



รายงานการวิจัย

การเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความสำคัญระดับสูงมากให้
ต้านทานแรงแผ่นดินไหวในเขตภาคเหนือของประเทศไทย
(Strengthening of Reinforced Concrete Buildings with very High
Significance to Earthquake Resistance in the Northern of
Thailand)

นายเจนศักดิ์ คชนิล

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

ประจำปีงบประมาณ 2561

พ.ศ. 2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อประเมินและเสริมสมรรถนะความต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก อาคารที่ศึกษาได้จากการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) ในเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในภาคเหนือของประเทศไทย ในที่นี้ได้แก่อาคารเรียนตามแบบมาตรฐานขนาด 4 ชั้น 12 ห้องเรียน ขั้นตอนการศึกษาสามารถดำเนินการดังนี้ คือ การรวบรวมข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประเมินสมรรถนะอาคาร การประเมินสมรรถนะอาคาร การเสริมกำลังให้กับอาคาร และการเปรียบเทียบผลการเสริมกำลังให้กับอาคาร

ผลการศึกษาพบว่า อาคารใช้ในการวิจัยมีข้อมูลพื้นฐานดังต่อไปนี้ คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมดังนี้คือ $S_s = 1.021$ และ $S_1=0.276$ ประเภทความสำคัญของอาคาร (III) ตัวประกอบความสำคัญ (1.25) ประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวตามมาตรฐาน มยพ.1302-52 (ง) ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง ($R=5$) ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน ($\Omega_0=3$) ตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว ($C_d=4.5$) อาคารเป็นอาคารประเภท ง การวิเคราะห์โครงสร้างใช้วิธีแบบสถิตไม่เชิงเส้น (Pushover Analysis) ผลการเสริมกำลังอาคาร พบว่าอาคารที่เสริมกำลังด้วยกำแพงรับแรงเฉือนสามารถต้านทานแรงเฉือนได้สูงที่สุด คือ 7,771 ตัน (ทิศทาง X) และ 6,529 ตัน (ทิศทาง Y) การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุด (Story Drift) ของอาคาร สำหรับอาคารเดิมและอาคารที่เสริมกำลังในลักษณะที่แตกต่างกันนี้มีสมรรถนะที่ยังอยู่ภายใต้ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level-IO) เส้นโค้งกำลังของอาคารที่เสริมกำลังด้วยผนังรับแรงเฉือนมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันสูงที่สุด อาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยคอนกรีต การหุ้มด้วยเหล็กแผ่น และการใช้ผนังรับแรงเฉือน พบว่าจุดหมุนพลาสติกไม่เกิดการเสียหายเลย เนื่องจากเป้าหมายในการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นอาคารสำคัญกำหนดให้มีระดับความเสียหายไม่เกินระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (IO) ตามมาตรฐาน มยพ.1303-57

คำสำคัญ : อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก การประเมินสมรรถนะอาคาร การเสริมกำลังอาคาร

Abstract

This research aimed to evaluate and strengthen earthquake resistance performance of reinforced concrete buildings. Building education from a specific sampling (Purposive Sampling) in a vulnerable zone of earthquake in the North of Thailand. The building includes a standard-size 4-storey 12 classroom. Step study can do this is to collect the basic data for the performance evaluation of the building. Performance evaluation of the building to strengthen buildings and compare the results to strengthen buildings.

The study found that the building was used in the research are the basic information is the following linear spectral response acceleration values: $S_1 = 1.021$, and $S_s = 0.276$, types of buildings (III), supporting priority (1.25), type design earthquake resistance compliant products. DPT 1302-52 (d), adjustment factor response ($R = 5$), excess power factor ($\Omega_0 = 3$), supporting the expansion of deflection ($C_d = 4.5$), the analysis methods are Pushover Analysis. It's found that the building was strengthened with shear wall shear can have the highest is 7,771 tons (direction X) and 6. 529 tons (direction Y), Story drift of a building for existing buildings and buildings that were added in such a different performance to the Immediate Occupancy Level (IO). Capacity curve of the building were strengthened with shear wall is a straight line with a slope as high as possible. The strengthening with concrete jacketing, steel jacketing and shear walls found that plastic hinge is not damaged at all. The goal of reinforced concrete building was immediately level (IO) by the DPT 1303-57.

Keywords : Reinforced Concrete Building, Performance evaluation of the building, strengthen of the building.

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยฉบับนี้ได้รับความอนุเคราะห์และการสนับสนุนจากบุคคลหลายฝ่ายซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้งานสำเร็จตามเป้าหมาย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน กระทรวงศึกษาธิการ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณาจารย์ บุคลากรของ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนเป็นอย่างดี ที่สำคัญขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนด้านพลังใจอันอบอุ่นทำให้ไม่ย่อท้อในการทำงาน ผู้วิจัยหวังว่าผลงานการวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับการศึกษาแก่ผู้สนใจทุกท่านในโอกาสต่อไป



เจนศักดิ์ คชนิล

สารบัญ

ปกใน	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ช
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก	5
2.2 แรงที่กระทำต่ออาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก	10
2.3 การประเมินความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหว	15
2.4 การเสริมความมั่นคงแข็งแรงให้กับอาคาร	20
2.5 ระดับสมรรถนะของอาคาร	21
2.6 วิธีการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร	26
2.7 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการ	
3.1 ทัวไป	33
3.2 ขอบเขตการศึกษา	33
3.3 กรอบความคิดในการวิจัย	35

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 ขั้นตอนและเครื่องมือการทำวิจัย	36
3.5 การแสดงผลการวิเคราะห์	41
3.6 การสรุปผล	42
บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิจัย	
4.1 การประมาณน้ำหนักบรรทุก (Load) ของอาคาร	43
4.2 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้าง	43
4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารโดยวิธี Pushover Analysis	45
4.4 แรงต้านข้างสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารโดยวิธี Pushover Analysis	46
4.5 แรงเฉือนของอาคาร (Story Shear)	47
4.6 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคาร (Story Drift)	58
4.7 เส้นโค้งกำลัง (Capacity curve)	69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	
5.1 การศึกษาแนวทางการประเมินและการเสริมสมรรถนะความต้านทานแผ่นดินไหว ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตภาคเหนือของประเทศไทย	75
5.2 การประเมินความต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตภาคเหนือ ของประเทศไทย	75
5.3 การเสริมสมรรถนะความต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ในเขตภาคเหนือของประเทศไทย	76
5.4 เปรียบเทียบวิธีการเสริมสมรรถนะความต้านทานแผ่นดินไหวรูปแบบต่างๆ ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตภาคเหนือของประเทศไทย	76
5.5 อภิปรายผล	77
5.6 ข้อเสนอแนะในการวิจัย	78
บรรณานุกรม	79
ภาคผนวก	83
ประวัติย่อผู้วิจัย	84

สารบัญตาราง

ตาราง	ชื่อตาราง	หน้า
2.1	จำนวนแท่งทดสอบและการทดสอบ	6
2.2	คุณสมบัติทางกลของเหล็กเสริม	8
2.3	น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load)	10
2.4	น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) ตามบัญญัติกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2522	11
2.5	แรงลมสำหรับออกแบบอาคาร	13
2.6	การจำกัดความเสียหายและระดับสมรรถนะของอาคาร	21
2.7	ระดับสมรรถนะของโครงสร้างและความเสียหาย	22
4.1	การเคลื่อนที่เป้าหมายของยอดอาคารทิศตามยาวของอาคาร (ทิศทาง X)	40
4.2	การเคลื่อนที่เป้าหมายของยอดอาคารทิศตามขวางของอาคาร (ทิศทาง Y)	40
4.3	การกระจายแรงสำหรับกรณีวิเคราะห์โครงสร้างอาคารโดยวิธี Pushover Analysis	41
4.4	แรงเฉือนของอาคารเดิมที่ยังไม่ได้เสริมกำลัง (ทิศทาง X)	42
4.5	แรงเฉือนของอาคารเดิมที่ยังไม่ได้เสริมกำลัง (ทิศทาง Y)	43
4.6	แรงเฉือนของอาคารเดิมที่คำนึงถึงผลของผนังอิฐก่อ (ทิศทาง X)	44
4.7	แรงเฉือนของอาคารเดิมที่คำนึงถึงผลของผนังอิฐก่อ (ทิศทาง Y)	45
4.8	แรงเฉือนของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยคอนกรีต (ทิศทาง X)	46
4.9	แรงเฉือนของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยคอนกรีต (ทิศทาง Y)	47
4.10	แรงเฉือนของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยเหล็กแผ่น (ทิศทาง X)	48
4.11	แรงเฉือนของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยเหล็กแผ่น (ทิศทาง Y)	49
4.12	แรงเฉือนของอาคารที่เสริมกำลังโดยผนังรับแรงเฉือน (ทิศทาง X)	50
4.13	แรงเฉือนของอาคารที่เสริมกำลังโดยผนังรับแรงเฉือน (ทิศทาง Y)	51
4.14	การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารเดิมที่ยังไม่ได้เสริมกำลัง (ทิศทาง X)	53
4.15	การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารเดิมที่ยังไม่ได้เสริมกำลัง (ทิศทาง Y)	54
4.16	การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารเดิมที่คำนึงถึงผลของผนังอิฐก่อ (ทิศทาง X)	55
4.17	การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารเดิมที่คำนึงถึงผลของผนังอิฐก่อ (ทิศทาง Y)	56

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	ชื่อตาราง	หน้า
4.18	การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยคอนกรีต (ทิศทาง X)	57
4.19	การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยคอนกรีต (ทิศทาง Y)	58
4.20	การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยเหล็กแผ่น (ทิศทาง X)	59
4.21	การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยเหล็กแผ่น (ทิศทาง Y)	60
4.22	การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารที่เสริมกำลังโดยผนังรับแรงเฉือน (ทิศทาง X)	61
4.23	การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารที่เสริมกำลังโดยผนังรับแรงเฉือน (ทิศทาง Y)	62



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

การเสริมกำลังให้กับอาคารเพื่อให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหวนั้นเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับอาคารในปัจจุบัน เนื่องจากสถานการณ์ภัยพิบัติต้านแผ่นดินไหวมีความรุนแรงและเป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนเป็นจำนวนมาก อาคารในประเทศไทยส่วนใหญ่ประมาณมากกว่า 80% เป็นอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ทั้งชนิดที่หล่อในที่ (Cast in Situ) และชนิดที่หล่อสำเร็จ (Precast Concrete) โดยอาจเป็นคอนกรีตหล่อสำเร็จแบบเหล็กเสริมธรรมดา หรือแบบเสริมเหล็กอัดแรง ที่เรียกว่าคอนกรีตอัดแรง (วินิต ช่อวิเชียร, 2545:15) อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กนี้มีการคำนวณออกแบบและก่อสร้างโดยวิธีอีลาสติคมาตั้งแต่ในอดีตซึ่งนับเป็นเวลานานมากกว่า 40 ปีโดยนับจากการกำหนดมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กของสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (มาตรฐาน ว.ส.ท., 2534: 28) ที่มีขึ้นครั้งแรกในปี พ.ศ.2515 ซึ่งเป็นการคำนวณออกแบบโดยคิดเฉพาะแรงกระทำในแนวตั้งเท่านั้น (Vertical Load) ยังมิได้คำนึงถึงแรงกระทำทางด้านข้าง (Lateral Load) ได้แก่แรงลม (Wind load) และแรงแผ่นดินไหว (Earthquake Load) ทำให้อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวนมากในประเทศไทยมีความเสี่ยงที่จะพังทลายลงได้เมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้น (เจนศักดิ์ คชนิล, 2555: STR003-2) ถึงแม้ในปัจจุบันกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย ได้จัดทำมาตรฐานการออกแบบอาคารไว้เรียกว่า มาตรฐานประกอบการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวปี พ.ศ. 2550 (มยผ.1301, 2550: 1-19) มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2552 (มยผ.1302, 2552: 1-55) และมาตรฐานประกอบการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวปี พ.ศ. 2554 (มยผ.1301, 2554: 11-18) แต่เป็นเพียงมาตรฐานที่นำไปใช้กับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบขึ้นมาใหม่เท่านั้น ยังมิได้มีมาตรฐานสำหรับการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเดิมให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้ จนกระทั่งปี พ.ศ. 2557 กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย ได้ดำเนินการจัดทำมาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวขึ้น (มยผ.1303, 2557: iii) เพื่อใช้สำหรับการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กขึ้นเป็นครั้งแรก มาตรฐานฉบับนี้ได้จัดทำขึ้นโดยอิงเอกสารวิชาการและมาตรฐานเกี่ยวกับการประเมินและการเสริมกำลังความต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารประเทศที่มีวิทยาการก้าวหน้าทางด้านนี้ ได้แก่ มาตรฐาน ASCE/SEI 41-06 (ASCE/SEI 41-06, 2007) มาตรฐาน JBDPA (JBDPA, 2001) และมาตรฐาน Eurocode 8 (Eurocode 8, 2005) เนื่องจากงานวิจัยในประเทศไทยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมและสมรรถนะของชิ้นส่วนอาคารในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวมีน้อยมาก ไม่เพียงพอที่จะนำมาสร้างเป็นมาตรฐานได้ สำหรับในปัจจุบันเทคนิคการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยจึงเป็นสิ่งใหม่ที่เพิ่งเริ่มต้นขึ้นและมีแนวทางการดำเนินการที่เป็นที่ยอมรับในระดับสากล ในปัจจุบันการเสริมกำลังอาคารให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวให้กับอาคารที่สร้างก่อนมาตรฐาน มยผ.1301 ปี พ.ศ.2550 จึงเป็นสิ่งจำเป็น (เจนศักดิ์ คชนิล, 2557) โดยเฉพาะอาคารสาธารณะที่มีความสำคัญในระดับสูงมากซึ่งมีผลกระทบต่อประชาชนจำนวนมากในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวในเขตภาคเหนือในประเทศไทย ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาการเสริมกำลังอาคารดังกล่าว

เพื่อเป็นการลดความสูญเสียในด้านชีวิต และทรัพย์สินของประชาชนที่ตกอยู่ในภาวะเสี่ยงต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้นได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาแนวทางการประเมินสมรรถนะและการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตภาคเหนือของประเทศไทยให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับ

1.2.2 ประเมินสมรรถนะและการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตภาคเหนือของประเทศไทยให้ต้านทานแผ่นดินไหวในระดับที่ยอมรับได้

1.2.3 วิเคราะห์วิธีการที่เหมาะสมในการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตภาคเหนือของประเทศไทยให้ต้านทานแผ่นดินไหว

1.2.4 จัดทำแบบก่อสร้างมาตรฐานที่ผ่านการเสริมกำลังให้ต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตภาคเหนือของประเทศไทย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ขอบเขตด้านเนื้อหา

ประกอบด้วยการศึกษา แนวทางการประเมินสมรรถนะและการเสริมกำลังอาคารให้ต้านทานแผ่นดินไหว การทำการประเมินสมรรถนะและการเสริมกำลังอาคาร การวิเคราะห์วิธีการที่เหมาะสมในการเสริมกำลังอาคารความต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตภาคเหนือของประเทศไทย และการจัดทำแบบก่อสร้างมาตรฐานที่ผ่านการเสริมกำลังแล้ว

1.3.2 ขอบด้านประชากร

อาคารต้นแบบในการศึกษานี้ผู้วิจัยใช้การสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) โดยผู้วิจัยได้ใช้วิจารณ์ญาติพิจารณายึดตามวัตถุประสงค์หรือลักษณะของการวิจัยเป็นสำคัญ (ณรงค์ โพธิ์พฤษานันท์, 2551) ในที่นี้ผู้วิจัยได้ทำการสำรวจข้อมูลการใช้อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตภาคเหนือของประเทศไทย เนื่องจากเป็นอาคารสาธารณะที่มีผลกระทบต่อชีวิตคนจำนวนมาก โดยมีการก่อสร้างอาคารเป็นไปตามแบบมาตรฐานของกองแบบแผน สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข

1.3.3 ขอบเขตด้านพื้นที่และระยะเวลาที่ทำการวิจัย

พื้นที่ในการดำเนินการวิจัยได้แก่ อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นอาคารสาธารณะ ในเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว ในภาคเหนือของประเทศไทย ระยะเวลาในการดำเนินโครงการเริ่มตั้งแต่เดือนตุลาคม 2560 ถึง กันยายน 2561

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 รวบรวมและสำรวจข้อมูลเกี่ยวกับการประเมินและการเสริมสมรรถนะให้อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กต้านแรงแผ่นดินไหว

1.4.2 ติดต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อสำรวจอาคารที่จะใช้เป็นอาคารตัวอย่างในงานวิจัย

1.4.3 ศึกษาแนวทางการประเมินและการเสริมสมรรถนะให้อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กต้านแรงแผ่นดินไหว

1.4.4 ประเมินสมรรถนะอาคารตัวอย่างในงานวิจัยที่ไม่มีการเสริมสมรรถนะอาคาร

- 1.4.5 ประเมินสมรรถนะอาคารตัวอย่างในงานวิจัยที่มีการเสริมสมรรถนะอาคาร 6 วิธี
- 1.4.6 วิเคราะห์เปรียบเทียบสมรรถนะของอาคารก่อนและหลังการเสริมสมรรถนะอาคาร
- 1.4.7 เปรียบเทียบวิธีการเสริมสมรรถนะอาคารด้านทานแผ่นดินไหวรูปแบบต่างๆ
- 1.4.8 จัดทำแบบก่อสร้างมาตรฐานที่ผ่านการเสริมกำลังให้ด้านทานแผ่นดินไหว
- 1.4.9 วิเคราะห์ผลการวิจัย และสรุปผลการวิจัย
- 1.4.10 เผยแพร่ผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ด้านวิชาการ

ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับแนวทางการประเมินและการเสริมสมรรถนะความต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตภาคเหนือของประเทศไทย โดยดำเนินการตามมาตรฐานของประเทศไทยที่เหมาะสม และเป็นที่ยอมรับในระดับสากล

1.5.2 ด้านนโยบาย

เป็นการวิจัยที่เป็นประโยชน์สอดคล้องกับนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2555-2559) จำนวน 2 ยุทธศาสตร์จากทั้งหมด 5 ยุทธศาสตร์ รายละเอียดดังนี้คือยุทธศาสตร์การวิจัยที่ 3 การอนุรักษ์ เสริมสร้าง และพัฒนาทุนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ในกลยุทธ์การวิจัยที่ 4 สร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับภัยพิบัติจากธรรมชาติและอุตสาหกรรม รวมทั้งระบบบริหารจัดการน้ำท่วมที่มีประสิทธิภาพ และยุทธศาสตร์การวิจัยที่ 4 การสร้างศักยภาพและความสามารถในการพัฒนานวัตกรรมและบุคลากรทางการวิจัย ในกลยุทธ์การวิจัยที่ 1 พัฒนาวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรมสู่เชิงพาณิชย์ รวมทั้งองค์ความรู้ใหม่ทางวิทยาศาสตร์ สังคมศาสตร์ และการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ในวิทยาการต่าง ๆ

1.5.3 ด้านเศรษฐกิจ/พาณิชย์

สามารถนำอาคารที่มีการประเมินและการเสริมสมรรถนะความต้านทานแผ่นดินไหวไปใช้ได้ มีการกระจายรายได้สู่ประชาชนเนื่องจากการสร้างแนวทางอาชีพเกี่ยวกับการก่อสร้างขึ้นมาใหม่คือ การเสริมสมรรถนะความต้านทานแผ่นดินไหวให้กับอาคารต่างๆ โดยมีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจในระยะยาว เนื่องจากมีความปลอดภัยต่อชีวิต และลดการสูญเสียทางเศรษฐกิจเป็นอย่างมากเมื่อมีเหตุการณ์แผ่นดินไหวเกิดขึ้นซึ่งเป็นการเพิ่มความเชื่อมั่นในการลงทุนสำหรับภาคเอกชนและภาครัฐบาลในเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว

1.5.4 ด้านสังคมและชุมชน

ประชาชนได้ใช้อาคารที่มีความมั่นคง แข็งแรง มีความปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สินสำหรับเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้น ทำให้สังคมและชุมชนเกิดความสงบสุขได้ถึงแม้จะมีทำเลที่ตั้งอยู่ในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว และเป็นการลดผลกระทบต่อสังคมและชุมชนได้ในกรณีที่ต้องดำเนินการฟื้นฟูและเยียวยาผู้ประสบภัยหลังจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่อาจเกิดขึ้น

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.6.1 อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Building) หมายถึง อาคารที่ก่อสร้างโดยวัสดุหลักคือคอนกรีตโดยภายใน ชั้นส่วนคอนกรีตโครงสร้างนั้นมีการใส่เหล็กเส้นเข้าไปเพื่อช่วยในการรับแรงดึงด้วย

1.6.2 การประเมินความต้านทานแรงแผ่นดินไหว (Seismic Evaluation) หมายถึง การตรวจสอบความสามารถในการต้านทานแผ่นดินไหวของชั้นส่วนโครงสร้างและบ่งชี้ข้อบกพร่องของอาคารตามเป้าหมายในการเสริมความมั่นคงแข็งแรงตามที่กำหนดโดยมาตรฐาน

1.6.3 การเสริมสมรรถนะความต้านทานแผ่นดินไหว (Seismic Rehabilitation) หมายถึง การแก้ไขข้อบกพร่องของอาคาร ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้อาคารไม่อาจบรรลุเป้าหมายระดับสมรรถนะของอาคารตามที่ต้องการ รวมทั้งการออกแบบเสริมความมั่นคงแข็งแรงของอาคาร ให้ใช้วิธีการและเกณฑ์ต่างๆให้ เป็นไปตามมาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับ



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประเมินและการเสริมสมรรถนะความต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างเหมาะสมนั้น สามารถพิจารณาได้จากการรวบรวมข้อมูลตามทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังแสดงในรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก หมายถึง อาคารที่มีโครงสร้างหลัก (Main Structure) ประกอบด้วยวัสดุสองประเภทคือ คอนกรีต และเหล็กเสริม เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่รับแรงอัดได้สูง แต่มีความสามารถในการรับแรงดึงต่ำ อีกทั้งยังมีความเปราะ เมื่อถูกกระทำด้วยแรงดึงจึงแตกหักได้ง่าย ในขณะที่เหล็กมีความสามารถในการรับแรงดึงสูง เมื่อถูกนำมาใช้งานร่วมกันจะเกิดการถ่ายเทแรงภายในระหว่างคอนกรีตและเหล็ก ช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงของวัสดุโดยรวมให้มากยิ่งขึ้น

2.1.1 กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต (Compressive Strength)

กำลังอัดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากที่สุดของคอนกรีต เนื่องจากการออกแบบคอนกรีตส่วนมากมักจะออกแบบให้คอนกรีตรับเฉพาะแรงอัดอย่างเดียว ถึงแม้ว่าคอนกรีตจะรับแรงดึงได้บ้างแต่มักจะไม่นำมาคิดในองค์อาคารส่วนที่ต้องรับแรงดึงเนื่องจากมักจะให้เหล็กเสริมรับแรงส่วนนี้ไป กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาส่วนผสม (โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์) อายุ การบ่ม และอื่น ๆ เนื่องจากวิวัฒนาการทางวิชาการของคอนกรีตได้พัฒนาไปมาก จึงทำให้ในปัจจุบันนี้สามารถผลิตคอนกรีตที่กำลังอัดถึง 700 กก./ cm^2 หรือสูงกว่าได้ กำลังอัดของคอนกรีต, f_c' หมายถึงกำลังอัดที่ได้จากการทดสอบแท่งตัวอย่างมาตรฐานรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. (มาตรฐานอเมริกัน) ที่อายุ 28 วัน ในบางครั้งแท่งตัวอย่างเป็นรูปลูกบาศก์ ขนาด 15 x 15 x 15 ซม. (มาตรฐานอังกฤษ) ปกติแล้วกำลังอัดของรูปลูกบาศก์จะสูงกว่ากำลังอัดของรูปทรงกระบอกมาตรฐาน การหาค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$f_c' = P_u / A$$

โดย

$$f_c' = \text{ความต้านทานแรงอัดของชิ้นตัวอย่างทดสอบ, กก./\text{cm}^2.}$$

$$P_u = \text{น้ำหนักกดสูงสุดที่ชิ้นตัวอย่างทดสอบรับได้, กก.}$$

$$A = \text{พื้นที่หน้าตัดที่รับน้ำหนักกดของชิ้นตัวอย่างทดสอบ, \text{cm}^2.}$$

และคำนวณหาค่าหน่วยน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างจากสูตร

$$W_c = W / V$$

โดย

$$W_c = \text{ความแน่นของชิ้นตัวอย่างทดสอบ, กก./\text{m}^3}$$

$$W = \text{น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างทดสอบ, กก.}$$

$$V = \text{ปริมาตรของชิ้นตัวอย่างทดสอบ, \text{m}^3}$$

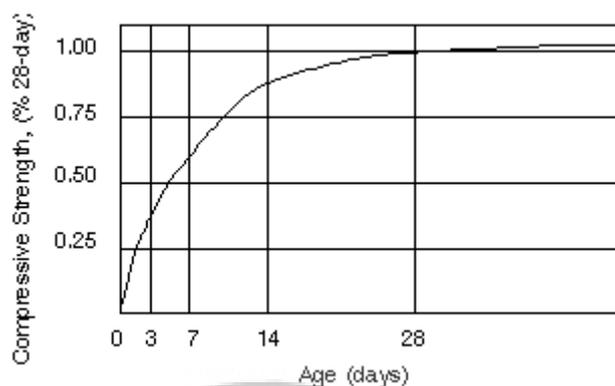
ในการออกแบบของค้ำอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก การกำหนดใช้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตเป็นสิ่งสำคัญ ผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงขีดความสามารถของผู้รับเหมาก่อสร้างด้วยว่า จะมีความสามารถผลิตคอนกรีตคุณภาพนั้น ๆ ได้หรือไม่ โดยปกติผู้ออกแบบจะกำหนดกำลังอัดของคอนกรีตสำหรับก่อสร้างจริงให้สูงกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้คำนวณออกแบบประมาณ 15 - 25% เนื่องจากกำลังของคอนกรีตในที่ก่อสร้างย่อมต่ำกว่ากำลังของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ จำนวนแห่งทดสอบและการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตสามารถพิจารณาจำนวนน้อยที่สุดของแห่งทดสอบหรือการทดสอบสำหรับคอนกรีตแต่ละประเภทตามจำนวนดังแสดงในตารางที่ 2.1 แล้วนำจึงนำไปทดสอบหาลำลังอัดของคอนกรีตเมื่ออายุ 28 วัน หรือตามอายุที่กำหนด

ตารางที่ 2.1 จำนวนแห่งทดสอบและการทดสอบ (วินิต ช่อวิเชียร, 2550; 10)

ชนิดของงาน	จำนวนน้อยที่สุดของแห่งทดสอบหรือการทดสอบสำหรับคอนกรีตแต่ละประเภท*
อาคาร, คอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป	แห่งทดสอบ 3 แห่ง ต่อวันหรือต่อผลัด การทดสอบ 1 ครั้ง (แห่งทดสอบ 2 แห่ง) ต่อคอนกรีตทุกๆ 100 ลูกบาศก์เมตร
คอนกรีตผสมเสร็จ (เมื่อใช้กำลังเป็นหลักในการรับรอง)	การทดสอบ 1 ครั้ง (แห่งทดสอบ 2 แห่ง) ต่อคอนกรีตชนิดหนึ่ง, การทดสอบ 1 ครั้ง สำหรับการบรรทุก ทุกๆ 25 ครั้ง
พื้นถนน	แห่งทดสอบ 2 แห่ง ต่อพื้นที่ 500 ตารางเมตร
เขื่อนกันน้ำ, คอนกรีตหลาทั่วไป	การทดสอบ 1 หรือ 2 ครั้ง ต่อผลัด

* สำหรับการทดสอบแต่ละประเภท (การบ่มมาตรฐาน หรือการบ่มในสนาม)

การทดสอบหาลำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตให้ปฏิบัติตามวิธีของ ASTM C39 โดยการกด หรืออัดแรงตามแนวแกนของแห่งทดสอบมาตรฐานอย่างช้าๆด้วยเครื่องทดสอบ จนกระทั่งคอนกรีตถูกอัดแตก (ภายในระยะเวลา 2-3 นาที) เมื่อนำค่าน้ำหนักกดหรือแรงอัดสูงสุดที่ได้มาหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของแห่งทดสอบที่รับแรงอัด จะได้ค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุด(กำลังของคอนกรีต)ของแห่งคอนกรีตนั้น ค่ากำลังของคอนกรีตจะถือเป็นที่ยอมรับได้เมื่อผลเฉลี่ยกำลังอัดของการทดสอบ 3 ครั้งต่อเนื่องกันให้ค่าเท่ากับหรือมากกว่า f_c' ที่กำหนด (วินิต ช่อวิเชียร, 2550) โดยที่กำลังอัดของการทดสอบแต่ละครั้ง (แห่งทดสอบ 2 แห่ง) อาจให้ค่าต่ำกว่า f_c' ได้ไม่เกิน 35 กก./ซม² ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับอายุของแห่งคอนกรีตมาตรฐานที่มีระยะเวลาต่างๆกันเมื่อรับแรงอัดตามแนวแกนจนแห่งคอนกรีตแตกสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2-1



ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดกับอายุของคอนกรีต
ที่มา : The University of Memphis. On-Line. (2017)

2.1.2 กำลังต้านทานแรงดึงของเหล็กเสริม (Tensile Strength)

เหล็กเสริม (Reinforcing bars หรือเรียกสั้นๆว่า Rebars) ซึ่งใช้ในงานก่อสร้างทั่วไปเป็นเหล็กกล้าละมุน (Mild Steel) มีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ต่ำ (ประมาณ 0-0.3%) ผลิตขึ้นแบบรีดร้อน (Hot Rolled) โดยการหลอมเหล็กแท่งแล้วรีดออกมาด้วยลูกกลิ้งให้มีขนาดและรูปร่างตามต้องการ ปัจจุบันสามารถแบ่งเหล็กเสริมคอนกรีตได้เป็น 2 กลุ่ม คือ เหล็กเส้นและเหล็กตะแกรง โดยเหล็กตะแกรงเป็นลักษณะของลวดเหล็กกำลังสูง เชื่อมยึดเป็นตะแกรงมาจากโรงงาน ทำให้สามารถใช้งานได้โดยไม่มีจำเป็นต้องผูก ซึ่งปกติจะใช้เสริมในพื้นที่สำเร็จหรือถนน ส่วนเหล็กเส้นยังสามารถแบ่งตามลักษณะภายนอกได้เป็น 2 ประเภท คือเหล็กกลม (Round Bars) และเหล็กข้ออ้อย (Deformed Bars) โดยเหล็กกลมจะมีหน้าตัดกลมและมีผิวเรียบ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 6, 9, 12, 15, 19, 22 และ 25 มม. หรือเรียกตามภาษาช่างว่าเหล็กขนาด 2 หุน, 3 หุน, 4 หุน, 5 หุน, 6 หุน, 7 หุน และเหล็ก 1 นิ้ว ตามลำดับ ซึ่งในปัจจุบันเหล็กกลมที่นิยมใช้คือขนาด 6 และ 9 มม. เพื่อใช้เป็นเหล็กปลอกและเสริมพื้น ส่วนเหล็กขนาดอื่นๆ มักจะใช้เหล็กข้ออ้อยแทน เพราะสามารถรับแรงได้มากกว่า

