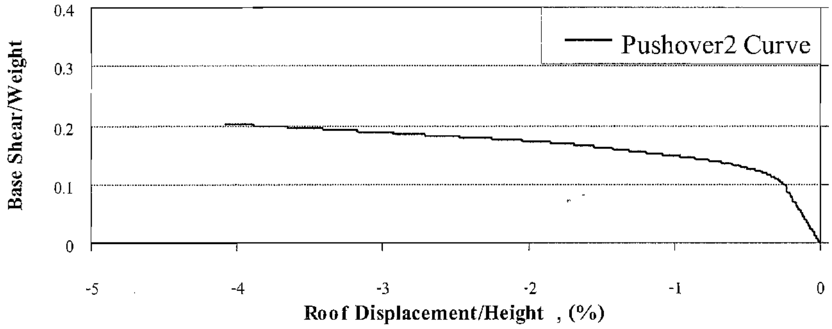


รูปที่ 3.42 รูปแบบของแรงตามโหมด สำหรับอาคาร 9 ชั้น

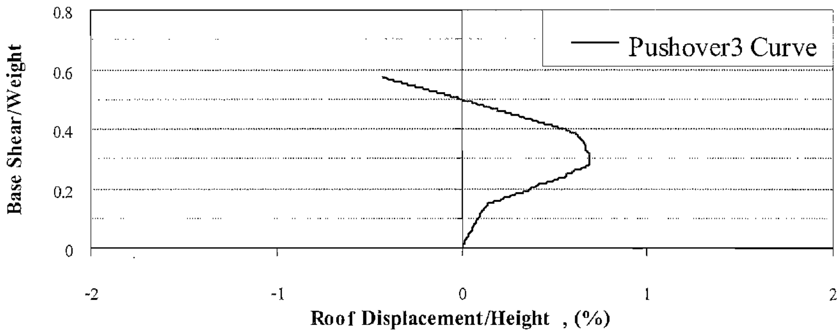
จากการวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 9 ชั้นโดยใช้รูปแบบของแรงตามโหมดทั้งสามโหมดจะได้ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานและระยะเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา หรือที่เรียกว่า Pushover Curve สำหรับโหมดที่ 1, 2 และ 3 แสดงตามรูปที่ 3.43, 3.44 และ 3.45 ตามลำดับ



รูปที่ 3.43 Pushover Curve โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 9 ชั้น



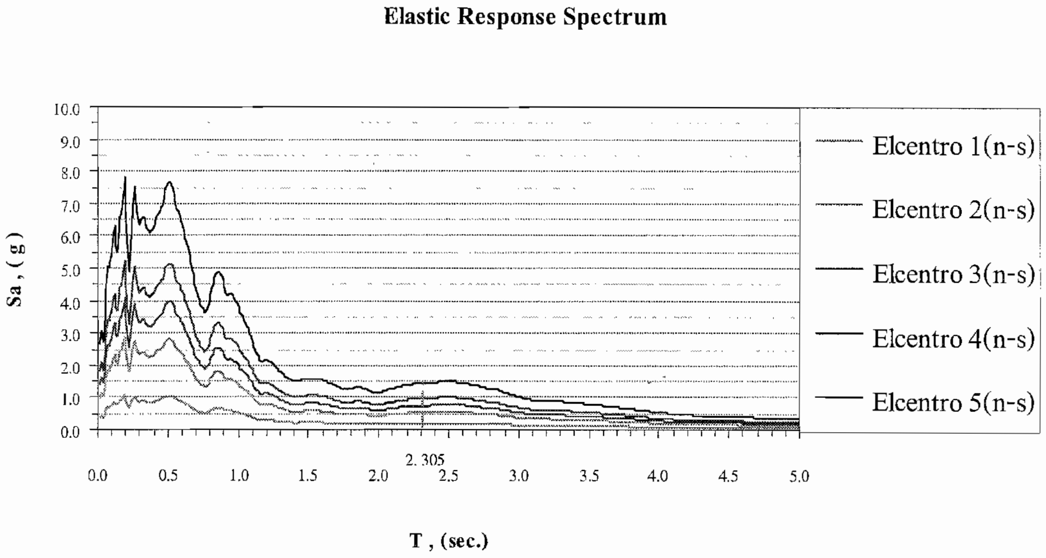
รูปที่ 3.44 Pushover Curve โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 9 ชั้น



รูปที่ 3.45 Pushover Curve โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 9 ชั้น

3.2.3 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Displacement Coefficient

การวิเคราะห์โดยวิธี Displacement Coefficient จะอาศัยกราฟ Pushover Curve ของโหมดที่หนึ่ง ตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2 และผลตอบสนองที่คาบการสั่นของโครงสร้างซึ่งได้จาก Elastic Response Spectrum เนื่องจากแรงแผ่นดินไหว Elcentro 1940 NS ทั้งห้าระดับความรุนแรงแสดงดังรูปที่ 3.46



รูปที่ 3.46 Elastic Response Spectrum

เมื่อนำค่าความเร่งตอบสนอง (Response Acceleration) ที่คาบการแกว่งประสิทธิผล (Te) เท่ากับ 2.305 วินาที มีค่าเท่ากับ 0.1979 g, 0.5299 g, 0.7502 g, 0.9670 g, 1.4367 g ตามลำดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวไปคำนวณค่าเป้าหมายการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง(Target Displacement)ตามสมการที่2.1 จะได้ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคาของอาคาร 9 ชั้นที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวแสดงดังตารางที่ 3.6

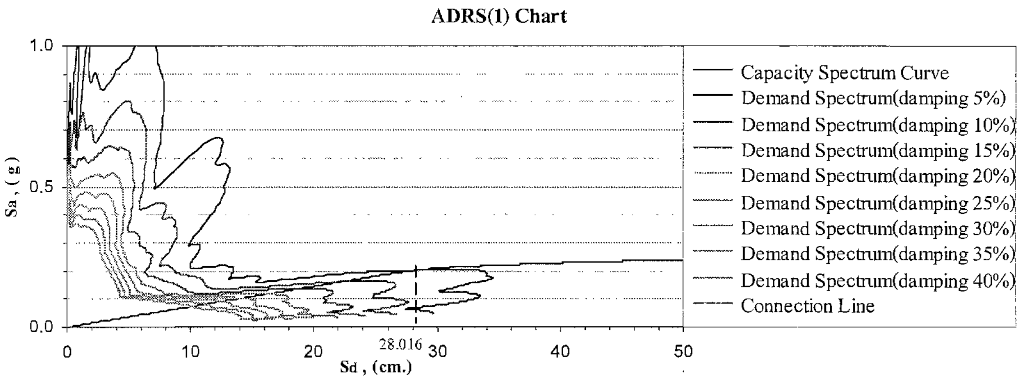
ตารางที่ 3.6 ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา (อาคาร 9 ชั้น) ด้วยวิธี Displacement Coefficient

ลำดับ	แผ่นดินไหว	C_0	C_1	C_2	C_3	S_a	T_e	g (cm./sec.^{2})	δ_t (cm.)
1	Elcentro 1	1.37817	1.0	1.0	1.0	0.1979	2.3045	981	35.964
2	Elcentro 2	1.37817	1.0	1.0	1.0	0.5299	2.3045	981	96.324
3	Elcentro 3	1.37817	1.0	1.05	1.0	0.7502	2.3045	981	143.172
4	Elcentro 4	1.37817	1.0	1.10	1.0	0.9670	2.3045	981	193.337
5	Elcentro 5	1.37817	1.0	1.15	1.0	1.4367	2.3045	981	300.309

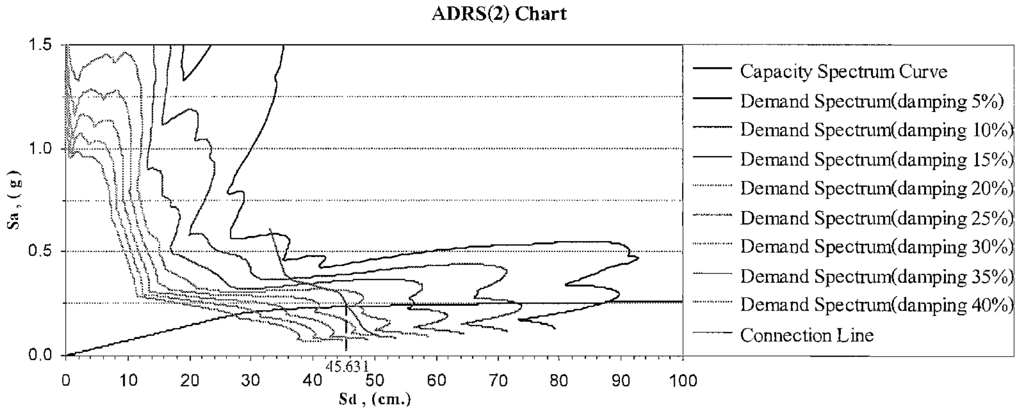
ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของชั้นหลังคาของอาคารเหล็ก 9 ชั้น ที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีค่าเท่ากับ 35.964, 96.324, 143.172, 193.337 และ 300.309 เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อได้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของชั้นหลังคาแล้วจึงจะนำผลการวิเคราะห์โครงสร้างที่ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของชั้นหลังคาไปหาค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดในแต่ละชั้น, ค่า Story Drift สูงสุด และ ค่า Rotation Ductility สูงสุดในแต่ละชั้นต่อไป ซึ่งผลการวิเคราะห์จะได้นำเสนอในบทที่ 5 หัวข้อที่ 5.1.2 ในตารางที่ 5.8 ถึง 5.11 ต่อไป

3.2.4 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Capacity Spectrum

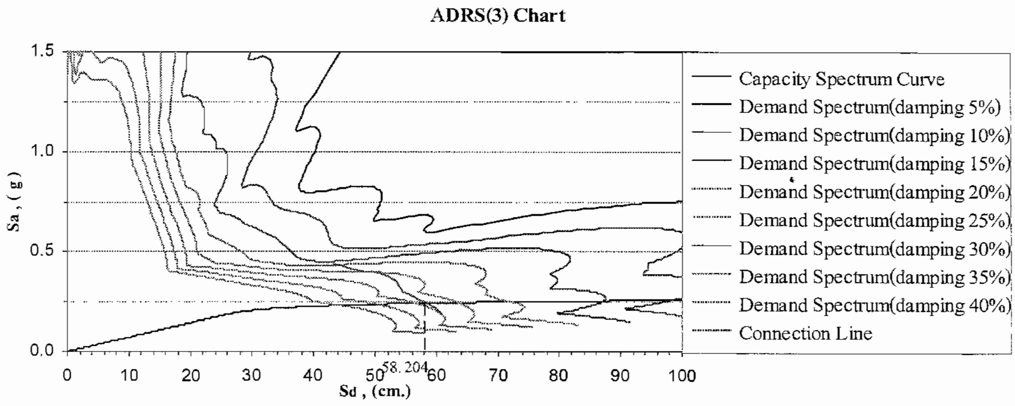
การวิเคราะห์โดยวิธีนี้จะอาศัยขั้นตอนตามที่เสนอในหัวข้อที่ 2.3 โดยค่าPerformance Point จะหาจาก จุดตัดระหว่างกราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum ที่พล๊อตในรูป ความเร่งและการเคลื่อนตัวทางข้าง (Acceleration Displacement Response Spectrum , ADRS) ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวแสดงได้ดังรูปที่ 3.47, 3.48, 3.49, 3.50 และ 3.51



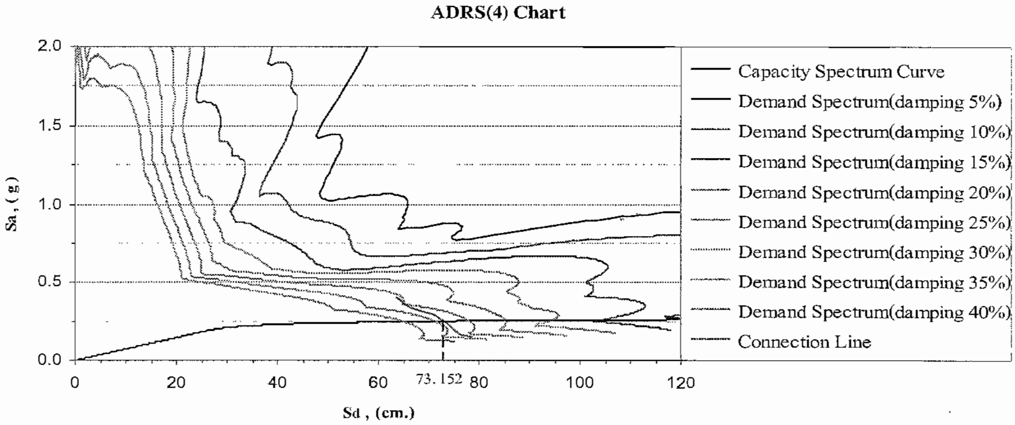
รูปที่ 3.47 กราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 1.15 Elcentro (Elcentro 1)



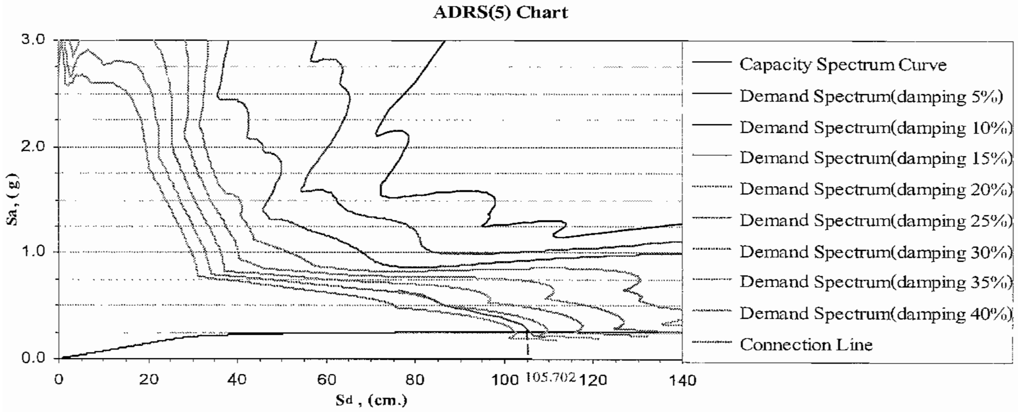
รูปที่ 3.48 กราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.08 Elcentro (Elcentro 2)



รูปที่ 3.49 กราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.36 Elcentro (Elcentro 3)



รูปที่ 3.50 กราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 5.62 Elcentro (Elcentro 4)



รูปที่ 3.51 กราฟ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 8.35 Elcentro (Elcentro 5)

จากการวิเคราะห์กราฟที่แสดงในรูปที่ 3.47 ถึง 3.51 ได้ค่าการเคลื่อนตัวของระบบ SDOF เทียบเท่า ที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีค่าเท่ากับ 28.016, 45.631, 58.204, 73.152 และ 105.702 เซนติเมตร ตามลำดับซึ่งค่าการเคลื่อนตัวของ SDOF เทียบเท่าสามารถนำไปหาค่าค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคาของอาคารเหล็ก 9 ชั้นที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวได้โดยอาศัยสมการที่ 2.7 ซึ่งจะได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา (อาคาร 9 ชั้น) ด้วยวิธี Capacity Spectrum

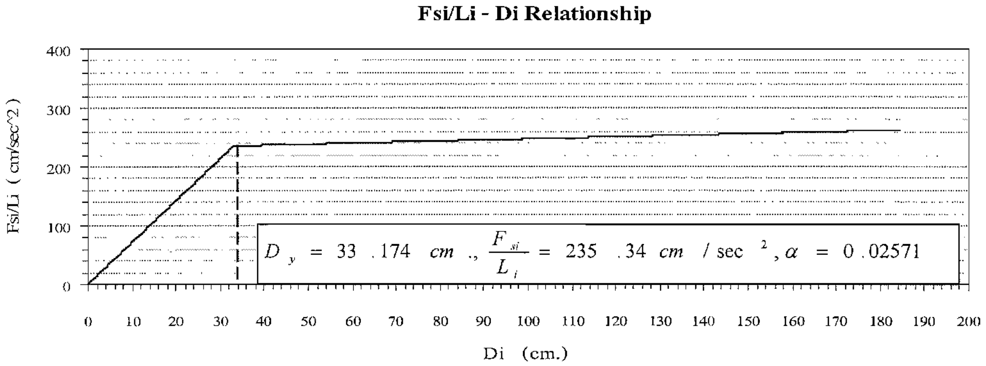
ลำดับ	แผ่นดินไหว	Performance Point (cm.)	Γ_1	$\phi_{roof,1}$	U_{roof} (cm.)
1	Elcentro 1	28.016	0.16848	8.18003	38.613
2	Elcentro 2	45.631	0.16848	8.18003	62.888
3	Elcentro 3	58.204	0.16848	8.18003	80.216
4	Elcentro 4	73.152	0.16848	8.18003	100.818
5	Elcentro 5	105.702	0.16848	8.18003	145.679

ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของชั้นหลังคาของอาคารเหล็ก 9 ชั้นที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีค่าเท่ากับ 38.613, 62.888, 80.216, 100.818 และ 145.679 เซนติเมตร ตามลำดับ

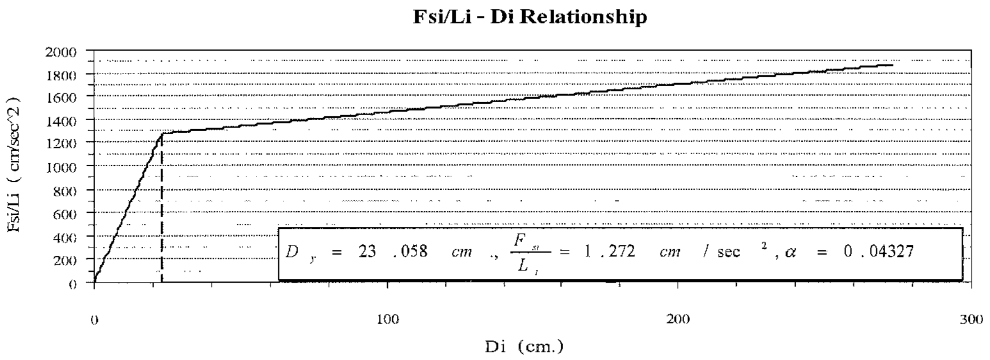
เมื่อได้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของชั้นหลังคาแล้วจึงจะนำผลการวิเคราะห์โครงสร้างที่ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของชั้นหลังคาไปหาค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดในแต่ละชั้น , ค่า Story Drift สูงสุด และ ค่า Rotation Ductility สูงสุดในแต่ละชั้นต่อไป ซึ่งผลการวิเคราะห์จะได้นำเสนอในบทที่ 5 หัวข้อที่ 5.1.2 ในตารางที่ 5.8 ถึง 5.11 ต่อไป

3.2.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Modal Pushover Analysis

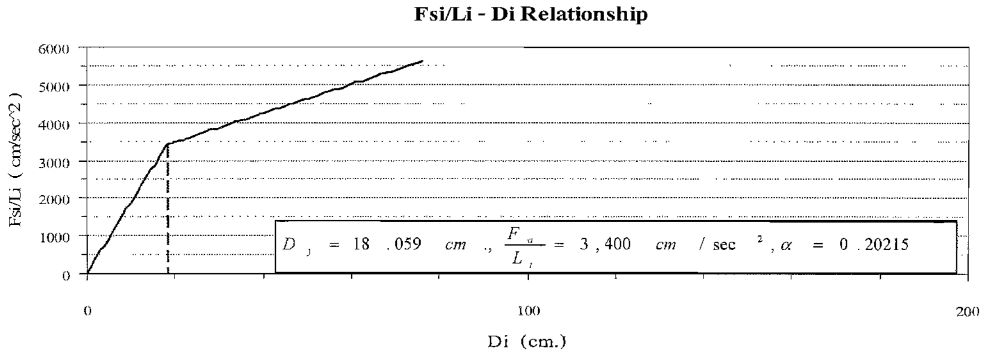
การวิเคราะห์ด้วยวิธี Modal Pushover Analysis นี้จะอาศัยกราฟ Bilinear Pushover Curve ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ (ซึ่งแปลงมาจากกราฟ Pushover Curve โดยใช้สมการที่2.31 ถึง 2.33) ที่พล๊อตในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกระทำและการเคลื่อนที่ (Fs-D) ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระในแต่ละโหมดแสดงดังรูปที่ 3.52, 3.53 และ 3.54 ไปหาผลตอบสนองการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง



รูปที่ 3.52 กราฟ Bilinear Pushover 1 Curve โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 9 ชั้น

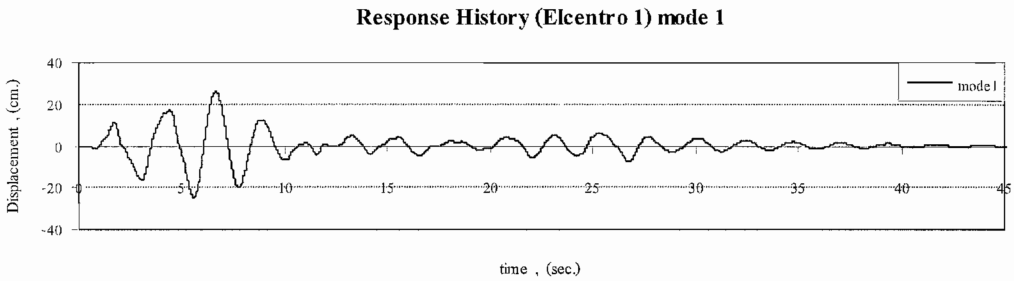


รูปที่ 3.53 กราฟ Bilinear Pushover 2 Curve โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 9 ชั้น

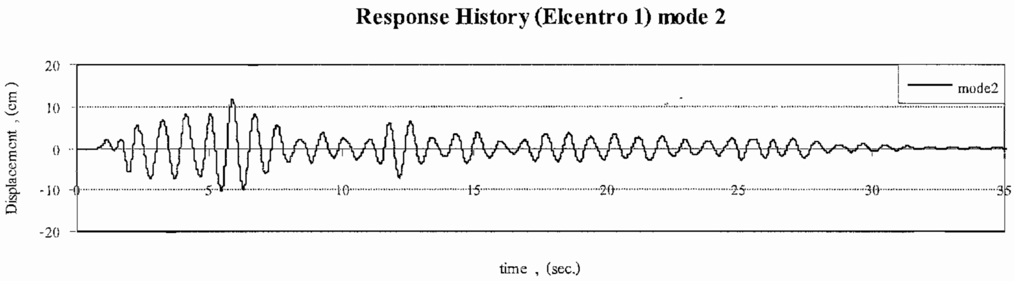


รูปที่ 3.54 กราฟ Bilinear Pushover 3 Curve โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 9 ชั้น

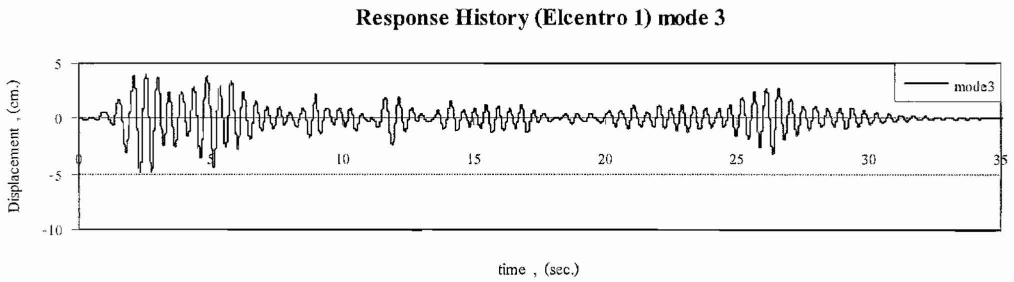
ผลตอบสนองในการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของระบบอินอีลาสติกแบบเทียบเท่าระบบหนึ่งดีกรีความอิสระของแต่ละโหมดวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม BISPEC [14] ได้ผล Response History Analysis ดังแสดงตามรูปที่ 3.55 ถึง 3.69



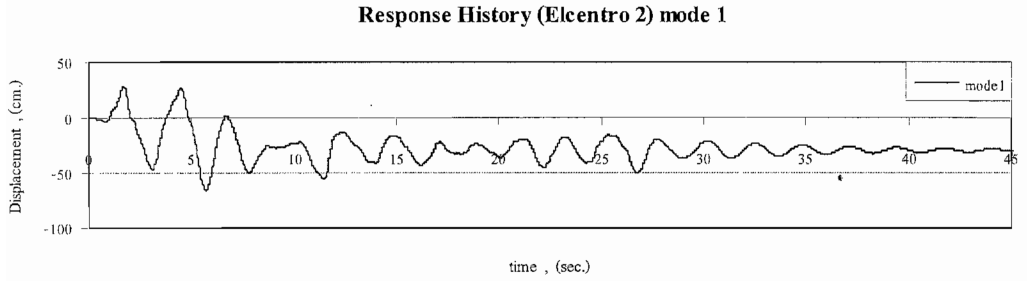
รูปที่ 3.55 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 1.15 Elcentro (Elcentro 1)



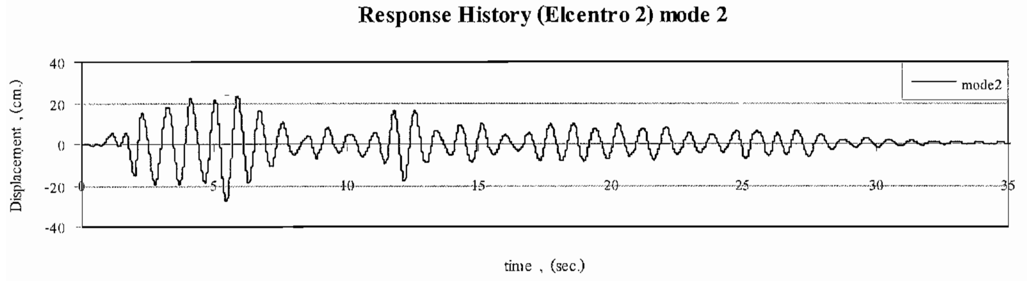
รูปที่ 3.56 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 1.15 Elcentro (Elcentro 1)



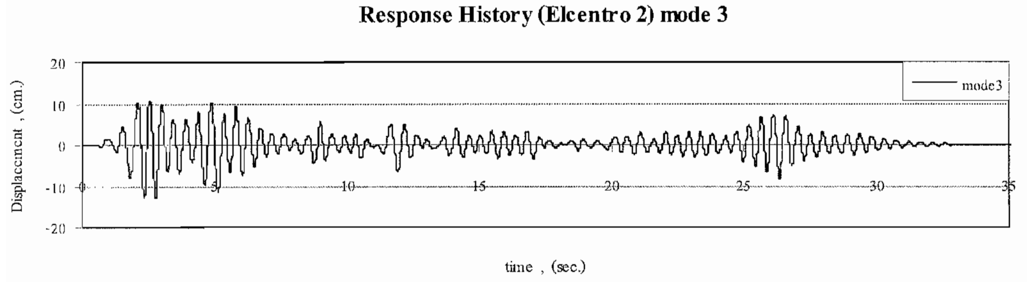
รูปที่ 3.57 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 1.15 Elcentro (Elcentro 1)



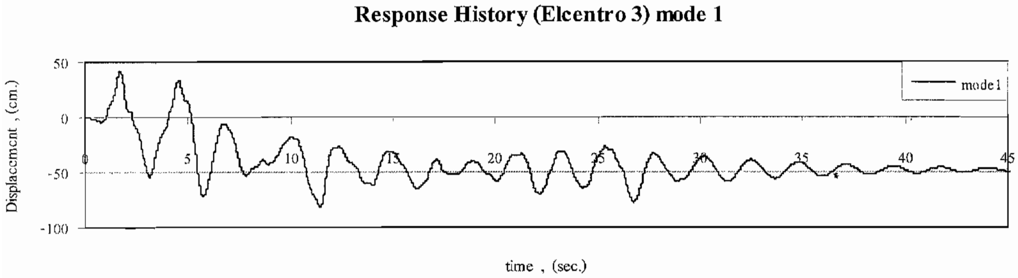
รูปที่ 3.58 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.08 Elcentro (Elcentro 2)



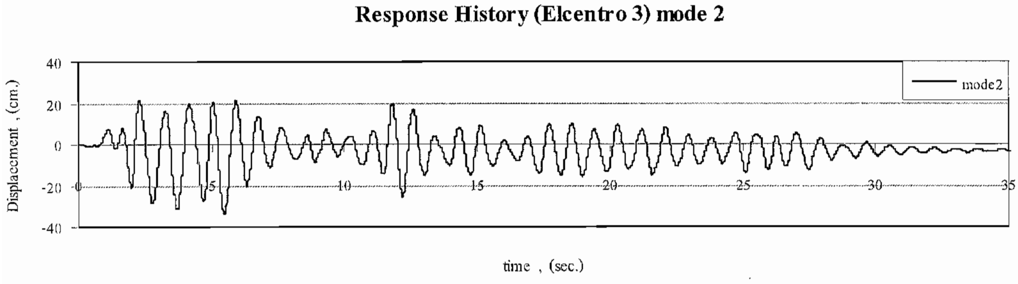
รูปที่ 3.59 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.08 Elcentro (Elcentro 2)



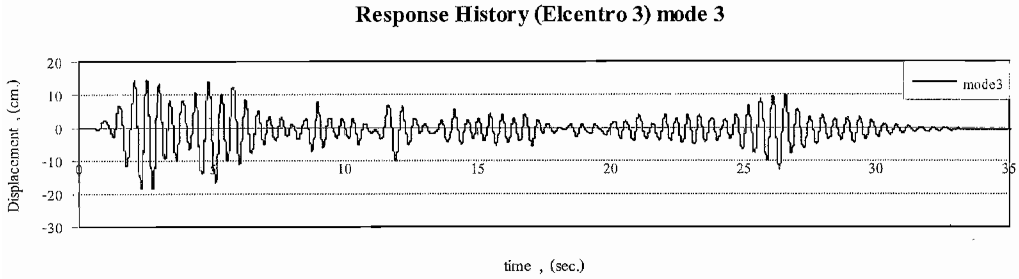
รูปที่ 3.60 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.08 Elcentro (Elcentro 2)



รูปที่ 3.61 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.36 Elcentro (Elcentro 3)

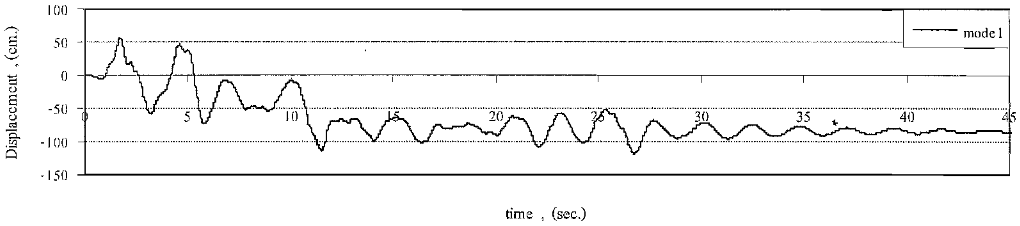


รูปที่ 3.62 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.36 Elcentro (Elcentro 3)



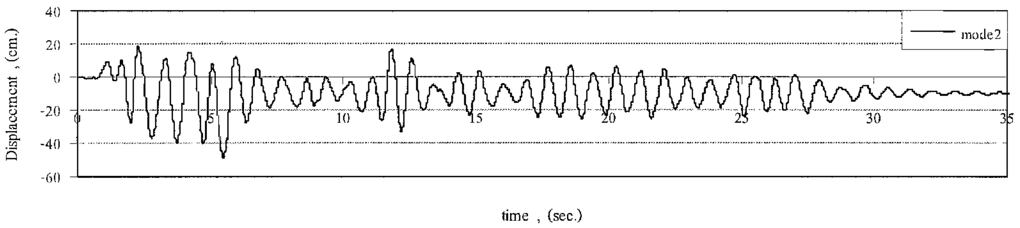
รูปที่ 3.63 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.36 Elcentro (Elcentro 3)

Response History (Elcentro 4) mode 1



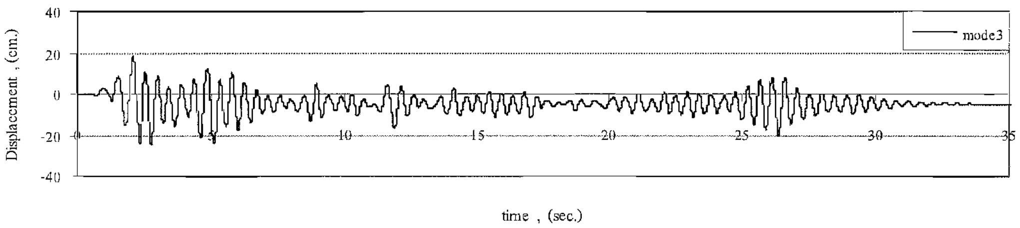
รูปที่ 3.64 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 5.62 Elcentro (Elcentro 4)

Response History (Elcentro 4) mode 2

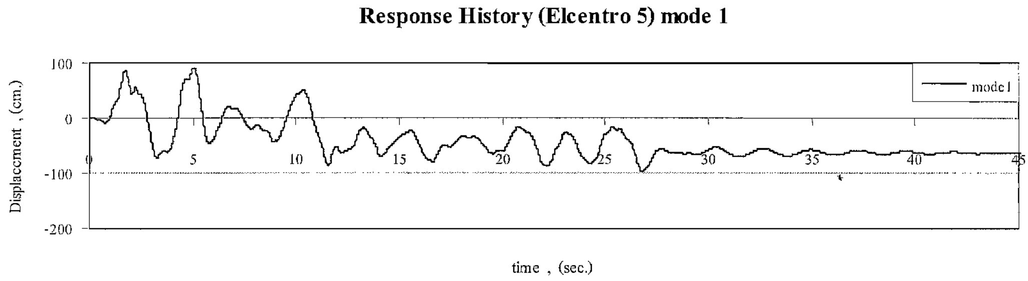


รูปที่ 3.65 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 5.62 Elcentro (Elcentro 4)

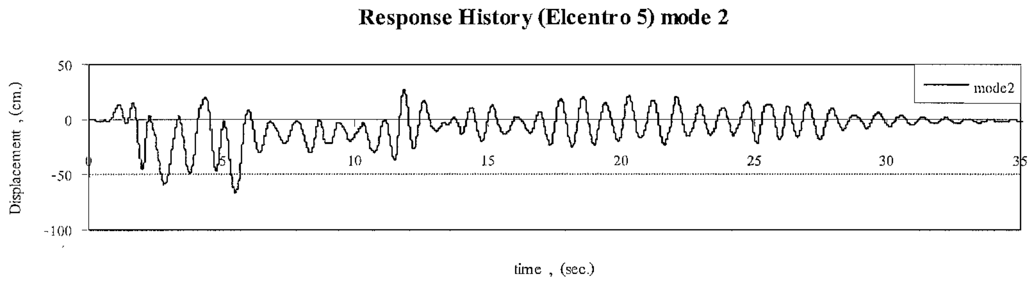
Response History (Elcentro 4) mode 3



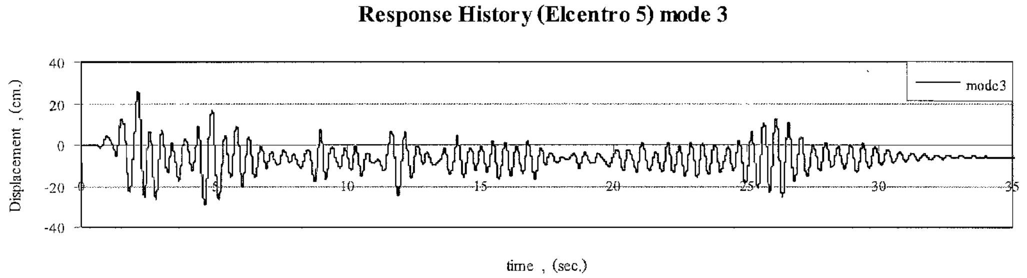
รูปที่ 3.66 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 5.62 Elcentro (Elcentro 4)



