สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบาญ	ซ
สารบาญตาราง	ฎ
สารบาญภาพ	ฐ
อักษรย่อและสัญลักษณ์	ธ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	12
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	12
1.5 สมมุติฐานการวิจัย	12
1.6 ขอบเขตของการวิจัย	12
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย	14
2.1 คำนิยามการประเมินความแข็งแรงอาคารต่อแผ่นดินไหว	14
2.2 การวิเคราะห์โดยวิธีแรงสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static Pushover)	16
2.3 การประเมินแรงกระทำด้านข้างเนื่องจากแผ่นดินไหว	19
2.4 คุณสมบัติของจุดหมุนพลาสติก	32
2.5 คุณสมบัติของวัสดุ	34
2.6 สตีฟเนสเริ่มต้นขององค์อาคาร	36
2.7 แบบจำลองชิ้นส่วนอาคาร	37
2.8 แบบจำลองเส้นใย (Fiber Model)	44
2.9 เส้นโค้งความต้องการ (Demand Spectrum)	46
2.10 พิกัดสมรรถนะ (Performance Point)	47

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญ (ต่อ)

		หน้า
2.11	การเสริมกำลังของอาคาร	48
บทที่ 3	**วิธีการวิจัย**	58
3.1	รวบรวมข้อมูล	59
3.2	ผลการประเมินด้วยวิธี RVS	62
3.3	การประเมินความอ่อนแอของอาคารอย่างละเอียดโดยวิธี Capacity Spectrum Method	64
3.4	อาคารโรงเรียนตัวอย่างที่ทำการศึกษา	66
3.5	แบบจำลองการวิเคราะห์	73
3.6	น้ำหนักบรรทุกและแรงกระทำ	73
3.7	แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์	77
บทที่ 4	**ผลการวิเคราะห์ประเมินความอ่อนแอของอาคารโรงเรียนมาตรฐาน**	90
4.1	ผลการวิเคราะห์อาคารในทิศ Y-Y ด้วยหน้าตัดพลาสติกกำหนดโดยโปรแกรม	90
4.2	ผลการวิเคราะห์อาคารในทิศ Y-Y ด้วยหน้าตัดพลาสติกระบุเฉพาะ	95
4.3	ผลการวิเคราะห์อาคารในทิศ Y-Y ด้วยแบบจำลองไฟเบอร์	99
4.4	การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ในทิศ Y-Y	102
4.5	ผลการวิเคราะห์อาคารในทิศ X-X ด้วยหน้าตัดพลาสติกกำหนดโดยโปรแกรม	106
4.6	ผลการวิเคราะห์อาคารในทิศ X-X ด้วยหน้าตัดพลาสติกระบุเฉพาะ	110
4.7	การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ในทิศ X-X	114
บทที่ 5	**ผลการวิเคราะห์การเสริมกำลังและการปรับปรุงพฤติกรรมอาคาร**	120
5.1	การปรับปรุงพฤติกรรมของโครงสร้างอาคาร	120
5.2	ผลการวิเคราะห์แบบจำลองอาคารในทิศ Y-Y ที่เสริมกำลังด้วยวิธีขยายหน้าตัดเสา	127
5.3	ผลการวิเคราะห์แบบจำลองอาคารในทิศ Y-Y ที่เสริมค้ำยันแนวทแยง	131
5.4	ผลการวิเคราะห์แบบจำลองอาคารในทิศ Y-Y ที่เสริมผนังรับแรงเฉือน	135
5.5	ผลการเปรียบเทียบการเสริมกำลังด้วยวิธีต่าง ๆ ในทิศ Y-Y	139