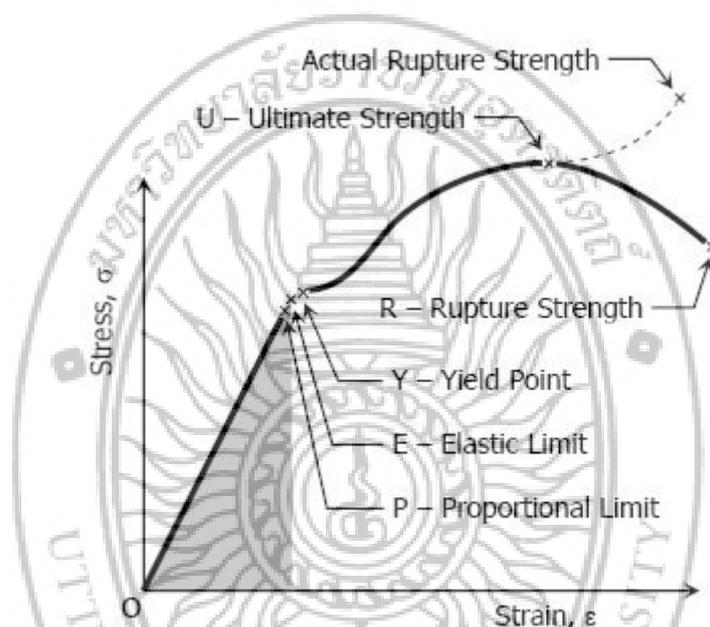
เหล็กข้ออ้อยจะมีผิวเป็นลักษณะขี้ผึ้ง เพื่อให้สามารถยึดเกาะกับคอนกรีตได้ดี โดยเหล็กข้ออ้อยในปัจจุบันมี 3 เกรด คือ SD30, SD40 และ SD50 ซึ่งมีกำลังครากไม่น้อยกว่า 3000, 4000 และ 5000 กก.ต่อ ตร.ซม. ตามลำดับ ซึ่งทั่วไปสำหรับอาคารขนาดเล็กเช่นอาคารพักอาศัยทั่วไป มักจะใช้เหล็กเกรด SD30 เนื่องจากความแข็งแรงไม่มากนัก สามารถตัดและตัดโดยใช้แรงคนได้ และสามารถซื้อได้ตามร้านขายวัสดุทั่วไป ส่วนเหล็กเกรด SD40 และ SD50 เหมาะสำหรับอาคารขนาดใหญ่ หรือบริษัทรับเหมาที่มีอุปกรณ์เครื่องมือตัด เนื่องจากเหล็กมีความแข็งแรง ทำให้ต้องตัดหรือตัดด้วยเครื่องมือ ความยาวของเหล็กเสริมที่หาซื้อจากร้านค้าทั่วไปคือ 10 เมตร แต่กำลังซื้อจำนวนมากจากโรงงานสามารถสั่งความยาวพิเศษคือ 12 เมตรได้ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 20-2527 และมอก. 24-2527 ให้ข้อกำหนดที่ต้องการทางด้านคุณสมบัติทางกล ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กเสริม (วินิต ช่อวิเชียร, 2550; 26)

ชนิดของเหล็กเสริม	ชั้นคุณภาพ	กำลังจุดคราก กก./ซม ²	กำลังดึงประลัย กก./ซม ²	ความยืด %	การทดสอบการดัดโค้งเย็น	
					มุมดัดโค้งเย็น	๓ ภายในส่วนโค้ง

		ไม่น้อยกว่า	ไม่น้อยกว่า	ไม่น้อยกว่า	องศา	ของ θ ของเหล็ก
เหล็กกลมเรียบ	SR24	2,400	3,900	21	180	1.5 เท่า
เหล็กข้ออ้อย	SD30	3,000	4,900	17	180	4 เท่า
	SD40	4,000	5,700	15	180	5 เท่า
	SD50	5,000	6,300	13	90	5 เท่า

เมื่อนำผลการทดสอบดึงเหล็กมาเขียนเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงกับหน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริม จะได้ดังที่แสดงในภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงดึงและหน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริม

ที่มา : Pinoy Math Community. On-Line. (2017)

จากภาพที่ 2-2 พบว่าขณะที่หน่วยแรงดึงยังอยู่ในช่วงอีลาสติกหรือช่วงยืดตัวของเหล็กเสริม หน่วยแรงดึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับหน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริม โดยการยืดตัวของเหล็กเสริมในช่วงยืดหยุ่นนี้ค่อนข้างน้อยและสามารถหดตัวกลับลงมาตามแนวเดิมได้หากเลิกดึง แต่เมื่อแรงดึงกระทำมากขึ้นจนกระทั่งถึงหน่วยแรงที่เหล็กเสริมเริ่มครากซึ่งเป็นจุดสิ้นสุดของช่วงอีลาสติก เหล็กเสริมจะเริ่มถูกดึงยืดออกขณะที่แรงดึงค่อนข้างคงที่เรียกว่าหน่วยแรง ณ. จุดนี้ว่า หน่วยแรงที่จุดคราก (Yield strength : f_y) หรือจุดยึด ซึ่งในบางครั้งอาจพบว่ามีทั้งจุดครากบน (Upper yield point) และจุดครากล่าง (Lower yield point) ตำแหน่งของจุดครากบนไม่แน่นอนขึ้นกับ อัตราแรงของแรงดึงและหน้าตัดของเหล็กเสริม ปกติถือว่าจุดครากล่างเป็นหน่วยแรงดึงที่จุดครากของเหล็กอย่างแท้จริง ช่วงที่หน่วยการยืดตัวของเหล็กเสริมเพิ่มมากขึ้นขณะที่แรงดึงค่อนข้างคงที่เรียกว่า ช่วงพลาสติก แต่เมื่อเหล็กเสริมมีกำลังที่จุดครากสูงขึ้นการยืดตัวในช่วงนี้การยืดตัวในช่วงนี้จะลดน้อยลงตามลำดับ ถัดจากช่วงนี้เหล็กเสริมจะมีพฤติกรรมใหม่ซึ่งสามารถรับแรงดึงเพิ่มขึ้นได้อีกและมีการยืดตัวเพิ่มขึ้น แต่หน่วยแรงดึงและหน่วยการยืดตัวไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงเหมือนกับในช่วงอีลาสติก เรียกช่วงนี้ว่าช่วงการแข็งตัวเพิ่ม (Strain hardening) เมื่อเหล็กเสริมรับแรงดึงจนกระทั่งถึงกำลังสูงสุดของเหล็กเสริมนั้น (Ultimate tensile strength) หน่วยแรงดึงจะค่อยๆลดลงและ

หน้าตัดของเหล็กเสริมเริ่มมีคอคอดเกิดขึ้นและเล็กลงตามลำดับซึ่งสังเกตได้ค่อนข้างชัดเจน จนกระทั่งถึงจุดที่เหล็กเสริมถูกดึงขาดออกจากกัน เรียกหน่วยแรงที่จุดนี้ว่า หน่วยแรงดึงที่จุดขาดของเหล็กเสริม

2.1.3 คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced concrete)

คอนกรีตเสริมเหล็ก คือ คอนกรีตที่มีการเพิ่มสมรรถภาพการรับน้ำหนัก โดยการนำเหล็กเข้ามาเพื่อช่วยเพิ่มความสามารถที่ขาดไปของคอนกรีต โดยเฉพาะในเรื่องความเปราะและการรับแรงดึง กลไกสำคัญที่ทำให้เกิดกำลังคือ คอนกรีตรับแรงอัดและเหล็กเสริมรับแรงดึง เนื่องจากคอนกรีตมีความแข็งแรงในการรับแรงอัดได้ดีแต่มีความอ่อนแอในการรับแรงดึง ดังนั้นเมื่อรับน้ำหนักจะเกิดการแตกร้าวจากการหดตัวและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ซึ่งทำให้เกิดหน่วยแรงดึงเกินกว่าที่คอนกรีตจะรับได้ ในคานคอนกรีตโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดจะถูกต้านทานโดยคู่ควมแรงอัด-แรงดึงในคอนกรีต คานดังกล่าวจะวิบัติอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดรอยร้าวครั้งแรกในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เหล็กเส้นจะถูกเสริมเข้าไปในคอนกรีตเพื่อรับแรงดึงทำหน้าที่แทนคอนกรีตหลังเกิดการแตกร้าว เพื่อทำหน้าที่เป็นแรงคู่ควมร่วมกับแรงอัดในคอนกรีตในการต้านทานโมเมนต์ดัดที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุก เหล็กและคอนกรีตทำงานร่วมกันอย่างดีเนื่องมาจากเหตุผลหลายประการ คือ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตมีเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการเลื่อนไถลของเหล็กเสริม ส่วนผสมคอนกรีตที่พอเหมาะจะช่วยป้องกันไม่ให้น้ำซึมผ่านมาทำให้เกิดการกัดกร่อนในเหล็กเสริม อัตราการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันของเหล็กและคอนกรีตทำให้เกิดแรงน้อยมากระหว่างคอนกรีตและเหล็กภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ลักษณะของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถแสดงดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2.3 ลักษณะของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

ที่มา : มหาสิวิล.คอม. ออนไลน์. 2560

2.2 แรงที่กระทำต่ออาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

แรงที่กระทำต่ออาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีผลทำให้ โครงสร้างของอาคารมีขนาดที่แตกต่างกัน ผู้ออกแบบโครงสร้างอาคารจะเป็นผู้กำหนดแรงหรือน้ำหนักที่จำเป็น โดยพิจารณาถึงผลประโยชน์ของอาคารที่สร้างขึ้นมาเป็นเกณฑ์กำหนด น้ำหนักที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีดังนี้ คือ

2.2.1 น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load)

น้ำหนักบรรทุกคงที่หมายถึง น้ำหนักที่มีตำแหน่งกระทำคงที่ถาวร และไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของน้ำหนัก ในที่นี้ได้แก่น้ำหนักองค์อาคารของโครงสร้างเอง ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก น้ำหนักของวัสดุประกอบโครงสร้างคูณด้วยปริมาตรขององค์อาคารหรือชิ้นส่วนอาคารนั้นๆ เช่น พื้นคอนกรีต เสาคอนกรีต และคานคอนกรีต เป็นต้น หน่วยน้ำหนักของวัสดุประกอบมักมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load)

น้ำหนักบรรทุกคงที่	หน่วยน้ำหนัก	หน่วย
คอนกรีตเสริมเหล็กธรรมดา	2,300-2,400	กก./ลบ.ม.
เหล็ก	7,700-7,900	กก./ลบ.ม.
ไม้	460-490	กก./ลบ.ม.
กระจก	2,900-3,000	กก./ลบ.ม.
น้ำ	1000	กก./ลบ.ม.
ผนังอิฐบล็อกจาก 10 ซม.	120-150	กก./ตร.ม.
ผนังอิฐมวลเบา 10 ซม.	180-200	กก./ตร.ม.
ผนังอิฐบล็อกจากมวลเบา 10 ซม.	90-100	กก./ตร.ม.
ผนังเบา เช่น ฝ้าไม้, ไม้อัด, ยิบซั่ม รวมโครงคร่าว	20-40	กก./ตร.ม.
หลังคากระเบื้องลอนคู่, ลอนเล็ก, รวมแปรง	12-15	กก./ตร.ม.
หลังคากระเบื้องโมเนีย, ดินเผาเคลือบ รวมระแนง	50-70	กก./ตร.ม.
โครงสร้างหลังคา	20-50	กก./ตร.ม.
ฝ้าเพดาน รวมคร่าว	15-20	กก./ตร.ม.
พื้นไม้รวมตง	30-50	กก./ตร.ม.
พื้นแผ่นสำเร็จรวมคอนกรีตทับหน้า หนา 10 ซม.	240-260	กก./ตร.ม.
พื้นผิวกระเบื้อง รวมปูนทราย หนา 5 ซม.	120-150	กก./ตร.ม.

2.2.2 น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load)

น้ำหนักบรรทุกจร หมายถึง น้ำหนักบรรทุกที่เป็นลักษณะมีการเคลื่อนย้าย เคลื่อนที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงขนาดน้ำหนักอยู่ตลอดเวลา หรืออยู่ชั่วคราว เช่น รถยนต์ หิมะ แรงลม ผู้คนที่ใช้อาคาร วัสดุอุปกรณ์สำนักงาน เป็นต้น ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาเราจะสามารถสังเกตได้ว่า แรงกระทำเหล่านี้จะเกิดขึ้นเป็นครั้งคราว และเมื่อมีการเคลื่อนย้ายออกไป ก็จะไม่มีความคงค้าง ซึ่งตามข้อกำหนดของพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 หรือข้อบัญญัติกรุงเทพมหานคร ว่าด้วยเรื่องควบคุมอาคาร พ.ศ. 2544 ได้กำหนดค่าน้ำหนักบรรทุกจรขั้นต่ำเพื่อใช้ควบคุมการออกแบบไว้ ดังแสดงในตารางที่ 2.4 เป็นตัวอย่างน้ำหนักบรรทุกจรสำหรับใช้คำนวณออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กตามบัญญัติกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2522

ตารางที่ 2.4 น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) ตามบัญญัติกรุงเทพมหานคร พ.ศ. 2522

ประเภทการใช้อาคาร	น้ำหนักบรรทุกจรขั้นต่ำ (กก./ตร.ม.)
หลังคา	50
พื้นกันสาดหรือพื้นหลังคาคอนกรีต	100
ที่พักอาศัย, โรงเรียนอนุบาล, ห้องน้ำ-ห้องส้วม	150
ห้องแถว, ตึกแถว, อาคารชุด, หอพักโรงแรม	200
สำนักงาน, ธนาคาร	250
อาคารพาณิชย์, มหาวิทยาลัย, วิทยาลัย และโรงเรียน	300
ห้องโถง, บันได และทางเดินของอาคารชุด, หอพัก, โรงแรม, โรงพยาบาล, สำนักงาน, ธนาคาร	300
ตลาด, ห้างสรรพสินค้า, หอประชุม, โรงมหรสพ, ภัตตาคาร, ห้องประชุม, ที่จอด/เก็บรถยนต์นั่ง	400
ห้องโถง, บันได และช่องทางเดินของอาคารพาณิชย์, มหาวิทยาลัย, วิทยาลัย, และโรงเรียน	400
คลังสินค้า, โรงกีฬา, พิพิธภัณฑ, อัฒจันทร์, โรงพิมพ์, โรงงานอุตสาหกรรม, ห้องเก็บเอกสารและพัสดุ	500
ห้องโถง, บันได, ช่องทางเดินของตลาด, ห้างสรรพสินค้า, หอประชุม, โรงมหรสพ, ภัตตาคาร, หอสมุด	500
ห้องเก็บหนังสือของหอสมุด	600

ที่จอดรถหรือเก็บรถยนต์บรรทุกเปล่าและรถอื่น ๆ	800
--	-----

2.2.3 น้ำหนักกระแทก (Impacted Load)

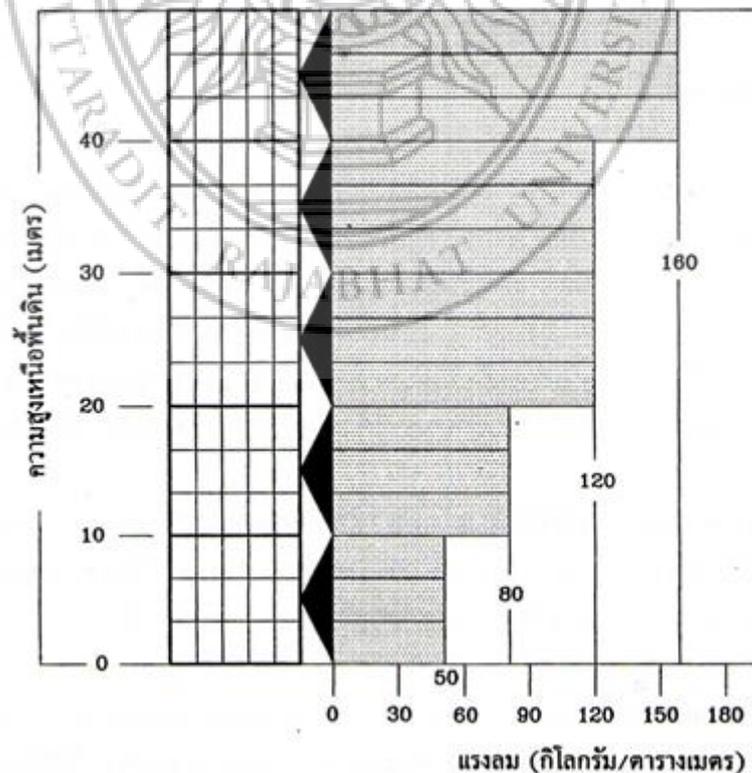
น้ำหนักกระแทก หมายถึง น้ำหนักที่ตกกระทบบนพื้นผิวจากที่สูงจะมีผลทำให้ Live Load ซึ่งมีค่าปกติอยู่แล้วจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม เช่น สถานที่เดินร่ำ โรงยิมเนเซียม ฯลฯ จะมีค่าน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับ Live Load และ ระยะตก

2.2.4 น้ำหนักเคลื่อนที่ (Moving Load)

น้ำหนักเคลื่อนที่ หมายถึง น้ำหนักบรรทุกที่มีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาไม่หยุดนิ่ง จะมีผลทำให้ Live Load ลดลงจากเดิม โดยอาศัยความเร็วเป็นตัวพ่วงน้ำหนักไว้ เช่น รถยนต์เคลื่อนที่ผ่านสะพาน ฯลฯ

2.2.5 แรงแลม (Wind Load)

แรงแลม หมายถึง แรงแลมที่พัดผ่านตัวอาคาร การเคลื่อนย้ายของลมมีลักษณะคล้ายกับการไหลของน้ำ สามารถทำให้สิ่งที่ยาวทิศทางอยู่โคนลง หรือพังทลายลงมา เช่น อาคารสร้างขึ้นในที่โล่งบริเวณใกล้ๆ ไม่มีอาคารและต้นไม้ใหญ่อยู่เลย อาคารนั้นจะรับแรงแลมอย่างเต็มที่ จะต้องระมัดระวังแรงแลมเป็นพิเศษ แต่ถ้ามีอาคารและต้นไม้ใหญ่อยู่ใกล้ๆ อาคารที่สร้างขึ้น จะทำให้กระแสลมที่กระทำกับอาคารลดลง โดยเทศบัญญัติได้กำหนดไว้ในภาพที่ 2-4 และ ตารางที่ 2.5



ภาพที่ 2.4 ลักษณะของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก
ที่มา : ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. ออนไลน์. (2560)

ตารางที่ 2.5 แรงลมสำหรับออกแบบอาคาร

ชนิดของวัสดุ	น้ำหนักบรรทุกจร (kg/m^2)
อาคารสูงไม่เกิน 10 เมตร	50
อาคารสูงไม่เกิน 10 - 20 เมตร	80
อาคารสูงไม่เกิน 20 - 40 เมตร	120
อาคารสูงเกิน 40 เมตร	160

2.2.6 น้ำหนักหิมะ (Snow Load)

น้ำหนักหิมะ หมายถึง น้ำหนักหิมะที่เกิดเฉพาะอาณาเขตที่มีอากาศหนาวเย็น บริเวณใกล้ขั้วโลกเหนือ และขั้วโลกใต้ มีสภาพเหมือนกับน้ำแข็งปกคลุมหลังคาของอาคาร ในขณะที่อุณหภูมิลดต่ำลง ใอน้ำจะรวมตัวกันเป็นก้อน หิมะจะปกคลุมหลังคาในช่วงระหว่างนี้ น้ำหนักของหิมะไม่มีผลต่ออาคาร จะมีผลกระทบกับอาคารก็ต่อเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหิมะจะเกิดการละลาย น้ำหนักของหิมะจะกระทำกับอาคารอย่างเต็มที่ แต่สำหรับประเทศไทยอยู่ในเขตร้อน ไม่มีหิมะเลย จึงไม่ต้องคำนึงถึงน้ำหนักของหิมะ

2.2.7 แผ่นดินไหว (Earth Quake)

แผ่นดินไหว หมายถึง การเกิดแผ่นดินไหวซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงภายในของโลก มีผลกระทบต่อผิวโลก อาจเกิดจากภูเขาไฟระเบิด เกิดจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว อาคารที่สร้างขึ้นมาจะอยู่ในสภาพนิ่ง เมื่อเกิดแผ่นดินไหวจะเกิดแรงกระทำพื้นฐานราก ทำให้ฐานรากเกิดการเคลื่อนที่ เมื่อส่วนล่างเคลื่อนที่ส่วนบนจะอยู่นิ่ง จึงเสมือนกับมีแรงสวนทางกัน การออกแบบอาคารให้สามารถรับแผ่นดินไหวได้ จะต้องเพิ่มความแข็งแรงให้มากขึ้น คือ เพิ่มค่าปลอดภัย (Factor of safety) ให้สูงมากกว่าอาคารปกติ จะมากเพียงไรนั้นขึ้นอยู่กับอิทธิพลของแผ่นดินไหวว่าจะรุนแรงเพียงใด หรืออาจมีการออกแบบฐานรากให้มีลักษณะยืดหยุ่นได้ (Flexible) หรือเคลื่อนที่ได้โดยให้ตัวอาคารอยู่นิ่งเฉยขณะเดียวกันฐานรากเกิดการเคลื่อนที่โดยมี Roller ระหว่างตัวอาคารกับฐานราก

แรงและน้ำหนักดังกล่าวทั้งหมดเมื่อกระทำกับโครงสร้างอาคารเรียกว่า แรงภายนอก (External Force) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ 1) น้ำหนักที่กระทำเป็นจุด (Point Load) คือ น้ำหนัก หรือแรงกระทำกับพื้นที่ขนาดเล็ก เช่น น้ำหนักตงวางพาดลงบนคาน น้ำหนักที่ถ่ายจากเสาตงคาน ที่รองรับน้ำหนักของล้อรถยนต์ที่ถ่ายลงสู่ถนน ที่รองรับปลายคาน เป็นต้น 2) น้ำหนักที่แผ่กระจายเต็มพื้นที่ (Distributed Load) คือ น้ำหนักที่แผ่กระจายเต็มพื้นที่รองรับ เช่น น้ำหนักกำแพงถ่ายลงคาน น้ำหนักพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กถ่ายลงคาน น้ำหนักคาน น้ำหนักพื้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.1) น้ำหนักจะแผ่กระจายเท่ากันหมดทุกพื้นที่ย่อยๆ (Uniform Load) เช่น แรงดันของน้ำกระทำกับกันดั้ม น้ำหนักคาน การรับน้ำหนักของตง การรับน้ำหนักของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นต้น

2.2) น้ำหนักจะแผ่กระจายไม่เท่ากันหมดทุกพื้นที่ย่อยๆ (Non – Uniform Load) คือ การรับแรงโดยที่พื้นที่ส่วนหนึ่งรับน้ำหนักมาก และอีกแห่งหนึ่งรับน้ำหนักน้อย เมื่อเปรียบเทียบในบริเวณเดียวกัน เช่น แรงดันของน้ำกับผนัง ส่วนล่างจะรับน้ำหนักมาก ส่วนบนจะรับน้ำหนักน้อยลง เป็นต้น

จากแรงที่กระทำกับโครงสร้างทั้งหมดพบว่า แรงที่เป็นภัยพิบัติจากธรรมชาติที่สร้างความเสียหายรุนแรงต่อโครงสร้างต่างๆได้มากที่สุดได้แก่แรงจากแผ่นดินไหว ซึ่งเป็นแรงกระทำทางด้านข้าง (Lateral Load) ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

2.3 การประเมินความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหว

ในประเทศไทยได้กำหนดมาตรฐานการประเมินความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารไว้ได้แก่มาตรฐาน มยผ.1303-57 (มยผ.1303-57, 2557) ในส่วนที่ 5 ที่กล่าวถึงข้อกำหนดเกี่ยวกับการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อประเมินและเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร รายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1 ข้อกำหนดทั่วไปในการวิเคราะห์โครงสร้าง การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารให้เป็นไปตามข้อกำหนด ดังนี้

1) การเลือกใช้วิธีวิเคราะห์โครงสร้าง วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างตามมาตรฐานมยผ.1303-57 ครอบคลุมด้วยกัน 4 วิธีได้แก่

- (1) วิธีสถิตเชิงเส้น (Linear Static)
- (2) วิธีพลศาสตร์เชิงเส้น (Linear Dynamic)
- (3) วิธีสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static)
- (4) วิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Dynamic)

2) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

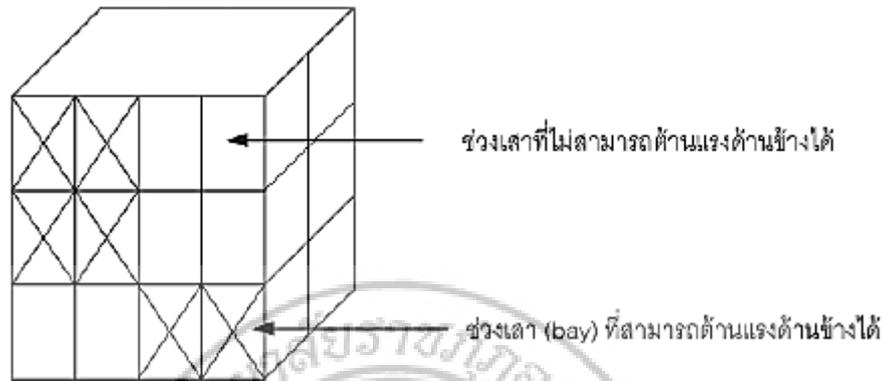
- สมมติฐานพื้นฐาน การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างอนุญาตให้ใช้แบบจำลองแบบ 3 มิติได้ในทุกกรณี และอนุญาตให้ใช้แบบจำลองแบบ 2 มิติได้เฉพาะกรณีตามที่มาตรฐานกำหนด

- การปิดตัวรอบแกนดิ่ง
- ชั้นส่วนโครงสร้างหลักและรอง
- สมมติฐานทางด้านค่าสติเฟนสและกำลัง
- แบบจำลองของฐานราก

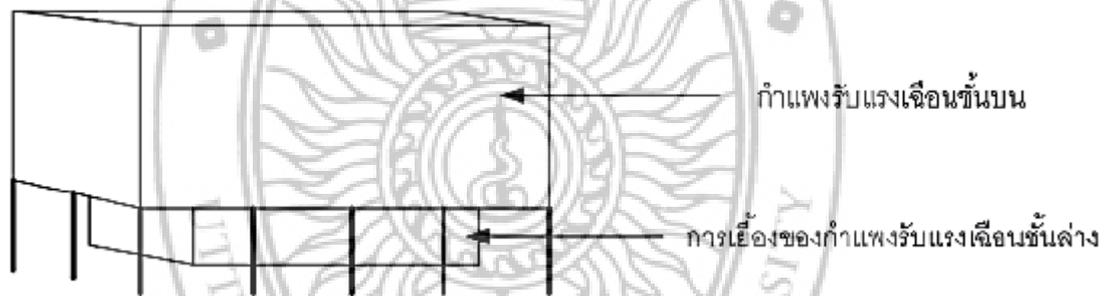
3) รูปทรงอาคาร ความสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอของรูปทรงอาคารขึ้นอยู่กับรูปทรงโครงสร้างในแนวราบและแนวตั้ง ในการประเมินอาคารในสภาพเดิม ให้พิจารณาจากรูปทรงอาคารเดิม ส่วนการวิเคราะห์อาคารที่ได้รับการเสริมความมั่นคงแข็งแรง ให้พิจารณาจากรูปทรงอาคารหลังจากที่มีการเสริมความมั่นคงแข็งแรงแล้ว ทั้งนี้ให้พิจารณาความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้างทั้งในสภาวะที่รวมและไม่รวมผลของชั้นส่วนโครงสร้างรอง การจำแนกความสม่ำเสมอหรือไม่สม่ำเสมอของรูปทรงอาคาร พิจารณาได้ดังนี้

- ความไม่ต่อเนื่องในแนวระนาบของระบบต้านแรงด้านข้าง
- ความไม่สม่ำเสมอจากการเยื้องออกนอกระนาบของระบบต้านแรงด้านข้าง
- ความไม่สม่ำเสมอจากการมีชั้นที่อ่อนแอ

- ความไม่สม่ำเสมอในด้านกำลังต้านทานการบิดตัวรอบแกนตั้ง



ภาพที่ 2.5 ความไม่ต่อเนื่องในแนวระนาบของระบบต้านแรงด้านข้าง
ที่มา : กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2557)



ภาพที่ 2.6 ความไม่สม่ำเสมอจากการเอียงออกนอกระนาบ
ที่มา : กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2557)

4) ไดอะแฟรม สามารถจำแนกประเภทได้ดังนี้

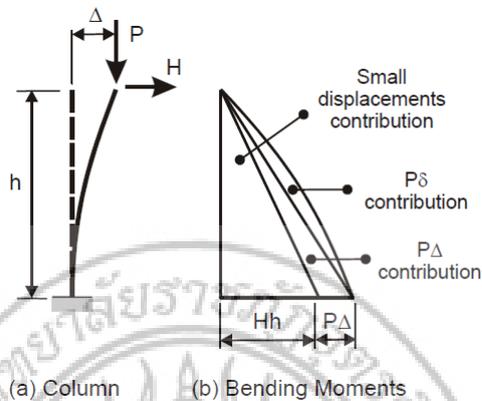
- แบบอ่อน (Flexible) เมื่อค่าการโก่งตัวสูงสุดในแนวระนาบของไดอะแฟรมมีค่ามากกว่า 2 เท่าของค่าเฉลี่ยของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story Drift) ของชิ้นส่วนแนวตั้งสำหรับต้านแรงด้านข้าง (Vertical Lateral Force Resisting Elements) ในชั้นที่อยู่ถัดไปด้านล่างของไดอะแฟรมนั้น

- แบบแข็ง (Stiff) เมื่อค่าการโก่งตัวสูงสุดในแนวระนาบของไดอะแฟรมมีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของค่าเฉลี่ยของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นของชิ้นส่วนแนวตั้งสำหรับต้านแรงด้านข้างในชั้นที่อยู่ถัดไปด้านล่างของไดอะแฟรมนั้น

- แบบแข็งเกร็ง (Rigid) เมื่อไม่สามารถทำการจำแนกให้เป็นแบบอ่อนหรือแบบแข็งเกร็งได้

5) ผลของ P- Δ ในการวิเคราะห์โครงสร้างทุกวิธีทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นต้องพิจารณาผลของ P- Δ สำหรับวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างแบบไม่เชิงเส้น ผลของ P- Δ แบบสถิตเนื่องจาก

น้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้ง ต้องรวมเข้าไปในการวิเคราะห์โดยการใช้อย่างจำลองทางคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปแบบไม่เชิงเส้นของทุกชิ้นส่วนโครงสร้างที่รับแรงตามแนวแกน ลักษณะของ P- Δ แสดงดังภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2.7 ลักษณะของ P- Δ

ที่มา : [Computers and Structures, Inc. On-Line. \(2017\)](#)

6) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้าง ในการวิเคราะห์โครงสร้าง ต้องประเมินผลกระทบจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้าง เมื่อคาบการสั่นที่เพิ่มขึ้นของอาคารเนื่องจากผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้างทำให้ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมเพิ่มขึ้น มิเช่นนั้นไม่จำเป็นต้องประเมินผลกระทบดังกล่าว การคำนวณผลกระทบจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้างมี 2 วิธีดังต่อไปนี้

- วิธีแบบง่าย (ASCE, 2005 : 201-202) ในการคำนวณผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้างโดยวิธีแบบง่ายยอมให้ใช้วิธีการที่กำหนดตามมาตรฐานสากล โดยใช้ค่าคาบการสั่นพื้นฐานประสิทธิภาพ (Effective Fundamental Period) และอัตราส่วนความหน่วงพื้นฐานประสิทธิภาพ (Effective Fundamental Damping Ratio) ของระบบโครงสร้างฐานราก

- วิธีแบบจำลองที่ชัดเจน ในการคำนวณผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้างโดยวิธีแบบจำลองที่ชัดเจน ต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่คำนึงถึงความอ่อนตัว (Flexibility) และความหน่วง (Damping) ของชิ้นส่วนดินและฐานรากแต่ละชั้น ค่าสติเฟนสของฐานรากต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐาน มยผ.1303-57 ค่าอัตราส่วนความหน่วงสำหรับชิ้นส่วนฐานรากแต่ละชั้นต้องไม่เกินค่าที่ใช้กับโครงสร้างส่วนบนในภาวะอีลาสติก

