สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ค
กิตติกรรมประกาศ ง
สารบัญ จ
รายการตาราง ช
รายการรูปภาพ ซ
รายการสัญลักษณ์ ฎ

บทที่

1. บทนำ **1**
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ 2
1.3 ขอบเขตการศึกษา 2
1.4 วิธีการศึกษา 2

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง **4**
2.1 ลักษณะโครงสร้างตึกแถวในประเทศไทย 4
2.2 พฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อ 5
2.3 คุณสมบัติอิฐก่อในประเทศ 7
2.4 แบบจำลองคุณสมบัติของอิฐก่อ 11
2.5 แบบจำลองผนังอิฐก่อ 13
2.6 พฤติกรรมอาคารคอนกรีตที่มีผนังอิฐก่อในประเทศไทย 15

3. อาคารตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา **16**
3.1 อาคารตัวอย่างที่ใช้ศึกษา 16
3.1.1 ผลการสำรวจลักษณะอาคาร 16
3.1.2 รูปแบบทางสถาปัตยกรรม 17

หน้า

3.1.3 รูปแบบทางโครงสร้าง 19

4. การวิเคราะห์โครงสร้าง 35

4.1 การจัดทำแบบจำลองโครงสร้าง 35

4.2 การกำหนดพฤติกรรมการเสียรูปสำหรับแบบจำลองเสา-คาน 37

4.3 แบบจำลองผนังอิฐก่อ 40

4.3.1 แบบจำลองคุณสมบัติไร้เชิงเส้นของผนังอิฐก่อ 40

4.3.2 การจำลองสติฟเนสค้ำยันของผนังอิฐก่อ 41

4.4 การปรับแก้แบบจำลอง 42

4.5 คลื่นแผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์แบบ 3 มิติ 45

4.6 แบบจำลองและการวิเคราะห์ผล 54

5. ผลการวิเคราะห์ 57

5.1 โหมดการสั่น 57

5.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น 60

5.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้นแบบประวัติเวลา 64

6. สรุปผลการวิเคราะห์ 71

6.1 สรุปผลการวิเคราะห์ 71

เอกสารอ้างอิง 73

ภาคผนวก 75

ภาคผนวก ก การคำนวณความกว้างของค้ำยันของกำแพงอิฐก่อ 75

ภาคผนวก ข การทดสอบปริซึมอิฐก่อ 77

ประวัติผู้วิจัย 90

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2.3.1	กำลังรับแรงอัดของปริซึมอิฐก่อขนาดจริง	8
2.3.2	กำลังรับแรงอัดของมอตาร์สำหรับก่อผนัง	9
2.3.3	กำลังรับแรงอัดของมอตาร์สำหรับฉาบผนัง	9
3.1	ลักษณะทางสถาปัตยกรรมของกลุ่มอาคารตัวอย่าง	18
3.2	ดัชนีทางโครงสร้างคานของกลุ่มอาคารตัวอย่าง	22
3.3	ดัชนีทางโครงสร้างเสาของกลุ่มอาคารตัวอย่าง	23
3.4	ดัชนีโครงสร้างของเสา	24
3.5	ดัชนีโครงสร้างของคาน	24
4.1	รายการคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีประวัติเวลาไม่เชิงเส้นแบบ 3 มิติ ระดับรุนแรงน้อยถึงปานกลาง ตัวอย่างที่ อ.เมือง จ.กำแพงเพชร	46
4.2	รายการคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีประวัติเวลาไม่เชิงเส้น แบบ 3 มิติ ระดับรุนแรงปานกลางถึงสูง ตัวอย่างที่ อ.เมือง จ.กาญจนบุรี	47
4.3	รายการคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีประวัติเวลาไม่เชิงเส้น แบบ 3 มิติ ระดับรุนแรงสูงถึงสูงมาก ตัวอย่างที่ อ.วังชิ้น จ.แพร่	48
5.1	โหมดการสั่นของโครงสร้างด้วยโปรแกรม Perform 3D	57
ข1	ผลการทดสอบการรับแรงของปริซึมอิฐก่อ	83