รูปที่ 3.67 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 1 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 8.35 Elcentro (Elcentro 5)



รูปที่ 3.68 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 2 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 8.35 Elcentro (Elcentro 5)



รูปที่ 3.69 Response History ของระบบเทียบเท่าหนึ่งดีกรีความอิสระ โหมดที่ 3 สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 8.35 Elcentro (Elcentro 5)

เมื่อได้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของสูงสุดของแต่ละโหมดทุกระดับความรุนแรงแล้วสามารถหาค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของชั้นหลังคาได้โดยใช้สมการที่ 2.34 และ 2.35ในหัวข้อ 2.4 ซึ่งค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง, ค่า Story drift และค่า Rotation ductility ของแต่ละโหมดทุกชั้นแสดงในตารางที่ 3.8

ส่วนค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด, ค่า Story drift สูงสุดและค่า Rotation ductility สูงสุดของแต่ละชั้นจะได้นำเสนอในบทที่ 5 หัวข้อ 5.1.2 ในตารางที่ 5.8 ถึง 5.11 ต่อไป

ตารางที่ 3.8 ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง, ค่า Story drift และค่า Rotation ductility ของแต่ละโหมด สำหรับอาคาร 9 ชั้น

No.	Earthquake	Floor	Peak Displacement (cm.)					Peak Story Drift (%)					Rotation Ductility (μ_θ)				
			Modal Pushover Analysis Method				NDA	Modal Pushover Analysis Method				NDA	Modal Pushover Analysis Method				NDA
			mode 1	mode 2	mode 3	SRSS	(cm.)	mode 1	mode 2	mode 3	SRSS	(%)	mode 1	mode 2	mode 3	SRSS	(μ_θ)
1	**Elcentro 1**	**roof**	35.971	-6.429	1.303	**36.565**	**37.186**	0.767	-0.838	0.399	**1.204**	**1.152**	0.468	0.565	0.290	**0.789**	**0.710**
	(Scale 1.15)	9^{th}	32.931	-3.106	-0.277	**33.078**	**33.833**	0.918	-0.858	0.262	**1.284**	**1.281**	0.670	0.733	0.304	**1.038**	**0.984**
		8^{th}	29.294	0.295	-1.316	**29.325**	**30.353**	0.983	-0.684	0.009	**1.197**	**1.282**	0.799	0.685	0.118	**1.059**	**1.199**
		7^{th}	25.400	3.005	-1.351	**25.613**	**27.813**	1.012	-0.392	-0.210	**1.105**	**1.189**	0.767	0.428	0.095	**0.884**	**0.963**
		6^{th}	21.389	4.557	-0.521	**21.876**	**25.260**	1.068	-0.138	-0.267	**1.109**	**1.116**	0.880	0.225	0.226	**0.935**	**0.984**
		5^{th}	17.158	5.103	0.536	**17.908**	**21.788**	1.107	0.106	-0.184	**1.127**	**1.189**	0.934	0.003	0.214	**0.958**	**0.931**
		4^{th}	12.771	4.681	1.265	**13.661**	**17.104**	1.081	0.279	-0.036	**1.117**	**1.384**	1.119	0.208	0.112	**1.143**	**1.449**
		3^{rd}	8.489	3.574	1.407	**9.317**	**11.643**	1.026	0.393	0.117	**1.105**	**1.418**	0.956	0.330	0.044	**1.013**	**1.548**
		2^{nd}	4.422	2.017	0.945	**4.951**	**6.025**	0.806	0.368	0.172	**0.902**	**1.098**	0.876	0.382	0.149	**0.967**	**1.406**
		1^{st}	0.000	0.000	0.000	**0.000**	**0.000**	0.000	0.000	0.000	**0.000**	**0.000**	0.310	0.151	0.074	**0.353**	**0.415**

ตารางที่ 3.8 ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง, ค่า Story drift และค่า Rotation ductility ของแต่ละโหมด สำหรับอาคาร 9 ชั้น (ต่อ)

No.	Earthquake	Floor	Peak Displacement (cm.)					Peak Story Drift (%)					Rotation Ductility (μ_θ)				
			Modal Pushover Analysis Method				NDA	Modal Pushover Analysis Method				NDA	Modal Pushover Analysis Method				NDA
			mode 1	mode 2	mode 3	SRSS	(cm.)	mode 1	mode 2	mode 3	SRSS	(%)	mode 1	mode 2	mode 3	SRSS	(μ_θ)
2	**Elcentro 2**	**roof**	90.846	-15.438	3.493	**92.214**	**74.295**	1.354	-1.867	1.069	**2.542**	**2.38**	0.822	1.413	0.776	**1.810**	**1.931**
	(Scale 3.08)	9th	85.479	-8.042	-0.742	**85.859**	**68.732**	1.799	-1.883	0.703	**2.697**	**2.512**	1.399	1.891	0.815	**2.490**	**2.492**
		8th	78.351	-0.582	-3.528	**78.433**	**62.865**	2.208	-1.406	0.023	**2.618**	**2.481**	2.070	1.743	0.317	**2.725**	**2.648**
		7th	69.601	4.989	-3.620	**69.873**	**56.185**	2.732	-0.742	-0.562	**2.886**	**2.605**	2.789	0.830	0.255	**2.921**	**2.965**
		6th	58.776	7.930	-1.394	**59.325**	**48.158**	3.200	-0.257	-0.715	**3.289**	**2.541**	3.737	0.425	0.605	**3.810**	**3.192**
		5th	46.096	8.948	1.438	**46.978**	**38.913**	3.416	0.184	-0.493	**3.456**	**2.704**	4.274	0.013	0.574	**4.312**	**3.140**
		4th	32.560	8.219	3.391	**33.752**	**29.947**	3.221	0.489	-0.096	**3.259**	**2.679**	4.518	0.362	0.299	**4.542**	**3.595**
		3rd	19.797	6.281	3.769	**21.109**	**19.985**	2.681	0.691	0.312	**2.786**	**2.553**	3.889	0.579	0.119	**3.934**	**3.299**
		2nd	9.172	3.543	2.535	**10.154**	**9.868**	1.672	0.646	0.462	**1.851**	**1.799**	2.883	0.671	0.400	**2.987**	**2.975**
		1st	0.000	0.000	0.000	**0.000**	**0.000**	0.000	0.000	0.000	**0.000**	**0.000**	0.552	0.265	0:199	**0.644**	**0.619**

ตารางที่ 3.8 ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง, ค่า Story drift และค่า Rotation ductility ของแต่ละโหมด สำหรับอาคาร 9 ชั้น (ต่อ)

No.	Earthquake	Floor	Peak Displacement (cm.)					Peak Story Drift (%)					Rotation Ductility (μ_θ)				
			Modal Pushover Analysis Method				NDA	Modal Pushover Analysis Method				NDA	Modal Pushover Analysis Method				NDA
			mode 1	mode 2	mode 3	SRSS	(cm.)	mode 1	mode 2	mode 3	SRSS	(%)	mode 1	mode 2	mode 3	SRSS	(μ_θ)
3	**Elcentro 3**	**roof**	111.737	-19.007	4.963	**113.451**	**111.481**	1.742	-2.258	1.479	**3.213**	**3.487**	1.100	1.809	1.123	**2.396**	**3.016**
	(Scale 4.36)	9^{th}	104.836	-10.058	-0.899	**105.321**	**101.727**	2.343	-2.217	0.974	**3.369**	**3.438**	1.938	2.312	1.220	**3.254**	**3.684**
		8^{th}	95.552	-1.275	-4.760	**95.679**	**91.186**	2.875	-1.606	0.038	**3.293**	**3.355**	2.817	2.096	0.438	**3.539**	**3.783**
		7^{th}	84.160	5.088	-4.910	**84.457**	**80.315**	3.501	-0.817	-0.761	**3.674**	**3.361**	3.858	0.924	0.342	**3.981**	**4.069**
		6^{th}	70.289	8.324	-1.895	**70.806**	**68.555**	3.976	-0.280	-0.971	**4.102**	**3.693**	4.895	0.465	0.821	**4.985**	**4.404**
		5^{th}	54.536	9.434	1.953	**55.381**	**54.686**	4.139	0.192	-0.669	**4.197**	**4.083**	5.392	0.018	0.778	**5.448**	**5.157**
		4^{th}	38.136	8.674	4.602	**39.379**	**39.091**	3.844	0.516	-0.131	**3.880**	**3.935**	5.526	0.381	0.406	**5.554**	**5.574**
		3^{rd}	22.906	6.629	5.121	**24.389**	**23.919**	3.149	0.729	0.424	**3.260**	**3.278**	4.720	0.611	0.162	**4.762**	**4.901**
		2^{nd}	10.427	3.741	3.442	**11.600**	**11.100**	1.900	0.682	0.627	**2.114**	**2.023**	3.456	0.708	0.543	**3.570**	**3.665**
		1^{st}	0.000	0.000	0.000	**0.000**	**0.000**	0.000	0.000	0.000	**0.000**	**0.000**	0.611	0.280	0:270	**0.724**	**0.662**

ตารางที่ 3.8 ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง, ค่า Story drift และค่า Rotation ductility ของแต่ละโหมด สำหรับอาคาร 9 ชั้น (ต่อ)

No.	Earthquake	Floor	Peak Displacement (cm.)					Peak Story Drift (%)					Rotation Ductility (μ_θ)				
			Modal Pushover Analysis Method				NDA	Modal Pushover Analysis Method				NDA	Modal Pushover Analysis Method				NDA
			mode 1	mode 2	mode 3	SRSS	(cm.)	mode 1	mode 2	mode 3	SRSS	(%)	mode 1	mode 2	mode 3	SRSS	(μ_θ)
4	**Elcentro 4**	**roof**	163.048	-27.369	6.566	**165.459**	**146.507**	3.483	-3.117	1.762	**4.995**	**4.624**	2.861	2.676	1.444	**4.176**	**4.061**
	(Scale 5.62)	9th	149.245	-15.019	-0.414	**150.000**	**128.473**	4.130	-2.963	1.154	**5.213**	**4.905**	3.941	3.245	1.506	**5.322**	**5.087**
		8th	132.880	-3.277	-4.986	**133.014**	**111.709**	4.657	-2.088	0.073	**5.104**	**4.865**	5.046	2.892	0.521	**5.839**	**5.709**
		7th	114.427	4.999	-5.276	**114.658**	**95.529**	5.242	-0.985	-0.817	**5.396**	**4.74**	6.460	1.341	0.356	**6.608**	**6.237**
		6th	93.657	8.903	-2.040	**94.102**	**78.969**	5.606	-0.330	-1.049	**5.713**	**4.891**	7.401	0.545	0.885	**7.473**	**6.353**
		5th	71.443	10.211	2.118	**72.200**	**62.586**	5.586	0.201	-0.724	**5.636**	**4.821**	7.679	0.034	0.841	**7.725**	**6.575**
		4th	49.309	9.416	4.986	**50.447**	**44.272**	5.062	0.558	-0.141	**5.094**	**4.562**	7.512	0.410	0.439	**7.536**	**6.607**
		3rd	29.253	7.203	5.545	**30.633**	**26.772**	4.066	0.792	0.458	**4.168**	**3.713**	6.339	0.663	0.176	**6.376**	**5.723**
		2nd	13.142	4.064	3.729	**14.252**	**12.278**	2.395	0.741	0.680	**2.598**	**2.238**	4.594	0.769	0.589	**4.695**	**4.181**
		1st	0.000	0.000	0.000	**0.000**	**0.000**	0.000	0.000	0.000	**0.000**	**0.000**	0.697	0.304	0.292	**0.815**	**0.716**

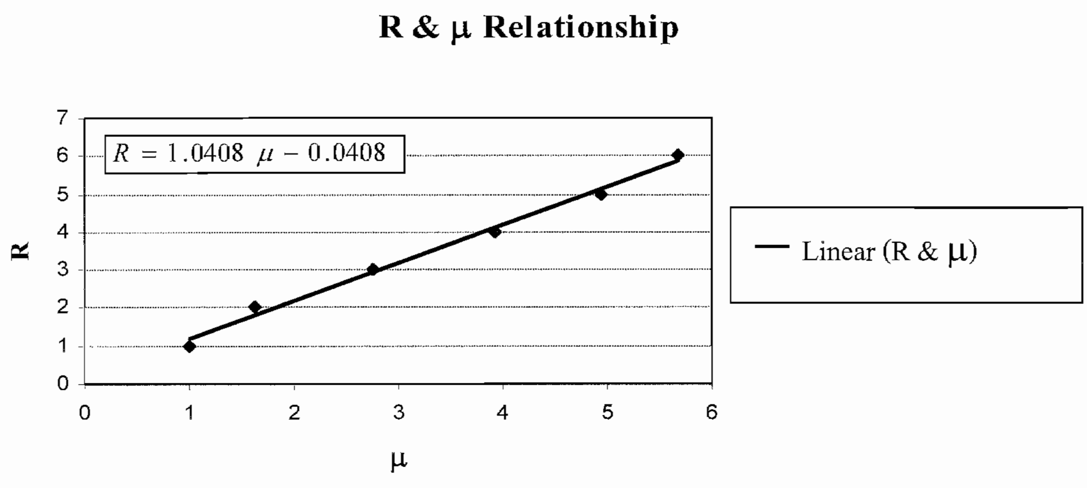
ตารางที่ 3.8 ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง, ค่า Story drift และค่า Rotation ductility ของแต่ละโหมด สำหรับอาคาร 9 ชั้น (ต่อ)

No.	Earthquake	Floor	Peak Displacement (cm.)					Peak Story Drift (%)					Rotation Ductility (μ_θ)				
			Modal Pushover Analysis Method				NDA	Modal Pushover Analysis Method				NDA	Modal Pushover Analysis Method				NDA
			mode 1	mode 2	mode 3	SRSS	(cm.)	mode 1	mode 2	mode 3	SRSS	(%)	mode 1	mode 2	mode 3	SRSS	(μ_θ)
5	**Elcentro 5**	**roof**	133.253	-37.305	7.744	**138.593**	**185.877**	2.440	-4.054	1.963	**5.123**	**7.354**	1.830	3.622	1.656	**4.383**	**6.759**
	(Scale 8.35)	9^{th}	123.584	-21.239	-0.036	**125.396**	**156.743**	3.079	-3.801	1.278	**5.056**	**7.563**	2.752	4.270	1.707	**5.359**	**8.215**
		8^{th}	111.382	-6.180	-5.098	**111.669**	**126.771**	3.625	-2.701	0.099	**4.521**	**6.877**	3.750	3.825	0.577	**5.388**	**8.683**
		7^{th}	97.018	4.521	-5.489	**97.278**	**111.760**	4.247	-1.194	-0.849	**4.492**	**5.922**	4.965	2.001	0.362	**5.365**	**8.528**
		6^{th}	80.190	9.251	-2.126	**80.750**	**96.114**	4.679	-0.390	-1.096	**4.822**	**5.76**	5.975	0.634	0.923	**6.079**	**7.769**
		5^{th}	61.648	10.798	2.217	**62.626**	**76.378**	4.763	0.202	-0.757	**4.827**	**6.077**	6.380	0.059	0.879	**6.441**	**8.192**
		4^{th}	42.774	9.997	5.217	**44.235**	**54.153**	4.365	0.590	-0.147	**4.408**	**5.78**	6.382	0.429	0.459	**6.413**	**8.486**
		3^{rd}	25.476	7.658	5.801	**27.228**	**33.553**	3.534	0.842	0.480	**3.664**	**4.584**	5.408	0.703	0.184	**5.457**	**7.357**
		2^{nd}	11.473	4.323	3.899	**12.866**	**16.398**	2.091	0.788	0.711	**2.345**	**2.989**	3.928	0.818	0.616	**4.060**	**5.183**
		1^{st}	0.000	0.000	0.000	**0.000**	**0.000**	0.000	0.000	0.000	**0.000**	**0.000**	0.658	0.324	0.306	**0.794**	**0.772**

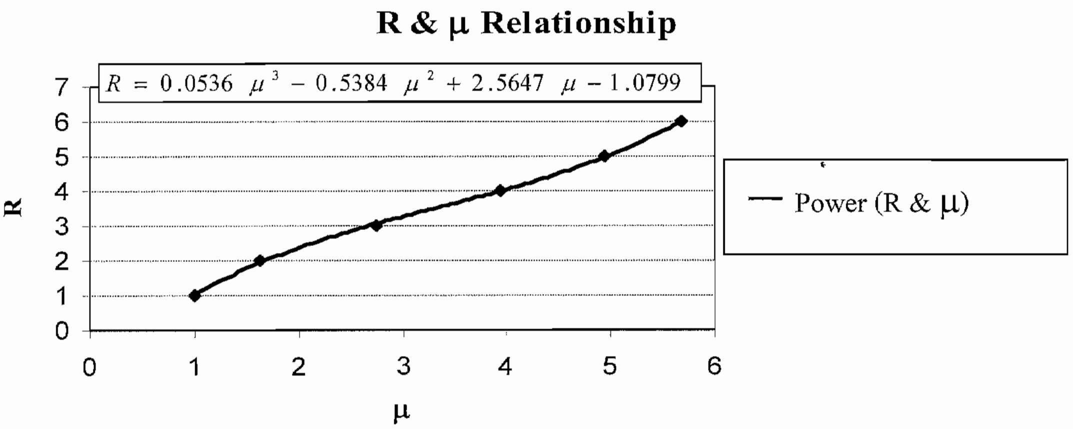
บทที่ 4 การวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy-Based Analysis

ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.5 ในวิธี Energy-Based Analysis เส้นกราฟ Energy Demand Curve จะแปรผันตามความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ ซึ่งจะขึ้นกับคลื่นแผ่นดินไหว ในบทนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารตัวอย่าง 3 ชั้นและ 9 ชั้นด้วยวิธี Energy-Based Analysis โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ ในรูปแบบสมการเชิงเส้นและแบบสมการไม่เชิงเส้น

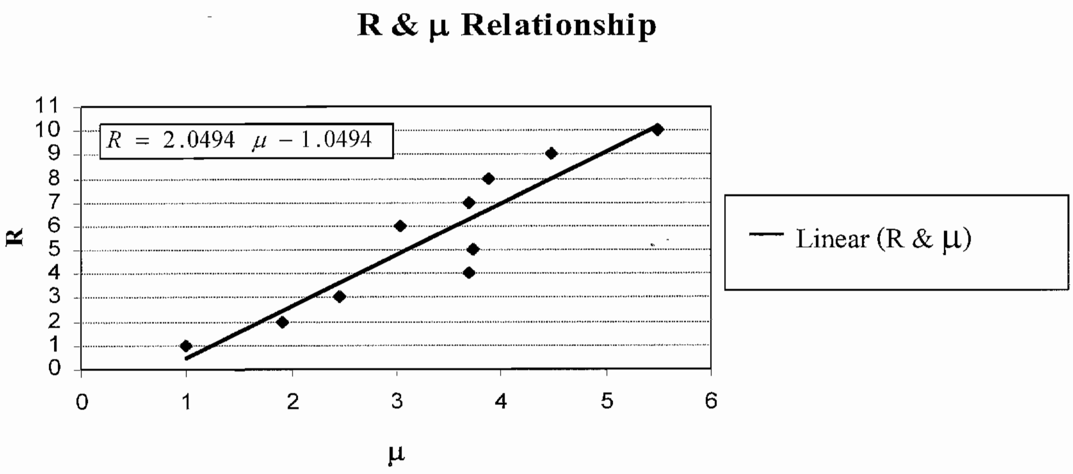
สำหรับในงานวิจัยนี้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ จะได้จากการวิเคราะห์ระบบ SDOF ที่มีค่า R ต่างๆกันภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Elcentro 1940 โดยใช้โปรแกรม BISPEC [14] ซึ่งเมื่อนำค่า R กับค่า μ ที่เกิดขึ้นมาหาความสัมพันธ์จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบสมการเชิงเส้นและแบบสมการไม่เชิงเส้นดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 สำหรับอาคาร 3 ชั้นและดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 สำหรับอาคาร 9 ชั้น



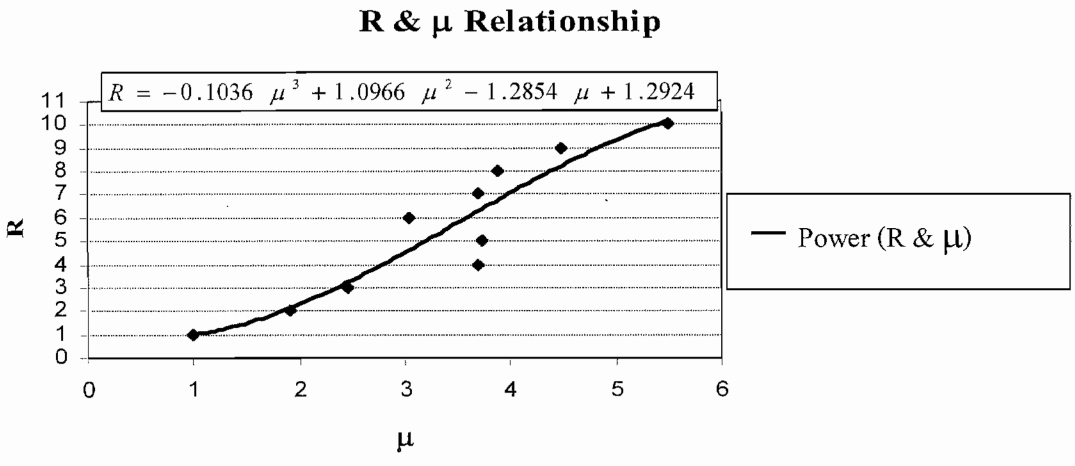
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบเชิงเส้น สำหรับอาคาร 3 ชั้น



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบไม่เชิงเส้น สำหรับอาคาร 3 ชั้น



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบเชิงเส้น สำหรับอาคาร 9 ชั้น



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบไม่เชิงเส้น สำหรับอาคาร 9 ชั้น

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy-Based Analysis สำหรับทั้งอาคาร 3 ชั้นและอาคาร 9 ชั้นจะทำการวิเคราะห์เป็นสี่กรณีคือ

1. วิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R&μ เป็นแบบเชิงเส้นโดยใช้มวลประสิทธิผลของโหมดแรกในการวิเคราะห์
2. วิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R&μ เป็นแบบเชิงเส้นโดยใช้มวลทั้งหมดในการวิเคราะห์
3. วิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R&μ เป็นแบบไม่เชิงเส้นโดยใช้มวลประสิทธิผลของโหมดแรกในการวิเคราะห์
4. วิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R&μ เป็นแบบไม่เชิงเส้นโดยใช้มวลทั้งหมดในการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์จะเริ่มด้วยการสร้างกราฟ Energy Capacity Curve โดยคำนวณค่าพลังงานสะสมในโครงสร้างจากผลการวิเคราะห์ Pushover Curve เนื่องจากรูปแบบของการกระจายแรงกระทำทางด้านข้างตามโหมดการสั่นโหมดแรก แล้วจึงสร้างกราฟ Energy Demand Curve ที่คำนวณมาจาก Elastic Energy Demand ($MS_v^2/2$)โดยใช้ค่าความเร็วเสมือน (Pseudo-velocity) ที่ได้จากสเปคตรัมผลตอบสนองของระบบที่มีความหน่วง 5 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Elcentro 1940 ที่ระดับความรุนแรงทั้งห้าระดับ ซึ่งค่าความเร็วเสมือนสำหรับอาคารเหล็ก 3 ชั้นที่มีคาบการสั่นของโหมดแรก 1.073 วินาทีเป็น 54.176, 134.920, 187.805, 229.133 และ 269.723 เซนติเมตร/วินาที ตามลำดับ และค่าความเร็วเสมือนสำหรับอาคารเหล็ก 9 ชั้นที่มีคาบการสั่นของโหมดแรก 2.305 วินาทีเป็น 71.150, 190.561, 269.756, 347.713 และ 516.621 เซนติเมตร/วินาที ตามลำดับ

ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเหนียวทางด้านพลังงาน (μ_E) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานสะสมทั้งหมดต่อพลังงานสะสมที่จุดคลาก (โดยที่พลังงานสะสมที่จุดคลากสำหรับอาคาร 3 ชั้นมีค่าเท่ากับ 275 กิโลนิวตัน-เมตร) เป็นดังแสดงในตารางที่ 4.1

ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ความเหนียวทางด้านพลังงานของอาคาร 9 ชั้น (โดยที่พลังงานสะสมที่จุดคลากสำหรับอาคาร 9 ชั้นมีค่าเท่ากับ 1431.7 กิโลนิวตัน-เมตร) เป็นดังแสดงในตารางที่4.2

เมื่อได้ Energy Capacity Curve และ Energy Demand Curve แล้วจะนำกราฟทั้งสองมาหาจุดตัดเพื่อหาค่าการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นดังที่อธิบายไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.5 ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 3 ชั้นดังแสดงในหัวข้อ 4.1 และผลการวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 9 ชั้นดังแสดงในหัวข้อ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่าแฟคเตอร์ความเหนียวทางด้านพลังงาน (μ_E) ของอาคาร 3 ชั้น ที่ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคาต่างๆ

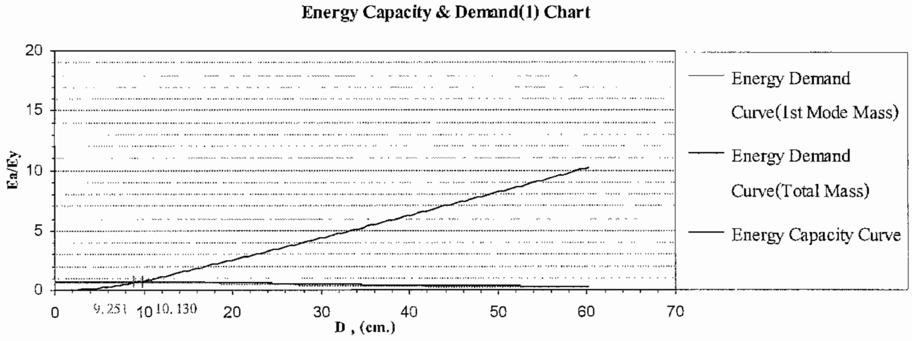
Roof Disp (%)	Base Shear/Weight (V/W)	Absorbed Energy (kN-m)	μ_E
0.00	0.00	0.00	0.00
0.21	0.06	7.83	1.00
0.41	0.11	31.32	1.00
0.62	0.17	70.48	1.00
0.82	0.22	125.29	1.00
1.03	0.28	195.77	1.00
1.21	0.32	272.11	1.00
1.26	0.32	294.12	1.07
1.31	0.32	316.39	1.15
1.36	0.33	338.91	1.23
1.42	0.33	362.31	1.32
1.49	0.33	397.50	1.45
1.54	0.34	420.79	1.53
2.01	0.34	633.93	2.31
2.52	0.34	873.88	3.18
3.03	0.35	1,117.11	4.06
3.54	0.35	1,363.92	4.96
4.01	0.36	1,588.73	5.78
4.52	0.36	1,841,46	6.70
5.03	0.37	2,097.26	7.63
5.54	0.37	2,356.16	8.57
6.01	0.37	2,591.80	9.43

ตารางที่ 4.2 ค่าแฟคเตอร์ความเหนียวทางด้านพลังงาน (μ_E) ของอาคาร 9 ชั้น ที่ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคาต่างๆ

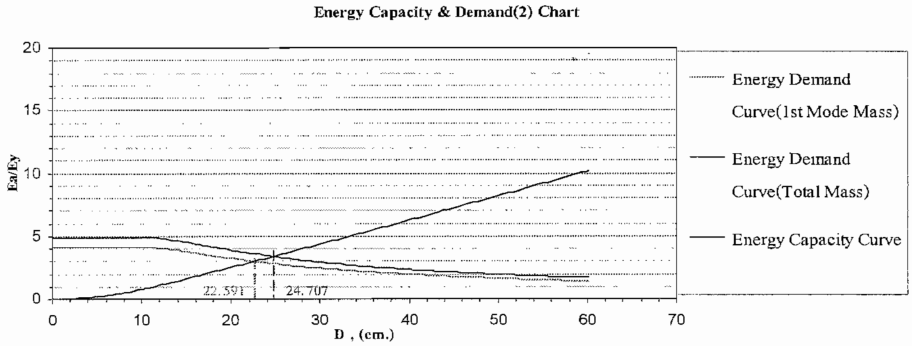
Roof Disp (%)	Base Shear/Weight (V/W)	Absorbed Energy (kN-m)	μ_E
0.00	0.00	0.00	0.00
0.20	0.03	39.16	1.00
0.40	0.06	151.47	1.00
0.60	0.08	336.98	1.00
0.80	0.11	595.67	1.00
1.00	0.14	942.80	1.00
1.20	0.16	1,368.23	1.00
1.23	0.16	1,431.72	1.00
1.24	0.16	1,468.20	1.02
1.25	0.16	1,479.70	1.03
1.30	0.16	1,592.55	1.11
1.35	0.16	1,723.38	1.20
1.40	0.16	1,839.22	1.28
1.45	0.16	1,955.58	1.37
1.50	0.17	2,090.08	1.46
2.00	0.17	3,291.26	2.30
2.50	0.18	4,457.96	3.11
3.00	0.18	5,619.33	3.92
3.50	0.19	6,721.22	4.69
4.00	0.19	7,811.92	5.46
4.50	0.19	8,905.10	6.22
5.00	0.19	10,013.80	6.99
5.50	0.19	11,131.30	7.77
6.00	0.19	12,270.90	8.57
6.50	0.19	13,401.90	9.36

4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 3 ชั้น

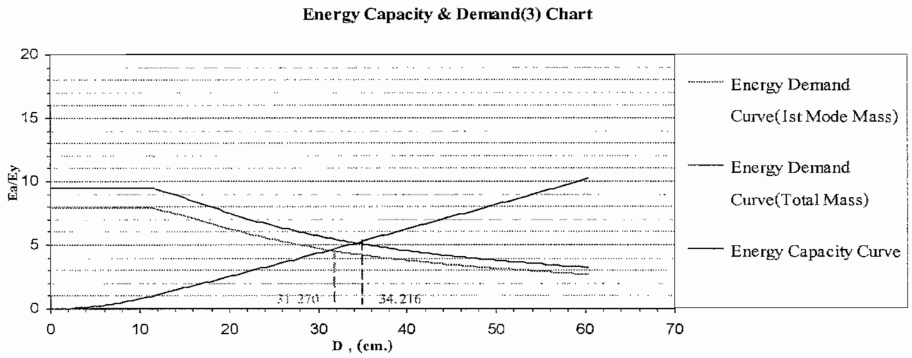
กราฟรวมระหว่าง Energy Capacity และ Energy Demand ที่ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ เป็นแบบเชิงเส้น ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวสำหรับอาคาร 3 ชั้นแสดงตามรูปที่ 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 และ 4.9



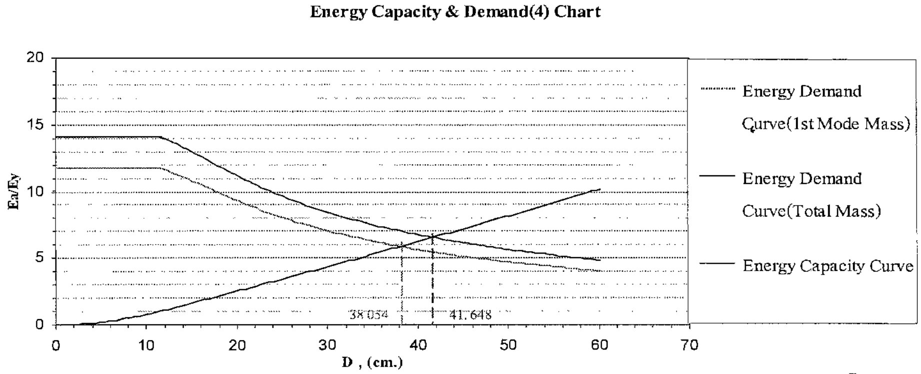
รูปที่ 4.5 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Linear R & μ) สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 0.88 Elcentro



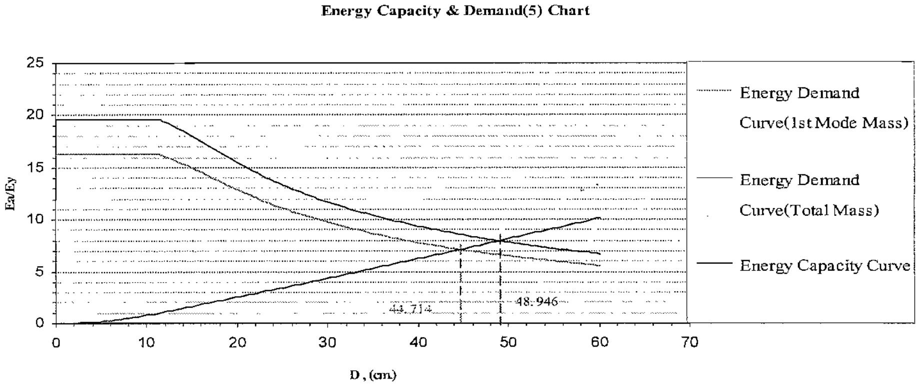
รูปที่ 4.6 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Linear R & μ) สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 2.19 Elcentro



รูปที่ 4.7 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Linear R & μ) สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.05 Elcentro



รูปที่ 4.8 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Linear R & μ)
สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.72 Elcentro



รูปที่ 4.9 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Linear R & μ)
สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.38 Elcentro

ค่าการเคลื่อนตัวของระบบเสมือน SDOF ที่จุดตัดระหว่าง Energy Demand กับ Capacity Curve ที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์โดยพิจารณามวลของโหมดแรกมีค่าเท่ากับ 9.251, 22.591, 31.270, 38.054 และ 44.714 เซนติเมตร และสำหรับการวิเคราะห์โดยใช้มวลทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 10.130, 24.707, 34.216, 41.648 และ 48.946 เซนติเมตร ตามลำดับ

ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคาจากค่าการเคลื่อนตัวของระบบเสมือน SDOF ของอาคารเหล็ก 3 ชั้น ที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวแสดงสรุปไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา (อาคาร 3 ชั้น)