7) ผลของแรงแผ่นดินไหวหลายทิศทาง โครงสร้างของอาคารต้องได้รับการออกแบบให้สามารถต้านทานการสั่นไหวเนื่องจากแผ่นดินไหวที่มากกระทำได้จากทุกทิศทางในแนวราบ

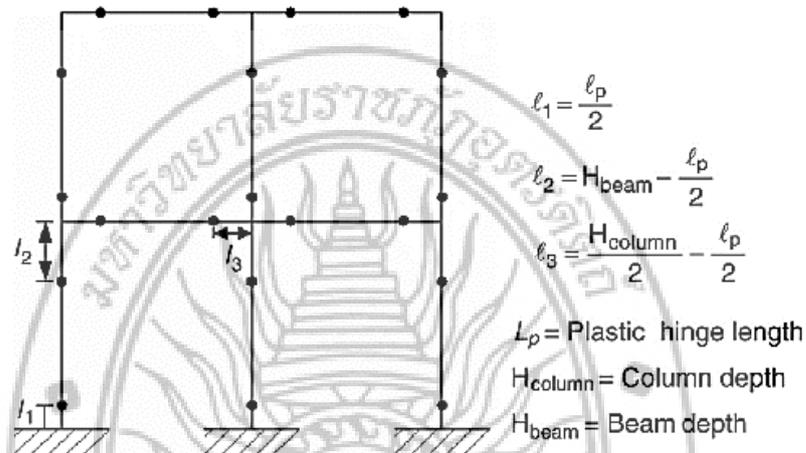
8) น้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้ง (QG) ในการรวมผลของแรง ผลของน้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้งต้องนำไปพิจารณารวมกับผลของแรงแผ่นดินไหว เมื่อผลของน้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้งและแรงแผ่นดินไหวต่อแรงในชิ้นส่วนโครงสร้างมีการเสริมกัน ให้พิจารณาผลของน้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้งที่ได้จากการรวมผลของน้ำหนักบรรทุกคงที่ (QD) และผลของน้ำหนักบรรทุกจร (QL) คือ

$$QG = 1.1(QD + QL)$$

หากผลของน้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้งและแรงแผ่นดินไหวมีการหักล้างกัน ให้พิจารณาผลของน้ำหนักบรรทุกแนวตั้ง (QG) ดังนี้

$$QG = 0.9QD$$

9) การตรวจสอบสมมติฐานที่ใช้ในการออกแบบ ต้องมีการตรวจสอบว่าตำแหน่งที่ขึ้นส่วนของโครงสร้างเกิดการเสีรูปแบบพลาสติกเป็นไปตามที่สมมติขึ้นในการสร้างแบบจำลองหรือไม่ ลักษณะของการเสีรูปแบบพลาสติกเมื่อโครงสร้างได้รับแรงด้านข้างแสดงดังภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2.8 การเสีรูปแบบพลาสติกเมื่อโครงสร้างได้รับแรงด้านข้าง

ที่มา : [ResearchGate. On-Line. \(2017\)](#)

10) การพลิกคว่ำ โครงสร้างอาคารต้องได้รับการออกแบบให้สามารถต้านทานโมเมนต์พลิกคว่ำจากแรงแผ่นดินไหว

- วิธีวิเคราะห์แบบเชิงเส้น เมื่อใช้วิธีวิเคราะห์แบบเชิงเส้น ความต้านทานโมเมนต์พลิกคว่ำขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของน้ำหนักบรรทุกคงที่เท่านั้น หรือร่วมกับการต้านทานแรงดึงและแรงถอนของรอยต่อที่ยึดรั้งกับขึ้นส่วนของโครงสร้างที่อยู่ใต้ระดับที่กำลังพิจารณา

- วิธีวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น ต้องจำลองการยกถอน หรือการโยกตัวของโครงสร้างด้านที่รับแรงดึงเนื่องจากแผ่นดินไหว

2.3.2 วิธีวิเคราะห์โครงสร้าง วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างในมาตรฐานนี้มี 4 วิธี คือ

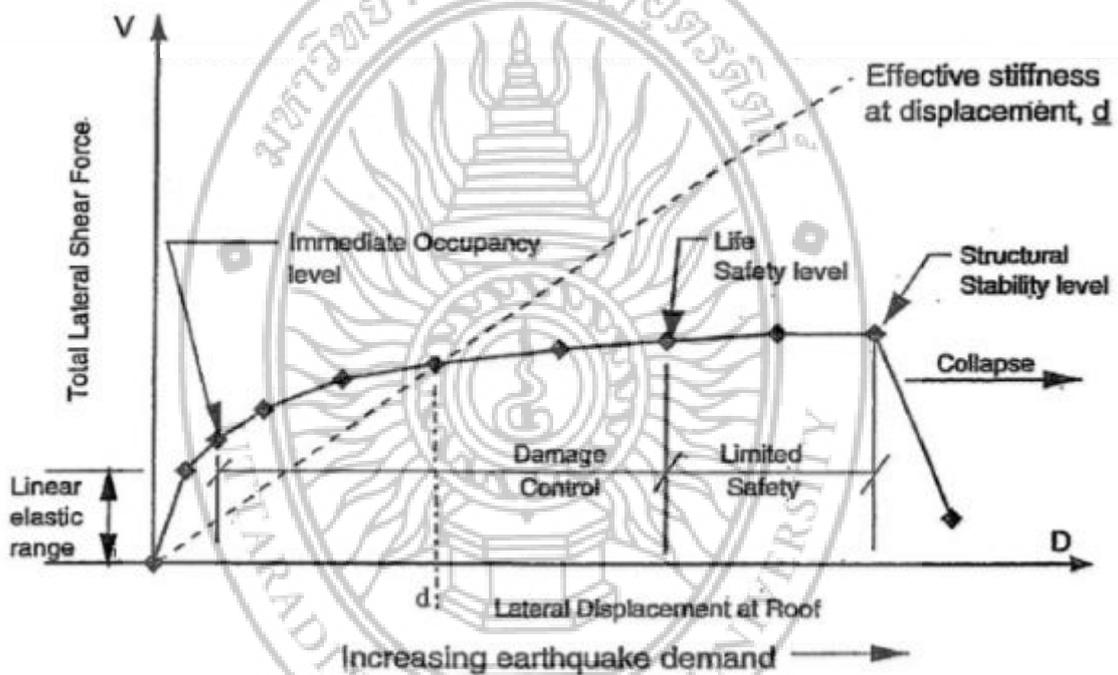
- วิธีสถิตเชิงเส้น (Linear static procedure, LSP) เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด โดยเปรียบเทียบอัตราส่วนของความต้องการต่อกำลังโครงสร้าง (DCR) >2 เหมาะกับโครงสร้างที่มีลักษณะสมมาตร และรูปร่างปกติ

- วิธีพลศาสตร์เชิงเส้น (Linear dynamic procedure, LDP) เหมาะกับโครงสร้างที่ไม่ปกติ ต้องใช้ประวัติเวลาของคลื่นแผ่นดินไหวในการวิเคราะห์

- วิธีสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear static procedure, NSP) เป็นวิธีที่ทำการผลักโครงสร้างให้ถึงการเคลื่อนที่เป้าหมายโดยตรวจสอบกำลังของหน้าตัดว่าสามารถเคลื่อนที่ได้ยอมให้หรือไม่ ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด

- วิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear dynamic procedure, NDP) เป็นวิธีที่มีความละเอียดสูงสุด แต่ต้องใช้เวลาในการแปรผล

ปัจจุบันวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดได้แก่ วิธีสถิตไม่เชิงเส้น เนื่องจากเป็นวิธีที่มีการป้อนข้อมูลที่ไม่ซับซ้อน และให้ผลใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริง โดยการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น เป็นการใช้แรงต้านข้างที่เป็นตัวแทนของแรงแผ่นดินไหวกระทำต่อโครงสร้าง โดยค่อย ๆ ผลักจนกระทั่งการเคลื่อนที่ของยอดอาคาร (ที่จุดควบคุม) มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่าการเคลื่อนที่เป้าหมาย การเสียรูปของอาคารจะเป็นลักษณะของโหมดที่ 1 ผลลัพธ์ ที่ได้จากการผลักได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐาน (Base shear force) เป็นแกนตั้ง และการเคลื่อนที่ที่ยอดอาคาร (Roof displacement) เป็นแกนนอน เรียกว่าเส้นโค้งกำลัง (Capacity curve) ดังแสดงในภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2.9 เส้นโค้งกำลังที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีสถิตไม่เชิงเส้น
ที่มา : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.). ออนไลน์. (2560)

2.3.3 เกณฑ์การยอมรับ การตรวจสอบเกณฑ์การยอมรับ ให้จำแนกชิ้นส่วนโครงสร้างเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างหลักหรือรอง และจำแนกพฤติกรรมเป็นพฤติกรรมที่ควบคุมโดยการเสียรูปและควบคุมโดยแรง ฐานรากเป็นไปตามเกณฑ์การยอมรับในมาตรฐาน

- การวิเคราะห์แบบเชิงเส้น
- การวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น

2.4 การเสริมความมั่นคงแข็งแรงให้กับอาคาร

การเสริมความมั่นคงแข็งแรง ต้องใช้มาตรการการเสริมความมั่นคงแข็งแรงเพื่อให้บรรลุเป้าหมายในการแก้ไขข้อบกพร่องซึ่งพบจากการประเมินความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคาร มาตรการที่เหมาะสมในการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร มีดังนี้

2.4.1 การปรับเปลี่ยนชิ้นส่วนโครงสร้างเฉพาะที่ (Local Modification of Component)

2.4.2 การลดความไม่สม่ำเสมอที่มีอยู่ของโครงสร้างอาคาร (Removal or Reduction of Existing Irregularities)

2.4.3 การเพิ่มสติฟเนสให้โครงสร้างโดยรวม (Global Structural Stiffening)

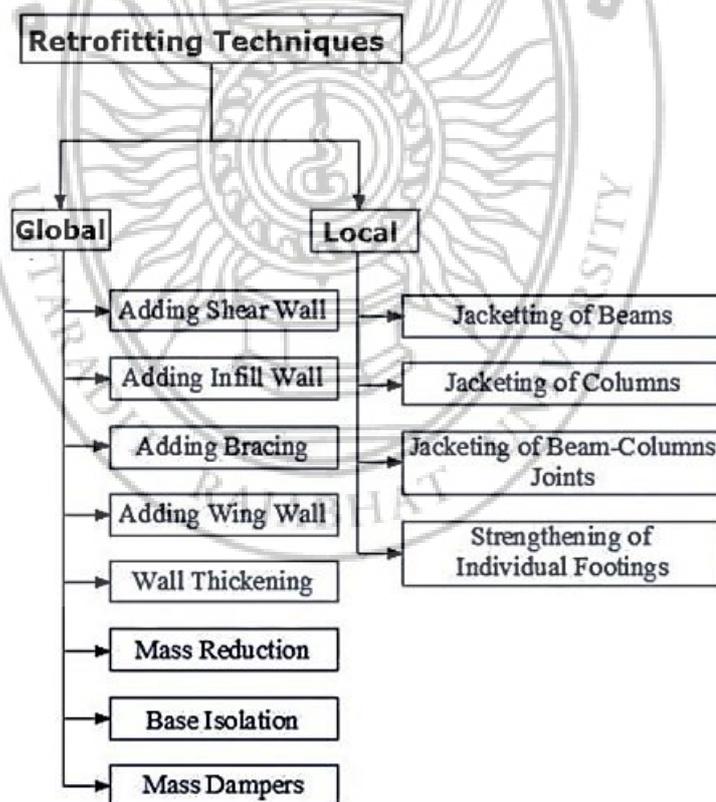
2.4.4 การเสริมความแข็งแรงให้โครงสร้างโดยรวม (Global Structural Strengthening)

2.4.5 การลดมวลรวมของโครงสร้าง (Mass Reduction)

2.4.6 การติดตั้งระบบสลายพลังงาน (Energy Dissipation System)

2.4.7 วิธีการอื่นๆ ที่ผ่านการวิจัยและการยอมรับในวงวิชาการสากล

เทคนิคการเสริมความมั่นคงแข็งแรงให้กับอาคารสามารถแสดงดังภาพที่ 2-10 โดยอาคารที่ได้ผ่านการออกแบบเสริมความมั่นคงแข็งแรงแล้ว ต้องได้รับการตรวจสอบว่ามีสมรรถนะเป็นไปตามเป้าหมายระดับสมรรถนะที่ออกแบบรวมทั้งข้อกำหนดต่างๆของมาตรฐาน



ภาพที่ 2.10 เทคนิคการเสริมความมั่นคงแข็งแรงให้กับอาคาร
ที่มา : The Constructor- Civil Engineering Home. On-Line. (2017)

2.5 ระดับสมรรถนะของอาคาร

2.5.1 ระดับสมรรถนะของอาคาร จำแนกได้เป็น 4 ระดับ คือ

- ระดับอาคารปฏิบัติงานได้ (Operational Level) หมายถึง ระดับสมรรถนะอาคารที่ขึ้นส่วนโครงสร้างมีระดับสมรรถนะโครงสร้างแบบเข้าใช้อาคารได้ทันที

- ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level-IO) หมายถึง ระดับสมรรถนะอาคารที่ขึ้นส่วนโครงสร้างมีระดับสมรรถนะโครงสร้างแบบเข้าใช้อาคารได้ทันที ในขณะที่ส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างเกิดความเสียหายเล็กน้อย อาคารมีสภาพที่สามารถกลับเข้าใช้งานได้อย่างปลอดภัยทันที หลังเกิดแผ่นดินไหว แม้วาระบบต่าง ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกันกับโครงสร้างอาจใช้งานไม่ได้

- ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (Life Safety Level-LS) หมายถึง ระดับสมรรถนะอาคารที่ขึ้นส่วนโครงสร้างมีระดับสมรรถนะโครงสร้างแบบปลอดภัยต่อชีวิต ซึ่งจำเป็นต้องทำการซ่อมแซมและบูรณะอาคารค่อนข้างมาก ก่อนกลับเข้าใช้งานได้ตามปกติ

- ระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse Prevention Level-CP) เป็นระดับสมรรถนะที่เกิดความเสียหาย โดยรวมที่รุนแรงมาก แต่สามารถทำการอพยพเพื่อหลีกเลี่ยงการเสียชีวิตของผู้ใช้อาคารส่วนใหญ่ได้ เนื่องจากอาคารยังไม่พังทลาย แต่อาจมีความเสี่ยง ต่อการสูญเสียชีวิตของผู้ใช้อาคารบางส่วน เนื่องจากการพังทลายของชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง

นิยามระดับความเสียหายและระดับสมรรถนะของอาคารโดยประมาณของอาคารในส่วนโครงสร้างและส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างสามารถแสดงดังในตารางที่ 2.6

2.5.2 ระดับสมรรถนะของโครงสร้างอาคาร จำแนกได้เป็น 3 ระดับ คือ

- ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level-IO)

- ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (Life Safety Level-LS)

- ระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse Prevention Level-CP)

นิยามระดับความเสียหายและระดับสมรรถนะของโครงสร้างสามารถแสดงดังในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.6 การจำกัดความเสียหายและระดับสมรรถนะของอาคาร

	ระดับป้องกันการพังทลาย	ระดับปลอดภัยต่อชีวิต	ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที	ระดับอาคารปฏิบัติงานได้
ความเสียหายโดยรวม	รุนแรงมาก	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำมาก
โครงสร้างทั่วไป	<ul style="list-style-type: none"> - อาคารมีสติฟเนสและกำลังค้ำอยู่ น้อยมากแต่เสาและกำแพงยังสามารถแบกทานน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วงต่อไปได้ - มีการเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างชั้นเกิดขึ้นมากอย่างถาวร - ทางออกบางแห่งถูกกีดขวางโดยชั้นส่วนที่พังลงมา - กำแพงอิฐก่อและผนังกันตก (parapets) พังเสียหาย - อาคารไถ่ล้ม 	<ul style="list-style-type: none"> - โครงสร้างอาคารทุกชั้นมีสติฟเนสและกำลังค้ำไว้ได้พอสมควร - องค์อาคารที่รับน้ำหนักจากแรงโน้มถ่วง คงความสามารถแบกทานน้ำหนักบรรทุกดังกล่าวได้ - ไม่มีการพังทลายของกำแพงหรือผนังกันตกในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของชั้นส่วน - มีการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นเล็กน้อยแบบถาวร - มีความเสียหายต่อผนังกันห้อง - อาคารอาจแยกแก็กการซ่อมแซมได้อย่างประหยัด 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่มีการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นแบบถาวร - โครงสร้างโดยรวมยังคงสติฟเนสและกำลังส่วนใหญ่ของเดิมไว้ได้ - ผนังรอบอาคาร (facades) ผนังกันห้องและฝ้าเพดานรวมทั้งชั้นส่วนโครงสร้าง เกิดรอยร้าวขนาดเล็ก - ลิฟต์สามารถเริ่มต้นใช้ใหม่ได้ทันที - ระบบดับเพลิงสามารถทำงานได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่มีการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นอย่างถาวร - โครงสร้างโดยรวมยังคงสติฟเนสและกำลังส่วนใหญ่ของเดิมไว้ได้ - ผนังรอบอาคาร ผนังกันห้องและฝ้าเพดานรวมทั้งชั้นส่วนโครงสร้าง เกิดรอยร้าวขนาดเล็กมาก - ระบบที่สำคัญต่อการดำเนินการปกติทั้งหมดสามารถทำงานได้
ส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (nonstructural components)	<ul style="list-style-type: none"> - มีความเสียหายมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - ชั้นส่วนทางสถาปัตยกรรม ระบบเครื่องจักรกลและไฟฟ้ามีความเสียหาย แต่ไม่มีความเสี่ยงจากวัตถุตกลงมา 	<ul style="list-style-type: none"> - อุปกรณ์และสิ่งของภายในโดยทั่วไปยังคงอยู่แต่อาจไม่สามารถใช้งานได้เนื่องจากความเสียหายด้านกลไกหรือระบบสาธารณูปโภคใช้งานไม่ได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ไม่มีความเสียหายเกิดขึ้น - ส่วนของระบบไฟฟ้าและสาธารณูปโภคต่างๆ สามารถใช้งานได้ ถึงแม้ว่าอาจต้องใช้ระบบฉุกเฉินช่วยสนับสนุน

ตารางที่ 2.7 ระดับสมรรถนะของโครงสร้างและความเสียหาย

ชั้นส่วน Elements		ระดับป้องกันการพังทลาย	ระดับปลอดภัยต่อชีวิต	ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที
โครงสร้างแรง	ชั้นส่วน	- เกิดรอยแตกร้าวอย่าง	- มีความเสียหายอย่าง	- เกิดรอยแตกร้าวเล็กน้อย

ตัดคอนกรีต	หลัก	<p>รุนแรงและเกิดจุดหมุนพลาสติกสำหรับชิ้นส่วนที่มีความเหนียว</p> <ul style="list-style-type: none"> - เกิดการแตกร้าวอย่างจำกัด (limited cracking) รวมถึงเกิดการพังเสียหายบริเวณรอยต่อทาบในเสาที่ไม่มี ความเหนียว - มีความเสียหายอย่างรุนแรงบริเวณเสาสั้น 	<p>รุนแรงต่อคาน</p> <ul style="list-style-type: none"> - มีการกระเทาะของคอนกรีตที่หุ้มและล่อนมีรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือน (shear cracking) (ความกว้างไม่เกิน 3 มิลลิเมตร) สำหรับเสาที่มีความเหนียว - มีการกระเทาะของคอนกรีตที่หุ้มเล็กน้อยสำหรับเสาที่ไม่มี ความเหนียว - เกิดรอยร้าวที่จุดต่อ (joint cracks) มีความกว้างไม่เกิน 3 มิลลิเมตร 	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดการครากอย่างจำกัดที่อาจเกิดขึ้นได้ในบางตำแหน่ง - ไม่มีการกระเทาะของคอนกรีต (มีความเครียดต่ำกว่า 0.003)
โครงสร้างแรงตัดคอนกรีต	ชิ้นส่วนรอง	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดการกระเทาะรุนแรงของคอนกรีตหุ้มในเสาและคาน มีความเสียหายที่รอยต่ออย่างรุนแรงเกิดการโก่งเดาะในเหล็กเสริมบางส่วน 	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดรอยแตกร้าวอย่างรุนแรงและเกิดจุดหมุนพลาสติกสำหรับชิ้นส่วนที่มีความเหนียว - เกิดการแตกร้าวอย่างจำกัด รวมถึงเกิดการพังเสียหายบริเวณรอยต่อทาบในเสาที่ไม่มี ความเหนียว - มีความเสียหายอย่างรุนแรงบริเวณเสาสั้น 	<ul style="list-style-type: none"> - มีการกระเทาะของคอนกรีตเล็กน้อยที่บางตำแหน่งในเสาและคานที่มีความเหนียว - เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการตัดในคานและเสา - การแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนตรงรอยต่อมีความกว้างน้อยกว่า 1.5 มิลลิเมตร
โครงสร้างแรงตัดคอนกรีต	การเคลื่อนที่ระหว่างชิ้น	<ul style="list-style-type: none"> - ร้อยละ 4 แบบชั่วคราวหรือแบบถาวร 	<ul style="list-style-type: none"> - ร้อยละ 2 แบบชั่วคราว - ร้อยละ 1 แบบถาวร 	<ul style="list-style-type: none"> - ร้อยละ 1 แบบชั่วคราว - การเคลื่อนที่แบบถาวรมีค่าน้อยมาก

ตารางที่ 2.7 ระดับสมรรถนะของโครงสร้างและความเสียหาย (ต่อ)

ชิ้นส่วน Elements		ระดับป้องกันการพังทลาย	ระดับปลอดภัยต่อชีวิต	ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที
กำแพงคอนกรีต	ชิ้นส่วนหลัก	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดรอยแตกร้าวขนาดใหญ่เนื่องจากแรงดัดและแรงเฉือนจนทำให้เศษวัสดุร่วงหล่นได้ - เกิดการเลื่อนไถลตรงรอยต่อ 	<ul style="list-style-type: none"> - องค์กรอาคารชอบ เกิดการแตกร้าวและปูนกระเทาะออกบ้าง รวมถึงมีการโก่งเดาะของเหล็กเสริมในวงจำกัด - เกิดการเลื่อนไถลตรงรอยต่อเล็กน้อย 	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กบนกำแพง ความกว้างน้อยกว่า 1.5 มิลลิเมตร - เกิดรอยแตกร้าวในคานยึดต่อกำแพง มี

		<ul style="list-style-type: none"> - เกิดการแตกอัดในคอนกรีตรุนแรงและเกิดการโก่งเดาะในเหล็กเสริม - บริเวณรอบช่องเปิดพังเสียหาย - มีความเสียหายที่องค์อาคารขอบ (boundary element) ของกำแพงอย่างรุนแรง - คานยึดต่อกำแพงแตกเสียหายจนหมดสภาพ 	<ul style="list-style-type: none"> - บริเวณรอบช่องเปิดมีความเสียหาย - มีรอยแตกร้าวจากการตัดและการอัด (crushing) บ้าง - คานยึดต่อกำแพงมีรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนและแรงดัดอย่างรุนแรง - มีการแตกอัดบ้างแต่สภาพคอนกรีตโดยรวมยังคงอยู่ 	ความกว้างน้อยกว่า 3 มิลลิเมตร
กำแพงคอนกรีต	ชิ้นส่วนรอง	<ul style="list-style-type: none"> - กำแพงแตกร้าวและหมดสภาพ 	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดรอยแตกร้าวขนาดใหญ่เนื่องจากแรงดัดและแรงเฉือน - เกิดการเลื่อนไถลตรงรอยต่อ - เกิดการแตกอัดอย่างรุนแรง - บริเวณรอบช่องเปิดพังเสียหาย - มีความเสียหายที่องค์อาคารขอบของกำแพงอย่างรุนแรง - คานยึดต่อกำแพงแตกร้าวและหมดสภาพ 	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดรอยแตกร้าวเล็กน้อยในกำแพง - เกิดการเลื่อนไถลตรงรอยต่อโครงสร้างเล็กน้อย - เกิดรอยแตกร้าวในคานยึดต่อกำแพง มีความกว้างน้อยกว่า 3 มิลลิเมตร - เกิดการกระเทาะเล็กน้อย

ตารางที่ 2.7 ระดับสมรรถนะของโครงสร้างและความเสียหาย (ต่อ)

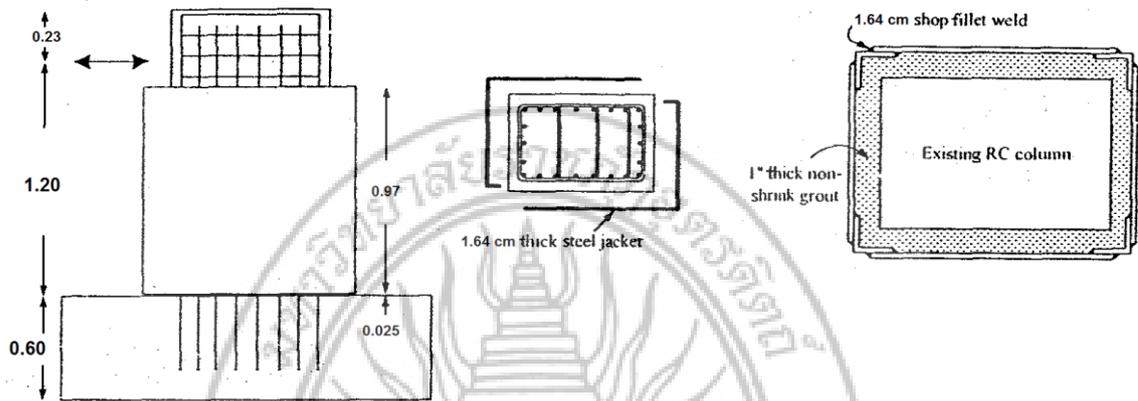
ชิ้นส่วน Elements		ระดับป้องกันการพังทลาย	ระดับปลอดภัยต่อชีวิต	ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที
กำแพงคอนกรีต	การเคลื่อนที่ระหว่างชั้น	<ul style="list-style-type: none"> - ร้อยละ 2 แบบชั่วคราวหรือแบบถาวร 	<ul style="list-style-type: none"> - ร้อยละ 1 แบบชั่วคราว - ร้อยละ 0.5 แบบถาวร 	<ul style="list-style-type: none"> - ร้อยละ 0.5 แบบชั่วคราว - การเคลื่อนที่แบบถาวรมีค่าน้อยมาก
ฐานราก	ทั่วไป	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดการทรุดตัวและเอียงตัวมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดการทรุดตัวน้อยกว่า 150 มิลลิเมตร และผลต่อการทรุดตัวน้อยกว่า 12 มิลลิเมตร ภายในช่วง 10 เมตร 	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดการทรุดตัวน้อยและเกิดการเอียงตัวน้อยมากไม่มีนัยสำคัญ

2.6 วิธีการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร

วิธีการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร ตามมาตรฐาน มยผ.1303-57 นั้นสามารถแบ่งออกเป็น 5 วิธีดังนี้

2.6.1 วิธีพอกโครงสร้างในคาน เสา หรือจุดต่อที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก แผ่นเหล็ก หรือวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย (มยผ.1508-51, 2551: มยผ.1901-51, 2551)

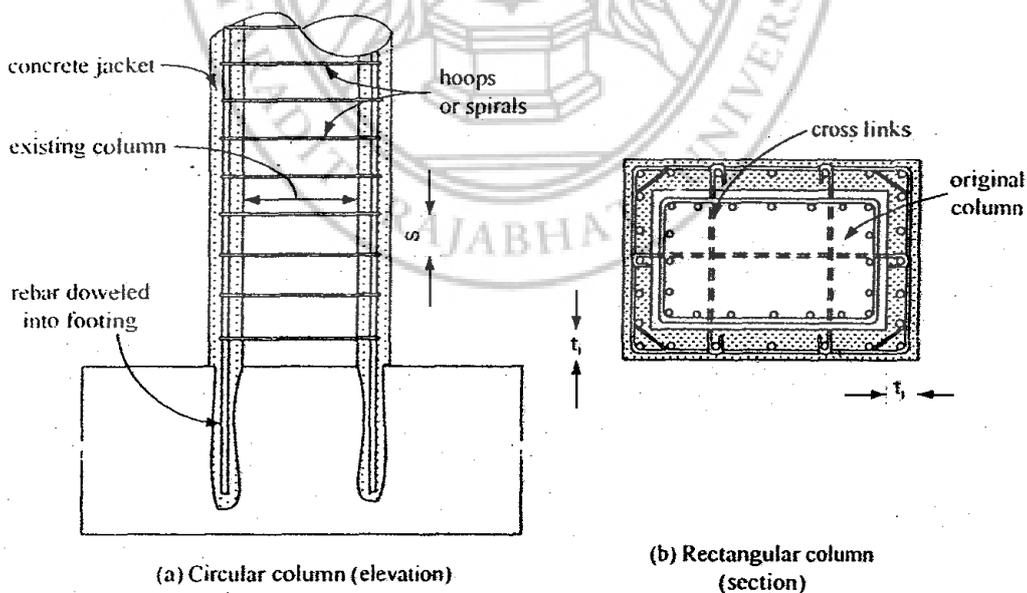
- การพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing) ดังภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2.11 การปรับปรุงรูปแบบการเสริมกำลังด้วย Steel Jacketing

ที่มา : Aboutaha et al., (1999)

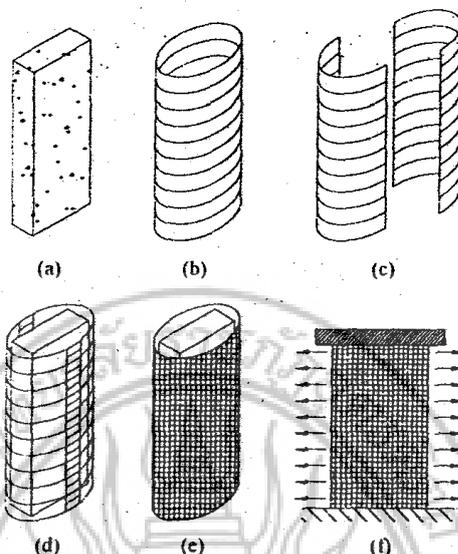
- การพอกโครงสร้างเสาที่มีอยู่เดิมด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Jacketing) ดังภาพที่ 2-12



ภาพที่ 2.12 การหุ้มด้วยคอนกรีต (Concrete Jacketing)

ที่มา : Priestley et al., (1995)

- การพอกโครงสร้างเสาและคานที่มีอยู่เดิมด้วยวัสดุคอมโพสิตประเภทพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer-FRP) ดังภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2.13 การประยุกต์ใช้ FRP ในเสาเหลี่ยม

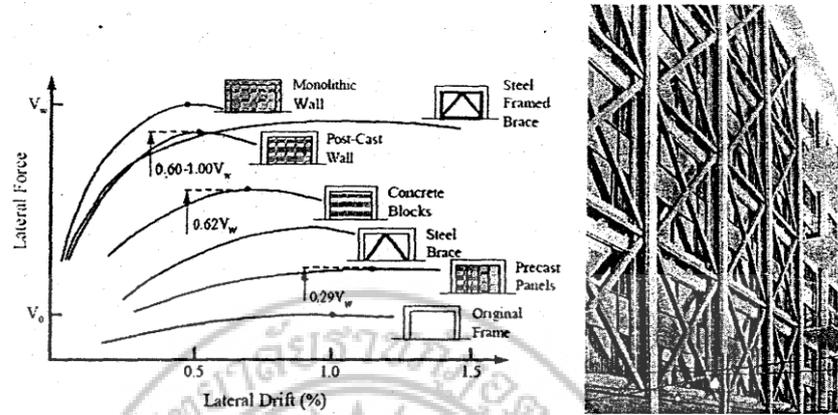
ที่มา : Yan et al. (2006)