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
5.6 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองอาคารในทิศ X-X ที่เสริมกำลังด้วยวิธีขยายหน้าตัดเสา	143
5.7 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองอาคารในทิศ X-X ที่เสริมค้ำยันแนวทแยง	147
5.8 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองอาคารในทิศ X-X ที่เสริมผนังรับแรงเฉือน	152
5.9 ผลการเปรียบเทียบการเสริมกำลังด้วยวิธีต่าง ๆ ในทิศ Y-Y	156
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	161
6.1 สรุปผลการวิเคราะห์	161
6.2 ผลการวิเคราะห์อาคารโรงเรียนมาตรฐานในทิศ Y-Y	161
6.3 ผลการวิเคราะห์อาคารโรงเรียนมาตรฐานในทิศ X-X	162
6.4 ผลการวิเคราะห์อาคารโรงเรียนมาตรฐานที่เสริมกำลังด้วยวิธีต่าง ๆ ในทิศ Y-Y	163
6.5 ผลการวิเคราะห์อาคารโรงเรียนมาตรฐานที่เสริมกำลังด้วยวิธีต่าง ๆ ในทิศ X-X	163
6.6 ข้อเสนอแนะ	164
บรรณานุกรม	165
ภาคผนวก	172
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณความเค้นสูงสุดของคานและเสา	173
ภาคผนวก ข ตัวอย่างรายการคำนวณโมเมนต์-มุมหมุนของคานและเสา	180
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม SAP2000	192
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม SeismoStruct	198
ภาคผนวก จ ตัวอย่างการคำนวณสัมประสิทธิ์ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหว	204
ประวัติผู้เขียน	206

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญตาราง

หน้า

ตาราง

1.1 ข้อมูลพื้นฐานโรงเรียนในสังกัดสำนักงานเขตพื้นที่การศึกษา เชียงใหม่ เขต 1 ปีการศึกษา 2552 3
2.1 ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (Response Modification Factor, R) ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (System Overstrength Factor, W_0) และตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (Deflection Amplification Factor, C_d) 21
2.2 การจำแนกประเภทความสำคัญของอาคาร และค่าตัวประกอบความสำคัญของอาคาร 25
2.3 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบสั้น (S_s) และที่คาบ 1 วินาที (S_1) ของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา (จังหวัดเชียงใหม่) 28
2.4 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดินที่ ณ ที่ตั้งอาคาร F_a 29
2.5 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร F_v 29
2.6 คุณสมบัติทางกลของเหล็กเสริม 35
2.7 กำลัง ณ จุดครากที่แท้จริงของเหล็กเสริม (กก/ซม^2) ที่ผลิตภายในประเทศไทย (Kiattivisanchai, 2001) 35
2.8 ค่าสตีฟเนสเริ่มต้นขององค์อาคาร 36
2.9 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองแบบในช่วงไร้เชิงเส้น: คานคอนกรีตเสริมเหล็ก 39
2.10 ค่าพารามิเตอร์สำหรับการจำลองแบบในช่วงไร้เชิงเส้น: เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก 42
3.1 ขั้นตอนและวัตถุประสงค์ในการศึกษา 58
3.2 ค่าเฉลี่ยคะแนนรวม (ทั้งหมด) และปัจจัย (ลบ) ต่าง ๆ ที่มีผลต่ออาคารกลุ่ม C3 ที่มีคะแนนไม่ผ่านเกณฑ์ประเมิน 64
3.3 คุณสมบัติของวัสดุ 78
3.4 คุณสมบัติของคานและเสา 79
3.5 ตัวอย่างคุณสมบัติของ Plastic Hinge 82
3.6 คุณสมบัติของวัสดุ (สำหรับโปรแกรม SeismoStruct) 87
4.1 ระดับสมรรถนะของอาคารต่อข้อจำกัดอัตราการเคลื่อนที่ของอาคาร 95

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตาราง

5.1 กำลังโมเมนต์ดัดของเสาและคานที่จุดต่อ 122
5.2 ลักษณะการเสียหายของอาคารในทิศ Y-Y 141
5.3 ลักษณะการเสียหายของอาคารในทิศ X-X 157
ข.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับแรงดัดของเสา C1-2 189
ข.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับแรงดัดของเสา C2-3 191

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ

หน้า

รูป

1.1 ค่าเฉลี่ยลักษณะการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี NL-RHA 9

1.2 การเสียรูปทางด้านข้างวิเคราะห์ โดย MPA และ NL-RHA โดยไม่คิดน้ำหนักตัวเอง 10

2.1 การวิเคราะห์โดยวิธี Capacity Spectrum 15

2.2 ขั้นตอนการประเมินอาคารเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว FEMA 310 16

2.3 การวิเคราะห์โดยวิธี Nonlinear Static Pushover 19

2.4 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับพื้นที่ทั่วประเทศไทย (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} < S_{DS}$ 20

2.5 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าสำหรับ พื้นที่ทั่วประเทศไทย (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} > S_{DS}$ 21