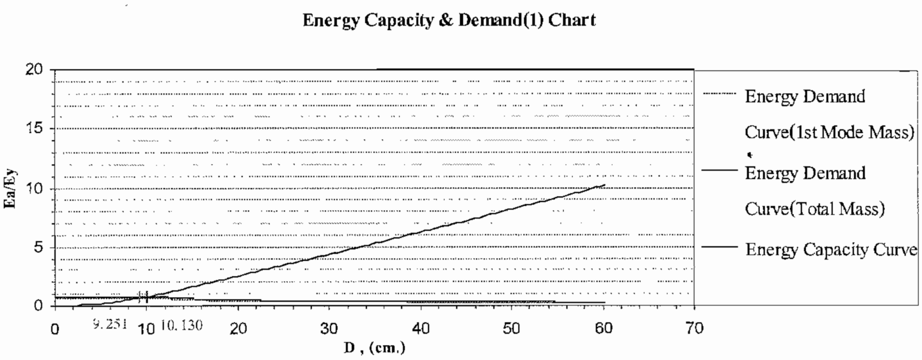
ด้วยวิธี Energy-Based Analysis โดยความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ เป็นแบบเชิงเส้น

ลำดับ	แผ่นดินไหว	Energy Balance Point (cm.)	Γ_1	$\emptyset_{roof,1}$	U^{*}_{roof}(cm.)	หมายเหตุ (มวล)
1	Elcentro 1 (0.88 Elcentro)	9.251	0.3571	3.542	11.702	มวลโหมดแรก
		10.130	0.3571	3.542	12.812	มวลทั้งหมด
2	Elcentro 2 (2.19 Elcentro)	22.591	0.3571	3.542	28.575	มวลโหมดแรก
		24.707	0.3571	3.542	31.250	มวลทั้งหมด
3	Elcentro 3 (3.05 Elcentro)	31.270	0.3571	3.542	39.553	มวลโหมดแรก
		34.216	0.3571	3.542	43.279	มวลทั้งหมด
4	Elcentro 4 (3.72 Elcentro)	38.054	0.3571	3.542	48.133	มวลโหมดแรก
		41.648	0.3571	3.542	52.680	มวลทั้งหมด
5	Elcentro 5 (4.38 Elcentro)	44.714	0.3571	3.542	56.556	มวลโหมดแรก
		48.946	0.3571	3.542	61.910	มวลทั้งหมด

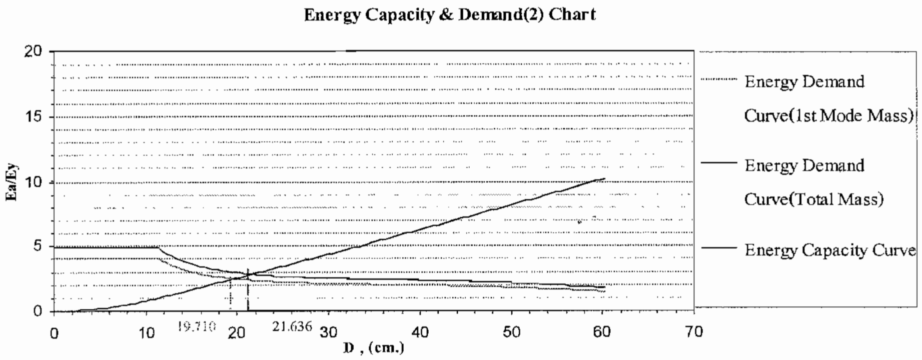
จากค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของชั้นหลังคาของอาคารเหล็ก 3 ชั้นที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวสำหรับกรณีที่ใช้มวลของโหมดแรกซึ่งมีค่าเท่ากับ 11.702, 28.575, 39.553, 48.133 และ 56.556 เซนติเมตร และสำหรับกรณีที่ใช้มวลทั้งหมดซึ่งมีค่าเท่ากับ 12.812, 31.250, 43.279, 52.680 และ 61.910 เซนติเมตร จะนำไปคำนวณหาค่าต่างๆเป็น ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด, ค่า Story drift สูงสุด และค่า Rotation ductility สูงสุด ของแต่ละชั้นซึ่งจะนำเสนอต่อไปในบทที่ 5 หัวข้อ 5.2.1 ในตารางที่ 5.15 ถึง 5.18 ต่อไป

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis สำหรับอาคาร 3 ชั้นกรณีที่ใช้มวลของโหมดแรกในการวิเคราะห์จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้นอีกสามวิธี และวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น ซึ่งจะนำเสนอต่อไปในบทที่ 5 หัวข้อ 5.1.1 ในตารางที่ 5.1 ถึง 5.4 ต่อไป

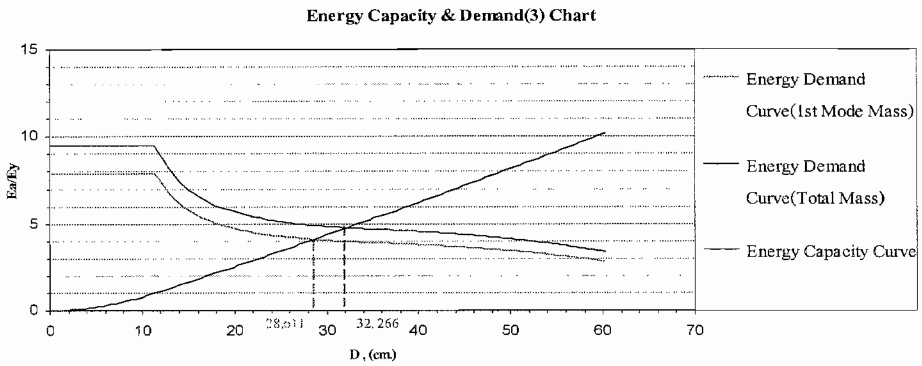
กราฟรวมระหว่าง Energy Capacity และ Energy Demand ที่ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ เป็นแบบไม่เชิงเส้น ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวสำหรับอาคาร3 ชั้นแสดงตามรูปที่ 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 และ 4.14



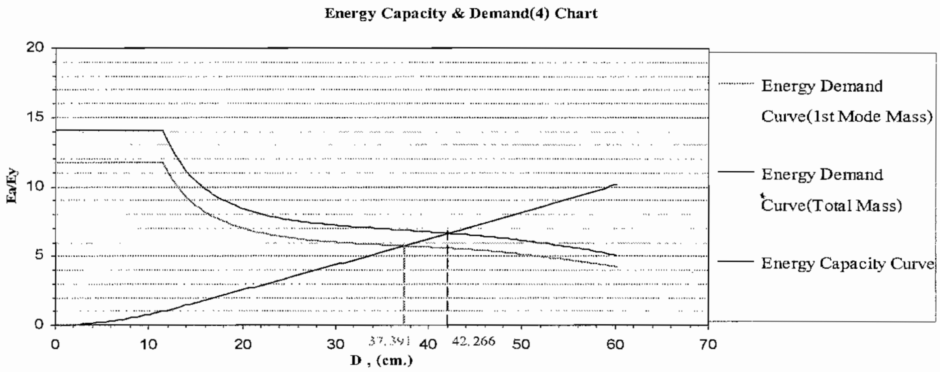
รูปที่ 4.10 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Nonlinear R & μ) สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 0.88 Elcentro



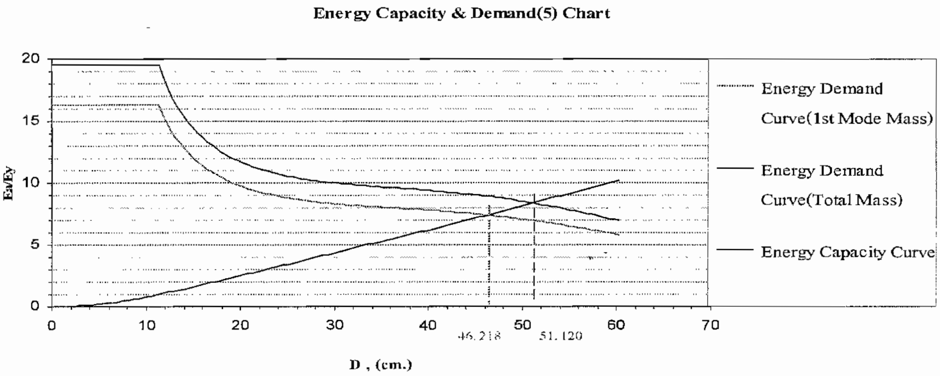
รูปที่ 4.11 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Nonlinear R & μ) สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 2.19 Elcentro



รูปที่ 4.12 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Nonlinear R & μ) สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.05 Elcentro



รูปที่ 4.13 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Nonlinear R & μ)
สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.72 Elcentro



รูปที่ 4.14 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Nonlinear R & μ)
สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.38 Elcentro

ค่าการเคลื่อนตัวของระบบเสมือน SDOF ที่จุดตัดระหว่าง Energy Demand กับ Capacity Curve ที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์โดยพิจารณามวลของโหมดแรกมีค่าเท่ากับ 9.251, 19.710, 28.611, 37.391 และ 46.218 เซนติเมตร และสำหรับการวิเคราะห์โดยใช้มวลทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 10.130, 21.636, 32.266, 42.266 และ 51.120 เซนติเมตร ตามลำดับ

ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคาจากค่าการเคลื่อนตัวของระบบเสมือน SDOF ของอาคารเหล็ก 3 ชั้น ที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวแสดงสรุปไว้ในตารางที่ 4.4

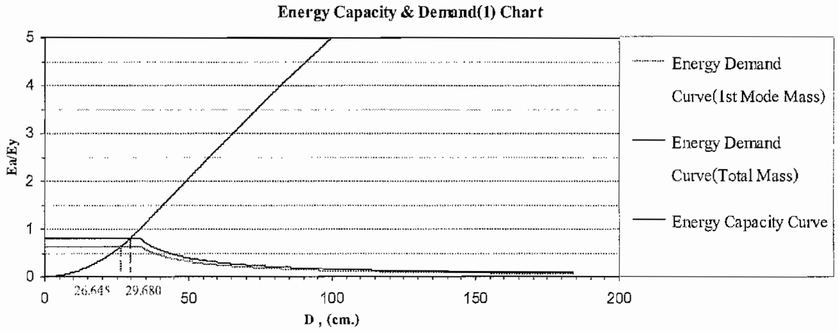
ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา (อาคาร 3 ชั้น) ด้วยวิธี Energy-Based Analysis โดยความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ เป็นแบบไม่เชิงเส้น

ลำดับ	แผ่นดินไหว	Energy Balance Point (cm.)	Γ_1	$\varnothing_{roof,1}$	U^*_{roof}(cm.)	หมายเหตุ (มวล)
1	Elcentro 1 (0.88 Elcentro)	9.251	0.3571	3.542	11.702	มวลโหมดแรก
		10.130	0.3571	3.542	12.812	มวลทั้งหมด
2	Elcentro 2 (2.19 Elcentro)	19.710	0.3571	3.542	24.930	มวลโหมดแรก
		21.636	0.3571	3.542	27.366	มวลทั้งหมด
3	Elcentro 3 (3.05 Elcentro)	28.611	0.3571	3.542	36.187	มวลโหมดแรก
		32.266	0.3571	3.542	40.810	มวลทั้งหมด
4	Elcentro 4 (3.72 Elcentro)	37.391	0.3571	3.542	47.295	มวลโหมดแรก
		42.266	0.3571	3.542	53.459	มวลทั้งหมด
5	Elcentro 5 (4.38 Elcentro)	46.218	0.3571	3.542	58.458	มวลโหมดแรก
		51.120	0.3571	3.542	64.658	มวลทั้งหมด

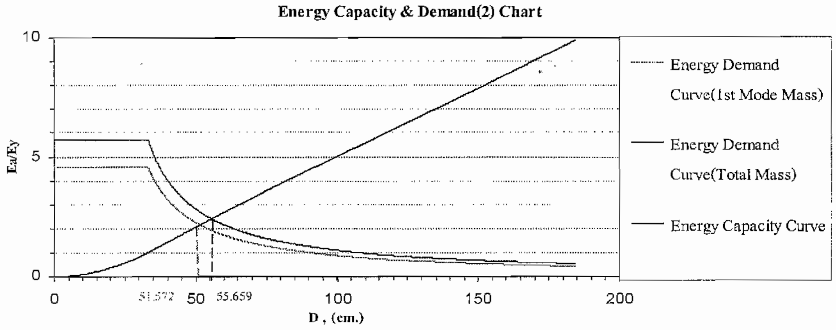
จากค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของชั้นหลังคาของอาคารเหล็ก 3 ชั้นที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวสำหรับกรณีที่ใช้มวลของโหมดแรกซึ่งมีค่าเท่ากับ 11.702, 24.930, 36.187, 47.295 และ 58.458 เซนติเมตรและสำหรับกรณีที่ใช้มวลทั้งหมดซึ่งมีค่าเท่ากับ 12.812, 27.366, 40.810, 53.459 และ 64.658 เซนติเมตรจะนำไปคำนวณหาค่าต่างๆเป็น ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด, ค่า Story drift สูงสุด และค่า Rotation ductility สูงสุด ของแต่ละชั้นซึ่งจะนำเสนอต่อไปในบทที่5 หัวข้อ 5.2.1 ในตารางที่ 5.15 ถึง 5.18 ต่อไป

4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 9 ชั้น

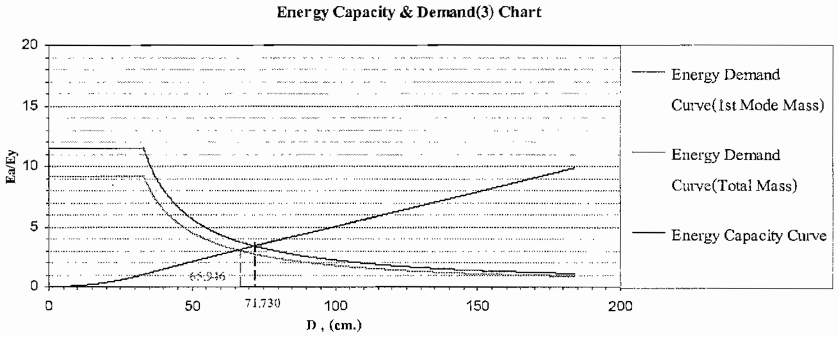
กราฟรวมระหว่าง Energy Capacity และ Energy Demand ที่ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ เป็นแบบเชิงเส้น ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวสำหรับอาคาร 3 ชั้นแสดงตามรูปที่ 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 และ 4.19



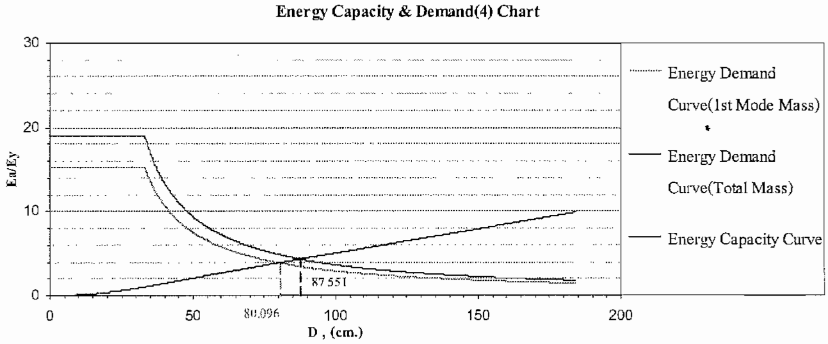
รูปที่ 4.15 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Linear R & μ)
สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 1.15 Elcentro



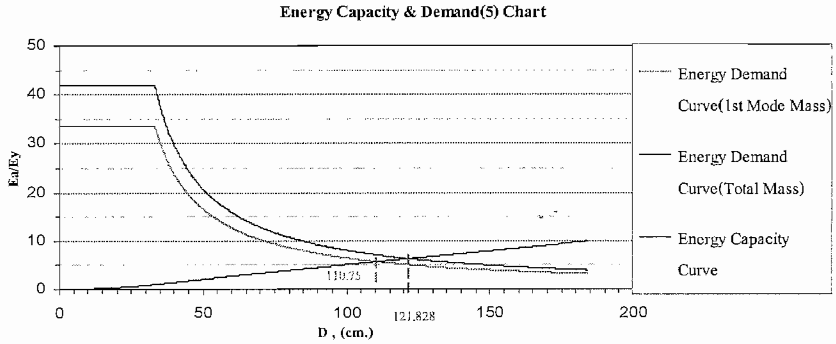
รูปที่ 4.16 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Linear R & μ)
สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.08 Elcentro



รูปที่ 4.17 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Linear R & μ)
สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.36 Elcentro



รูปที่ 4.18 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Linear R & μ)
สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 5.62 Elcentro



รูปที่ 4.19 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Linear R & μ)
สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 8.35 Elcentro

ค่าการเคลื่อนตัวของระบบเสมือนSDOF ที่จุดตัดระหว่าง Energy Demand กับ Capacity Curve ที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์โดยพิจารณามวลของโหมดแรกมีค่าเท่ากับ 26.645, 51.572, 65.946, 80.096 และ 110.752 เซนติเมตร และสำหรับการวิเคราะห์โดยใช้มวลทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 29.680, 55.659, 71.730, 87.551 และ 121.828 เซนติเมตร ตามลำดับ

ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคาจากค่าการเคลื่อนตัวของระบบเสมือน SDOF ของอาคารเหล็ก 9 ชั้น ที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวแสดงสรุปไว้ในตารางที่ 4.5

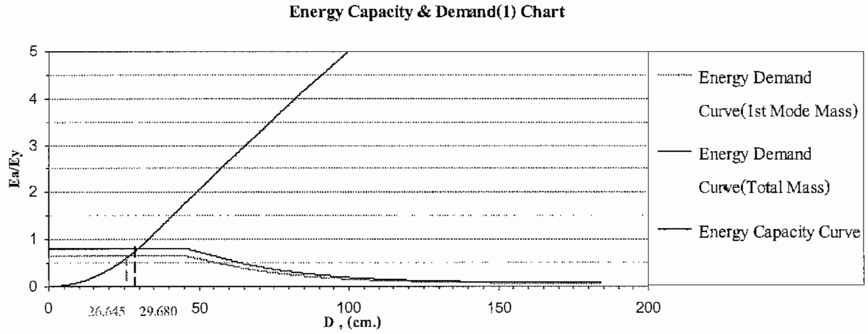
ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา (อาคาร 9 ชั้น) ด้วยวิธี Energy-Based Analysis โดยความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ เป็นแบบเชิงเส้น

ลำดับ	แผ่นดินไหว	Energy Balance Point (cm.)	Γ_1	$\emptyset_{roof,1}$	U^*_{roof}(cm.)	หมายเหตุ (มวล)
1	Elcentro 1 (1.15 Elcentro)	26.645	0.16848	8.18003	36.721	มวลโหมดแรก
		29.680	0.16848	8.18003	40.904	มวลทั้งหมด
2	Elcentro 2 (3.08 Elcentro)	51.572	0.16848	8.18003	71.074	มวลโหมดแรก
		55.659	0.16848	8.18003	76.708	มวลทั้งหมด
3	Elcentro 3 (4.36 Elcentro)	65.946	0.16848	8.18003	90.884	มวลโหมดแรก
		71.730	0.16848	8.18003	98.857	มวลทั้งหมด
4	Elcentro 4 (5.62 Elcentro)	80.096	0.16848	8.18003	110.386	มวลโหมดแรก
		87.551	0.16848	8.18003	120.660	มวลทั้งหมด
5	Elcentro 5 (8.35 Elcentro)	110.752	0.16848	8.18003	152.634	มวลโหมดแรก
		121.828	0.16848	8.18003	167.902	มวลทั้งหมด

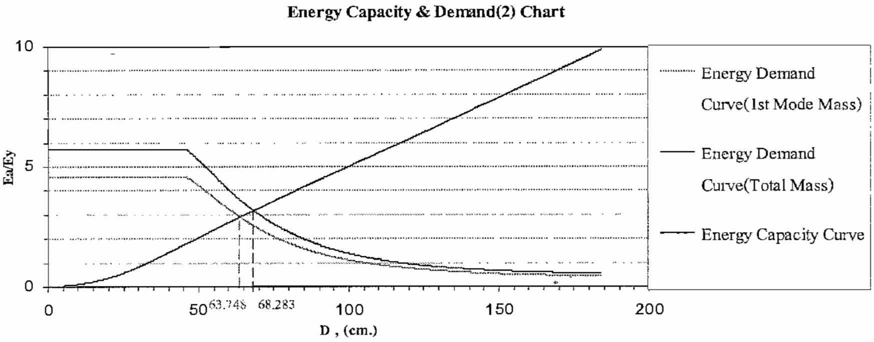
จากค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของชั้นหลังคาของอาคารเหล็ก 9 ชั้นที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวสำหรับกรณีที่ใช้มวลของโหมดแรกซึ่งมีค่าเท่ากับ 36.721, 71.074, 90.884, 110.386 และ 152.634 เซนติเมตรและสำหรับกรณีที่ใช้มวลทั้งหมดซึ่งมีค่าเท่ากับ 40.904, 76.708, 98.857, 120.660 และ 167.902 เซนติเมตรจะนำไปคำนวณหาค่าต่างๆเป็น ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด, ค่า Story drift สูงสุด และค่า Rotation ductility สูงสุด ของแต่ละชั้นซึ่งจะนำเสนอต่อไปในบทที่ 5 หัวข้อ 5.2.2 ในตารางที่ 5.22 ถึง 5.25 ต่อไป

ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis สำหรับอาคาร 9 ชั้นกรณีที่ใช้มวลของโหมดแรกในการวิเคราะห์จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้นอีกสามวิธี และวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น ซึ่งจะนำเสนอต่อไปในบทที่ 5 หัวข้อ 5.1.2 ในตารางที่ 5.8 ถึง 5.11 ต่อไป

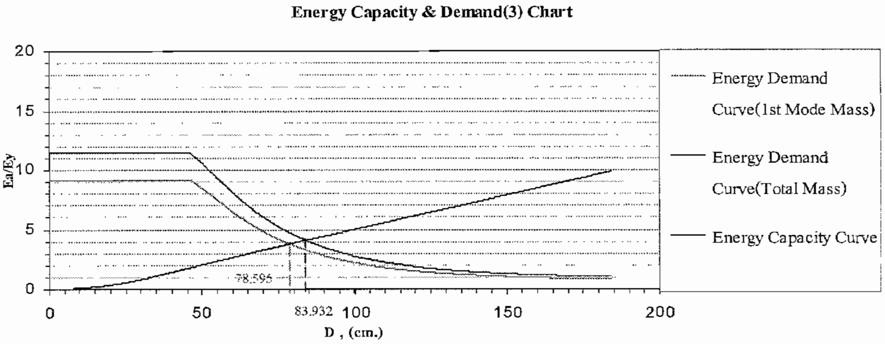
กราฟรวมระหว่าง Energy Capacity และ Energy Demand ที่ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ เป็นแบบไม่เชิงเส้น ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวสำหรับอาคาร9 ชั้นแสดงตามรูปที่ 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 และ 4.24



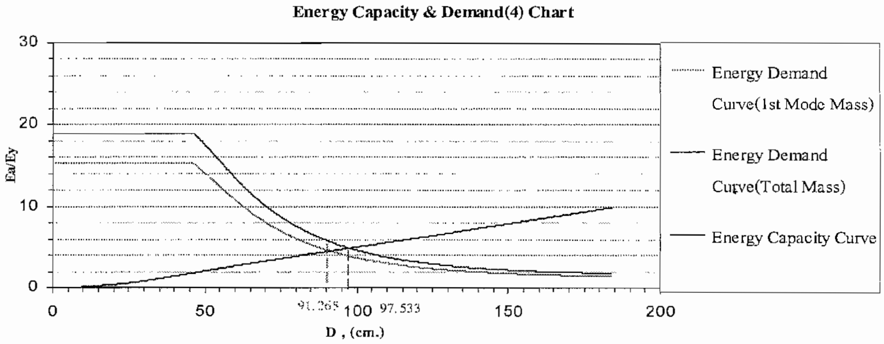
รูปที่ 4.20 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Nonlinear R & μ) สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 1.15 Elcentro



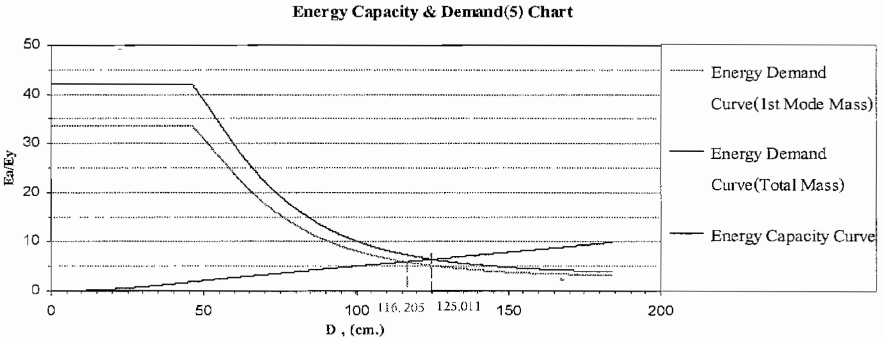
รูปที่ 4.21 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Nonlinear R & μ) สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 3.08 Elcentro



รูปที่ 4.22 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Nonlinear R & μ) สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 4.36 Elcentro



รูปที่ 4.23 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Nonlinear R & μ) สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 5.62 Elcentro



รูปที่ 4.24 กราฟ Energy Capacity และ Energy Demand (Nonlinear R & μ) สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรง 8.35 Elcentro

ค่าการเคลื่อนตัวของระบบเสมือน SDOF ที่จุดตัดระหว่าง Energy Demand กับ Capacity Curve ที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์โดยพิจารณามวลของโหมดแรกมีค่าเท่ากับ 26.645, 63.748, 78.595, 91.265 และ 116.205 เซนติเมตร และสำหรับการวิเคราะห์โดยใช้มวลทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 29.680, 68.283, 83.932, 97.533 และ 125.011 เซนติเมตร ตามลำดับ

ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคาจากค่าการเคลื่อนตัวของระบบเสมือน SDOF ของอาคารเหล็ก 9 ชั้น ที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวแสดงสรุปไว้ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา (อาคาร 9 ชั้น) ด้วยวิธี Energy-Based Analysis โดยความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ เป็นแบบไม่เชิงเส้น

ลำดับ	แผ่นดินไหว	Energy Balance Point (cm.)	Γ_1	$\varnothing_{roof,1}$	U_{roof} (cm.)	หมายเหตุ (มวล)
1	Elcentro 1 (1.15 Elcentro)	26.645	0.16848	8.18003	36.721	มวลโหมดแรก
		29.680	0.16848	8.18003	40.904	มวลทั้งหมด
2	Elcentro 2 (3.08 Elcentro)	63.748	0.16848	8.18003	87.857	มวลโหมดแรก
		68.283	0.16848	8.18003	94.105	มวลทั้งหมด
3	Elcentro 3 (4.36 Elcentro)	78.595	0.16848	8.18003	108.318	มวลโหมดแรก
		83.932	0.16848	8.18003	115.672	มวลทั้งหมด
4	Elcentro 4 (5.62 Elcentro)	91.265	0.16848	8.18003	125.778	มวลโหมดแรก
		97.533	0.16848	8.18003	134.418	มวลทั้งหมด
5	Elcentro 5 (8.35 Elcentro)	116.205	0.16848	8.18003	160.150	มวลโหมดแรก
		125.011	0.16848	8.18003	172.287	มวลทั้งหมด

จากค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดของชั้นหลังคาของอาคารเหล็ก 9 ชั้นที่ทั้งห้าระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวสำหรับกรณีที่ใช้มวลของโหมดแรกซึ่งมีค่าเท่ากับ 36.721, 87.857, 108.318, 125.778 และ 160.150 เซนติเมตรและสำหรับกรณีที่ใช้มวลทั้งหมดซึ่งมีค่าเท่ากับ 40.904, 94.105, 115.672, 134.418 และ 172.287 เซนติเมตรจะนำไปคำนวณหาค่าต่างๆเป็น ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด, ค่า Story drift สูงสุด และค่า Rotation ductility สูงสุด ของแต่ละชั้นซึ่งจะนำเสนอต่อไปในบทที่5 หัวข้อ5.2.2 ในตารางที่ 5.22 ถึง 5.25 ต่อไป

บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบ

5.1 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static Analysis) กับวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Dynamic Analysis)

ในบทนี้จะนำผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น(NSA)ทั้งสี่วิธีมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น(NDA)ซึ่งเป็นวิธีที่ถูกต้องที่สุดเพื่อหาข้อดีและข้อเสียรวมทั้งความถูกต้องแม่นยำของวิธีสถิตไม่เชิงเส้นทั้งสี่วิธี โดยในบทนี้จะทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่สำคัญคือ

5.1.1 การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง(Floor Displacement) , Story Drift และ Rotation Ductility ของอาคาร 3 ชั้น

การเปรียบเทียบผลค่าต่างๆจากการวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 3 ชั้นคือ การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Floor Displacement)ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 และ 5.2 การเปรียบเทียบค่า Story Drift ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.3 ส่วนการเปรียบเทียบค่า Rotation Ductility ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบผลค่าต่างๆจากการวิเคราะห์อาคาร 3 ชั้น ยังได้แสดงในรูปของกราฟแสดงการเปรียบเทียบผล โดยเส้นกราฟของแต่ละวิธีจะใช้ชื่อย่อคือ วิธี Nonlinear Dynamic Analysis (NDA) , วิธี Displacement Coefficient (FEMA) , วิธี Capacity Spectrum (ATC) , วิธี Energy Based Analysis (Energy) และวิธี Modal Pushover Analysis (MPA) ดังรูปที่ 5.1

สำหรับวิธี Energy Based Analysis จะใช้ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ เป็นแบบเชิงเส้นโดยใช้มวลประสิทธิผลของโหมดแรกในการวิเคราะห์เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นและวิธีสถิตไม่เชิงเส้นอีกสามวิธี

ความแตกต่างระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น (NSA) กับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (NDA) สำหรับอาคาร 3 ชั้น ยังได้แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างดังแสดงในตารางที่ 5.5 ความแตกต่างของค่า Story Drift ได้แสดงในตารางที่ 5.6 ส่วนความแตกต่างของค่า Rotation Ductility ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด(Peak Floor Displacement)ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA (อาคาร 3 ชั้น)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA) Peak Disp. (cm.)	Nonlinear Static Analysis (NSA)							
				Displacement Coefficient		Capacity Spectrum		Energy-Based Analysis		Modal Pushover Analysis	
				Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)
1	Elcentro 1 (0.88 Elcentro)	3rd	**12.027**	**11.702**	**-2.70**	**11.689**	**-2.81**	**11.702**	**-2.70**	**11.725**	**-2.51**
		2nd	7.610	7.788	2.34	7.780	2.24	7.788	2.34	7.827	2.85
		1st	3.150	3.305	4.92	3.299	4.76	3.305	4.92	3.409	8.24
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
2	Elcentro 2 (2.19 Elcentro)	3rd	**23.744**	**29.144**	**22.74**	**16.962**	**-28.56**	**28.575**	**20.35**	**23.818**	**0.31**
		2nd	15.311	19.469	27.16	11.402	-25.53	19.093	24.70	16.024	4.66
		1st	6.401	8.613	34.56	4.727	-26.15	8.428	31.67	7.170	12.02
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
3	Elcentro 3 (3.05 Elcentro)	3rd	**36.098**	**42.596**	**18.00**	**20.249**	**-43.91**	**39.553**	**9.57**	**36.553**	**1.26**
		2nd	23.040	28.372	23.14	13.592	-41.01	26.353	14.38	24.454	6.14
		1st	10.089	12.995	28.80	5.730	-43.20	11.996	18.91	11.348	12.48
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
4	Elcentro 4 (3.72 Elcentro)	3rd	**47.638**	**54.442**	**14.28**	**22.972**	**-51.78**	**48.133**	**1.04**	**46.937**	**-1.47**
		2nd	31.135	36.231	16.36	15.390	-50.57	32.045	2.92	31.323	0.60
		1st	14.054	16.876	20.08	6.612	-52.95	14.808	5.37	14.718	4.73
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
5	Elcentro 5 (4.38 Elcentro)	3rd	**59.416**	**67.000**	**12.77**	**28.534**	**-51.98**	**56.556**	**-4.81**	**57.398**	**-3.40**
		2nd	39.855	44.559	11.80	19.065	-52.16	37.633	-5.58	38.242	-4.05
		1st	18.448	20.993	13.80	8.415	-54.39	17.569	-4.76	18.117	-1.79
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด(Peak Floor Displacement/Height)ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA (อาคาร 3 ชั้น)