การเสริมกำลังด้วยวิธีการเหล่านี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มกำลังรับแรงดัด แรงเฉือน การบิด ความสามารถในการเคลื่อนที่หรือความเหนียว และอื่นๆ การเสริมกำลังด้วยวิธีการดังกล่าวมานี้ ทั้งในด้านการออกแบบและการก่อสร้างต้องทำให้เกิดพฤติกรรมร่วม (Composite Action) ระหว่างหน้าตัดขององค์อาคารเดิมกับวัสดุเสริมกำลังที่นำมาติดตั้ง นอกจากนี้การเสริมกำลังที่ชิ้นส่วนใดนั้น ต้องคำนึงถึงกำลังรับน้ำหนักของชิ้นส่วนเชื่อมต่อที่อยู่ข้างเคียงด้วยว่าสามารถต้านทานแรงที่ถ่ายมาจากชิ้นส่วนที่เสริมกำลังแล้วหรือไม่ ทั้งนี้อาจต้องพิจารณาปรับปรุงกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกขององค์อาคารข้างเคียงด้วย สำหรับการคำนวณออกแบบเสริมกำลังชิ้นส่วนอาคารด้วยวิธีการข้างต้นนั้น ให้ใช้สูตรหรือสมการตามมาตรฐานสากลหรืออ้างอิงจากผลการทดสอบที่เป็นที่น่าเชื่อถือ หรือใช้ข้อแนะนำตาม มยพ.1303-57

2.6.2 การเพิ่มโครงสร้างต้านแรงด้านข้างโดยใช้กำแพงรับแรงเฉือนคอนกรีต รวมถึงโครงแกงแนงเหล็ก เป็นการเสริมความมั่นคงแข็งแรงโดยรวมให้กับอาคาร โดยอาศัยการเพิ่มโครงสร้างใหม่ที่ช่วยต้านทานแรงด้านข้างภายใต้แผ่นดินไหวที่พิจารณา การเสริมโครงสร้างในลักษณะนี้สามารถใช้กับกรณีที่โครงสร้างโดยรวมอ่อนแอและมีการเคลื่อนที่ไปมากภายใต้แผ่นดินไหวที่ใช้ประเมิน หรือในกรณีที่ชิ้นส่วนวิกฤติไม่มีความเหนียวเพียงพอในการรองรับการเสียรูปภายใต้แรงแผ่นดินไหว สามารถใช้การเพิ่มกำแพงรับแรงเฉือนรวมถึงโครงแกงแนงเหล็ก เพื่อเพิ่มสติเฟสและกำลังโดยรวมให้แก่โครงสร้างอาคารได้ การเสริมโครงสร้างโดยการเพิ่มกำแพงรับแรงเฉือน รวมถึงโครงแกงแนงเหล็กในลักษณะที่เหมาะสมยังสามารถลดความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงอาคารได้ และสามารถช่วยลดปัญหาโครงสร้างอาคารที่มีชั้นที่อ่อนหรือชั้นที่อ่อนแอ สำหรับกรณีที่อาคารมีความไม่สม่ำเสมอในด้านการบิด หากจัดให้มีการเสริมกำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงแกงแนงเหล็กในตำแหน่งที่เหมาะสม สามารถช่วยลดความไม่สม่ำเสมอดังกล่าวได้

การเสริมกำลังโดยรวมของทั้งอาคารสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้โครงสร้างเหล็ก โครงยึดรังเหล็ก กำแพงรับแรงเฉือน กำแพงผนังหล่อสำเร็จ เป็นต้น ซึ่งการเสริมกำลังเหล่านี้จะทำให้โครง

อาคารทั้งหลังมีกำลัง หรือความเหนียวเปลี่ยนแปลงไป ดังตัวอย่างที่แสดงในภาพ 2-14 ซึ่งแสดงถึงผลกระทบของการเสริมกำลัง โดยใช้องค์อาคารประเภทต่างๆ

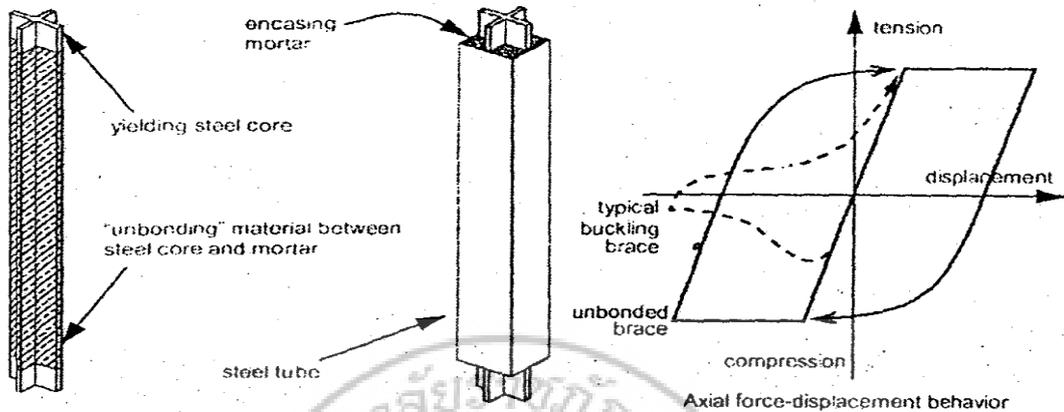


ภาพที่ 2.14 ตัวอย่างการเสริมกำลังโดยรวมของทั้งอาคาร

ที่มา : Sugano, (1989)

2.6.3 การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้อุปกรณ์สลายพลังงานแบบพาสซีฟ แบ่งได้เป็นประเภทที่คุณสมบัติขึ้นกับการเคลื่อนที่ ขึ้นกับความเร็ว หรือแบบอื่น การวิเคราะห์ต้องเป็นไปตามมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์แบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น อุปกรณ์การสลายพลังงานต้องได้รับการออกแบบโดยพิจารณาภาวะแวดล้อมในการใช้งาน ประกอบด้วย ความล่าช้า ความคืบ การเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ หรือความชื้นประกอบด้วย ในการสร้างแบบจำลองต้องพิจารณาตำแหน่งของอุปกรณ์สลายพลังงานในทางแปลนและตามความสูงของอาคารอย่างครบถ้วน ในการวิเคราะห์ ต้องพิจารณาคุณสมบัติที่อาจเปลี่ยนไปตามความถี่ อุณหภูมิ ความเร็ว และแรงภายในที่แยกทานอยู่ โดยอาศัยการวิเคราะห์หลายๆ กรณีที่ครอบคลุมช่วงคุณสมบัติของอุปกรณ์สลายพลังงาน

2.6.4 การติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมการสั่นสะเทือนโดยการเสริมกำลังด้วยวิธีการใช้ค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะ การเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถทำได้โดยการใช้ค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะ (Buckling Restrained Brace, BRB) ซึ่งเป็นค้ำยันที่มีลักษณะเป็นแกนเหล็กที่มีการหุ้มด้วยวัสดุลดการยึดเหนียว (Debonding Material) และมีการสอดไว้ในปลอกเหล็กที่มีการเติมคอนกรีตไว้เพื่อป้องกันแกนเหล็กไม่ให้เกิดการโก่งเดาะออกด้านข้าง (Lateral Buckling) ทั้งในระนาบและออกนอกระนาบของค้ำยัน โดยที่แกนเหล็กยังสามารถเคลื่อนที่ในแนวแกนได้ภายในปลอกหุ้มดังแสดงในภาพที่ 2-15 ในการออกแบบการเสริมกำลังด้วยค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะ ต้องวิเคราะห์และจำลองลักษณะการเสียรูปแบบไม่เชิงเส้นขององค์อาคาร การออกแบบและให้รายละเอียดปลายค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะ และจุดต่อระหว่างค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะและโครงสร้างคอนกรีต ต้องพิจารณาถึงขนาดของการเสียรูปที่เกิดขึ้น กำลังที่เพิ่มสูงขึ้น (Overstrength) อันเนื่องมาจากกำลังครากจริงของวัสดุ การเกิดพฤติกรรมความเครียดแข็งเพิ่มขึ้น และจากการที่แกนเหล็กไม่สามารถขยายตัวออกด้านข้างได้ขณะรับแรงอัด การออกแบบและให้รายละเอียดค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะ ให้ใช้วิธีตามมาตรฐานสากล หรืออาศัยวิธีการที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีทางกลศาสตร์ประกอบกับผลจากการทดสอบองค์อาคารค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะที่มีลักษณะเหมือนหรือคล้ายคลึงกับค้ำยันที่ไม่โก่งเดาะที่ต้องการใช้



ภาพที่ 2.15 ลักษณะของ Buckling Restrainted Brace

ที่มา : Kitamura et al., (2004)

2.6.5 การเสริมความแข็งแรงให้แก่ฐานรากอาคาร การกำหนดแผนการเสริมความแข็งแรงของฐานรากควรทำควบคู่ไปกับการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของระบบโครงสร้างและเป็นไปตามหลักการและข้อกำหนดของมาตรฐาน เพื่อให้การเสริมความมั่นคงแข็งแรงทำให้อาคารมีคุณลักษณะตามสมรรถนะที่ต้องการภายใต้การกระทำของแผ่นดินไหวที่กำหนดในกรณีที่ต้องมีการเสริมโครงสร้างใหม่ เพื่อเข้าไปทำงานร่วมกับโครงสร้างเดิม ผลกระทบที่เกิดจากความแตกต่างของสติเฟเนสของแต่ละชั้นส่วนต้องไม่ส่งผลให้อาคารมีพฤติกรรมไม่เป็นไปตามเกณฑ์การยอมรับ ความแตกต่างของค่าสติเฟเนสและกำลังรับน้ำหนักของแต่ละฐานรากต้องถูกนำมาพิจารณาประกอบการวิเคราะห์การเสริมความแข็งแรงโดยรวมของอาคารและฐานราก

2.7 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเกี่ยวกับการประเมินความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหว และเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับประเทศไทยในอดีตที่ผ่านมา มีดังต่อไปนี้

บริบูรณ์ สัมพันธุ์เจริญ และไพบูลย์ ปัญญาคะโป (2553) ศึกษาพฤติกรรมต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยองค์อาคารรับยึดใ้การโก่งเดาะ (Buckling Restrainted Brace, BRB) ในที่นี้ใช้อาคารเรียนตามแบบมาตรฐานกระทรวงศึกษาธิการสูง 5 ชั้น การวิเคราะห์ใช้วิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Dynamic Procedure) แบบ 3 มิติ ใช้การแบ่งหน้าตัดองค์อาคารของเสาและคานออกเป็นชิ้นส่วนย่อยเล็กๆ (Fiber Section) ในการวิเคราะห์ ผลการศึกษาพบว่ากรณีก่อนการเสริมกำลังให้กับอาคาร จากการวิเคราะห์คาดว่าอาคารตัวอย่างจะมีการวิบัติแบบชั้นอ่อน (Soft Story) ในชั้นล่าง และเกิดการวิบัติเฉพาะที่ในองค์อาคาร เสาชั้นล่างเกิดการแตกร้าวที่ผิวคอนกรีต เหล็กเสริมมีการเลื่อนหลุดที่รอยทาบ และเหล็กเสริมเกิดการครากที่ปลายบนของเสาชั้นล่างและชั้นสอง กรณีภายหลังจากการเสริมกำลังแล้วจากการวิเคราะห์พบว่าไม่เกิดการวิบัติดังกล่าว

เจนศักดิ์ คชนิล (2555) ศึกษาเกี่ยวกับการประเมินการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบสำหรับรับแรงในแนวตั้งในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย โดยการ

วิเคราะห์กำลังที่ต้องการ(Seismic Demand) คำนวณ Seismic Capacity จากมิติขององค์อาคารและเหล็กเสริมจริงของแต่ละองค์อาคาร เปรียบเทียบ Seismic Demand กับ Seismic Capacity โดยคำนวณอยู่ในรูป Demand Capacity Ratio (DCR) และวิเคราะห์รูปแบบการวิบัติของโครงสร้าง ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเกิดแผ่นดินไหวทิศทางตามขวางกับอาคารพบว่าจุดต่อคาน-เสา คาดว่าจะเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือน เมื่อเกิดแผ่นดินไหวในทิศทางตามยาวกับอาคารจะทำให้โครงสร้าง คาน มีแนวโน้มที่จะเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดัดและแรงเฉือน สรุปได้ว่าอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบเพื่อรับแรงในแนวดิ่งในเขตภาคเหนือของประเทศไทยมีความเสี่ยงที่จะเกิดการวิบัติเมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้น เนื่องจากการขาดรายละเอียดเหล็กเสริมเพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับอาคาร

N. Choopool and V. Boonyapinyo (2011) ศึกษาเกี่ยวกับการประเมินความสามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย อาคารที่ศึกษาเป็นอาคาร 9 ชั้นซึ่งมีการแปรผันความเหนียวที่แตกต่างกันคือ อาคารแบบความเหนียวพิเศษ (Special Ductile Frame-SDF) อาคารแบบความเหนียวจำกัด (Intermediate Ductile Frame-IDF) และอาคารแบบความเหนียวธรรมดา (Ordinary Ductile Frame-ODF) เปรียบเทียบกับอาคารที่ออกแบบให้รับแรงเฉพาะในแนวดิ่ง (Gravity Load Design-GLD) โดยใช้วิธีวิเคราะห์โครงสร้างแบบวิธีสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear Static) และวิธีพลศาสตร์ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Dynamic) ผลการศึกษาพบว่า SDF มีความเหนียวมากกว่า ODF แต่ SDF นี้มีความแข็งแรงน้อยกว่า ODF สำหรับการออกแบบช่วงไม่ยึดหยุ่นพบว่า SDF มีค่าสติฟเนสลดลงเมื่อโครงสร้างมีการเสียรูปเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่า PGAs เฉลี่ยที่โครงสร้างเกิดการวิบัติสำหรับอาคาร SDF, IDF, ODF, และ GLD คือ 0.76g, 0.60g, 0.50g, และ 0.29g ตามลำดับ

กรพล สายเชื้อ และคณะ (2556) ศึกษาเกี่ยวกับการตัดสินใจหลายตัวแปรในการคัดเลือกวิธีเสริมกำลังอาคารเรียนต้านทานแรงแผ่นดินไหวในเทศบาลนครเชียงใหม่ โดยใช้วิธีการตัดสินใจแบบหลายทางเลือก (MCDM) เป็นกระบวนการช่วยตัดสินใจในการเลือกแนวทางการเสริมกำลังอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็ก 3 วิธี คือ การเสริมกำลังอาคารด้วยวิธีขยายหน้าตัดเสา การเสริมค้ำยันแนวทแยง และการเสริมกำแพงรับแรงเฉือน ผลการศึกษาสรุปได้ว่า วิธีการเสริมกำลังด้วยวิธีเสริมค้ำยันแนวทแยง เป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุด

เอกลักษณ์ แสงวโรธม์ และคณะ (2556) ศึกษาเกี่ยวกับสมรรถนะของโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกออกแบบให้รับแผ่นดินไหวภายใต้แผ่นดินไหวรุนแรง อาคารตัวอย่างเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 ชั้นและ 10 ชั้น ซึ่งถูกออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐาน มยพ.1302-52 ด้วยโครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวจำกัดแล้วทำการวิเคราะห์แบบอินอีลาสติกเชิงเวลา (Inelastic Dynamic Analysis) ผลการวิเคราะห์พบว่าอาคาร 4 ชั้นมีระดับสมรรถนะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ความปลอดภัย แต่อาคาร 10 ชั้นไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์ความปลอดภัยที่คาดหวัง

สรุปการศึกษาที่ผ่านมาในอดีตเกี่ยวกับการประเมินและการเสริมความแข็งแรงให้กับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยนั้น ส่วนใหญ่มีแนวทางการประเมินและการเสริมสมรรถนะอาคารที่

หลากหลาย มีเกณฑ์การยอมรับที่ไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันเท่าที่ควร ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเป็นมาตรฐานเดียวกันสำหรับประเทศไทยและเป็นไปตามมาตรฐานสากล ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นการดำเนินการตามมาตรฐาน มยผ.1303-57 เป็นหลักในการศึกษาวิจัย



บทที่ 3

วิธีดำเนินการศึกษา

3.1 ทัวไป

ในบทนี้เป็นการแสดงขั้นตอนการดำเนินการศึกษา ที่มุ่งเน้นไปที่การประเมินและการเสริมสมรรถนะความต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตภาคเหนือของประเทศไทย ในพื้นที่ใช้อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความสำคัญระดับสูงมาก เนื่องจากเป็นอาคารสาธารณะที่มีผู้ใช้อาคารเป็นจำนวนมาก และมีการก่อสร้างจริงมาอย่างยาวนานตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันในเขตภาคเหนือของประเทศไทย การประเมินและการเสริมสมรรถนะความต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีรายละเอียดเกี่ยวกับสิ่งต่อไปนี้ คือ ขอบเขตการศึกษา ขั้นตอนการดำเนินงาน เครื่องมือการวิจัย สถิติที่ใช้ในการศึกษา การรวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูล การแสดงผลการวิเคราะห์ และการสรุปผล

3.2 ขอบเขตการศึกษา

3.2.1 ขอบเขตด้านประชากร

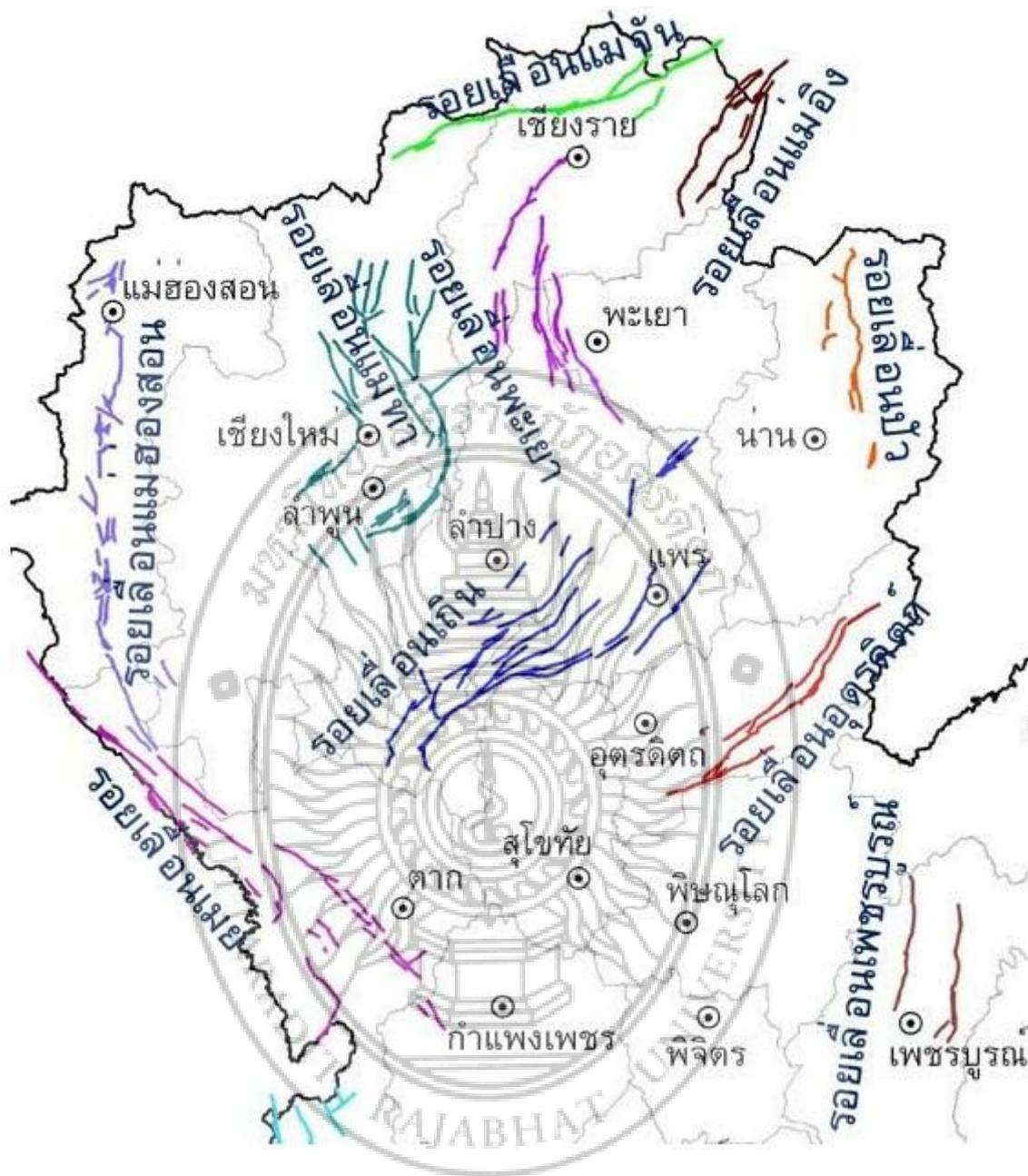
อาคารต้นแบบในการศึกษานี้ผู้วิจัยใช้การสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง (Purposive Sampling) โดยผู้วิจัยได้ใช้วิจารณ์ญาติพิจารณายึดตามวัตถุประสงค์หรือลักษณะของการวิจัยเป็นสำคัญ (ณรงค์ โพธิ์พุกขานันท์, 2551) ในที่นี้ผู้วิจัยได้ทำการสำรวจข้อมูลการใช้อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตภาคเหนือของประเทศไทย เนื่องจากเป็นอาคารสาธารณะที่มีผลกระทบต่อชีวิตคนจำนวนมาก โดยมีการก่อสร้างอาคารเป็นไปตามแบบมาตรฐานของกองแบบแผน สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข

3.2.2 ขอบเขตด้านตัวแปร/ขอบเขตด้านเนื้อหา

ตัวแปรที่ศึกษา คือ ประกอบด้วยการศึกษา แนวทางการประเมินสมรรถนะและการเสริมกำลังอาคารให้ต้านทานแผ่นดินไหว การทำการประเมินสมรรถนะและการเสริมกำลังอาคาร การวิเคราะห์วิธีการที่เหมาะสมในการเสริมกำลังอาคารความต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตภาคเหนือของประเทศไทย และการจัดทำแบบก่อสร้างมาตรฐานที่ผ่านการเสริมกำลังแล้ว

3.2.3 ขอบเขตด้านพื้นที่ และระยะเวลาในการทำวิจัย

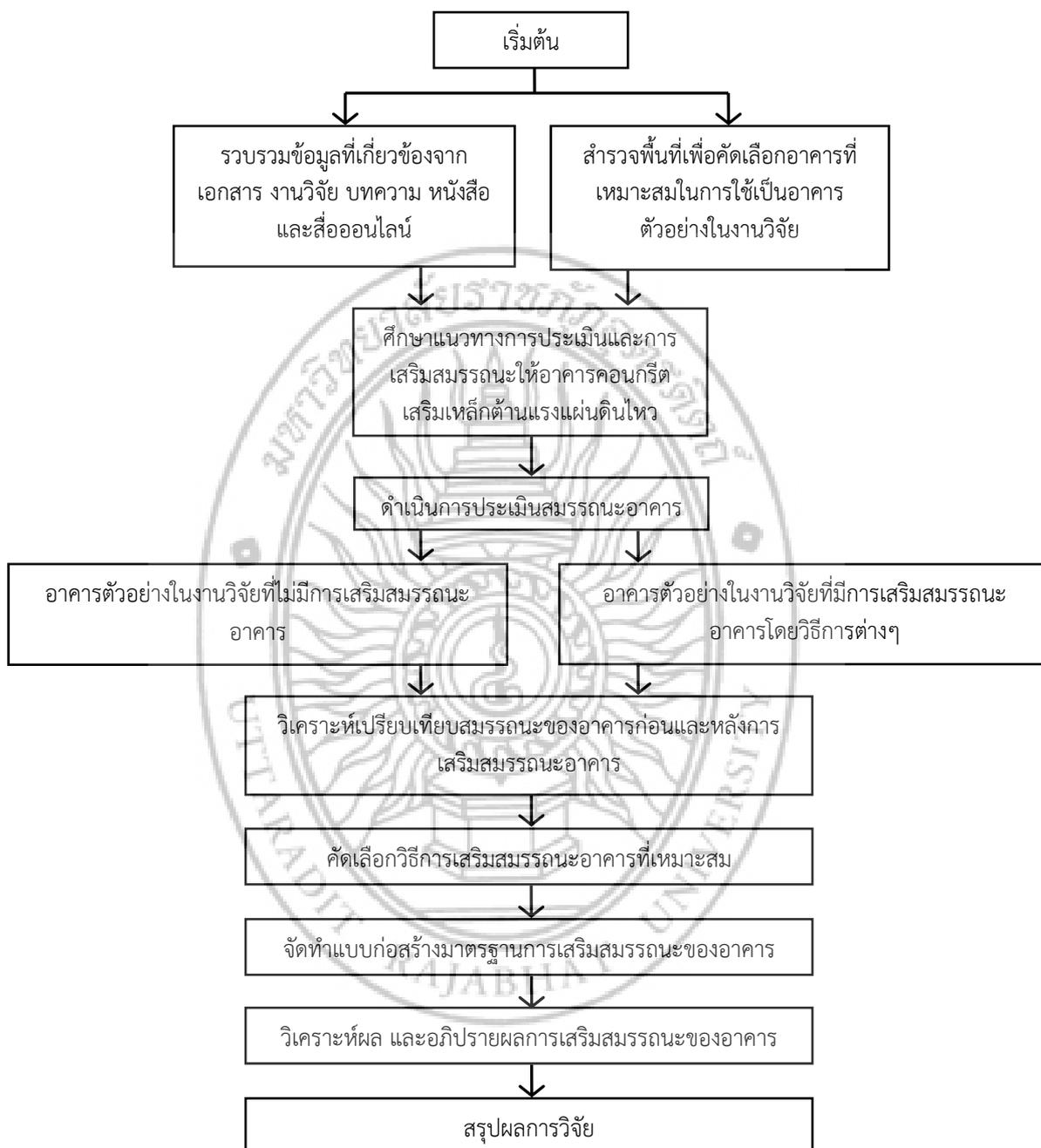
พื้นที่ในการดำเนินการวิจัยได้แก่ อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นอาคารสาธารณะ ในเขตพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว ในภาคเหนือของประเทศไทย ระยะเวลาในการดำเนินโครงการเริ่มตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ.2560 - เดือนกันยายน พ.ศ.2561



ภาพที่ 3.1 พื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย
ที่มา : แทนไท. 2560. (ออนไลน์)

3.3 กรอบความคิดในการวิจัย

การวิจัยนี้สามารถมีกรอบความคิดในการวิจัยดังแสดงในภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3.2 กรอบความคิดในการวิจัย

3.4 ขั้นตอนและเครื่องมือการทำวิจัย

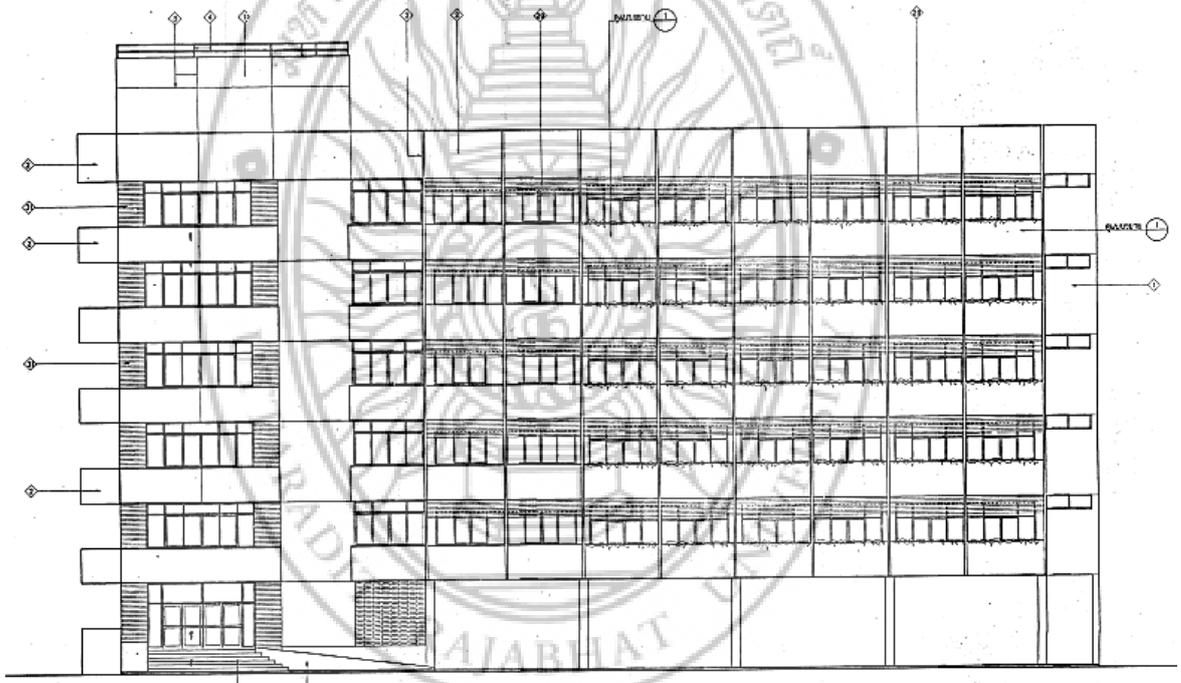
ในการศึกษานี้เป็นการดำเนินการ โดยเรียงลำดับขั้นตอนการทำงานดังนี้

3.4.1 การค้นคว้าข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ

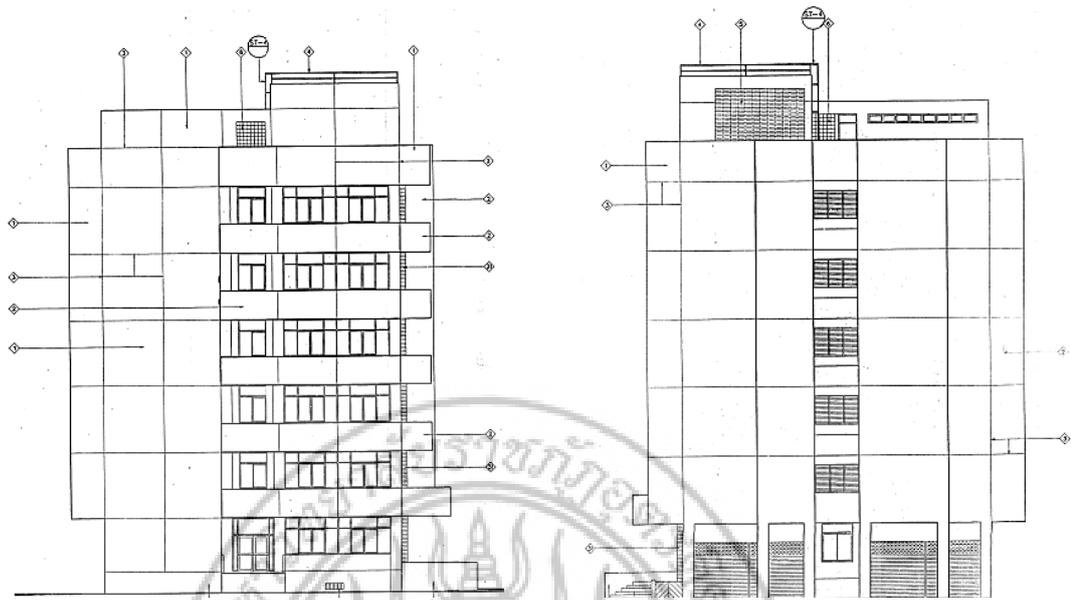
ดำเนินการค้นคว้าหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยจากแหล่งต่างๆ เช่น หอสมุดมหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ หอสมุดคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม การค้นคว้าข้อมูลจากอินเทอร์เน็ต