2.6 ตำแหน่งจุดหมุนพลาสติกของเสาและคาน 33

2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ของจุดหมุนพลาสติกทั่วไป 34

2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความสามารถในการหมุนของจุดหมุนพลาสติก เนื่องจากโมเมนต์ดัด 37

2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนและโมเมนต์ดัดของเสา 41

2.10 แบบจำลองคานที่พิจารณาผลของ Rigid Zone 43

2.11 แบบจำลองแบบเส้นใย Fiber Model 44

2.12 ความสัมพันธ์ Stress-Strain ของแบบจำลองคอนกรีต 45

2.13 ความสัมพันธ์ Stress-Strain ของแบบจำลองเหล็กเสริม 46

2.14 แสดงการเปลี่ยนความสัมพันธ์ระหว่าง S_a และ T ให้อยู่ในรูปแบบ S_a และ S_d (ADRS) 46

2.15 ภาพแสดงการหาพิกัดสมรรถนะ 47

2.16 การเสริมกำลังด้วยวิธีการหุ้มด้วยคอนกรีตที่คาน 49

2.17 การเสริมกำลังด้วยวิธีการหุ้มด้วยคอนกรีตที่เสา 49

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูป

2.17 การเสริมกำลังด้วยวิธีการหุ้มด้วยคอนกรีตที่เสา (ต่อ) 50

2.18 การเสริมกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กในช่องว่างระหว่างคาน - เสา 50

2.19 การเพิ่มความหนาของกำแพงด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก 53

2.20 ตัวอย่างการเสริมเหล็กตรงกลาง 53

2.21 การเสริมส่วนที่เป็นช่องเปิดด้วยกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็กหรือกำแพงอิฐก่อเสริมเหล็ก 54

2.22 รายละเอียดของกำแพงคอนกรีตเสริมเหล็ก 54

2.23 ตัวอย่างการเสริมกำลังจุดต่อคานที่กำแพงด้านนอก 55

2.24 ประเภทของค้ำยัน 56

2.25 รายละเอียดการเสริมกำลังที่จุดต่อค้ำยัน 57

3.1 ตำแหน่งของอาคารโรงเรียนที่สำรวจในพื้นที่ 60

3.2 แสดงสัดส่วนและลักษณะโครงสร้างอาคารที่ได้ทำการสุ่มสำรวจในพื้นที่ 61

3.3 จำนวนอาคารแยกตามชนิดระบบโครงสร้างและจำนวนชั้น 62

3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอาคารและคะแนนที่ได้จากการประเมินโดยวิธี RVS ของอาคารประเภท C3 เมื่อกำหนดให้พื้นที่สำรวจอยู่ในเขตแผ่นดินไหว ระดับปานกลาง (Moderate Seismicity) 63

3.5 ขั้นตอนการประเมินความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหว 65

3.6 รูปด้านหน้า และแบบแปลนอาคารที่ศึกษา 66

3.7 รูปด้านหน้าและแปลนอาคารชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 ชั้นที่ 3 และแปลนหลังคา ของอาคารที่ศึกษา 69