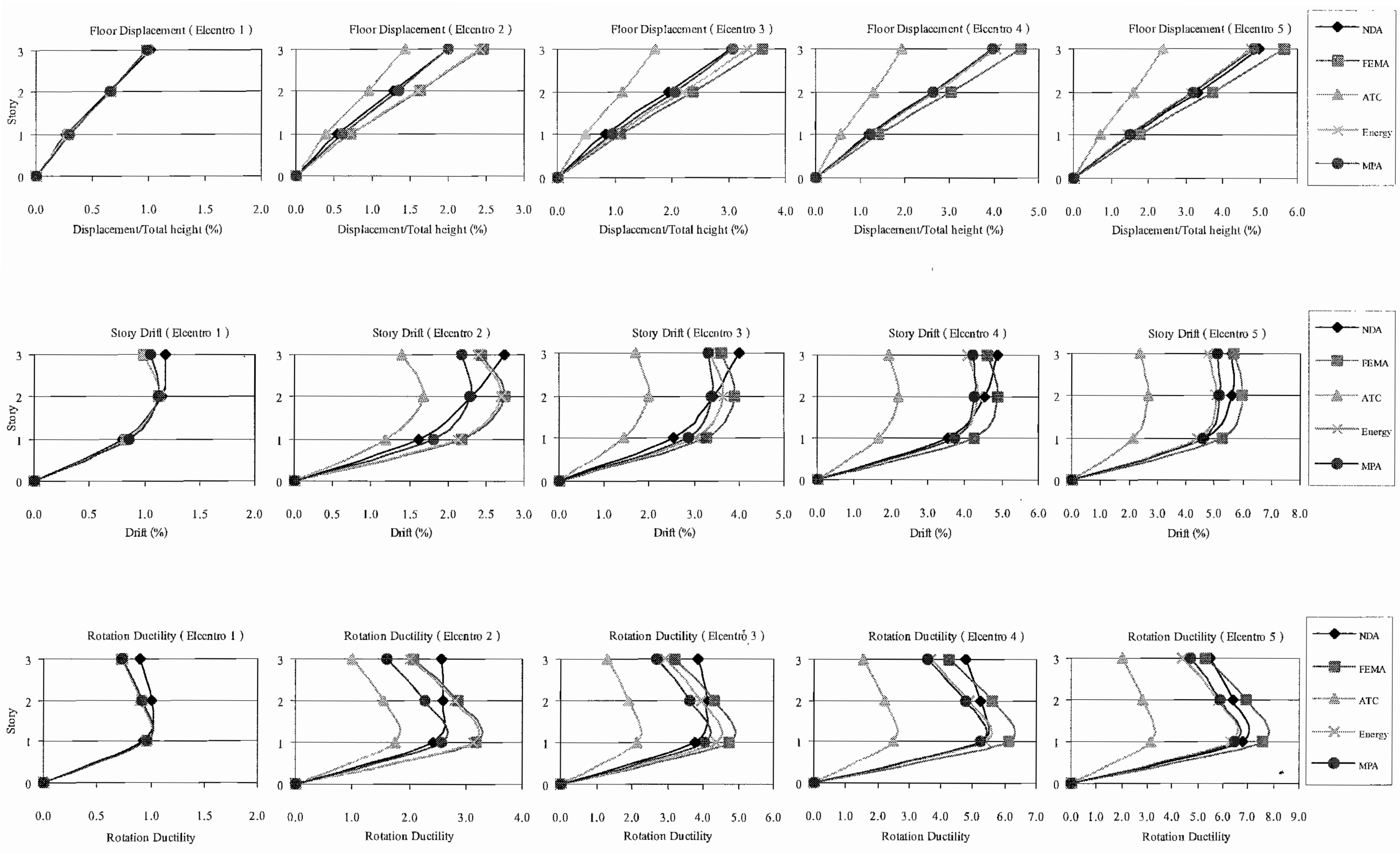
No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA)	Nonlinear Static Analysis (NSA)							
				Displacement Coefficient		Capacity Spectrum		Energy-Based Analysis		Modal Pushover Analysis	
			Peak Disp/Height (%)	Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)
1	**Elcentro 1** (0.88 Elcentro)	**3rd**	**1.01**	**0.984**	**-2.70**	**0.983**	**-2.81**	**0.984**	**-2.70**	**0.986**	**-2.51**
		2nd	0.64	0.655	2.34	0.654	2.24	0.655	2.34	0.658	2.85
		1st	0.26	0.278	4.92	0.278	4.76	0.278	4.92	0.287	8.24
		G	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
2	**Elcentro 2** (2.19 Elcentro)	**3rd**	**2.00**	**2.452**	**22.74**	**1.427**	**-28.56**	**2.404**	**20.35**	**2.004**	**0.31**
		2nd	1.29	1.638	27.16	0.959	-25.53	1.606	24.70	1.348	4.66
		1st	0.54	0.725	34.56	0.398	-26.15	0.709	31.67	0.603	12.02
		G	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
3	**Elcentro 3** (3.05 Elcentro)	**3rd**	**3.04**	**3.583**	**18.00**	**1.703**	**-43.91**	**3.327**	**9.57**	**3.075**	**1.26**
		2nd	1.94	2.387	23.14	1.143	-41.01	2.217	14.38	2.057	6.14
		1st	0.85	1.093	28.80	0.482	-43.20	1.009	18.91	0.955	12.48
		G	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
4	**Elcentro 4** (3.72 Elcentro)	**3rd**	**4.01**	**4.580**	**14.28**	**1.932**	**-51.78**	**4.049**	**1.04**	**3.949**	**-1.47**
		2nd	2.62	3.048	16.36	1.295	-50.57	2.696	2.92	2.635	0.60
		1st	1.18	1.420	20.08	0.556	-52.95	1.246	5.37	1.238	4.73
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
5	**Elcentro 5** (4.38 Elcentro)	**3rd**	**5.00**	**5.636**	**12.77**	**2.400**	**-51.98**	**4.758**	**-4.81**	**4.829**	**-3.40**
		2nd	3.35	3.749	11.80	1.604	-52.16	3.166	-5.58	3.217	-4.05
		1st	1.55	1.766	13.80	0.708	-54.39	1.478	-4.76	1.524	-1.79
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบผล Peak Story Drift ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA (อาคาร 3 ชั้น)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA)	Nonlinear Static Analysis (NSA)							
				Displacement Coefficient		Capacity Spectrum		Energy-Based Analysis		Modal Pushover Analysis	
			Peak Story Drift (%)	Drift (%)	Error (%)	Drift (%)	Error (%)	Drift (%)	Error (%)	Drift (%)	Error (%)
1	**Elcentro 1** (0.88 Elcentro)	3rd	**1.19**	**0.99**	**-16.78**	**0.99**	**-16.89**	**0.99**	**-16.78**	**1.05**	**-11.49**
		2nd	1.16	1.13	-2.80	1.13	-2.85	1.13	-2.80	1.13	-2.59
		1st	0.80	0.83	4.90	0.83	4.74	0.83	4.90	0.86	8.22
		G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	**Elcentro 2** (2.19 Elcentro)	3rd	**2.74**	**2.44**	**-10.86**	**1.40**	**-48.77**	**2.39**	**-12.63**	**2.17**	**-20.78**
		2nd	2.30	2.74	19.17	1.68	-26.72	2.69	17.08	2.29	-0.39
		1st	1.62	2.17	34.60	1.19	-26.13	2.13	31.70	1.81	12.04
		G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	**Elcentro 3** (3.05 Elcentro)	3rd	**4.01**	**3.59**	**-10.39**	**1.68**	**-58.06**	**3.33**	**-16.84**	**3.30**	**-17.50**
		2nd	3.43	3.88	13.08	1.98	-42.19	3.62	5.57	3.37	-1.72
		1st	2.55	3.28	28.81	1.45	-43.20	3.03	18.91	2.86	12.49
		G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	**Elcentro 4** (3.72 Elcentro)	3rd	**4.89**	**4.60**	**-5.91**	**1.91**	**-60.83**	**4.06**	**-16.88**	**4.91**	**-14.18**
		2nd	4.52	4.88	8.19	2.22	-50.93	4.35	-3.65	4.25	-5.79
		1st	3.55	4.26	20.07	1.67	-52.96	3.74	5.36	3.71	4.72
		G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	**Elcentro 5** (4.38 Elcentro)	3rd	**5.63**	**5.66**	**0.59**	**2.39**	**-57.55**	**4.78**	**-15.18**	**5.08**	**-9.78**
		2nd	5.60	5.95	6.22	2.69	-51.99	5.06	-9.56	5.14	-8.20
		1st	4.66	5.30	13.79	2.12	-54.39	4.43	-4.77	4.57	-1.80
		G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบผล Peak Rotation Ductility ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA (อาคาร 3 ชั้น)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA)		Nonlinear Static Analysis (NSA)											
					Displacement Coefficient			Capacity Spectrum			Energy-Based Analysis			Modal Pushover Analysis		
			Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)
1	**Elcentro 1** (0.88 Elcentro)	3rd	0.008795	0.905	0.007113	0.732	-19.12	0.007105	0.731	-19.22	0.007113	0.732	-19.12	0.007120	0.733	-19.04
		2nd	0.007718	1.002	0.006986	0.907	-9.48	0.006979	0.906	-9.58	0.006986	0.907	-9.48	0.006990	0.908	-9.43
		1st	0.006569	0.930	0.006776	0.960	3.15	0.006769	0.959	3.04	0.006776	0.960	3.15	0.006779	0.960	3.20
		G	0	0	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00
2	**Elcentro 2** (2.19 Elcentro)	3rd	0.024958	2.569	0.020172	2.077	-19.18	0.009714	1.000	-61.08	0.019514	2.009	-21.81	0.015495	1.595	-37.91
		2nd	0.020092	2.609	0.022141	2.875	10.20	0.011941	1.551	-40.57	0.021501	2.792	7.01	0.017541	2.278	-12.70
		1st	0.017206	2.437	0.022433	3.177	30.38	0.012321	1.745	-28.39	0.022060	3.125	28.21	0.018115	2.566	5.28
		G	0	0	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00
3	**Elcentro 3** (3.05 Elcentro)	3rd	0.037708	3.882	0.031369	3.229	-16.81	0.012742	1.312	-66.21	0.028614	2.946	-24.12	0.026117	2.689	-30.74
		2nd	0.031438	4.082	0.033285	4.322	5.88	0.014751	1.915	-53.08	0.030601	3.974	-2.66	0.028106	3.650	-10.60
		1st	0.026670	3.778	0.033383	4.728	25.17	0.015206	2.154	-42.98	0.030960	4.385	16.09	0.028452	4.030	6.68
		G	0	0	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00
4	**Elcentro 4** (3.72 Elcentro)	3rd	0.046240	4.760	0.041190	4.240	-10.92	0.015016	1.546	-67.53	0.035714	3.677	-22.76	0.034705	3.573	-24.95
		2nd	0.040357	5.240	0.043065	5.592	6.71	0.017013	2.209	-57.84	0.037701	4.896	-6.58	0.036663	4.761	-9.15
		1st	0.036922	5.230	0.043047	6.097	16.59	0.017418	2.467	-52.82	0.037960	5.377	2.81	0.036918	5.229	-0.01
		G	0	0	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00
5	**Elcentro 5** (4.38 Elcentro)	3rd	0.052956	5.452	0.051600	5.312	-2.56	0.019663	2.024	-62.87	0.042714	4.397	-19.34	0.045713	4.706	-13.68
		2nd	0.049072	6.372	0.053434	6.939	8.89	0.021634	2.809	-55.91	0.044701	5.805	-8.91	0.045282	5.880	-7.72
		1st	0.047874	6.781	0.053291	7.548	11.32	0.021938	3.107	-54.18	0.044860	6.354	-6.30	0.045447	6.437	-5.07
		G	0	0	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA (อาคาร 3 ชั้น)

ตารางที่ 5.5 ความแตกต่างของค่า Floor Displacement ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี NSA กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 3 ชั้น

Earthquake	**Floor Displacement**				
	Displacement Coefficient	**Capacity Spectrum**	**Energy Based Analysis**	**Modal Pushover Analysis**	
				1 Mode	**3 Mode**
Elcentro 1	**2 - 5 (3.3 %)**	**2 - 5 (3.3 %)**	**2 – 5 (3.3 %)**	**2 - 5 (3.3 %)**	**2 - 8 (4.5 %)**
Elcentro 2 - 5	**12 - 35 (20.3 %)**	**25 - 55 (43.5 %)**	**1 – 32 (12.0 %)**	**0 - 9 (3.5 %)**	**0 - 12 (4.4 %)**

ตารางที่ 5.6 ความแตกต่างของค่า Story Drift ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี NSA กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 3 ชั้น

Earthquake	**Story Drift**				
	Displacement Coefficient	**Capacity Spectrum**	**Energy Based Analysis**	**Modal Pushover Analysis**	
				1 Mode	**3 Mode**
Elcentro 1	**2 - 17 (8.2 %)**	**2 - 17 (8.2 %)**	**2 – 17 (8.2 %)**	**2 - 17 (8.2 %)**	**2 - 12 (7.4 %)**
Elcentro 2 - 5	**1 - 35 (14.3 %)**	**26 - 61 (47.8 %)**	**3 – 32 (13.2 %)**	**0 - 28 (10.3 %)**	**0 - 21 (9.1 %)**

ตารางที่ 5.7 ความแตกต่างของค่า Rotation Ductility ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี NSA กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 3 ชั้น

Earthquake	Rotation Ductility				
	Displacement Coefficient	Capacity Spectrum	Energy Based Analysis	Modal Pushover Analysis	
				1 Mode	3 Mode
Elcentro 1	3 - 19 (10.6 %)	3 - 19 (10.6 %)	3 – 19 (10.6 %)	3 - 19 (10.6 %)	3 - 19 (10.6 %)
Elcentro 2 - 5	2 - 30 (13.7 %)	28 - 68 (53.6 %)	2 – 28 (13.9 %)	0 - 38 (14.1 %)	0 - 38 (13.7 %)

จากผลการเปรียบเทียบค่าต่างๆจากการวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 3 ชั้นด้วยวิธี NSA ทั้ง 4 วิธีจะสังเกตุได้ว่า

การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างอาคารเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวElcentro1 มีค่าใกล้เคียงกันมากทั้งสี่วิธี และยังใกล้เคียงกับวิธีNDA โดยมีความแตกต่างกับวิธีNDA อยู่ในช่วง 2-8 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 3.6 เปอร์เซ็นต์)

การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างอาคารเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว Elcentro2 ถึง Elcentro5 มีค่าแตกต่างกับวิธีNDA ดังนี้คือ วิธีCapacity Spectrum ให้ค่าต่ำที่สุดและต่ำกว่าวิธีNDA ประมาณ 25-55 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 43.5 เปอร์เซ็นต์) วิธีDisplacement Coefficient ให้ค่าสูงที่สุดและสูงกว่าวิธีNDA ประมาณ 12-35 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 20.3 เปอร์เซ็นต์) วิธีEnergy Based Analysis ให้ค่าแตกต่างกับวิธีNDA ประมาณ 1-32 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 12.0 เปอร์เซ็นต์) วิธี Modal Pushover Analysis ให้ค่าใกล้เคียงกับวิธี NDA มากที่สุดโดยให้ค่าแตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-12 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 4.4 เปอร์เซ็นต์)

สำหรับวิธี Modal Pushover Analysis นั้นเมื่อพิจารณาเฉพาะผลของโหมดแรกเพียงโหมดเดียวแล้วให้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างแตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-9 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 3.5 เปอร์เซ็นต์)

ค่าStory Drift และค่า Rotation Ductility เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวElcentro1 มีค่าใกล้เคียงกันมากทั้งสี่วิธี โดยมีค่า Story Drift แตกต่างกับวิธีNDA อยู่ในช่วง 2-17 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 8.0 เปอร์เซ็นต์)และมีค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธีNDA อยู่ในช่วง 3-19 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 10.6 เปอร์เซ็นต์)

ค่า Story Drift และค่า Rotation Ductility เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว Elcentro2 ถึง Elcentro5 มีค่าแตกต่างกับวิธีNDA ดังนี้คือ วิธีCapacity Spectrum ให้ค่าต่ำที่สุดโดยค่า Story Drift ต่ำกว่าวิธีNDA ประมาณ 26-61 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 47.8 เปอร์เซ็นต์)และค่า Rotation Ductility ต่ำกว่าวิธีNDA ประมาณ 28-68 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 53.6 เปอร์เซ็นต์) วิธี Displacement Coefficient ให้ค่าสูงที่สุดโดยค่า Story Drift แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 1-35 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 14.3 เปอร์เซ็นต์)และค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 2-30 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 13.7 เปอร์เซ็นต์) วิธี Energy Based Analysis ให้ค่า Story Drift แตกต่างกับวิธีNDA ประมาณ 3-32 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 13.2 เปอร์เซ็นต์)และค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 2-28 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ย 13.9 เปอร์เซ็นต์) วิธี Modal Pushover Analysis ให้ค่าใกล้เคียงกับวิธี NDA มากที่สุดโดยค่า Story Drift แตกต่างกับวิธีNDA ประมาณ 0-21 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 9.1 เปอร์เซ็นต์)และค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-38 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 13.7 เปอร์เซ็นต์)

สำหรับวิธี Modal Pushover Analysis นั้นเมื่อพิจารณาเฉพาะผลของโหมดแรกเพียงโหมดเดียวแล้ว มีค่า Story Drift แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-28 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 10.3 เปอร์เซ็นต์) และค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-38 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 14.1 เปอร์เซ็นต์)

5.1.2 การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง(Floor Displacement) , Story Drift และ Rotation Ductility ของอาคาร 9 ชั้น

การเปรียบเทียบผลค่าต่างๆจากการวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 9 ชั้นคือ การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง(Floor Displacement)ได้แสดงไว้ในตารางที่5.8 และ5.9 การเปรียบเทียบค่า Story Drift ได้แสดงไว้ในตารางที่5.10 ส่วนการเปรียบเทียบค่า Rotation Ductility ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.11

การเปรียบเทียบผลค่าต่างๆจากการวิเคราะห์อาคาร 9 ชั้นยังได้แสดงในรูปของกราฟแสดงการเปรียบเทียบผล โดยเส้นกราฟของแต่ละวิธีจะใช้ชื่อย่อคือ วิธี Nonlinear Dynamic Analysis(NDA) , วิธี Displacement Coefficient (FEMA) , วิธี Capacity Spectrum (ATC) , วิธี Energy Based Analysis(Energy) และวิธี Modal Pushover Analysis(MPA) ดังรูปที่ 5.2

สำหรับวิธี Energy Based Analysis จะใช้ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ เป็นแบบเชิงเส้นโดยใช้มวลประสิทธิผลของของโหมดแรกในการวิเคราะห์เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นและวิธีสถิตไม่เชิงเส้นอีกสามวิธี

ความแตกต่างระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น (NSA) กับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (NDA) สำหรับอาคาร 9 ชั้นยังได้แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างดังแสดงในตารางที่ 5.12 ความแตกต่างของค่า Story Drift ได้แสดงในตารางที่ 5.13 ส่วนความแตกต่างของค่า Rotation Ductility ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.8 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด(Peak Floor Displacement)ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA (อาคาร 9 ชั้น)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA)	Nonlinear Static Analysis (NSA)							
				Displacement Coefficient		**Capacity Spectrum**		**Energy-Based Analysis**		**Modal Pushover Analysis**	
			Peak Disp. (cm.)	Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)
1	**Elcentro 1** (1.15 Elcentro)	**9th**	**37.186**	**35.964**	**-3.29**	**38.613**	**3.84**	**36.721**	**-1.25**	**36.566**	**-1.67**
		8th	33.833	32.923	-2.69	35.387	4.59	33.625	-0.62	33.078	-2.23
		7th	30.353	29.286	-3.51	31.526	3.87	29.921	-1.42	29.324	-3.39
		6th	27.813	25.395	-8.69	27.394	-1.51	25.956	-6.68	25.613	-7.91
		5th	25.260	21.384	-15.34	23.122	-8.47	21.869	-13.42	21.875	-13.40
		4th	21.788	17.153	-21.28	18.578	-14.74	17.551	-19.45	17.908	-17.81
		3rd	17.104	12.769	-25.35	13.774	-19.47	13.051	-23.70	13.660	-20.14
		2nd	11.643	8.486	-27.12	9.083	-21.99	8.656	-25.65	9.317	-19.98
		1st	6.025	4.422	-26.60	4.712	-21.80	4.506	-25.21	4.950	-17.83
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
2	**Elcentro 2** (3.08 Elcentro)	**9th**	**74.295**	**96.324**	**29.65**	**62.888**	**-15.35**	**71.074**	**-4.34**	**92.214**	**24.12**
		8th	68.732	90.566	31.77	58.910	-14.29	66.812	-2.79	85.859	24.92
		7th	62.865	82.880	31.84	53.985	-14.13	61.349	-2.41	78.433	24.76
		6th	56.185	73.439	30.71	48.326	-13.99	54.834	-2.41	69.873	24.36
		5th	48.158	61.813	28.35	41.468	-13.89	46.827	-2.76	59.324	23.19
		4th	38.913	48.324	24.18	33.134	-14.85	37.181	-4.45	46.978	20.73
		3rd	29.947	34.033	13.65	23.863	-20.31	26.591	-11.20	33.752	12.71
		2nd	19.985	20.617	3.16	14.887	-25.51	16.431	-17.78	21.109	5.62
		1st	9.868	9.502	-3.71	7.168	-27.36	7.798	-20.98	10.154	2.90
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

ตารางที่ 5.8 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด(Peak Floor Displacement)ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA (อาคาร 9 ชั้น) (ต่อ)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA) Peak Disp. (cm.)	Nonlinear Static Analysis (NSA)							
				Displacement Coefficient		Capacity Spectrum		Energy-Based Analysis		Modal Pushover Analysis	
				Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)
3	**Elcentro 3** (4.36 Elcentro)	**9th**	**111.481**	**143.172**	**28.43**	**80.216**	**-28.05**	**90.884**	**-18.48**	**113.451**	**1.77**
		8th	101.727	132.184	29.94	75.547	-25.74	85.514	-15.94	105.321	3.53
		7th	91.186	118.623	30.09	69.416	-23.87	78.384	-14.04	95.679	4.93
		6th	80.315	102.903	28.12	61.928	-22.89	69.629	-13.30	84.457	5.16
		5th	68.555	84.747	23.62	52.644	-23.21	58.796	-14.23	70.805	3.28
		4th	54.686	64.958	18.78	41.565	-23.99	46.111	-15.68	55.381	1.27
		3rd	39.091	44.973	15.05	29.550	-24.41	32.570	-16.68	39.379	0.74
		2nd	23.919	26.736	11.78	18.110	-24.29	19.802	-17.21	24.389	1.96
		1st	11.100	12.019	8.28	8.486	-23.55	9.172	-17.37	11.600	4.51
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
4	**Elcentro 4** (5.62 Elcentro)	**9th**	**146.507**	**193.337**	**31.96**	**100.818**	**-31.19**	**110.386**	**-24.65**	**165.458**	**12.94**
		8th	128.473	175.334	36.47	94.737	-26.26	103.596	-19.36	150.000	16.76
		7th	111.709	154.777	38.55	86.591	-22.49	94.460	-15.44	133.014	19.07
		6th	95.529	132.232	38.42	76.586	-19.83	83.243	-12.86	114.658	20.02
		5th	78.969	107.518	36.15	64.303	-18.57	69.566	-11.91	94.102	19.16
		4th	62.586	81.608	30.39	50.150	-19.87	54.008	-13.71	72.200	15.36
		3rd	44.272	56.157	26.84	35.240	-20.40	37.788	-14.65	50.447	13.95
		2nd	26.772	33.241	24.17	21.293	-20.46	22.713	-15.16	30.632	14.42
		1st	12.278	14.859	21.02	9.774	-20.40	10.348	-15.72	14.252	16.07
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

ตารางที่ 5.8 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด(Peak Floor Displacement)ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA (อาคาร 9 ชั้น) (ต่อ)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA) Peak Disp. (cm.)	Nonlinear Static Analysis (NSA)							
				Displacement Coefficient		**Capacity Spectrum**		**Energy-Based Analysis**		**Modal Pushover Analysis**	
				Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)
5	**Elcentro 5** (8.35 Elcentro)	**9th**	**185.877**	**300.309**	**61.56**	**145.679**	**-21.63**	**152.634**	**-17.88**	**138.593**	**-25.44**
		8th	156.743	267.673	70.77	134.333	-14.30	140.299	-10.49	125.395	-20.00
		7th	126.771	232.496	83.40	120.416	-5.01	125.397	-1.08	111.669	-11.91
		6th	111.760	195.616	75.03	104.351	-6.63	108.372	-3.03	97.277	-12.96
		5th	96.114	156.980	63.33	85.865	-10.66	88.969	-7.43	80.749	-15.99
		4th	76.378	117.912	54.38	65.768	-13.89	68.024	-10.94	62.626	-18.00
		3rd	54.153	80.482	48.62	45.512	-15.96	47.015	-13.18	44.235	-18.31
		2nd	33.553	47.051	40.23	27.046	-19.39	27.917	-16.80	27.228	-18.85
		1st	16.398	20.625	25.77	12.156	-25.87	12.543	-23.51	12.866	-21.54
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

ตารางที่ 5.9 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด(Peak Floor Displacement/Height)ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA (อาคาร 9 ชั้น)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA)	Nonlinear Static Analysis (NSA)							
				Displacement Coefficient		Capacity Spectrum		Energy-Based Analysis		Modal Pushover Analysis	
			Peak Disp/Height (%)	Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)
1	**Elcentro 1** (1.15 Elcentro)	9th	**1.00**	**0.967**	**-3.29**	**1.038**	**3.84**	**0.988**	**-1.25**	**0.983**	**-1.67**
		8th	0.91	0.885	-2.69	0.952	4.59	0.904	-0.62	0.890	-2.23
		7th	0.82	0.788	-3.51	0.848	3.87	0.805	-1.42	0.789	-3.39
		6th	0.75	0.683	-8.69	0.737	-1.51	0.698	-6.68	0.689	-7.91
		5th	0.68	0.575	-15.34	0.622	-8.47	0.588	-13.42	0.588	-13.40
		4th	0.59	0.461	-21.28	0.500	-14.74	0.472	-19.45	0.482	-17.81
		3rd	0.46	0.343	-25.35	0.370	-19.47	0.351	-23.70	0.367	-20.14
		2nd	0.31	0.228	-27.12	0.244	-21.99	0.233	-25.65	0.251	-19.98
		1st	0.16	0.119	-26.60	0.127	-21.80	0.121	-25.21	0.133	-17.83
		G	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
2	**Elcentro 2** (3.08 Elcentro)	9th	**2.00**	**2.590**	**29.65**	**1.691**	**-15.35**	**1.911**	**-4.34**	**2.480**	**24.12**
		8th	1.85	2.436	31.77	1.584	-14.29	1.797	-2.79	2.309	24.92
		7th	1.69	2.229	31.84	1.452	-14.13	1.650	-2.41	2.109	24.76
		6th	1.51	1.975	30.71	1.300	-13.99	1.475	-2.41	1.879	24.36
		5th	1.30	1.662	28.35	1.115	-13.89	1.259	-2.76	1.595	23.19
		4th	1.05	1.300	24.18	0.891	-14.85	1.000	-4.45	1.263	20.73
		3rd	0.81	0.915	13.65	0.642	-20.31	0.715	-11.20	0.908	12.71
		2nd	0.54	0.554	3.16	0.400	-25.51	0.442	-17.78	0.568	5.62
		1st	0.27	0.256	-3.71	0.193	-27.36	0.210	-20.98	0.273	2.90
		G	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

ตารางที่ 5.9 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด(Peak Floor Displacement/Height)ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA (อาคาร 9 ชั้น) (ต่อ)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA) Peak Disp/Height (%)	Nonlinear Static Analysis (NSA)							
				Displacement Coefficient		Capacity Spectrum		Energy-Based Analysis		Modal Pushover Analysis	
				Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)
3	**Elcentro 3** (4.36 Elcentro)	9^{th}	**3.00**	**3.850**	**28.43**	**2.157**	**-28.05**	**2.444**	**-18.48**	**3.051**	**1.77**
		8^{th}	2.74	3.555	29.94	2.032	-25.74	2.300	-15.94	2.832	3.53
		7^{th}	2.45	3.190	30.09	1.867	-23.87	2.108	-14.04	2.573	4.93
		6^{th}	2.16	2.767	28.12	1.665	-22.89	1.872	-13.30	2.271	5.16
		5^{th}	1.84	2.279	23.62	1.416	-23.21	1.581	-14.23	1.904	3.28
		4^{th}	1.47	1.747	18.78	1.118	-23.99	1.240	-15.68	1.489	1.27
		3^{rd}	1.05	1.209	15.05	0.795	-24.41	0.876	-16.68	1.059	0.74
		2^{nd}	0.64	0.719	11.78	0.487	-24.29	0.533	-17.21	0.656	1.96
		1^{st}	0.30	0.323	8.28	0.228	-23.55	0.247	-17.37	0.312	4.51
		G	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
4	**Elcentro 4** (5.62 Elcentro)	9^{th}	**3.94**	**5.199**	**31.96**	**2.711**	**-31.19**	**2.969**	**-24.65**	**4.450**	**12.94**
		8^{th}	3.45	4.715	36.47	2.548	-26.26	2.786	-19.36	4.034	16.76
		7^{th}	3.00	4.162	38.55	2.329	-22.49	2.540	-15.44	3.577	19.07
		6^{th}	2.57	3.556	38.42	2.060	-19.83	2.239	-12.86	3.083	20.02
		5^{th}	2.12	2.891	36.15	1.729	-18.57	1.871	-11.91	2.531	19.16
		4^{th}	1.68	2.195	30.39	1.349	-19.87	1.452	-13.71	1.942	15.36
		3^{rd}	1.19	1.510	26.84	0.948	-20.40	1.016	-14.65	1.357	13.95
		2^{nd}	0.72	0.894	24.17	0.573	-20.46	0.611	-15.16	0.824	14.42
		1^{st}	0.33	0.400	21.02	0.263	-20.40	0.278	-15.72	0.383	16.07
		G	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

ตารางที่ 5.9 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด(Peak Floor Displacement/Height)ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA (อาคาร 9 ชั้น) (ต่อ)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA) Peak Disp/Height (%)	Nonlinear Static Analysis (NSA)							
				Displacement Coefficient		Capacity Spectrum		Energy-Based Analysis		Modal Pushover Analysis	
				Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)
5	Elcentro 5 (8.35 Elcentro)	9th	**5.00**	**8.076**	**61.56**	**3.918**	**-21.63**	**4.105**	**-17.88**	**3.727**	**-25.44**
		8th	4.22	7.198	70.77	3.613	-14.30	3.773	-10.49	3.372	-20.00
		7th	3.41	6.252	83.40	3.238	-5.01	3.372	-1.08	3.003	-11.91
		6th	3.01	5.261	75.03	2.806	-6.63	2.914	-3.03	2.616	-12.96
		5th	2.58	4.222	63.33	2.309	-10.66	2.393	-7.43	2.172	-15.99
		4th	2.05	3.171	54.38	1.769	-13.89	1.829	-10.94	1.684	-18.00
		3rd	1.46	2.164	48.62	1.224	-15.96	1.264	-13.18	1.190	-18.31
		2nd	0.90	1.265	40.23	0.727	-19.39	0.751	-16.80	0.732	-18.85
		1st	0.44	0.555	25.77	0.327	-25.87	0.337	-23.51	0.346	-21.54
		G	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

ตารางที่ 5.10 เปรียบเทียบผล Peak Story Drift ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA (อาคาร 9 ชั้น)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA)	Nonlinear Static Analysis (NSA)							
				Displacement Coefficient		Capacity Spectrum		Energy-Based Analysis		Modal Pushover Analysis	
			Peak Story Drift (%)	Drift (%)	Error (%)	Drift (%)	Error (%)	Drift (%)	Error (%)	Drift (%)	Error (%)
1	Elcentro 1 (1.15 Elcentro)	9^{th}	**1.15**	**0.77**	**-33.39**	**0.81**	**-29.33**	**0.78**	**-32.17**	**1.20**	**4.55**
		8^{th}	1.28	0.92	-28.34	0.97	-23.94	0.93	-27.04	1.28	0.22
		7^{th}	1.28	0.98	-23.40	1.04	-18.65	1.00	-21.95	1.20	-6.60
		6^{th}	1.19	1.01	-14.87	1.08	-9.32	1.03	-13.25	1.11	-7.03
		5^{th}	1.12	1.07	-4.31	1.15	2.76	1.09	-2.35	1.11	-0.60
		4^{th}	1.19	1.11	-6.95	1.21	1.95	1.14	-4.47	1.13	-5.19
		3^{rd}	1.38	1.08	-21.91	1.18	-14.45	1.11	-19.87	1.12	-19.30
		2^{nd}	1.42	1.03	-27.67	1.10	-22.20	1.05	-26.13	1.11	-22.07
		1^{st}	1.10	1.12	1.64	1.19	8.30	1.14	3.90	1.25	-17.81
		G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	Elcentro 2 (3.08 Elcentro)	9^{th}	**2.38**	**1.45**	**-38.94**	**1.00**	**-57.82**	**1.08**	**-54.80**	**2.54**	**6.80**
		8^{th}	2.51	1.94	-22.78	1.24	-50.52	1.38	-45.11	2.70	7.37
		7^{th}	2.48	2.38	-3.96	1.43	-42.43	1.64	-33.73	2.62	5.52
		6^{th}	2.61	2.93	12.63	1.73	-33.56	2.02	-22.44	2.89	10.80
		5^{th}	2.54	3.40	33.98	2.10	-17.23	2.43	-4.19	3.29	29.43
		4^{th}	2.70	3.61	33.37	2.34	-13.47	2.67	-1.17	3.46	27.82
		3^{rd}	2.68	3.39	26.39	2.27	-15.44	2.56	-4.29	3.26	21.67
		2^{nd}	2.55	2.81	9.88	1.95	-23.69	2.18	-14.66	2.79	9.15
		1^{st}	1.80	2.40	33.30	1.81	0.55	1.97	9.39	1.85	2.88
		G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 5.10 เปรียบเทียบผล Peak Story Drift ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA (อาคาร 9 ชั้น) (ต่อ)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA)	Nonlinear Static Analysis (NSA)							
				Displacement Coefficient		Capacity Spectrum		Energy-Based Analysis		Modal Pushover Analysis	
			Peak Story Drift (%)	Drift (%)	Error (%)	Drift (%)	Error (%)	Drift (%)	Error (%)	Drift (%)	Error (%)
3	**Elcentro 3** (4.36 Elcentro)	**9th**	**3.49**	**2.77**	**-20.47**	**1.18**	**-66.21**	**1.36**	**-61.14**	**3.21**	**-7.86**
		8th	3.44	3.42	-0.45	1.55	-54.99	1.80	-47.66	3.37	-2.00
		7th	3.36	3.97	18.25	1.89	-43.67	2.21	-34.14	3.29	-1.84
		6th	3.36	4.58	36.33	2.34	-30.29	2.73	-18.66	3.67	9.32
		5th	3.69	4.99	35.24	2.80	-24.29	3.20	-13.31	4.10	11.08
		4th	4.08	5.04	23.53	3.03	-25.74	3.42	-16.30	4.20	2.80
		3rd	3.94	4.60	16.96	2.89	-26.63	3.22	-18.11	3.88	-1.39
		2nd	3.28	3.71	13.30	2.43	-25.90	2.68	-18.16	3.26	-0.54
		1st	2.02	3.03	49.94	2.14	5.87	2.31	14.42	2.11	4.51
		G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	**Elcentro 4** (5.62 Elcentro)	**9th**	**4.62**	**4.54**	**-1.74**	**1.53**	**-66.81**	**1.71**	**-62.94**	**5.00**	**8.02**
		8th	4.91	5.19	5.77	2.06	-58.09	2.31	-52.99	5.21	6.27
		7th	4.87	5.69	16.95	2.53	-48.10	2.83	-41.81	5.10	4.92
		6th	4.74	6.24	31.59	3.10	-34.60	3.45	-27.17	5.40	13.83
		5th	4.89	6.54	33.70	3.57	-26.97	3.93	-19.72	5.71	16.81
		4th	4.82	6.42	33.23	3.76	-21.95	4.09	-15.09	5.64	16.91
		3rd	4.56	5.78	26.77	3.52	-22.84	3.80	-16.60	5.09	11.67
		2nd	3.71	4.64	24.94	2.91	-21.71	3.12	-15.96	4.17	12.25
		1st	2.24	3.75	67.56	2.47	10.22	2.61	16.69	2.60	16.08
		G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 5.10 เปรียบเทียบผล Peak Story Drift ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA (อาคาร 9 ชั้น) (ต่อ)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA)	Nonlinear Static Analysis (NSA)							
				Displacement Coefficient		Capacity Spectrum		Energy-Based Analysis		Modal Pushover Analysis	
			Peak Story Drift (%)	Drift (%)	Error (%)	Drift (%)	Error (%)	Drift (%)	Error (%)	Drift (%)	Error (%)
5	**Elcentro 5** (8.35 Elcentro)	9^{th}	**7.35**	**8.24**	**12.00**	**2.86**	**-61.06**	**3.11**	**-57.67**	**5.12**	**-30.33**
		8^{th}	7.56	8.88	17.38	3.51	-53.56	3.76	-50.27	5.06	-33.15
		7^{th}	6.88	9.31	35.35	4.05	-41.04	4.30	-37.52	4.52	-34.25
		6^{th}	5.92	9.75	64.65	4.67	-21.22	4.90	-17.31	4.49	-24.14
		5^{th}	5.76	9.86	71.17	5.07	-11.95	5.29	-8.23	4.82	-16.28
		4^{th}	6.08	9.45	55.44	5.11	-15.88	5.30	-12.75	4.83	-20.56
		3^{rd}	5.78	8.44	45.97	4.66	-19.37	4.82	-16.61	4.41	-23.74
		2^{nd}	4.58	6.67	45.49	3.76	-18.03	3.88	-15.35	3.66	-20.06
		1^{st}	2.99	5.21	74.14	3.07	2.64	3.17	5.90	2.35	21.55
		G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 5.11 เปรียบเทียบผล Peak Rotation Ductility ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA (อาคาร 9 ชั้น)