3.4.2 พิจารณาคัดเลือกอาคารต้นแบบ

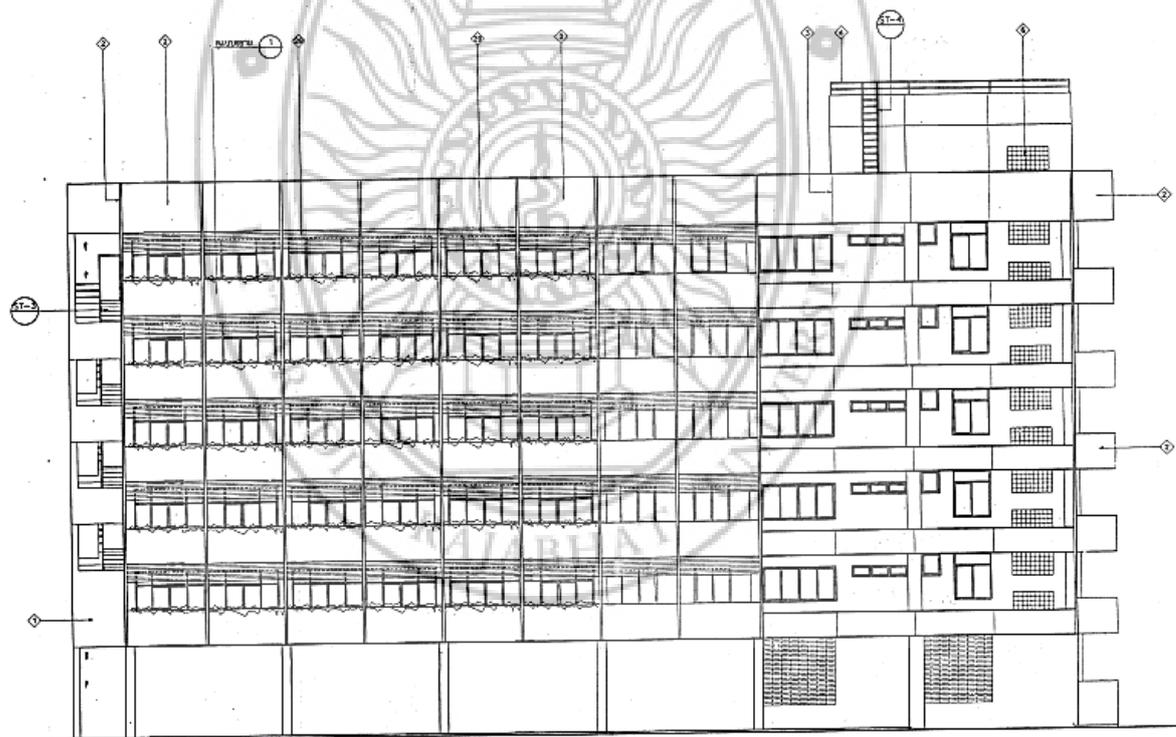
ผู้วิจัยใช้การสุ่มแบบเจาะจง (Purposive Sampling) สืบหาข้อมูลจริงจากสำนักงานคณะกรรมการการศึกษาขั้นพื้นฐาน เขต 1 ภาคเหนือ จำนวน 10 จังหวัด ในพื้นที่ใช้อาคารเรียน 4 ชั้น 12 ห้อง แบบ สปช. 2/28 เนื่องจากมีการก่อสร้างจริงเป็นจำนวนมากกว่า 50 อาคาร ในเขตภาคเหนือของประเทศไทย โดยเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 4 ชั้น ความสูงทุกชั้น 3.50 เมตร กว้าง 9.40 เมตร ยาว 40 เมตร ห้องเรียนกว้าง 7.00 เมตร ยาว 8.00 เมตร รายละเอียดแบบก่อสร้างของอาคารต้นแบบแสดงดังภาพที่ 3-3 ถึง 3-11



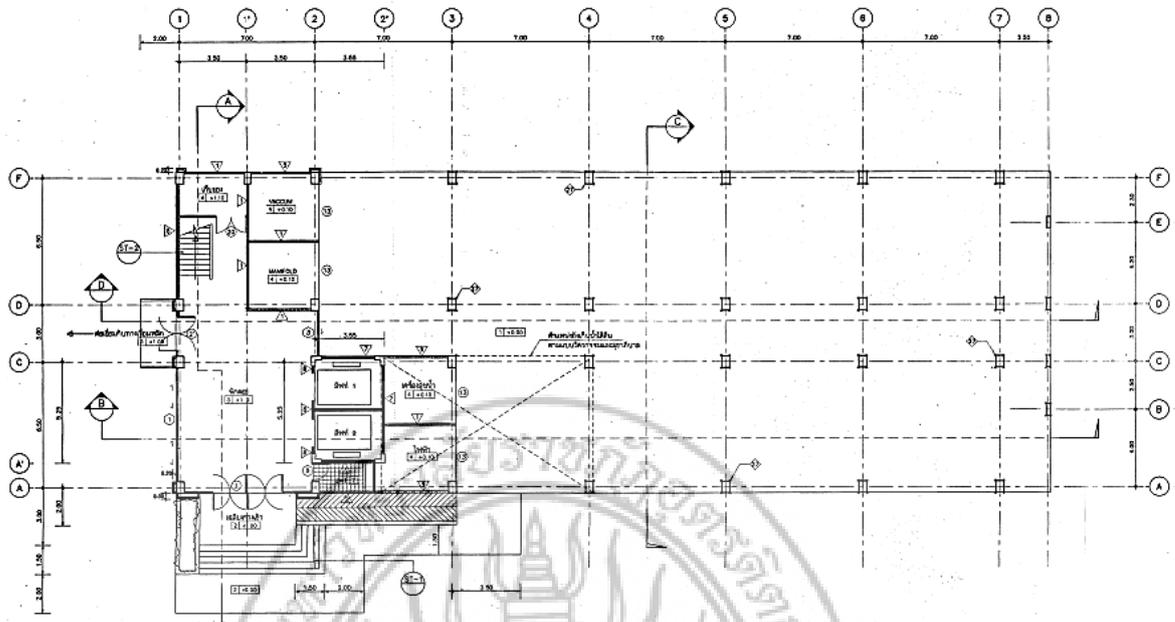
ภาพที่ 3.3 ด้านหน้าของอาคาร



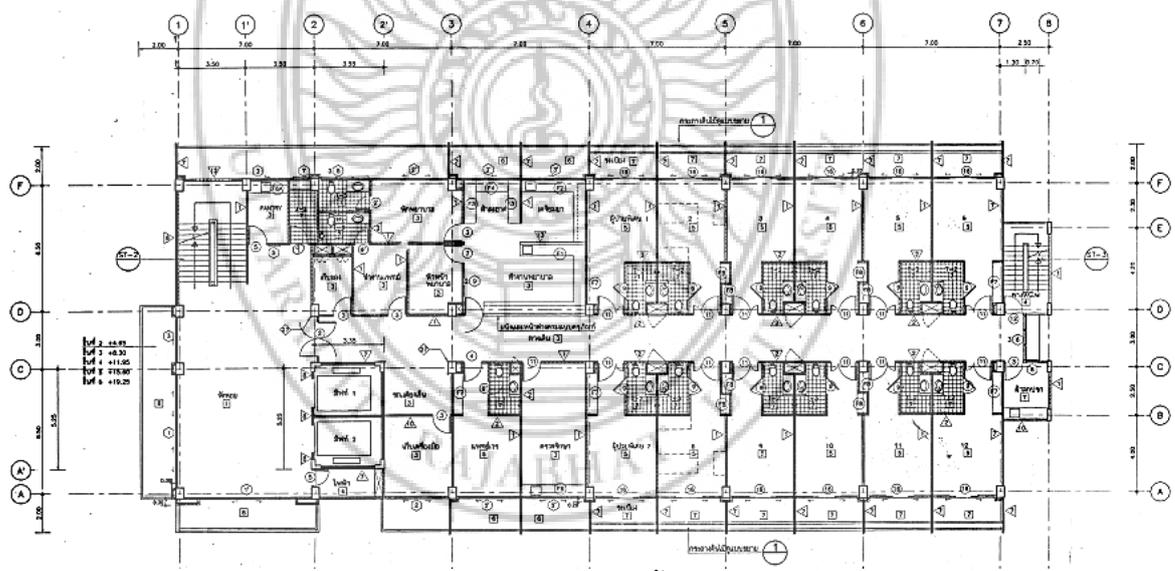
ภาพที่ 3.4 ด้านข้างของอาคาร



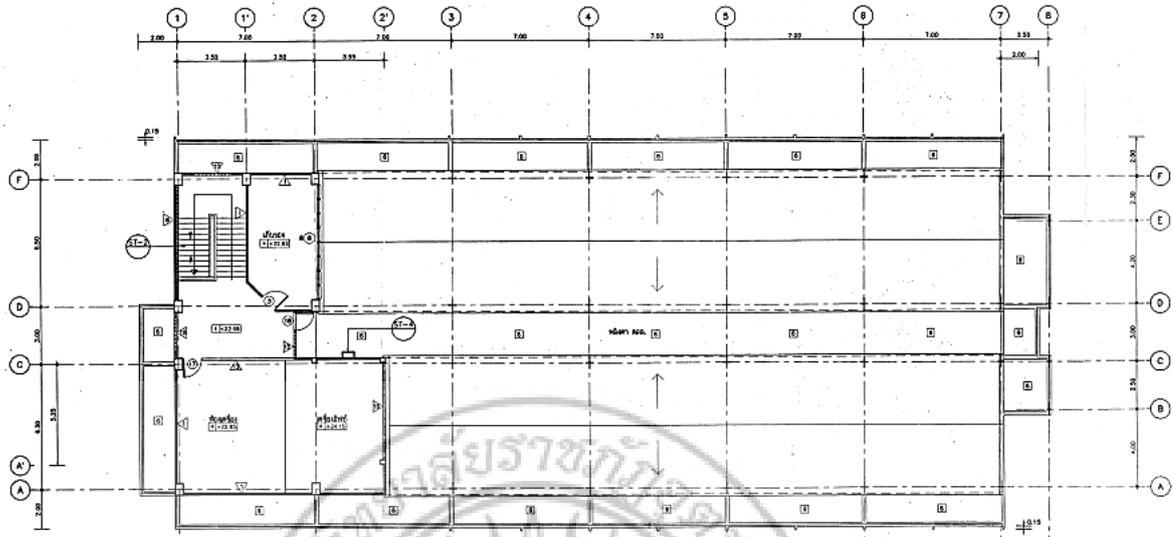
ภาพที่ 3.5 ด้านหลังของอาคาร



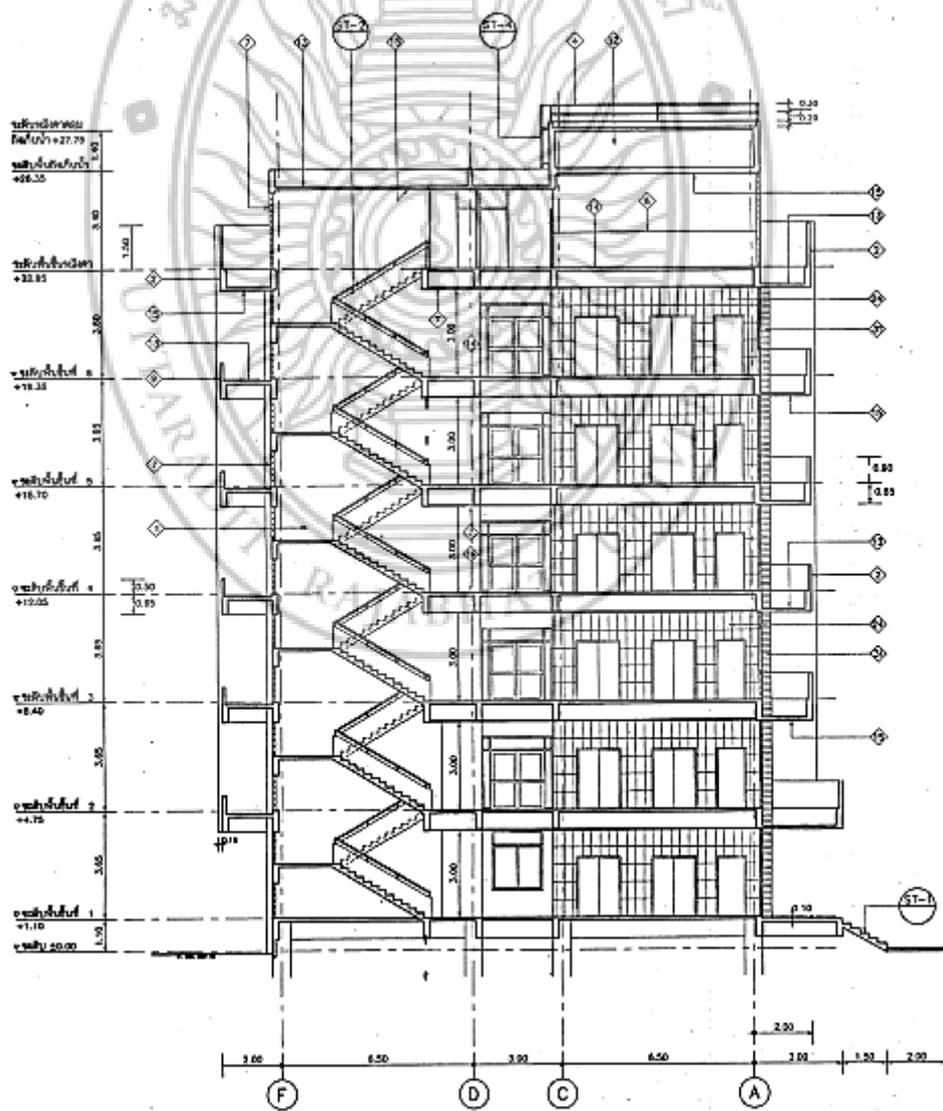
ภาพที่ 3.6 แพลนชั้น 1



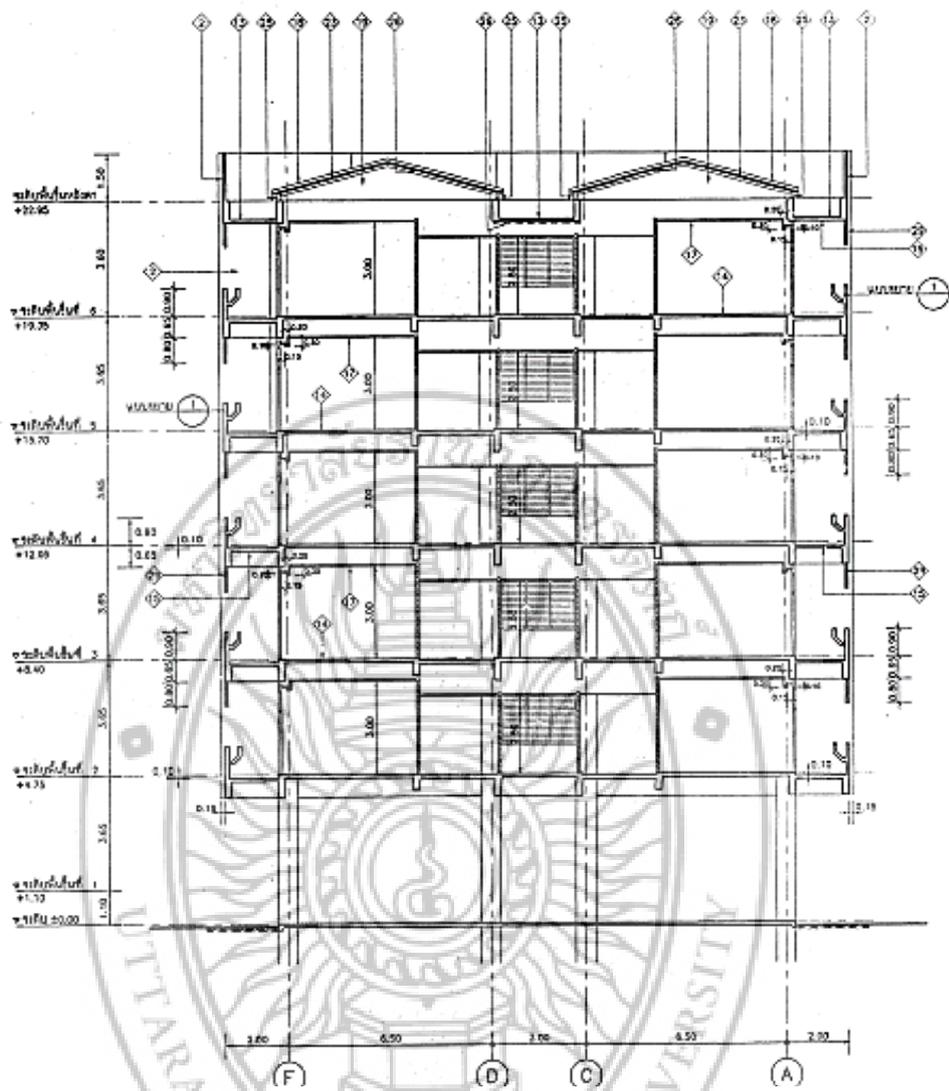
ภาพที่ 3.7 แพลนชั้น 2-6



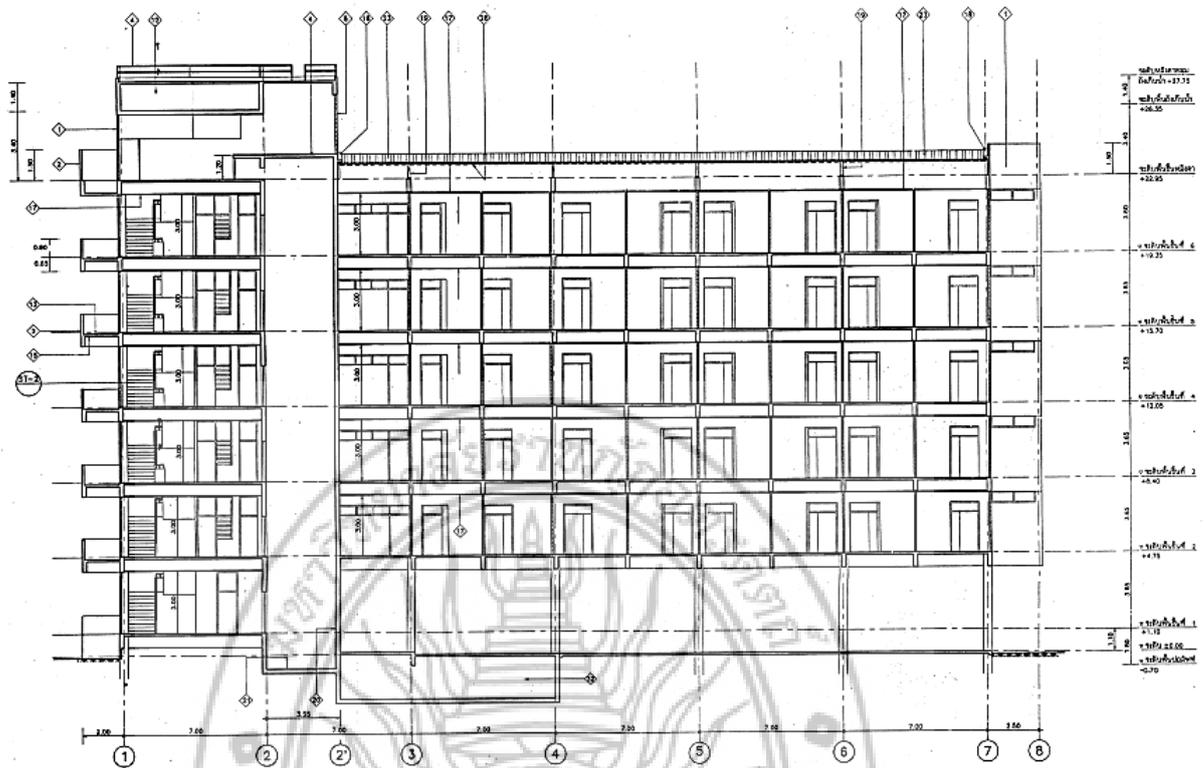
ภาพที่ 3.8 แปลนชั้นหลังคา



ภาพที่ 3.9 รูปตัด A



ภาพที่ 3.10 รูปตัด C



ภาพที่ 3.11 รูปตัด B

3.4.3 ศึกษาแนวทางการประเมินและการเสริมสมรรถนะให้อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กต้านแรงแผ่นดินไหว

3.4.4 ประเมินสมรรถนะอาคารตัวอย่างในงานวิจัยที่ไม่มีการเสริมสมรรถนะอาคาร

3.4.5 ประเมินสมรรถนะอาคารตัวอย่างในงานวิจัยที่มีการเสริมสมรรถนะอาคาร 6 วิธี

3.4.6 วิเคราะห์เปรียบเทียบสมรรถนะของอาคารก่อนและหลังการเสริมสมรรถนะอาคาร

3.4.7 คัดเลือกวิธีการเสริมสมรรถนะอาคารที่เหมาะสม

3.4.8 วิเคราะห์ผลการเสริมสมรรถนะของอาคาร

3.4.9 อภิปรายผลการเสริมสมรรถนะของอาคาร

3.4.10 สรุปผลการวิจัย

3.4.11 เผยแพร่ผลการวิจัย

3.5 การแสดงผลการวิเคราะห์

3.6.1 แสดงผลโดยการนำเสนอในรูปแบบของตารางเปรียบเทียบ

3.6.2 แสดงผลโดยการนำเสนอในรูปแบบของกราฟเปรียบเทียบ

3.6 การสรุปผล

ผู้วิจัยได้ทำการสรุปผลการดำเนินการศึกษาดังนี้

3.7.1 ผลการศึกษาเกี่ยวกับแนวทางการประเมินความต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตภาคเหนือของประเทศไทย

3.7.2 ผลการประเมินความต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตภาคเหนือของประเทศไทย

3.7.3 ผลการเสริมสมรรถนะความต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตภาคเหนือของประเทศไทย

3.7.4 ผลการเปรียบเทียบวิธีการเสริมสมรรถนะความต้านทานแผ่นดินไหวรูปแบบต่างๆของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตภาคเหนือของประเทศไทย



บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัย

ในบทนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาที่เป็นผลจากการดำเนินการทั้งหมดโดยเริ่มต้นจากการประมาณน้ำหนักบรรทุกทุก(Load) ของอาคารในแต่ละชั้น การคำนวณค่าแรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear) โดยใช้แรงสถิตเทียบเท่าแทนแรงเนื่องจากแผ่นดินไหวตามกฎกระทรวงฉบับที่ 52 กระจายแรงเฉือนที่ฐานสู่โครงข้อแข็งในแต่ละเฟรมตาม Stiffness ของแต่ละเฟรมและกระจายสู่แต่ละชั้นของอาคาร ทำการวิเคราะห์หาค่ากำลังที่ต้องการ (แรงเฉือนและโมเมนต์ดัด) จากการรวมแรงและน้ำหนักบรรทุกต่างๆ การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารโดยวิธีการผลักด้วยแรงทางด้านข้าง (Pushover Analysis) การเสริมสมรรถนะความต้านทานแผ่นดินไหวรูปแบบต่างๆ และการเปรียบเทียบผลการเสริมสมรรถนะความต้านทานแผ่นดินไหวรูปแบบต่างๆของอาคารซึ่งแสดงได้ดังต่อไปนี้

4.1 การประมาณน้ำหนักบรรทุกทุก (Load) ของอาคาร

การประมาณน้ำหนักบรรทุกทุกของอาคารสามารถดำเนินการได้โดยใช้น้ำหนักต่อหน่วยของวัสดุหลักในการก่อสร้างอาคารได้ดังนี้

คอนกรีต	2,400	kg/m ³
เหล็กเสริมคอนกรีต	7,856	kg/m ³
กำแพงก่ออิฐครึ่งก้อน	180	kg/m ²
น้ำหนักบรรทุกจร	300	kg/m ²

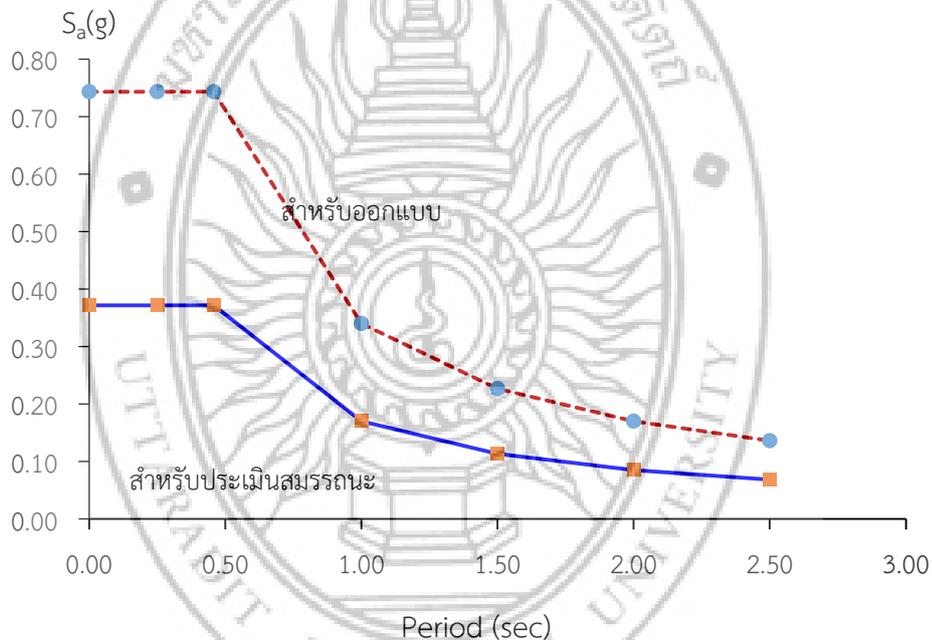
4.2 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้าง

เมื่อเกิดการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวอาคารต่างๆจะมีการตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนแตกต่างกันไปโดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก คือ คาบการสั่นพื้นฐานของอาคารและปัจจัยประกอบอื่นๆดังนั้นผลตอบสนองของอาคารจึงแสดงในรูปของ “ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม” ซึ่งมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา (Maximum Considered Earthquake) ที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_0) และ คาบการสั่น 1 วินาที (S_1) ณ อำเภอลำปางและจังหวัดต่างๆ ทั่วประเทศไทย ยกเว้นในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯที่มีลักษณะดินอ่อนเป็นพิเศษ ค่าความเร่งตอบสนองที่แสดงนี้ ได้มาจากการวิเคราะห์ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวโดยสมมุติให้สภาพชั้นดินในทุกๆพื้นที่เป็นแบบดินแข็งหรือหิน ที่มีความเร็วคลื่นเฉือน v_s โดยเฉลี่ยในช่วงจากผิวดินถึงความลึก 30 เมตร เท่ากับ 760 เมตรต่อวินาที ในกรณีของพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ ผลตอบสนองของอาคารได้ถูกแสดงในรูปของ ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ ซึ่งได้รวมผลเนื่องจากสภาพดินอ่อนในพื้นที่นี้เข้าไปแล้วและสามารถนำไปใช้ในการออกแบบได้โดยตรง การวิจัยนี้สามารถหาค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม โดยพิจารณาที่คาบสั่น (S_0) และที่คาบ 1 วินาที (S_1) ของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุด ในพื้นที่นี้ได้พิจารณาจากพื้นที่ตั้งของอาคารโรงเรียนต้นแบบที่ตั้งอยู่ในเขตภาคเหนือซึ่งมีค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมมากที่สุดคือ อำเภอลำปาง จังหวัดแพร่ โดยได้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมดังนี้ $S_0 = 1.021$ และ $S_1=0.276$ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างมีค่า

ดังนั้น $S_{D5} = 0.743$ และ $S_{D1} = 0.340$ ประเภทความสำคัญของอาคาร และค่าตัวประกอบความสำคัญของอาคารสามารถแสดงได้ดังนี้

ประเภทความสำคัญของอาคาร	IV
ตัวประกอบความสำคัญ	1.5
ประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว	ง
ค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน (Response Modification Factor, R)	5
ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (System Over strength Factor, Ω_0)	3
ตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (Deflection Amplification Factor, C_d)	4.5
ค่าคาบการสั่นพื้นฐาน (Fundamental Period, $T = 0.02H$)	0.459 วินาที
สัมประสิทธิ์ผลตอบแทนแรงแผ่นดินไหว (C_s)	0.223

ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างสามารถแสดงดังภาพที่ 4-1



ภาพที่ 4.1 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้าง

4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารโดยวิธี Pushover Analysis

วิธีสถิตไม่เชิงเส้น (Nonlinear static procedure, NSP) เป็นวิธีที่ทำการผลักโครงสร้างให้ถึงค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายของยอดอาคารที่ประมาณค่าไว้ โดยที่สถานะนี้ แรงภายใน การเคลื่อนที่ และการเสียรูป เช่น การเคลื่อนที่ระหว่างชั้น (Inter Story Drift) หรือการหมุนของจุดหมุนพลาสติกที่ปลายคานหรือเสา (Plastic Hinge Rotation) ถือว่าเป็นค่าตอบสนองสูงสุด (Peak Response) ที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหวนั้น โดยต้องนำค่าเหล่านี้ไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์การยอมรับเพื่อประเมินระดับสมรรถนะของโครงสร้างในการต้านทานแผ่นดินไหว การคำนวณค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายของยอดอาคาร (Target Roof Displacement, δ_t) สามารถดำเนินการได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g$$

$$\text{เมื่อ } C_1 = 1 + \frac{R-1}{aT_e^2}, \quad C_2 = 1 + \frac{1}{800} \left(\frac{R-1}{aT_e^2} \right), \quad R = \frac{S_a}{V_y / W} \cdot C_m$$

ตารางที่ 4.1 การเคลื่อนที่เป่าหมายของยอดอาคารทิศตามยาวของอาคาร (ทิศทาง X)

Symbol	Value	Unit	Reference
$C_0 =$	1.40		มยผ.1303-57, ข้อ 5.3.3.3.2
$a =$	60		มยผ.1303-57, ข้อ 5.3.1.3.1
$C_m =$	0.90		มยผ.1303-57, ข้อ 5.3.1.3.1
$T_e =$	0.286	sec	มยผ.1303-57, ข้อ 5.3.3.2.6
$V_y =$	351,376	kg	มยผ.1303-57, ข้อ 5.3.3.2.5
$W =$	953,278	kg	มยผ.1303-57, ข้อ 5.3.1.3.1
$S_a =$	0.372	g	มยผ.1303-57, ข้อ 3.5
$R =$	8.91		มยผ.1303-57, ข้อ 5.3.3.3.2
$C_1 =$	2.61		มยผ.1303-57, ข้อ 5.3.3.3.2
$C_2 =$	1.00		มยผ.1303-57, ข้อ 5.3.3.3.2
$\delta_t =$	0.272	m	มยผ.1303-57, ข้อ 5.3.3.3.2

ตารางที่ 4.2 การเคลื่อนที่เป่าหมายของยอดอาคารทิศตามขวางของอาคาร (ทิศทาง Y)

Symbol	Value	Unit	Reference
$C_0 =$	1.40		มยผ.1303-57, ข้อ 5.3.3.3.2
$a =$	60		มยผ.1303-57, ข้อ 5.3.1.3.1
$C_m =$	0.90		มยผ.1303-57, ข้อ 5.3.1.3.1
$T_e =$	0.292	sec	มยผ.1303-57, ข้อ 5.3.3.2.6
$V_y =$	362,367	kg	มยผ.1303-57, ข้อ 5.3.3.2.5
$W =$	953,278	kg	มยผ.1303-57, ข้อ 5.3.1.3.1
$S_a =$	0.372	g	มยผ.1303-57, ข้อ 3.5
$R =$	8.64		มยผ.1303-57, ข้อ 5.3.3.3.2
$C_1 =$	2.49		มยผ.1303-57, ข้อ 5.3.3.3.2
$C_2 =$	1.00		มยผ.1303-57, ข้อ 5.3.3.3.2

$\delta_t =$	0.270	m	มยพ.1303-57, ข้อ 5.3.3.3.2
--------------	-------	---	----------------------------

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายของยอดอาคารที่ศึกษามีค่าตั้งนี้คือ $\delta_t = 0.272$ เมตร (ทิศตามยาวของอาคาร) และ $\delta_t = 0.270$ เมตร (ทิศตามขวางของอาคาร)

4.4 แรงต้านข้างสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารโดยวิธี Pushover Analysis