3.8 โครงสร้างพื้นอาคาร 70

3.9 รูปตัดคาน (ก) B9 และ (ข) B9-END 71

3.10 รายละเอียดคาน (ก) B1 (ข) B2 และ (ค) R1 72

3.11 หน้าตัดเสา 73

3.12 น้ำหนักบรรทุกและแรงกระทำในแนวดิ่ง ในทิศ Y-Y 75

3.13 น้ำหนักบรรทุกและแรงกระทำในแนวดิ่ง ในทิศ X-X 76

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูป

3.14 แรงกระทำด้านข้างที่กระทำกับองค์อาคารเนื่องมาจากแรงแผ่นดินไหวที่คำนวณ 77
3.15 ความสัมพันธ์ของ Stress – Strain ของเหล็กและคอนกรีต 78
3.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง Moment - Rotation 82
3.17 แบบจำลองในระนาบ Y-Y 88
3.18 แบบจำลองในระนาบ X-X 89
3.19 สภาวะค่าขอบของแบบจำลอง 89
4.1 เส้นสมรรถนะ (Capacity Curve) รับแรงในทิศ Y-Y
กรณีหน้าตัดพลาสติกกำหนดโดยโปรแกรม 91
4.2 พฤติกรรมการเกิดหน้าตัดพลาสติกของอาคารในทิศ Y-Y
กรณีหน้าตัดพลาสติกกำหนดโดยโปรแกรม 92
4.3 พิกัดสมรรถนะของอาคารในทิศ Y-Y กรณีหน้าตัดพลาสติกกำหนดโดยโปรแกรม 93
4.4 การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (story drift) ของอาคารในทิศ Y-Y
กรณีกำหนดตัดหน้าพลาสติกโดยโปรแกรม 94
4.5 การเคลื่อนที่ระดับชั้นของอาคารในทิศ Y-Y กรณีกำหนดตัดหน้าพลาสติกโดยโปรแกรม 94
4.6 เส้นสมรรถนะ (Capacity Curve) รับแรงในทิศ Y-Y
กรณีหน้าตัดพลาสติกกำหนดค่าระบุเฉพาะ 96
4.7 พฤติกรรมการเกิดหน้าตัดพลาสติกของอาคารในทิศ Y-Y
กรณีหน้าตัดพลาสติกกำหนดค่าระบุเฉพาะ 96
4.8 พิกัดสมรรถนะของอาคารในทิศ Y-Y กรณีหน้าตัดพลาสติกกำหนดค่าระบุเฉพาะ 97
4.9 การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story drift) ของอาคารในทิศ Y-Y
กรณีหน้าตัดพลาสติกกำหนดค่าระบุเฉพาะ 98
4.10การเคลื่อนที่ระดับชั้นของอาคารในทิศ Y-Yกรณีหน้าตัดพลาสติกกำหนดค่าระบุเฉพาะ 98
4.11เส้นสมรรถนะ (Capacity Curve) รับแรงในทิศ Y-Y โดยวิธีแบบจำลองไฟเบอร์ 99

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูป

4.12พฤติกรรมการเกิดความเสียหายของอาคารในทิศ Y-Y โดยวิธีแบบจำลองไฟเบอร์ 100
4.13การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (Story drift) ของอาคารในทิศ Y-Y โดยวิธีแบบจำลองไฟเบอร์ 101
4.14การเคลื่อนที่ระดับชั้นของอาคารในทิศ Y-Y โดยวิธีแบบจำลองไฟเบอร์ 101
4.15เปรียบเทียบกราฟสมรรถนะ (Capacity Curve) ในทิศ Y-Y ด้วยวิธีวิเคราะห์ต่าง ๆ 102
4.16ความสัมพันธ์โมเมนต์และระยะหมุนของคาน B1-END 103
4.17 ความสัมพันธ์โมเมนต์และระยะหมุนของเสาชั้นที่ 1 (C1-2).ในทิศ Y-Y 103
4.18 ความสัมพันธ์โมเมนต์และระยะหมุนของเสาชั้นที่ 2 (C2-3) ในทิศ Y-Y 104
4.19 เปรียบเทียบลักษณะการเสียหายของอาคารในทิศ Y-Y
(ก) แรงกระทำสูงสุด (ข) จุดวิบัติของอาคาร 105
4.20 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น ณ จุดที่อาคารวิบัติในทิศ Y-Y 105
4.21 เส้นสมรรถนะ (Capacity Curve) รับแรงในทิศ X-X
กรณีหน้าตัดพลาสติกกำหนดโดยโปรแกรม 106
4.22 พฤติกรรมของการเกิดหน้าตัดพลาสติกในเสาและคานของอาคารในทิศ X-X
กรณีหน้าตัดพลาสติกกำหนดโดยโปรแกรม 107
4.23 จุดพิกัดสมรรถนะของอาคารในทิศ X-X กรณีหน้าตัดพลาสติกกำหนดโดยโปรแกรม 108
4.24 การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (story drift) ของอาคารในทิศ X-X
กรณีหน้าตัดพลาสติกกำหนดโดยโปรแกรม 109
4.25 การเคลื่อนที่ระดับชั้นของอาคารในทิศ X-X กรณีหน้าตัดพลาสติกกำหนดโดยโปรแกรม 109
4.26 เส้นสมรรถนะ (Capacity Curve) รับแรงในทิศ X-X
กรณีหน้าตัดพลาสติกกำหนดค่าระบุเฉพาะ 111
4.27 พฤติกรรมของการเกิดหน้าตัดพลาสติกของอาคารในทิศ X-X
กรณีหน้าตัดพลาสติกกำหนดค่าระบุเฉพาะ 112
4.28 พิกัดสมรรถนะของอาคารในทิศ X-X กรณีหน้าตัดพลาสติกกำหนดค่าระบุเฉพาะ 113