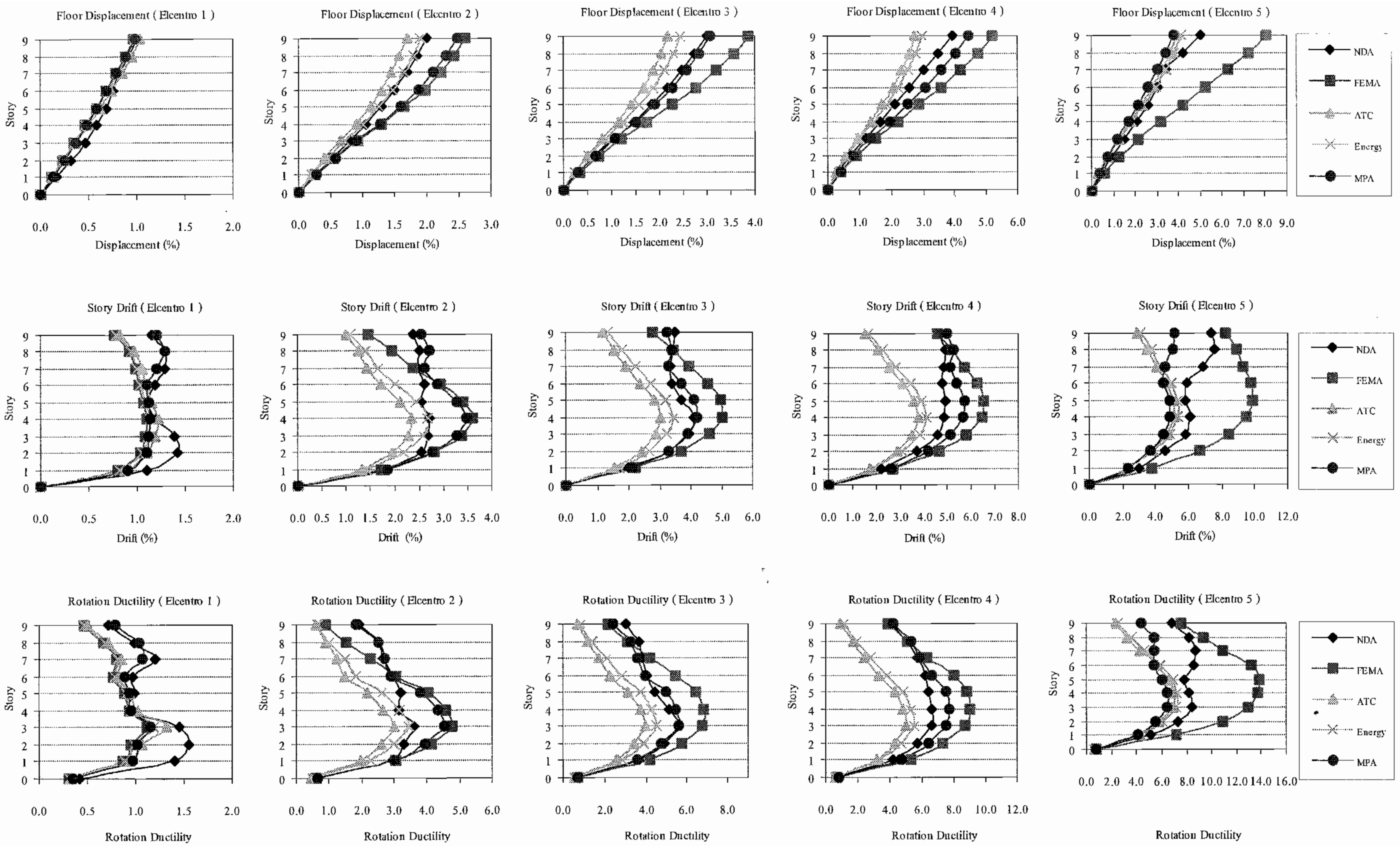
No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA)		Nonlinear Static Analysis (NSA)											
					Displacement Coefficient			Capacity Spectrum			Energy-Based Analysis			Modal Pushover Analysis		
			Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)
1	**Elcentro 1** (1.15 Elcentro)	9th	0.006958	0.710	0.004570	0.466	-34.32	0.004850	0.495	-30.29	0.004652	0.474	-33.14	0.007736	0.789	11.18
		8th	0.008452	0.984	0.005753	0.669	-31.94	0.006105	0.710	-27.77	0.005857	0.682	-30.71	0.008922	1.038	5.55
		7th	0.009409	1.199	0.006270	0.799	-33.36	0.006657	0.848	-29.25	0.006384	0.813	-32.15	0.008315	1.059	-11.63
		6th	0.006322	0.963	0.005034	0.767	-20.37	0.005354	0.816	-15.31	0.005128	0.781	-18.89	0.005800	0.884	-8.26
		5th	0.006456	0.984	0.005770	0.879	-10.62	0.006171	0.940	-4.41	0.005887	0.897	-8.82	0.006139	0.935	-4.90
		4th	0.006107	0.931	0.006127	0.934	0.34	0.006687	1.019	9.50	0.006262	0.954	2.55	0.006288	0.958	2.97
		3rd	0.009509	1.449	0.007337	1.118	-22.84	0.008644	1.317	-9.10	0.007774	1.185	-18.25	0.007502	1.143	-21.10
		2nd	0.009953	1.548	0.006146	0.956	-38.25	0.006886	1.071	-30.81	0.006281	0.977	-36.90	0.006510	1.013	-34.59
		1st	0.009036	1.406	0.005612	0.873	-37.89	0.005997	0.933	-33.63	0.005725	0.891	-36.64	0.006215	0.967	-31.22
		G	0.002666	0.415	0.001992	0.310	-25.28	0.002122	0.330	-20.39	0.002029	0.316	-23.88	0.002267	0.353	-14.97
2	**Elcentro 2** (3.08 Elcentro)	9th	0.018939	1.931	0.008576	0.875	-54.72	0.006004	0.612	-68.30	0.006444	0.657	-65.97	0.017747	1.810	-6.29
		8th	0.021417	2.492	0.013229	1.539	-38.23	0.007645	0.890	-64.30	0.008300	0.966	-61.24	0.021394	2.490	-0.11
		7th	0.020786	2.648	0.017787	2.266	-14.43	0.009740	1.241	-53.14	0.011484	1.463	-44.75	0.021391	2.725	2.91
		6th	0.019458	2.965	0.020143	3.069	3.52	0.009582	1.460	-50.76	0.011960	1.822	-38.53	0.019172	2.921	-1.47
		5th	0.020946	3.192	0.026525	4.042	26.64	0.014186	2.162	-32.27	0.017244	2.628	-17.67	0.025002	3.810	19.37
		4th	0.020606	3.140	0.029982	4.569	45.50	0.017366	2.646	-15.72	0.020639	3.145	0.16	0.028299	4.312	37.34
		3rd	0.023593	3.595	0.031393	4.784	33.06	0.019625	2.990	-16.82	0.022747	3.466	-3.59	0.029808	4.542	26.34
		2nd	0.021204	3.299	0.026402	4.107	24.51	0.016702	2.598	-21.23	0.019303	3.003	-8.97	0.025286	3.934	19.25
		1st	0.019121	2.975	0.019503	3.034	2.00	0.012666	1.970	-33.76	0.014532	2.261	-24.00	0.019198	2.987	0.40
		G	0.003977	0.619	0.003648	0.568	-8.27	0.002939	0.457	-26.10	0.003131	0.487	-21.27	0.004138	0.644	4.05

ตารางที่ 5.11 เปรียบเทียบผล Peak Rotation Ductility ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA (อาคาร 9 ชั้น) (ต่อ)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA)		Nonlinear Static Analysis (NSA)											
					Displacement Coefficient			Capacity Spectrum			Energy-Based Analysis			Modal Pushover Analysis		
			Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)
3	Elcentro 3 (4.36 Elcentro)	9th	0.02957	3.016	0.021158	2.158	-28.45	0.007035	0.717	-76.21	0.008028	0.819	-72.85	0.023496	2.396	-20.54
		8th	0.031658	3.684	0.026944	3.135	-14.89	0.009778	1.138	-69.11	0.012035	1.400	-61.99	0.027963	3.254	-11.67
		7th	0.029694	3.783	0.032790	4.177	10.43	0.013501	1.720	-54.53	0.016261	2.071	-45.24	0.027779	3.539	-6.45
		6th	0.026701	4.069	0.035873	5.466	34.35	0.014853	2.263	-44.37	0.018318	2.791	-31.40	0.026129	3.981	-2.14
		5th	0.028900	4.404	0.042383	6.458	46.65	0.020614	3.141	-28.67	0.024541	3.739	-15.08	0.032717	4.985	13.21
		4th	0.033844	5.157	0.044775	6.823	32.30	0.024190	3.686	-28.53	0.028062	4.276	-17.08	0.035753	5.448	5.64
		3rd	0.036580	5.574	0.044417	6.768	21.42	0.026117	3.980	-28.60	0.029661	4.520	-18.91	0.036447	5.554	-0.36
		2nd	0.031503	4.901	0.036794	5.724	16.80	0.022120	3.441	-29.78	0.025008	3.890	-20.62	0.030609	4.762	-2.84
		1st	0.023560	3.665	0.026734	4.159	13.47	0.016527	2.571	-29.85	0.018536	2.884	-21.32	0.022945	3.570	-2.61
		G	0.004255	0.662	0.004367	0.679	2.65	0.003341	0.520	-21.48	0.003549	0.552	-16.60	0.004655	0.724	9.41
4	Elcentro 4 (5.62 Elcentro)	9th	0.039819	4.061	0.038339	3.910	-3.72	0.009028	0.921	-77.33	0.010449	1.066	-73.76	0.040943	4.176	2.82
		8th	0.043719	5.087	0.044188	5.142	1.07	0.014216	1.654	-67.48	0.016340	1.901	-62.63	0.045738	5.322	4.62
		7th	0.044819	5.709	0.049797	6.344	11.11	0.019046	2.426	-57.50	0.021760	2.772	-51.45	0.045838	5.839	2.27
		6th	0.040933	6.237	0.052202	7.954	27.53	0.021650	3.299	-47.11	0.024862	3.788	-39.26	0.043364	6.608	5.94
		5th	0.041695	6.353	0.057931	8.827	38.94	0.028165	4.292	-32.45	0.031642	4.822	-24.11	0.049043	7.473	17.62
		4th	0.043151	6.575	0.058991	8.989	36.71	0.031567	4.810	-26.85	0.034923	5.321	-19.07	0.050694	7.725	17.48
		3rd	0.043361	6.607	0.056875	8.666	31.17	0.032824	5.002	-24.30	0.035848	5.462	-17.33	0.049456	7.536	14.06
		2nd	0.036789	5.723	0.047117	7.330	28.07	0.027564	4.288	-25.08	0.030004	4.668	-18.44	0.040988	6.376	11.41
		1st	0.026875	4.181	0.033869	5.269	26.02	0.020302	3.158	-24.46	0.021986	3.420	-18.19	0.030182	4.695	12.31
		G	0.004606	0.716	0.004494	0.699	-2.43	0.003730	0.580	-19.01	0.003903	0.607	-15.25	0.005238	0.815	13.74

ตารางที่ 5.11 เปรียบเทียบผล Peak Rotation Ductility ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA (อาคาร 9 ชั้น) (ต่อ)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA)		Nonlinear Static Analysis (NSA)											
					Displacement Coefficient			Capacity Spectrum			Energy-Based Analysis			Modal Pushover Analysis		
			Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)
5	Elcentro 5 (8.35 Elcentro)	9th	0.066276	6.759	0.074188	7.566	11.94	0.022035	2.247	-66.75	0.024460	2.494	-63.09	0.042973	4.383	-35.16
		8th	0.070596	8.215	0.080126	9.324	13.50	0.027825	3.238	-60.59	0.030258	3.521	-57.14	0.046055	5.359	-34.76
		7th	0.068158	8.683	0.085323	10.869	25.18	0.033657	4.288	-50.62	0.036053	4.593	-47.10	0.042295	5.388	-37.95
		6th	0.055969	8.528	0.086686	13.209	54.88	0.036701	5.592	-34.43	0.038993	5.942	-30.33	0.035211	5.365	-37.09
		5th	0.050988	7.769	0.090938	13.857	78.35	0.043167	6.578	-15.34	0.045337	6.908	-11.08	0.039892	6.079	-21.76
		4th	0.053762	8.192	0.089673	13.664	66.80	0.045485	6.931	-15.40	0.047454	7.231	-11.73	0.042269	6.441	-21.38
		3rd	0.055693	8.486	0.084674	12.902	52.04	0.045033	6.862	-19.14	0.046743	7.123	-16.07	0.042084	6.413	-24.44
		2nd	0.047289	7.357	0.069700	10.843	47.39	0.037287	5.801	-21.15	0.038661	6.014	-18.25	0.035077	5.457	-25.82
		1st	0.033317	5.183	0.046346	7.210	39.11	0.027099	4.216	-18.66	0.028098	4.371	-15.66	0.026095	4.060	-21.68
		G	0.004960	0.772	0.004541	0.706	-8.45	0.004403	0.685	-11.23	0.004478	0.697	-9.72	0.005104	0.794	2.91



ที่ 5.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA (อาคาร 9 ชั้น)

ตารางที่ 5.12 ความแตกต่างของค่า Floor Displacement ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี NSA กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 9 ชั้น

Earthquake	**Floor Displacement**				
	Displacement Coefficient	**Capacity Spectrum**	**Energy Based Analysis**	**Modal Pushover Analysis**	
				1 Mode	**3 Mode**
Elcentro 1	**2 - 27 (14.9 %)**	**1 - 22 (11.1 %)**	**1 - 26 (13.0 %)**	**2 - 27 (14.9 %)**	**1 - 20 (11.6 %)**
Elcentro 2 - 5	**3 - 75 (33.3 %)**	**5 - 31 (19.8 %)**	**1 - 25 (12.8 %)**	**0 - 30 (13.9 %)**	**0 - 26 (13.9 %)**

ตารางที่ 5.13 ความแตกต่างของค่า Story Drift ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี NSA กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 9 ชั้น

Earthquake	**Story Drift**				
	Displacement Coefficient	**Capacity Spectrum**	**Energy Based Analysis**	**Modal Pushover Analysis**	
				1 Mode	**3 Mode**
Elcentro 1	**1 - 33 (18.0 %)**	**2 - 30 (14.5 %)**	**2 - 32 (16.8 %)**	**4 - 33 (20.8 %)**	**0 - 22 (9.3 %)**
Elcentro 2 - 5	**0 - 74 (30.4 %)**	**1 - 67 (31.0 %)**	**1 - 63 (25.6 %)**	**1 - 67 (20.2 %)**	**0 - 34 (13.7 %)**

ตารางที่ 5.12 ความแตกต่างของค่า Floor Displacement ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี NSA กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 9 ชั้น

Earthquake	Floor Displacement				
	Displacement Coefficient	Capacity Spectrum	Energy Based Analysis	Modal Pushover Analysis	
				1 Mode	3 Mode
Elcentro 1	2 - 27 (14.9 %)	1 - 22 (11.1 %)	1 - 26 (13.0 %)	2 - 27 (14.9 %)	1 - 20 (11.6 %)
Elcentro 2 - 5	3 - 75 (33.3 %)	5 - 31 (19.8 %)	1 - 25 (12.8 %)	0 - 30 (13.9 %)	0 - 26 (13.9 %)

ตารางที่ 5.13 ความแตกต่างของค่า Story Drift ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี NSA กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 9 ชั้น

Earthquake	Story Drift				
	Displacement Coefficient	Capacity Spectrum	Energy Based Analysis	Modal Pushover Analysis	
				1 Mode	3 Mode
Elcentro 1	1 - 33 (18.0 %)	2 - 30 (14.5 %)	2 - 32 (16.8 %)	4 - 33 (20.8 %)	0 - 22 (9.3 %)
Elcentro 2 - 5	0 - 74 (30.4 %)	1 - 67 (31.0 %)	1 - 63 (25.6 %)	1 - 67 (20.2 %)	0 - 34 (13.7 %)

ตารางที่ 5.14 ความแตกต่างของค่า Rotation Ductility ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี NSA กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 9 ชั้น

Earthquake	Rotation Ductility				
	Displacement Coefficient	Capacity Spectrum	Energy Based Analysis	Modal Pushover Analysis	
				1 Mode	3 Mode
Elcentro 1	0 - 38 (25.6 %)	4 - 34 (21.1 %)	2 – 37 (24.2 %)	0 - 38 (25.5 %)	2 - 35 (14.6 %)
Elcentro 2 - 5	1 - 78 (29.3 %)	15 - 77 (39.7 %)	0 – 74 (32.3 %)	1 - 73 (24.7 %)	0 - 38 (14.7 %)

จากผลการเปรียบเทียบค่าต่างๆจากการวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 9 ชั้นด้วยวิธีNSA ทั้ง 4 วิธีจะสังเกตุได้ว่า

การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างอาคารเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวElcentro1 มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันทั้งสี่วิธี และยังใกล้เคียงกับวิธีNDA โดยมีความแตกต่างกับวิธีNDA อยู่ในช่วง 1-27 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 12.7 เปอร์เซ็นต์)

การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างอาคารเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว Elcentro2 ถึง Elcentro5 มีค่าแตกต่างกับวิธีNDA ดังนี้คือ วิธีCapacity Spectrum ให้ค่าต่ำที่สุดและต่ำกว่าวิธีNDA ประมาณ 5-31 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 19.8 เปอร์เซ็นต์) วิธีDisplacement Coefficient ให้ค่าสูงที่สุดและสูงกว่าวิธีNDA ประมาณ 3-75 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 33.3 เปอร์เซ็นต์) วิธี Energy Based Analysis ให้ค่าแตกต่างกับวิธีNDA ประมาณ 1-25 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 12.8 เปอร์เซ็นต์) วิธี Modal Pushover Analysis ให้ค่าแตกต่างกับวิธีNDA ประมาณ 0-26 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 13.9 เปอร์เซ็นต์)

สำหรับวิธี Modal Pushover Analysis นั้นเมื่อพิจารณาเฉพาะผลของโหมดแรกเพียงโหมดเดียวแล้วให้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างแตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-30 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 13.9 เปอร์เซ็นต์)

ค่าStory Drift และค่า Rotation Ductility เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวElcentro1 มีค่าใกล้เคียงกันสามวิธีคือวิธี Displacement Coefficient วิธี Capacity Spectrum และวิธี Energy Based Analysis โดยมีค่า Story Drift แตกต่างกับวิธีNDA อยู่ในช่วง 1-33 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 16.5 เปอร์เซ็นต์)และมีค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA อยู่ในช่วง 0-38 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 23.6 เปอร์เซ็นต์) ส่วนวิธี Modal Pushover Analysis ให้ค่าใกล้เคียงกับวิธี NDA มากที่สุดโดยมีค่า Story Drift แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-22 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 9.3 เปอร์เซ็นต์)และมีค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 2-35 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 14.6 เปอร์เซ็นต์)

ค่า Story Drift และค่า Rotation Ductility เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว Elcentro2 ถึง Elcentro5 มีค่าแตกต่างกับวิธีNDA ดังนี้คือ วิธี Capacity Spectrum ให้ค่าต่ำที่สุดโดยค่า Story Drift แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 1-67 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 31.0 เปอร์เซ็นต์)และค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 15-77 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 39.7 เปอร์เซ็นต์) วิธี Displacement Coefficient ให้ค่าสูงที่สุดโดยค่า Story Drift แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-74 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 30.4 เปอร์เซ็นต์)และค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 1-78 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 29.3 เปอร์เซ็นต์) วิธี Energy Based Analysis ให้ค่า Story Drift แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 1-63 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 25.6 เปอร์เซ็นต์)และค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-74

เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ย 25.6 เปอร์เซ็นต์) วิธี Modal Pushover Analysis ให้ค่าใกล้เคียงกับวิธี NDA มากที่สุดโดยค่า Story Drift แตกต่างกับวิธีNDA ประมาณ 0-34 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 13.7 เปอร์เซ็นต์)และค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-38 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 14.7 เปอร์เซ็นต์)

สำหรับวิธี Modal Pushover Analysis นั้นเมื่อพิจารณาเฉพาะผลของโหมดแรกเพียงโหมดเดียวแล้ว มีค่า Story Drift แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 1-67 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 20.2 เปอร์เซ็นต์) และมีค่า Story Drift แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 1-73 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 24.7 เปอร์เซ็นต์)

5.2 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis กับวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Dynamic Analysis)

ในบทนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีEnergy Based Analysis ทั้งสี่กรณีคือ

1. วิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R&μ เป็นแบบเชิงเส้นโดยใช้มวลประสิทธิผลของโหมดแรกในการวิเคราะห์
2. วิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R&μ เป็นแบบเชิงเส้นโดยใช้มวลทั้งหมดในการวิเคราะห์
3. วิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R&μ เป็นแบบไม่เชิงเส้นโดยใช้มวลประสิทธิผลของโหมดแรกในการวิเคราะห์
4. วิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R&μ เป็นแบบไม่เชิงเส้นโดยใช้มวลทั้งหมดในการวิเคราะห์

แล้วนำผลที่ได้จากทั้งสี่กรณีมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น(NDA) ซึ่งเป็นวิธีที่ถูกต้องที่สุดเพื่อหาข้อดีและข้อเสียรวมทั้งความถูกต้องแม่นยำของวิธี Energy Based Analysis ทั้งสี่กรณี โดยในบทนี้จะทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่สำคัญคือ

5.2.1 การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง(Floor Displacement) , Story Drift และ Rotation Ductility ของอาคาร 3 ชั้น

การเปรียบเทียบผลค่าต่างๆจากการวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 3 ชั้นคือการเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง(Floor Displacement)ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.15 และ5.16 การเปรียบเทียบค่า Story Drift ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.17 ส่วนการเปรียบเทียบค่า Rotation Ductility ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.18

การเปรียบเทียบผลค่าต่างๆจากการวิเคราะห์อาคาร 3 ชั้นยังได้แสดงในรูปของกราฟแสดงการเปรียบเทียบผล ดังรูปที่ 5.3

ความแตกต่างระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis กับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (NDA) สำหรับอาคาร 3 ชั้น ยังได้แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างดังแสดงในตารางที่ 5.19 ความแตกต่างของค่า Story Drift ได้แสดงในตารางที่ 5.20 ส่วนความแตกต่างของค่า Rotation Ductility ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.21

ตารางที่ 5.15 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด(Peak Floor Displacement)ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 3 ชั้น)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA) Peak Disp. (cm.)	Energy-Based Analysis (Nonlinear μ & R)				Energy-Based Analysis (Linear μ & R)			
				1 st modal mass		Total mass		1 st modal mass		Total mass	
				Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)
1	**Elcentro 1** (0.88 Elcentro)	3^{rd}	**12.027**	**11.702**	**-2.70**	**12.812**	**6.53**	**11.702**	**-2.70**	**12.812**	**6.53**
		2^{nd}	7.610	7.788	2.34	8.552	12.38	7.788	2.34	8.552	12.38
		1^{st}	3.150	3.305	4.92	3.632	15.32	3.305	4.92	3.632	15.32
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
2	**Elcentro 2** (2.19 Elcentro)	3^{rd}	**23.744**	**24.930**	**5.00**	**27.366**	**15.25**	**28.575**	**20.35**	**31.250**	**31.61**
		2^{nd}	15.311	16.685	8.97	18.293	19.48	19.093	24.70	20.861	36.25
		1^{st}	6.401	7.247	13.21	8.037	25.56	8.428	31.67	9.294	45.20
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
3	**Elcentro 3** (3.05 Elcentro)	3^{rd}	**36.098**	**36.187**	**0.25**	**40.810**	**13.05**	**39.553**	**9.57**	**43.279**	**19.89**
		2^{nd}	23.040	24.122	4.70	27.188	18.00	26.353	14.38	28.826	25.11
		1^{st}	10.089	10.894	7.98	12.408	22.99	11.996	18.91	13.218	31.02
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
4	**Elcentro 4** (3.72 Elcentro)	3^{rd}	**47.638**	**47.295**	**-0.72**	**53.459**	**12.22**	**48.133**	**1.04**	**52.680**	**10.58**
		2^{nd}	31.135	31.488	1.13	35.578	14.27	32.045	2.92	35.062	12.61
		1^{st}	14.054	14.534	3.42	16.556	17.80	14.808	5.37	16.299	15.98
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
5	**Elcentro 5** (4.38 Elcentro)	3^{rd}	**59.416**	**58.458**	**-1.61**	**64.658**	**8.82**	**56.556**	**-4.81**	**61.910**	**4.20**
		2^{nd}	39.855	38.895	-2.41	43.007	7.91	37.633	-5.58	41.184	3.33
		1^{st}	18.448	18.194	-1.38	20.226	9.64	17.569	-4.76	19.324	4.75
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

ตารางที่ 5.16 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด(Peak Floor Displacement/Height)ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 3 ชั้น)

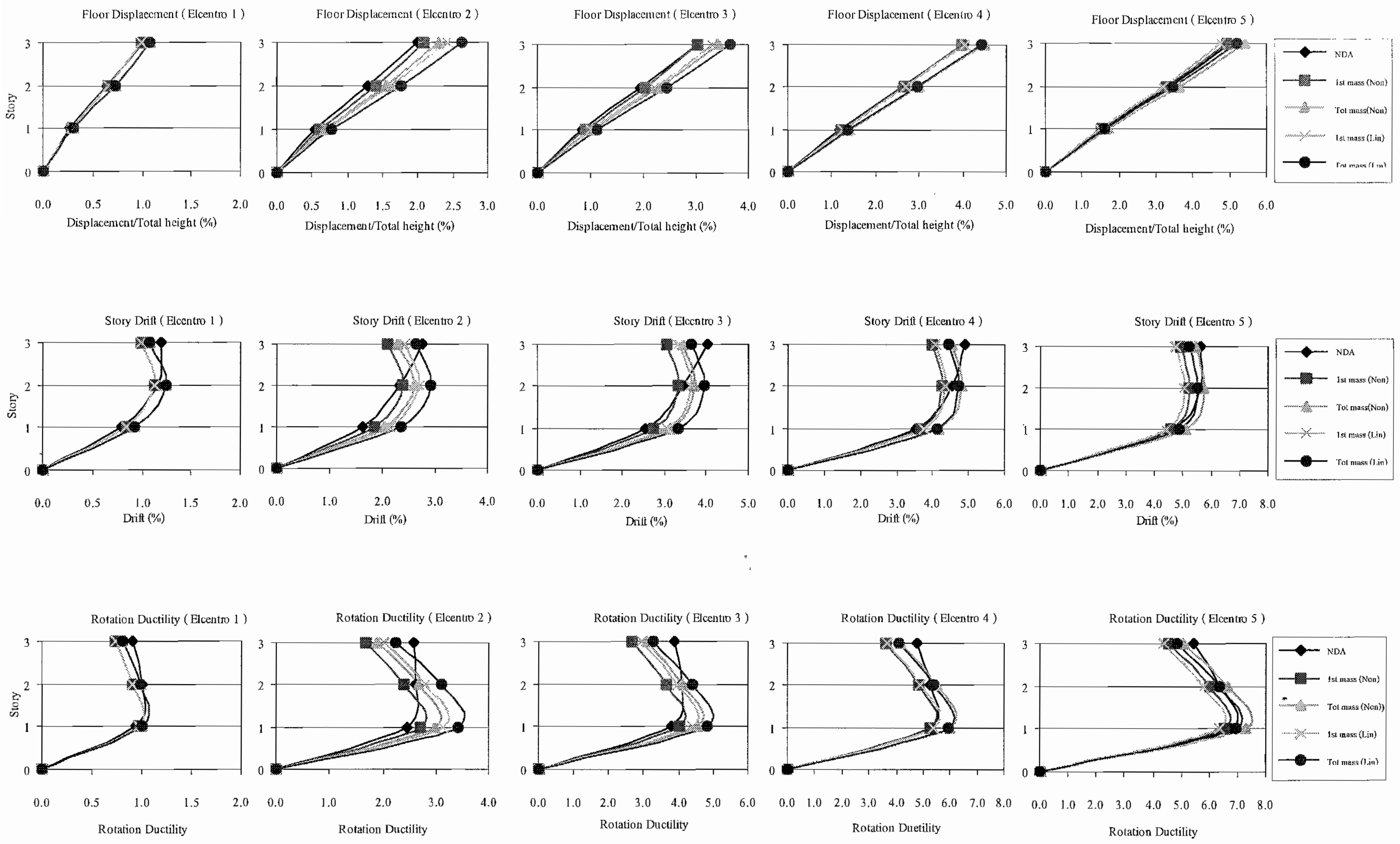
No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA)	Energy-Based Analysis (Nonlinear μ & R)				Energy-Based Analysis (Linear μ & R)			
				1 st modal mass		Total mass		1 st modal mass		Total mass	
			Peak Disp/Height (%)	Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)
1	Elcentro 1 (0.88 Elcentro)	3^{rd}	**1.01**	**0.984**	**-2.70**	**1.078**	**6.53**	**0.984**	**-2.70**	**1.078**	**6.53**
		2^{nd}	0.64	0.655	2.34	0.719	12.38	0.655	2.34	0.719	12.38
		1^{st}	0.26	0.278	4.92	0.306	15.32	0.278	4.92	0.306	15.32
		G	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
2	Elcentro 2 (2.19 Elcentro)	3^{rd}	**2.00**	**2.097**	**5.00**	**2.302**	**15.25**	**2.404**	**20.35**	**2.629**	**31.61**
		2^{nd}	1.29	1.404	8.97	1.539	19.48	1.606	24.70	1.755	36.25
		1^{st}	0.54	0.610	13.21	0.676	25.56	0.709	31.67	0.782	45.20
		G	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
3	Elcentro 3 (3.05 Elcentro)	3^{rd}	**3.04**	**3.044**	**0.25**	**3.433**	**13.05**	**3.327**	**9.57**	**3.641**	**19.89**
		2^{nd}	1.94	2.029	4.70	2.287	18.00	2.217	14.38	2.425	25.11
		1^{st}	0.85	0.916	7.98	1.044	22.99	1.009	18.91	1.112	31.02
		G	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
4	Elcentro 4 (3.72 Elcentro)	3^{rd}	**4.01**	**3.979**	**-0.72**	**4.497**	**12.22**	**4.049**	**1.04**	**4.432**	**10.58**
		2^{nd}	2.62	2.649	1.13	2.993	14.27	2.696	2.92	2.950	12.61
		1^{st}	1.18	1.223	3.42	1.393	17.80	1.246	5.37	1.371	15.98
		G	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
5	Elcentro 5 (4.38 Elcentro)	3^{rd}	**5.00**	**4.918**	**-1.61**	**5.439**	**8.82**	**4.758**	**-4.81**	**5.208**	**4.20**
		2^{nd}	3.35	3.272	-2.41	3.618	7.91	3.166	-5.58	3.465	3.33
		1^{st}	1.55	1.531	-1.38	1.701	9.64	1.478	-4.76	1.626	4.75
		G	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

ตารางที่ 5.17 เปรียบเทียบผล Peak Story Drift ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 3 ชั้น)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA)	Energy-Based Analysis (Nonlinear μ & R)				Energy-Based Analysis (Linear μ & R)			
				1 st modal mass		Total mass		1 st modal mass		Total mass	
			Peak Story Drift (%)	Drift (%)	Error (%)	Drift (%)	Error (%)	Drift (%)	Error (%)	Drift (%)	Error (%)
1	**Elcentro 1** (0.88 Elcentro)	3^{rd}	**1.19**	**0.99**	**-16.78**	**1.08**	**-9.44**	**0.99**	**-16.78**	**1.08**	**-9.44**
		2^{nd}	1.16	1.13	-2.80	1.24	6.67	1.13	-2.80	1.24	6.67
		1^{st}	0.80	0.83	4.90	0.92	15.30	0.83	4.90	0.92	15.30
		G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	**Elcentro 2** (2.19 Elcentro)	3^{rd}	**2.74**	**2.08**	**-24.03**	**2.29**	**-16.40**	**2.39**	**-12.63**	**2.62**	**-4.28**
		2^{nd}	2.30	2.38	3.61	2.59	12.59	2.69	17.08	2.92	26.98
		1^{st}	1.62	1.83	13.24	2.03	25.59	2.13	31.70	2.35	45.23
		G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	**Elcentro 3** (3.05 Elcentro)	3^{rd}	**4.01**	**3.04**	**-23.99**	**3.44**	**-14.18**	**3.33**	**-16.84**	**3.65**	**-8.95**
		2^{nd}	3.43	3.34	-2.73	3.73	8.69	3.62	5.57	3.94	14.78
		1^{st}	2.55	2.75	7.99	3.13	22.99	3.03	18.91	3.34	31.03
		G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	**Elcentro 4** (3.72 Elcentro)	3^{rd}	**4.89**	**3.99**	**-18.34**	**4.51**	**-7.62**	**4.06**	**-16.88**	**4.45**	**-8.98**
		2^{nd}	4.52	4.28	-5.23	4.80	6.33	4.35	-3.65	4.74	4.88
		1^{st}	3.55	3.67	3.41	4.18	17.80	3.74	5.36	4.11	15.97
		G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	**Elcentro 5** (4.38 Elcentro)	3^{rd}	**5.63**	**4.94**	**-12.31**	**5.46**	**-2.95**	**4.78**	**-15.18**	**5.23**	**-7.09**
		2^{nd}	5.60	5.22	-6.69	5.75	2.69	5.06	-9.56	5.52	-1.47
		1^{st}	4.66	4.59	-1.38	5.10	9.63	4.43	-4.77	4.88	4.74
		G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 5.18 เปรียบเทียบผล Peak Rotation Ductility ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 3 ชั้น)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA)		Energy-Based Analysis (Nonlinear μ & R)						Energy-Based Analysis (Linear μ & R)					
					1 st modal mass			Total mass			1 st modal mass			Total mass		
			Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)
1	Elcentro 1 (0.88 Elcentro)	3rd	0.008795	0.905	0.007113	0.732	-19.12	0.007738	0.797	-12.02	0.007113	0.732	-19.12	0.007738	0.797	-12.02
		2nd	0.007718	1.002	0.006986	0.907	-9.48	0.007611	0.988	-1.39	0.006986	0.907	-9.48	0.007611	0.988	-1.39
		1st	0.006569	0.930	0.006776	0.960	3.15	0.007077	1.002	7.73	0.006776	0.960	3.15	0.007077	1.002	7.73
		G	0	0	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00
2	Elcentro 2 (2.19 Elcentro)	3rd	0.024958	2.569	0.016414	1.690	-34.23	0.018514	1.906	-25.82	0.019514	2.009	-21.81	0.021714	2.235	-13.00
		2nd	0.020092	2.609	0.018501	2.402	-7.92	0.020501	2.662	2.04	0.021501	2.792	7.01	0.023801	3.091	18.46
		1st	0.017206	2.437	0.019060	2.700	10.78	0.021060	2.983	22.40	0.022060	3.125	28.21	0.024160	3.422	40.42
		G	0	0	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00
3	Elcentro 3 (3.05 Elcentro)	3rd	0.037708	3.882	0.025814	2.657	-31.54	0.029714	3.059	-21.20	0.028614	2.946	-24.12	0.031714	3.265	-15.90
		2nd	0.031438	4.082	0.027901	3.623	-11.25	0.031701	4.116	0.84	0.030601	3.974	-2.66	0.033701	4.376	7.20
		1st	0.026670	3.778	0.028260	4.003	5.96	0.031960	4.527	19.84	0.030960	4.385	16.09	0.033960	4.810	27.33
		G	0	0	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00
4	Elcentro 4 (3.72 Elcentro)	3rd	0.046240	4.760	0.035014	3.604	-24.28	0.040114	4.130	-13.25	0.035714	3.677	-22.76	0.039514	4.068	-14.55
		2nd	0.040357	5.240	0.037001	4.805	-8.32	0.042101	5.467	4.32	0.037701	4.896	-6.58	0.041501	5.389	2.83
		1st	0.036922	5.230	0.037260	5.278	0.92	0.042260	5.986	14.46	0.037960	5.377	2.81	0.041660	5.901	12.83
		G	0	0	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00
5	Elcentro 5 (4.38 Elcentro)	3rd	0.052956	5.452	0.044314	4.562	-16.32	0.049414	5.087	-6.69	0.042714	4.397	-19.34	0.047114	4.850	-11.03
		2nd	0.049072	6.372	0.046201	5.999	-5.85	0.051301	6.662	4.54	0.044701	5.805	-8.91	0.049101	6.376	0.06
		1st	0.047874	6.781	0.046360	6.567	-3.16	0.051460	7.289	7.49	0.044860	6.354	-6.30	0.049160	6.963	2.69
		G	0	0	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00	0	0	0.00