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
1	ภาพความเสียหายของอาคารตึกแถวจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว จ.เชียงราย ปี พ.ศ. 2557	1
2.2-1	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างและการเคลื่อนตัวด้านข้าง	6
2.2-2	รูปแบบการวิบัติของโครงข้อแข็งคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อของ Merhrabi	7
2.3-1	การทดสอบหน่วยแรงอัดของปริซึมอิฐก่อ	8
2.3-2	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของปริซึมอิฐก่อกับค่าอิลาสติกโมดูลัสของปริซึมอิฐก่อในประเทศไทย	10
2.3-3	พฤติกรรมของกำแพงอิฐก่อ	11
2.3-4	ตัวอย่างสำหรับศึกษาพฤติกรรมของอิฐก่อสำหรับรับแรงในทิศทางต่างๆ	11
2.4-1	ผลการทดสอบปริซึมอิฐก่อเพื่อหาค่าอิลาสติกโมดูลัส	12
2.4-2	ผลการทดสอบปริซึมอิฐก่อที่ระดับความแข็งแรงของมอร์ต้าที่แตกต่างกัน	12
2.4-3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหน่วยแรง กับความเครียดของปริซึมอิฐก่อที่ระดับความแข็งแรงของมอร์ต้าที่แตกต่างกัน	13
2.5-1	ค้ำยันแนวทแยงเทียบเท่ารับแรงอัดเพียงอย่างเดียว (Equivalent compression strut)	14
3.1-1	ลักษณะทั่วไปของอาคารตัวอย่าง	17
3.1-2	ลักษณะของอาคารตัวอย่าง	26
3.1-3	แปลนโครงสร้างอาคารตัวอย่าง	27
3.1-3	แปลนโครงสร้างอาคารตัวอย่าง (ต่อ)	28
3.1-3	แปลนโครงสร้างอาคารตัวอย่าง (ต่อ)	29
3.1-3	แปลนโครงสร้างอาคารตัวอย่าง (ต่อ)	30
3.1-3	แปลนโครงสร้างอาคารตัวอย่าง (ต่อ)	31
3.1-3	แปลนโครงสร้างอาคารตัวอย่าง (ต่อ)	32
3.1-4	รูปตัวอย่างหน้าตัดเสาและคานของอาคารตัวอย่าง	33
3.1-4	รูปตัวอย่างหน้าตัดเสาและคานของอาคารตัวอย่าง (ต่อ)	34
4.1-1	พฤติกรรมของวัสดุซึ่งเป็นส่วนประกอบของหน้าตัด	35
4.1-2	แบบจำลองแบบ Lumped Plasticity Model	36
4.1-3	พฤติกรรมของผนังอิฐก่อภายใต้แรงกระทำทางด้านข้าง (Paulay and Priestley 1992)	36
4.2-1	การจำลองหน้าตัด	37
4.2-2	แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง-ความเครียดของคอนกรีต	38

หน้า

4.2-3 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรง-ความเครียดของเหล็กเสริม 39
4.2-4 แบบจำลองคานและเสาในโครงอาคาร 39
4.3-1 แบบจำลองไร้เชิงเส้นของกำแพงอิฐก่อ 41
4.3-2 ค้ำยันแนวทแยงเทียบเท่ารับแรงอัดเพียงอย่างเดียว (Equivalent compression strut) 42
4.4-1 ตัวอย่างการทดสอบ 43
4.4-2 ผลการทดสอบโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อภายใต้แรงสลับทิศ 43
4.4-3 การทดสอบโครงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังอิฐก่อภายใต้แรงสลับทิศ 44
4.4-4 แบบจำลองค้ำยันแนวทแยงเทียบเท่าที่รับแรงอัดได้เพียงอย่างเดียวแบบคำยันเดี่ยว 44
4.4-5 การเปรียบเทียบค่าระหว่างผลการทดสอบกับค่าจากแบบจำลอง 45
4.5-1 สเปกตรัมผลตอบสนองของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง อาคารตัวอย่าง 49
4.5-1 สเปกตรัมผลตอบสนองของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้าง อาคารตัวอย่าง (ต่อ) 50
4.5-2 คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับ อ.วังชิ้น จ.แพร่ 51
4.5-3 คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับ อ.เมือง จ.กาญจนบุรี 52
4.5-4 คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับ อ.เมือง จ.กำแพงเพชร 53
4.6-1 แบบจำลองโครงสร้างของอาคารตัวอย่าง 54
4.6-1 แบบจำลองโครงสร้างของอาคารตัวอย่าง (ต่อ) 55
5.1-1 รูปแบบการสั่นของโครงสร้างในโหมดการสั่นต่างๆ 57
5.1-1 รูปแบบการสั่นของโครงสร้างในโหมดการสั่นต่างๆ (ต่อ) 58
5.1-1 รูปแบบการสั่นของโครงสร้างในโหมดการสั่นต่างๆ (ต่อ) 59
5.2-1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้นของอาคาร 60
5.2-2 กราฟการเคลื่อนที่สัมพันธ์แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น 61
5.2-3 ลำดับความเสียหายของอาคารจากการวิเคราะห์แสดงความเสียหายที่กำแพงอิฐก่อ 62
5.2-4 ลำดับความเสียหายของอาคารจากการวิเคราะห์แสดงตำแหน่งการคราก ที่เหล็กเสริมในเสาอาคาร 62
5.2-5 ลำดับความเสียหายของอาคารจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static Pushover Analysis) อาคารเกิดการวิบัติ 63
5.2-6 ภาพความเสียหายของอาคารที่เกิดขึ้น 63
5.2-7 ตัวอย่างภาพตัดขวางอาคารแสดงลักษณะความเสียหายของอาคารที่เกิดขึ้น 63

หน้า

5.3-1 ค่าผลตอบสนองของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์เฉลี่ยระหว่างชั้นของอาคาร อ.เมือง จ.กำแพงเพชร 64
5.3-2 ค่าผลตอบสนองของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์เฉลี่ยระหว่างชั้นของอาคาร อ.เมือง จ.กาญจนบุรี 65
5.3-3 ค่าผลตอบสนองของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์เฉลี่ยระหว่างชั้นของอาคาร อ.วังชิ้น จ.แพร่ 66
5.3-4 ค่าความเครียดกับเวลาของเสาอาคารจากการวิเคราะห์โครงสร้าง 67
5.3-4 ค่าความเครียดกับเวลาของเสาอาคารจากการวิเคราะห์โครงสร้าง (ต่อ) 68
5.3-5 ตำแหน่งความเสียหายของตอม่อ ตัวอย่าง อ.วังชิ้น จ.แพร่ 68
5.3-6 ภาพแสดงตำแหน่งความเสียหายของตอม่อเนื่องจากแรงเฉือน 69
ข.1 ตัวอย่างอิฐมอญปั้นมือที่นำมาใช้ในการทดสอบ 78
ข.2 รูปตัวอย่างการทดสอบ 79
ข.3 รูปตัวอย่างที่จะใช้ในการทดสอบ 79
ข.4 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ 80
ข.5 การตัดตัวอย่างทดสอบให้ได้มุม และขนาดที่กำหนด 80
ข.6 ตัวอย่างทดสอบ 81
ข.7 การเตรียมการทดสอบ 82
ข.8 การผลทดสอบปริซึมอิฐก่อเทียบกับผลการรวบรวมข้อมูลของ ชนิภา เนตรรัตนะ 83
ข.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของปริซึมอิฐก่อที่มุมรับแรง 90 องศา 84
ข.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของปริซึมอิฐก่อที่มุมรับแรง 45 องศา 84
ข.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของปริซึมอิฐก่อที่มุมรับแรง 45 องศา (ต่อ) 85
ข.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของปริซึมอิฐก่อที่มุมรับแรง 35 องศา 85
ข.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของปริซึมอิฐก่อที่มุมรับแรง 35 องศา (ต่อ) 86
ข.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของปริซึมอิฐก่อที่มุมรับแรง 25 องศา 86
ข.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของปริซึมอิฐก่อที่มุมรับแรง 25 องศา (ต่อ) 87
ข.13 ภาพความเสียหายที่เกิดขึ้นภายหลังการทดสอบ 88
ข.14 ลักษณะการแยกตัวกันของปูนฉาบกับปริซึมอิฐก่อ 89

รายการสัญลักษณ์

A_g	=	พื้นที่หน้าตัดของเสา
A_v	=	พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน
a	=	ช่วงแรงเฉือน หาได้จากระยะครึ่งหนึ่งของช่วงความยาวระหว่างชิ้นส่วนองค์อาคาร
a	=	ความกว้างประสิทธิผลของค้ำยันแนวทแยง
b_w	=	ความกว้างของหน้าตัด
b''	=	ความกว้างของหน้าตัดเสาคิดที่ระยะระหว่างศูนย์กลางเหล็กปลอกที่ตั้งฉากกับทิศที่มีแรงมากระทำ
d	=	ความลึกประสิทธิผล
d_m	=	ความยาวตามแนวทแยงของผนังอิฐก่อ
E_c	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
E_{f}	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้าง
E_{i}	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของผนังอิฐก่อ
E_s	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็ก
E_{me}	=	โมดูลัสยืดหยุ่นของผนังอิฐก่อ
f_{yt}	=	กำลังครากที่คาดหมายของเหล็กเสริม
f_c'	=	กำลังอัดประลัยแบบทรงกระบอกของคอนกรีต
h	=	ความลึกของหน้าตัดองค์อาคาร
h_{col}	=	ความสูงของเสาจากศูนย์กลางคานถึงศูนย์กลางคาน
h_m	=	ความสูงของผนังก่ออิฐ
M_n	=	กำลังต้านทานโมเมนต์
V_a	=	ค่าแรงเฉือนของเสาที่ทำให้เกิดการวิบัติ
V_c	=	กำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต
V_n	=	กำลังต้านทานแรงเฉือนขององค์อาคาร
V_s	=	กำลังรับแรงเฉือนของเหล็กเสริม
s	=	ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมรับแรงเฉือน
t	=	ความหนาของผนังอิฐก่อ

ρ_s = อัตราส่วนปริมาตรของเหล็กปลอก คำนวณโดยนำปริมาตรของเหล็กปลอกทั้งหมดในหนึ่งชั้นหารด้วยปริมาตรของคอนกรีตที่ถูกโอบรัดภายในเหล็กปลอก

θ = มุมของความยาวแนวทแยง