แรงกระทำด้านข้างที่เป็นตัวแทนของแรงแผ่นดินไหวที่มีรูปแบบของการกระจายแรงที่คงที่มากระทำต่ออาคาร ตามมาตรฐาน มยพ.1303-57 กำหนดให้การกระจายตามแนวตั้งของแรงให้เป็นสัดส่วนกับรูปร่างโหมดพื้นฐานของอาคารในทิศทางของแรงกระทำแนวราบที่พิจารณา ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การกระจายแรงสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารโดยวิธี Pushover Analysis

Story	Elevation (m)	Force X (kg)	Force Y (kg)
Roof	14.2	7,341.48	7,341.48
Story4	11.2	28,306.41	28,306.41
Story3	7.7	20,007.14	20,007.14
Story2	4.2	11,145.43	11,145.43
Base	0	0	0

4.5 แรงเฉือนของอาคาร (Story Shear)

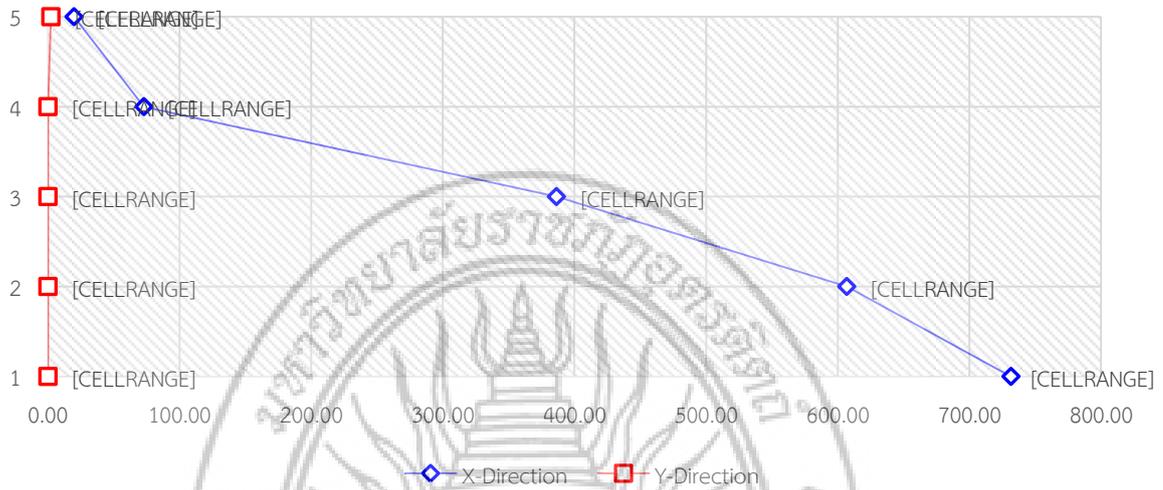
จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธี Pushover Analysis สามารถแสดงถึงแรงเฉือนของอาคารแต่ละชั้น ซึ่งในที่นี้ได้ทำการวิเคราะห์อาคารจำนวน 5 กรณี ดังนี้คือ

- 4.5.1 อาคารเดิมที่ยังไม่ได้เสริมกำลัง (Existing Building)
 - 4.5.2 อาคารเดิมที่ค้ำถึงผลของผนังอิฐก่อ (Infill Wall)
 - 4.5.3 อาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยคอนกรีต (Concrete Jacketing)
 - 4.5.4 อาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยเหล็กแผ่น (Steel Jacketing)
 - 4.5.5 อาคารที่เสริมกำลังโดยใช้ผนังรับแรงเฉือน (Shear Wall)
- ผลการวิจัยสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.4-4.13 และภาพที่ 4.2-4.13

ตารางที่ 4.4 แรงเฉือนของอาคารเดิมที่ยังไม่ได้เสริมกำลัง (ทิศทาง X)

Floor	X (tons)	Y (tons)
1	731.55	0.00
2	606.77	0.00
3	386.24	0.00

4	72.87	0.00
5	19.79	2.21



ภาพที่ 4.2 แรงเฉือนของอาคารเดิมที่ยังไม่ได้เสริมกำลัง (ทิศทาง X)

จากตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.2 พบว่าแรงเฉือนสูงสุด (Story Shear) ของอาคารเรียนเกิดขึ้นสูงที่สุดที่บริเวณชั้นล่างสุดของอาคาร คือ 731.55 ตัน ในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง X) ขนาดของแรงเฉือนแต่ละชั้นของอาคารมีค่าลดลงเมื่ออยู่ในระดับชั้นของอาคารที่สูงขึ้นไปเรียงตามลำดับ โดยค่าแรงเฉือนที่น้อยที่สุดอยู่ที่ชั้นหลังคาของอาคาร

ตารางที่ 4.5 แรงเฉือนของอาคารเดิมที่ยังไม่ได้เสริมกำลัง (ทิศทาง Y)

Floor	X (tons)	Y (tons)
1	0.00	785.57
2	0.00	651.57
3	0.00	414.76
4	0.00	78.26
5	0.04	21.87



ภาพที่ 4.3 แรงเฉือนของอาคารเดิมที่ยังไม่ได้เสริมกำลัง (ทิศทาง Y)

จากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.3 พบว่าแรงเฉือนสูงสุด (Story Shear) ของอาคารเรียนเกิดขึ้นสูงที่สุดที่บริเวณชั้นล่างสุดของอาคาร คือ 785.57 ตัน ในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง Y) ขนาดของแรงเฉือนแต่ละชั้นของอาคารมีค่าลดลงเมื่ออยู่ในระดับชั้นของอาคารที่สูงขึ้นไปเรียงตามลำดับ โดยค่าแรงเฉือนที่น้อยที่สุดอยู่ที่ชั้นหลังคาของอาคาร

ตารางที่ 4.6 แรงเฉือนของอาคารเดิมที่คำนึงถึงผลของผนังอิฐก่อ (ทิศทาง X)

Floor	X (tons)	Y (tons)
1	3,800.56	0.00
2	3,169.16	0.00
3	2,035.74	0.00
4	432.15	0.00
5	91.93	14.12

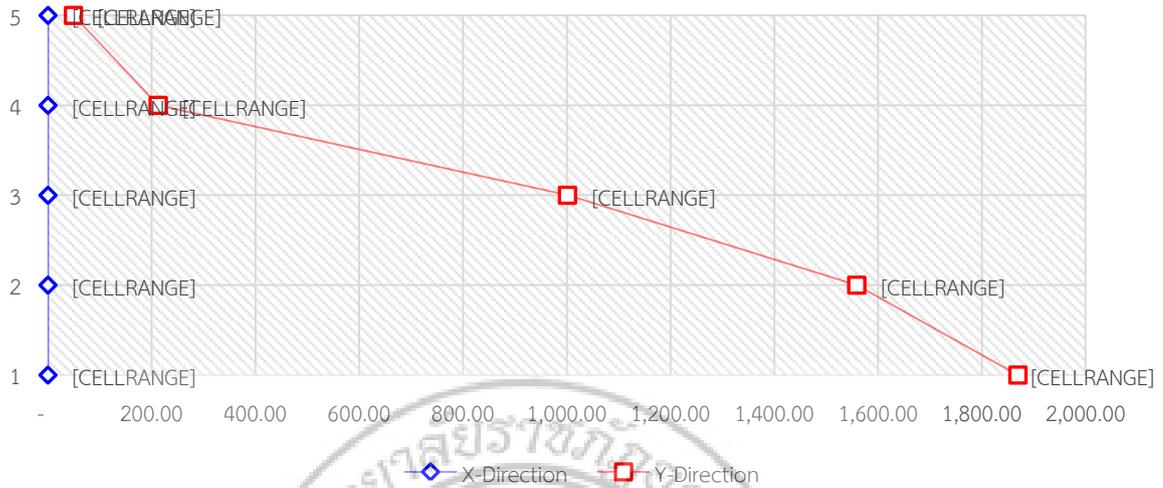


ภาพที่ 4.4 แรงเฉือนของอาคารเดิมที่คำนึงถึงผลของผนังอิฐก่อ (ทิศทาง X)

จากตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.4 พบว่าแรงเฉือนสูงสุด (Story Shear) ของอาคารเรียนเกิดขึ้นสูงที่สุดที่บริเวณชั้นล่างสุดของอาคาร คือ 3,800.56 ตัน ในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง X) ขนาดของแรงเฉือนแต่ละชั้นของอาคารมีค่าลดลงเมื่ออยู่ในระดับชั้นของอาคารที่สูงขึ้นไปเรียงตามลำดับ โดยค่าแรงเฉือนที่น้อยที่สุดอยู่ที่ชั้นหลังคาของอาคาร

ตารางที่ 4.7 แรงเฉือนของอาคารเดิมที่คำนึงถึงผลของผนังอิฐก่อ (ทิศทาง Y)

Floor	X (tons)	Y (tons)
1	0.00	1,869.35
2	0.00	1,558.79
3	0.01	1,001.30
4	0.00	212.55
5	0.07	49.12



ภาพที่ 4.5 แรงเฉือนของอาคารเดิมที่คำนึงถึงผลของผนังอิฐก่อ (ทิศทาง Y)

จากตารางที่ 4.7 และภาพที่ 4.5 พบว่าแรงเฉือนสูงสุด (Story Shear) ของอาคารเรียนเกิดขึ้นสูงที่สุดที่บริเวณชั้นล่างสุดของอาคาร คือ 1,869.35 ตัน ในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง Y) ขนาดของแรงเฉือนแต่ละชั้นของอาคารมีค่าลดลงเมื่ออยู่ในระดับชั้นของอาคารที่สูงขึ้นไปเรียงตามลำดับ โดยค่าแรงเฉือนที่น้อยที่สุดอยู่ที่ชั้นหลังคาของอาคาร

ตารางที่ 4.8 แรงเฉือนของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยคอนกรีต (ทิศทาง X)

Floor	X (tons)	Y (tons)
1	4,537.88	0.02
2	3,619.79	0.01
3	2,310.26	0.01
4	560.19	0.00
5	84.43	10.96



ภาพที่ 4.6 แรงเฉือนของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยคอนกรีต (ทิศทาง X)

จากตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.6 พบว่าแรงเฉือนสูงสุด (Story Shear) ของอาคารเรียนเกิดขึ้นสูงที่สุดที่บริเวณชั้นล่างสุดของอาคาร คือ 4,537.88 ตัน ในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง X) ขนาดของแรงเฉือนแต่ละชั้นของอาคารมีค่าลดลงเมื่ออยู่ในระดับชั้นของอาคารที่สูงขึ้นไปเรียงตามลำดับ โดยค่าแรงเฉือนที่น้อยที่สุดอยู่ที่ชั้นหลังคาของอาคาร

ตารางที่ 4.9 แรงเฉือนของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยคอนกรีต (ทิศทาง Y)

Floor	X (tons)	Y (tons)
1	0.00	5,980.10
2	0.00	4,770.22
3	0.00	3,044.50
4	0.00	738.22
5	0.02	118.09

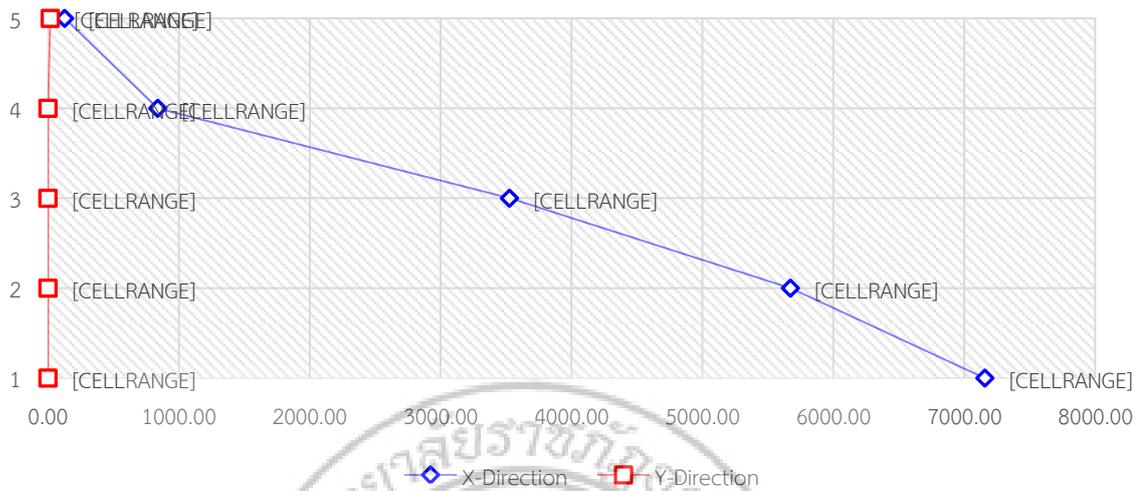


ภาพที่ 4.7 แรงเฉือนของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยคอนกรีต (ทิศทาง Y)

จากตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.7 พบว่าแรงเฉือนสูงสุด (Story Shear) ของอาคารเรียนเกิดขึ้นสูงที่สุดที่บริเวณชั้นล่างสุดของอาคาร คือ 5,980.10 ตัน ในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง Y) ขนาดของแรงเฉือนแต่ละชั้นของอาคารมีค่าลดลงเมื่ออยู่ในระดับชั้นของอาคารที่สูงขึ้นไปเรียงตามลำดับ โดยค่าแรงเฉือนที่น้อยที่สุดอยู่ที่ชั้นหลังคาของอาคาร

ตารางที่ 4.10 แรงเฉือนของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยเหล็กแผ่น (ทิศทาง X)

Floor	X (tons)	Y (tons)
1	7156.90	0.02
2	5671.70	0.01
3	3525.33	0.00
4	838.67	0.01
5	127.35	17.54



ภาพที่ 4.8 แรงเฉือนของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยเหล็กแผ่น (ทิศทาง X)

จากตารางที่ 4.10 และภาพที่ 4.8 พบว่าแรงเฉือนสูงสุด (Story Shear) ของอาคารเรียงกันเกิดขึ้นสูงที่สุดที่บริเวณชั้นล่างสุดของอาคาร คือ 7,156.90 ตัน ในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง X) ขนาดของแรงเฉือนแต่ละชั้นของอาคารมีค่าลดลงเมื่ออยู่ในระดับชั้นของอาคารที่สูงขึ้นไปเรียงตามลำดับ โดยค่าแรงเฉือนที่น้อยที่สุดอยู่ที่ชั้นหลังคาของอาคาร

ตารางที่ 4.11 แรงเฉือนของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยเหล็กแผ่น (ทิศทาง Y)

Floor	X (tons)	Y (tons)
1	0.01	6529.12
2	0.00	5174.19
3	0.00	3216.10
4	0.00	765.56
5	0.02	124.46

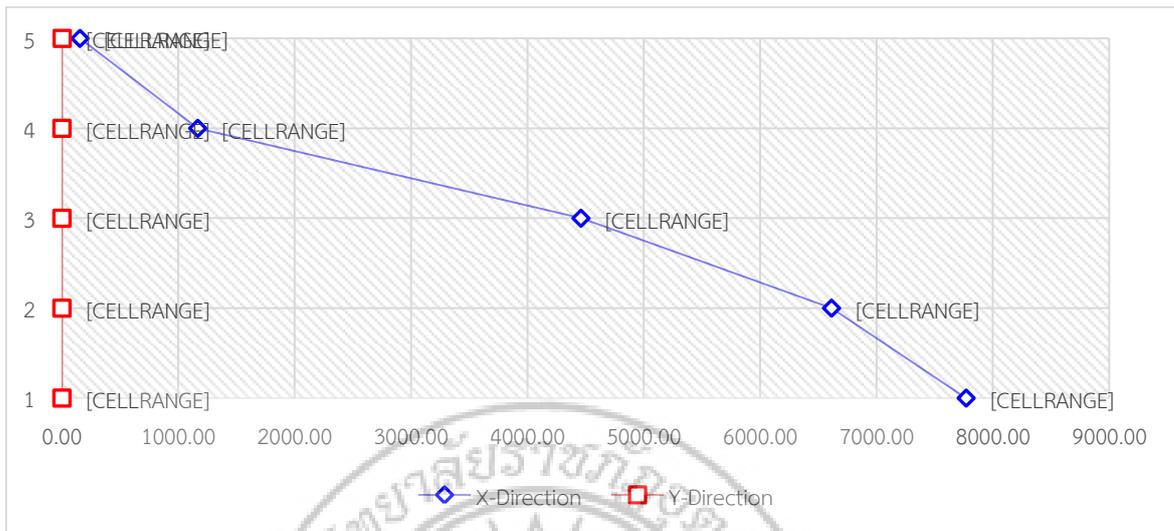


ภาพที่ 4.9 แรงเฉือนของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยเหล็กแผ่น (ทิศทาง Y)

จากตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.9 พบว่าแรงเฉือนสูงสุด (Story Shear) ของอาคารเรียนเกิดขึ้นสูงที่สุดที่บริเวณชั้นล่างสุดของอาคาร คือ 6,529.12 ตัน ในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง Y) ขนาดของแรงเฉือนแต่ละชั้นของอาคารมีค่าลดลงเมื่ออยู่ในระดับชั้นของอาคารที่สูงขึ้นไปเรียงตามลำดับ โดยค่าแรงเฉือนที่น้อยที่สุดอยู่ที่ชั้นหลังคาของอาคาร

ตารางที่ 4.12 แรงเฉือนของอาคารที่เสริมกำลังโดยผนังรับแรงเฉือน (ทิศทาง X)

Floor	X (tons)	Y (tons)
1	7770.60	0.00
2	6613.35	0.00
3	4460.27	0.00
4	1166.94	0.00
5	154.64	1.86



ภาพที่ 4.10 แรงเฉือนของอาคารที่เสริมกำลังโดยผนังรับแรงเฉือน (ทิศทาง X)

จากตารางที่ 4.12 และภาพที่ 4.10 พบว่าแรงเฉือนสูงสุด (Story Shear) ของอาคารเรียนเกิดขึ้นสูงที่สุดที่บริเวณชั้นล่างสุดของอาคาร คือ 7,770.61 ตัน ในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง X) ขนาดของแรงเฉือนแต่ละชั้นของอาคารมีค่าลดลงเมื่ออยู่ในระดับชั้นของอาคารที่สูงขึ้นไปเรียงตามลำดับ โดยค่าแรงเฉือนที่น้อยที่สุดอยู่ที่ชั้นหลังคาของอาคาร

ตารางที่ 4.13 แรงเฉือนของอาคารที่เสริมกำลังโดยผนังรับแรงเฉือน (ทิศทาง Y)

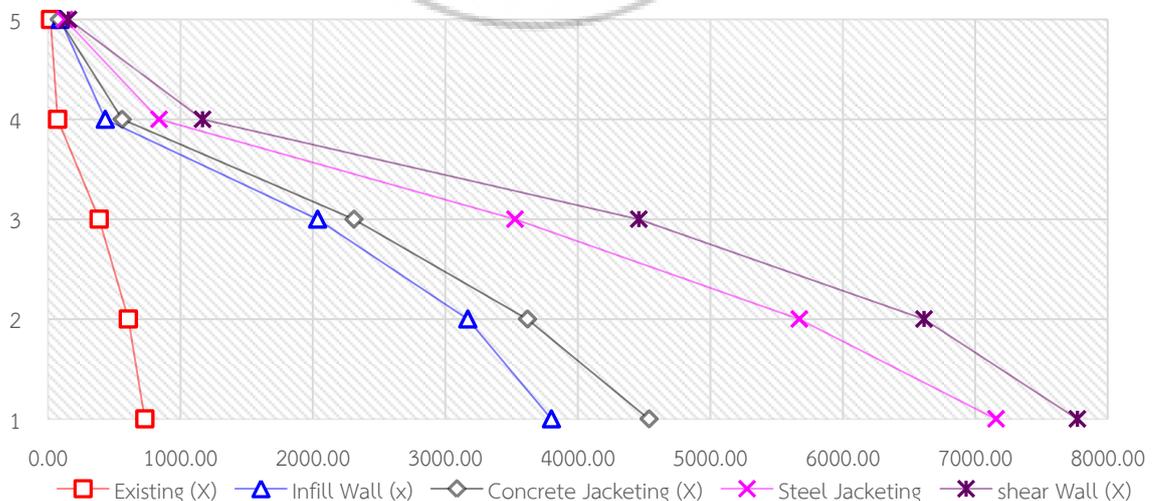
Floor	X (tons)	Y (tons)
1	0.00	3651.86
2	0.00	3108.72
3	0.00	2095.84
4	0.11	533.16
5	0.00	78.64



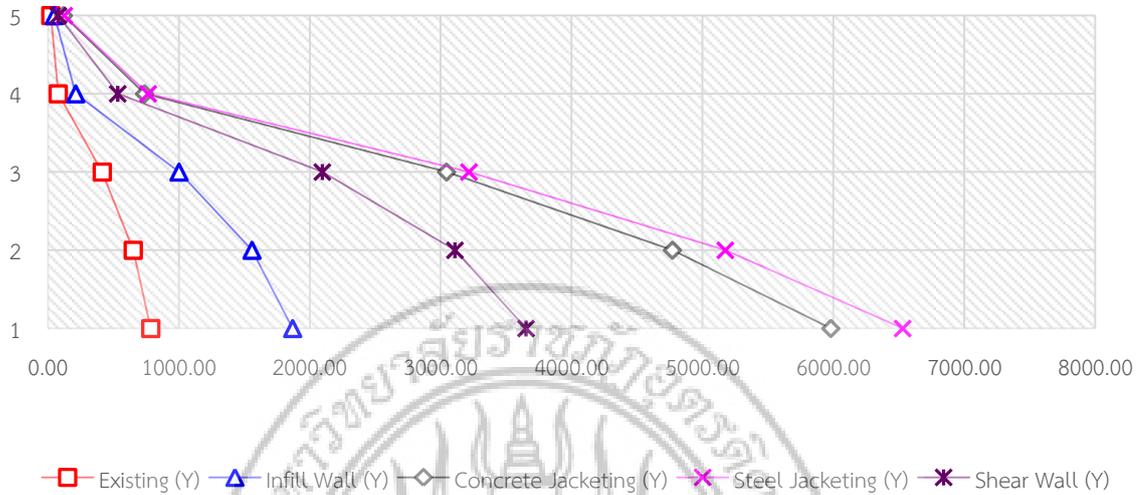
ภาพที่ 4.11 แรงเฉือนของอาคารที่เสริมกำลังโดยผนังรับแรงเฉือน (ทิศทาง Y)

จากตารางที่ 4.13 และภาพที่ 4.11 พบว่าแรงเฉือนสูงสุด (Story Shear) ของอาคารเรียนเกิดขึ้นสูงที่สุดที่บริเวณชั้นล่างสุดของอาคาร คือ 3,651.87 ตัน ในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง Y) ขนาดของแรงเฉือนแต่ละชั้นของอาคารมีค่าลดลงเมื่ออยู่ในระดับชั้นของอาคารที่สูงขึ้นไปเรียงตามลำดับ โดยค่าแรงเฉือนที่น้อยที่สุดอยู่ที่ชั้นหลังคาของอาคาร

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของแรงเฉือนสูงสุด (Story Shear) ของอาคารเรียนที่เกิดขึ้นสูงที่สุดสำหรับอาคารเดิมและอาคารที่เสริมกำลังในลักษณะที่ต่างกันสามารถแสดงผลได้ดังแสดงใน ภาพที่ 4.12 และภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.12 แรงเฉือนของอาคาร (ทิศทาง X)



ภาพที่ 4.13 แรงเฉือนของอาคาร (ทิศทาง Y)

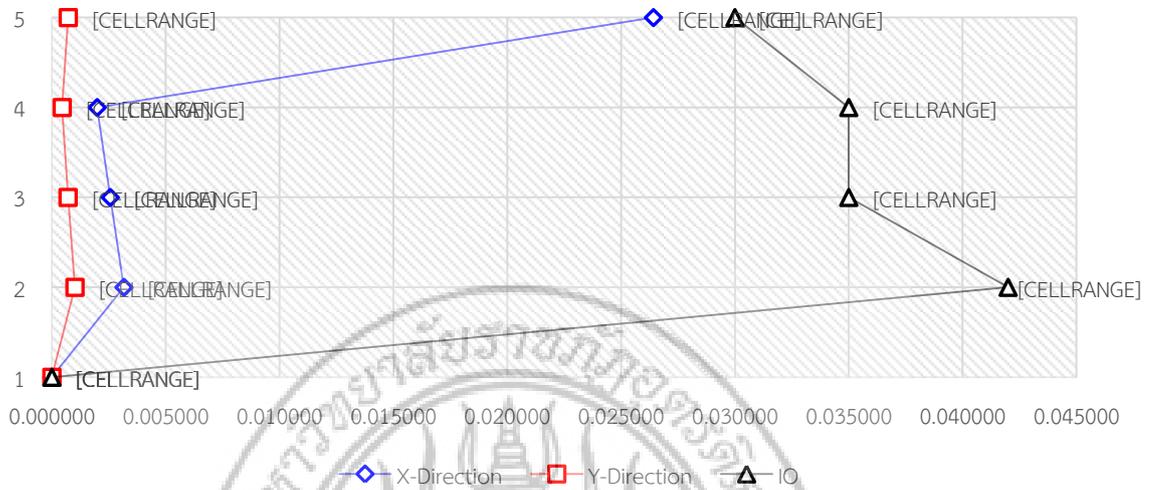
จากภาพที่ 4.12 พบว่าเมื่อมีแรงแผ่นดินไหวกระทำในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง X) จนกระทั่งยอดของอาคารเกิดการเสีรูปทางด้านข้างตามที่กำหนด (Target Displacement X) อาคารที่เสริมกำลังด้วยกำแพงรับแรงเฉือน (Shear Wall) สามารถต้านทานแรงเฉือนได้สูงที่สุด คือ 7,771 ตัน เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.13 พบว่าเมื่อมีแรงแผ่นดินไหวกระทำในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง Y) จนกระทั่งยอดของอาคารเกิดการเสีรูปทางด้านข้างตามที่กำหนด (Target Displacement Y) อาคารที่เสริมกำลังด้วยการหุ้มด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing) สามารถต้านทานแรงเฉือนได้สูงที่สุด คือ 6,529 ตัน

4.6 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคาร (Story Drift)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธี Pushover Analysis สามารถแสดงถึงการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคาร (Story Drift) ซึ่งในที่นี้ได้ทำการวิเคราะห์อาคารจำนวน 5 กรณีโดยใช้ค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายของยอดอาคารทิศทาง X = 0.272 เมตร และค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายของยอดอาคารทิศทาง Y = 0.270 เมตร รายละเอียดแสดงในตารางที่ 4.14-4.23 และภาพที่ 4.14-4.25

ตารางที่ 4.14 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารเดิมที่ยังไม่ได้เสริมกำลัง (ทิศทาง X)

Floor	Drift X (m)	Drift Y (m)	IO (m)
1	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.003164	0.001013	0.042000
3	0.002564	0.000710	0.035000
4	0.001988	0.000450	0.035000
5	0.026421	0.000718	0.030000

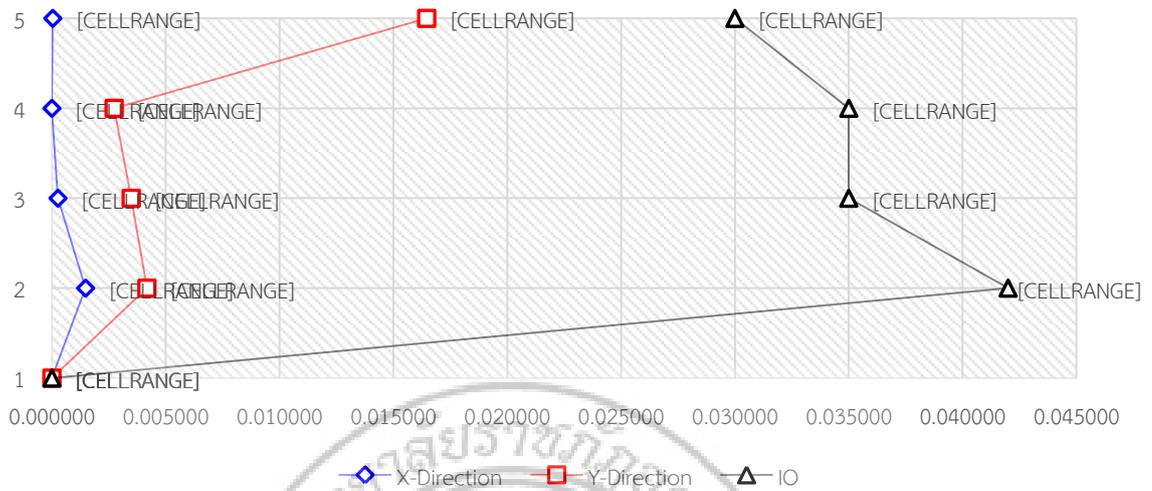


ภาพที่ 4.14 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารเดิมที่ยังไม่ได้เสริมกำลัง (ทิศทาง X)

จากตารางที่ 4.14 และภาพที่ 4.14 พบว่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุด (Story Drift) ของอาคารเรียนเกิดขึ้นสูงที่สุดที่บริเวณชั้นบนสุดของอาคาร คือ 0.026421 เมตร ในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง X) เมื่อเปรียบเทียบกับระดับสมรรถนะของอาคารโดยประมาณของอาคารในส่วนโครงสร้างระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level-IO) พบว่าค่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุดของอาคารยังมีค่าน้อยกว่าค่าระดับสมรรถนะของอาคารระดับ IO

ตารางที่ 4.15 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารเดิมที่ยังไม่ได้เสริมกำลัง (ทิศทาง Y)

Floor	Drift X (m)	Drift Y (m)	IO (m)
1	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.001481	0.004173	0.042000
3	0.000265	0.003483	0.035000
4	0.000000	0.002733	0.035000
5	0.000038	0.016461	0.030000

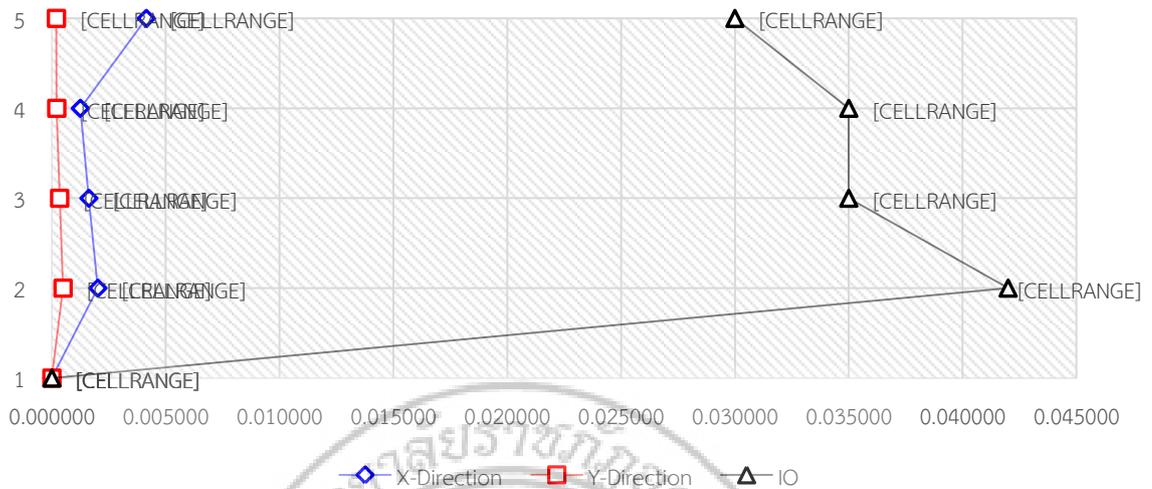


ภาพที่ 4.15 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารเดิมที่ยังไม่ได้เสริมกำลัง (ทิศทาง Y)

จากตารางที่ 4.15 และภาพที่ 4.15 พบว่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุด (Story Drift) ของอาคารเรียนเกิดขึ้นสูงที่สุดที่บริเวณชั้นบนสุดของอาคาร คือ 0.016461 เมตร ในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง Y) เมื่อเปรียบเทียบกับระดับสมรรถนะของอาคารโดยประมาณของอาคารในส่วนโครงสร้างระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level-IO) พบว่าค่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุดของอาคารยังมีค่าน้อยกว่าค่าระดับสมรรถนะของอาคารระดับ IO

ตารางที่ 4.16 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารเดิมที่ค้ำึงถึงผลของผนังอิฐก่อ (ทิศทาง X)

Floor	Drift X (m)	Drift Y (m)	IO (m)
1	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.002019	0.000489	0.042000
3	0.001623	0.000340	0.035000
4	0.001247	0.000212	0.035000
5	0.004147	0.000198	0.030000

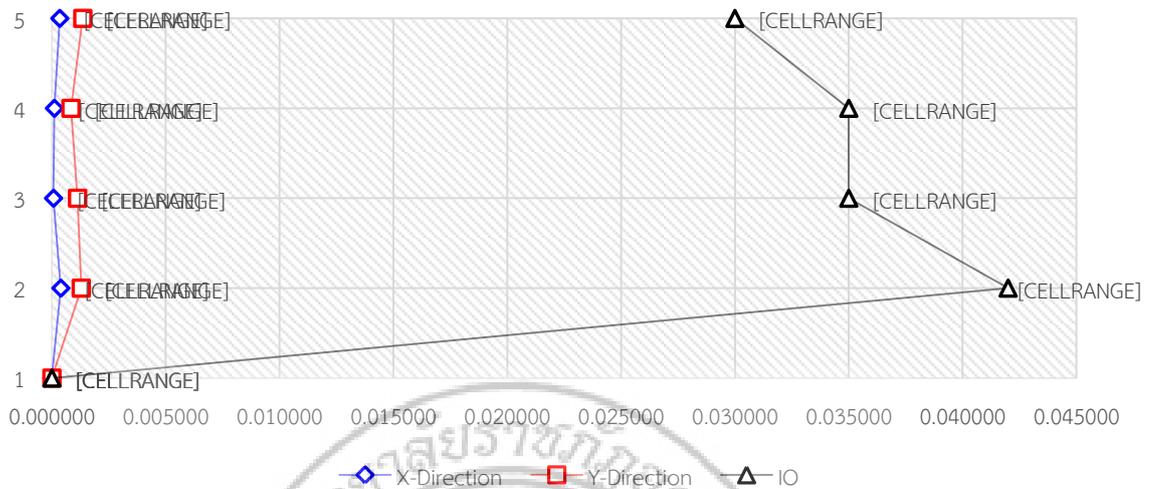


ภาพที่ 4.16 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารเดิมที่คำนึงถึงผลของผนังอิฐก่อ (ทิศทาง X)

จากตารางที่ 4.16 และภาพที่ 4.16 พบว่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุด (Story Drift) ของอาคารเรียนเกิดขึ้นสูงที่สุดที่บริเวณชั้นบนสุดของอาคาร คือ 0.004147 เมตร ในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง X) เมื่อเปรียบเทียบกับระดับสมรรถนะของอาคารโดยประมาณของอาคารในส่วนโครงสร้างระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level-IO) พบว่าค่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุดของอาคารยังมีค่าน้อยกว่าค่าระดับสมรรถนะของอาคารระดับ IO

ตารางที่ 4.17 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารเดิมที่คำนึงถึงผลของผนังอิฐก่อ (ทิศทาง Y)

Floor	Drift X (m)	Drift Y (m)	IO (m)
1	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.000392	0.001288	0.042000
3	0.000071	0.001127	0.035000
4	0.000110	0.000837	0.035000
5	0.000344	0.001357	0.030000

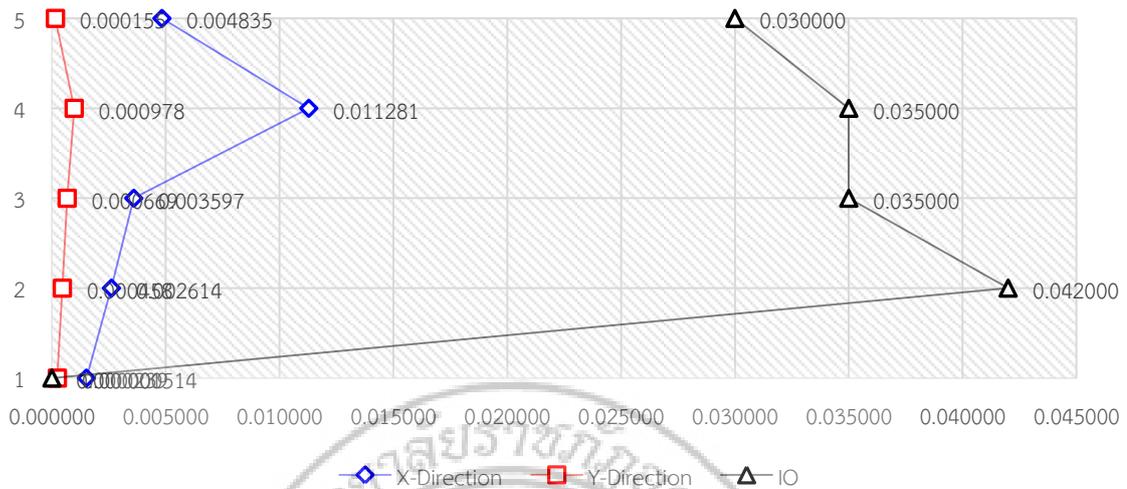


ภาพที่ 4.17 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารเดิมที่คำนึงถึงผลของผนังอิฐก่อ (ทิศทาง Y)

จากตารางที่ 4.17 และภาพที่ 4.17 พบว่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุด (Story Drift) ของอาคารเรียนเกิดขึ้นสูงที่สุดที่บริเวณชั้น 2 ของอาคาร คือ 0.000392 เมตร ในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง Y) เมื่อเปรียบเทียบกับระดับสมรรถนะของอาคารโดยประมาณของอาคารในส่วนโครงสร้างระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level-IO) พบว่าค่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุดของอาคารยังมีค่าน้อยกว่าค่าระดับสมรรถนะของอาคารระดับ IO

ตารางที่ 4.18 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยคอนกรีต (ทิศทาง X)

Floor	Drift X (m)	Drift Y (m)	IO (m)
1	0.001514	0.000239	0.000000
2	0.002614	0.000458	0.042000
3	0.003597	0.000669	0.035000
4	0.011281	0.000978	0.035000
5	0.004835	0.000155	0.030000

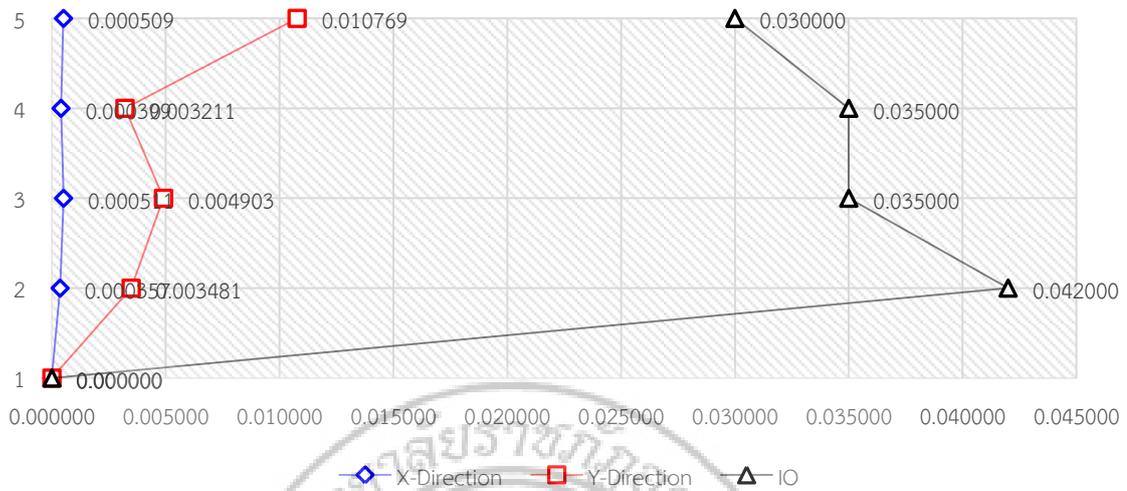


ภาพที่ 4.18 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยคอนกรีต (ทิศทาง X)

จากตารางที่ 4.18 และภาพที่ 4.18 พบว่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุด (Story Drift) ของอาคารเรียนเกิดขึ้นสูงที่สุดที่บริเวณชั้น 4 ของอาคาร คือ 0.011281 เมตร ในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง X) เมื่อเปรียบเทียบกับระดับสมรรถนะของอาคารโดยประมาณของอาคารในส่วนโครงสร้างระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level-IO) พบว่าค่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุดของอาคารยังมีค่าน้อยกว่าค่าระดับสมรรถนะของอาคารระดับ IO

ตารางที่ 4.19 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยคอนกรีต (ทิศทาง Y)

Floor	Drift X (m)	Drift Y (m)	IO (m)
1	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.000357	0.003481	0.042000
3	0.000511	0.004903	0.035000
4	0.000399	0.003211	0.035000
5	0.000509	0.010769	0.030000

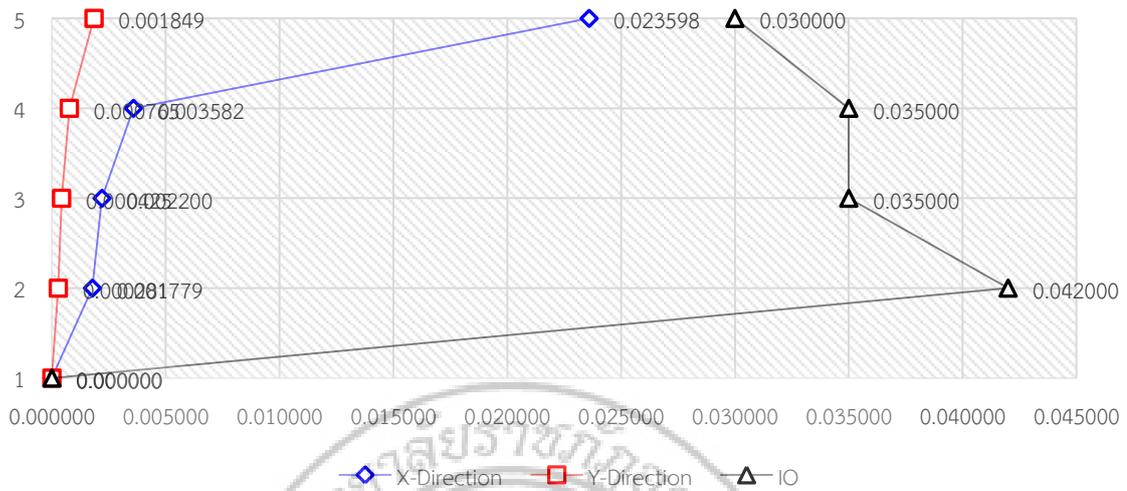


ภาพที่ 4.19 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยคอนกรีต (ทิศทาง Y)

จากตารางที่ 4.19 และภาพที่ 4.19 พบว่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุด (Story Drift) ของอาคารเรียนเกิดขึ้นสูงที่สุดที่บริเวณชั้นบนสุดของอาคาร คือ 0.010769 เมตร ในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง Y) เมื่อเปรียบเทียบกับระดับสมรรถนะของอาคารโดยประมาณของอาคารในส่วนโครงสร้างระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level-IO) พบว่าค่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุดของอาคารยังมีค่าน้อยกว่าค่าระดับสมรรถนะของอาคารระดับ IO

ตารางที่ 4.20 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยเหล็กแผ่น (ทิศทาง X)

Floor	Drift X (m)	Drift Y (m)	IO (m)
1	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.001779	0.000281	0.042000
3	0.002200	0.000425	0.035000
4	0.003582	0.000765	0.035000
5	0.023598	0.010769	0.030000

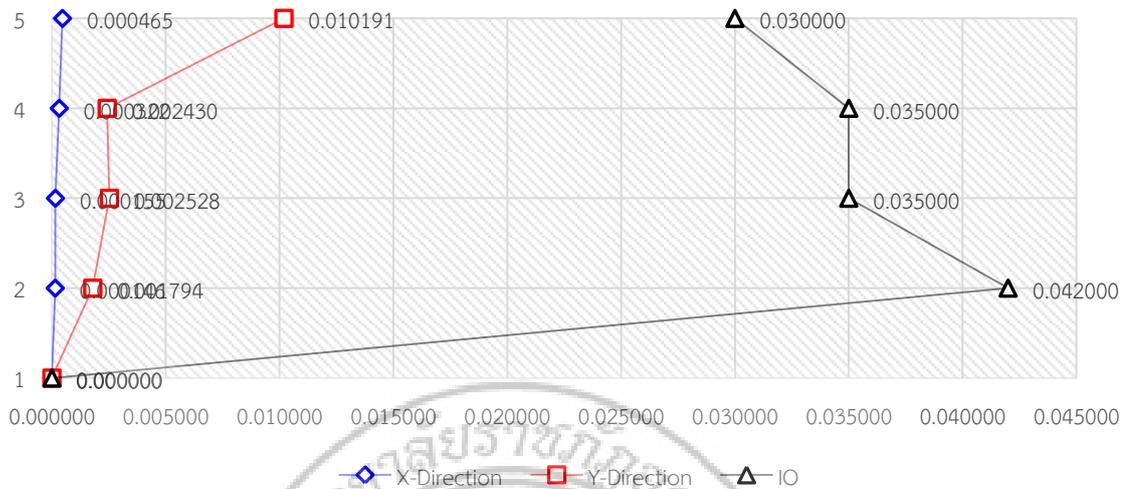


ภาพที่ 4.20 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยเหล็กแผ่น (ทิศทาง X)

จากตารางที่ 4.20 และภาพที่ 4.20 พบว่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุด (Story Drift) ของอาคารเรียนเกิดขึ้นสูงที่สุดที่บริเวณชั้นบนสุด ของอาคาร คือ 0.023598 เมตร ในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง X) เมื่อเปรียบเทียบกับระดับสมรรถนะของอาคารโดยประมาณของอาคารในส่วนโครงสร้างระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level-IO) พบว่าค่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุดของอาคารยังมีค่าน้อยกว่าค่าระดับสมรรถนะของอาคารระดับ IO

ตารางที่ 4.21 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยเหล็กแผ่น (ทิศทาง Y)

Floor	Drift X (m)	Drift Y (m)	IO (m)
1	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.000146	0.001794	0.042000
3	0.000155	0.002528	0.035000
4	0.000322	0.002430	0.035000
5	0.000465	0.010191	0.030000

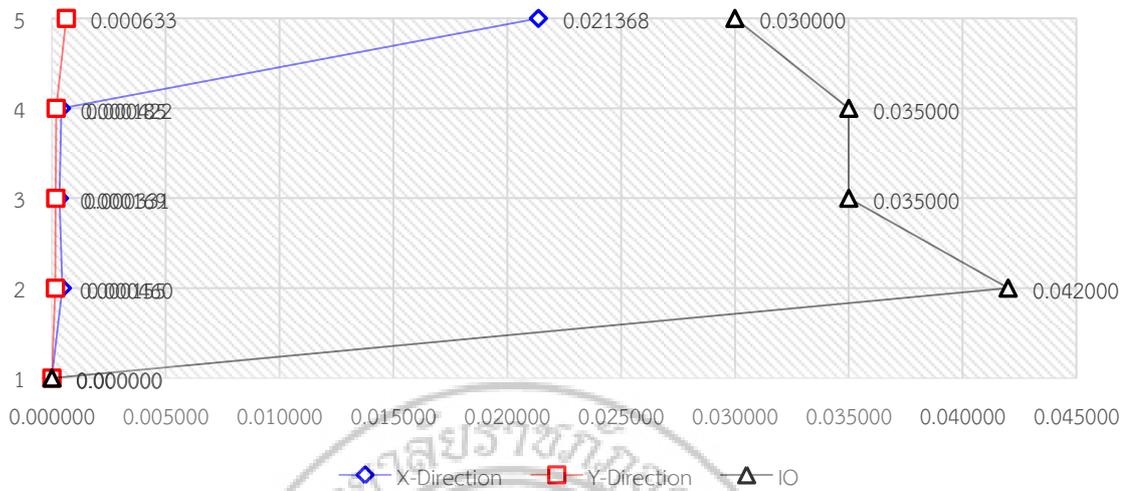


ภาพที่ 4.21 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยเหล็กแผ่น (ทิศทาง Y)

จากตารางที่ 4.21 และภาพที่ 4.21 พบว่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุด (Story Drift) ของอาคารเรียนเกิดขึ้นสูงที่สุดที่บริเวณชั้นบนสุดของอาคาร คือ 0.010191 เมตร ในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง Y) เมื่อเปรียบเทียบกับระดับสมรรถนะของอาคารโดยประมาณของอาคารในส่วนโครงสร้างระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level-IO) พบว่าค่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุดของอาคารยังมีค่าน้อยกว่าค่าระดับสมรรถนะของอาคารระดับ IO

ตารางที่ 4.22 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารที่เสริมกำลังโดยผนังรับแรงเฉือน (ทิศทาง X)

Floor	Drift X (m)	Drift Y (m)	IO (m)
1	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.000460	0.000155	0.042000
3	0.000331	0.000169	0.035000
4	0.000422	0.000185	0.035000
5	0.021368	0.000633	0.030000



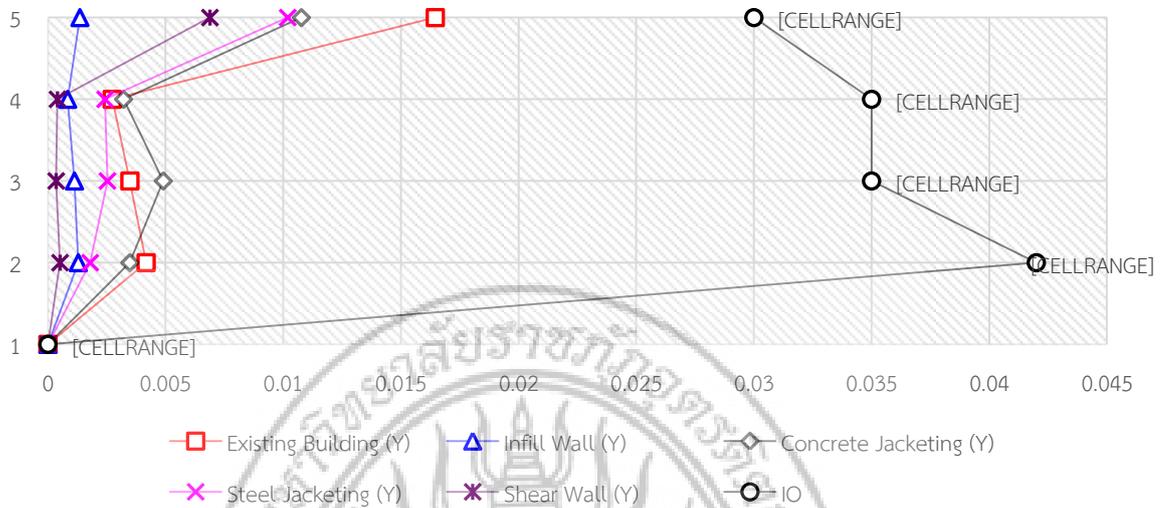
ภาพที่ 4.22 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารที่เสริมกำลังโดยผนังรับแรงเฉือน (ทิศทาง X)

จากตารางที่ 4.22 และภาพที่ 4.22 พบว่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุด (Story Drift) ของอาคารเรียนเกิดขึ้นสูงที่สุดที่บริเวณชั้นบนสุดของอาคาร คือ 0.021368 เมตร ในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง X) เมื่อเปรียบเทียบกับระดับสมรรถนะของอาคารโดยประมาณของอาคารในส่วนโครงสร้างระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level-IO) พบว่าค่าการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุดของอาคารยังมีค่าน้อยกว่าค่าระดับสมรรถนะของอาคารระดับ IO

ตารางที่ 4.23 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคารที่เสริมกำลังโดยผนังรับแรงเฉือน (ทิศทาง Y)

Floor	Drift X (m)	Drift Y (m)	IO (m)
1	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.000023	0.000515	0.042000
3	0.000013	0.000350	0.035000
4	0.000011	0.000406	0.035000
5	0.000116	0.000633	0.030000

ภาพที่ 4.24 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคาร (ทิศทาง X)

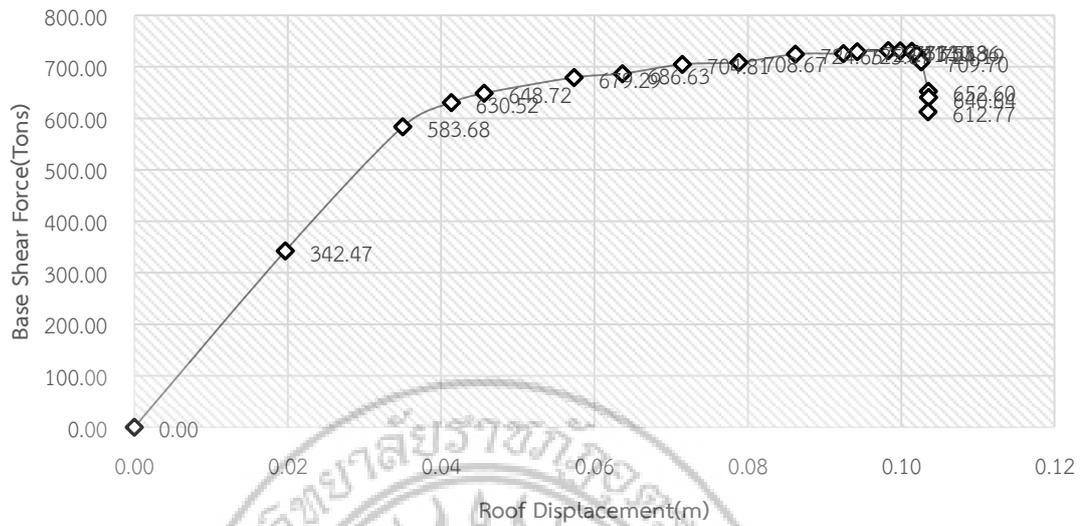


ภาพที่ 4.25 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคาร (ทิศทาง Y)

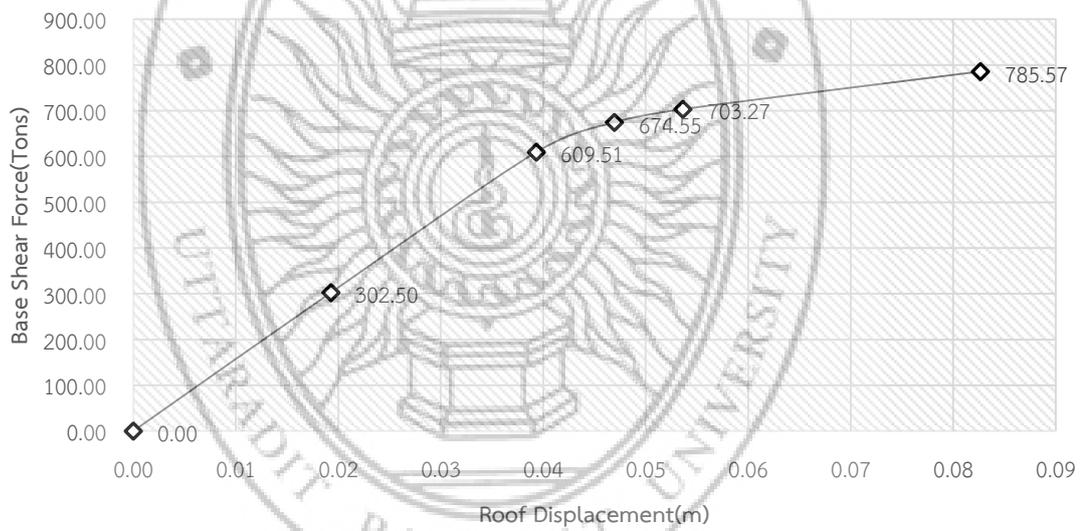
จากภาพที่ 4.24 และ 4.25 พบว่าเมื่อมีแรงแผ่นดินไหวกระทำในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง X) และตามขวางกับอาคารจนกระทั่งยอดของอาคารเกิดการเสีรูปทางด้านข้างตามที่กำหนด (Target Displacement) การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุด (Story Drift) ของอาคาร สำหรับอาคารเดิมและอาคารที่เสริมกำลังในลักษณะที่แตกต่างกันนี้มีสมรรถนะที่ยังอยู่ภายใต้ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level-IO)

4.7 เส้นโค้งกำลัง (Capacity curve)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธี Pushover Analysis สามารถแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐาน (Base shear force) เป็นแกนตั้ง และการเคลื่อนที่ที่ยอดอาคาร (Roof displacement) เป็นแกนนอน เรียกว่าเส้นโค้งกำลัง (Capacity curve) ดังแสดงในภาพที่ 4.26-4.37

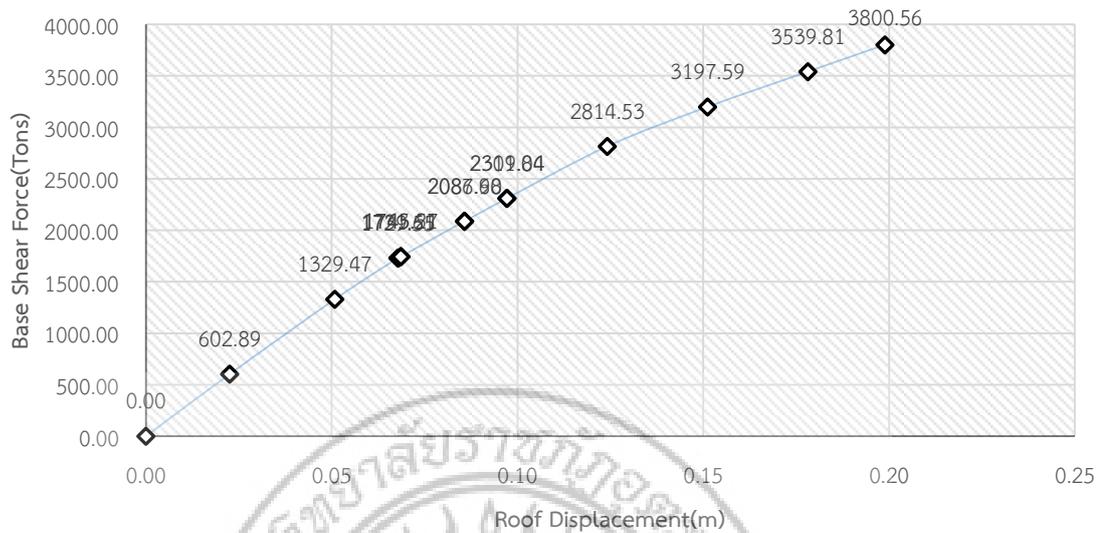


ภาพที่ 4.26 เส้นโค้งกำลังของอาคารเดิมที่ยังไม่ได้เสริมกำลัง (ทิศทาง X)



ภาพที่ 4.27 เส้นโค้งกำลังของอาคารเดิมที่ยังไม่ได้เสริมกำลัง (ทิศทาง Y)

จากภาพที่ 4.26-4.27 ช่วงแรกโครงสร้างอยู่ในสภาวะยืดหยุ่น เส้นกราฟเป็นเส้นตรง แต่เมื่อเพิ่มแรงผลักดันขึ้นไปอีก โครงสร้างจะมีการเสียรูป จนกระทั่งโครงสร้างสามารถต้านทานแรงกระทำและการเคลื่อนที่ได้สูงสุด ก่อนที่จะมีกำลังต้านทานแรงด้านข้างตกลง และเกิดการพังทลาย (Collapse)

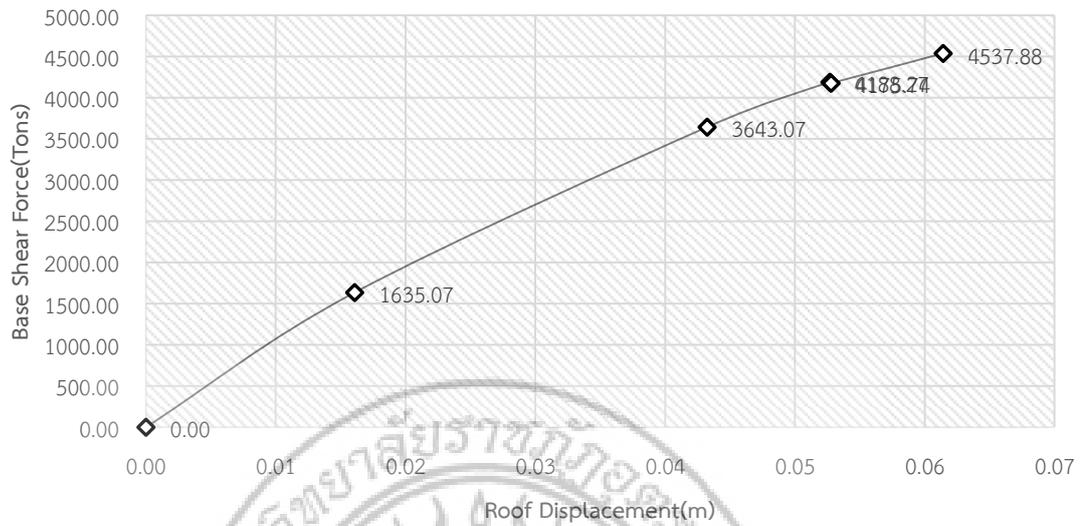


ภาพที่ 4.28 เส้นโค้งกำลังของอาคารเดิมที่คำนึงถึงผลของผนังอิฐก่อ (ทิศทาง X)



ภาพที่ 4.29 เส้นโค้งกำลังของอาคารเดิมที่คำนึงถึงผลของผนังอิฐก่อ (ทิศทาง Y)

จากภาพที่ 4.28-4.29 ช่วงแรกโครงสร้างอยู่ในสภาวะยืดหยุ่น เส้นกราฟเป็นเส้นตรง แต่เมื่อเพิ่มแรงผลักมากขึ้นไปอีก โครงสร้างจะมีการเสียรูป จนกระทั่งโครงสร้างสามารถต้านทานแรงกระทำและการเคลื่อนที่ได้สูงสุด ก่อนที่จะมีกำลังต้านทานแรงด้านข้างตกลง และเกิดการพังทลาย (Collapse)

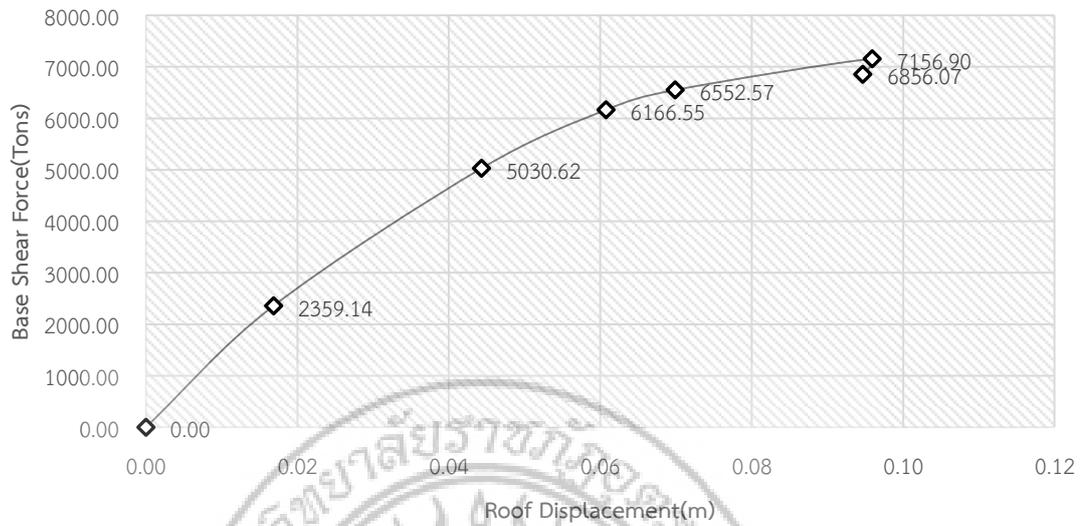


ภาพที่ 4.30 เส้นโค้งกำลังของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยคอนกรีต (ทิศทาง X)



ภาพที่ 4.31 เส้นโค้งกำลังของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยคอนกรีต (ทิศทาง Y)

จากภาพที่ 4.30-4.31 ช่วงแรกโครงสร้างอยู่ในสภาวะยืดหยุ่น เส้นกราฟเป็นเส้นตรง แต่เมื่อเพิ่มแรงผลึกมากขึ้นไปอีก โครงสร้างจะมีการเสียรูป จนกระทั่งโครงสร้างสามารถต้านทานแรงกระทำและการเคลื่อนที่ได้สูงสุด ก่อนที่จะมีกำลังต้านทานแรงด้านข้างตกลง และเกิดการพังทลาย (Collapse)

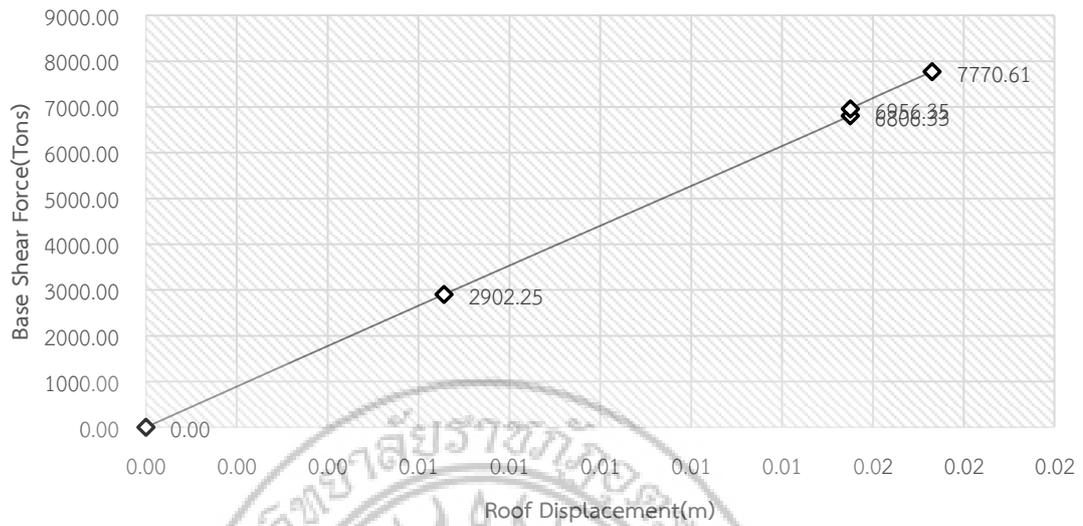


ภาพที่ 4.32 เส้นโค้งกำลังของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยเหล็กแผ่น (ทิศทาง X)

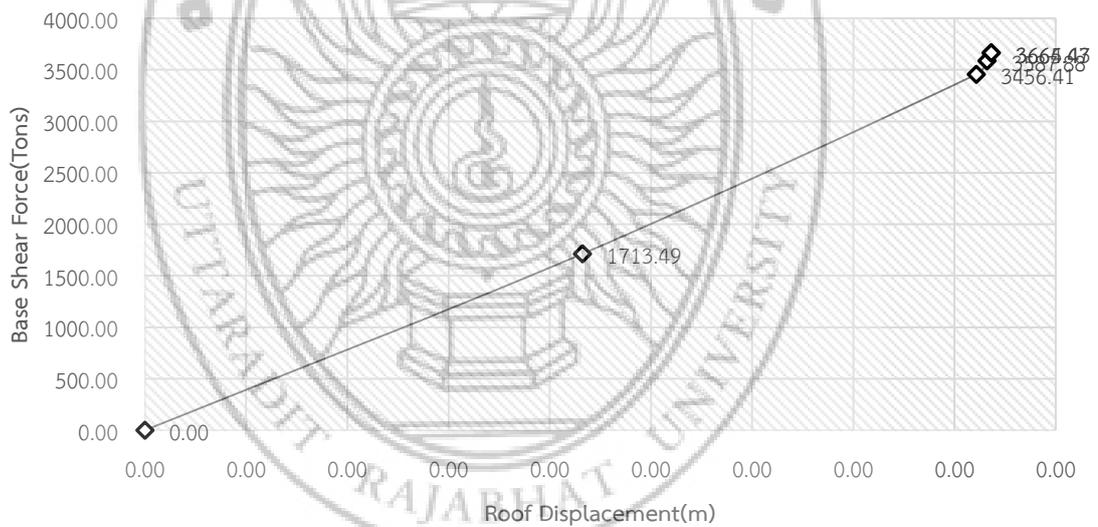


ภาพที่ 4.33 เส้นโค้งกำลังของอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยเหล็กแผ่น (ทิศทาง Y)

จากภาพที่ 4.32-4.33 ช่วงแรกโครงสร้างอยู่ในสภาวะยืดหยุ่น เส้นกราฟเป็นเส้นตรง แต่เมื่อเพิ่มแรงผลักรวมมากขึ้นไปอีก โครงสร้างจะมีการเสียรูป จนกระทั่งโครงสร้างสามารถต้านทานแรงกระทำและการเคลื่อนที่ได้สูงสุด ก่อนที่จะมีกำลังต้านทานแรงด้านข้างตกลง และเกิดการพังทลาย (Collapse)

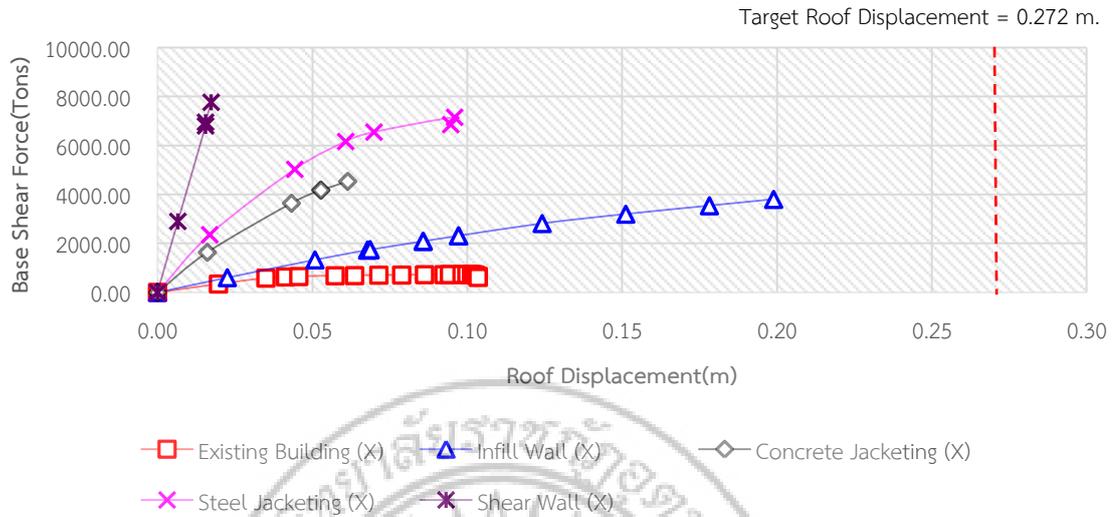


ภาพที่ 4.34 เส้นโค้งกำลังของอาคารที่เสริมกำลังโดยผนังรับแรงเฉือน (ทิศทาง X)

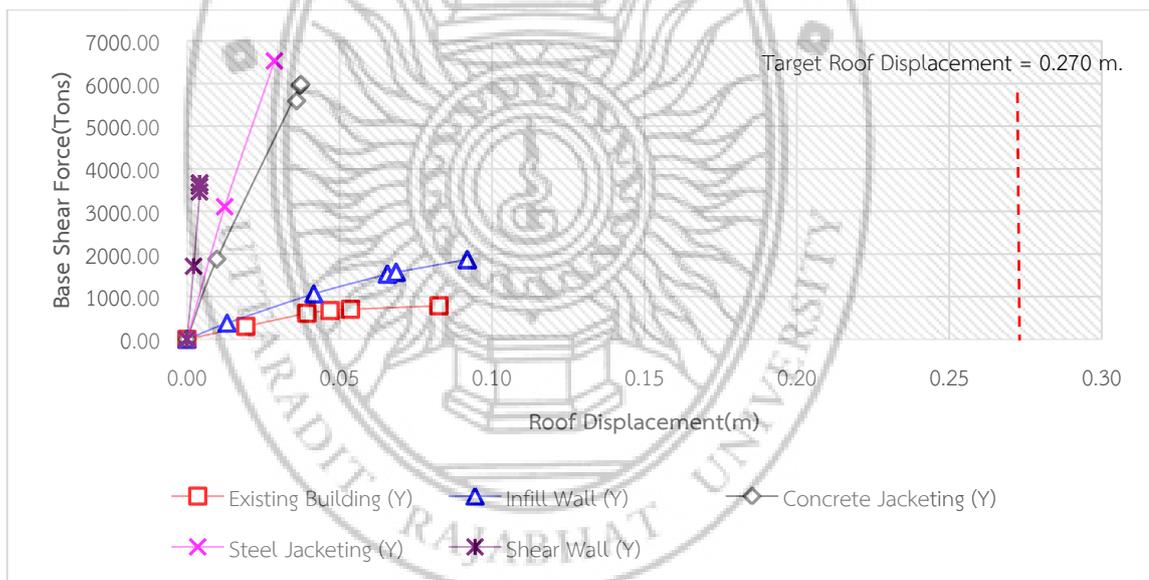


ภาพที่ 4.35 เส้นโค้งกำลังของอาคารที่เสริมกำลังโดยผนังรับแรงเฉือน (ทิศทาง Y)

จากภาพที่ 4.34-4.35 ช่วงแรกโครงสร้างอยู่ในสภาวะยืดหยุ่น เส้นกราฟเป็นเส้นตรง แต่เมื่อเพิ่มแรงผลักดันขึ้นไปอีก โครงสร้างจะมีการเสียรูป จนกระทั่งโครงสร้างสามารถต้านทานแรงกระทำและการเคลื่อนที่ได้สูงสุด ก่อนที่จะมีกำลังต้านทานแรงด้านข้างตกลง และเกิดการพังทลาย (Collapse)



ภาพที่ 4.36 เส้นโค้งกำลังของอาคาร (ทิศทาง X)



ภาพที่ 4.37 เส้นโค้งกำลังของอาคาร (ทิศทาง Y)

จากภาพที่ 4.36-4.37 พบว่าเมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้นในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง X) และทิศทางตามขวางกับอาคาร (ทิศทาง Y) เส้นโค้งกำลังของอาคารที่เสริมกำลังด้วยผนังรับแรงเฉือนมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันสูงที่สุด โดยมีกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ฐานอาคารถึง 7,771 ตัน และ 3,588 ตันตามลำดับ และระยะการเคลื่อนที่ของยอดอาคารสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายของยอดอาคารตามที่ได้คำนวณไว้ คือ ทิศทาง X = 0.272 เมตร และทิศทาง Y = 0.270 เมตร เนื่องจากเกิดการวิบัติก่อนซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ (อมร พิมาณมาศ, 2556, หน้า 194)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยทั้งหมด คือ การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารโดยวิธีการผลักด้วยแรงทางด้านข้าง (Pushover Analysis) การเสริมสมรรถนะความต้านทานแผ่นดินไหวรูปแบบต่างๆ และการเปรียบเทียบผลการเสริมสมรรถนะความต้านทานแผ่นดินไหวรูปแบบต่างๆของอาคาร สามารถสรุปผลตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยได้ดังนี้

5.1 การศึกษาแนวทางการประเมินและการเสริมสมรรถนะความต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตภาคเหนือของประเทศไทย

เมื่อเกิดการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว ผลตอบสนองของอาคารตัวอย่างแสดงในรูปของ “ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม” ซึ่งมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา (Maximum Considered Earthquake) ที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_0) และ คาบการสั่น 1 วินาที (S_1) ของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุด ในที่นี้ได้พิจารณาจากพื้นที่ตั้งของอาคารโรงเรียนต้นแบบที่ตั้งอยู่ในเขตภาคเหนือซึ่งมีค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมมากที่สุดคือ อำเภอวังชิ้น จังหวัดแพร่ โดยได้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมดังนี้ $S_0 = 1.021$ และ $S_1 = 0.276$ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างมีค่าดังนี้ $S_{DS} = 0.743$ และ $S_{D1} = 0.340$ ค่าอื่นๆสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้าง ได้แก่ ประเภทความสำคัญของอาคาร(III) ตัวประกอบความสำคัญ(1.25) ประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว(ง) ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (Response Modification Factor, $R=5$) ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (System Over strength Factor, $\Omega_0=3$) ตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว(Deflection Amplification Factor, $C_d = 4.5$) ค่าคาบการสั่นพื้นฐาน(Fundamental Period, $T= 0.02H = 0.289$ วินาที) สัมประสิทธิ์ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหว ($C_s = 0.186$)

5.2 การประเมินความต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตภาคเหนือของประเทศไทย

วิธีการประเมินที่เหมาะสมกับอาคารต้นแบบได้แก่ การวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบสถิตไม่เชิงเส้น (Pushover Analysis) ซึ่งแสดงผลของพฤติกรรมโดยรวมของโครงสร้างได้ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนรวมที่ฐานกับการเคลื่อนที่ของจุดควบคุม เรียกว่า เส้นโค้งแรงกระทำด้านข้าง (Pushover Curve) สำหรับอาคารต้นแบบ ในที่นี้คืออาคารเดิมที่คำนึงถึงผลของผนังอิฐก่อเนื่องจากผลการวิเคราะห์โครงสร้างทำให้พบว่าผนังอิฐก่อมีผลต่อการต้านทานแรงด้านข้างของอาคาร โดยมีแรงเฉือนที่ฐานสูงสุด 3,800.56 ตัน (ทิศทาง X) และ 1,869.35 ตัน (ทิศทาง Y) ค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายของยอดอาคารที่ศึกษามีค่าดังนี้คือ 0.272 เมตร (ทิศทาง X) และ 0.270 เมตร (ทิศทาง Y) การเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นมีค่าไม่เกินค่าที่ยอมให้ การครากขององค์อาคารเกิดขึ้นที่จุดต่อพลาสติกบริเวณเสาชั้นที่ 1 ทุกต้น เสาชั้นที่ 2-3 (ข้างบันไดทั้งสองด้านของอาคาร) และเสาชั้นที่ 4 ทุกต้น การวิบัติเกิดขึ้นที่เสาชั้นที่ 1 ก่อนเป็น

ลำดับแรก ดังนั้นควรทำการเสริมกำลังให้กับอาคารต้นแบบเพื่อให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวบริเวณ โคนเสา และปลายเสาที่ตำแหน่งที่เกิดจุดต่อพลาสติกที่ดังกล่าว

5.3 การเสริมสมรรถนะความต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตภาคเหนือของประเทศไทย

การวิจัยนี้ดำเนินการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กตามมาตรฐาน มยผ.1303-57 โดยเลือกใช้วิธีการเสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยคอนกรีต (Concrete Jacketing) การเสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยเหล็กแผ่น (Steel Jacketing) และการเสริมกำลังโดยใช้ผนังรับแรงเฉือน (Shear Wall) โดยการเสริมกำลังให้กับอาคารเดิมโดยมุ่งเน้นไปที่ตำแหน่งที่อาคารเกิดการเสียหายเมื่อเกิดแผ่นดินไหว ได้แก่ เสาชั้น 1 ทั้งหมด เสาบริเวณบันไดทั้งสองฝั่งของอาคารทุกชั้น และเสาชั้น 4 ของอาคารทั้งหมด เนื่องจากเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบสถิตไม่เชิงเส้น (Pushover Analysis) ความเสียหายของโครงสร้างจะเกิดขึ้นที่บริเวณดังกล่าวเป็นจำนวนมาก

5.4 เปรียบเทียบวิธีการเสริมสมรรถนะความต้านทานแผ่นดินไหวรูปแบบต่างๆของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในเขตภาคเหนือของประเทศไทย

เมื่อมีแรงแผ่นดินไหวกระทำในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง X) จนกระทั่งยอดของอาคารเกิดการเสียรูปทางด้านข้างตามที่กำหนด (Target Displacement X) อาคารที่เสริมกำลังด้วยกำแพงรับแรงเฉือน (Shear Wall) สามารถต้านทานแรงเฉือนได้สูงที่สุด คือ 7,771 ตัน เมื่อมีแรงแผ่นดินไหวกระทำในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง Y) จนกระทั่งยอดของอาคารเกิดการเสียรูปทางด้านข้างตามที่กำหนด (Target Displacement Y) อาคารที่เสริมกำลังด้วยการหุ้มด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing) สามารถต้านทานแรงเฉือนได้สูงที่สุด คือ 6,529 ตัน การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุด (Story Drift) ของอาคาร สำหรับอาคารเดิมและอาคารที่เสริมกำลังในลักษณะที่แตกต่างกันนี้มีสมรรถนะที่ยังอยู่ภายใต้ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level-IO) เส้นโค้งกำลังของอาคารที่เสริมกำลังด้วยผนังรับแรงเฉือนมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันสูงที่สุด โดยมีกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ฐานอาคารถึง 7,771 ตัน (ทิศทาง X) และ 3,588 ตัน (ทิศทาง Y) ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบลักษณะความเสียหายของจุดหมุนพลาสติกสำหรับอาคารเดิม และอาคารที่เสริมกำลังในลักษณะที่แตกต่างกันพบว่า อาคารเดิมที่ไม่ได้เสริมกำลังจุดหมุนพลาสติกเกิดการเสียหายระดับป้องกันการพังทลาย (CP) เป็นจำนวนมากที่บริเวณเสาของอาคารชั้น 4 และเสาชั้น 1-2 บริเวณมุมอาคารที่ติดกับบันได อาคารเดิมที่คำนึงถึงผลของผนังอิฐก่อ พบว่าจุดหมุนพลาสติกระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (IO) เกิดขึ้นที่เสาชั้น 1 ชั้น 4 และเสาบริเวณบันไดชั้น 1-4 ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (LS) เกิดขึ้นที่ชั้น 3 บริเวณบันได และที่ชั้น 4 ระดับป้องกันการพังทลาย (CP) ส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่เสาชั้น 1-3 บริเวณที่ติดกับบันได ส่วนอาคารที่เสริมกำลังโดยการหุ้มด้วยคอนกรีต การหุ้มด้วยเหล็กแผ่น และการใช้ผนังรับแรงเฉือนนั้น พบว่าจุดหมุนพลาสติกไม่เกิดการเสียหายเลย เนื่องจากเป้าหมายในการเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นอาคารสำคัญกำหนดให้มีระดับความเสียหายไม่เกินระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (IO) ตามมาตรฐาน มยผ.1303-57

5.5 อภิปรายผล

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีแบบสถิตไม่เชิงเส้น (Pushover Analysis) สามารถอภิปรายผลการวิจัยได้ดังนี้

5.5.1 การประมาณน้ำหนักบรรทุก (Load) ของอาคาร การวิจัยนี้ใช้น้ำหนักบรรทุกตายตัว และน้ำหนักบรรทุกจรได้อย่างเหมาะสม ตรงตามพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 สำหรับการวิเคราะห์

5.5.2 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้าง พื้นที่ที่ทำการศึกษาคือเขตพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย เมื่อพิจารณาตามมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยพ.1502-52 ในที่นี้เลือกใช้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่มีค่ามากที่สุด ในเขตภาคเหนือ ได้แก่ อำเภอวังชิ้น จังหวัดแพร่ ซึ่งถือว่ามีความเหมาะสม สามารถใช้วิเคราะห์โครงสร้างอาคารในเขตภาคเหนือได้

5.5.3 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารโดยวิธี Pushover Analysis จากการคำนวณค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายของยอดอาคาร (Target Roof Displacement, δ_t) ที่ติดตามยาวของอาคาร (ทิศทาง X) เท่ากับ 0.272 เมตร ที่ติดตามขวางของอาคาร (ทิศทาง Y) เท่ากับ 0.270 เมตร ซึ่งน้อยกว่าการคำนวณโดยการประมาณการระยะที่ผลกยอดอาคารจาก ร้อยละ 4 ของความสูงอาคาร (มงคล จิรวรรณเดช, 2560, หน้า 187) โดยในที่นี้อาคารสูง 14.45 เมตร ดังนั้นระยะที่ผลกยอดอาคารเท่ากับ 0.578 เมตร

5.5.4 แรงต้านข้างสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารโดยวิธี Pushover Analysis แรงกระทำด้านข้างที่เป็นตัวแทนของแรงแผ่นดินไหวที่มีรูปแบบของการกระจายแรงที่คงที่มากกระทำต่ออาคาร ตามมาตรฐาน มยพ.1303-57 กำหนดให้การกระจายตามแนวตั้งของแรงให้เป็นสัดส่วนกับรูปร่างโหมดพื้นฐานของอาคารในทิศทางของแรงกระทำแนวราบที่พิจารณา เนื่องจากอาคารมีรูปร่างค่อนข้างสม่ำเสมอ ทำให้รูปแบบการเคลื่อนตัวของอาคารคล้ายกับการเกิดแผ่นดินไหวจริง (อมร พิมาณมาศ, 2556, หน้า 196)

5.5.5 แรงเฉือนของอาคาร (Story Shear) ความสามารถต้านทานแรงเฉือนได้สูงสุดของอาคาร ภายหลังการเสริมกำลังแล้วพบว่า เมื่อมีแรงแผ่นดินไหวกระทำในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง X) การเสริมกำลังด้วยกำแพงรับแรงเฉือน (Shear Wall) สามารถต้านทานแรงเฉือนได้สูงสุด เมื่อมีแรงแผ่นดินไหวกระทำในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง Y) อาคารที่เสริมกำลังด้วยการหุ้มด้วยแผ่นเหล็ก (Steel Jacketing) สามารถต้านทานแรงเฉือนได้สูงสุด แต่การเสริมกำลังด้วยวิธีการหุ้มด้วยคอนกรีต (Concrete Jacketing) ก็สามารถต้านทานแรงเฉือนได้ดีเช่นกัน

5.5.6 การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นของอาคาร (Story Drift) การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุด (Story Drift) ของอาคาร สำหรับอาคารเดิมและอาคารที่เสริมกำลังในลักษณะที่แตกต่างกันนี้มีสมรรถนะที่ยังอยู่ภายใต้ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level-IO)

5.5.7 เส้นโค้งกำลัง (Capacity curve) เมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขึ้นในทิศทางตามยาวกับอาคาร (ทิศทาง X) และทิศทางตามขวางกับอาคาร (ทิศทาง Y) เส้นโค้งกำลังของอาคารที่เสริมกำลังด้วยผนังรับแรงเฉือนมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันสูงที่สุด โดยมีกำลังต้านทานแรงเฉือนที่ฐานอาคารถึง 7,771 ตัน และ 3,588 ตันตามลำดับ

จากผลการวิจัยต่างๆเมื่อต้องการเลือกวิธีการเสริมกำลังแบบใดมาใช้ นั้น จึงควรพิจารณาถึงปัจจัยอื่นๆมาประกอบด้วยเนื่องจากมีข้อดี ข้อเสียที่แตกต่างกัน

5.6 ข้อเสนอแนะในการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาโดยใช้อาคารต้นแบบคืออาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความสูง 4 ชั้น และใช้วิธีการเสริมกำลังตามมาตรฐาน มยผ.1303-57 จำนวน 3 แบบเท่านั้น ซึ่งผลการวิจัยได้ครอบคลุมถึงอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีระดับความสูงที่มากกว่า 4 ชั้น และวิธีการเสริมกำลังอาคารแบบอื่นๆ ประกอบกับแบบของอาคารที่นำมาวิเคราะห์เป็นแบบมาตรฐานอาคารเรียนของสำนักงานการศึกษาขั้นพื้นฐาน เพื่อเป็นการเกิดประโยชน์ทางการศึกษาวิจัยมากขึ้นจึงควรศึกษาการเสริมกำลังให้กับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในลักษณะอื่นที่มีผลกระทบต่อประชาชนด้วย



บรรณานุกรม

- Aboutaha, R. S. et al. (1999). "Rehabilitation of Shear Critical Concrete Columns by use of Rectangular Steel Jackets". ACI Structural Journal. Vol. 96. No.1
- ASCE7-05. (2005). American Society of Civil Engineers. "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers". Reston, Virginia.
- Computers and Structures, Inc. [On-Line]. (2017). "P-Delta effect". Available: <https://www.wiki.csiamerica.com/display/kb/P-Delta+effect> (Accessed 6 June 2017).
- Kitamura, H. Ishi, T. Mukai, T. Shumizu, T. Fujisawa, K. Ishida, Y.. (2004). "Seismic Retrofit for Existing RC Building Using Energy Dissipative Braces". Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C. Canada. paper No. 1209
- N. Choopool and V. Boonyapinyo. (2011). "Seismic Performance Evaluation of Reinforced Concrete Moment Resisting Frames with Various Ductility in Low Seismic Zone". American J. of Engineering and Applied Sciences 4 (1): 17-36.
- Pennung Warnitchai, Chanet Sangarayakul and Scott A Ashford. (2000). "Seismic Hazard in Bangkok due to Long-distance Earthquakes". Proceeding 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand. pp:7.
- Pinoy Math Community. [On-Line]. (2017). "Stress-strain Diagram". Available: <http://www.mathalino.com/reviewer/mechanics-and-strength-of-materials/stress-strain-diagram> (Accessed 6 June 2017).
- Priestley, T. et al. (1995). "Pharmacological Properties of Recombinant Human N-methyl-D-aspartate Receptors Comprising NR1a/NR2A and NR1a/NR2B Subunit Assemblies Expressed in Permanently Transfected Mouse Fibroblast Cells". Mol Pharmacol. Vol 48. pp.841-848.
- ResearchGate. [On-Line]. (2017). "Force-deformation relationship of a typical plastic hinge". Available: https://www.researchgate.net/figure/222528216_fig4_Fig-6-Force-deformation-relationship-of-a-typical-plastic-hinge (Accessed 6 June 2017).
- Sugano. (1989). "Study of the Seismic Behavior of Retrofitted Reinforced Concrete Building". Proceeding. ASCE'89 Structural Congress. San Francisco. CA.

- The Constructor- Civil Engineering Home. [On-Line]. (2017). "Seismic Retrofitting Techniques for Concrete Structures". Available: <https://theconstructor.org/concrete/seismic-retrofitting-techniques-concrete-structures/11767/> (Accessed 6 June 2017).
- The University of Memphis. [On-Line]. (2017). "Properties of Concrete". Available: http://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/section_3_properties.html (Accessed 6 June 2017).
- UBC-1997. (1997). Uniform Building Code. "Structural Engineering Design Provisions. International Conference of Building Officials (ICBO)". Whittier. California, pp: 2-9 to 2-22.
- Yan. Z. Panteldes. C. P. and Leaveley. L. D.. (2006). "Fiber-Reinforced Polymer Jacketed and Shape-Modified Compression Members: I-Experimental Behavior". ACI Structure Journal. Vol. 103. No. 6. Nov-Dec.
- กฎกระทรวง ฉบับที่ 49. (2540). "กฎกระทรวง ฉบับที่ 49 ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522". หน้า 51-56.
- กรพล สายเชื้อ, ชยานนท์ ทรราชภิญโญ, พุทธิพล ดำรงชัย, และปุ่น เทียงบูรณธรรม. (2556). "การตัดสินใจหลายตัวแปรในการคัดเลือกวิธีเสริมกำลังอาคารเรียนด้านทานแรงแผ่นดินไหวในเทศบาลนครเชียงใหม่". การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18. เชียงใหม่. หน้า APP12-18.
- กรมทรัพยากรธรณี. (2555). "แผนที่รอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย". แหล่งที่มา : http://www.dmr.go.th/images/article/freetemp/article_20140507091801.png, 14 กันยายน 2558.
- กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2550). "มาตรฐานประกอบการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ. 1301-50". กรุงเทพฯ : สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคารกรมโยธาธิการและผังเมือง.
- กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2551). "มาตรฐานการเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย มยผ. 1508-51". กรุงเทพฯ : สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคารกรมโยธาธิการและผังเมือง.
- กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2551). "มาตรฐานปฏิบัติในการซ่อมแซมคอนกรีต มยผ. 1901-51". กรุงเทพฯ : สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคารกรมโยธาธิการและผังเมือง.
- กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2552). "มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ. 1302-52". พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัท ดิจิตอล ออฟเซต เอเชีย แปซิฟิก จำกัด.

- กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2554). “มาตรฐานประกอบการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ. 1301-54”. กรุงเทพฯ : สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคารกรมโยธาธิการและผังเมือง.
- กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2557). “มาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ.1303-57”. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร กรมโยธาธิการและผังเมือง.
- เจนศักดิ์ คชนิล. (2555). “การประเมินการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบสำหรับรับแรงในแนวดิ่งในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย”. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17. อุตรธานี. หน้า STR003-1 ถึง STR003-10.
- ณรงค์ โพธิ์พุกขานันท์. (2551). “ระเบียบวิธีวิจัย”. พิมพ์ครั้งที่ 5. บริษัท ส.เอเชียเพรส (1989) จำกัด, กรุงเทพฯ.
- แทนไท. [ออนไลน์]. (2560). “เปิด 14 กลุ่มรอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย”. แหล่งที่มา : <http://oknation.nationtv.tv/blog/varietynews/2014/05/06/entry-1> (วันที่เข้าถึงข้อมูล 19 พฤษภาคม 2560).
- บริบูรณ์ สัมพันธ์เจริญ และไพบูลย์ ปัญญาคะโป. (2553). “พฤติกรรมต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยองค์อาคารรังยี่ดไร้การโค้งเดาะ”. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 6. เพชรบุรี. หน้า 499-504.
- ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. [ออนไลน์]. (2560). “ระบบโครงสร้างอาคารสูงประเภทต่าง ๆ”. แหล่งที่มา : <http://winddesign31.blogspot.com/> (วันที่เข้าถึงข้อมูล 6 มิถุนายน 2560).
- มงคล จิรวัชรเดช. (2560). “คู่มือการใช้โปรแกรมอีแทปส์ ETABS (2016) ขั้นสูง สำหรับออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว (Seismic Analysis)”. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : TumCivil Training Center โดย นายอชิพัทธ์ ศรีเกต.
- มหาซีวิล.คอม. [ออนไลน์]. (2560). “การออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กแบ่งออกจามาตรฐานของวสท.” แหล่งที่มา : <http://www.mahacivil.com/index.php/2015-02-14-22-02-58/> (วันที่เข้าถึงข้อมูล 6 มิถุนายน 2560).
- วินิต ช่อวิเชียร. (2550). “การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง”. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : วินิต ช่อวิเชียร. หน้า 10.
- สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.). [ออนไลน์]. (2560). “แนวทางการประเมินโครงสร้าง”. Available: http://www.thaiseismic.com/structure_evaluate/ (วันที่เข้าถึงข้อมูล 6 มิถุนายน 2560).

อมร พิमानมาศ. (2555). “ประเทศไทยเสี่ยงต่อแผ่นดินไหวและสึนามิแค่ไหนและจะรับมืออย่างไร”. พิมพ์ครั้งที่ 1. ม.ป.ท. หน้า 2.

อมร พิमानมาศ. (2556). “แนวทางการออกแบบ การประเมิน และการเสริมกำลังอาคารเก่าเพื่อดำเนินงานแผ่นดินไหวในประเทศไทย”. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัทซีวิลเอ็นจิเนียริง คอนซัลแตนท์แอนด์เทรนนิ่ง จำกัด

เอกลักษณ์ แสงวโรตม์, ปีย์ลักษณ์ วันทนาศิริ, ชีระชัย ดีสมสุข, และทศพล ปิ่นแก้ว. (2556). “สมรรถนะของโครงสร้างแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกออกแบบให้รับแผ่นดินไหวภายใต้แผ่นดินไหวรุนแรง”. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 18. เชียงใหม่. หน้า STR9-15.





ภาคผนวก