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 3 ชั้น)

ตารางที่ 5.21 ความแตกต่างของค่า Rotation Ductility ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 3 ชั้น

Earthquake	Rotation Ductility					
	Energy Based Analysis (Nonlinear R & μ)		Energy Based Analysis (Linear R & μ)		Modal Pushover Analysis	
	1 st Mass	Total Mass	1 st Mass	Total Mass	1 Mode	3 Mode
Elcentro 1	3 - 19 (10.6 %)	1 - 12 (7.0 %)	3 - 19 (10.6 %)	1 - 12 (7.0 %)	3 - 19 (10.6 %)	3 - 19 (10.6 %)
Elcentro 2 - 5	1 - 34 (13.4 %)	1 - 26 (11.9 %)	2 - 28 (13.9 %)	0 - 41 (13.9 %)	0 - 38 (14.1 %)	0 - 38 (13.7 %)

จากผลการเปรียบเทียบค่าต่างๆจากการวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 3 ชั้นด้วยวิธี Energy Based Analysis ทั้ง 4 กรณีจะได้ว่า

การใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R&μ แบบไม่เชิงเส้นจะให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับวิธีNDA มากกว่าการใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R&μ แบบเชิงเส้นโดยที่การใช้มวลประสิทธิผลของโหมดแรกในการวิเคราะห์จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับวิธีNDA มากกว่าการใช้มวลทั้งหมดในการวิเคราะห์ดังนี้

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R&μ แบบไม่เชิงเส้นและใช้มวลประสิทธิผลของโหมดแรกในการวิเคราะห์ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Elcentro 1 ให้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง(Floor Displacement)แตกต่างกับวิธีNDA ประมาณ 2-5 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 3.3 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Story Drift แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 2-17 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 8.2 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 3-19 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 10.6 เปอร์เซ็นต์)

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R&μ แบบไม่เชิงเส้นและใช้มวลทั้งหมดในการวิเคราะห์ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Elcentro 1 ให้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Floor Displacement)แตกต่างกับวิธีNDA ประมาณ 6-16 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 11.4 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Story Drift แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 6-16 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 10.5 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 1-12 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 7.0 เปอร์เซ็นต์)

สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบเชิงเส้นภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Elcentro 1 ให้ผลค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง , Story Drift และ Rotation Ductility เท่ากันกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบไม่เชิงเส้นภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Elcentro 1

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบไม่เชิงเส้นและใช้มวลของโหมดแรกในการวิเคราะห์ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Elcentro 2 ถึง Elcentro 5 ให้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Floor Displacement) แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-13 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 4.2 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Story Drift แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 2-24 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 10.3 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 1-34 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 13.4 เปอร์เซ็นต์)

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบไม่เชิงเส้นและใช้มวลทั้งหมดในการวิเคราะห์ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Elcentro 2 ถึง Elcentro 5 ให้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Floor Displacement) แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 7-23 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 15.4 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Story Drift แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 2-26 เปอร์เซ็นต์(ค่า

ความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 12.3 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 1-26 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 11.9 เปอร์เซ็นต์)

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบเชิงเส้นและใช้มวลของโหมดแรกในการวิเคราะห์ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Elcentro 2 ถึง Elcentro 5 ให้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Floor Displacement) แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 1-32 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 12.0 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Story Drift แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 3-32 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 13.2 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 2-28 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 13.9 เปอร์เซ็นต์)

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบไม่เชิงเส้นและใช้มวลทั้งหมดในการวิเคราะห์ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Elcentro 2 ถึง Elcentro 5 ให้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Floor Displacement) แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 3-45 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 20.0 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Story Drift แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 1-45 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 14.5 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-41 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 13.9 เปอร์เซ็นต์)

5.2.2 การเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง(Floor Displacement) , Story Drift และ Rotation Ductility ของอาคาร 9 ชั้น

การเปรียบเทียบผลค่าต่างๆจากการวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 9 ชั้นคือการเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง(Floor Displacement)ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.22 และ5.23 การเปรียบเทียบค่า Story Drift ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.24 ส่วนการเปรียบเทียบค่า Rotation Ductility ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.25

การเปรียบเทียบผลค่าต่างๆจากการวิเคราะห์อาคาร 9 ชั้นยังได้แสดงในรูปของกราฟแสดงการเปรียบเทียบผล ดังรูปที่ 5.4

ความแตกต่างระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis กับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (NDA) สำหรับอาคาร 9 ชั้น ยังได้แสดงเป็นเปอร์เซนต์ความแตกต่างของค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างดังแสดงในตารางที่ 5.26 ความแตกต่างของค่า Story Drift ดังแสดงในตารางที่ 5.27 ส่วนความแตกต่างของค่า Rotation Ductility ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.28

ตารางที่ 5.22 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด(Peak Floor Displacement)ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 9 ชั้น)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA) Peak Disp. (cm.)	Energy-Based Analysis (Nonlinear R & μ)				Energy-Based Analysis (Linear R & μ)			
				1 st modal mass		Total mass		1 st modal mass		Total mass	
				Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)
1	Elcentro 1 (1.15 Elcentro)	9th	**37.186**	**36.721**	**-1.25**	**40.904**	**10.00**	**36.721**	**-1.25**	**40.904**	**10.00**
		8th	33.833	33.625	-0.62	37.551	10.99	33.625	-0.62	37.551	10.99
		7th	30.353	29.921	-1.42	33.538	10.49	29.921	-1.42	33.538	10.49
		6th	27.813	25.956	-6.68	29.233	5.11	25.956	-6.68	29.233	5.11
		5th	25.260	21.869	-13.42	24.755	-2.00	21.869	-13.42	24.755	-2.00
		4th	21.788	17.551	-19.45	19.909	-8.63	17.551	-19.45	19.909	-8.63
		3rd	17.104	13.051	-23.70	14.691	-14.11	13.051	-23.70	14.691	-14.11
		2nd	11.643	8.656	-25.65	9.599	-17.56	8.656	-25.65	9.599	-17.56
		1st	6.025	4.506	-25.21	4.943	-17.96	4.506	-25.21	4.943	-17.96
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
2	Elcentro 2 (3.08 Elcentro)	9th	**74.295**	**87.856**	**18.25**	**94.104**	**26.66**	**71.074**	**-4.34**	**76.708**	**3.25**
		8th	68.732	82.690	20.31	88.504	28.77	66.812	-2.79	72.238	5.10
		7th	62.865	75.852	20.66	81.044	28.92	61.349	-2.41	66.401	5.62
		6th	56.185	67.462	20.07	71.885	27.94	54.834	-2.41	59.294	5.53
		5th	48.158	57.071	18.51	60.582	25.80	46.827	-2.76	50.500	4.86
		4th	38.913	44.841	15.23	47.422	21.87	37.181	-4.45	39.959	2.69
		3rd	29.947	31.727	5.95	33.437	11.65	26.591	-11.20	28.468	-4.94
		2nd	19.985	19.332	-3.27	20.284	1.50	16.431	-17.78	17.498	-12.44
		1st	9.868	8.981	-8.98	9.368	-5.07	7.798	-20.98	8.237	-16.53
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

ตารางที่ 5.22 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด(Peak Floor Displacement)ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 9 ชั้น) (ต่อ)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA) Peak Disp. (cm.)	Energy-Based Analysis (Nonlinear R & μ)				Energy-Based Analysis (Linear R & μ)			
				1 st modal mass		Total mass		1 st modal mass		Total mass	
				Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)
3	**Elcentro 3** (4.36 Elcentro)	**9th**	**111.481**	**108.318**	**-2.84**	**115.672**	**3.76**	**90.884**	**-18.48**	**98.857**	**-11.32**
		8th	101.727	101.697	-0.03	108.379	6.54	85.514	-15.94	92.916	-8.66
		7th	91.186	92.784	1.75	98.633	8.17	78.384	-14.04	84.971	-6.82
		6th	80.315	81.831	1.89	86.726	7.98	69.629	-13.30	75.212	-6.35
		5th	68.555	68.456	-0.14	72.293	5.45	58.796	-14.23	63.216	-7.79
		4th	54.686	53.195	-2.73	55.992	2.39	46.111	-15.68	49.352	-9.75
		3rd	39.091	37.252	-4.70	39.091	0.00	32.570	-16.68	34.714	-11.20
		2nd	23.919	22.413	-6.30	23.434	-2.03	19.802	-17.21	20.998	-12.21
		1st	11.100	10.229	-7.85	10.640	-4.14	9.172	-17.37	9.657	-13.00
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
4	**Elcentro 4** (5.62 Elcentro)	**9th**	**146.507**	**125.778**	**-14.15**	**134.417**	**-8.25**	**110.386**	**-24.65**	**120.660**	**-17.64**
		8th	128.473	117.112	-8.84	124.592	-3.02	103.596	-19.36	112.695	-12.28
		7th	111.709	105.943	-5.16	112.232	0.47	94.460	-15.44	102.250	-8.47
		6th	95.529	92.613	-3.05	97.709	2.28	83.243	-12.86	89.639	-6.17
		5th	78.969	76.797	-2.75	80.724	2.22	69.566	-11.91	74.524	-5.63
		4th	62.586	59.202	-5.41	62.037	-0.88	54.008	-13.71	57.582	-8.00
		3rd	44.272	41.166	-7.02	43.030	-2.81	37.788	-14.65	40.119	-9.38
		2nd	26.772	24.569	-8.23	25.624	-4.29	22.713	-15.16	23.998	-10.36
		1st	12.278	11.092	-9.66	11.537	-6.04	10.348	-15.72	10.864	-11.52
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

ตารางที่ 5.22 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด(Peak Floor Displacement)ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 9 ชั้น) (ต่อ)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA) Peak Disp. (cm.)	Energy-Based Analysis (Nonlinear R & μ)				Energy-Based Analysis (Linear R & μ)			
				1 st modal mass		Total mass		1 st modal mass		Total mass	
				Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)	Disp. (cm.)	Error (%)
5	**Elcentro 5** (8.35 Elcentro)	9^{th}	**185.877**	**160.150**	**-13.84**	**172.286**	**-7.31**	**152.634**	**-17.88**	**167.902**	**-9.67**
		8^{th}	156.743	146.754	-6.37	157.183	0.28	140.299	-10.49	153.413	-2.12
		7^{th}	126.771	130.797	3.18	139.520	10.06	125.397	-1.08	136.365	7.57
		6^{th}	111.760	112.743	0.88	119.804	7.20	108.372	-3.03	117.249	4.91
		5^{th}	96.114	92.354	-3.91	97.826	1.78	88.969	-7.43	95.844	-0.28
		4^{th}	76.378	70.493	-7.71	74.486	-2.48	68.024	-10.94	73.038	-4.37
		3^{rd}	54.153	48.671	-10.12	51.349	-5.18	47.015	-13.18	50.378	-6.97
		2^{nd}	33.553	28.882	-13.92	30.444	-9.27	27.917	-16.80	29.878	-10.95
		1^{st}	16.398	12.974	-20.88	13.673	-16.62	12.543	-23.51	13.421	-18.15
		G	0.000	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

ตารางที่ 5.23 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด(Peak Floor Displacement/Height)ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 9 ชั้น)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA)	Energy-Based Analysis (Nonlinear R & μ)				Energy-Based Analysis (Linear R & μ)			
				1 st modal mass		Total mass		1 st modal mass		Total mass	
			Peak Disp/Height (%)	Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)
1	**Elcentro 1** (1.15 Elcentro)	9^{th}	**1.00**	**0.988**	**-1.25**	**1.100**	**10.00**	**0.988**	**-1.25**	**1.100**	**10.00**
		8^{th}	0.91	0.904	-0.62	1.010	10.99	0.904	-0.62	1.010	10.99
		7^{th}	0.82	0.805	-1.42	0.902	10.49	0.805	-1.42	0.902	10.49
		6^{th}	0.75	0.698	-6.68	0.786	5.11	0.698	-6.68	0.786	5.11
		5^{th}	0.68	0.588	-13.42	0.666	-2.00	0.588	-13.42	0.666	-2.00
		4^{th}	0.59	0.472	-19.45	0.535	-8.63	0.472	-19.45	0.535	-8.63
		3^{rd}	0.46	0.351	-23.70	0.395	-14.11	0.351	-23.70	0.395	-14.11
		2^{nd}	0.31	0.233	-25.65	0.258	-17.56	0.233	-25.65	0.258	-17.56
		1^{st}	0.16	0.121	-25.21	0.133	-17.96	0.121	-25.21	0.133	-17.96
		G	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
2	**Elcentro 2** (3.08 Elcentro)	9^{th}	**2.00**	**2.363**	**18.25**	**2.531**	**26.66**	**1.911**	**-4.34**	**2.063**	**3.25**
		8^{th}	1.85	2.224	20.31	2.380	28.77	1.797	-2.79	1.943	5.10
		7^{th}	1.69	2.040	20.66	2.179	28.92	1.650	-2.41	1.786	5.62
		6^{th}	1.51	1.814	20.07	1.933	27.94	1.475	-2.41	1.595	5.53
		5^{th}	1.30	1.535	18.51	1.629	25.80	1.259	-2.76	1.358	4.86
		4^{th}	1.05	1.206	15.23	1.275	21.87	1.000	-4.45	1.075	2.69
		3^{rd}	0.81	0.853	5.95	0.899	11.65	0.715	-11.20	0.766	-4.94
		2^{nd}	0.54	0.520	-3.27	0.545	1.50	0.442	-17.78	0.471	-12.44
		1^{st}	0.27	0.242	-8.98	0.252	-5.07	0.210	-20.98	0.222	-16.53
		G	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

ตารางที่ 5.23 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด(Peak Floor Displacement/Height)ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 9 ชั้น) (ต่อ)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA) Peak Disp/Height (%)	Energy-Based Analysis (Nonlinear R & μ)				Energy-Based Analysis (Linear R & μ)			
				1 st modal mass		Total mass		1 st modal mass		Total mass	
				Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)
3	**Elcentro 3** (4.36 Elcentro)	**9th**	**3.00**	**2.913**	**-2.84**	**3.111**	**3.76**	**2.444**	**-18.48**	**2.658**	**-11.32**
		8th	2.74	2.735	-0.03	2.915	6.54	2.300	-15.94	2.499	-8.66
		7th	2.45	2.495	1.75	2.652	8.17	2.108	-14.04	2.285	-6.82
		6th	2.16	2.201	1.89	2.332	7.98	1.872	-13.30	2.023	-6.35
		5th	1.84	1.841	-0.14	1.944	5.45	1.581	-14.23	1.700	-7.79
		4th	1.47	1.431	-2.73	1.506	2.39	1.240	-15.68	1.327	-9.75
		3rd	1.05	1.002	-4.70	1.051	0.00	0.876	-16.68	0.934	-11.20
		2nd	0.64	0.603	-6.30	0.630	-2.03	0.533	-17.21	0.565	-12.21
		1st	0.30	0.275	-7.85	0.286	-4.14	0.247	-17.37	0.260	-13.00
		G	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00
4	**Elcentro 4** (5.62 Elcentro)	**9th**	**3.94**	**3.382**	**-14.15**	**3.615**	**-8.25**	**2.969**	**-24.65**	**3.245**	**-17.64**
		8th	3.45	3.149	-8.84	3.351	-3.02	2.786	-19.36	3.031	-12.28
		7th	3.00	2.849	-5.16	3.018	0.47	2.540	-15.44	2.750	-8.47
		6th	2.57	2.491	-3.05	2.628	2.28	2.239	-12.86	2.411	-6.17
		5th	2.12	2.065	-2.75	2.171	2.22	1.871	-11.91	2.004	-5.63
		4th	1.68	1.592	-5.41	1.668	-0.88	1.452	-13.71	1.548	-8.00
		3rd	1.19	1.107	-7.02	1.157	-2.81	1.016	-14.65	1.079	-9.38
		2nd	0.72	0.661	-8.23	0.689	-4.29	0.611	-15.16	0.645	-10.36
		1st	0.33	0.298	-9.66	0.310	-6.04	0.278	-15.72	0.292	-11.52
		G	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

ตารางที่ 5.23 เปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด(Peak Floor Displacement/Height)ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 9 ชั้น) (ต่อ)

No.	**Earthquake (scale)**	**Floor**	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA)	**Energy-Based Analysis (Nonlinear R & μ)**				**Energy-Based Analysis (Linear R & μ)**			
				1 st modal mass		**Total mass**		**1 st modal mass**		**Total mass**	
			Peak Disp/Height (%)	Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)	Disp./H. (%)	Error (%)
5	**Elcentro 5** (8.35 Elcentro)	**9th**	**5.00**	**4.307**	**-13.84**	**4.633**	**-7.31**	**4.105**	**-17.88**	**4.515**	**-9.67**
		8th	4.22	3.947	-6.37	4.227	0.28	3.773	-10.49	4.126	-2.12
		7th	3.41	3.517	3.18	3.752	10.06	3.372	-1.08	3.667	7.57
		6th	3.01	3.032	0.88	3.222	7.20	2.914	-3.03	3.153	4.91
		5th	2.58	2.484	-3.91	2.631	1.78	2.393	-7.43	2.577	-0.28
		4th	2.05	1.896	-7.71	2.003	-2.48	1.829	-10.94	1.964	-4.37
		3rd	1.46	1.309	-10.12	1.381	-5.18	1.264	-13.18	1.355	-6.97
		2nd	0.90	0.777	-13.92	0.819	-9.27	0.751	-16.80	0.803	-10.95
		1st	0.44	0.349	-20.88	0.368	-16.62	0.337	-23.51	0.361	-18.15
		G	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00

ตารางที่ 5.24 เปรียบเทียบผล Peak Story Drift ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 9 ชั้น)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA)	Energy-Based Analysis (Nonlinear R & μ)				Energy-Based Analysis (Linear R & μ)			
				1 st modal mass		Total mass		1 st modal mass		Total mass	
			Peak Story Drift (%)	Drift (%)	Error (%)	Drift (%)	Error (%)	Drift (%)	Error (%)	Drift (%)	Error (%)
1	**Elcentro 1** (1.15 Elcentro)	**9th**	**1.15**	**0.78**	**-32.17**	**0.85**	**-26.55**	**0.78**	**-32.17**	**0.85**	**-26.55**
		8th	1.28	0.93	-27.04	1.01	-20.94	0.93	-27.04	1.01	-20.94
		7th	1.28	1.00	-21.95	1.09	-15.25	1.00	-21.95	1.09	-15.25
		6th	1.19	1.03	-13.25	1.13	-4.95	1.03	-13.25	1.13	-4.95
		5th	1.12	1.09	-2.35	1.22	9.59	1.09	-2.35	1.22	9.59
		4th	1.19	1.14	-4.47	1.32	10.74	1.14	-4.47	1.32	10.74
		3rd	1.38	1.11	-19.87	1.29	-7.13	1.11	-19.87	1.29	-7.13
		2nd	1.42	1.05	-26.13	1.18	-17.14	1.05	-26.13	1.18	-17.14
		1st	1.10	1.14	3.57	1.25	13.61	1.14	3.57	1.25	13.61
		G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	**Elcentro 2** (3.08 Elcentro)	**9th**	**2.38**	**1.30**	**-45.22**	**1.41**	**-40.61**	**1.08**	**-54.80**	**1.13**	**-52.60**
		8th	2.51	1.73	-31.30	1.88	-25.05	1.38	-45.11	1.47	-41.36
		7th	2.48	2.12	-14.66	2.31	-6.83	1.64	-33.73	1.79	-27.71
		6th	2.61	2.62	0.67	2.85	9.50	2.02	-22.44	2.22	-14.81
		5th	2.54	3.09	21.47	3.32	30.70	2.43	-4.19	2.66	4.69
		4th	2.70	3.31	22.40	3.53	30.53	2.67	-1.17	2.90	7.25
		3rd	2.68	3.13	16.77	3.32	23.90	2.56	-4.29	2.77	3.34
		2nd	2.55	2.61	2.32	2.76	7.92	2.18	-14.66	2.34	-8.45
		1st	1.80	2.27	26.00	2.36	31.41	1.97	9.39	2.08	15.56
		G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 5.24 เปรียบเทียบผล Peak Story Drift ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 9 ชั้น) (ต่อ)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA) Peak Story Drift (%)	Energy-Based Analysis (Nonlinear R & μ) 1 st modal mass Drift (%)	Energy-Based Analysis (Nonlinear R & μ) 1 st modal mass Error (%)	Energy-Based Analysis (Nonlinear R & μ) Total mass Drift (%)	Energy-Based Analysis (Nonlinear R & μ) Total mass Error (%)	Energy-Based Analysis (Linear R & μ) 1 st modal mass Drift (%)	Energy-Based Analysis (Linear R & μ) 1 st modal mass Error (%)	Energy-Based Analysis (Linear R & μ) Total mass Drift (%)	Energy-Based Analysis (Linear R & μ) Total mass Error (%)
3	**Elcentro 3** (4.36 Elcentro)	**9th**	**3.49**	**1.67**	**-52.07**	**1.84**	**-47.22**	**1.36**	**-61.14**	**1.50**	**-57.00**
		8th	3.44	2.25	-34.57	2.46	-28.46	1.80	-47.66	2.01	-41.68
		7th	3.36	2.76	-17.61	3.01	-10.43	2.21	-34.14	2.46	-26.59
		6th	3.36	3.38	0.44	3.64	8.37	2.73	-18.66	3.03	-9.92
		5th	3.69	3.85	4.29	4.11	11.40	3.20	-13.31	3.50	-5.26
		4th	4.08	4.02	-1.45	4.27	4.47	3.42	-16.30	3.69	-9.52
		3rd	3.94	3.74	-4.83	3.95	0.41	3.22	-18.11	3.46	-12.03
		2nd	3.28	3.08	-6.19	3.23	-1.50	2.68	-18.16	2.86	-12.69
		1st	2.02	2.58	27.60	2.69	32.74	2.31	14.42	2.44	20.47
		G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	**Elcentro 4** (5.62 Elcentro)	**9th**	**4.62**	**2.19**	**-52.70**	**2.48**	**-46.38**	**1.71**	**-62.94**	**2.01**	**-56.53**
		8th	4.91	2.82	-42.54	3.12	-36.41	2.31	-52.99	2.64	-46.26
		7th	4.87	3.36	-30.85	3.67	-24.66	2.83	-41.81	3.18	-34.58
		6th	4.74	3.99	-15.79	4.29	-9.57	3.45	-27.17	3.81	-19.52
		5th	4.89	4.44	-9.21	4.72	-3.58	3.93	-19.72	4.28	-12.58
		4th	4.82	4.55	-5.58	4.80	-0.50	4.09	-15.09	4.41	-8.59
		3rd	4.56	4.19	-8.19	4.39	-3.71	3.80	-16.60	4.07	-10.82
		2nd	3.71	3.40	-8.40	3.56	-4.25	3.12	-15.96	3.31	-10.73
		1st	2.24	2.80	25.08	2.91	30.10	2.61	16.69	2.74	22.51
		G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 5.24 เปรียบเทียบผล Peak Story Drift ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 9 ชั้น) (ต่อ)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA) Peak Story Drift (%)	Energy-Based Analysis (Nonlinear R & μ)				Energy-Based Analysis (Linear R & μ)			
				1 st modal mass		Total mass		1 st modal mass		Total mass	
				Drift (%)	Error (%)	Drift (%)	Error (%)	Drift (%)	Error (%)	Drift (%)	Error (%)
5	**Elcentro 5** (8.35 Elcentro)	9th	**7.35**	**3.38**	**-54.03**	**3.81**	**-48.17**	**3.11**	**-57.67**	**3.66**	**-50.28**
		8th	7.56	4.03	-46.75	4.46	-41.06	3.76	-50.27	4.30	-43.11
		7th	6.88	4.56	-33.74	4.98	-27.65	4.30	-37.52	4.82	-29.85
		6th	5.92	5.15	-13.11	5.55	-6.34	4.90	-17.31	5.40	-8.78
		5th	5.76	5.52	-4.21	5.89	2.26	5.29	-8.23	5.76	-0.07
		4th	6.08	5.51	-9.38	5.84	-3.91	5.30	-12.75	5.72	-5.90
		3rd	5.78	4.99	-13.59	5.28	-8.73	4.82	-16.61	5.17	-10.49
		2nd	4.58	4.01	-12.42	4.23	-7.66	3.88	-15.35	4.15	-9.40
		1st	2.99	3.27	9.55	3.45	15.44	3.17	5.90	3.39	13.32
		G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ 5.25 เปรียบเทียบผล Peak Rotation Ductility ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 9 ชั้น)

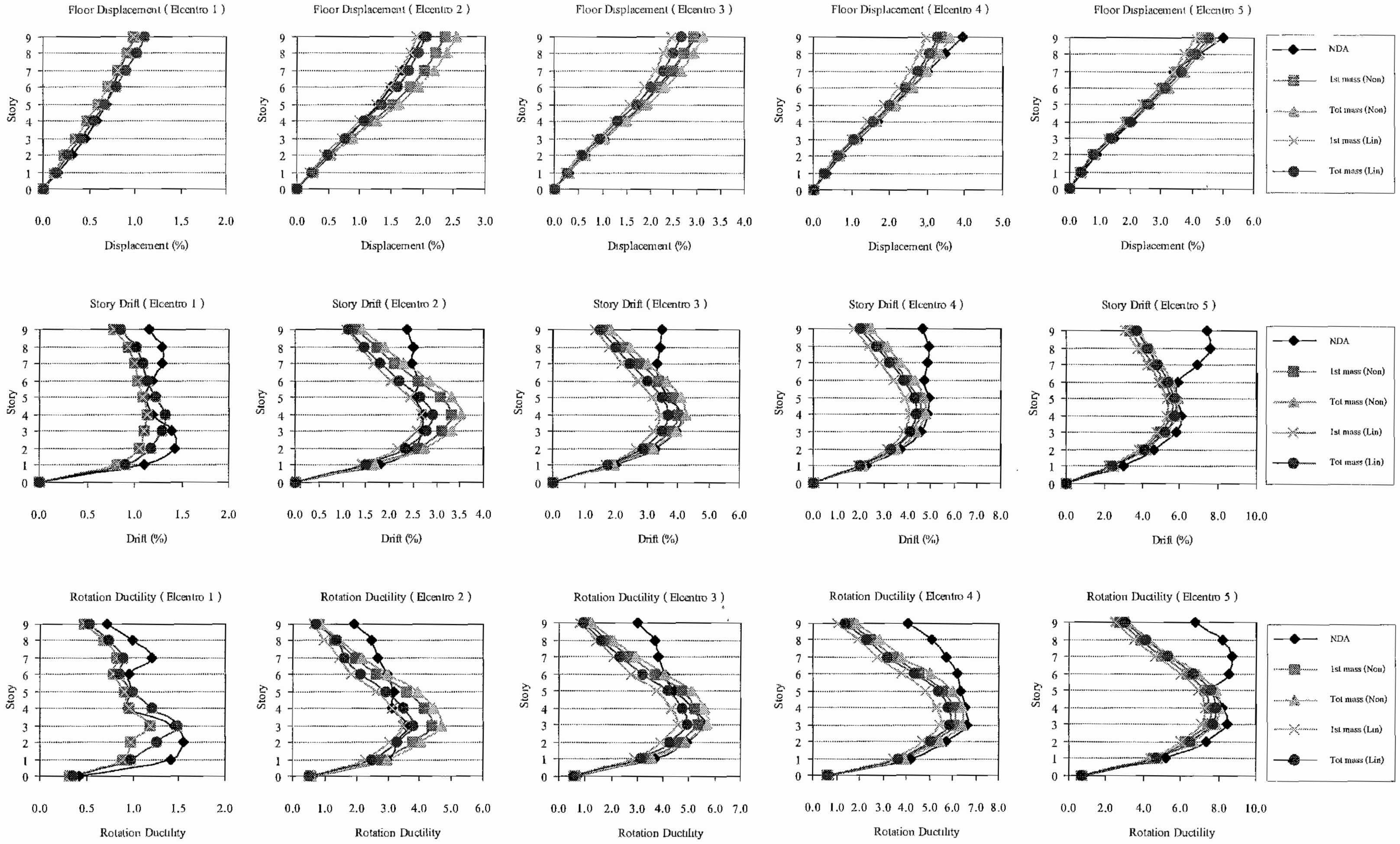
No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA)		Energy-Based Analysis (Nonlinear R & μ)						Energy-Based Analysis (Linear R & μ)					
					1 st modal mass			Total mass			1 st modal mass			Total mass		
			Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)
1	Elcentro 1 (1.15 Elcentro)	9th	0.006958	0.710	0.004652	0.474	-33.14	0.005040	0.514	-27.56	0.004652	0.474	-33.14	0.005040	0.514	-27.56
		8th	0.008452	0.984	0.005857	0.682	-30.71	0.006348	0.739	-24.90	0.005857	0.682	-30.71	0.006348	0.739	-24.90
		7th	0.009409	1.199	0.006384	0.813	-32.15	0.006928	0.882	-26.37	0.006384	0.813	-32.15	0.006928	0.882	-26.37
		6th	0.006322	0.963	0.005128	0.781	-18.89	0.005600	0.853	-11.42	0.005128	0.781	-18.89	0.005600	0.853	-11.42
		5th	0.006456	0.984	0.005887	0.897	-8.82	0.006498	0.990	0.66	0.005887	0.897	-8.82	0.006498	0.990	0.66
		4th	0.006107	0.931	0.006262	0.954	2.55	0.007903	1.204	29.41	0.006262	0.954	2.55	0.007903	1.204	29.41
		3rd	0.009509	1.449	0.007774	1.185	-18.25	0.009662	1.472	1.61	0.007774	1.185	-18.25	0.009662	1.472	1.61
		2nd	0.009953	1.548	0.006281	0.977	-36.90	0.008040	1.251	-19.22	0.006281	0.977	-36.90	0.008040	1.251	-19.22
		1st	0.009036	1.406	0.005725	0.891	-36.64	0.006311	0.982	-30.15	0.005725	0.891	-36.64	0.006311	0.982	-30.15
		G	0.002666	0.415	0.002029	0.316	-23.88	0.002225	0.346	-16.53	0.002029	0.316	-23.88	0.002225	0.346	-16.53
2	Elcentro 2 (3.08 Elcentro)	9th	0.018939	1.931	0.007739	0.789	-59.14	0.008352	0.852	-55.90	0.006444	0.657	-65.97	0.006753	0.689	-64.34
		8th	0.021417	2.492	0.011410	1.328	-46.73	0.012742	1.483	-40.51	0.008300	0.966	-61.24	0.011834	1.377	-44.75
		7th	0.020786	2.648	0.015458	1.969	-25.63	0.017164	2.186	-17.43	0.011484	1.463	-44.75	0.012682	1.616	-38.99
		6th	0.019458	2.965	0.017323	2.640	-10.97	0.019398	2.956	-0.31	0.011960	1.822	-38.53	0.013786	2.101	-29.15
		5th	0.020946	3.192	0.023429	3.570	11.85	0.025716	3.919	22.77	0.017244	2.628	-17.67	0.019338	2.947	-7.68
		4th	0.020606	3.140	0.026972	4.110	30.89	0.029198	4.449	41.70	0.020639	3.145	0.16	0.022871	3.485	10.99
		3rd	0.023593	3.595	0.028668	4.368	21.51	0.030686	4.676	30.06	0.022747	3.466	-3.59	0.024877	3.791	5.44
		2nd	0.021204	3.299	0.024202	3.765	14.14	0.025837	4.019	21.85	0.019303	3.003	-8.97	0.021091	3.281	-0.53
		1st	0.019121	2.975	0.017977	2.797	-5.98	0.019109	2.973	-0.06	0.014532	2.261	-24.00	0.015802	2.458	-17.36
		G	0.003977	0.619	0.003491	0.543	-12.22	0.003608	0.561	-9.29	0.003131	0.487	-21.27	0.003265	0.508	-17.90

ตารางที่ 5.25 เปรียบเทียบผล Peak Rotation Ductility ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 9 ชั้น) (ต่อ)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA)		Energy-Based Analysis (Nonlinear R & μ)						Energy-Based Analysis (Linear R & μ)					
					1 st modal mass			Total mass			1 st modal mass			Total mass		
			Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)
3	**Elcentro 3** (4.36 Elcentro)	9th	0.02957	3.016	0.009947	1.014	-66.36	0.012039	1.228	-59.29	0.008028	0.819	-72.85	0.008830	0.901	-70.14
		8th	0.031658	3.684	0.015863	1.846	-49.89	0.017695	2.059	-44.11	0.012035	1.400	-61.99	0.013785	1.604	-56.46
		7th	0.029694	3.783	0.021155	2.695	-28.76	0.023368	2.977	-21.30	0.016261	2.071	-45.24	0.018497	2.356	-37.71
		6th	0.026701	4.069	0.024167	3.682	-9.49	0.026641	4.059	-0.22	0.018318	2.791	-31.40	0.020992	3.199	-21.38
		5th	0.028900	4.404	0.030898	4.708	6.91	0.033499	5.104	15.91	0.024541	3.739	-15.08	0.027449	4.183	-5.02
		4th	0.033844	5.157	0.034211	5.213	1.08	0.036682	5.589	8.39	0.028062	4.276	-17.08	0.030875	4.705	-8.77
		3rd	0.036580	5.574	0.035209	5.365	-3.75	0.037411	5.701	2.27	0.029661	4.520	-18.91	0.032199	4.906	-11.98
		2nd	0.031503	4.901	0.029491	4.588	-6.39	0.031255	4.862	-0.79	0.025008	3.890	-20.62	0.027059	4.210	-14.11
		1st	0.023560	3.665	0.021633	3.365	-8.18	0.022842	3.554	-3.05	0.018536	2.884	-21.32	0.019954	3.104	-15.31
		G	0.004255	0.662	0.003867	0.602	-9.11	0.003991	0.621	-6.21	0.003549	0.552	-16.60	0.003694	0.575	-13.18
4	**Elcentro 4** (5.62 Elcentro)	9th	0.039819	4.061	0.015495	1.580	-61.09	0.018316	1.868	-54.00	0.010449	1.066	-73.76	0.013785	1.406	-65.38
		8th	0.043719	5.087	0.021139	2.460	-51.65	0.024034	2.797	-45.03	0.016340	1.901	-62.63	0.019385	2.256	-55.66
		7th	0.044819	5.709	0.026882	3.424	-40.02	0.029831	3.800	-33.44	0.021760	2.772	-51.45	0.025098	3.197	-44.00
		6th	0.040933	6.237	0.030080	4.583	-26.51	0.032972	5.024	-19.45	0.024862	3.788	-39.26	0.028338	4.318	-30.77
		5th	0.041695	6.353	0.036799	5.607	-11.74	0.039583	6.032	-5.07	0.031642	4.822	-24.11	0.035130	5.353	-15.75
		4th	0.043151	6.575	0.039673	6.045	-8.06	0.042213	6.432	-2.17	0.034923	5.321	-19.07	0.038162	5.815	-11.56
		3rd	0.043361	6.607	0.039977	6.092	-7.80	0.042180	6.427	-2.72	0.035848	5.462	-17.33	0.038683	5.894	-10.79
		2nd	0.036789	5.723	0.033256	5.174	-9.60	0.035003	5.445	-4.85	0.030004	4.668	-18.44	0.032246	5.016	-12.35
		1st	0.026875	4.181	0.024184	3.762	-10.01	0.025424	3.955	-5.40	0.021986	3.420	-18.19	0.023508	3.657	-12.53
		G	0.004606	0.716	0.004125	0.642	-10.43	0.004243	0.660	-7.87	0.003903	0.607	-15.25	0.004057	0.631	-11.91

ตารางที่ 5.25 เปรียบเทียบผล Peak Rotation Ductility ของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 9 ชั้น) (ต่อ)

No.	Earthquake (scale)	Floor	Nonlinear Dynamic Analysis (NDA)		Energy-Based Analysis (Nonlinear R & μ)						Energy-Based Analysis (Linear R & μ)					
					1 st modal mass			Total mass			1 st modal mass			Total mass		
			Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)	Rad. (θ)	Duct. (μ_θ)	Error (%)
5	**Elcentro 5** (8.35 Elcentro)	**9th**	0.066276	6.759	0.027056	2.759	-59.18	0.031240	3.186	-52.86	0.024460	2.494	-63.09	0.029734	3.032	-55.14
		8th	0.070596	8.215	0.032862	3.824	-53.45	0.037060	4.313	-47.50	0.030258	3.521	-57.14	0.035549	4.137	-49.64
		7th	0.068158	8.683	0.038619	4.920	-43.34	0.042758	5.447	-37.27	0.036053	4.593	-47.10	0.041267	5.257	-39.45
		6th	0.055969	8.528	0.041451	6.316	-25.94	0.045415	6.920	-18.86	0.038993	5.942	-30.33	0.043985	6.702	-21.41
		5th	0.050988	7.769	0.047668	7.264	-6.51	0.051431	7.837	0.87	0.045337	6.908	-11.08	0.050072	7.630	-1.80
		4th	0.053762	8.192	0.049574	7.554	-7.79	0.053000	8.076	-1.42	0.047454	7.231	-11.73	0.051761	7.887	-3.72
		3rd	0.055693	8.486	0.048588	7.404	-12.76	0.051572	7.858	-7.40	0.046743	7.123	-16.07	0.050491	7.694	-9.34
		2nd	0.047289	7.357	0.040168	6.249	-15.06	0.042614	6.629	-9.89	0.038661	6.014	-18.25	0.041723	6.491	-11.77
		1st	0.033317	5.183	0.029134	4.532	-12.56	0.030812	4.793	-7.52	0.028098	4.371	-15.66	0.030202	4.699	-9.35
		G	0.004960	0.772	0.004481	0.697	-9.66	0.004486	0.698	-9.56	0.004478	0.697	-9.72	0.004484	0.698	-9.60



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลของวิธี Energy-Based Analysis (อาคาร 9 ชั้น)

ตารางที่ 5.26 ความแตกต่างของค่า Floor Displacement ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 9 ชั้น

Earthquake	Floor Displacement					
	Energy Based Analysis (Nonlinear R & μ)		Energy Based Analysis (Linear R & μ)		Modal Pushover Analysis	
	1 st Mass	Total Mass	1 st Mass	Total Mass	1 Mode	3 Mode
Elcentro 1	0 - 26 (13.0 %)	2 - 18 (10.8 %)	1 - 26 (13.0 %)	2 - 18 (10.8 %)	2 - 27 (14.9 %)	1 - 20 (11.6 %)
Elcentro 2 - 5	0 - 21 (8.5 %)	0 - 29 (8.6 %)	1 - 25 (12.8 %)	0 - 18 (8.4 %)	0 - 30 (13.9 %)	0 - 26 (13.9 %)

ตารางที่ 5.27 ความแตกต่างของค่า Story Drift ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 9 ชั้น

Earthquake	Story Drift					
	Energy Based Analysis (Nonlinear R & μ)		Energy Based Analysis (Linear R & μ)		Modal Pushover Analysis	
	1 st Mass	Total Mass	1 st Mass	Total Mass	1 Mode	3 Mode
Elcentro 1	2 - 32 (16.8 %)	5 - 27 (14.0 %)	2 - 32 (16.8 %)	5 - 27 (14.0 %)	4 - 33 (20.8 %)	0 - 22 (9.3 %)
Elcentro 2 - 5	0 - 54 (20.1 %)	0 - 48 (18.7 %)	1 - 63 (25.6 %)	0 - 57 (21.2 %)	1 - 67 (20.2 %)	0 - 34 (13.7 %)

ตารางที่ 5.28 ความแตกต่างของค่า Rotation Ductility ระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis กับวิธี NDA สำหรับอาคาร 9 ชั้น

Earthquake	Rotation Ductility					
	Energy Based Analysis (Nonlinear R & μ)		Energy Based Analysis (Linear R & μ)		Modal Pushover Analysis	
	1 st Mass	Total Mass	1 st Mass	Total Mass	1 Mode	3 Mode
Elcentro 1	2 - 37 (24.2 %)	0 - 30 (19.0 %)	2 - 37 (24.2 %)	0 - 30 (19.0 %)	0 - 38 (25.5 %)	2 - 35 (14.6 %)
Elcentro 2 - 5	1 - 67 (24.2 %)	0 - 60 (20.6 %)	0 - 74 (32.3 %)	0 - 70 (25.4 %)	1 - 73 (24.7 %)	0 - 38 (14.7 %)

จากผลการเปรียบเทียบค่าต่างๆจากการวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 9 ชั้นด้วยวิธี Energy Based Analysis ทั้ง 4 กรณีจะได้ว่า

การใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R&μ แบบไม่เชิงเส้นจะให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับวิธี NDA มากกว่าการใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R&μ แบบเชิงเส้นโดยที่การใช้มวลทั้งหมดในการวิเคราะห์จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับวิธีNDA มากกว่าการใช้มวลประสิทธิผลของโหมดแรกในการวิเคราะห์ดังนี้

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R&μ แบบไม่เชิงเส้นและใช้มวลประสิทธิผลของโหมดแรกในการวิเคราะห์ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Elcentro 1 ให้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง(Floor Displacement)แตกต่างกับวิธีNDA ประมาณ 1-26 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 13.0 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Story Drift แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 2-32 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 16.8 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 2-37 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 24.2 เปอร์เซ็นต์)

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R&μ แบบไม่เชิงเส้นและใช้มวลทั้งหมดในการวิเคราะห์ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Elcentro 1 ให้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Floor Displacement)แตกต่างกับวิธีNDA ประมาณ 2-18 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 10.8 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Story Drift แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 5-27 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 14.0 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-30 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 19.0 เปอร์เซ็นต์)

สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบเชิงเส้นภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Elcentro 1 ให้ผลค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง , Story Drift และ Rotation Ductility เท่ากันกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบไม่เชิงเส้นภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Elcentro 1

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบไม่เชิงเส้นและใช้มวลของโหมดแรกในการวิเคราะห์ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Elcentro 2 ถึง Elcentro 5 ให้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Floor Displacement) แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-21 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 8.5 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Story Drift แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-54 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 20.1 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 1-67 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 24.2 เปอร์เซ็นต์)

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบไม่เชิงเส้นและใช้มวลทั้งหมดในการวิเคราะห์ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Elcentro 2 ถึง Elcentro 5 ให้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Floor Displacement) แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-29 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่าง

เฉลี่ยเท่ากับ 8.6 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Story Drift แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-48 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 18.7 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-60 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 20.6 เปอร์เซ็นต์)

การวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบเชิงเส้นและใช้มวลของโหมดแรกในการวิเคราะห์ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Elcentro 2 ถึง Elcentro 5 ให้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Floor Displacement) แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 1-25 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 12.8 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Story Drift แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 1-63 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 25.6 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-74 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 32.3 เปอร์เซ็นต์)

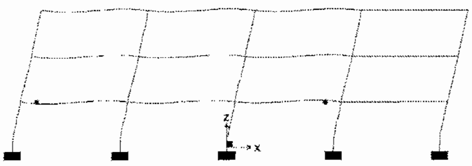
การวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบไม่เชิงเส้นและใช้มวลทั้งหมดในการวิเคราะห์ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Elcentro 2 ถึง Elcentro 5 ให้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Floor Displacement) แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-18 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 8.4 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Story Drift แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-57 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 21.2 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่า Rotation Ductility แตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-70 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 25.6 เปอร์เซ็นต์)

5.3 การเปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก

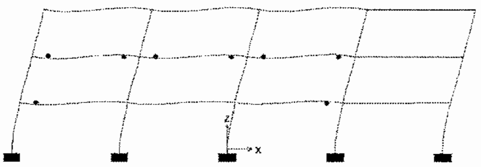
ในหัวข้อนี้จะได้ทำการเปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก(Plastic Hinge)ของโครงสร้างอาคาร 3 ชั้นและโครงสร้างอาคาร 9 ชั้น เมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น(NSA) กับเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น(NDA) โดยพิจารณาเปรียบเทียบที่การเคลื่อนตัวของชั้นหลังคาของโครงสร้างเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้นมีค่าเท่ากับการเคลื่อนตัวของชั้นหลังคาของโครงสร้างเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น

5.3.1 การเปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติกของอาคาร 3 ชั้น

ตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก(Plastic Hinge)ของโครงสร้างอาคาร3 ชั้นเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น ที่ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว(Elcentro)ห้าระดับคือ 0.88 , 2.19 , 3.05 , 3.72 และ 4.38 เท่าของElcentro โดยพิจารณาช่วงเวลาที่ชั้นหลังคาเกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุด แล้วเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น ที่การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคามีค่าเท่ากัน แสดงดังรูปที่ 5.5 ถึง 5.9

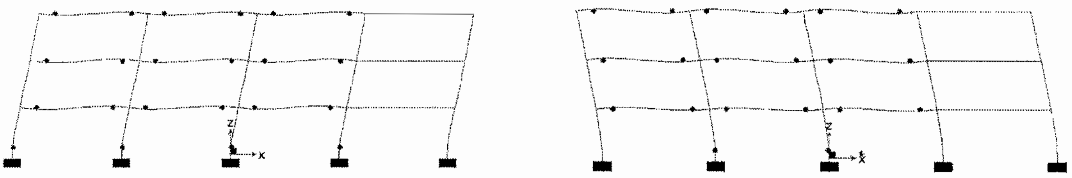


NSA



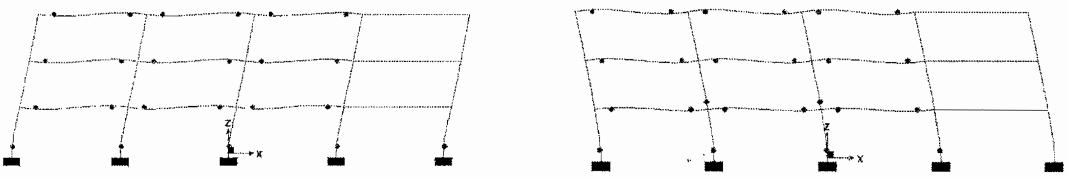
NDA

รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก(Plastic Hinge)ของอาคาร3ชั้นที่ระดับความรุนแรง 0.88 Elcentro (Elcentro1) ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA



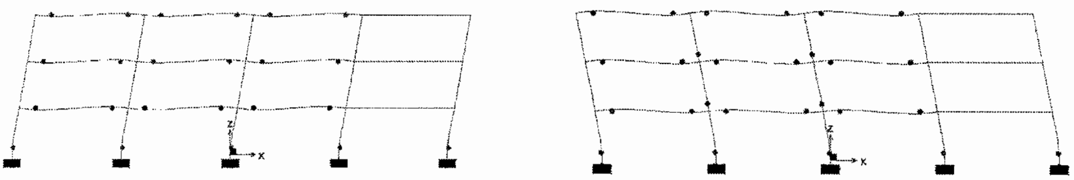
NSA NDA

รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก(Plastic Hinge)ของอาคาร3ชั้นที่ระดับความรุนแรง 2.19 Elcentro (Elcentro2) ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA



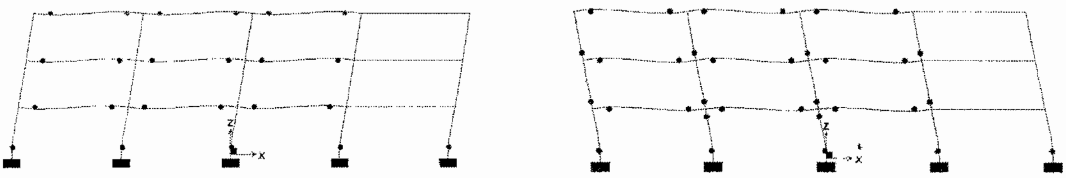
NSA NDA

รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก(Plastic Hinge)ของอาคาร3ชั้นที่ระดับความรุนแรง 3.05 Elcentro (Elcentro3) ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA



NSA NDA

รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก(Plastic Hinge)ของอาคาร3ชั้นที่ระดับความรุนแรง 3.72 Elcentro (Elcentro4) ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA

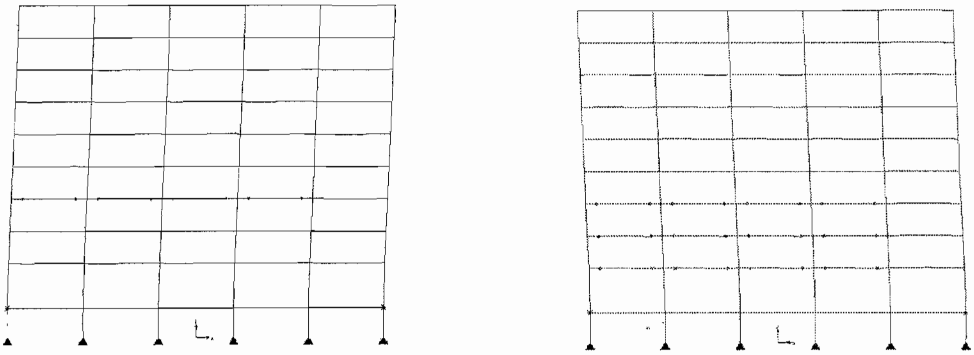


NSA NDA

รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก(Plastic Hinge)ของอาคาร3ชั้นที่ระดับความรุนแรง 4.38 Elcentro (Elcentro5) ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA

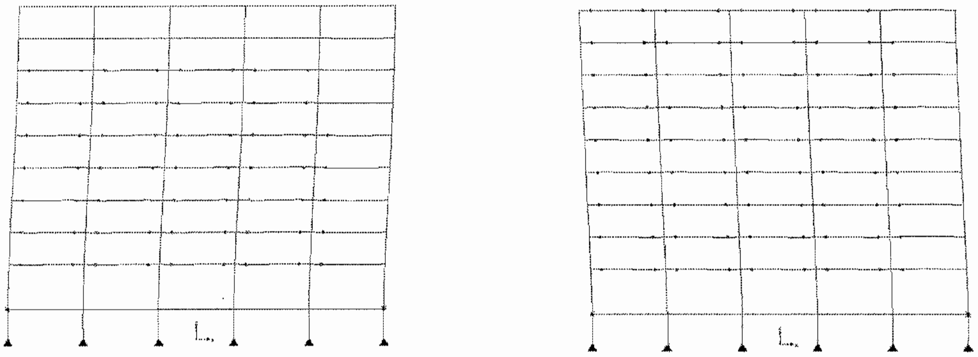
5.3.2 การเปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติกของอาคาร 9 ชั้น

ตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก(Plastic Hinge)ของอาคาร9 ชั้นเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น ที่ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว(Elcentro)ห้าระดับคือ 1.15 , 3.08 , 4.36 , 5.62 และ 8.35 เท่าของElcentro โดยพิจารณาช่วงเวลาที่ชั้นหลังคาเกิดการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดแล้วเปรียบเทียบกับวิธีสถิตไม่เชิงเส้น ที่การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคามีค่าเท่ากัน แสดงดังรูปที่ 5.10 ถึง 5.14



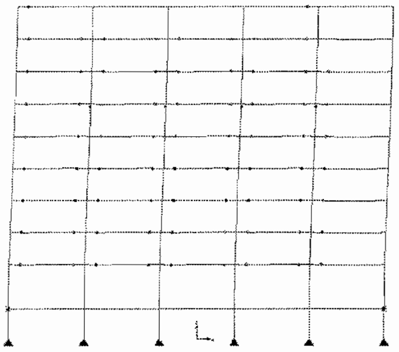
NSA NDA

รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก(Plastic Hinge)ของอาคาร9ชั้นที่ระดับความรุนแรง 1.15 Elcentro (Elcentro1) ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA

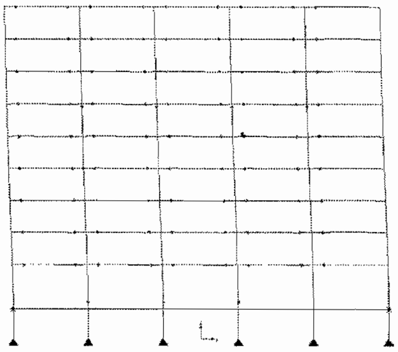


NSA NDA

รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก(Plastic Hinge)ของอาคาร9ชั้นที่ระดับความรุนแรง 3.08 Elcentro (Elcentro2) ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA

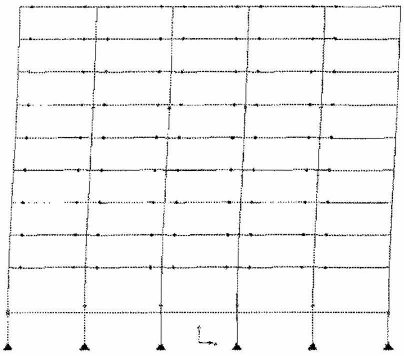


NSA

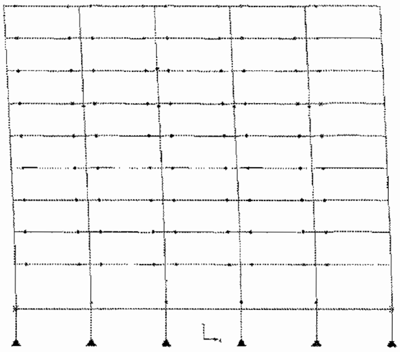


NDA

รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก(Plastic Hinge)ของอาคาร9ชั้นที่ระดับความรุนแรง 4.36 Elcentro (Elcentro3) ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA

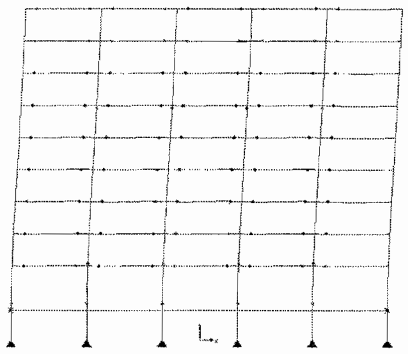


NSA

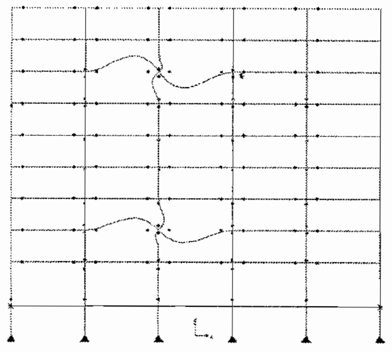


NDA

รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก(Plastic Hinge)ของอาคาร9ชั้นที่ระดับความรุนแรง 5.62 Elcentro (Elcentro4) ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA



NSA



NDA

รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดจุดหมุนพลาสติก(Plastic Hinge)ของอาคาร9ชั้นที่ระดับความรุนแรง 8.35 Elcentro (Elcentro5) ระหว่างวิธี NSA และวิธี NDA

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย

6.1 สรุปผลการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น กับวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น

จากการศึกษาผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น(Nonlinear Static Procedure) ทั้งสี่วิธีคือ 1. วิธี Displacement Coefficient 2. วิธี Capacity Spectrum 3. วิธี Energy-Based Analysis 4. วิธี Modal Pushover Analysis โดยใช้แบบจำลองอาคารเหล็กสูง 3 ชั้นและ 9 ชั้นตามลำดับ ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Elcentro 1940 NS ที่ใช้ตัวคูณปรับระดับความรุนแรงให้เป็นห้าระดับต่างๆกัน ได้ผลสรุปดังนี้

1. ที่ระดับความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวมีค่าต่ำ(ในงานวิจัยนี้คือผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างประมาณหนึ่งเปอร์เซ็นต์) การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างยังคงอยู่ในช่วงอีลาสติก การประเมินค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างโดยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น ทั้งสี่วิธีให้ผลที่ใกล้เคียงกันมาก และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น(Nonlinear Dynamic Analysis) แล้วมีความใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะอาคารสูง 3 ชั้นซึ่งการเคลื่อนตัวทางด้านข้างจะถูกครอบคลุมโดยโหมดที่หนึ่ง จะมีความถูกต้องใกล้เคียงกันมาก

2. ที่ระดับความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวมีค่าสูง(ในงานวิจัยนี้คือผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างตั้งแต่สองถึงห้าเปอร์เซ็นต์) การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างจะเกินขอบเขตอีลาสติก เกิดจุดหมุนพลาสติก(plastic hinge) ขึ้นในชิ้นส่วนโครงสร้าง การประเมินค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างโดยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น ทั้งสี่วิธีเปรียบเทียบกับวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น(NDA) แล้วให้ผลที่แตกต่างกันมากขึ้นตามความรุนแรงของแผ่นดินไหว โดยวิธี Capacity Spectrum ให้ค่าต่ำสุดและต่ำกว่าวิธี NDA ประมาณ 25-55 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 43.5 เปอร์เซ็นต์) สำหรับอาคารสูง3ชั้น และต่ำกว่าประมาณ 5-31 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 19.8 เปอร์เซ็นต์) สำหรับอาคารสูง 9ชั้น วิธี Displacement Coefficient ให้ค่าสูงที่สุดและสูงกว่าวิธี NDA ประมาณ 12-35 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 20.3 เปอร์เซ็นต์) สำหรับอาคารสูง3ชั้น และสูงกว่าประมาณ 3-75 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 33.3 เปอร์เซ็นต์) สำหรับอาคารสูง9ชั้น วิธี Energy-Based Analysis ให้ค่าใกล้เคียงกับวิธี NDA มากกว่าเนื่องจากเป็นการใช้หลักการของพลังงานร่วมกับความสัมพันธ์ระหว่าง Strength Reduction Factor กับ Ductility (R&μ) โดยมีความแตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 1-32 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 12.0 เปอร์เซ็นต์) สำหรับอาคารสูง 3

ชั้น และแตกต่างประมาณ 1-25 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 12.8 เปอร์เซ็นต์) สำหรับอาคารสูง 9 ชั้น วิธี Modal Pushover Analysis ให้ค่าใกล้เคียงกับวิธี NDA มากที่สุดเนื่องจากเป็นการรวมผลหลายโหมด โดยมีความแตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-12 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 4.4 เปอร์เซ็นต์) สำหรับอาคารสูง 3 ชั้น และประมาณ 0-26 เปอร์เซ็นต์(ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 13.9 เปอร์เซ็นต์) สำหรับอาคารสูง 9 ชั้น

สำหรับวิธี Modal Pushover Analysis นั้นเมื่อพิจารณาเฉพาะผลของโหมดแรกเพียงโหมดเดียวแล้วก็ยังคงให้ค่าใกล้เคียงกับวิธี NDA มากกว่าวิธี Displacement Coefficient และวิธี Capacity Spectrum โดยมีความแตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-9 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 3.5 เปอร์เซ็นต์) สำหรับอาคารสูง 3 ชั้นและประมาณ 0-30 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 13.9 เปอร์เซ็นต์)สำหรับอาคารสูง 9 ชั้น

3. ที่ระดับความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวมีค่าสูงมาก (ในงานวิจัยนี้คือผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างประมาณห้าเปอร์เซนต์) การเคลื่อนตัวด้านข้างของโครงสร้างจะเกินขอบเขตอีลาสติกมาก เกิดจุดหมุนพลาสติกขึ้นในชิ้นส่วนโครงสร้างมาก การประเมินค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างทั้งวิธี NSA และวิธี NDA มีความแปรปรวนค่อนข้างมาก โดยเฉพาะกับอาคารสูง9ชั้นซึ่งผลตอบสนองจะถูกครอบคลุมโดยโหมดลำดับที่สูงขึ้น จึงให้ผลการประเมินที่ไม่ค่อยสอดคล้องกับผลที่ประเมินที่ระดับความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวมีค่าไม่สูงนัก

4. การเปรียบเทียบผลการประเมินค่า Story Drift และ Rotation Ductility โดยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น (NSA) ทั้งสี่วิธี เปรียบเทียบกับวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (NDA) ที่ทุกระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว พบว่า

ที่ระดับความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวมีค่าต่ำ (ในงานวิจัยนี้คือผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างประมาณหนึ่งเปอร์เซ็นต์) การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างยังคงอยู่ในช่วงอีลาสติก ผลการประเมินค่า Story Drift และ Rotation Ductility โดยวิธี NSA ทั้งสี่วิธี สำหรับอาคารสูง 3 ชั้นมีค่าใกล้เคียงกันมากและใกล้เคียงกับการประเมินโดยวิธี NDA สำหรับอาคารสูง 9 ชั้นการประเมินโดยวิธี Modal Pushover Analysis จะให้ค่าใกล้เคียงกับวิธี NDA มากที่สุด ส่วนการประเมินด้วยวิธีNSAอีกสามวิธี มีค่าใกล้เคียงกันมากและมีความแตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 2-19 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 9.4 เปอร์เซ็นต์) สำหรับอาคารสูง 3 ชั้น และมีค่าแตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-38 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 20.0 เปอร์เซ็นต์) สำหรับอาคารสูง 9 ชั้น

ที่ระดับความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวมีค่าสูง (ในงานวิจัยนี้คือผลการเคลื่อนตัวทางด้านข้างตั้งแต่สองถึงห้าเปอร์เซ็นต์) การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างจะเกินขอบเขตอีลาสติก ผลการประเมินค่า Story Drift และ Rotation Ductility โดยวิธี NSAทั้งสี่วิธีเปรียบเทียบกับวิธีNDAแล้วให้ผลที่แตกต่างกัน โดยวิธี Capacity Spectrum ให้ค่าต่ำที่สุด และต่ำกว่าวิธี NDA ประมาณ 26-68 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 50.7 เปอร์เซ็นต์) สำหรับอาคารสูง 3 ชั้นและต่ำกว่าวิธี NDA ประมาณ 1-77 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 35.4 เปอร์เซ็นต์) สำหรับอาคารสูง 9 ชั้น วิธี Displacement Coefficient ให้ค่าสูงที่สุด โดยมีความแตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 1-35 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 14.0 เปอร์เซ็นต์) สำหรับอาคารสูง 3 ชั้น และแตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-78 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 29.8 เปอร์เซ็นต์) สำหรับอาคารสูง 9 ชั้น วิธี Energy-Based Analysis ให้ค่าใกล้เคียงกับวิธี NDA ดีกว่าสองวิธีแรกเล็กน้อยโดยมีความแตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 2-32 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 13.6 เปอร์เซ็นต์) สำหรับอาคารสูง 3 ชั้นและแตกต่างประมาณ 0-74 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 29.0 เปอร์เซ็นต์) สำหรับอาคารสูง 9 ชั้น วิธี Modal Pushover Analysis ให้ค่าใกล้เคียงกับวิธี NDA มากที่สุดเนื่องจากเป็นการรวมผลหลายโหมด โดยมีความแตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-38 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 12.8 เปอร์เซ็นต์) สำหรับอาคารสูง 3 ชั้นและ 9 ชั้น

สำหรับวิธี Modal Pushover Analysis นั้นเมื่อพิจารณาเฉพาะผลของโหมดแรกเพียงโหมดเดียวแล้วก็ยังคงให้ค่าใกล้เคียงกับวิธี NDA มากกว่าวิธี Displacement Coefficient และวิธี Capacity Spectrum โดยมีความแตกต่างกับวิธี NDA ประมาณ 0-38 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 12.2 เปอร์เซ็นต์) สำหรับอาคารสูง 3 ชั้นและแตกต่างประมาณ 1-73 เปอร์เซ็นต์ (ค่าความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ 22.5 เปอร์เซ็นต์) สำหรับอาคารสูง 9 ชั้น

ข้อเสนอแนะสำหรับการนำวิธีสถิตไม่เชิงเส้นไปใช้งานคือ วิธี Displacement Coefficient จะใช้ได้ง่ายกว่าและสะดวกในการคำนวณมากกว่าวิธีสถิตไม่เชิงเส้นอื่นๆ แต่มีข้อพิจารณาคือที่ระดับความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวมีค่าสูง ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Displacement Coefficient จะให้ค่าที่สูงกว่าวิธีสถิตไม่เชิงเส้นอื่นๆ (พิจารณาจากผลการวิจัยนี้) ซึ่งอาจจะทำให้การออกแบบไม่ประหยัด
ส่วนการนำวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นไปใช้งานจะไม่ค่อยสะดวกเนื่องจากต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์นานและต้องการข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวจำนวนมาก

6.2 สรุปผลการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธี Energy Based Analysis กับ วิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น

จากการศึกษาผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบการประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว ด้วยวิธี Energy Based Analysis ทั้งสี่กรณีคือ

1. วิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ เป็นแบบเชิงเส้นโดยใช้มวลประสิทธิผลของโหมดแรกในการวิเคราะห์
2. วิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ เป็นแบบเชิงเส้นโดยใช้มวลทั้งหมดในการวิเคราะห์
3. วิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ เป็นแบบไม่เชิงเส้นโดยใช้มวลประสิทธิผลของโหมดแรกในการวิเคราะห์
4. วิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ เป็นแบบไม่เชิงเส้นโดยใช้มวลทั้งหมดในการวิเคราะห์ โดยใช้แบบจำลองอาคารเหล็กสูง 3 ชั้นและ 9 ชั้น ตามลำดับภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Elcentro 1940 NS ที่ใช้ตัวคูณปรับระดับความรุนแรงให้เป็นห้าระดับต่างๆกันได้ผลสรุปดังนี้

1. การวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 3 ชั้น และอาคาร 9 ชั้น โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบไม่เชิงเส้นจะให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับวิธี NDA มากกว่าเนื่องจากการวิเคราะห์โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่าง R & μ แบบไม่เชิงเส้น จะได้เส้นกราฟ Energy Demand Curve ที่ถูกต้องมากกว่า

2. การวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 3 ชั้น โดยใช้มวลประสิทธิผลของโหมดแรกในการวิเคราะห์จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับวิธี NDA มากกว่าการใช้มวลทั้งหมดในการวิเคราะห์ เนื่องจากผลตอบสนองต่อคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับอาคาร 3 ชั้นจะถูกครอบคลุมโดยโหมดที่หนึ่งมากกว่า

3. การวิเคราะห์โครงสร้างอาคาร 9 ชั้น โดยใช้มวลทั้งหมดในการวิเคราะห์จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับวิธี NDA มากกว่าการใช้มวลประสิทธิผลของโหมดแรกในการวิเคราะห์ เนื่องจากผลตอบสนองต่อคลื่นแผ่นดินไหวสำหรับอาคาร 9 ชั้นจะถูกครอบคลุมโดยโหมดลำดับที่สูงขึ้นด้วย

6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยต่อไปในอนาคต

ในการทำวิจัยนี้ ผลการประเมินการเคลื่อนตัวด้านข้างโดยวิธี Energy-Based Analysis และวิธี Modal Pushover Analysis ให้ผลใกล้เคียงกับวิธี NDA มากกว่าวิธีอื่น ส่วนการประเมินค่า Story Drift และ Rotation Ductility นั้น วิธี Modal Pushover Analysis ให้ผลใกล้เคียงกับวิธี NDA มากที่สุดเนื่องจากเป็นการรวมผลหลายโหมด ดังนั้นการวิจัยเกี่ยวกับการประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น เช่นวิธี Energy-Based Analysis น่าจะสามารถพัฒนาทฤษฎีรวมทั้งระเบียบวิธีการให้สามารถใช้ผลลัพธ์จากการรวมผลหลายโหมด ซึ่งน่าจะให้ผลของ Floor Displacement , Story Drift , Rotation Ductility ใกล้เคียงกับวิธี NDA มากกว่านี้

เอกสารอ้างอิง

1. ATC-40, 1996, "**Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings**", Applied Technology Council, Redwood City, California.

2. Acharya, S.R., 2004, "**Evaluation of The Modal Pushover Analysis Procedure Using Inelastic Modal Decomposition**", Master of Engineering Thesis, Civil Engineering Program, Asian Institute of Technology , Thailand, pp. 1-15

3. Bozorgnia, Y. and Bertero, V.V., 2004, "**Earthquake Engineering : From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering**", CRC Press, Florida, USA.

4. Chintanapakdee, C., 2002, "**Evaluation of The Modal Pushover Analysis Procedure Using Vertically Regular and Irregular Generic Frames**", Doctor of Engineering Dissertation, Civil and Environmental Engineering Program, University of California , Berkeley.

5. Chintanapakdee, C. and Chopra, A.K., 2003, "Evaluation of Modal Pushover Analysis Using Generic Frame", **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, January, pp. 417-442.

6. Chopra, A.K., 2001, "**Dynamics of Structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering**", 2nd ed., Prentice-Hall , New Jersey.

7. Chopra, A.K. and Chintanapakdee, C., 2004, "Evaluation of Modal and FEMA Pushover Analyses : Vertically Regular and Irregular Generic Frame", **Earthquake Spectra**, Vol. 20, No.1, pp. 255-271.

8. Chopra, A.K. and Goel, R.K., 1999, "Capacity – Demand Diagram Methods Based on Inelastic Design Spectrum", **Earthquake Spectra**, Vol. 15, No. 4, November , pp. 637-655.

9. Chopra, A.K. and Goel, R.K., 2001, "**A Modal Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Demands for Buildings**", Report No. PEER-2001/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

10. Chopra, A.K. and Goel, R.K., 2002, "A Modal Pushover Analysis Procedure for Estimate Seimic Demands for Building", **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, December 2001, pp. 561-582.

11. Computer and Structures, 2000, **SAP 2000 Nonlinear** , Berkeley , USA.

12. FEMA 273, 1997, "**NEHRP Guidelines for The Seismic Rehabilitation of Building**", Federal Emergency Management Agency, Washing ton D.C.

13. FEMA 440, 2006, "**Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures**", Federal Emergency Management Agency, Washing ton D.C.

14. Hachem, M.M., 2004, **BISPEC : Bidirectional Linear and Nonlinear Spectra of Earthquakes** , Dept. of Civil Engineering, University of California, Berkeley.

15. Krawinkler, H. and Gupta, A., "Story Drift Demand for Steel Moment Frame Structures in Different Seismic Regions", **6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering**.

16. Leelataviwat, S. and Saewan, W., 2007, "**Energy Based Analysis Procedure for Performance Based Design and Evaluation of Structures**", Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand.

17. Montes, E.H., 2004, "An Energy-Based Formulation for First and Multiple Mode Nonlinear Static(Pushover) Analysis", **Journal of Earthquake Engineering**, Vol. 8, No. 1, pp. 69-88.

18. Naeim, F., 2001, "**The Seismic Design Handbook**", 2nd ed., Kluwer Academic Publishers , Massachusetts.

19. SAC , 1997, **SAC Joint Venture**, U.S.A., Available : http://quiver.eerc.berkeley.edu

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยวิธี Displacement Coefficient

ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยวิธี Displacement Coefficient สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว 3.05 เท่าของ Elcentro (Elcentro 3)

คาบการแกว่งตามธรรมชาติในช่วงอีลาสติก , T_i = 1.073 วินาที

จากกราฟ Bilinear Pushover Curve (รูปที่ 3.6) ค่าสติฟเนสทางด้านข้างของอาคารในช่วงอีลาสติก(K_i) มีค่าเท่ากับค่าสติฟเนสประสิทธิผลทางด้านข้างของอาคาร(K_e)

จะได้คาบการแกว่งตามธรรมชาติประสิทธิผลคำนวณตามสมการที่ 2.2

$$T_e = 1.073 \times \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} = 1.073 \text{ วินาที}$$

ค่าคาบการแกว่งประสิทธิผลที่ระดับความรุนแรง 3.05 Elcentro คำนวณโดยโปรแกรม BISPEC มีค่า S_a = 1.121 g

ค่าแฟคเตอร์ร่วมของโหมดแรก (Γ_1) คำนวณตามสมการที่ 2.8

$$\Gamma_1 = \frac{478.9x10^3 x1.000 + 478.9x10^3 x2.357 + 518.6x10^3 x3.542}{478.9x10^3 x1.000^2 + 478.9x10^3 x2.357^2 + 518.6x10^3 x3.542^2} = 0.3571$$

ค่าสัมประสิทธิ์ C_0 คำนวณตามสมการที่ 2.3

$$C_0 = \Gamma_1 \phi_{roof,1}$$

$$= 0.3571 \times 3.542 = 1.26485$$

ค่าสัมประสิทธิ์ C_1 = 1.0 เนื่องจากเมื่อดูจากสเปคตรัมผลตอบสนองตามรูปที่3.7 แล้ว T_e = 1.073 วินาที มีค่าเกินช่วงความเร่งคงที่

ค่าสัมประสิทธิ์ C_2 = 1.05 เนื่องจากเป็นโครงสร้างประเภทที่ 1 ซึ่งค่า T_e = 1.073 วินาทีมีค่าเกินช่วงความเร่งคงที่ และการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างอยู่ระหว่างช่วง Immediate Occupancy และ Life Safety

ค่าสัมประสิทธิ์ C_3 = 1.0 เนื่องจากค่าสติฟเนสของอาคารหลังการคลากยังเป็นบวก

ดังนั้นเป้าหมายการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา (Target Roof Displacement) คำนวณตามสมการที่2.1 มีค่า

$$\delta_t = 1.26485 \times 1.0 \times 1.05 \times 1.0 \times 1.121 \times 1.073^2/4\pi^2 \times 981$$

$$= 42.596 \text{ เซนติเมตร}$$

ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยวิธี Displacement Coefficient สำหรับอาคาร 9 ชั้น ที่ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว 4.36 เท่าของ Elcentro (Elcentro 3)

คาบการแกว่งตามธรรมชาติในช่วงอีลาสติก , T_i = 2.305 วินาที

จากกราฟ Bilinear Pushover Curve (รูปที่ 3.6) ค่าสติฟเนสทางด้านข้างของอาคารในช่วงอีลาสติก(K_i) มีค่าเท่ากับค่าสติฟเนสประสิทธิผลทางด้านข้างของอาคาร(K_e)

จะได้คาบการแกว่งตามธรรมชาติประสิทธิผลคำนวณตามสมการที่2.2

$$T_e = 2.305 \times \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} = 2.305 \text{ วินาที}$$

ค่าคาบการแกว่งประสิทธิผลที่ระดับความรุนแรง 4.36 Elcentro คำนวณโดยโปรแกรม BISPEC มีค่า S_a = 0.750 g

ค่าแฟคเตอร์ร่วมของโหมดแรก (Γ_1) คำนวณตามสมการที่ 2.8

$$\Gamma_1 = \frac{503.7\times10^3 \times 1.000 + 494.9\times10^3 \times (1.916+2.878+3.865+4.826+5.742+6.636+7.476) + 534.4\times10^3 \times 8.180}{503.7\times10^3 \times 1.0002 + 494.9\times10^3 \times (1.916^2+2.878^2+3.865^2+4.826^2+5.742^2+6.636^2+7.476^2) + 534.4\times10^3 \times 8.1802}$$

$$= 0.16848$$

ค่าสัมประสิทธิ์ C_O คำนวณตามสมการที่ 2.3

$$C_O = \Gamma_1 \; \phi_{roof,1}$$

$$= 0.16848 \times 8.18003 = 1.37817$$

ค่าสัมประสิทธิ์ C_1 = 1.0 เนื่องจากเมื่อดูจากสเปคตรัมผลตอบสนองตามรูปที่3.7 แล้ว T_e = 2.305 วินาที มีค่าเกินช่วงความเร่งคงที่

ค่าสัมประสิทธิ์ C_2 = 1.05 เนื่องจากเป็นโครงสร้างประเภทที่ 1 ซึ่งค่า T_e = 1.073 วินาทีมีค่าเกินช่วงความเร่งคงที่ และการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของโครงสร้างอยู่ระหว่างช่วง Immediate Occupancy และ Life Safety

ค่าสัมประสิทธิ์ C_3 = 1.0 เนื่องจากค่าสติฟเนสของอาคารหลังการคลากยังเป็นบวก

ดังนั้นเป้าหมายการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา(Target Roof Displacement)คำนวณตามสมการที่2.1 มีค่า

$$\delta_t = 1.37817 \times 1.0 \times 1.05 \times 1.0 \times 0.750 \times 2.3045^2/4\pi^2 \times 981$$

$$= 143.20 \text{ เซนติเมตร}$$

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยวิธี Capacity Spectrum

ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยวิธี Capacity Spectrum สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว 3.05 เท่าของ Elcentro (Elcentro 3)

เริ่มด้วยการแปลงกราฟ Pushover Curve ให้เป็น Capacity Spectrum โดยใช้สมการที่ 2.6 และ 2.7 ได้ค่าดังแสดงในตารางที่ ข.1

กราฟ Elastic Response Spectrum (Demand Spectrum) ที่ค่าความหน่วงต่างๆซึ่งวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม BISPEC แสดงในตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.1 แสดงค่า Capacity Spectrum

Pushover Curve			Capacity Curve	
Step	Base Shear	Roof Disp.		
	Vb	u_{roof}	Sd	Sa
	(kN)	(cm.)	(cm.)	g
1	203.12	0.610	0.482	0.017
10	2,031.17	6.096	4.820	0.168
15	3,046.75	9.144	7.229	0.253
20	4,062.34	12.192	9.639	0.337
23	4,452.14	13.725	10.851	0.369
24	4,568.06	14.384	11.372	0.379
25	4,621.75	14.994	11.854	0.383
30	4,857.71	18.355	14.512	0.403
40	4,925.50	24.451	19.331	0.408
50	4,993.25	30.547	24.151	0.414
60	5,061.02	36.643	28.970	0.419
70	5,124.59	42.739	33.790	0.425
80	5,188.16	48.835	38.609	0.430
90	5,251.73	54.931	43.429	0.435
100	5,315.30	61.027	48.249	0.441

ตารางที่ ข.2 แสดงค่า Demand Spectrum

Time	Damping 5 %		Damping 10 %		Damping 15 %		Damping 20 %	
T	Sd	Sa	Sd	Sa	Sd	Sa	Sd	Sa
sec.	cm.	g	cm.	g	cm.	g	cm.	g
0.01	0.002	0.978	0.002	0.977	0.002	0.976	0.002	0.975
0.10	0.493	1.985	0.457	1.838	0.415	1.670	0.377	1.517
0.20	2.404	2.420	1.780	1.792	1.518	1.528	1.346	1.355
0.30	5.153	2.305	4.184	1.872	3.594	1.608	3.076	1.376
0.40	9.193	2.314	7.168	1.804	6.397	1.610	5.648	1.421
0.50	17.332	2.792	13.235	2.132	10.408	1.676	8.903	1.434
0.60	20.690	2.314	16.774	1.876	13.906	1.555	11.750	1.314
0.70	19.208	1.578	16.340	1.343	13.945	1.146	12.069	0.992
0.80	24.195	1.522	18.339	1.154	14.181	0.892	11.868	0.747
0.90	32.667	1.624	20.606	1.024	15.343	0.763	12.777	0.635
1.00	34.225	1.378	23.275	0.937	17.549	0.707	14.103	0.568
1.20	28.093	0.786	20.770	0.581	17.227	0.482	15.715	0.439
1.40	27.073	0.556	24.305	0.499	21.122	0.434	18.287	0.376
1.60	35.615	0.560	28.841	0.454	24.269	0.382	20.730	0.326
1.80	37.284	0.463	30.231	0.376	26.385	0.328	24.563	0.305
2.00	41.610	0.419	36.269	0.365	31.727	0.319	30.106	0.303
2.20	60.731	0.505	47.078	0.392	41.894	0.349	37.511	0.312
2.40	76.522	0.535	62.035	0.434	51.806	0.362	44.222	0.309
2.60	88.952	0.530	70.064	0.417	56.919	0.339	47.530	0.283
2.80	91.560	0.470	69.610	0.358	55.900	0.287	46.379	0.238
3.00	83.714	0.375	66.143	0.296	55.747	0.249	47.757	0.214
3.20	84.029	0.330	68.098	0.268	56.062	0.220	48.438	0.190
3.40	88.185	0.307	72.167	0.251	59.896	0.209	50.345	0.175
3.60	88.359	0.275	73.113	0.227	61.219	0.190	51.834	0.161
3.80	84.670	0.236	71.075	0.198	60.264	0.168	51.527	0.144
4.00	78.322	0.197	66.610	0.168	57.281	0.144	49.683	0.125
4.20	73.281	0.167	64.566	0.147	57.250	0.131	51.029	0.116
4.40	75.679	0.157	66.875	0.139	59.446	0.124	53.208	0.111
4.60	77.346	0.147	68.819	0.131	61.506	0.117	55.217	0.105
4.80	78.255	0.137	70.091	0.122	63.042	0.110	56.895	0.099
5.00	78.503	0.126	70.792	0.114	64.045	0.103	58.122	0.094

ตารางที่ ข.2 แสดงค่า Demand Spectrum (ต่อ)

Time	Damping 25 %		Damping 30 %		Damping 35 %		Damping 40 %	
T	Sd	Sa	Sd	Sa	Sd	Sa	Sd	Sa
sec.	cm.	g	cm.	g	cm.	g	cm.	g
0.01	0.002	0.974	0.002	0.973	0.002	0.972	0.002	0.971
0.10	0.345	1.390	0.317	1.276	0.292	1.175	0.270	1.087
0.20	1.196	1.204	1.063	1.070	0.962	0.969	0.942	0.948
0.30	2.811	1.258	2.583	1.156	2.370	1.061	2.177	0.974
0.40	4.995	1.257	4.422	1.113	4.027	1.014	3.781	0.952
0.50	7.847	1.264	6.989	1.126	6.273	1.010	5.678	0.914
0.60	10.090	1.129	8.831	0.988	7.802	0.873	6.947	0.777
0.70	10.557	0.868	9.291	0.763	8.351	0.686	7.698	0.633
0.80	10.988	0.691	10.168	0.640	9.420	0.593	8.736	0.550
0.90	11.918	0.592	11.089	0.551	10.305	0.512	9.579	0.476
1.00	12.840	0.517	11.910	0.480	11.069	0.446	10.333	0.416
1.20	14.393	0.402	13.224	0.370	12.172	0.340	11.255	0.315
1.40	15.890	0.326	14.506	0.298	13.870	0.285	13.273	0.273
1.60	19.255	0.303	18.227	0.287	17.274	0.272	16.351	0.257
1.80	23.315	0.290	21.987	0.273	20.664	0.257	19.392	0.241
2.00	28.135	0.283	26.112	0.263	24.177	0.243	22.386	0.225
2.20	33.681	0.280	30.399	0.253	27.570	0.229	25.134	0.209
2.40	38.399	0.268	33.821	0.236	30.137	0.211	27.129	0.190
2.60	40.567	0.242	35.276	0.210	31.180	0.186	28.876	0.172
2.80	40.167	0.206	36.643	0.188	33.823	0.174	31.405	0.161
3.00	42.518	0.190	39.010	0.175	36.022	0.161	33.445	0.150
3.20	44.268	0.174	40.689	0.160	37.635	0.148	34.958	0.137
3.40	45.398	0.158	41.804	0.146	38.717	0.135	36.021	0.125
3.60	46.093	0.143	42.521	0.132	39.411	0.122	36.727	0.114
3.80	46.311	0.129	42.892	0.120	39.853	0.111	37.169	0.104
4.00	46.097	0.116	42.847	0.108	40.000	0.101	37.410	0.094
4.20	45.732	0.104	42.524	0.097	39.824	0.091	37.427	0.085
4.40	47.897	0.100	43.320	0.090	39.445	0.082	37.178	0.077
4.60	49.817	0.095	45.150	0.086	41.138	0.078	37.646	0.072
4.80	51.562	0.090	46.913	0.082	42.839	0.075	39.284	0.069
5.00	52.931	0.085	48.345	0.078	44.321	0.071	40.776	0.066

หลังจากได้ Capacity Spectrum และ Demand Spectrum ทำการสร้างเส้นต่อเชื่อม (Connection line) จุดที่ความหน่วงเทียบเท่าโดยใช้สมการที่ 2.11 , 2.13 และ 2.15 มีค่าแสดงดังตารางที่ ข.3

ตารางที่ ข.3 แสดงค่า Connection line

Connection line					
d_{pi}	a_{pi}	β_{eq}	κ	β_{eff}	Sa (β_{eff})
cm.	g				g
13.72	0.402	0.152	1.000	0.152	0.90
15.24	0.404	0.202	1.000	0.202	0.48
16.76	0.405	0.243	0.975	0.238	0.33
18.29	0.407	0.277	0.948	0.265	0.30
19.81	0.409	0.305	0.926	0.286	0.29
21.34	0.411	0.328	0.907	0.303	0.28
22.86	0.412	0.349	0.891	0.316	0.26
24.38	0.414	0.366	0.877	0.327	0.25
25.91	0.416	0.381	0.865	0.336	0.24
27.43	0.417	0.394	0.854	0.344	0.23

จากรูปที่ 3.12 จุดตัดระหว่าง Capacity Spectrum และ Connection line คือจุด Performance Point มีค่าเท่ากับ 16.010 เซนติเมตร

ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคาสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2.33 ดังนี้

U_{roof} = 0.3571 x 3.542 x 16.010 = 20.249 เซนติเมตร

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยวิธี Modal Pushover Analysis

ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยวิธี Modal Pushover Analysis สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว 3.05 เท่าของ Elcentro (Elcentro 3)

เริ่มด้วยการแปลงกราฟ Bilinear Pushover Curve ที่อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐาน (V_b) กับการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา (u_{roof}) ให้เป็นกราฟที่อยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง F_{si}/L_i กับ D_i โดยใช้สมการที่ 2.30 และ 2.32 ซึ่งได้ค่าผลการแปลงทั้งสามโหมดดังแสดงในตารางที่ ค.1, ค.2 และ ค.3 ตามลำดับ

ตาราง ค.1 แสดงผลการคำนวณค่าความสัมพันธ์ F_{si}/L_i และ D_i สำหรับโหมดที่หนึ่ง

Bilinear Pushover Curve 1				
Step	Base Shear	Roof Disp.	F_{si}/L_i	D_i
	Vb	u_{roof}		
	(kN)	(cm.)	(cm./sec^2)	cm.
1	203.12	0.610	16.52	0.482
10	2,031.17	6.096	165.22	4.820
15	3,046.75	9.144	247.82	7.229
20	4,062.34	12.192	330.43	9.639
23	4,671.69	13.725	379.99	11.085
24	4,814.28	14.384	391.59	11.423
25	4,821.52	14.994	392.37	11.854
30	4,857.71	19.574	395.13	14.512
40	4,925.46	25.669	400.64	19.331
50	4,993.25	31.766	406.15	24.151
60	5,061.01	37.862	411.66	28.970
70	5,124.59	43.958	416.83	33.790
80	5,188.16	50.054	422.00	38.609
90	5,251.73	56.150	427.17	43.429
100	5,315.30	62.246	432.35	48.249

ตาราง ค.2 แสดงผลการคำนวณค่าความสัมพันธ์ F_{si}/L_i และ D_i สำหรับโหมดที่สอง

Bilinear Pushover Curve 2				
Step	Base Shear	Roof Disp.	F_{si}/L_i	D_i
	Vb	u_{roof}		
	(kN)	(cm.)	(cm./sec^2)	cm.
1	598.57	0.305	306.17	0.930
5	2,992.84	1.524	1,530.86	4.650
10	5,629.54	2.867	2,879.56	8.744
15	5,679.94	4.136	2,905.34	12.617
20	5,739.86	5.660	2,935.99	17.266
30	5,859.69	8.708	2,997.28	26.563
40	5,980.78	11.756	3,059.22	35.861
50	6,103.13	14.804	3,121.80	45.159
60	6,226.79	17.852	3,185.06	54.456
70	6,353.32	20.900	3,249.77	63.754
80	6,468.78	23.948	3,308.83	73.052
90	6,584.24	26.996	3,367.89	82.349
100	6,707.45	30.044	3,430.92	91.647

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis

ตัวอย่างการวิเคราะห์ด้วยวิธี Energy Based Analysis สำหรับอาคาร 3 ชั้น ที่ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว 3.05 เท่าของ Elcentro (Elcentro 3) ความสัมพันธ์ระหว่าง R&μ เป็นแบบเชิงเส้น

เริ่มด้วยการสร้าง Energy Capacity Curve จากข้อมูล Bilinear Pushover Curve โดยใช้สมการที่ 2.39 และ 2.40

จากนั้นสร้าง Energy Demand Curve โดยใช้สมการที่ 2.41 และ 2.42 ได้ค่าแสดงดังตารางที่ ง.1

ตารางที่ ง.1 แสดงผลการคำนวณค่า Energy Capacity Curve และค่า Energy Demand Curve

Bilinear Pushover Curve			**Energy Capacity Curve**					**Energy Demand Curve**		
	Base shear	Roof Disp.	Ea	De	Ea/Ey	R	γ_e	Ea	De	Ea/Ey
	Vb	u_{roof}			μ					μ
	(kN)	(cm.)	(kN-m.)	cm.				(kN-m.)	cm.	
1	203.12	0.610	4.89	0.482	0.002	1.000	1.000	2,168.38	0.482	7.885
10	2,031.17	6.096	48.95	4.820	0.178	1.000	1.000	2,168.38	4.820	7.885
15	3,046.75	9.144	110.14	7.229	0.400	1.000	1.000	2,168.38	7.229	7.885
20	4,062.34	12.192	195.80	9.639	0.712	1.000	1.000	2,168.38	9.639	7.885
23	4,671.69	13.725	258.95	11.085	0.942	1.000	1.000	2,168.38	11.085	7.885
24	4,814.28	14.384	275.00	11.423	1.000	1.000	1.000	2,168.38	11.423	7.885
25	4,821.52	14.994	294.17	11.854	1.070	1.039	0.991	2,148.03	11.854	7.811
30	4,857.71	19.574	420.87	14.512	1.530	1.281	0.932	2,021.25	14.512	7.350
40	4,925.46	25.669	657.90	19.331	2.392	1.720	0.808	1,752.58	19.331	6.373
50	4,993.25	31.766	898.22	24.151	3.266	2.159	0.700	1,518.55	24.151	5.522
60	5,061.01	37.862	1141.82	28.970	4.151	2.598	0.615	1,333.20	28.970	4.848
70	5,124.59	43.958	1389.03	33.790	5.050	3.037	0.547	1,186.90	33.790	4.316
80	5,188.16	50.054	1639.33	38.609	5.960	3.476	0.493	1,069.20	38.609	3.888
90	5,251.73	56.150	1892.72	43.429	6.882	3.916	0.449	973.23	43.429	3.539
100	5,315.30	62.246	2149.19	48.249	7.814	4.355	0.412	893.48	48.249	3.249

ค่า Energy Capacity Curve และค่า Energy Demand Curve ที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.7
จุดตัดระหว่าง Energy Capacity Curve และ Energy Demand Curve มีค่าเท่ากับ 31.270 เซนติเมตร
โดยใช้สมการที่ 2.45 จะได้ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของชั้นหลังคา

U_{roof} = 0.3571 x 3.542 x 31.270 = 39.553 เซนติเมตร

ภาคผนวก จ

ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับงานวิจัยอ้างอิง

ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับงานวิจัยอ้างอิง

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์อาคารสูง 9 ชั้น ด้วยวิธี Nonlinear Dynamic Analysis , Modal Pushover Analysis และ Displacement Coefficient กับงานวิจัยของ A.K. Choppra และ R.K. Goel [9] ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์ภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่ระดับความรุนแรง 1.5 เท่าของ Elcentro ได้ผลดังแสดงในตารางที่ จ.1, จ.2 และ จ.3

ตารางที่ จ.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Nonlinear Dynamic Analysis

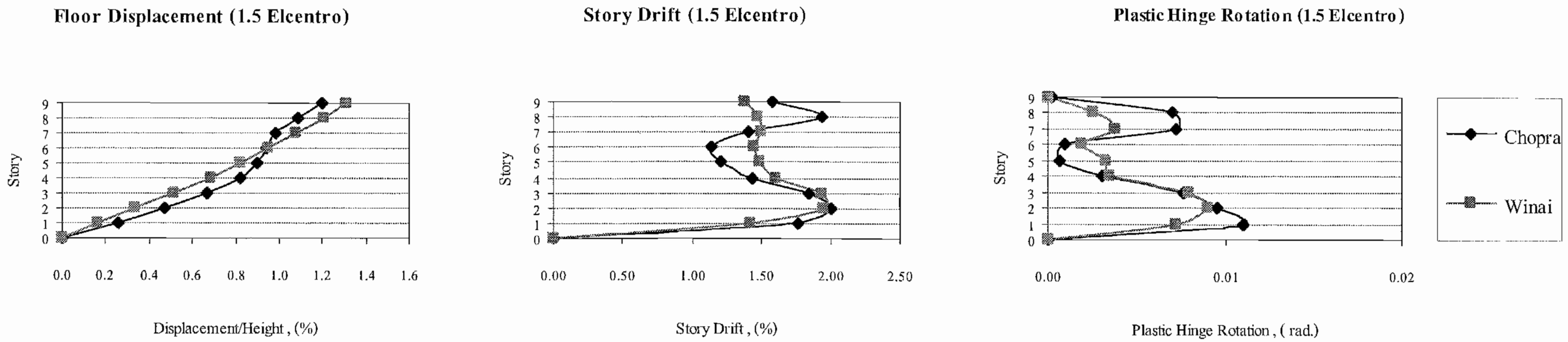
Nonlinear Dynamic Analysis Result Comparison						
Floor	**Chopra's result**			**Winai's result**		
	Floor Disp.	Story Drift	HingePlastic	Floor Disp.	Story Drift	HingePlastic
	(%)	(%)	(rad.)	(%)	(%)	(rad.)
9th	1.200	1.575	0.00024	1.307	1.372	0.00000
8th	1.088	1.945	0.00705	1.202	1.475	0.00254
7th	0.982	1.407	0.00718	1.078	1.493	0.00376
6th	0.942	1.135	0.00096	0.950	1.449	0.00191
5th	0.900	1.202	0.00063	0.823	1.486	0.00325
4th	0.820	1.426	0.00299	0.683	1.609	0.00348
3rd	0.668	1.844	0.00760	0.515	1.942	0.00798
2nd	0.473	2.003	0.00953	0.333	1.949	0.00897
1st	0.260	1.763	0.01100	0.161	1.418	0.00723
G	0.000	0.000	0.00000	0.000	0.000	0.00000

ตารางที่ จ.2 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Modal Pushover Analysis

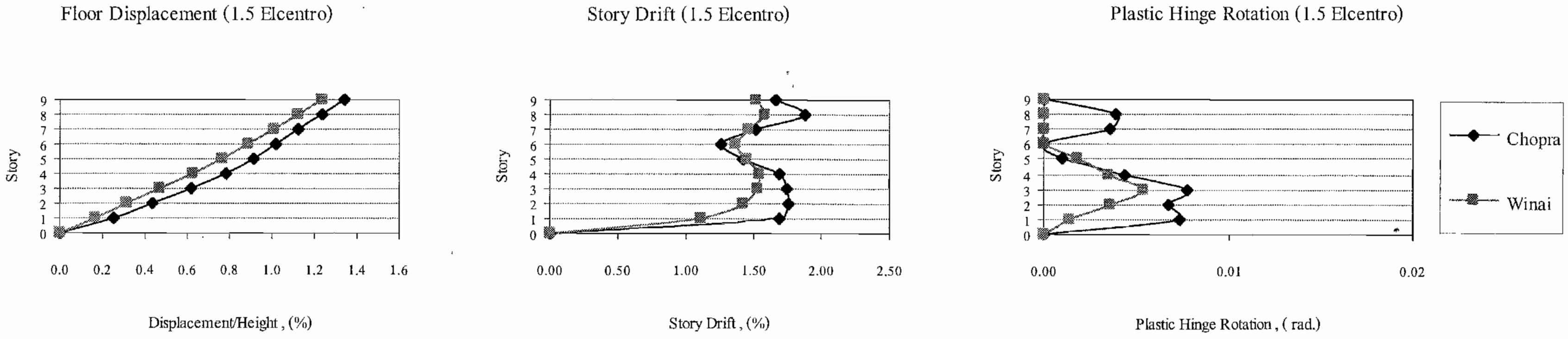
Modal Pushover Analysis Result Comparison						
Floor	**Chopra's result**			**Winai's result**		
	Floor Disp.	Story Drift	HingePlastic	Floor Disp.	Story Drift	HingePlastic
	(%)	(%)	(rad.)	(%)	(%)	(rad.)
9th	1.338	1.666	0.00000	1.233	1.507	0.00000
8th	1.233	1.879	0.00388	1.122	1.583	0.00000
7th	1.118	1.518	0.00355	1.005	1.453	0.00000
6th	1.015	1.259	0.00000	0.889	1.365	0.00000
5th	0.911	1.414	0.00102	0.767	1.442	0.00183
4th	0.781	1.683	0.00437	0.629	1.544	0.00351
3rd	0.614	1.738	0.00776	0.473	1.522	0.00542
2nd	0.435	1.752	0.00672	0.315	1.421	0.00360
1st	0.250	1.694	0.00736	0.164	1.110	0.00136
G	0.000	0.000	0.00000	0.000	0.000	0.00000

ตารางที่ จ.3 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Displacement Coefficient

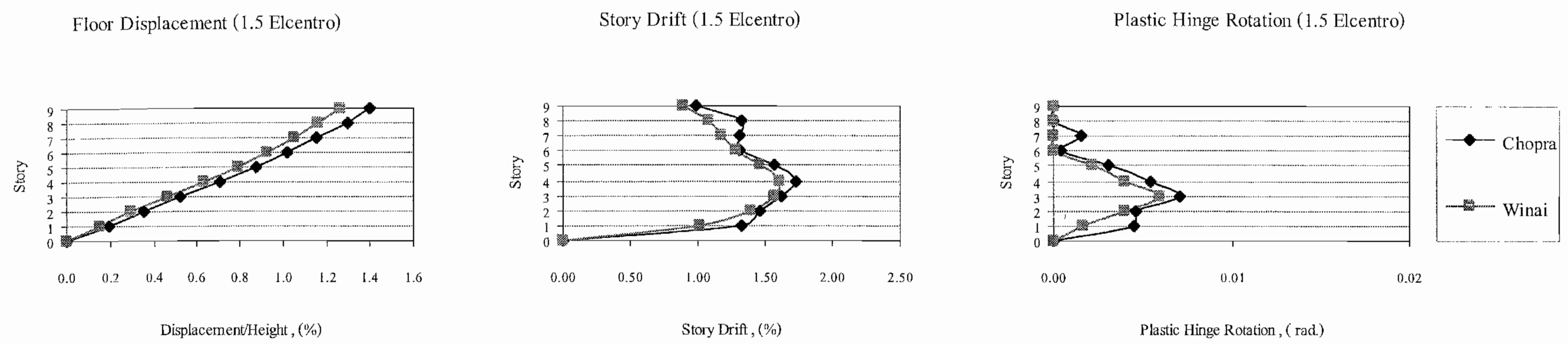
Displacement Coefficient Method Result Comparison						
Floor	**Chopra's result**			**Winai's result**		
	Floor Disp.	Story Drift	HingePlastic	Floor Disp.	Story Drift	HingePlastic
	(%)	(%)	(rad.)	(%)	(%)	(rad.)
9th	1.399	0.984	0.00000	1.262	0.895	0.00000
8th	1.294	1.318	0.00000	1.166	1.076	0.00000
7th	1.154	1.306	0.00150	1.051	1.173	0.00000
6th	1.015	1.314	0.00045	0.926	1.283	0.00000
5th	0.875	1.562	0.00309	0.790	1.459	0.00220
4th	0.708	1.730	0.00545	0.634	1.604	0.00397
3rd	0.524	1.623	0.00703	0.463	1.561	0.00590
2nd	0.351	1.462	0.00465	0.297	1.386	0.00403
1st	0.195	1.323	0.00451	0.149	1.011	0.00169
G	0.000	0.000	0.00000	0.000	0.000	0.00000



รูปที่ จ.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Nonlinear Dynamic Analysis



รูปที่ จ.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Modal Pushover Analysis



รูปที่ จ.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Displacement Coefficient

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นายวินัย แซ่วัน

วัน เดือน ปีเกิด 20 เมษายน 2516

ประวัติการศึกษา

ระดับมัธยมศึกษา ประโยคมัธยมศึกษาตอนต้น
โรงเรียนโพธาวัฒนาเสนี พ.ศ. 2530

ระดับประกาศนียบัตร ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาช่างก่อสร้าง
วิทยาลัยเทคนิคราชบุรี พ.ศ. 2534
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาช่างก่อสร้าง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ พ.ศ. 2536

ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2539

ระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2550

ประวัติการทำงาน วิศวกรโยธา/วิศวกรโครงการ
บริษัท ไทยมอริโมโต้ จำกัด พ.ศ. 2539 – 2546

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ Leelataviwat, S., Goel, S.C. and Saewan, W., 2007, “An Energy Based Method for Seismic - Evaluation of Structures”, **SEAOC 2007** Convention

12 พ.ย. 2550

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ข้อตกลงว่าด้วยการโอนสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

วันที่ 30 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2550

ข้าพเจ้า (นาย/~~นาง~~/~~นางสาว~~) **วินัย แซ่วัน** รหัสประจำตัว **47400313** เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับ ○ ประกาศนียบัตรบัณฑิต ∅ ปริญญาโท ○ ปริญญาเอก หลักสูตร **วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต** สาขาวิชา **วิศวกรรมโยธา** คณะ **วิศวกรรมศาสตร์** อยู่บ้านเลขที่ **333/4** หมู่ **2** ซอย **สายไหม 54** ถนน **สายไหม** แขวง **สายไหม** เขต **สายไหม** จังหวัด **กรุงเทพฯ** รหัสไปรษณีย์ **10220** เป็น "ผู้โอน" ขอโอนสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี **รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์** ตำแหน่ง **คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์** เป็นตัวแทน "ผู้รับโอน" สิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาและมีข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง **การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้นเพื่อการประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว** ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ **ผศ.ดร.สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์** อาจารย์ที่ปรึกษา ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใดๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุว่าวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุกครั้งที่มีการเผยแพร่

4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่ หรือให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลงหรือเผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีก่อน

5. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำข้อมูลจากวิทยานิพนธ์ไปประดิษฐ์หรือพัฒนาต่อยอดเป็นสิ่งประดิษฐ์หรืองานทรัพย์สินทางปัญญาประเภทอื่น ภายในระยะเวลาสิบ (10) ปีนับจากวันลงนามในข้อตกลงฉบับนี้ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีมีสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญานั้น พร้อมกับได้รับชำระค่าตอบแทนการอนุญาตให้ใช้สิทธิดังกล่าว รวมถึงการจัดสรรผลประโยชน์อันพึงเกิดขึ้นจากส่วนใดส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ในอนาคต โดยให้เป็นไปตามระเบียบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วย การบริหารผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2538

6. ในกรณีที่มีผลประโยชน์เกิดขึ้นจากวิทยานิพนธ์หรืองานทรัพย์สินทางปัญญาอื่นที่ข้าพเจ้าทำขึ้นโดยมีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีเป็นเจ้าของ ข้าพเจ้าจะมีสิทธิได้รับการจัดสรรผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญาดังกล่าวตามอัตราที่กำหนดไว้ในระเบียบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วยการบริหารผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2538

ลงชื่อ..ผู้โอนสิทธิ

(นายวินัย แซ่วัน)

ลงชื่อ..ผู้รับโอนสิทธิ

(รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์)

ลงชื่อ..พยาน

(ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล)

ลงชื่อ..พยาน

(ผศ.ดร.สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์)