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูป

4.29 การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story drift) ของอาคารในทิศ X-X
กรณีหน้าตัดพลาสติกกำหนดค่าระบุเฉพาะ 113
4.30 การเคลื่อนที่ระดับชั้นของอาคารในทิศ X-X กรณีหน้าตัดพลาสติกกำหนดค่าระบุเฉพาะ 114
4.31 เปรียบเทียบกราฟสมรรถนะ (Capacity Curve) ในทิศ X-X
ด้วยวิธีกำหนดหน้าตัดพลาสติก 115
4.32 ความสัมพันธ์โมเมนต์และระยะหมุนของคาน B1-END 115
4.33 ความสัมพันธ์โมเมนต์และระยะหมุนของคาน B2 116
4.34 ความสัมพันธ์โมเมนต์และระยะหมุนของคาน R 116
4.35 ความสัมพันธ์โมเมนต์และระยะหมุนของเสาชั้นที่ 1 (C1-2) ด้าน X-X 117
4.36 ความสัมพันธ์โมเมนต์และระยะหมุนของเสาชั้นที่ 2 และ 3 (C2-3, C3-2) ด้าน X-X 117
4.37 เปรียบเทียบลักษณะการเสียหายของอาคารในทิศ X-X
(ก) แรงกระทำสูงสุด (ข) จุดวิบัติของอาคาร 118
4.38 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น ณ จุดที่อาคารวิบัติในทิศ X-X 119
5.1 การเสริมกำลังด้วยวิธีขยายหน้าตัดเสา 121
5.2 รายละเอียดการเสริมกำลังด้วยวิธีเพิ่มโครงสร้างเหล็กค้ำยัน 124
5.3 รายละเอียดการเสริมกำลังด้วยผนังรับแรงเฉือนในระนาบ Y-Y 125
5.4 รายละเอียดการเสริมกำลังด้วยผนังรับแรงเฉือนในระนาบ X-X 126
5.5 เส้นสมรรถนะ (Capacity Curve) ของอาคาร
ที่เสริมกำลังด้วยวิธีขยายหน้าตัดเสาในทิศ Y-Y 127
5.6 พฤติกรรมการเกิดหน้าตัดพลาสติกของอาคาร
ที่เสริมกำลังด้วยวิธีขยายหน้าตัดเสาในทิศ Y-Y 128
5.7 พิกัดสมรรถนะของอาคารที่เสริมกำลังด้วยวิธีขยายหน้าตัดเสาในทิศ Y-Y 129
5.8 การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story Drift) ของอาคาร
ที่เสริมกำลังด้วยวิธีขยายหน้าตัดเสาในทิศ Y-Y 130

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูป

5.9 การเคลื่อนที่ระดับชั้นของอาคารที่เสริมกำลังด้วยวิธีขยายหน้าตัดเสาในทิศ Y-Y 130
5.10 เส้นสมรรถนะ (Capacity Curve) ของอาคารที่เสริมค้ำยันแนวทแยงในทิศ Y-Y 131
5.11 พฤติกรรมของการเกิดหน้าตัดพลาสติกของอาคารที่เสริมค้ำยันแนวทแยงในทิศ Y-Y 132
5.12 พิกัดสมรรถนะของอาคารที่เสริมค้ำยันแนวทแยงในทิศ Y-Y 133
5.13 การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story Drift) ของอาคาร
ที่เสริมค้ำยันแนวทแยงในทิศY-Y 134
5.14 การเคลื่อนที่ระดับชั้นของอาคารหลังจากการเสริมค้ำยันแนวทแยงในทิศ Y-Y 134
5.15 เส้นสมรรถนะ (Capacity Curve) ของอาคารที่เสริมผนังรับแรงเฉือนในทิศ Y-Y 135
5.16 พฤติกรรมของการเกิดหน้าตัดพลาสติกของอาคารที่เสริมผนังรับแรงเฉือนในทิศ Y-Y 136
5.17 พิกัดสมรรถนะของอาคารที่เสริมผนังรับแรงเฉือนในทิศ Y-Y 137
5.18 การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story Drift) ของอาคาร
ที่เสริมผนังรับแรงเฉือนในทิศ Y-Y 138
5.19 การเคลื่อนที่ระดับชั้นของอาคารที่เสริมผนังรับแรงเฉือนในทิศ Y-Y 138
5.20 เปรียบเทียบเส้นสมรรถนะของอาคารเดิมและที่เสริมกำลังโดยวิธีต่าง ๆ ในทิศ Y-Y 139
5.21 เปรียบเทียบลักษณะการเสียหายของอาคาร ณ พิกัดสมรรถนะของอาคารในทิศ Y-Y 140
5.22 เปรียบเทียบพิกัดสมรรถนะของอาคารในทิศ Y-Y 142
5.23 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น ณ พิกัดสมรรถนะของอาคารในทิศ Y-Y 142
5.24 เส้นสมรรถนะ (Capacity Curve) ของอาคาร
ที่เสริมกำลังด้วยวิธีขยายหน้าตัดเสาในทิศ X-X 144
5.25 พฤติกรรมของการเกิดหน้าตัดพลาสติกของอาคาร
ที่เสริมกำลังด้วยวิธีขยายหน้าตัดเสาในทิศ X-X 145
5.26 พิกัดสมรรถนะของอาคารที่เสริมกำลังด้วยวิธีขยายหน้าตัดเสาในทิศ X-X 145
5.27 การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story Drift) ของอาคาร
ที่เสริมกำลังด้วยวิธีขยายหน้าตัดเสาในทิศ X-X 146

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูป

5.28 การเคลื่อนที่ระหว่างชั้นของอาคารที่เสริมกำลังด้วยวิธีขยายหน้าตัดเสาในทิศ X-X 147
5.29 เส้นสมรรถนะ (Capacity Curve) ของอาคารที่เสริมค้ำยันแนวทแยงในทิศ X-X 148
5.30 พฤติกรรมการเกิดหน้าตัดพลาสติกของอาคารที่เสริมค้ำยันแนวทแยงในทิศ X-X 149
5.31 พิกัดสมรรถนะของอาคารที่เสริมค้ำยันแนวทแยงในทิศ X-X 150
5.32 การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story Drift) ของอาคาร
ที่เสริมค้ำยันแนวทแยงในทิศ X-X 150
5.33 การเคลื่อนที่ระหว่างชั้นของอาคารที่เสริมค้ำยันแนวทแยงในทิศ X-X 151
5.34 เส้นสมรรถนะ (Capacity Curve) ของอาคารที่เสริมผนังรับแรงเฉือน ในทิศ X-X 152
5.35 พฤติกรรมของการเกิดหน้าตัดพลาสติกของอาคารที่เสริมผนังรับแรงเฉือน ในทิศ X-X 153
5.36 พิกัดสมรรถนะของอาคารที่เสริมผนังรับแรงเฉือนในทิศ X-X 154
5.37 การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story Drift) ของอาคาร
ที่เสริมผนังรับแรงเฉือนในทิศ X-X 155
5.38 การเคลื่อนที่ระดับชั้นของอาคารที่เสริมผนังรับแรงเฉือน ในทิศ X-X 155
5.39 เปรียบเทียบเส้นสมรรถนะของอาคารเดิมและเสริมกำลังโดยวิธีต่าง ๆ ในทิศ X-X 156
5.40 เปรียบเทียบลักษณะการเสียหายของอาคาร ณ พิกัดสมรรถนะของอาคารในทิศ X-X 158
5.41 เปรียบเทียบพิกัดสมรรถนะของอาคารในทิศ X-X 159
5.42 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น ณ พิกัดสมรรถนะของอาคารในทิศ X-X 160
ก.1 หน้าตัดคาน B1 174
ก.2 หน้าตัดคาน B2 175
ก.3 หน้าตัดคาน B9 176
ก.4 หน้าตัดเสา C1-2 177
ก.5 หน้าตัดเสา C2-3 178
ก.6 Compression strength determination of confine concrete from lateral confining
stresses for rectangular section 179

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูป

ข.1 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดเมื่อคานเริ่มคราก คาน B1 181
ข.2 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดสูงสุด คาน B1 182
ข.3 กำลังต้านทานโมเมนต์ดัดเมื่อคานเริ่มคราก คาน B2 183
ข.4 กำลังต้านโมเมนต์ดัดสูงสุด คาน B2 184
ข.5 กำลังโมเมนต์ดัดเมื่อคานเริ่มคราก คาน B9 185
ข.6 กำลังต้านโมเมนต์ดัดสูงสุด คาน B9 186
ข.7 เสารับแรงอัดและแรงดัดพร้อมกัน C1-2 187
ข.8 เสารับแรงอัดและแรงดัดพร้อมกัน C2-3 190
ค.1 กำหนด Grid line ของโครงสร้าง 193
ค.2 กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ 194
ค.3 กำหนดหน้าตัดคานและเสา 194
ค.4 กำหนดหน้าตัดคานและเสา 195
ค.5 กำหนดคุณให้มีคุณสมบัติเป็น Nonlinear 195
ค.6 กำหนดการวิเคราะห์ Push Over Analysis 196
ค.7 เลือกรูปแบบการวิเคราะห์ 197
ง.1 กำหนดลักษณะของโครงสร้าง 199
ง.2 กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ 200
ง.3 กำหนดหน้าตัดคานและเสา 200
ง.4 กำหนดจำนวนหน้าตัดไฟเบอร์และมวลของโครงสร้าง 201
ง.5 กำหนดน้ำหนักเพิ่มเติม 201
ง.6 กำหนดระยะการวิเคราะห์ 202
ง.7 กำหนดความเครียดที่ทำให้ความเสียหายของวัสดุในระดับต่างๆ 202
ง.8 ผลแสดงในรูปความสัมพันธ์ของแรงเฉือนที่ฐานและการเคลื่อนที่ของยอดอาคาร 203
ง.9 แสดงระดับความเสียหายของชิ้นส่วนอาคาร 203

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อักษรย่อและสัญลักษณ์

V	แรงเฉือนที่ฐาน
C_s	สัมประสิทธิ์ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหว
W	น้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผลของอาคาร
S_a	ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่นพื้นฐาน
R	ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (Response Modification Factor, R)
I	ตัวประกอบความสำคัญของอาคาร (Important Factor) จำแนกตามลักษณะการใช้งานและความสำคัญของอาคารที่มีต่อสาธารณชนและการบรรเทาภัยหลังเกิดเหตุ
S_{MS}	ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที ที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร หน่วยเป็น ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก (g)
S_{M1}	ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 1.0 วินาที ที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร หน่วยเป็น ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก (g)
F_a	สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 0.2 วินาที (ตาราง 2.4)
F_v	สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 1 วินาที (ตาราง 2.5)
S_s	ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบสั้น 0.2 วินาที (ตาราง 2.3)
S_1	ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบ 1 วินาที (ตาราง 2.3)
S_{DS}	ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 0.2 วินาที
S_{D1}	ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 1 วินาที
T	ค่าคาบการสั่นพื้นฐานในทิศทางแกนหลักของอาคาร
H	ความสูงของอาคารวัดจากพื้นดิน มีหน่วยเป็นเมตร
F_i	แรงสถิตเทียบเท่าที่กระทำต่อชั้นที่ i (นิวตัน)
δ_i	การเคลื่อนที่ในแนวราบของอาคารที่ชั้นที่ i ไม่รวมผลของการบิด ณ ตำแหน่งศูนย์กลางมวลของชั้นที่เกิดจากแรงสถิตเทียบเท่า (เมตร)
g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก (เมตร/วินาที^{2})
n	คือ จำนวนชั้นของอาคาร
w_i	คือ น้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผลของชั้นที่ i (นิวตัน)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

F_x	แรงสถิตเทียบเท่าที่กระทำต่ออาคาร ณ ชั้นใด ๆ ในแนวราบ
C_{vx}	คือ ตัวประกอบการกระจายในแนวดิ่ง
w_x	คือ น้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผลของชั้นที่ x
h_i	คือ ความสูงที่ระดับชั้น i
h_x	คือ ความสูงที่ระดับชั้น x
k	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่กำหนดรูปแบบการกระจายแรง
Ec	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
E_s	โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก
fy	กำลังรับแรงดึงที่จุดคราก
E_{me}	โมดูลัสยืดหยุ่นของอิฐก่อ
I	โมเมนต์ความเฉื่อยของ
M_y	โมเมนต์คราก
θ_y	มุมหมุนคราก
ρ	อัตราส่วนเหล็กเสริม
V_c	แรงเฉือนของคอนกรีต
V_s	เหล็กเสริมตามขวางหรือเหล็กปลอก
S_a	ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม
S_d	ระยะทางตอบสนองเชิงสเปกตรัม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved