

การเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูงระดับปานกลางด้วยตัวหน่วง

Seismic Retrofit of Medium-rise RC Building with Dampers

นนทพัทธ์ ธรรมจักร์

ภูษณ เกรียงเกียรติก้อง

อภิศักดิ์ นาคโขนง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Seismic Retrofit of Medium-rise RC Building with Dampers

Nontaphat Tammajak

Phusana Kriangkriatkong

Apisak Nakkahnong

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2022

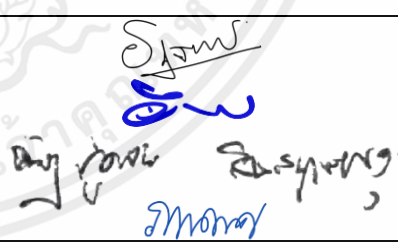
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูงระดับปานกลางด้วยตัวหน่วง

Seismic Retrofit of Medium-rise RC Building with Dampers

นักศึกษา นายนนทพัทธ์ ธรรมจักร รหัสนักศึกษา 63015090
นายภูษณ เกียงเกียรติก้อง รหัสนักศึกษา 63015136
นายอภิศักดิ์ นาคโขนง รหัสนักศึกษา 63015206
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ภาณุมาศ ไทรงาม

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.อภิวุฒิ สุจริตพงศ์ ผศ.ดร.อำพน จรัสจรวงเกียรติ ผศ.ดร.ณัฐดนัย สีนสมุทรผดุง ดร.ภาณุมาศ ไทรงาม	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

CU

(รศ.ดร.ชลิตา อุตะเถา)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 09 / 06 / 2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูงระดับปานกลางด้วยตัวหน่วง

นายนนทพัทธ์	ธรรมจักร์	รหัสนักศึกษา 63015090
นายภูษณ	เกรียงเกียรติก้อง	รหัสนักศึกษา 63015136
นายอภิศักดิ์	นาโคโขง	รหัสนักศึกษา 63015206

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ภาณุมาศ ไทรงาม

ปีการศึกษา 2565

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันเหตุการณ์แผ่นดินไหวเกิดขึ้นได้ทั้งในและนอกประเทศไทย ซึ่งแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อประเทศไทยทั้งทางตรงและทางอ้อม เมื่อแผ่นดินไหวครั้งใหญ่ในปี 2557 ที่จังหวัดเชียงราย ส่งผลให้เกิดอาคารเกิดความเสียหายหลายแห่ง ทำให้ภาครัฐเห็นถึงความสำคัญสำหรับการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวเพื่อความปลอดภัยของประชาชนมากยิ่งขึ้น ในปีพ.ศ. 2564 ประกาศกระทรวงมหาดไทย เรื่อง การออกแบบและคำนวณโครงสร้างอาคารเพื่อต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวทำให้อาคารในหลายพื้นที่ที่มีความต้องการ การออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวมากขึ้น

งานวิจัยเรื่องนี้จุดมุ่งหมายให้ผู้อ่านได้เข้าใจถึงรายละเอียดเกี่ยวกับการเสริมกำลังเพื่อต้านแรงแผ่นดินไหวโดยการเสริมด้วยองค์อาคารยึดรั้งไร้การโก่งเดาะ (buckling-restrained braces, BRBs) และวิธีการออกแบบหาจำนวนองค์อาคารยึดรั้งไร้การโก่งเดาะที่ต้องเสริมในแต่ละชั้น ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ETABS โดยใช้อาคารตัวอย่างสูง 36 ชั้น เป็นอาคารที่ทำการศึกษา โดยอาคารตัวอย่างดังกล่าวเปรียบเสมือนตัวอย่างอาคารของจังหวัดกรุงเทพมหานคร และทำการเปรียบเทียบกับอาคารที่ทำการเสริมกำลังด้วยองค์อาคารยึดรั้งไร้การโก่งเดาะแล้ว พบว่าระยะเวลาการเคลื่อนตัว สัมพัทธ์ระหว่างชั้น และอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นลดลง

นอกจากนี้งานวิจัยเรื่องนี้ได้ทำการเสริมด้วยองค์อาคารยึดรั้งไร้การโก่งเดาะ (BRBs) เข้าในอาคารตัวอย่างทั้งหมด 6 กรณี โดยเลือกสถานที่ตามความเป็นไปได้ของการติดตั้ง และเลือกติดตั้งใน

บริเวณที่ทำให้เกิดแรงบิดต่ออาคารได้น้อย จากการศึกษาพบว่าการเสริมด้วยองค์อาคารยึดรั้งไร้การ โกงเดาะ (BRBs) บริเวณใกล้ผนังรับแรงเฉือน (Shear wall) ทำให้ค่าการเคลื่อนตัว (displacement) ของอาคารตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กลดมากที่สุด เมื่อเทียบกับกรณีศึกษากรณีอื่นๆ

คำสำคัญ : อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูงระดับปานกลาง, การเสริมกำลังอาคาร และ องค์อาคารยึดรั้งไร้การโกงเดาะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Seismic Retrofit of Medium-rise RC Building with Dampers

Mr. Nontaphat	Tammajak	Student ID 63015090
Mr. Phusana	Kriangkriatkong	Student ID 63015136
Mr. Apisak	Nakkahnong	Student ID 63015206

Advisor: Dr. Panumas Saingam

Academic Year 2022

ABSTRACT

Nowadays, earthquake events occur both inside and outside Thailand. The earthquake that occurred affected Thailand both directly and indirectly. When the great earthquake in 2014 in Chiang Rai, many buildings were damaged. This affects the government realize the importance of designing earthquake resistant buildings for the safety of the public. The calculation of the building structure to withstand the vibration of the earthquake causes buildings in many areas to have demands, which consider design more earthquake-resistant buildings

This research aims to give the readers a detailed understanding of the seismic reinforcement by reinforcement with buckling-restrained braces (BRBs) and a design method for quantifying the number of BRBs that must be reinforced in each floor. which was analyzed by ETABS program using a 36-story sample building as the study building. The aforementioned example buildings are representative buildings in Bangkok. and comparing it with the reinforced building without retrofit. It is found that the displacement of retrofitted building was decreased when compared to the non-retrofit building.

In addition, this research has been retrofitted the example building with BRBs for a total of 6 cases, selecting locations according to the possibility of installation. In เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

addition, the BRB's locations were chosen to install in the area that causes less torsion to the building. This study found that reinforcement with BRBs near the shear wall resulted in the lowest displacement values when compared to other case studies

KEYWORDS: Medium-rise RC Building, Seismic Retrofit and Buckling Restrained Braces (BRB)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ดร.ภาณุมาศ ไทรงาม ที่กรุณาให้คำปรึกษาปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องคอยแนะนำช่วยเหลือในการ แก้ไขปัญหา คอยให้ความรู้ เอาใจใส่ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือจนสำเร็จได้ด้วยดีพวกเราผู้จัดทำรู้สึก ซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆ รายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน โดยคณาจารย์ท่านต่างๆ ได้ ถ่ายทอดความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ ความรู้ทั่วไป และประสบการณ์ต่างๆ จนสามารถนำมาใช้ในการ ทำงานและการดำเนินชีวิตได้อย่างดียิ่ง ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ร่วมเป็นกรรมการ ในการทดสอบ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือซึ่งกันและกันในการ ทำโครงการ รวมถึงตลอดระยะเวลาที่ได้เรียนรู้ศึกษาในภาควิชาโยธาจนตลอดมา

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่งซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและกำลังใจใน การสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคณะผู้จัดทำโดยตลอดทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ได้ คณะผู้จัดทำ รู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่าง

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูปภาพ.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1. ความเป็นมา.....	1
1.2. วัตถุประสงค์.....	1
1.3. ขอบเขตของโครงการพิเศษ.....	1
1.4. ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5. ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	3
2.1. ประวัติการเกิดแผ่นดินไหวในประเทศไทย.....	3
2.2. ทฤษฎีเกี่ยวกับโครงสร้างต้านทานแรงแผ่นดินไหว.....	4
2.2.1. ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว.....	4
2.2.2. พื้นที่ในกรุงเทพมหานคร.....	4
2.2.3. ตัวประกอบความสำคัญและประเภทของอาคาร.....	6
2.2.4. การจำแนกระบบโครงสร้างและข้อจำกัด.....	8
2.2.5. การเคลื่อนที่ตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นและการโก่งตัวของโครงสร้าง.....	13
2.3. การเสริมกำลังต้านทานแรงแผ่นดินไหวด้วยองค์อาคารยึดรั้งไร้การโก่งเดาะ.....	14
2.3.1. ส่วนประกอบและพฤติกรรมขององค์อาคารยึดรั้งไร้การโก่งเดาะ.....	14
2.3.2. การออกแบบขององค์อาคารยึดรั้งไร้การโก่งเดาะ.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ.....	23
3.1. รูปแบบการวิจัยหรือแบบแผนการวิจัย.....	23
3.2. การรวบรวมข้อมูล.....	23
3.3. เครื่องมือวิจัย.....	23
3.4. ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	23
3.5. การสร้างแบบจำลองอาคาร.....	24
3.5.1. ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม ETABS.....	24
3.5.2. การคำนวณแรงแผ่นดินไหวโดยวิธีสถิตเทียบเท่า.....	30
3.6. การเสริมกำลังของโครงสร้าง.....	34
3.6.1. วิธีการออกแบบ BRB.....	34
3.6.2. วิธีการเสริมกำลังของโครงสร้างโดยใช้โปรแกรม ETABS.....	38
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	42
4.1. ผลที่ได้จากการออกแบบ.....	47
4.2. ผลที่ได้จากการวิเคราะห์.....	48
4.2.1. ผลของการเคลื่อนตัว (Story Displacement).....	48
4.2.2. ผลของอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story Drift Ratio).....	53
4.2.3. ผลของประสิทธิภาพการทำงานของ BRB.....	57

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	59
5.1. สรุปผลการทดลอง	59
บรรณานุกรม.....	60
ภาคผนวก ก หน้าตัดอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูงระดับปานกลาง	621



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
ตารางที่ 2.1 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ ด้วยวิธีพลศาสตร์ สำหรับพื้นที่ในโซนต่าง ๆ ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพฯ หน่วยเป็น กรัม (g).....	5
ตารางที่ 2.2 การจำแนกประเภทความสำคัญของอาคารและค่าตัวประกอบความสำคัญของอาคาร.....	7
ตารางที่ 2.3 ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (Response Modification Factor, R) ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (System Over strength Factor, Ω_o) และ ตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (Deflection Amplification Factor, C_d).....	9
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงจำนวน BRB ที่ได้จากการออกแบบและค่าสติเฟนสของ BRB.....	47
ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์และร้อยละของประสิทธิภาพ BRB ที่ต้องการเพิ่มเติม.....	57

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 การแบ่งโซนพื้นที่แอ่งกรุงเทพเพื่อการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว.....	5
รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของ BRB.....	14
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูป (force-deformation curve).....	15
รูปที่ 2.4 Assumed Hysteresis loop of RC frame.....	16
รูปที่ 2.5 Conversion of SDOF model.....	17
รูปที่ 2.6 Max Story Drift Angle.....	22
รูปที่ 2.7 Residual Story Drift Angle.....	22
รูปที่ 3.1 วางแนว Grid line และจำนวนชั้นของแบบจำลอง.....	24
รูปที่ 3.2 กำหนดคุณสมบัติของคอนกรีต.....	25
รูปที่ 3.3 กำหนดขนาดหน้าตัดและคุณสมบัติเสา.....	25
รูปที่ 3.4 กำหนดขนาดหน้าตัดและคุณสมบัติคาน.....	26
รูปที่ 3.5 กำหนดขนาดหน้าตัดและคุณสมบัติผนังรับแรงเฉือน.....	26
รูปที่ 3.6 กำหนดขนาดหน้าตัดและคุณสมบัติของแผ่นพื้น Post-Tension.....	27
รูปที่ 3.7 แปลนแบบจำลองของโครงสร้าง เสา ผนังรับแรงเฉือนและพื้นชั้นที่ 2.....	27
รูปที่ 3.8 กำหนดจุดรองรับของแบบจำลองเป็นแบบยึดหมุน.....	28
รูปที่ 3.9 กำหนดน้ำหนักบรรทุก (LL) เท่ากับ 200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร.....	28
รูปที่ 3.10 กำหนด D1 เป็นไดอะแฟรมแข็ง (Rigid Diaphragm).....	29
รูปที่ 3.11 กำหนดค่าน้ำหนักสุทธิ (Mass Source).....	29
รูปที่ 3.12 กำหนดรูปแบบการสั่นพื้นฐานของอาคาร.....	30
รูปที่ 3.13 กำหนดกรณีและลักษณะของแรงแผ่นดินไหว.....	31
รูปที่ 3.14 ใส่ค่าแรงที่กระทำด้าน Y ในแต่ละชั้น.....	32
รูปที่ 3.15 ใส่ค่าแรงที่กระทำด้าน X ในแต่ละชั้น.....	32
รูปที่ 3.16 กำหนดค่า Stiffness ประสิทธิภาพของเสา.....	33
รูปที่ 3.17 กำหนดค่า Stiffness ประสิทธิภาพของคาน.....	33
รูปที่ 3.18 กำหนดค่า Stiffness ประสิทธิภาพของผนังรับแรงเฉือน.....	34

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.19 กำหนดค่า Stiffness ประสิทธิภาพของแผ่นพื้นไร้คาน.....	34
รูปที่ 3.20 กำหนด Link Properties สำหรับ BRB.....	38
รูปที่ 3.21 กำหนด Link Property DATA สำหรับ BRB แต่ละชั้น.....	38
รูปที่ 3.22 กำหนด Link Directional Properties สำหรับ BRB.....	39
รูปที่ 3.23 แบบสามมิติของแบบจำลองโครงสร้างหลังเสริม BRB ด้านที่ 1.....	39
รูปที่ 3.24 แบบสามมิติของแบบจำลองโครงสร้างหลังเสริม BRB ด้านที่ 2.....	30
รูปที่ 3.25 แบบสามมิติของแบบจำลองโครงสร้างหลังเสริม BRB ด้านที่ 3.....	41
รูปที่ 3.26 แบบสามมิติของแบบจำลองโครงสร้างหลังเสริม BRB ด้านที่ 4.....	41
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคาร.....	43
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสูงสุดของอาคาร.....	44
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ก่อนคุณตัวคุณปรับค่า.....	45
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นและอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น.....	46
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นและการเคลื่อนตัวสูงสุดในแกน X ของอาคารหลังเสริมกำลัง ทั้ง 6 กรณี.....	50
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นและการเคลื่อนตัวสูงสุดในแกน Y ของอาคารหลังเสริมกำลังทั้ง 5 กรณี.....	52
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นและอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นในแกน X หลังเสริม กำลัง แบบที่ 1 ถึง.....	54
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นและอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นในแกน Y หลังเสริม กำลัง แบบที่ 1 ถึง 6.....	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมา

ในอดีตประเทศไทยถือว่ามียันตรายจากแผ่นดินไหวต่ำ และอาคารที่มีอยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่ไม่ได้ออกแบบโดยคำนึงถึงการต้านทานแผ่นดินไหว อย่างไรก็ตามเกิดความเสียหายของอาคารเพิ่มขึ้นในช่วงที่เกิดแผ่นดินไหวครั้งล่าสุด และในปีพ.ศ. 2552 กรมโยธาธิการและผังเมืองได้เผยแพร่รหัสการออกแบบแผ่นดินไหวสำหรับอาคารใหม่ (DPT 1302-52, 2552) ตามด้วยรหัสสำหรับการติดตั้งเพิ่มเติมเพื่อเสริมกำลังต้านทานแผ่นดินไหว (1303-57, 2557)

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กหลายแห่งในกรุงเทพฯ สร้างขึ้นด้วยความสูงระหว่าง 30-40 ชั้น ซึ่งสามารถจัดเป็นอาคารสูงขนาดกลางได้ อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเหล่านี้ส่วนใหญ่สร้างขึ้นก่อนรหัสการออกแบบแผ่นดินไหวที่ได้รับการปรับปรุงได้เผยแพร่ออกมา

การติดตั้งเพิ่มเติมสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีอยู่ เพื่อเพิ่มความสามารถในการรองรับแผ่นดินไหวเป็นข้อกำหนดเร่งด่วนเพื่อให้แน่ใจว่าอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถต้านทานภายใต้รหัสการออกแบบคลื่นไหวสะเทือนที่ได้รับการปรับปรุง

องค์อาคารยึดรั้งไร้การโก่งเดาะ (BRB) เป็นวิธีการใหม่ในการปรับปรุงโครงสร้างแผ่นดินไหวของ อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันมีการเสนอวิธีการติดตั้งเพิ่มเติมสำหรับ อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มี BRB สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 หรือ 5 ชั้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการติดตั้งเพิ่มเติมสำหรับ อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความสูงระดับกลาง เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการรับแรงแผ่นดินไหวและให้สอดคล้องกับรหัสที่ปรับปรุง

1.2. วัตถุประสงค์

1.2.1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นอาคารสูงขนาดกลาง ทั้งก่อนและหลังการเสริมกำลังต้านแรงแผ่นดินไหวด้วยองค์อาคารยึดรั้งไร้การโก่งเดาะ

1.2.2. เพื่อเสนอวิธีเสริมกำลังต้านแรงแผ่นดินไหวสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นอาคารสูงขนาดกลางด้วยองค์อาคารยึดรั้งไร้การโก่งเดาะ

1.3. ขอบเขตของโครงการพิเศษ

1.3.1. ศึกษาเฉพาะแบบจำลองโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 38 ชั้น โครงการชื่อ อัจฉริยะเสียง สถานที่ตั้ง 968 ถนนพระราม4 แขวงสีลม เขตบางรัก กรุงเทพฯ ที่แบ่งตึกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนtowerสูง 38 ชั้น ส่วนอาคารที่จอดรถสูง 11ชั้น ด้วยโปรแกรม ETABS เท่านั้น

1.3.2. เสนอการติดตั้งเพื่อเสริมกำลังต้านแรงแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นอาคารสูงขนาดกลางด้วยองค์อาคารยึดรั้งไร้การโก่งเดาะ

1.3.3. ประสิทธิภาพของวิธีการออกแบบชุดติดตั้งเพิ่มเติมที่เสนอได้รับการตรวจสอบโดยใช้วิธีวิเคราะห์การตอบสนองไม่เชิงเส้นแบบประวัติเวลา (THA) โดยการเปรียบเทียบอาคารที่ศึกษาก่อนและหลังเสริมกำลังด้วยองค์อาคารยี่ดิ่งไร้การโก่งเดาะ

1.3.4. ศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมกรรมการเคลื่อนตัวด้านข้างของอาคาร (Lateral Displacement) และการเคลื่อนตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้น (Inter-story Drift)

1.4. ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

No.	Task Name	Duration (สัปดาห์)	2021					2022				
			AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEB	MAR	APR	MAY
1	ศึกษาวิธีการเสริมกำลังด้านแรงแผ่นดินไหว	6	■									
2	หาข้อมูลของอาคารที่นำมาศึกษา	4		■								
3	สร้างแบบจำลองอาคารโดยโปรแกรม ETABS	9			■	■	■					
4	วิเคราะห์โครงสร้างอาคาร	15					■	■	■	■	■	
5	นำแบบจำลองอาคารมาเสริมกำลังด้านแรงแผ่นดินไหว	12						■	■	■	■	■
6	สรุปผลการศึกษา	2										■

1.5. ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1. ได้ทราบวิธีการคำนวณปริมาณขององค์อาคารยี่ดิ่งไร้การโก่งเดาะ สำหรับการเสริมกำลังด้านแรงแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นอาคารสูงขนาดกลางเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนด มยผ. 1303-57

1.5.2. ได้ทราบวิธีการตรวจสอบประสิทธิภาพแผ่นดินไหวก่อนและหลังเสริมกำลังด้านแรงแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ศึกษา โดยใช้วิธีวิเคราะห์การตอบสนองไม่เชิงเส้นแบบประวัติเวลา ในโปรแกรม ETABS

1.5.3. ได้ทราบประสิทธิภาพของวิธีเสริมกำลังด้านแรงแผ่นดินไหวที่เสนอของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เป็นอาคารสูงขนาดกลางด้วยองค์อาคารยี่ดิ่งไร้การโก่งเดาะ

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1. ประวัติการเกิดแผ่นดินไหวในประเทศไทย

แผ่นดินไหวเป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของพื้นดิน อันเนื่องมาจากการปลดปล่อยพลังงานเพื่อลดความเครียดที่สะสมไว้ภายในโลกออกมาเพื่อปรับสมดุลของเปลือกโลกให้คงที่ ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ยังไม่สามารถทำนายเวลา สถานที่และความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

ประเทศไทยไม่อาจจัดอยู่ในเขตที่ปลอดภัยจากแผ่นดินไหวได้เนื่องจากหลักฐานการบันทึกประวัติศาสตร์ (Historical Earthquake Data) จดหมายเหตุศิลาจารึกและพงศาวดารได้ระบุว่า ประเทศไทยเคยได้รับแผ่นดินไหวขนาดปานกลางจนถึงขนาดใหญ่มาแล้วหลายครั้งและยังสร้างความเสียหายให้กับพื้นที่ในหลายภูมิภาคของประเทศโดยเฉพาะภาคเหนือและภาคตะวันตกมี แผ่นดินไหวครั้งสำคัญเมื่อ 13 พฤษภาคม พ.ศ. 2478 ตรวจพบมีจุดเหนือศูนย์กลางอยู่ที่จังหวัดน่านมี ขนาดถึง 6.5 ตามมาตราริกเตอร์แผ่นดินไหวเช้าตรู่ของวันที่ 22 เมษายน พ.ศ. 2526 บริเวณ เขื่อนวชิราลงกรณ์ จังหวัดกาญจนบุรี มีขนาด 5.9 ตามมาตรา ริกเตอร์ รู้สึกได้ทั่วทั้งภาคกลางและภาคเหนือ อาคารในกรุงเทพมหานครเสียหายเล็กน้อย และแผ่นดินไหวเกิดที่อำเภอพาน จังหวัด เชียงราย เมื่อวันที่ 11 กันยายน พ.ศ.2537 มีขนาด 5.1 ตามมาตราริกเตอร์ก่อให้เกิดความเสียหาย ต่อโรงพยาบาล อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย นอกจากนี้ยังมีแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นแล้วมีจุดเหนือศูนย์ เกิดแผ่นดินไหวอยู่ในบริเวณประเทศเพื่อนบ้านแล้วมีผลสะเทือนมาสู่ประเทศไทย โดยเฉพาะบริเวณ ภาคตะวันตกและภาคเหนือ ข้อมูลที่ได้ การเกิดแผ่นดินไหวที่ตรวจวัดได้(Instrumental Earthquake Data) โดยกรมอุตุนิยมวิทยา ทำให้ทราบว่า จุดเหนือศูนย์แผ่นดินไหว (Epicenter) มี การกระจายตัวในแถบพรมแดนไทย-สหภาพพม่า ไทย-ลาว,จีน-สหภาพพม่าหรือในทะเลอันดามันซึ่ง ยังสามารถตรวจวัดได้เป็นประจำจึงแสดงให้เห็นชัดว่าเปลือกโลกในบริเวณแถบดังกล่าวยังมีการเปลี่ยนแปลงอยู่

ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีมาตรการเตรียมพร้อมที่มีประสิทธิภาพสูงสุดมาตรการหนึ่ง คือการออกแบบก่อสร้างอาคารให้สามารถต้านทานแผ่นดินไหวที่รุนแรงได้ด้วยเหตุนี้ในปีพ.ศ. 2540 จึงได้ มีการออกกฎกระทรวงฉบับที่ 49 ภายใต้พ.ร.บ. ควบคุมอาคารฯ มากำหนดให้มีการออกแบบอาคาร ต้านทานแผ่นดินไหวในพื้นที่จังหวัดภาคเหนือ และจังหวัดกาญจนบุรีซึ่งในเวลาต่อมากฎกระทรวง ดังกล่าวได้ถูกแทนที่โดยกฎกระทรวง

โดยกฎกระทรวง พ.ศ. 2550 ซึ่งปรับปรุงขยายพื้นที่ควบคุมให้ ครอบคลุมถึงกรุงเทพมหานคร และปริมณฑลและ จังหวัดในภาคใต้

กฎกระทรวงดังกล่าวฉบับได้ว่าเป็นก้าวสำคัญของการดำเนินการลดภัยพิบัติแผ่นดินไหวของประเทศไทย อย่างไรก็ตามก็ยังมีข้อกำหนดต่าง ๆ ในการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว ที่ระบุไว้ในกฎกระทรวงนั้น อ้างอิงมาจากมาตรฐานแม่แบบในต่างประเทศที่ค่อนข้างล้าสมัย ส่งผลให้การออกแบบมีข้อจำกัดหลายประการ และไม่สอดคล้องกับองค์ความรู้ที่มีอยู่ในปัจจุบันมาตรฐานการ ออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ได้ถูกจัดทำขึ้นเพื่อให้ความสมบูรณ์ ทันสมัย และสอดคล้องกับหลักวิชาการในปัจจุบัน ทัดเทียมกับมาตรฐานในระดับสากล โดยคณะทำงานจัดทำมาตรฐาน ได้พิจารณาเลือกมาตรฐานASCE7-05 ของประเทศสหรัฐอเมริกามาใช้ เป็นมาตรฐานแม่แบบ และได้ดำเนินการปรับแก้ข้อกำหนด สัมประสิทธิ์ค่าตัวประกอบสูตรและสมการออกแบบบางส่วน เพื่อให้มาตรฐานฉบับนี้มีความสอดคล้องและเหมาะสมกับสภาวะการณ์ของประเทศไทย

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับโครงสร้างต้านทานแรงแผ่นดินไหว

มาตรฐานการออกแบบการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยพ.1302 ของกรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย

2.2.1. ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว

เมื่อเกิดการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวอาคารต่าง ๆ จะมีการตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนแตกต่างกันไป โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก คือ คาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร และปัจจัยประกอบอื่น ๆ ดังนั้น ผลตอบสนองของอาคารจึงแสดงในรูปของ “ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม” ซึ่งมีค่าแปร เปลี่ยนไปตามคาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร ซึ่งในกรณีของพื้นที่แอ่งกรุงเทพมหานคร ผลตอบสนอง ของอาคารได้ถูก แสดงในรูปของความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ ซึ่งได้รวมผล เนื่องจากสภาพดินอ่อนในพื้นที่นั้นเข้าไปแล้ว

2.2.2. พื้นที่ในแอ่งกรุงเทพมหานคร

พื้นที่ในแอ่งกรุงเทพครอบคลุมกรุงเทพมหานครและจังหวัดปริมณฑลหลายจังหวัด พื้นที่นี้ ได้ถูกแบ่งย่อยเป็น 7 โซน ดังรูปที่ 2.1 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ ในพื้นที่ 7 โซนนี้ขึ้นกับวิธีการออกแบบดังนี้ สำหรับการออกแบบด้วยวิธีพลศาสตร์ ให้ใช้สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการ ออกแบบที่กำหนดตามค่าที่แสดงในตารางที่ 2.1

2.2.3. ตัวประกอบความสำคัญและประเภทของอาคาร

อาคารได้ถูกจำแนกตามลักษณะการใช้งาน และความสำคัญของอาคารที่มีต่อสาธารณชนและ การบรรเทาภัยหลังเกิดเหตุออกเป็น 4 ประเภท (Occupancy Category) คือ ประเภท I, II, III, และ IV โดยอาคารแต่ละประเภทมีค่าตัวประกอบความสำคัญ (Importance Factor) เพื่อใช้ในการ ออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2



ตารางที่ 2.2 การจำแนกประเภทความสำคัญของอาคารและค่าตัวประกอบความสำคัญของอาคาร

ประเภทของอาคาร	ประเภทความสำคัญ	ตัวประกอบความสำคัญ
(๑) อาคารและโครงสร้างอื่น ๆ ที่มีปัจจัยเสี่ยงอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ค่อนข้างน้อย เมื่อเกิดการพังทลายของอาคารหรือส่วนโครงสร้างนั้น ๆ เช่น อาคารที่เกี่ยวข้องกับการเกษตร อาคารชั่วคราว อาคารเก็บของเล็ก ๆ ซึ่งไม่มีความสำคัญ เป็นต้น	I (น้อย)	1.0
(๑) อาคารและโครงสร้างอื่น ๆ ที่ไม่จัดอยู่ในอาคารประเภทความสำคัญ I (น้อย) III (มาก) และ IV (สูงมาก)	II (ปกติ)	1.0
(๑) โรงมหรสพ หอประชุม ศาสนสถาน สนามกีฬา อัฒจันทร์ สถานีขนส่ง สถานีบริการ หรือท่าจอดเรือ ที่มีพื้นที่อาคารตั้งแต่หกร้อยตารางเมตรขึ้นไป (๒) หอศิลป์ พิพิธภัณฑ์สถาน หรือสถานศึกษา ที่มีพื้นที่อาคารตั้งแต่หนึ่งพันตารางเมตรขึ้นไป (๓) หอสมุด ที่มีพื้นที่อาคารตั้งแต่สองพันตารางเมตรขึ้นไป (๔) ตลาด ห้างสรรพสินค้า หรือศูนย์การค้า ที่มีพื้นที่อาคารตั้งแต่หนึ่งพันห้าร้อยตารางเมตรขึ้นไป (๕) สถานรับเลี้ยงเด็กอ่อน สถานให้บริการดูแลผู้สูงอายุ หรือสถานสงเคราะห์ผู้สูงอายุ ที่มีพื้นที่อาคารตั้งแต่สามร้อยตารางเมตรขึ้นไป (๖) สถานพยาบาลที่รับผู้ป่วยไว้ค้างคืนที่ไม่สามารถทำการรักษากรณีฉุกเฉินได้ (๗) เรือนจำตามกฎหมายว่าด้วยราชทัณฑ์ (๘) อาคารที่ทำการของส่วนราชการ รัฐวิสาหกิจ หรือหน่วยงานของรัฐ ที่จัดตั้งขึ้นตามกฎหมาย ที่มีพื้นที่สาธารณะตั้งแต่หนึ่งพันตารางเมตรขึ้นไป (๙) อาคารที่เป็นที่ชุมนุมในพื้นที่หนึ่ง ๆ ได้ตั้งแต่สามร้อยคนขึ้นไป (๑๐) อาคารประเภทอื่น ๆ ที่สามารถรองรับผู้มาใช้สอยอาคารได้ตั้งแต่ห้าพันคนขึ้นไป	III (มาก)	1.25
(๑) อาคารที่จำเป็นต้องการช่วยเหลือและบรรเทาภัยหลังเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว ได้แก่ สถานพยาบาลที่รับผู้ป่วยไว้ค้างคืนที่สามารถทำการรักษากรณีฉุกเฉินได้ สถานีดับเพลิง อาคารศูนย์บรรเทาสาธารณภัย อาคารศูนย์สื่อสาร ทำอวกาศยาน โรงไฟฟ้า หรือโรงผลิตและเก็บน้ำประปา (๒) คลังสินค้าที่ใช้เป็นสถานที่เก็บรักษาวัตถุอันตรายตามกฎหมายว่าด้วยวัตถุอันตราย ประเภทวัตถุระเบิด วัตถุไวไฟ วัตถุมีพิษ หรือวัตถุกัมมันตรังสี	IV (สูงมาก)	1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4. การจำแนกระบบโครงสร้างและข้อจำกัด

ระบบต้านแรงด้านข้างและระบบรับน้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้งของโครงสร้างอาคารอาจเป็นระบบใดระบบหนึ่งที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2.3 หรือเป็นระบบผสมที่ได้จากการรวมระบบโครงสร้างหลายแบบ ระบบโครงสร้างที่สามารถเลือกใช้ได้จะขึ้นกับประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว ตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 2.3 ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (Response Modification Factor, R) และตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (System Over strength Factor, Ω_0) ของระบบ โครงสร้างแต่ละแบบให้เป็นไปตามที่กำหนดในตารางที่ 2.3 ค่าตัวประกอบเหล่านี้จะนำไปใช้ในการ คำนวณหาค่าแรงเฉือนที่ฐาน (Base Shear) แรงในองค์อาคาร เพื่อการออกแบบ (Element Design Force) และการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ด้านข้างระหว่างชั้น (Story Drift) ระบบโครงสร้างที่ เลือกใช้จะต้องได้รับการออกแบบและกำหนดรายละเอียดของโครงสร้าง (Detailing) ให้เป็นไปตาม ข้อกำหนดในมาตรฐานอ้างอิงที่เกี่ยวข้องและข้อกำหนดเพิ่มเติมตามที่ระบุในมาตรฐานฉบับนี้

ในกรณีที่วิศวกรผู้ออกแบบต้องการเลือกใช้ระบบโครงสร้างแบบอื่นที่มีได้มีระบุไว้ในตารางที่ 2.3 จะต้องดำเนินการพิสูจน์ด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างและการทดสอบตัวอย่างโครงสร้างในห้องปฏิบัติการ เพื่อแสดงให้เห็นว่าระบบโครงสร้างนั้น ๆ มีพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ความสามารถในการต้านทานแรงทางด้านข้างและความสามารถในการสลายพลังงานเทียบเท่าระบบโครงสร้างแบบใดแบบหนึ่งในตารางที่ 2.3 ที่มีค่าตัวประกอบ R , และ C_d เท่าเทียมกันกับระบบที่เลือกใช้

ตารางที่ 2.3 ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (Response Modification Factor, R) ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (System Over strength Factor, Ω_0) และ ตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (Deflection Amplification Factor, C_d)

ระบบโครงสร้าง โดยรวม	ระบบต้านแรงด้านข้าง	ค่าตัวประกอบ		ประเภทการ ออกแบบ ต้านทานแรง แผ่นดินไหว		
		R	Ω_0	ข	ค	ง
๑. ระบบกำแพงรับ น้ำหนักบรรทุก แนวตั้ง (Bearing Wall System)	กำแพงรับแรงเฉือนแบบธรรมดา (Ordinary Reinforced Concrete Shear Wall)	๕	๒.๕	✓	✓	*
	กำแพงรับแรงเฉือนแบบที่มีการให้รายละเอียดพิเศษ (Special Reinforced Concrete Shear Wall)	๕	๒.๕	✓	✓	✓
	กำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จแบบธรรมดา (Ordinary Precast Shear Wall)	๓	๒.๕	✓	X	X
	กำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จแบบที่มีการให้ รายละเอียดความเหนียวปานกลาง (Intermediate Precast Shear Wall)	๕	๒.๕	✓	✓	X
๒. ระบบโครงสร้าง (Building Frame System)	โครงแกนเหล็กแบบเยื้องศูนย์กลางที่ใช้จุดต่อแบบรับ แรงดัดได้ (Steel Eccentrically Braced Frame with Moment-Resisting Connections)	๘	๒	✓	✓	✓
	โครงแกนเหล็กแบบเยื้องศูนย์กลางที่ใช้จุดต่อแบบรับ แรงเฉือน (Steel Eccentrically Braced Frame with Non- Moment-Resisting Connections)	๗	๒	✓	✓	✓
	โครงแกนเหล็กแบบตรงศูนย์กลางแบบให้รายละเอียด พิเศษ (Special Steel Concentric Braced Frame)	๖	๒	✓	✓	✓
	โครงแกนเหล็กแบบตรงศูนย์กลางแบบธรรมดา (Ordinary Steel Concentric Braced Frame)	๓.๕	๒	✓	✓	X
	กำแพงรับแรงเฉือนแบบที่มีการให้รายละเอียดพิเศษ (Special Reinforced Concrete Shear Wall)	๖	๒.๕	✓	✓	✓
	กำแพงรับแรงเฉือนแบบธรรมดา (Ordinary Reinforced Concrete Shear Wall)	๕	๒.๕	✓	✓	*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน (Response Modification Factor, R) ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (System Over strength Factor, Ω_0) และ ตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (Deflection Amplification Factor, C_d) (ต่อ)

ระบบโครงสร้างโดยรวม	ระบบต้านแรงด้านข้าง	ค่าตัวประกอบ		ประเภทการออกแบบด้านทานแรงแผ่นดินไหว		
		R	Ω_0	ข	ค	ง
๒. ระบบโครงอาคาร (Building Frame System) (ต่อ)	กำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จแบบธรรมดา (Ordinary Precast Shear Wall)	๕	๒.๕	√	X	X
	กำแพงรับแรงเฉือนหล่อสำเร็จแบบที่มีการให้รายละเอียดความเหนียวปานกลาง (Intermediate Precast Shear Wall)	๕	๒.๕	√	√	X
๓. ระบบโครงต้านแรงดัด (Moment Resisting Frame)	โครงต้านแรงดัดเหล็กที่มีความเหนียวพิเศษ (Ductile/ Special Steel Moment-Resisting Frame)	๘	๓	√	√	√
	โครงถักต้านแรงดัดที่มีการให้รายละเอียดความเหนียวเป็นพิเศษ (Special Truss Moment Resisting Frame)	๗	๓	√	√	√
	โครงต้านแรงดัดเหล็กที่มีความเหนียวปานกลาง (Intermediate Steel Moment Resisting Frame)	๕.๕	๓	√	√	*
	โครงต้านแรงดัดเหล็กธรรมดา (Ordinary Steel Moment Resisting Frame)	๓.๕	๓	√	√	X
	โครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวพิเศษ (แบบหล่อในที่ หรือ แบบหล่อสำเร็จ) (Precast or Cast-in-Place Ductile/ Special Reinforced Concrete Moment Resisting Frame)	๘	๓	√	√	√
	โครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเหนียวปานกลาง	๕	๓	√	√	*
โครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบธรรมดา (Ordinary Reinforced Concrete Moment Resisting Frame)	๓	๓	√	X	X	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน (Response Modification Factor, R) ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (System Over strength Factor, Ω_0) และ ตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (Deflection Amplification Factor, C_d) (ต่อ)

ระบบโครงสร้างโดยรวม	ระบบต้านแรงด้านข้าง	ค่าตัวประกอบ		ประเภทการออกแบบด้านทานแรงแผ่นดินไหว		
		R	Ω_0	ข	ค	ง
๔. ระบบโครงสร้างแบบผสมที่มีโครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวที่สามารถต้านทานแรงด้านข้างไม่น้อยกว่าร้อยละ ๒๕ ของแรงที่กระทำกับอาคารทั้งหมด (Dual System with Ductile/Special Moment Resisting Frame)	ร่วมกับโครงแกนเหล็กแบบตรงศูนย์แบบพิเศษ (Special Steel Centrally Braced Frame)	๗	๒.๕	√	√	√
	ร่วมกับโครงแกนเหล็กแบบเยื้องศูนย์ (Steel Eccentrically Braced Frame)	๘	๒.๕	√	√	√
	ร่วมกับกำแพงรับแรงเฉือนแบบที่มีการให้รายละเอียดพิเศษ (Special Reinforced Concrete Shear Wall)	๗	๒.๕	√	√	√
	ร่วมกับกำแพงรับแรงเฉือนแบบธรรมดา (Ordinary Reinforced Concrete Shear Wall)	๖	๒.๕	√	√	*
๕. ระบบโครงสร้างแบบผสมที่มีโครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวปานกลางหรือความเหนียวจำกัดที่สามารถต้านทานแรงด้านข้างไม่น้อยกว่าร้อยละ ๒๕ ของแรงที่กระทำกับอาคารทั้งหมด (Dual System with Moment Resisting Frame with Limited Ductility / Dual System with Intermediate Moment Resisting Frame)	ร่วมกับโครงแกนเหล็กแบบตรงศูนย์แบบพิเศษ (Special Steel Centrally Braced Frame)	๖	๒.๕	√	√	X
	ร่วมกับกำแพงรับแรงเฉือนแบบที่มีการให้รายละเอียดพิเศษ (Special Reinforced Concrete Shear Wall)	๖.๕	๒.๕	√	√	√
	ร่วมกับกำแพงรับแรงเฉือนแบบธรรมดา (Ordinary Reinforced Concrete Shear Wall)	๕.๕	๒.๕	√	√	*

เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ค่าตัวประกอบปรับผลตอบแทน (Response Modification Factor, R) ตัวประกอบกำลังส่วนเกิน (System Over strength Factor, Ω_0) และ ตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (Deflection Amplification Factor, C_d) (ต่อ)

ระบบโครงสร้างโดยรวม	ระบบต้านแรงด้านข้าง	ค่าตัวประกอบ		ประเภทการออกแบบด้านทานแรงแผ่นดินไหว		
		R	Ω_0	ช	ค	ง
๖. ระบบปฏิสัมพันธ์ (Shear Wall Frame Interactive System)	ระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างกำแพงรับแรงเฉือนและโครงสร้างดัดแบบธรรมดาที่ไม่มีการให้รายละเอียดความเหนียว (Shear Wall Frame Interactive System with Ordinary Reinforced Concrete Moment Frame and Ordinary Concrete Shear Wall)	๔.๕	๒.๕	√	X	X
๗. ระบบโครงสร้างเหล็กที่ไม่มีการให้รายละเอียดสำหรับรับแรงแผ่นดินไหว (Steel Systems Not Specifically Detailed for Seismic Resistance)	ระบบโครงสร้างเหล็กที่ไม่มีการให้รายละเอียดสำหรับรับแรงแผ่นดินไหว	๓	๓	√	√	X

หมายเหตุ ๑) √ = ใช้ได้ X = ห้ามใช้

2.2.5. การเคลื่อนที่ตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นและการโก่งตัวของโครงสร้าง

2.2.5.1. การเคลื่อนที่ตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นที่ยอมให้

การเคลื่อนที่ตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากแผ่นดินไหวสำหรับออกแบบ (Design Story Drift, Δ) ที่คำนวณได้จากวิธีแรงสถิตเทียบเท่าหรือวิธีพลศาสตร์จะต้องมีค่าไม่เกินค่าที่ยอมให้ (Allowable Story Drift) ในกรณีที่อาคารมีการปิดตัวรอบแกนตั้งอย่างชัดเจน เมื่อถูกแรง แผ่นดินไหวกระทำ การคำนวณค่าการเคลื่อนที่ตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นนี้ จะต้องรวมผลของการปิดตัวของ อาคารไปด้วย

ในกรณีที่อาคารมีประเภทการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวแบบ ค หรือ ง และมีความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงโครงสร้างในแนวราบแบบ 1ก หรือ 1ข ค่า Δ จะเป็นค่าการเคลื่อนที่ตัวสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น ณ ขอบด้านใดด้านหนึ่งของอาคาร ณ ชั้นที่พิจารณาที่มีค่ามากที่สุด

องค์อาคารของระบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีใช้ส่วนหนึ่งของระบบโครงสร้างต้าน แรงแผ่นดินไหวจะต้องได้รับการออกแบบให้เป็นไปตามข้อกำหนด ของมาตรฐาน ACI1318
หมายเหตุ

1. H_{sx} คือความสูงระหว่างชั้นที่อยู่ใต้พื้นชั้นที่ x
2. อาคารชั้นเดียวที่มีผนังภายใน ฉากกั้นห้อง ฝ้าเพดาน และผนังภายนอกที่ถูกออกแบบให้สามารถทนต่อการเคลื่อนที่ตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นได้มาก จะมีการเคลื่อนที่ตัวสัมพันธ์ระหว่างชั้นเท่าใดก็ได้ไม่จำกัด แต่ยังคงต้องพิจารณาการเว้นระยะห่างระหว่างโครงสร้าง
3. โครงสร้างกำแพงอิฐก่อรับแรงเฉือนแบบยื่นจากฐานรองรับ หมายถึง อาคารที่ถูกออกแบบให้ใช้กำแพงอิฐก่อรับแรงเฉือนเป็นชิ้นส่วนโครงสร้างในแนวตั้งซึ่งยื่นขึ้นมาจากฐานรองรับ และถูกก่อสร้างในลักษณะที่มีถ่ายโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนระหว่างกำแพงข้างเคียง (แบบ Coupling Beam) น้อยมาก

2.2.5.2. การเคลื่อนที่ตัวของอาคารเมื่อรับแรงแผ่นดินไหว

ตามมาตรฐานการออกแบบอาคารสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือความสามารถในการรับแรงของอาคาร โดยที่อาคารนั้นจะต้องมีการเคลื่อนที่ไม่น้อยกว่าค่าที่ยอมให้มาตรฐาน มยผ. 1302-52 ระบุว่าค่าการเคลื่อนที่ตัวสัมพันธ์ที่แต่ละชั้นของอาคาร δ_x สามารถหาได้จากสมการข้างล่างนี้

$$\delta_x = C_d \delta_{xe} / I \quad (\text{สมการที่ 2.1})$$

โดยที่ C_d คือ ตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัวดังแสดงในตารางที่ 2.3

δ_{xe} คือ ค่าการเคลื่อนที่ที่จุดศูนย์กลางมวลที่ชั้น x เนื่องจากแรงสถิตย์
เทียบเท่าที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างสำหรับระบบอิลาสติก

I คือ ตัวประกอบความสำคัญของอาคาร

2.3. การเสริมกำลังต้านแรงแผ่นดินไหวด้วยองค์อาคารยึดรั้งใกรังโก่งเดาะ

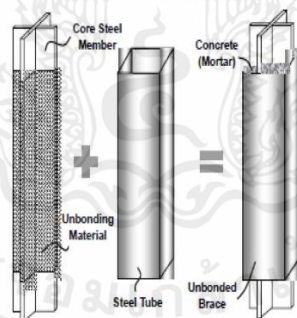
2.3.1. ส่วนประกอบและพฤติกรรมขององค์อาคารยึดรั้งใกรังโก่งเดาะ

จากงานวิจัยเรื่อง Buckling-Restrained Brace: History, Design and Applications โดย Toru Takeuchi (2015)

2.3.1.1. ส่วนประกอบขององค์อาคารยึดรั้งใกรังโก่งเดาะ

BRB หรือ Buckling-restrained Braces (องค์อาคารรั้งยึดใกรังโก่งเดาะ) เป็นวัสดุที่ประกอบด้วย

1. Core หรือ แกนกลางเหล็ก ไว้สำหรับต้านทานแรงในแนวแกน ซึ่งหน้าตัดแกนกลางจะมีขนาดเล็กกว่าค้ำยันปกติทั่วไป แกนกลางแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือตรงกลางที่ใช้รับการ yield และปลายทั้งสองไว้สำหรับยึด
2. Unbonding layer เป็นส่วนที่แยก core กับ casing ออกจากกัน เพื่อให้เหล็กภายในรับกำลังได้อย่างเต็มที่
3. Casing ช่วงป้องกันไม่ให้ชิ้นส่วนภายในเกิดการโก่งเดาะ สามารถใช้ concrete, composite members หรือ steel members

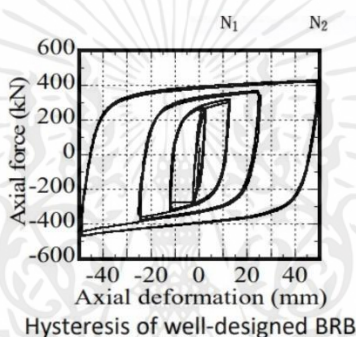


รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของ BRB [11]

2.3.1.2. พฤติกรรมขององค์อาคารยึดรั้งการโก่งเดาะ

ระหว่างรอบการดึงและรอบการอัด องค์อาคารยึดรั้งการโก่งเดาะมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูป (force-deformation curve) ที่มีเสถียรภาพ ในขณะที่การค้ำยันแบบตรงแนวศูนย์ของชิ้นส่วนโครงสร้างทำงานได้ดีระหว่างรอบการดึง แต่ระหว่างรอบการอัดจะโก่งงอ พฤติกรรมนี้เรียกว่า ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

พฤติกรรมในการรับแรงของ BRB คือแกนเหล็กจะเป็นตัวหลักในการรับแรงในแนวแกน โดย unbonding layer จะเข้ามาเสริมให้เหล็กภายในเคลื่อนตัวได้อย่างอิสระ และเปลือกหุ้มภายนอกคอยกั้นกันโก่งเดาะ BRB จึงคงกำลังของวัสดุไว้ได้



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูป (force-deformation curve)[17]

2.3.2. การออกแบบองค์อาคารยึดรั้งการโก่งเดาะ

จากงานวิจัยเรื่อง SEISMIC RETROFITTING OF LOW-RISE NONDUCTILE REINFORCED CONCRETE BUILDINGS BY BUCKLING-RESTRAINED BRACES ของ E.Yooprasertchai และ P.Warnitchai (2008)

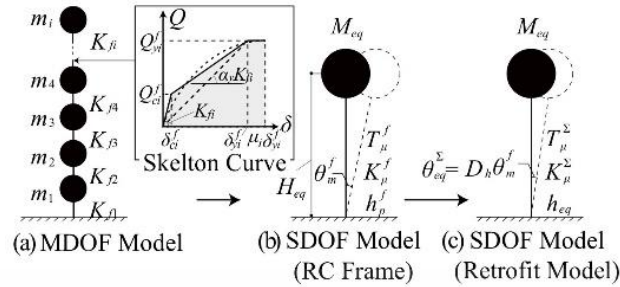
แกนเหล็กควรได้รับการออกแบบให้ต้านทานแรงตามแนวแกนทั้งหมดในเหล็กค้ำยัน แรงตามแนวแกนที่จุดคราก (The yield axial load), P_y สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P_y = F_y A_{sc} \quad (2.2)$$

โดยที่ F_y = actual yield stress และ A_{sc} = net area of steel core

การโก่งตัวของแกนเหล็กจะถูกจำกัดด้วย grout mortar ในปลอกเหล็ก กำลังโก่งงอของการผสมผสานระหว่าง grout mortar และปลอกเหล็ก P_c สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$P_c = \frac{\pi^2 EI_{CS}}{(kL)^2} \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.5 Conversion of SDOF model[18]

Equivalent height H_{eq} และ equivalent mass M_{eq} ถูกหาโดยพิจารณาเฉพาะโหมดที่ 1 เท่านั้น

$$H_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \cdot s_i \cdot H_i}{\sum_{i=1}^N m_i \cdot s_i} \quad (2.4)$$

$$M_{eq} = \frac{\left(\sum_{i=1}^N m_i \cdot s_i\right)^2}{\sum_{i=1}^N m_i \cdot s_i} \quad (2.5)$$

เมื่อ s_i คือ elastic mode หรือ mode shape ของชั้น i สำหรับ mode shape ที่ s secant stiffness ของแบบจำลอง SDOF สำหรับ target displacement, K_{μ}^f หาได้จากสมการ

$$K_{\mu}^f = M_{eq} \left(2\pi/T_{\mu}^f\right)^2 \quad (2.6)$$

Equivalent period T_{μ}^f หาได้จากสมการ

$$T_{\mu}^f = \sqrt{\mu/\alpha_y} \cdot T_f \quad (2.7)$$

โดยใช้ natural period ของแบบจำลอง MDOF T_f and μ

2.3.2.3. Evaluation of Damping of Structural System

พลังงาน hysteresis ของโครงคอนกรีตเสริมเหล็ก E_p^f ถูกประมาณโดยการพิจารณา hysteresis loop สำหรับการเคลื่อนตัวที่เป็นเป้าหมายของการติดตั้งเพิ่มเติม

$$E_p^f = \begin{cases} 2K_f (\mu \delta_y^f)^2 \frac{p\mu_c(1-p)}{\mu_c + p\mu} & (\mu_c < \mu \leq 1) \\ 2K_f (\mu \delta_y^f)^2 \left[p - \frac{p^2(1+\mu_c)\mu^\lambda}{\mu_c + p\mu} \right] & (\mu > 1) \end{cases} \quad (2.8a)$$

$$(2.8b)$$

พฤติกรรม hysteresis ของ damper และ เฟรม elastic ถูกพิจารณาด้วยเหมือนกัน

พลังงาน hysteresis ของ damper อย่างเดียว E_p^d และ พลังงาน hysteresis ของ damper และเฟรม elastic E_p^{add} มีค่าเท่ากัน สามารถหาได้จากสมการ

$$E_p^{add} = E_p^d = 4K_d (\mu_d - 1) (\delta_y^d)^2 \quad (2.9)$$

ในสมการข้างต้น K_d , δ_y^d , μ_d คือ stiffness, yielding displacement and ductility factor of dampers ตามลำดับ อัตราส่วนระหว่าง stiffness ของ เฟรม elastic และ stiffness ของ damper $\gamma_s = K_s f / K_d$ คือพารามิเตอร์ที่สำคัญของบทความนี้ Equivalent elastic strain energy ของระบบโครงสร้างทั้งหมด $E_e^f + E_e^d$ สามารถคำนวณได้โดยสมการ

$$E_e^f + E_e^d = \begin{cases} \frac{1}{2} K_f (\mu \delta_y^f)^2 \left((1 + \gamma_s) \frac{K_d}{K_f} + p \right) & \left(\mu_c < \mu \leq \frac{\delta_y^d}{\delta_y^f} \right) \\ \frac{1}{2} K_f (\mu \delta_y^f)^2 \left((1/\mu_d + \gamma_s) \frac{K_d}{K_f} + p \right) & \left(\frac{\delta_y^d}{\delta_y^f} < \mu \right) \end{cases} \quad (2.10a)$$

$$(2.10b)$$

อัตราส่วน equivalent damping ของชุดติดตั้งเพิ่มเติมแบบจำลอง RC หาได้จากสมการ

$$h_{eq}^f = \frac{E_p^f + E_p^d}{4\pi(E_e^f + E_e^d)} + h_0^f \quad (2.11)$$

เมื่อ h_0^f คือ ตัวหน่วงของโครงสร้างธรรมชาติ inherent structural damping สมมติให้เป็น 0.03

อย่างไรก็ตาม โครงสร้างแสดงฮิสเทรีซิสจำนวนมากที่มีแอมพลิจูดไม่แน่นอนในระหว่างการกระตุ้นแผ่นดินไหวแบบสุ่ม Newmark และ Rosenbluth ได้เสนอแนวคิดการหน่วงเฉลี่ยซึ่งประเมินค่าเฉลี่ย การหน่วงสำหรับช่วงที่ครอบคลุมตั้งแต่ 0 ถึงแอมพลิจูดสูงสุด จากผลการศึกษาเชิงตัวเลข reduction factor ที่ปลอดภัย $R=0.6$

อัตราส่วน equivalent damping ของโครง RC h_p^f หาได้จากสมการ

$$h_p^f = \frac{E_p^f}{4\pi E_e^f} \cdot R + h_0^f \quad (2.12)$$

อัตราส่วน equivalent damping ของชุดติดตั้งเพิ่มเติมแบบจำลอง RC หาค่าได้จากสมการ

$$h_{eq} = \frac{E_p^f + E_p^d}{4\pi(E_c^f + E_c^d)} \cdot R + h_0^f \quad (2.13)$$

2.3.2.4. Evaluation of Max Displacement by Response Spectrum

มุมการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดของโครง RC θ_{μ}^f หาค่าได้โดย displacement response spectrum

พิจารณา damping ratio h_p^f และ secant natural period สำหรับการเคลื่อนตัวเป้าหมาย T_{μ}^f , ค่าสัมประสิทธิ์ตอบสนอง reduction D_h แสดงในสมการ

$$D_h = \frac{T_{\mu}^{\Sigma}}{T_{\mu}^f} \sqrt{\frac{1 + ah_p^f}{1 + ah_{eq}^f}} \quad (2.14)$$

เมื่อ T_{μ}^{Σ} คือ secant natural period ของชุดติดตั้งเพิ่มเติมโครง RC ซึ่งสามารถได้มาจากสมการที่ 11, ค่าสัมประสิทธิ์ a ถูกเสนอให้มีค่า $a=25$ (คลื่นแผ่นดินไหวจากการสังเกต), $a=75$ (คลื่นแผ่นดินไหวเทียม) ในบทความนี้จะใช้เป็นคลื่นแผ่นดินไหวเทียม อย่างไรก็ตาม a ถูกนิยามให้เป็น 25 สำหรับการพิจารณาการตอบสนองที่ไม่เสถียรของโครงสร้าง RC เมื่อเทียบกับโครงสร้างเหล็ก มุมการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดของระบบโครงสร้างทั้งหมด θ_{eq}^{Σ} หาได้จาก

$$\theta_{eq}^{\Sigma} = \theta_{\mu}^f D_h \quad (2.15)$$

$$\frac{T_{\mu}^{\Sigma}}{T_{\mu}^f} = \sqrt{\frac{K_{\mu}^f}{K_{\mu}^{\Sigma}}} = \sqrt{p / \left(p + r_d \left(\gamma_s + \frac{1}{\mu_d} \right) \right)} \quad (2.16)$$

2.3.2.5. Evaluation of the Amount of Damper

Damper stiffness ที่ทำให้ได้ target displacement ตามความต้องการถูกคำนวณตามเงื่อนไข

$$\theta_{eq}^{\Sigma} = \theta_{tar}^{\Sigma}$$

สมการที่ 2.17 ได้มาจากการแทนสมการที่ 2.16 ลงในสมการที่ 2.14 และ 2.15

$$p(1 + ah_p^f) \left(\frac{\theta_m^f}{\theta_{tar}^{\Sigma}} \right)^2 = \left(p + r_d \left(\gamma_s + \frac{1}{\mu_d} \right) \right) (1 + ah_{eq}^f) \quad (2.17)$$

ท้ายที่สุด r_d หรืออัตราส่วน ระหว่าง stiffness ของ damper และ เฟรม RC, $r_d = K_d/K_f$ สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2.18 ซึ่งได้จากการแทนสมการที่ 2.12 และ 2.13 ในสมการที่ 2.17

$$r_d = \frac{p \left(\left(\frac{\theta_m^f}{\theta_{tar}^\Sigma} \right)^2 - 1 \right) \left(1 + a \left(h_0^f + \frac{1}{\pi} \cdot \frac{p\mu + \mu_c - p\mu^\lambda (1 + \mu_c)}{p\mu + \mu_c} \cdot R \right) \right)}{(1 + ah_0^f) \left(\gamma_s + \frac{1}{\mu_d} \right) + \frac{2aR}{\pi\mu_d} \left(1 - \frac{1}{\mu_d} \right)} \quad (2.18)$$

2.3.2.6. Damper Distribution for Multi Story RC Buildings

สมการของการกระจายตัวหน้าสำหรับอาคาร RC หลายชั้น เมื่อสมการนี้ถูกกำหนด secant stiffness สำหรับ displacement เป้าหมาย ของชุดติดตั้งเพิ่มเติมถูกพิจารณาเป็น stiffness ของแต่ละชั้นของอาคาร RC หลายชั้น และเงื่อนไขต่อไปนี้จะถูกสันนิษฐานด้วย

a) อัตราส่วน equivalent damping ของระบบโครงสร้างทั้งหมดและเฟรม RC สำหรับ displacement เป้าหมายจะเหมือนกันระหว่างแบบจำลอง SDOF และ แบบจำลอง MDOF

b) ในโค้ดแผ่นดินไหวของญี่ปุ่น แรงเฉือนตาม stiffness distribution method ที่ชื่อว่า Ai method ได้ถูกนิยามขึ้น ภายใต้เงื่อนไขการกระจายแรงของ Ai มุมการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดของแต่ละชั้นเท่ากับกับมุมการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นของแบบจำลอง SDOF ที่เป็นเป้าหมาย θ_{tar}^Σ

c) Ductility factor ของตัวหน้า μ_{di} , Ductility factor ของโครง RC μ , อัตราส่วน stiffness ของตัวหน้าและเฟรม elastic γ_{si} บนแต่ละชั้นเหมือนกัน ($i < N$)

พิจารณาเงื่อนไข a) จะได้สมการที่ 2.19

$$\frac{\sum_{i=1}^N E_{pi}^d}{\sum_{i=1}^N (E_{ei}^f + E_{ei}^d)} = \frac{E_p^d}{E_e^f + E_e^d} \quad (2.19)$$

เมื่อแยกพารามิเตอร์แต่ละตัวในสมการที่ 2.19 จะได้สมการที่ 2.20

$$\frac{\sum_{i=1}^N [K_{di} (\mu_{di} - 1) (\theta_i h_i / \mu_{di})^2]}{\sum_{i=1}^N [(K_{\mu i}^f \mu_{di} + K_{di} + \gamma_{si} K_{di} \mu_{di}) (\theta_i h_i)^2]} = \frac{K_d (\mu_d - 1)}{(K_{\mu}^f \mu_d + K_d + \gamma_s K_d \mu_d) \mu_d^2} \quad (2.20)$$

พิจารณาเงื่อนไข b) c)

มุมการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดของแต่ละชั้น θ_i คือ θ , Ductility factor ของตัว
 ผนัง μ_{di} คือ μ_d และ Ductility factor ของโครง RC μ_i คือ μ แทนค่าความสัมพันธ์เหล่านี้ในสมการที่
 2.20 จะได้สมการที่ 2.21

$$\sum_{i=1}^N (K_{di} h_i^2) / \sum_{i=1}^N (K_{\mu i}^f h_i^2) = K_d / K_{\mu}^f \quad (2.21)$$

พิจารณาเงื่อนไข b)

สมการที่ 2.22 สมบูรณ์ เพราะ มุมการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นสูงสุดของแต่ละชั้นภายใต้
 แรงเฉือนตามการกระจาย A_i เหมือนกัน

$$\theta_{iar}^{\Sigma} = \frac{Q_i h_i}{(K_{\mu i}^f + (\gamma_s + 1/\mu_d) K_{di}) h_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i h_i)}{\sum_{i=1}^N \{(K_{\mu i}^f + (\gamma_s + 1/\mu_d) K_{di}) h_i^2\}} \quad (2.22)$$

ท้ายที่สุด stiffness ของตัวผนัง K_{di} ของชั้น i ของอาคาร RC หลายชั้น แสดงในสมการที่

2.23 ซึ่งได้จากการแทนสมการที่สมการที่ 2.22 เพื่อสมการที่ 2.21 สมการที่ 2.23 คือ damper
 stiffness บนชั้น i เพื่อตอบสนอง displacement เป้าหมายในการติดตั้งเพิ่มเติมจากแผ่นดินไหว

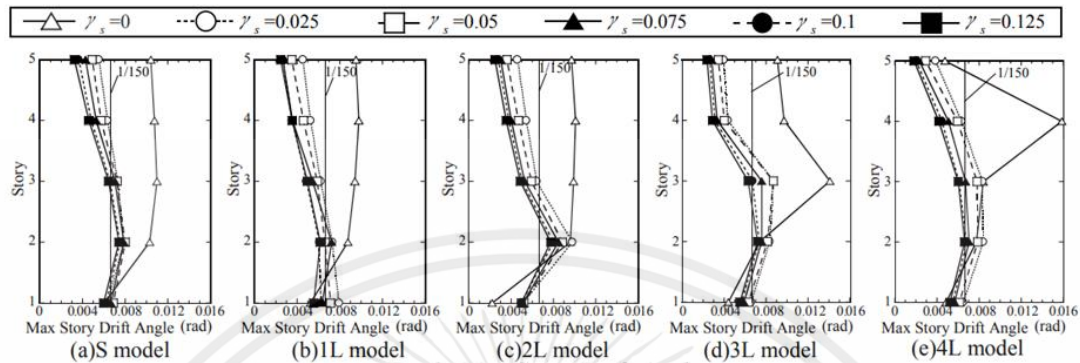
$$K_{di} = \frac{Q_i}{h_i} \frac{\sum_{i=1}^N (K_{\mu i}^f h_i^2)}{\sum_{i=1}^N (Q_i h_i)} \left(\frac{1}{\gamma_s + 1/\mu_d} + \frac{\mu}{\alpha_y} \cdot r_d \right) - \frac{K_{\mu i}^f}{\gamma_s + 1/\mu_d} \quad (2.23)$$

จากงานวิจัยข้างต้นได้ผลการทดสอบดังนี้

Max story drift angle

เมื่อ γ_s (อัตราส่วนระหว่าง stiffness ของ เฟอร์ม elastic และ stiffness ของ damper) เพิ่มขึ้น
 max story drift angle จะลดลง และ max story drift angle บนชั้นที่อ่อนจะได้รับการเคลื่อนตัว

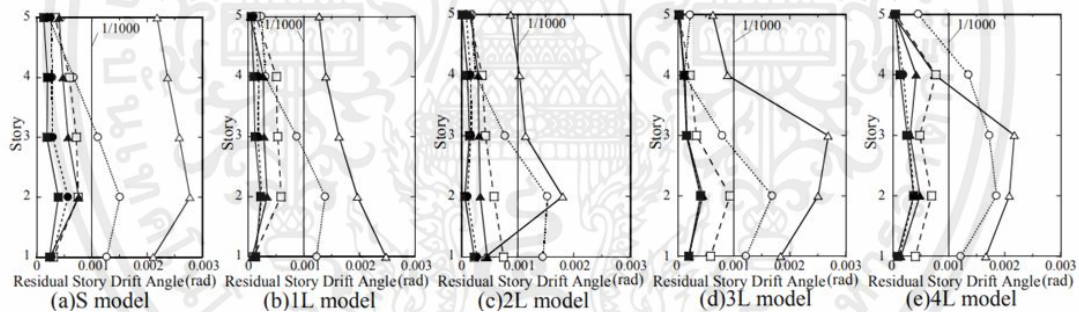
เป้าหมายประมาณ 1/150 เมื่อ γ_s มีค่าประมาณ 0.05 และเมื่อ γ_s มีค่าเกิน 0.1 การลดการตอบสนองไม่มีนัยสำคัญ



รูปที่ 2.6 Max Story Drift Angle[12]

Residual story drift angle

เมื่อ γ_s มีค่าเกิน 0.05~0.075, residual story drift angle จะต่ำกว่า 1/1000 รับรองความต่อเนื่องของอาคารที่ใช้ และสังเกตได้ว่าเมื่อ γ_s เพิ่มขึ้น residual story drift angle จะลดลง



รูปที่ 2.7 Residual Story Drift Angle[12]

จากการทบทวนงานวิจัยนี้ มีข้อจำกัดคือเป็นวิธีการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับระบบอาคารสูง 5 ชั้น และใช้ mode shape เพียงแค่ 1 โหมด แต่อาคารที่นำมาใช้ในโปรเจกของเรา เป็นอาคารสูง 36 ชั้นซึ่งอาจจะมีมากกว่า 1 โหมด พวกเราจึงจะนำวิธีนี้มาประยุกต์ใช้กับอาคารสูงเพื่อดูว่ามีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพหรือไม่ ถ้าไม่แล้วจะพัฒนาหรือปรับปรุงได้อย่างไร

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการ

3.1. รูปแบบการวิจัยหรือแบบแผนการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์และเปรียบเทียบพฤติกรรมของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความสูงขนาดกลางก่อนและหลังเสริมกำลังโดยองค์อาคารยึดรั้งไว้การโก่งเดาะ (Buckling Restrained Brace) เพื่อที่จะทำให้ผ่านมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง โดยศึกษาเปรียบเทียบจาก ระยะการเคลื่อนตัวของอาคาร เนื่องจากแรงแผ่นดินไหว กฎกระทรวงกำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคาร และพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2564

เมื่อ EQ_x คือ แรงแผ่นดินไหวในทิศทางแกน x โดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า

EQ_y คือ แรงแผ่นดินไหวในทิศทางแกน y โดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า

3.2. การรวบรวมข้อมูล

ทำการรวบรวมข้อมูลจากวิทยานิพนธ์ หนังสือ และเอกสารต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องโดยที่ได้ให้รายละเอียดไว้แล้วในบทที่ 2

3.3. เครื่องมือวิจัย

วิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างอาคารก่อนเสริมกำลัง และหลังเสริมกำลังด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า โดยวิธีการเสริมกำลังด้วยองค์อาคารยึดรั้งไว้การโก่งเดาะ

3.4. ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเสริมกำลังโดยการใช้อาคารยึดรั้งไว้การโก่งเดาะ
- 2) ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับกฎกระทรวงกำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคาร และพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2564
- 3) ศึกษาวิธีการใช้งานโปรแกรม ETABS
- 4) สร้างแบบจำลองอาคารอื้อจ้อเหลียง สูง 36 ชั้น โดยใช้โปรแกรม ETABS
- 5) ออกแบบเพื่อหาจำนวน Buckling Restrained Brace ที่ต้องใส่ในแต่ละชั้น
- 6) นำแบบจำลองอาคารมาเสริมกำลังต้านแรงแผ่นดินไหว
- 7) สรุปผลการศึกษา

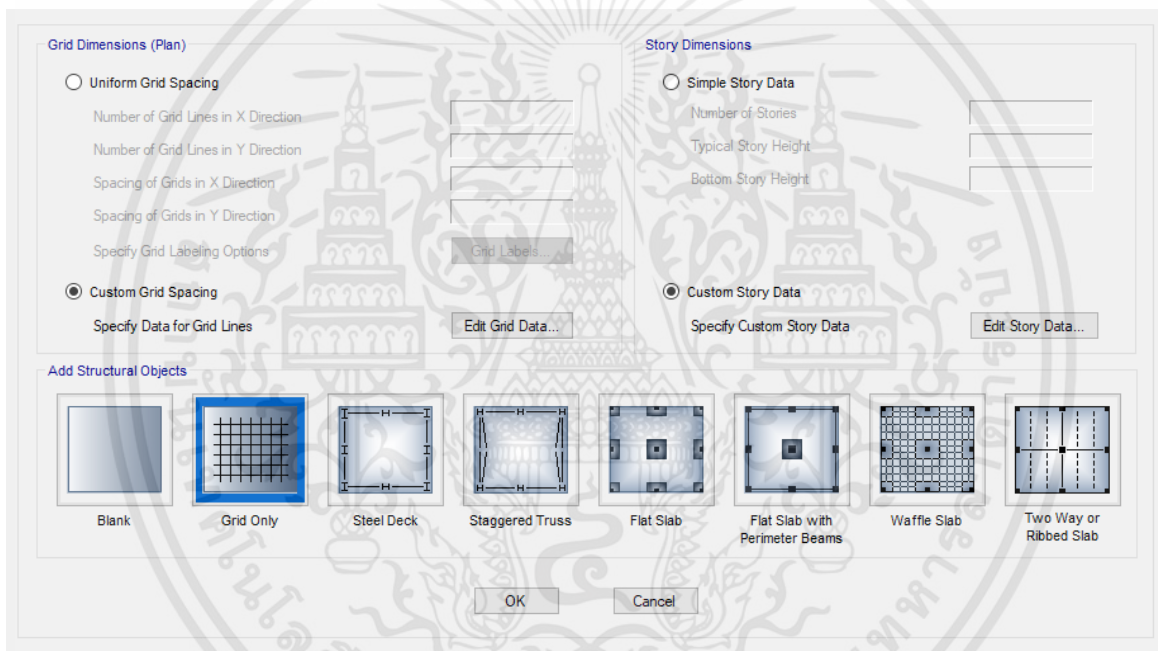
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5. การสร้างแบบจำลองอาคาร

3.5.1. ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม ETABS

การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม ETABS จะทำการจำลองโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 38 ชั้น และชั้นใต้ดิน 3 ชั้น (อาคารอื้อจื่อเหลียง)

- 1) เริ่มต้นโปรแกรม ETABS โดยการวางแผน Grid line จำนวนชั้นและความสูงของแต่ละชั้นตามแบบ



รูปที่ 3.1 วางแนว Grid line และจำนวนชั้นของแบบจำลอง

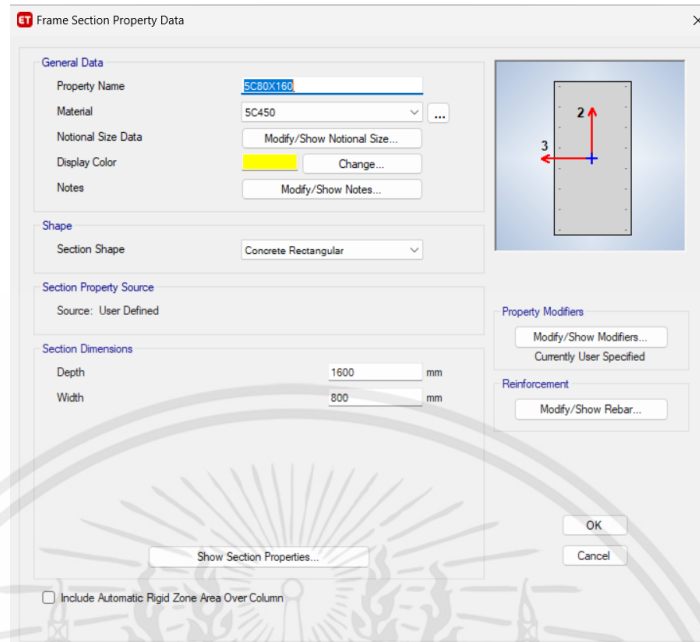
กำหนดคุณสมบัติของคอนกรีต 600, 450, และ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ โดยใช้คอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัด (f_c') เท่ากับ 600, 450, และ 320 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ (รูปทรงกระบอกที่อายุ 28 วัน ขนาด 0.15×0.30 m. โมดูลัสยืดหยุ่น ของคอนกรีต (E) เท่ากับ $15,200\sqrt{f_c'}$)

รูปที่ 3.2 กำหนดคุณสมบัติของคอนกรีต

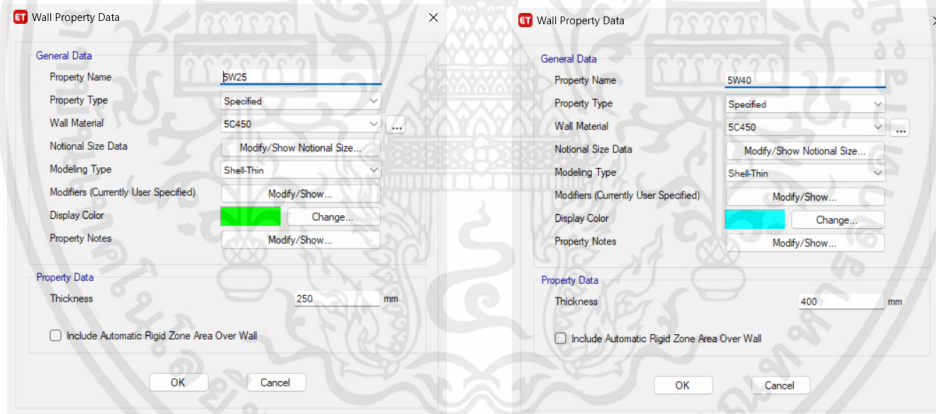
- 2) กำหนดขนาดหน้าตัดและคุณสมบัติของโครงสร้างต่าง ๆ ในอาคาร ได้แก่ เสา คาน ผนังรับแรงเฉือน และพื้น Post tension เป็นต้น โดยมีตัวอย่างดังต่อไปนี้

รูปที่ 3.3 กำหนดขนาดหน้าตัดและคุณสมบัติเสา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

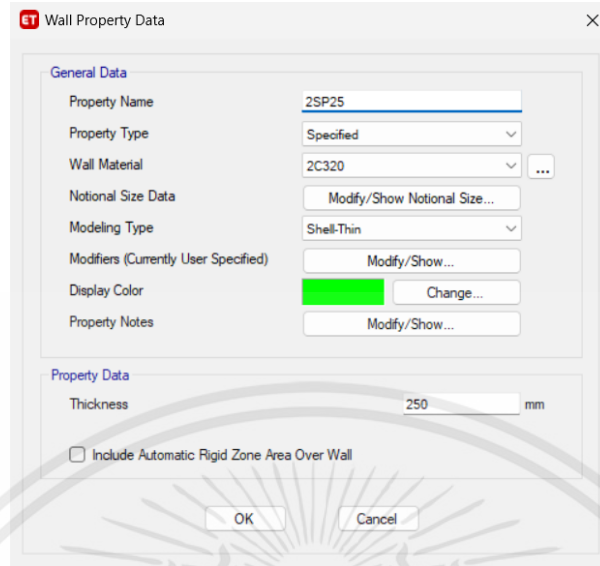


รูปที่ 3.4 กำหนดขนาดหน้าตัดและคุณสมบัติคาน



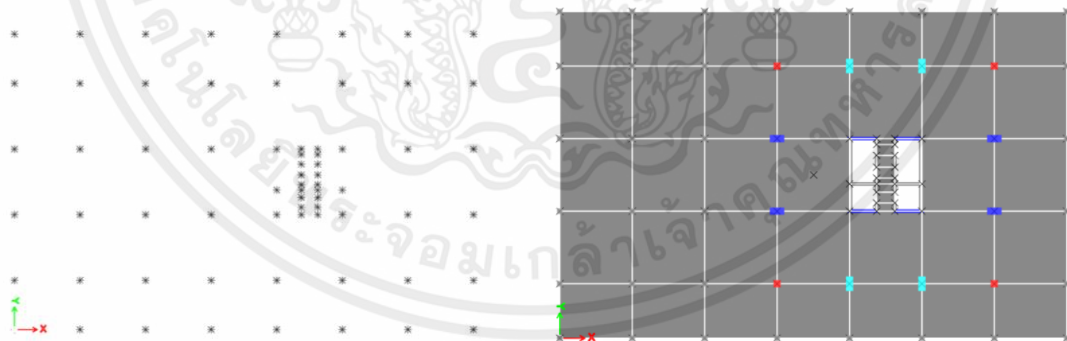
รูปที่ 3.5 กำหนดขนาดหน้าตัดและคุณสมบัติผนังรับแรงเฉือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



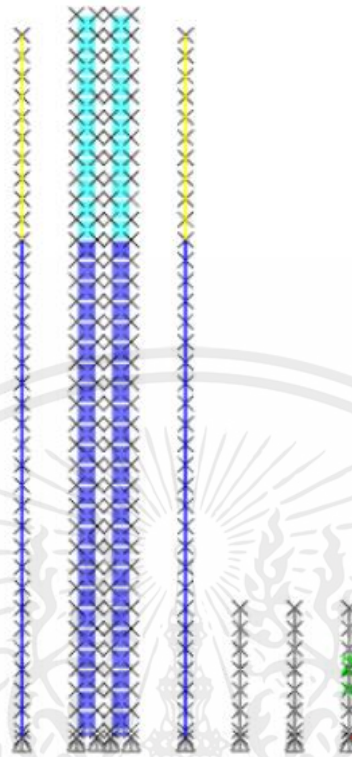
รูปที่ 3.6 กำหนดขนาดหน้าตัดและคุณสมบัติของแผ่นพื้น Post-Tension

หลังจากกำหนดขนาดหน้าตัดและคุณสมบัติต่าง ๆ แล้ว จากนั้นทำการสร้างแบบจำลอง โดยจะกำหนดจุดรองรับของแบบจำลองเป็นแบบยึดหมุน เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณแรงแผ่นดินไหวต่อไป



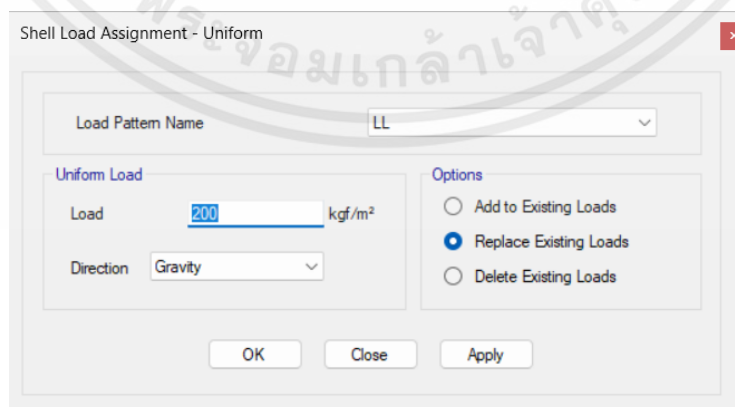
รูปที่ 3.7 แพลนแบบจำลองของโครงสร้าง เสา ผนังรับแรงเฉือนและพื้นชั้นที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 กำหนดจุดรองรับของแบบจำลองเป็นแบบยึดหมุน

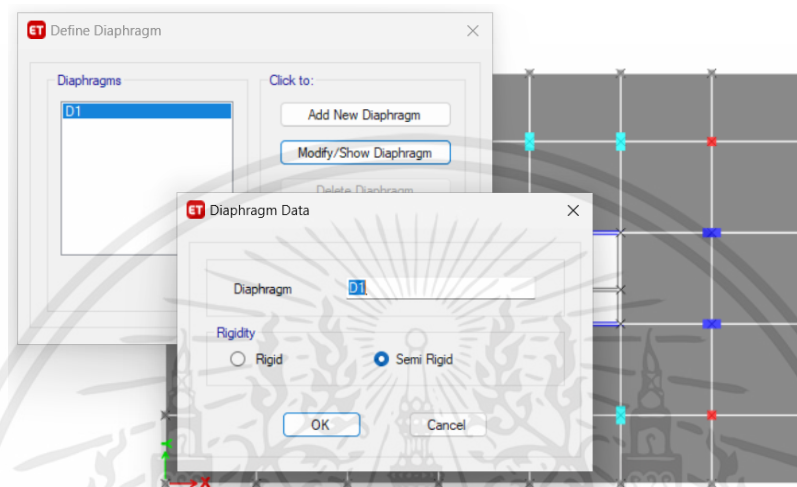
ทำการใส่น้ำหนักบรรทุก (Load) ที่พื้นของแต่ละชั้น โดยน้ำหนักบรรทุกคงที่เนื่องจากวัสดุตกแต่งและผนัง (SDL) เท่ากับ 300 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และน้ำหนักบรรทุกจร (LL) เท่ากับ 200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร



รูปที่ 3.9 กำหนดน้ำหนักบรรทุกจร (LL) เท่ากับ 200 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

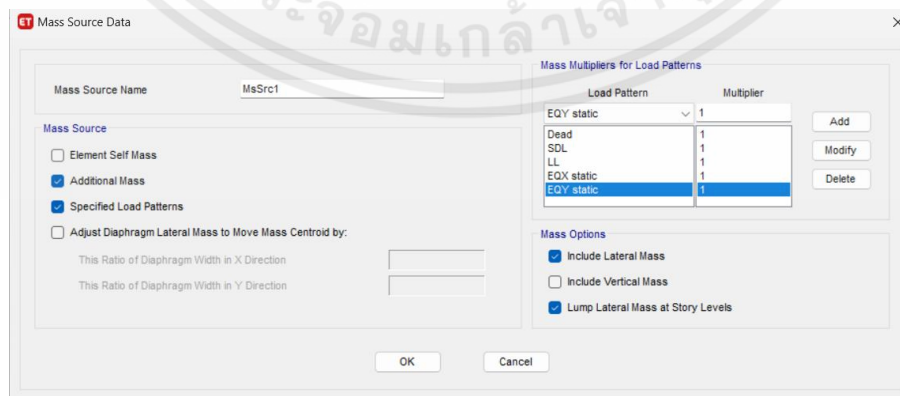
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้จุดศูนย์กลางของอาคารส่วน tower เป็นไดอะแฟรม (Diaphragm) D1 เพื่อส่งถ่ายแรงด้านข้าง และกำหนดให้ D1 เป็นไดอะแฟรมแข็ง (Rigid Diaphragm)



รูปที่ 3.10 กำหนด D1 เป็นไดอะแฟรมแข็ง (Rigid Diaphragm)

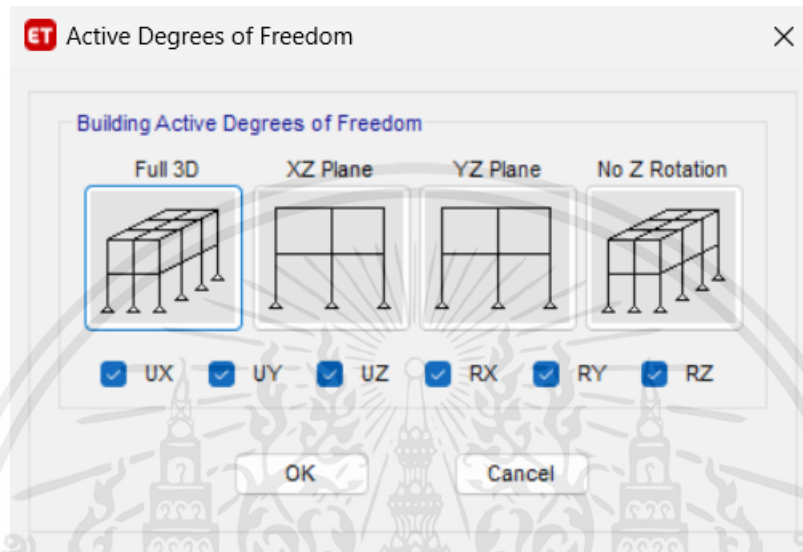
กำหนดค่าน้ำหนักสุทธิ (Mass Source) โดยใช้น้ำหนักบรรทุกทุกคงที่ (น้ำหนักโครงสร้าง) 100% น้ำหนักบรรทุกจร 100% น้ำหนักบรรทุกคงที่ (วัสดุตกแต่งและผนัง) 100% แรงแผ่นดินไหวในทิศทางแกน X โดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า 100% และแรงแผ่นดินไหวในทิศทางแกน Y โดยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า 100%



รูปที่ 3.11 กำหนดค่าน้ำหนักสุทธิ (Mass Source)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดรูปแบบการสั่นพื้นฐานของอาคารที่ 12 โหมด เมื่อกำหนดและป้อนข้อมูลทุกอย่างเสร็จเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการสังเคราะห์แบบจำลอง



รูปที่ 3.12 กำหนดรูปแบบการสั่นพื้นฐานของอาคาร

3.5.2. การคำนวณแรงแผ่นดินไหวโดยวิธีสถิตเทียบเท่า

ในส่วนของการวิเคราะห์โครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐานการออกแบบของอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว โดยพิจารณาจากแบบจำลองในโปรแกรม ETABS การคำนวณแรงแผ่นดินไหวเริ่มจากการหาแรงเฉือนที่ฐาน ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$V = C_s W \quad (3.1)$$

- โดยที่ C_s คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเร่งตอบสนอง คำนวณได้จาก $C_s = \frac{S_a I}{R}$
- S_a คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมบนพื้นดินสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร มีค่าเทียบเป็นสัดส่วนของค่าความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก
- I คือ ตัวประกอบความสำคัญของอาคาร
- R คือ ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง
- W คือ น้ำหนักทั้งหมดของอาคาร (kg)

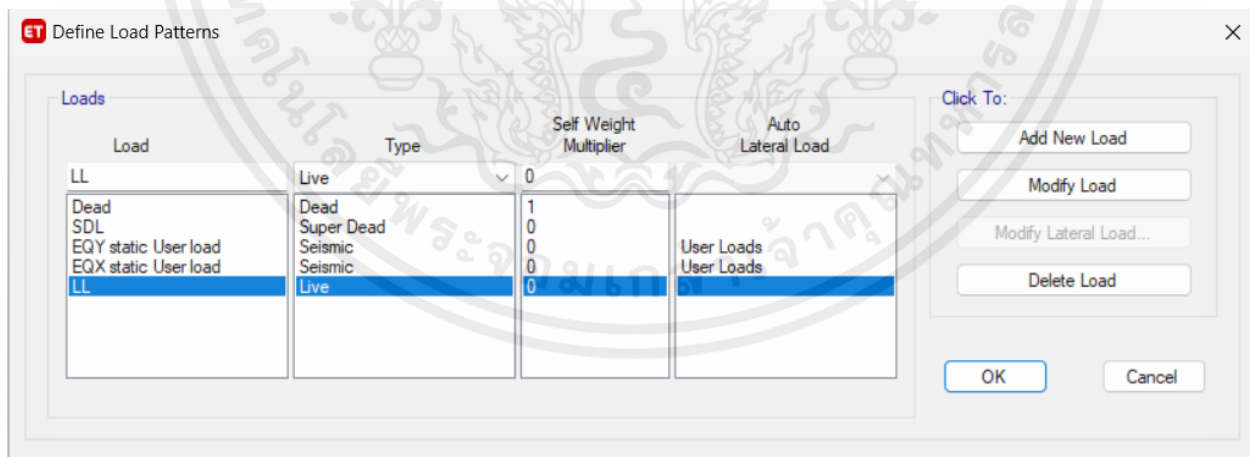
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นหาแรงกระทำในแต่ละชั้นจากสมการ

$$F_x = \frac{W_x H_x^k}{\sum_{i=1}^n W_i H_i^k} V \quad (3.2)$$

- โดยที่ W_x คือ น้ำหนักของพื้นที่ชั้น x (kg)
 H_x คือ ความสูงจากพื้นดินของชั้น x (m)
 k คือ ค่าตัวคูณลดกำลังมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ $T < 0.5$ s
 $1 + \frac{T-0.5}{2}$ เมื่อ $0.5 < T < 2.5$ s
 2 เมื่อ $T > 2.5$ s
 n คือ จำนวนชั้นทั้งหมด
 F_x คือ แรงที่กระทำในแต่ละชั้น x (kg)
 V คือ แรงเฉือนที่ฐาน (kg)

กำหนดแรงแผ่นดินไหวในทิศทางแกน Y (EQ_Y) และแรงแผ่นดินไหวในทิศทางแกน X (EQ_X) โดยทำการเลือกชนิดแรงแผ่นดินไหวเป็นแบบกำหนดเอง (User Loads) และทำการใส่ค่าแรงที่กระทำในแต่ละชั้น x (F_x) ที่คำนวณได้ไปใส่



รูปที่ 3.13 กำหนดกรณีและลักษณะของแรงแผ่นดินไหว

ST User Seismic Loads on Diaphragms

Number of Load Sets 1

Load Set 1 of 1

Story	Diaphragm	Fx tonf	Fy tonf	Mz tonf-m
Story36	D1	0	6.4626	0
Story35	D1	0	47.9042	0
Story34	D1	0	28.6357	0
Story33	D1	0	28.6357	0
Story32	D1	0	28.6357	0
Story31	D1	0	28.6357	0
Story30	D1	0	28.6357	0
Story29	D1	0	28.6357	0
Story28	D1	0	28.6357	0
Story27	D1	0	28.6357	0
Story26	D1	0	28.6357	0
Story25	D1	0	29.4158	0
Story24	D1	0	29.4158	0
Story23	D1	0	29.4158	0
Story22	D1	0	29.4158	0
Story21	D1	0	29.4158	0

1

Apply Load at Diaphragm Center of Mass Additional Eccentricity Ratio (all Diaphragms) 0.05

Sort Rows Add Row Delete Row(s)

OK Cancel

รูปที่ 3.14 ใส่ค่าแรงที่กระทำด้าน Y ในแต่ละชั้น

ST User Seismic Loads on Diaphragms

Number of Load Sets 1

Load Set 1 of 1

Story	Diaphragm	Fx tonf	Fy tonf	Mz tonf-m
Story36	D1	6.4626	0	0
Story35	D1	47.9042	0	0
Story34	D1	28.6357	0	0
Story33	D1	28.6357	0	0
Story32	D1	28.6357	0	0
Story31	D1	28.6357	0	0
Story30	D1	28.6357	0	0
Story29	D1	28.6357	0	0
Story28	D1	28.6357	0	0
Story27	D1	28.6357	0	0
Story26	D1	28.6357	0	0
Story25	D1	29.4158	0	0
Story24	D1	29.4158	0	0
Story23	D1	29.4158	0	0
Story22	D1	29.4158	0	0
Story21	D1	29.4158	0	0

1

Apply Load at Diaphragm Center of Mass Additional Eccentricity Ratio (all Diaphragms) 0.05

Sort Rows Add Row Delete Row(s)

OK Cancel

รูปที่ 3.15 ใส่ค่าแรงที่กระทำด้าน X ในแต่ละชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นกำหนดค่า Stiffness ที่สอดคล้องกับสภาพจริงจากค่าสั่ง Property Modification Factor โดยกำหนด Moment of Inertia ของหน้าตัดเสา เท่ากับ 0.7 คานเท่ากับ 0.35 ผนังรับแรงเฉือน เท่ากับ(ที่ไม่แตกร้า) 0.7 และแผ่นพื้นไร้คาน เท่ากับ 0.25 ดังแสดงในรูป

Property/Stiffness Modifiers for Analysis	
Cross-section (axial) Area	1
Shear Area in 2 direction	1
Shear Area in 3 direction	1
Torsional Constant	1
Moment of Inertia about 2 axis	0.7
Moment of Inertia about 3 axis	0.7
Mass	1
Weight	1

รูปที่ 3.16 กำหนดค่า Stiffness ประสิทธิภาพของเสา

Property/Stiffness Modifiers for Analysis	
Cross-section (axial) Area	1
Shear Area in 2 direction	1
Shear Area in 3 direction	1
Torsional Constant	1
Moment of Inertia about 2 axis	0.35
Moment of Inertia about 3 axis	0.35
Mass	1
Weight	1

รูปที่ 3.17 กำหนดค่า Stiffness ประสิทธิภาพของคาน

Property	Value
Membrane f11 Direction	1
Membrane f22 Direction	1
Membrane f12 Direction	1
Bending m11 Direction	0.7
Bending m22 Direction	0.7
Bending m12 Direction	0.7
Shear v13 Direction	1
Shear v23 Direction	1
Mass	1
Weight	1

รูปที่ 3.18 กำหนดค่า Stiffness ประสิทธิภาพของผนังรับแรงเฉือน

Property	Value
Membrane f11 Direction	1
Membrane f22 Direction	1
Membrane f12 Direction	1
Bending m11 Direction	0.25
Bending m22 Direction	0.25
Bending m12 Direction	0.25
Shear v13 Direction	1
Shear v23 Direction	1
Mass	1
Weight	1

รูปที่ 3.19 กำหนดค่า Stiffness ประสิทธิภาพของแผ่นพื้นไร้คาน

3.6. การเสริมกำลังของโครงสร้าง

3.6.1. วิธีการออกแบบ BRB

1) Simplification of RC building to single degree of freedom (ลดความซับซ้อนของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กให้เป็นแบบจำลองอย่างง่าย)

โดยคำนวณ Equivalent height (H_{eq}) , Equivalent mass (M_{eq}) และ Elastic lateral stiffness (K_f) จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \cdot u_i \cdot H_i}{\sum_{i=1}^N m_i \cdot u_i} \quad (3.3)$$

$$M_{eq} = \frac{(\sum_{i=1}^N m_i \cdot u_i)^2}{\sum_{i=1}^N m_i \cdot u_i^2} \quad (3.4)$$

$$K_f = \left(\frac{2\pi}{T_f}\right)^2 M_{eq} \quad (3.5)$$

โดยค่า	H_{eq}	คือ Equivalent height (m)
	M_{eq}	คือ Equivalent mass (kg)
	K_f	คือ Elastic lateral stiffness (kN/mm)
	m_i	คือ มวลสำหรับแต่ละชั้น i^{th} (kg)
	u_i	คือ Fundamental modal displacement สำหรับแต่ละชั้น i^{th} (m)
	H_i	คือ ความสูงสำหรับแต่ละชั้น i^{th} (m)
	T_f	คือ Fundamental period (sec)

2) หาค่า p (Stiffness reduction factor) โดยสมการค่า p นั้นขึ้นกับความความสัมพันธ์ของ Base shear – roof displacement ของ RC frame ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์แบบ Nonlinear modal pushover

โดยที่	μ_f	คือ Drift ductility at the target roof displacement คำนวณได้จาก $\frac{\delta_{tar}}{\delta_{fy}}$
	δ_{tar}	คือ Lateral target displacement คำนวณได้จาก $\theta_{tar} \cdot H_{eq}$
	δ_{fy}	คือ Lateral yield deformation of the SDOF _{RC} คำนวณได้จาก $\theta_{fy} \cdot H_{eq}$
		ซึ่งได้มีการกำหนดค่า $\theta_{tar} = 1/250$ และ $\theta_{fy} = 15/3200$
	μ_c	คือ The ratio of the crack-to-yield displacements มีค่าเท่ากับ 0.1 คำนวณค่า p จากสมการ

$$p = \frac{\mu_c + \alpha_1(\mu_f - \mu_c)}{\mu_f} \quad \text{for } (\mu_c < \mu_f \leq 1) \quad (3.6)$$

โดยที่ p คือ Stiffness reduction factor

α_1 คือ Pre-yield stiffness ratio มีค่าเท่ากับ 0.22

3) หาค่า Hysteretic energy of the SDOF_{RC} (E_f)

คำนวณได้จากสมการ

$$E_f = 2pK_f(\mu_f \delta_{fy})^2 \cdot \frac{(1-p) \cdot \mu_c}{\mu_c + p\mu_f} \text{ for } (\mu_c < \mu_f \leq 1) \quad (3.7)$$

โดย E_f คือ Hysteretic energy of the SDOF_{RC} (kN-mm)

λ คือ ค่าที่ใช้ลด stiffness ของ Takeda มีค่าเท่ากับ 0.4

4) หาอัตราส่วนความแข็งระหว่าง dampers กับ RC frame (r_d) คำนวณได้จากสมการ

$$r_d = \frac{K_d}{K_f} = \frac{p \left(\left(\frac{\theta_{f\mu}}{\theta_{tar}} \right)^2 - 1 \right) \cdot \left(1 + a \left(\xi_{f0} + \frac{R}{\pi} A_{f1} \right) \right)}{(1 + a h_{f0}) \left(\gamma_s + \frac{1}{\mu_d} \right) + \frac{2aR}{\pi \mu_d} \left(1 - \frac{1}{\mu_d} \right)} \text{ for } (\mu_c < \mu_f \leq 1) \quad (3.8)$$

โดยที่ r_d คือ อัตราส่วนความแข็งระหว่าง dampers กับ RC frame

$\theta_{f\mu}$ คือ Story drift of the SDOF_{RC} model คำนวณได้จาก $\frac{S_d}{H_{eq}}$ (rad)

a คือ Default calibration coefficient มีค่าเท่ากับ 25

R คือ Safe reduction factor มีค่าเท่ากับ 0.6

ξ_{f0} คือ Intrinsic damping of the existing RC frame มีค่าเท่ากับ 0.025

A_{f1} คือ Introduce two factors คำนวณได้จาก

$$A_{f1} = \frac{(1-p) \cdot \mu_c}{\mu_c + p\mu_f} \text{ for } (\mu_c < \mu_f \leq 1) \quad (3.9)$$

γ_s คือ อัตราส่วนระหว่าง stiffness ของ เฟรม elastic และ stiffness ของ damper

μ_d คือ Ductility factor of dampers

5) หาค่า stiffness of dampers ($K_{d,i}$) คำนวณได้จากสมการ

$$K_{d,i} = \frac{Q_i \sum_{i=1}^N (K_{f\mu,i} H_i^2)}{H_i \sum_{i=1}^N (Q_i H_i)} \left(\frac{1}{\gamma_s + \frac{1}{\mu_d}} + \frac{\mu_f}{\alpha_1 (\mu_f - \mu_c) + \mu_c} \cdot r_d \right) - K_{f\mu,i} \text{ for } (\mu_c < \mu_f < 1) \quad (3.10)$$

โดยที่ $K_{d,i}$ คือ Stiffness of dampers (kN/mm)

Q_i คือ แรงเฉือนในแต่ละชั้น (kg)

$K_{f\mu,i}$ คือ The story secant stiffness of RC frame
คำนวณได้จาก $K_{f,i} \cdot p$ (kN/mm)

3.6 หา Required lateral slip force of friction dampers at i^{th} story ($F_{d,i}$)

จากสมการ

$$F_{d,i} = \frac{K_{d,i}}{x_{BRB}} \quad (3.11)$$

โดยที่ $F_{d,i}$ คือ Required lateral slip force of friction dampers ที่ชั้น i^{th} (kN)

x_{BRB} คือ คำนวณได้จาก $\frac{\theta_{y,BRB}}{L_{BRB}}$ (mm)

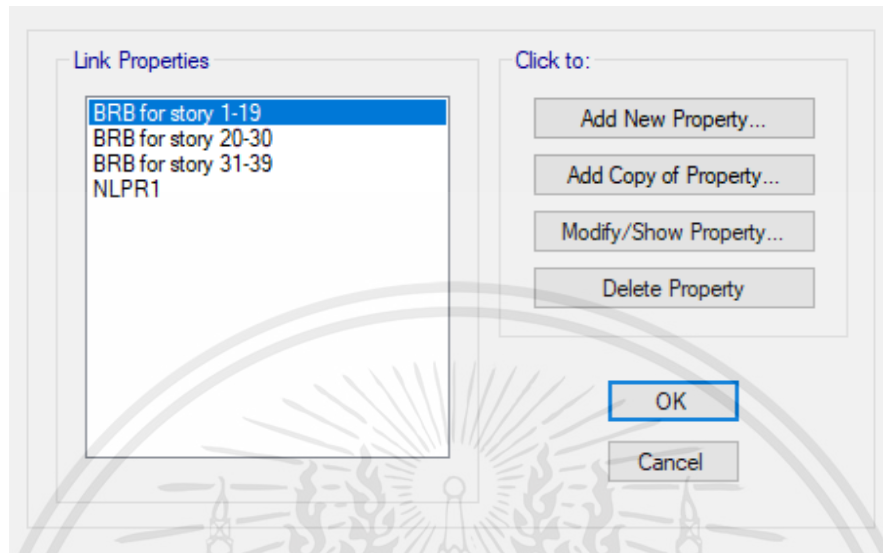
L_{BRB} คือ ความยาวของ BRB (mm)

3.6.1.7 หาจำนวน BRB ในแต่ละชั้นได้จาก

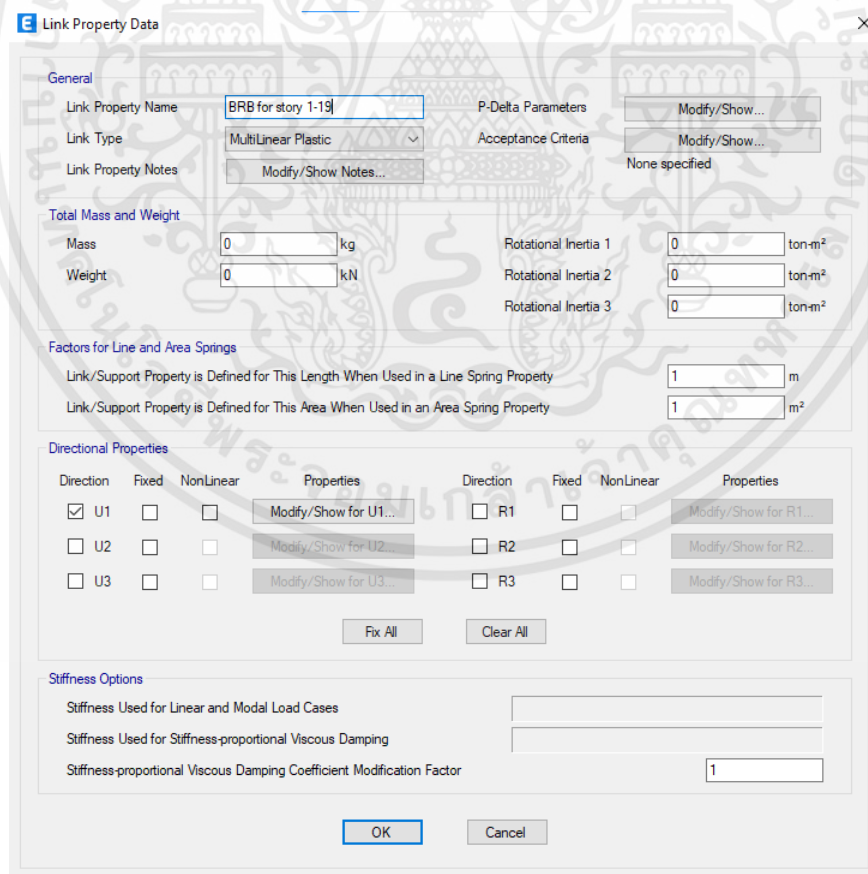
$$\text{จำนวน } BRB = \frac{F_{d,i}}{F_{BRB}} \quad (3.12)$$

โดยที่ F_{BRB} คือ Strength ของ BRB (kN)

3.6.2. วิธีการเสริมกำลังของโครงสร้างโดยใช้โปรแกรม ETABS



รูปที่ 3.20 กำหนด Link Properties สำหรับ BRB

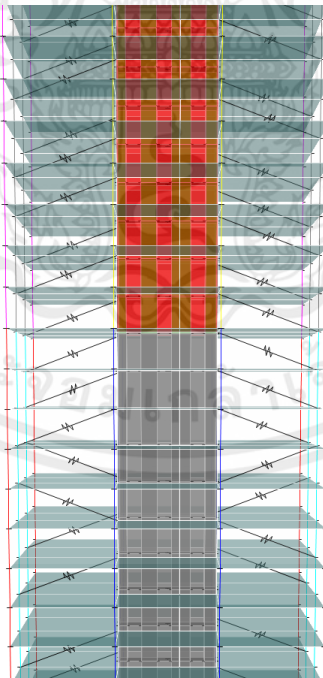


รูปที่ 3.21 กำหนด Link Property DATA สำหรับ BRB แต่ละชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

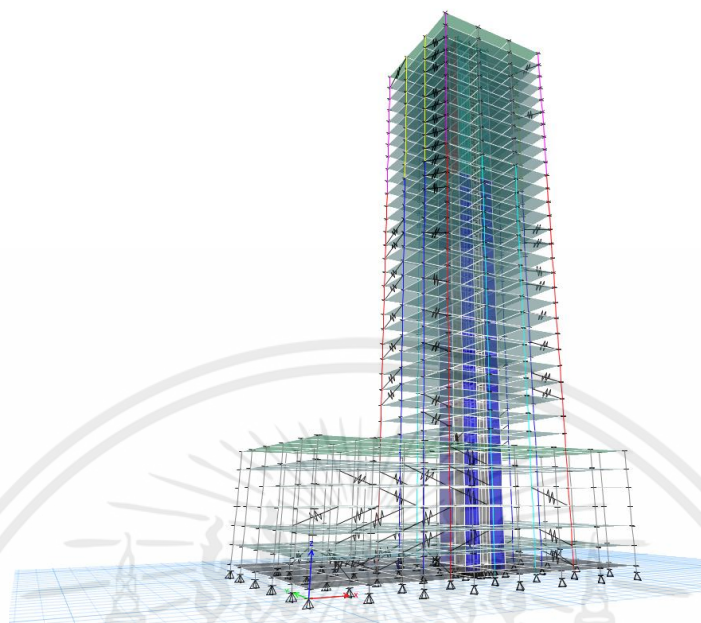
Identification	
Property Name	BRB for story 1-19
Direction	U1
Type	MultiLinear Plastic
NonLinear	No
Linear Properties	
Effective Stiffness	426472.1 kN/m
Effective Damping	0 kN-s/m
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/>	

รูปที่ 3.22 กำหนด Link Directional Properties สำหรับ BRB



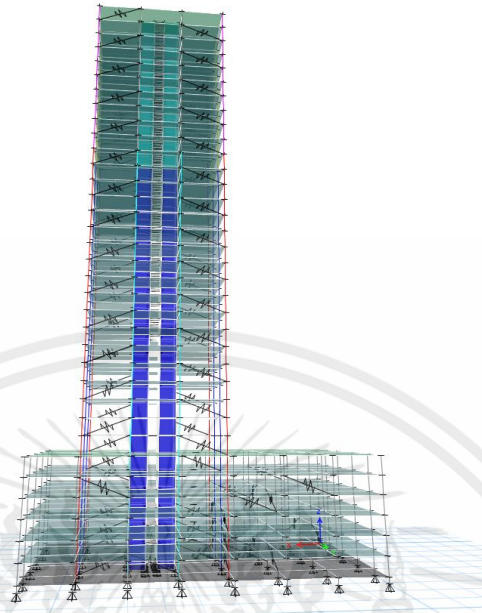
รูปที่ 3.23 แบบสามมิติของแบบจำลองโครงสร้างหลังเสริม BRB ด้านที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

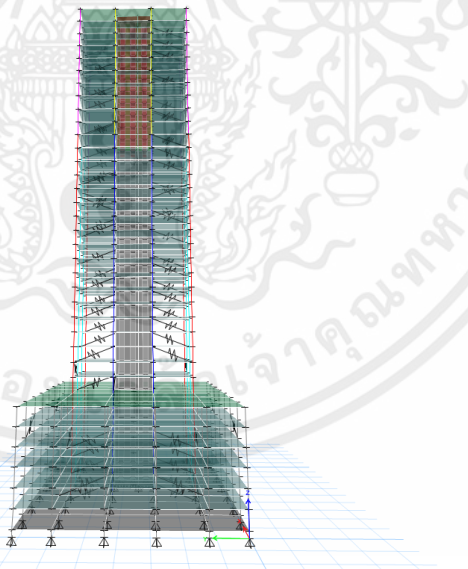


รูปที่ 3.24 แบบสามมิติของแบบจำลองโครงสร้างหลังเสริม BRB ด้านที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 แบบสามมิติของแบบจำลองโครงสร้างหลังเสริม BRB ด้านที่ 3



รูปที่ 3.26 แบบสามมิติของแบบจำลองโครงสร้างหลังเสริม BRB ด้านที่ 4

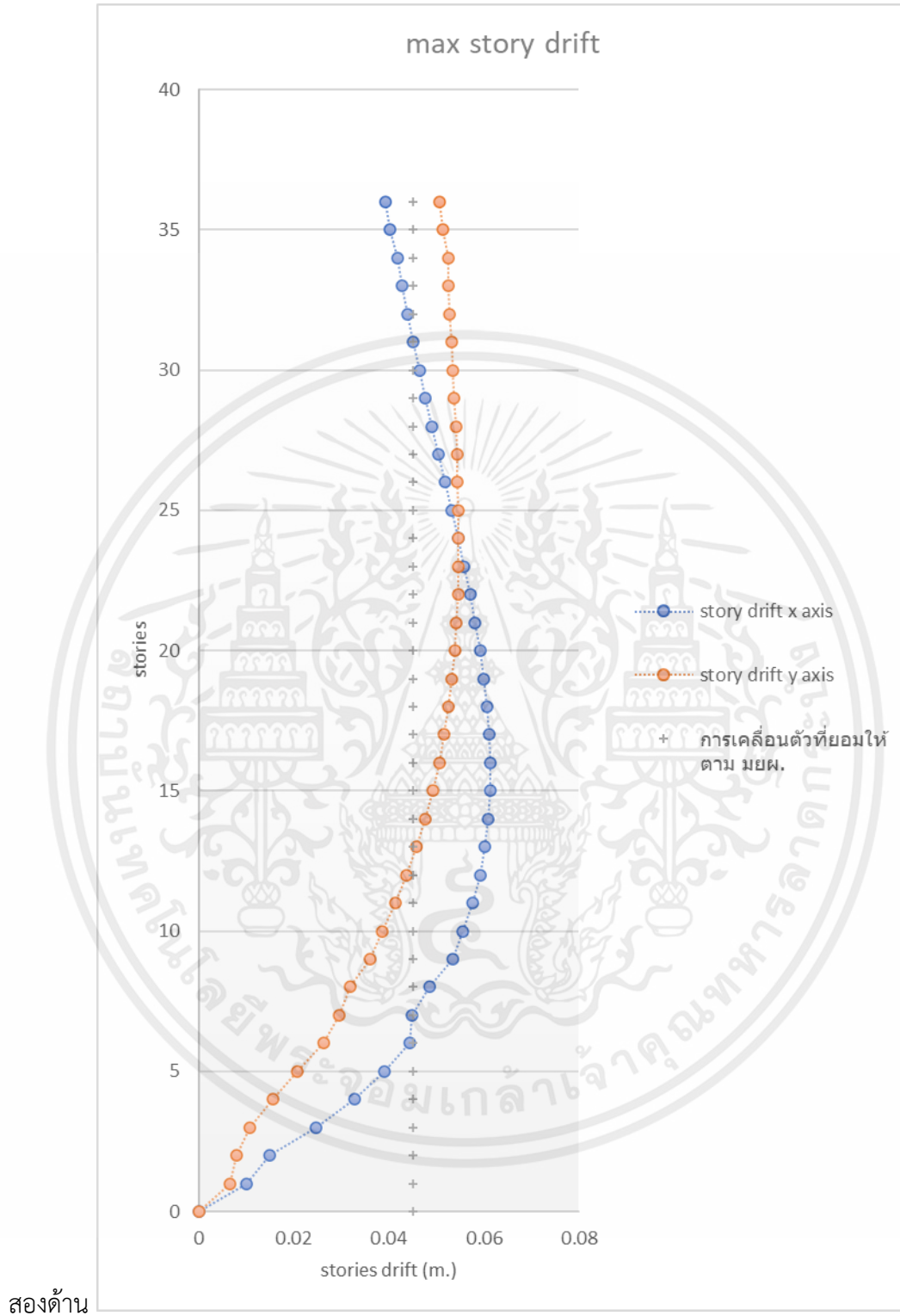
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

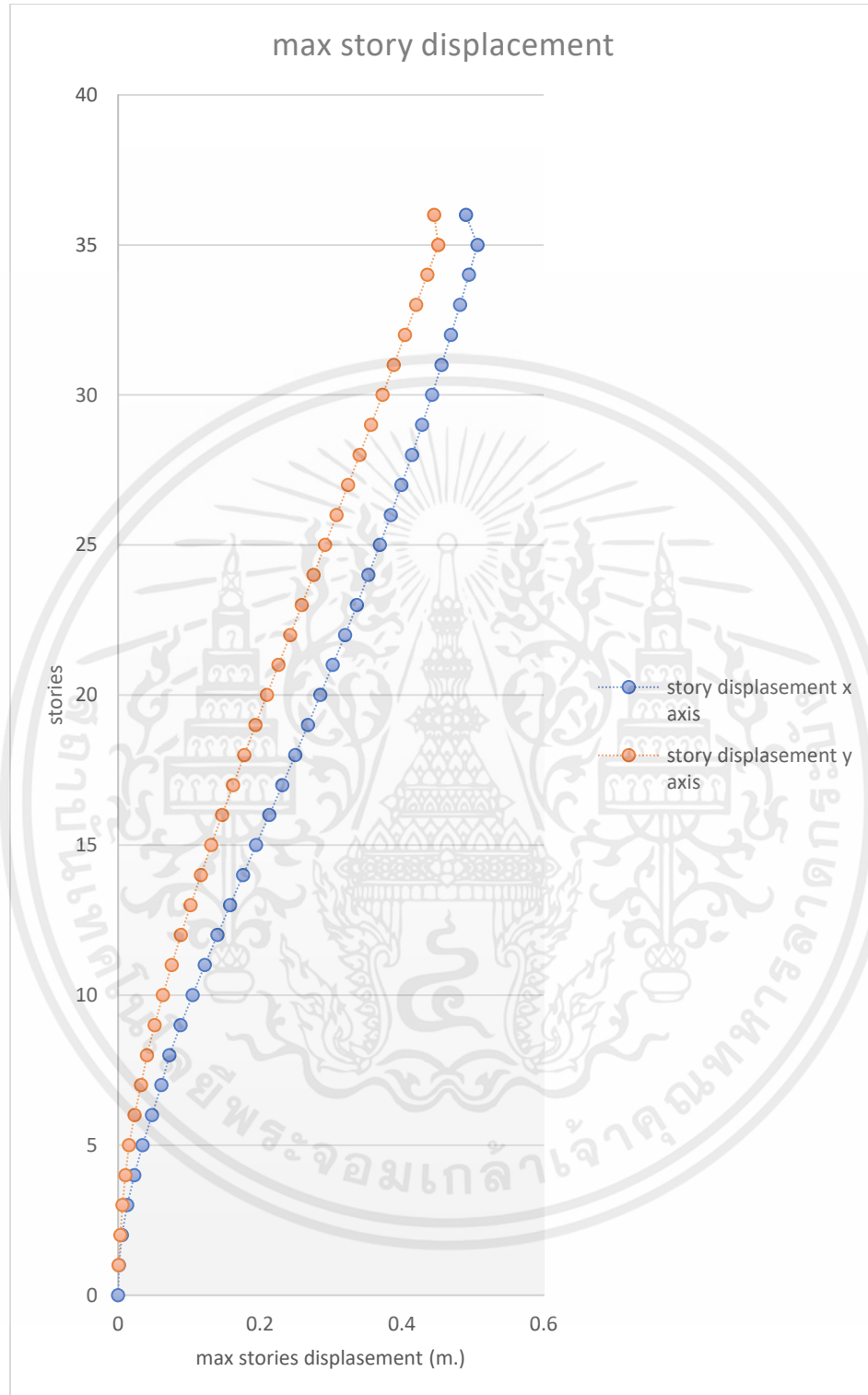
การออกแบบของค้ำอาคารยึดรั้งไว้การโก่งเดาะ (Buckling Restrained Brace) เพื่อเสริมกำลังต้านแรงแผ่นดินไหวสำหรับอาคารสูงปานกลาง โดยใช้โมเดลอาคารคอนกรีต 36 ชั้น เป็นอาคารตัวอย่าง ซึ่งเป็นโมเดลอาคารที่ถูกจำลองขึ้นให้มีลักษณะใกล้เคียงกับอาคารสูงในพื้นที่กรุงเทพมหานครฯ เมื่อได้รับแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วงและแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง ซึ่งพิจารณาค่าการเคลื่อนตัว (Story Displacement) ค่าอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story Drift Ratio) และค่าระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story Drift) ให้ผ่านเกณฑ์ของ มยผ. ว่าด้วยการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ยอมให้ 0.015h ของแต่ละชั้น พบว่าค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ยอมให้อยู่ที่ 0.045 ม. ต่อความสูง 3.00 เมตร (1 ชั้น)

จากการวิเคราะห์แรงต้านข้างที่กระทำต่ออาคารภายใต้แรงแผ่นดินไหว ปรากฏผลว่าทางด้านแกน x มีการเคลื่อนที่ตัวมากที่สุดอยู่ที่ 0.507 ม. ในขณะที่ด้านแกน Y มีการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์มากที่สุดอยู่ที่ 0.451 ม. โดยระยะการเคลื่อนตัวทั้งสองด้านถือว่าเกินกว่าค่ามาตรฐานที่ยอมให้ เมื่ออ้างอิงข้อมูลจาก [12] ซึ่งได้ระบุค่าของ θ_{target} ไว้เท่ากับ $1/250$ หรือ 0.004 rad และเพื่อให้ง่ายแก่การแสดงผล ทางผู้จัดทำจึงนำค่า θ_{target} แปลงให้อยู่ในรูปของการเคลื่อนตัวโดยการนำตัวคูณปรับค่า (Cd / I) เข้าไปคูณเพื่อให้มีค่าเทียบเท่ากับค่าเกณฑ์มาตรฐานของไทย ปรากฏผลว่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.015 ม. เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ทางด้านแกน x จึงพบว่า การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่มากที่สุดอยู่ที่ 0.1408 ม. ซึ่งถือว่าเกินค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่กำหนด ส่วนทางด้านแกน y มีการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์มากที่สุดอยู่ที่ 0.1252 ม. ซึ่งก็ถือว่าเกินค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่กำหนดเช่นเดียวกัน ทางคณะผู้ทำวิจัยจึงได้ทำการออกแบบเสริมกำลังทั้งสองแกน คือ แกน x และ แกน y พบว่ามีค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์เกินกว่าค่าที่กำหนดเช่นเดียวกัน ทางคณะผู้ทำวิจัยจึงได้ทำการออกแบบเสริมกำลังทั้งสองแกน



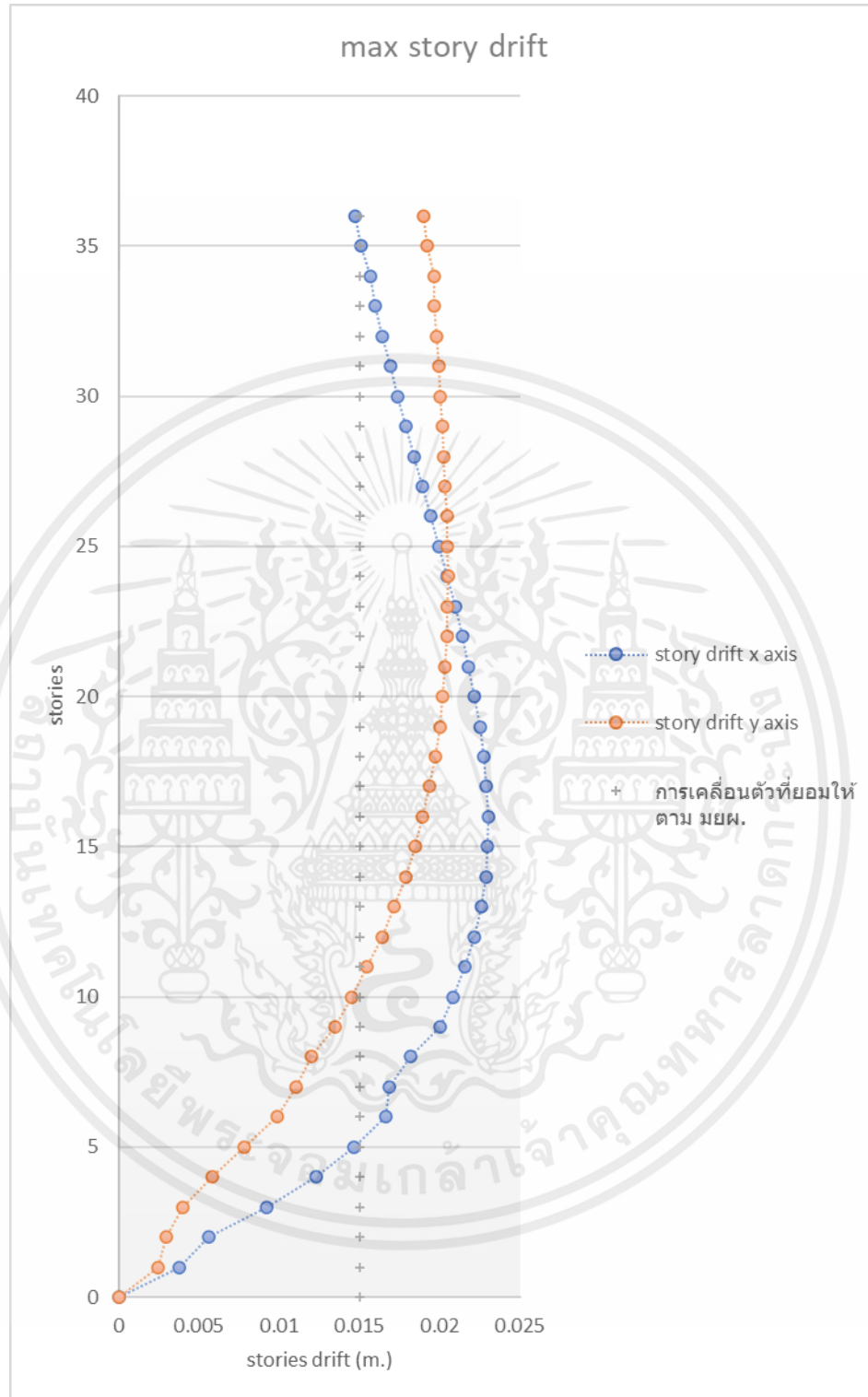
รูป 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ของอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



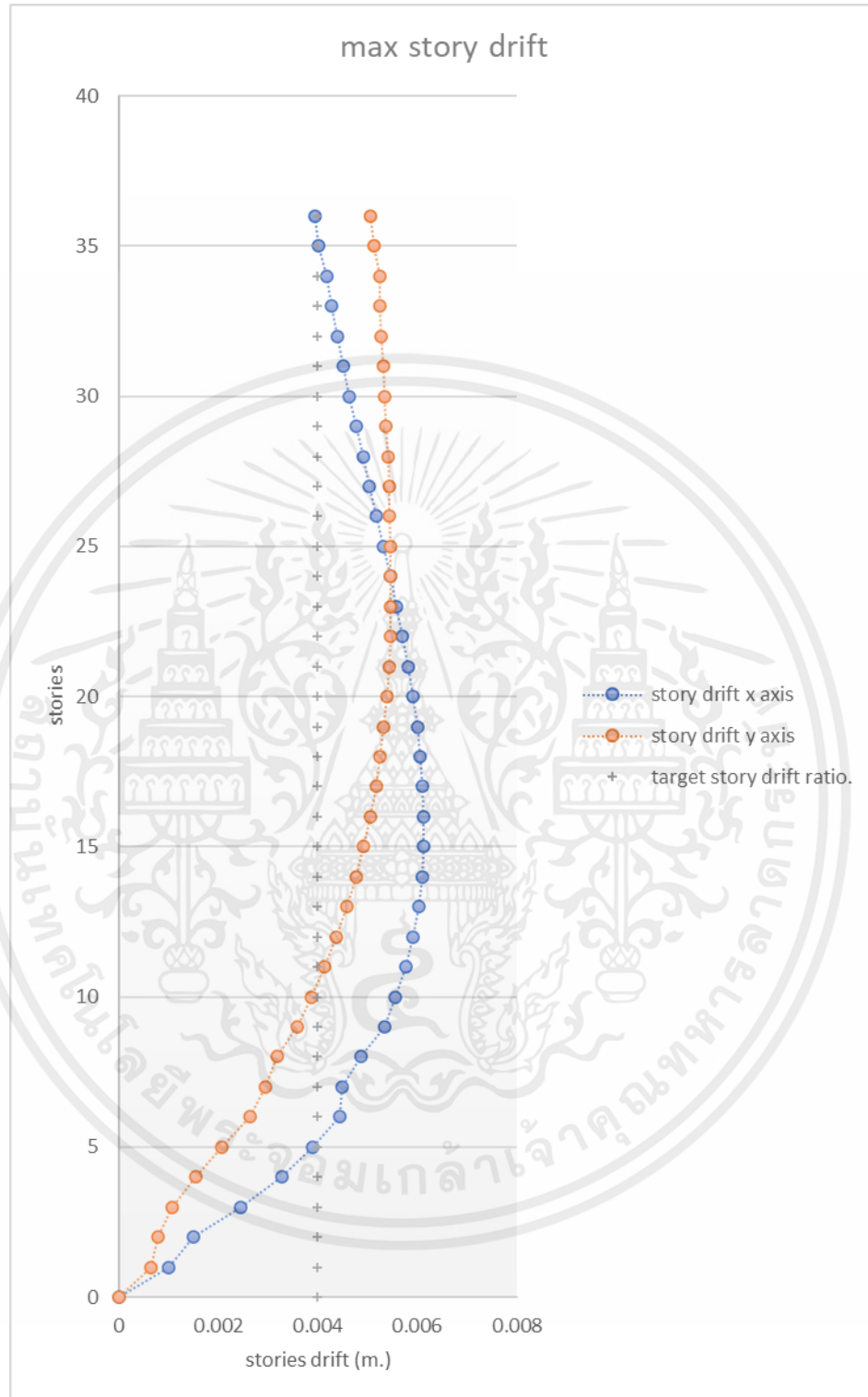
รูป 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสูงสุดของอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นและระยะการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ก่อนคุณตัวคุณปรับค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นและอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1. ผลที่ได้จากการออกแบบ

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงจำนวน BRB ที่ได้จากการออกแบบและค่าสติฟเนสของ BRB

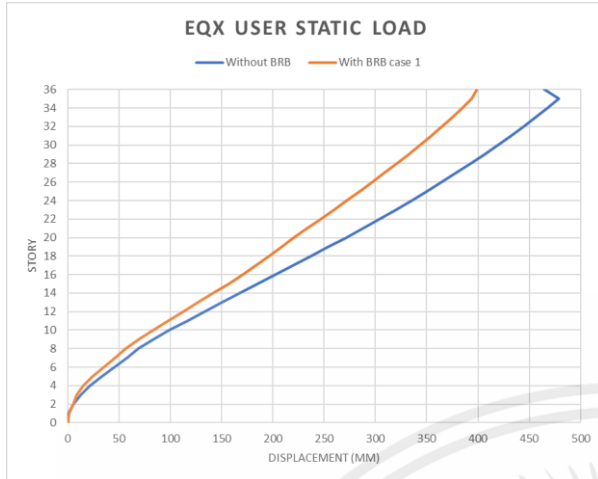
Story	จำนวน BRB (ตัว)		จำนวน BRB ที่ สามารถเสริมได้ จริง (ตัว)	F_{BRB} (kN)	K_{BRB} (kN/m)
	X-Dir	Y-dir	Y-dir		
STORY36	-	-	-	-	-
STORY35	1	1	1	1000	85294.42
STORY34	1	1	1	1000	85294.42
STORY33	1	1	1	1000	85294.42
STORY32	1	1	1	1000	85294.42
STORY31	1	1	1	1000	85294.42
STORY30	1	1	1	1000	85294.42
STORY29	1	1	1	1000	85294.42
STORY28	1	1	1	1500	126395.94
STORY27	1	1	1	1500	126395.94
STORY26	1	1	1	1500	126395.94
STORY25	1	1	1	1500	126395.94
STORY24	1	1	1	3000	255883.26
STORY23	1	1	1	3000	255883.26
STORY22	1	1	1	3000	255883.26
STORY21	1	1	1	3000	255883.26
STORY20	1	1	1	3000	255883.26
STORY19	1	1	1	5000	426472.10
STORY18	1	1	1	5000	426472.10
STORY17	1	1	1	5000	426472.10
STORY16	1	1	1	5000	426472.10

Story	จำนวน BRB (ตัว/ชั้น)		จำนวน BRB ที่ สามารถเสริมได้ จริง (ตัว)	F_{BRB} (kN)	K_{BRB} (kN/m)
	X-Dir	Y-dir	Y-dir		
STORY15	1	1	1	5000	426472.10
STORY14	1	1	1	5000	426472.10
STORY13	1	1	1	5000	426472.10
STORY12	1	1	1	5000	426472.10
STORY11	1	1	1	5000	426472.10
STORY10	1	2	2	3000	255883.26
STORY9	2	2	2	3000	255883.26
STORY8	1	2	2	5000	426472.10
STORY7	1	2	2	5000	426472.10
STORY6	2	2	2	5000	426472.10
STORY5	3	4	4	3000	255883.26
STORY4	2	4	4	4000	341177.68
STORY3	3	4	4	5000	426472.10
STORY2	4	6	6	5000	426472.10
STORY1	7	12	12	5000	426472.10

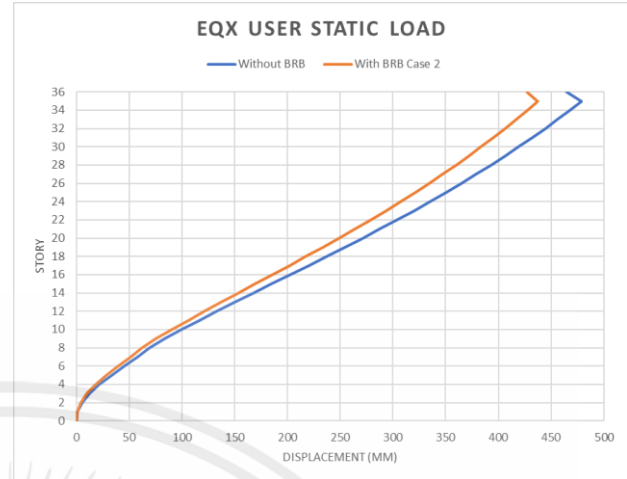
4.2. ผลที่ได้จากการวิเคราะห์

4.2.1. ผลของการเคลื่อนตัว (Story Displacement)

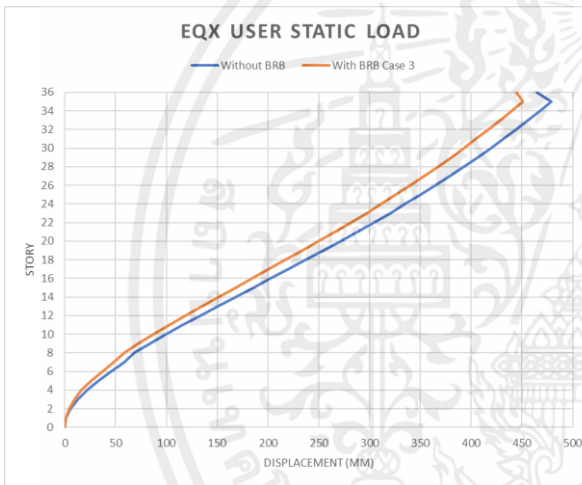
จากการวิเคราะห์โครงสร้างของอาคารหลังจากทำการเสริมกำลังด้วย BRB ตามที่ทางผู้วิจัยได้คำนวณออกแบบ พบว่าการเคลื่อนในแนวแกน x และแกน y ลดลง โดยลดลงมากที่สุด 0.05663 ม.



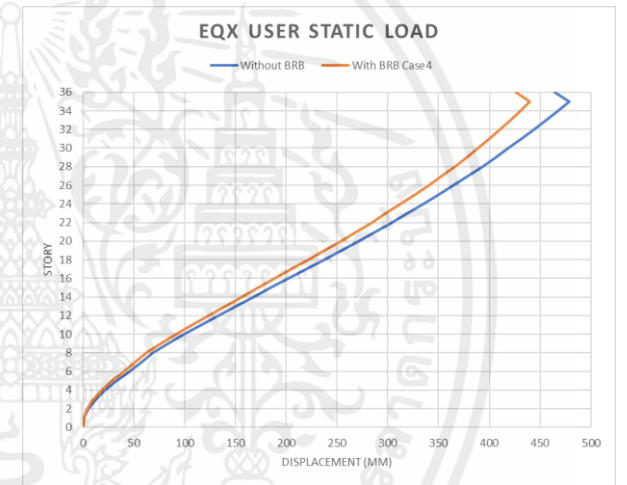
Case 1 เสริมช่วงด้านนอกแกน x ของโมเดล



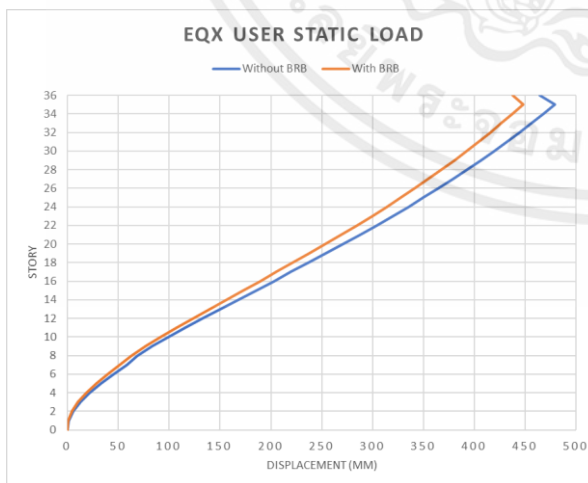
Case 2 เสริมช่วงใกล้ Shear Wall



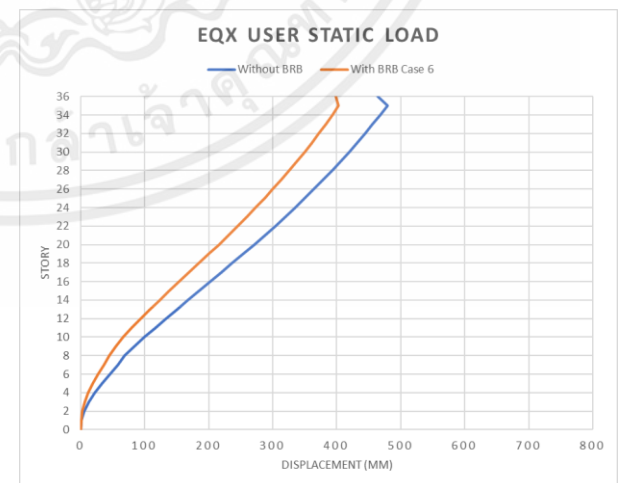
Case 3 เสริมช่วงด้านนอกแกน Y ของโมเดล



Case 4 เสริมช่วงห่างจาก Shear Wall

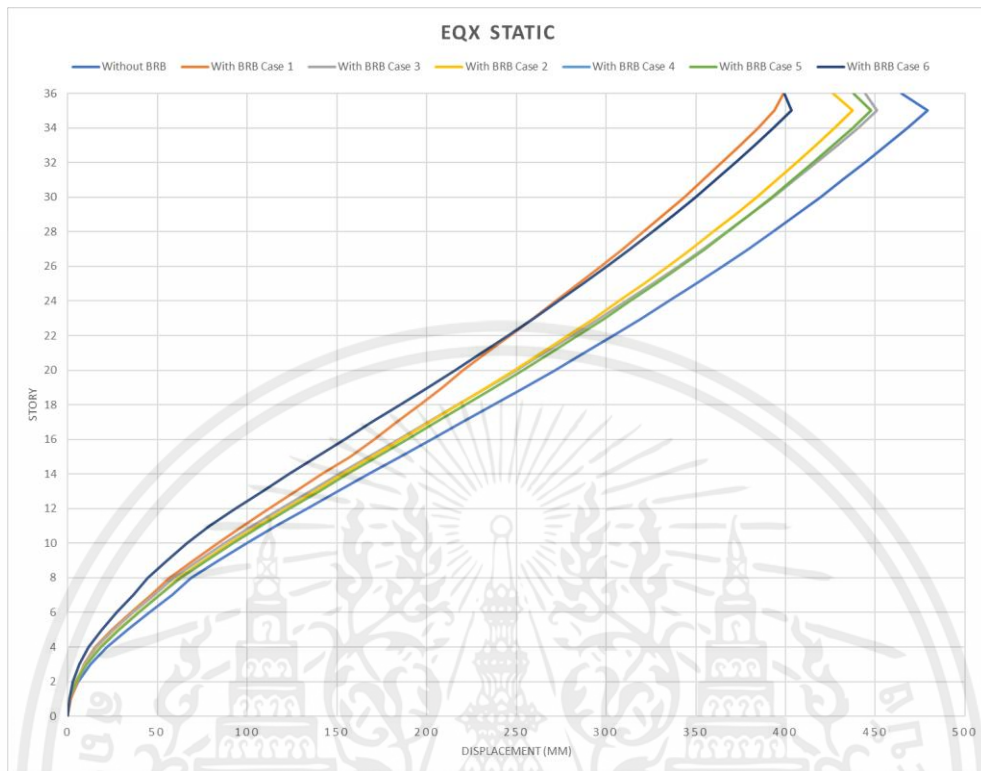


Case 5 เสริมช่วงด้านในแกน X ของโมเดล

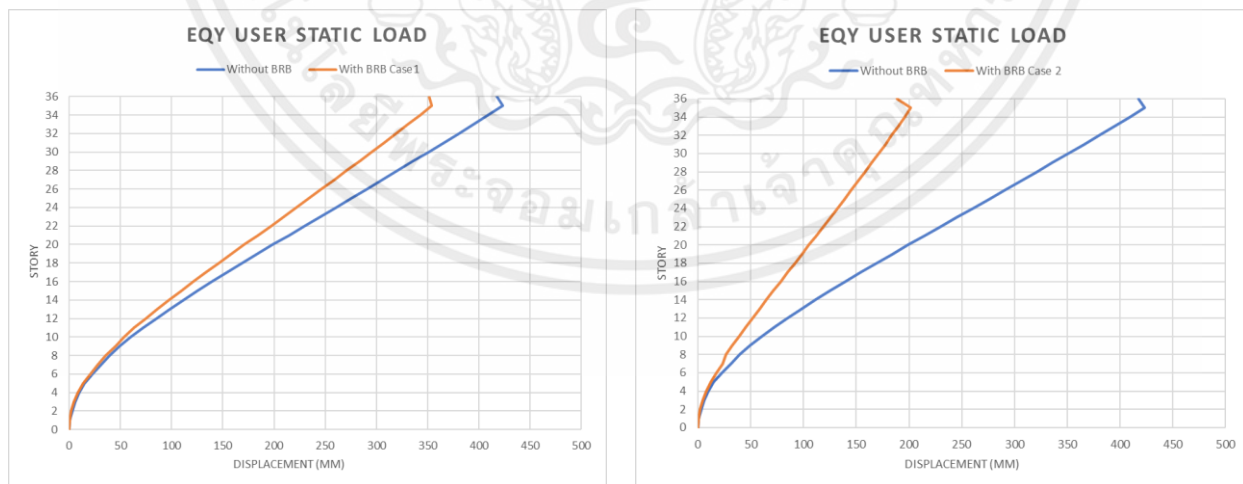


Case 6 เสริมช่วงด้านในแกน Y ของโมเดล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



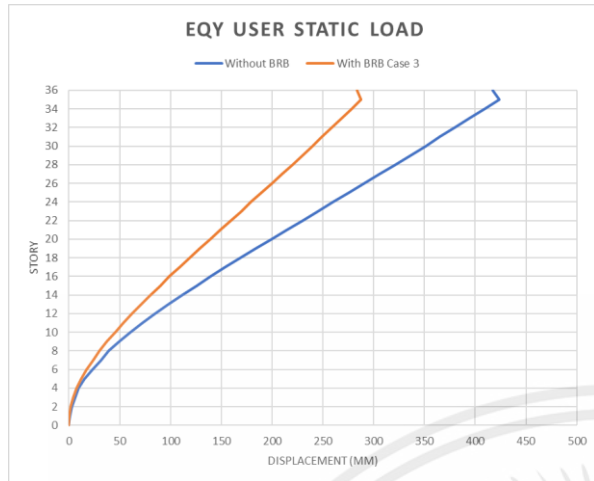
รูป 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นและการเคลื่อนตัวสูงสุดในแกน x ของอาคารหลังเสริมกำลังทั้ง 6 กรณี



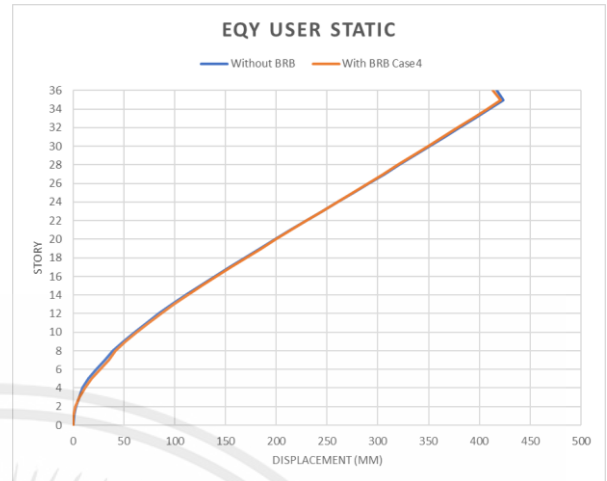
Case 1 เสริมช่วงด้านนอกแกน x ของโมเดล

Case 2 เสริมช่วงใกล้ Shear Wall

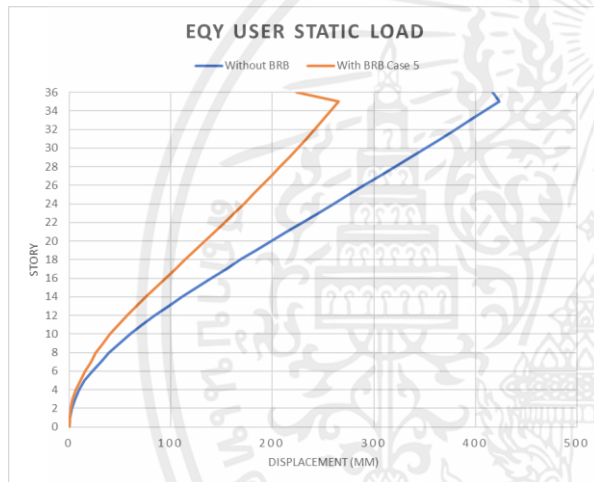
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



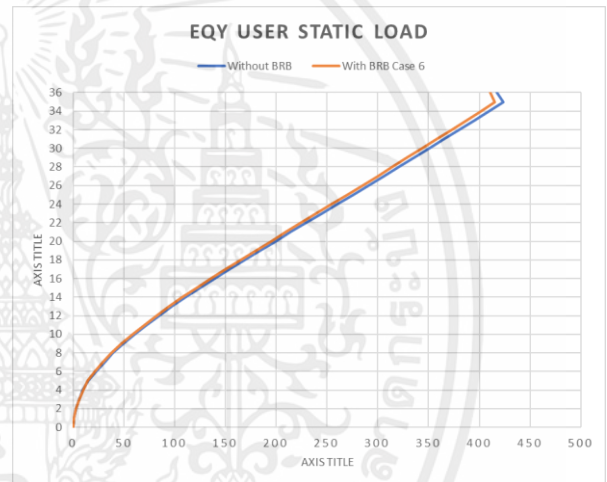
Case 3 เสริมช่วงด้านนอกแกน Y ของโมเดล



Case 4 เสริมช่วงห่างจาก Shear Wall

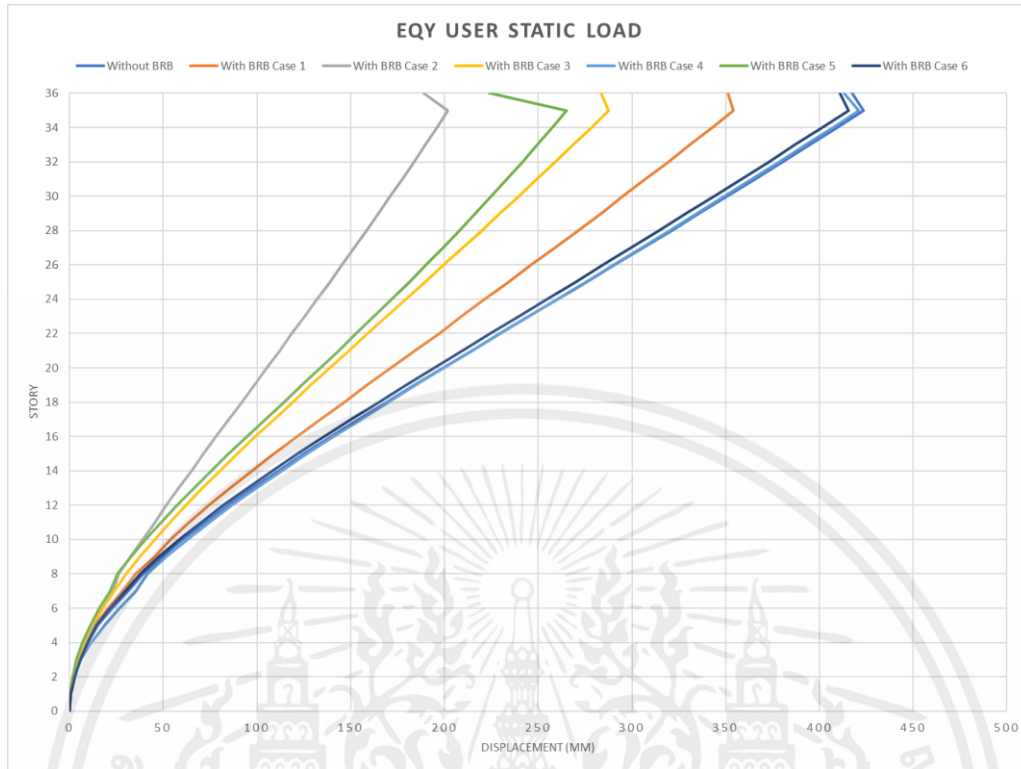


Case 5 เสริมช่วงด้านนในแกน X ของโมเดล



Case 6 เสริมช่วงด้านนในแกน Y ของโมเดล

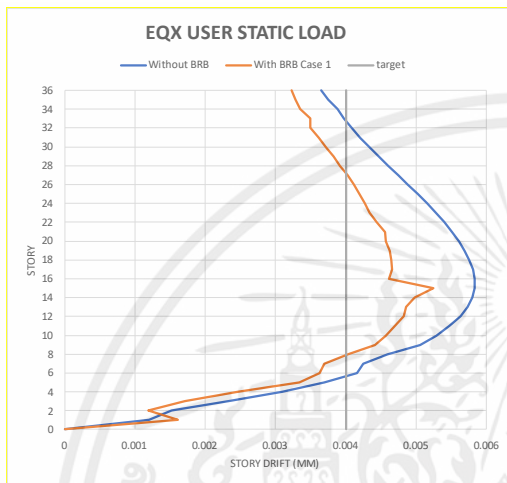
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



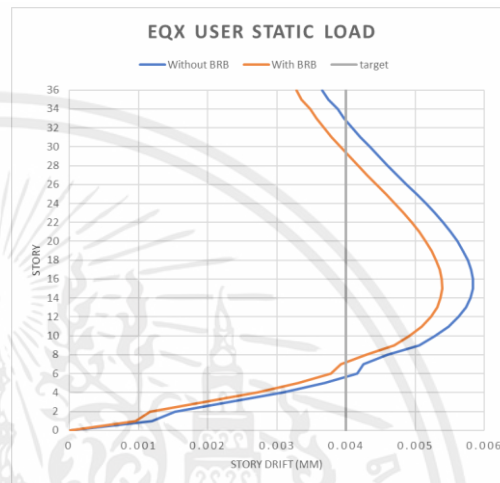
รูป 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นและการเคลื่อนตัวสูงสุดในแกน Y ของอาคารหลังเสริมกำลังทั้ง 6 กรณี

4.2.2. ผลของอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story Drift Ratio)

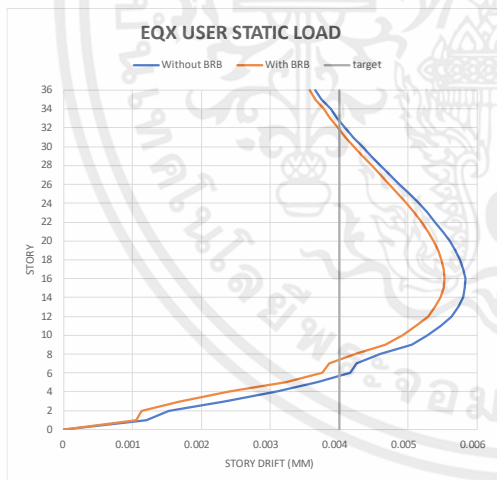
จากการวิเคราะห์โครงสร้างของอาคารหลังจากทำการเสริมกำลังด้วย BRB พบว่าอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ลดลงจากการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ก่อนทำการเสริมกำลัง



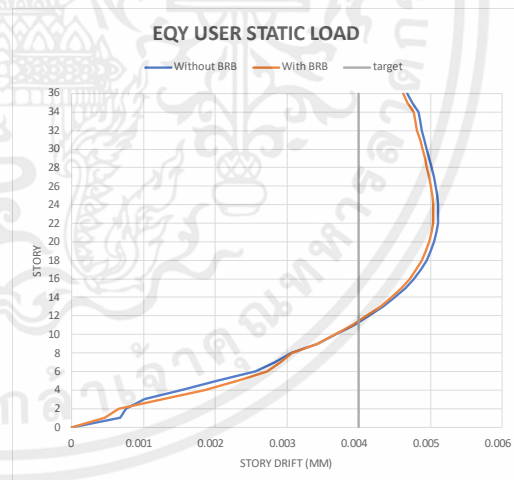
Case 1 เสริมช่วงด้านนอกแกน x ของโมเดล



Case 2 เสริมช่วงใกล้ Shear Wall

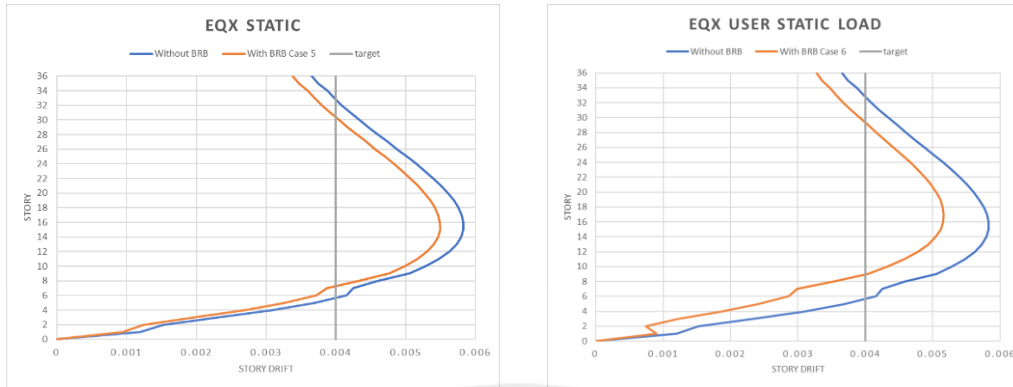


Case 3 เสริมช่วงด้านนอกแกน Y ของโมเดล



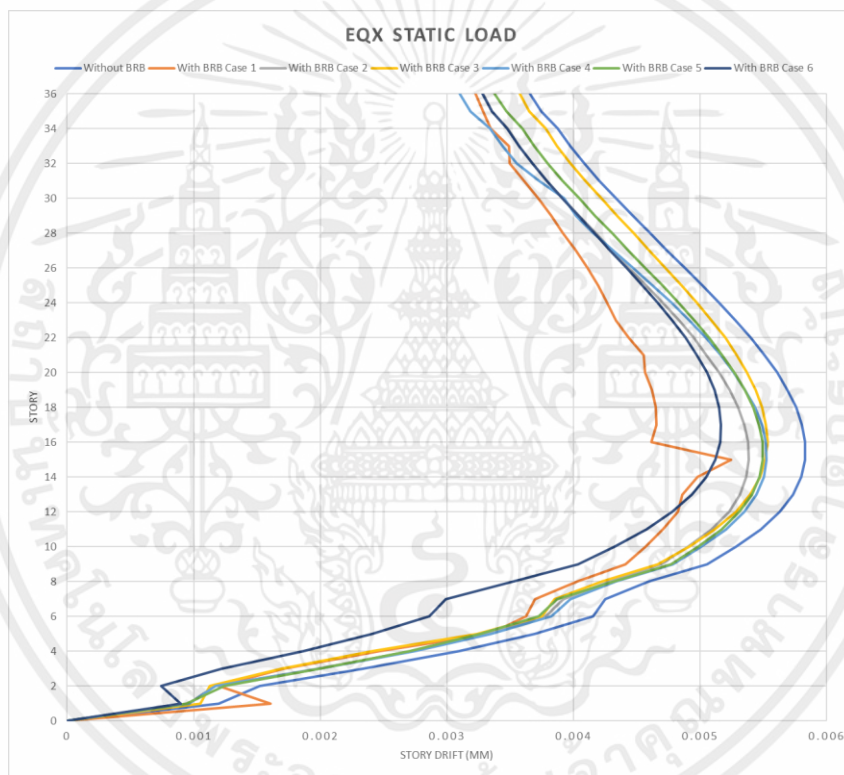
Case 4 เสริมช่วงห่างจาก Shear Wall

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



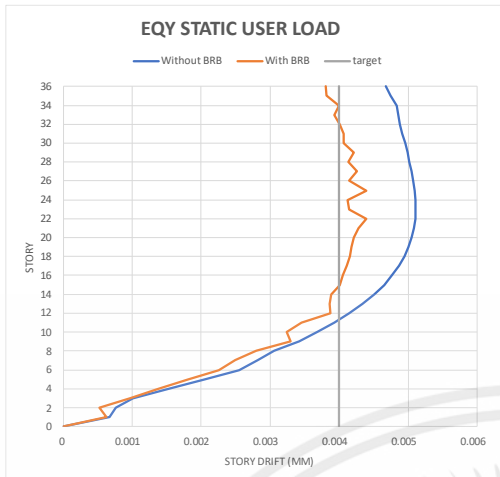
Case 5 เสริมช่วงด้านในแกน X ของโมเดล

Case 6 เสริมช่วงด้านในแกน Y ของโมเดล

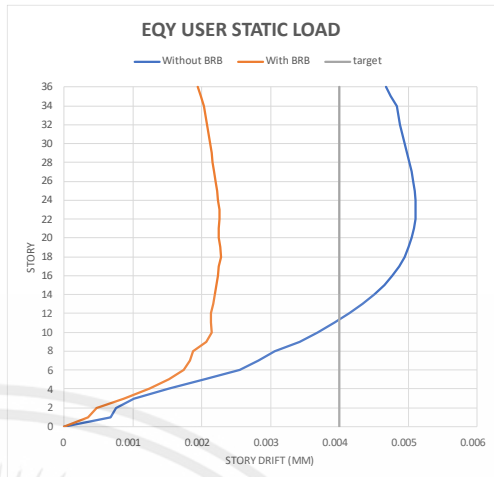


รูป 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นและอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นในแกน x ถึงเสริมกำลัง แบบที่ 1 ถึง 6

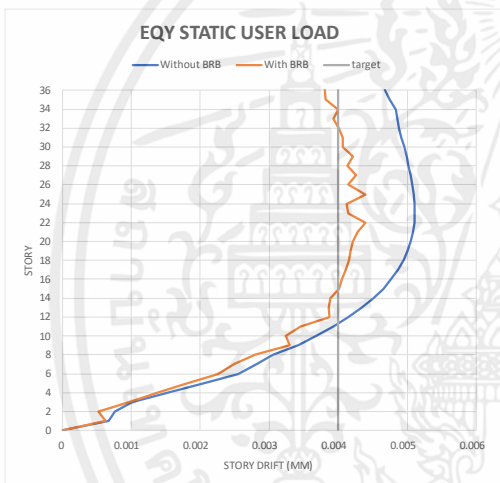
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



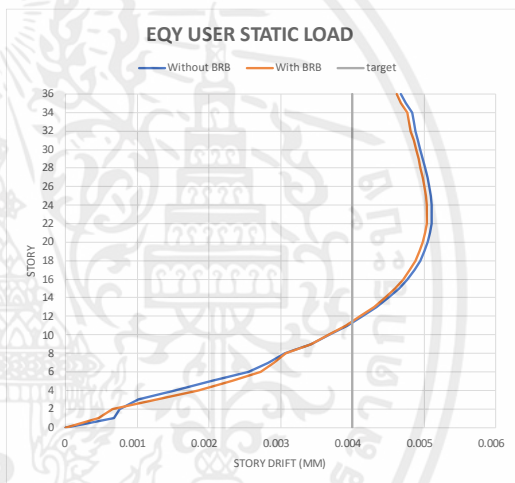
Case 1 เสริมช่วงด้านนอกแกน x ของโมเดล



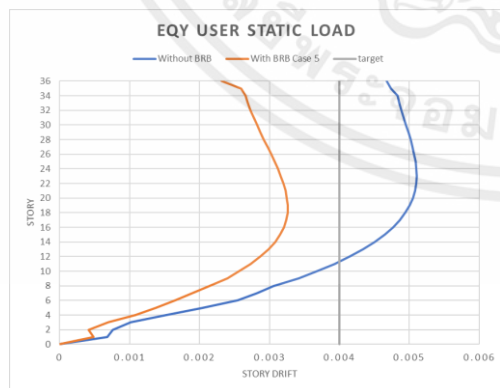
Case 2 เสริมช่วงใกล้ Shear Wall



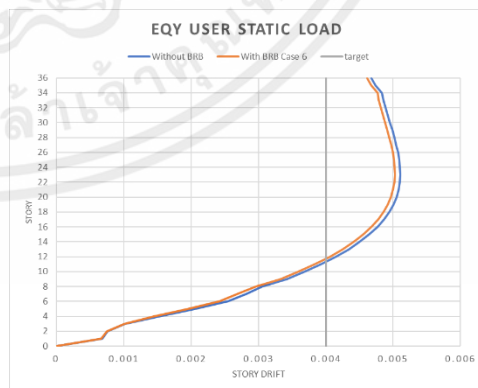
Case 3 เสริมช่วงด้านนอกแกน Y ของโมเดล



Case 4 เสริมช่วงห่างจาก Shear Wall

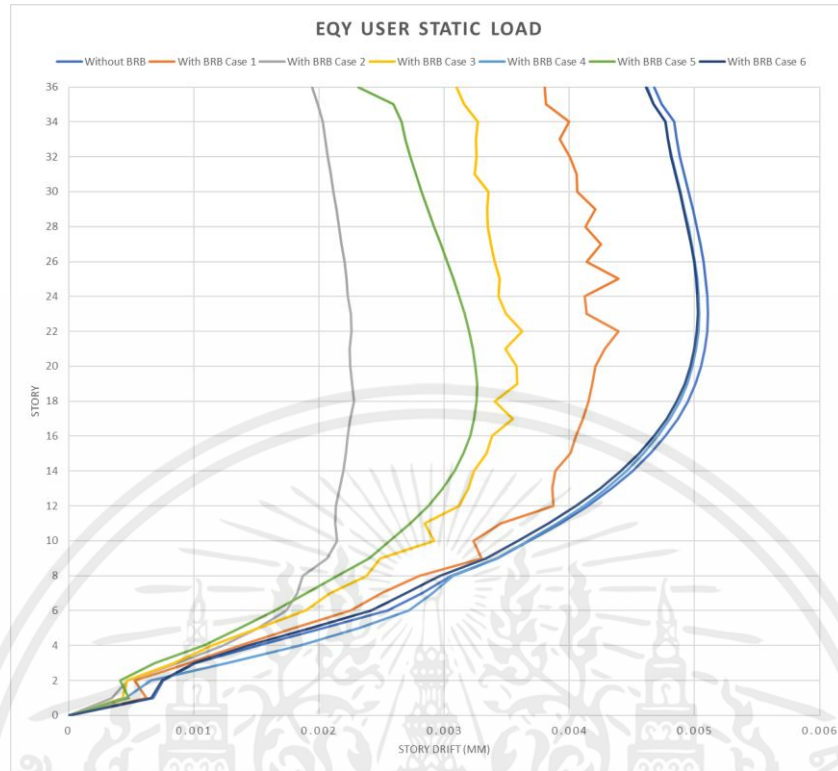


Case 5 เสริมช่วงด้านนในแกน X ของโมเดล



Case 6 เสริมช่วงด้านนในแกน Y ของโมเดล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับชั้นและอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้นในแกน Y หลังเสริมกำลังแบบที่ 1 ถึง 6

4.2.3. ผลของประสิทธิภาพการทำงานของ BRB

ร้อยละความเคลื่อนของการเสริมกำลังโดย BRB เมื่อคำนวณออกแบบตาม [6], [8] และ [12] แสดงผลดังตารางโดยชั้นที่มีค่าร้อยละที่มีค่าติดลบคือชั้นที่ไม่ต้องการใช้ประสิทธิภาพของ BRB เพิ่มเติม ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพของ BRB ในชั้นนั้นได้ถูกใช้อย่างเต็มที่

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์และร้อยละของประสิทธิภาพ BRB ที่ต้องการเพิ่มเติม

Story	Elevation (m)	การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ ตามมาตรฐาน (m)	การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ หลังเสริมกำลัง (case 2) (m)	ประสิทธิภาพของ BRB ที่ต้องการ เพิ่ม (%)
STORY36	106	0.045	0.003749	0.0408
STORY35	103	0.045	0.003734	0.0408
STORY34	100	0.045	0.00379392	0.0407
STORY33	97	0.045	0.003819386	0.0407
STORY32	94	0.045	0.003855725	0.0406
STORY31	91	0.045	0.003865424	0.04068
STORY30	88	0.045	0.003894415	0.04066
STORY29	85	0.045	0.00388746	0.04066
STORY28	82	0.045	0.003869595	0.04068
STORY27	79	0.045	0.003883453	0.04067
STORY26	76	0.045	0.003879617	0.04067
STORY25	73	0.045	0.003807194	0.04074
STORY24	70	0.045	0.003807501	0.04074
STORY23	67	0.045	0.004014901	0.04054
STORY22	64	0.045	0.00394727	0.0406
STORY21	61	0.045	0.003725554	0.04082
STORY20	58	0.045	0.003699496	0.04085
STORY19	55	0.045	0.003670709	0.04088
STORY18	52	0.045	0.003627278	0.04092
STORY17	49	0.045	0.003488031	0.04106

STORY16	46	0.045	0.003441599	0.04111
STORY15	43	0.045	0.00336439	0.04119
STORY14	40	0.045	0.003286036	0.04126
STORY13	37	0.045	0.0032042	0.04135
STORY12	34	0.045	0.003142118	0.04141
STORY11	31	0.045	0.003062242	0.04149
STORY10	28	0.045	0.003076346	0.04147
STORY9	25	0.045	0.002930515	0.04162
STORY8	22	0.045	0.002646638	0.0419
STORY7	19	0.045	0.002504293	0.04205
STORY6	16	0.045	0.002385632	0.04216
STORY5	13	0.045	0.002078879	0.04247
STORY4	10	0.045	0.00169279	0.04286
STORY3	7	0.045	0.001190164	0.04336
STORY2	4	0.045	0.000640236	0.04391
STORY1	1	0.045	0.000441804	0.04411
BASE	0	0.045	0	0.04455

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1. สรุปผลการทดลอง

ในการวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างเพื่อหารูปแบบการเสริมกำลังที่เหมาะสมขององค์อาคารยึดรั้งไว้การโก่งเดาะ (Buckling Restrain Braces) สำหรับการเสริมกำลังเพื่อต้านแรงแผ่นดินไหวของอาคารตัวอย่าง 36 ชั้น จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยองค์อาคารยึดรั้งไว้การโก่งเดาะ (Buckling Restrain Braces) ทำให้การเคลื่อนตัวของแต่ละชั้น (Story displacement) และ การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ระหว่างชั้น (Story Drift Ratio) ของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กลดลง ซึ่งส่งผลให้ความเสียหายที่เกิดจากแผ่นดินไหวของอาคารลดลง

5.1.2 การเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยองค์อาคารยึดรั้งไว้การโก่งเดาะ (Buckling Restrain Braces) ดังกรณีตัวอย่าง 6 กรณี พบว่า การติดตั้งองค์อาคารยึดรั้งไว้การโก่งเดาะบริเวณใกล้กับตรง Shear Wall มีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งมีค่าการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ลดน้อยลงมากกว่า 5 กรณีที่ทำการศึกษา

บรรณานุกรม

- [1] Building code requirements for structural concrete (ACI318-14 and ACI318-19). American Concrete Institute.
- [2] มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยวิธีกำลัง, พิมพ์ครั้งที่ 4 (2545), วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย
- [3] Arthit Petchasasithon. Lecture RC Design Slide.
- [4] Koichi Maekawa, Amorn Pimanmas and Hajime Okamura. Non-Linear Mechanics of Reinforced Concrete.
- [5] มงคล จิรวัชรเดช. การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก. 2550. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [6] Nadim Hassoun, Akthem Al-Manaseer. Structural concrete: Theory and Design. 2012, 5th Edition, Wiley.
- [7] Arthur H. Nilson, Charles W Dolan. Design of concrete structures. 2010 14th Edition, McGraw-Hill.
- [8] Jack C. McCormac and Russell H. Brown. Design of reinforced concrete. 2014. 9th Edition, John Wiley.
- [9] มงคล จิรวัชรเดช. การออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก. 2550. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [10] <https://www.grayson-eng.co.nz/cellular-beams-1>
- [11] <https://www.irjet.net/archives/V4/I3/IRJET-V4I3603.pdf>
- [12] T. Takeuchi and A. Wada: Buckling-Restrained Braces and Applications, 2017
- [13] E. Yooprasertchai and P. Warnitchai: SEISMIC RETROFITTING OF LOW-RISE NONDUCTILE REINFORCED CONCRETE BUILDINGS BY BUCKLING-RESTRAINED BRACES, 2008
- [14] Kazuhiro FUJISHITA, Fatih Sutcu, Toru Takeuchi, Ryota Matsui: Seismic retrofit design method for RC buildings using buckling-restrained braces and steel frames, 2015.
- [15] กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย : คู่มือปฏิบัติที่ใช้ในการตรวจสอบ ประเมิน และเสริมความมั่นคงแข็งแรงให้กับโครงสร้างของอาคารเพื่อให้สามารถต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว , 2018
- [16] F. Sutcu, T. Takeuchi, and R. Matsui. Seismic retrofitting design method of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

existing RC buildings with buckling restrained braces, Journal of
Constructional Steel Research, pp. 304-313. 2014. 101

[17] Earthq Engng Struct Dyn, Volume: 43, Issue: 6, Pages: 851-869, First published: 08 October
2013, DOI: (10.1002/eqe.2376)

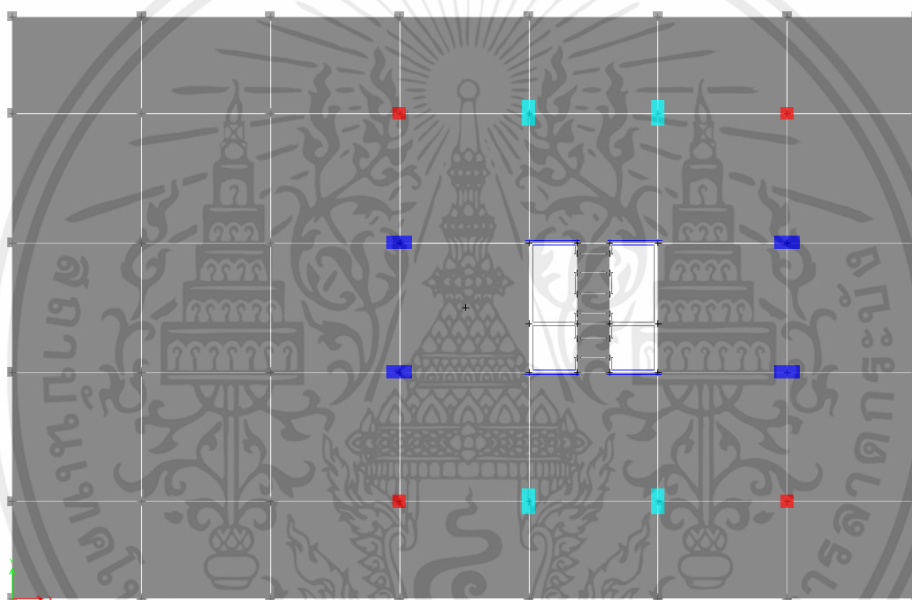
[18] Jacobsen L. S. Damping in composite structures. 2nd World Conference on
Earthquake Engineering 1960; 1029-1044.



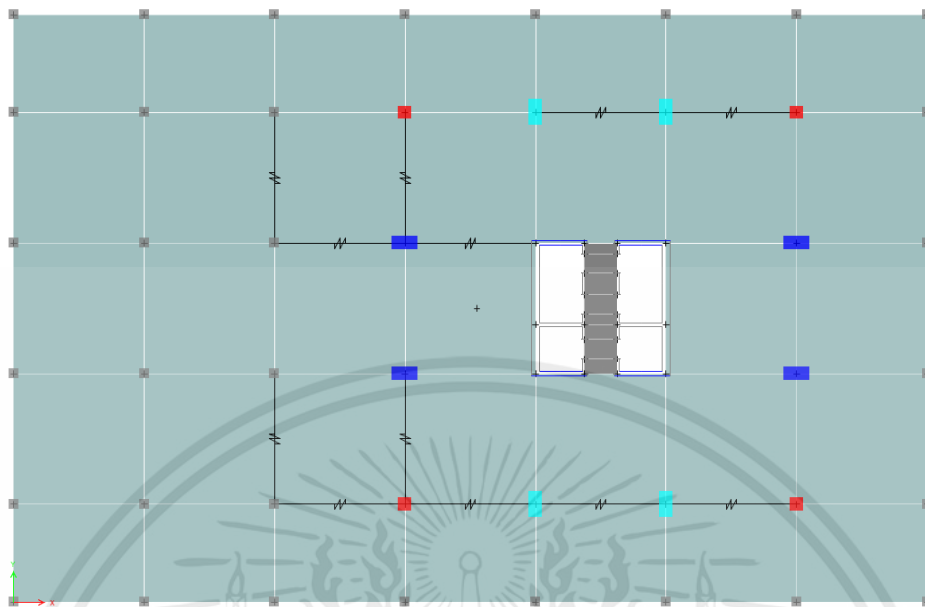
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

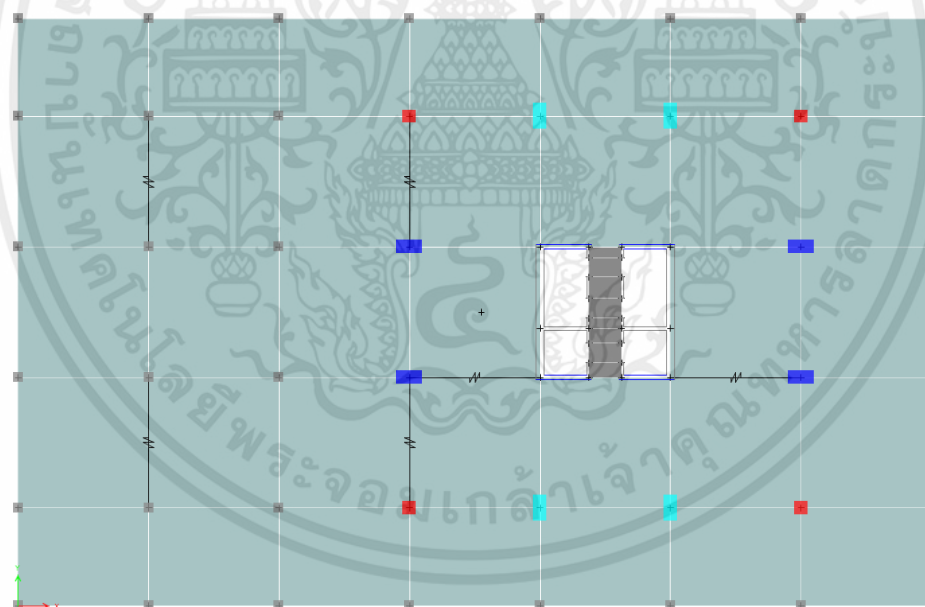
หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลาง



รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 1

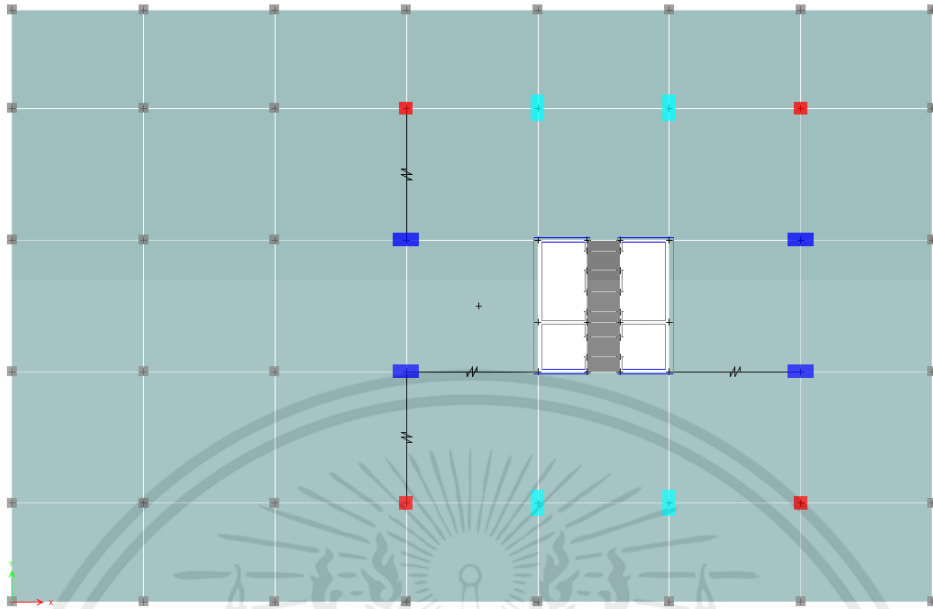


รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 2

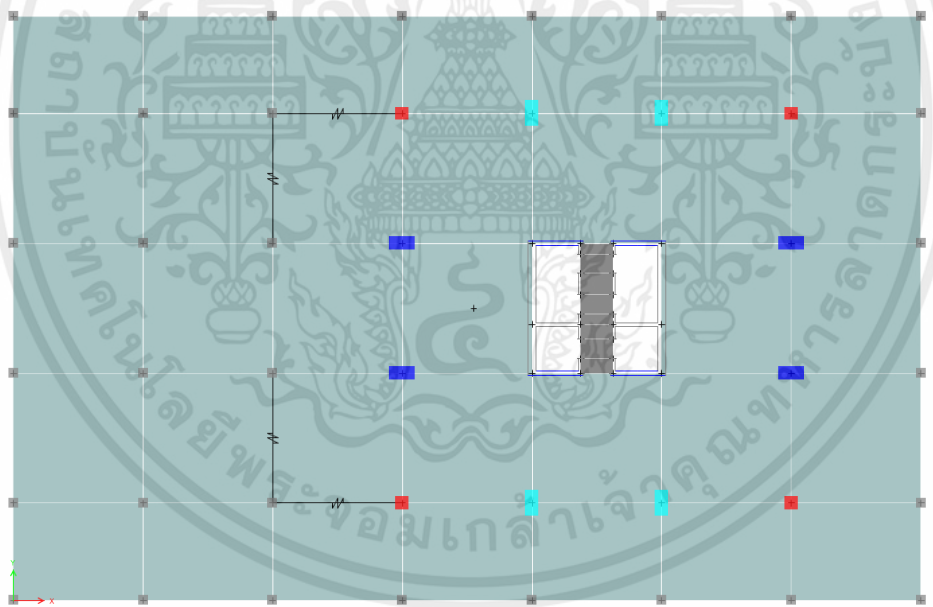


รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

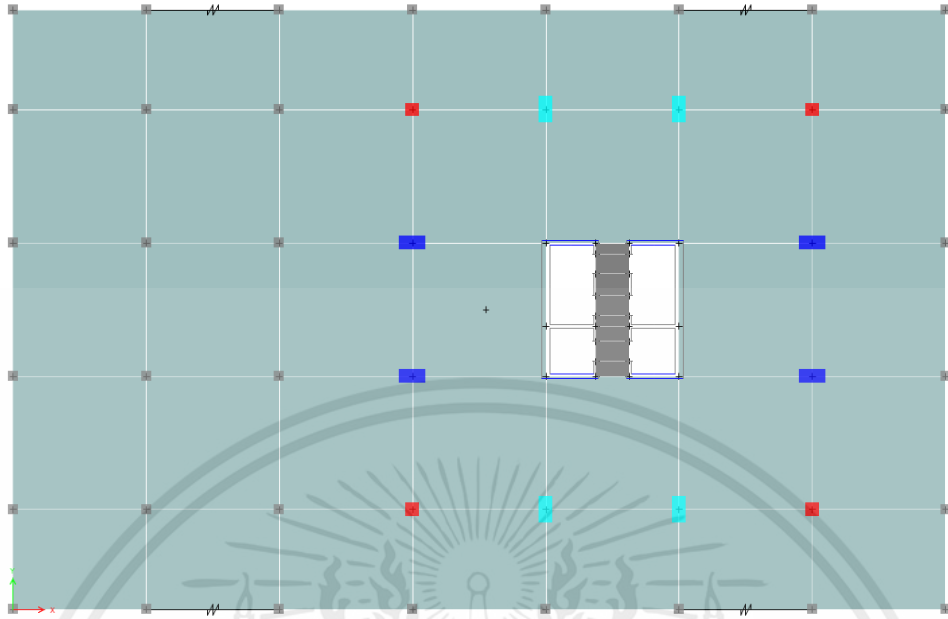


รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 4

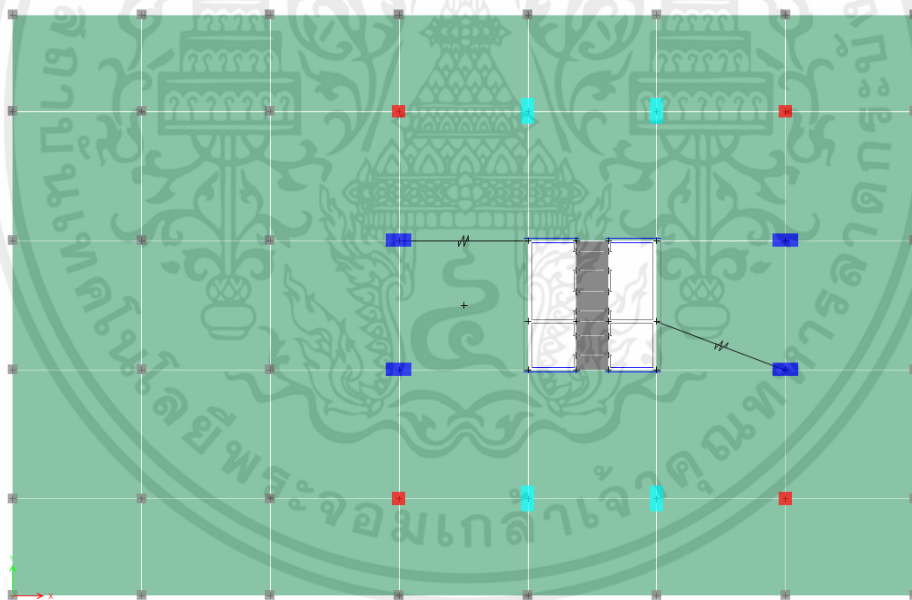


รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

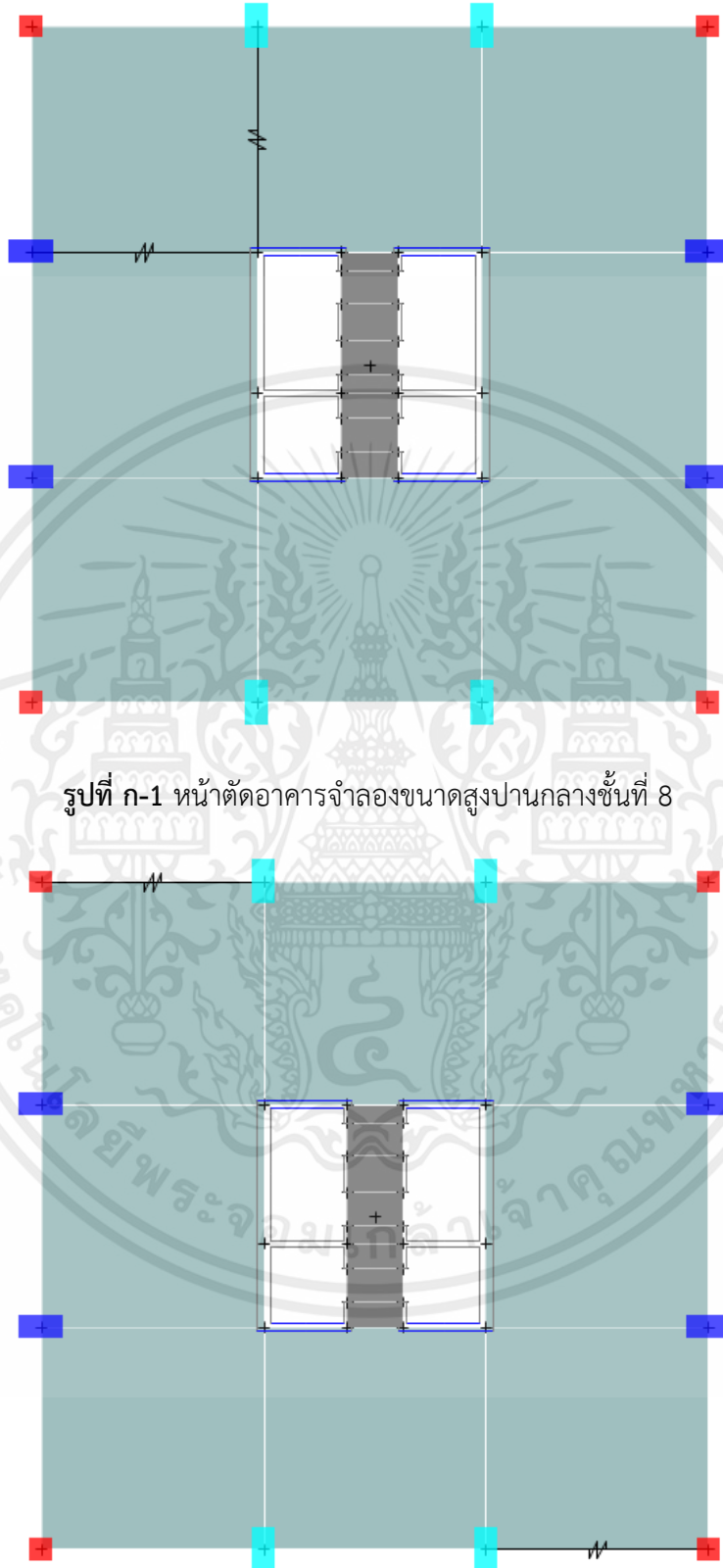


รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 6



รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 7

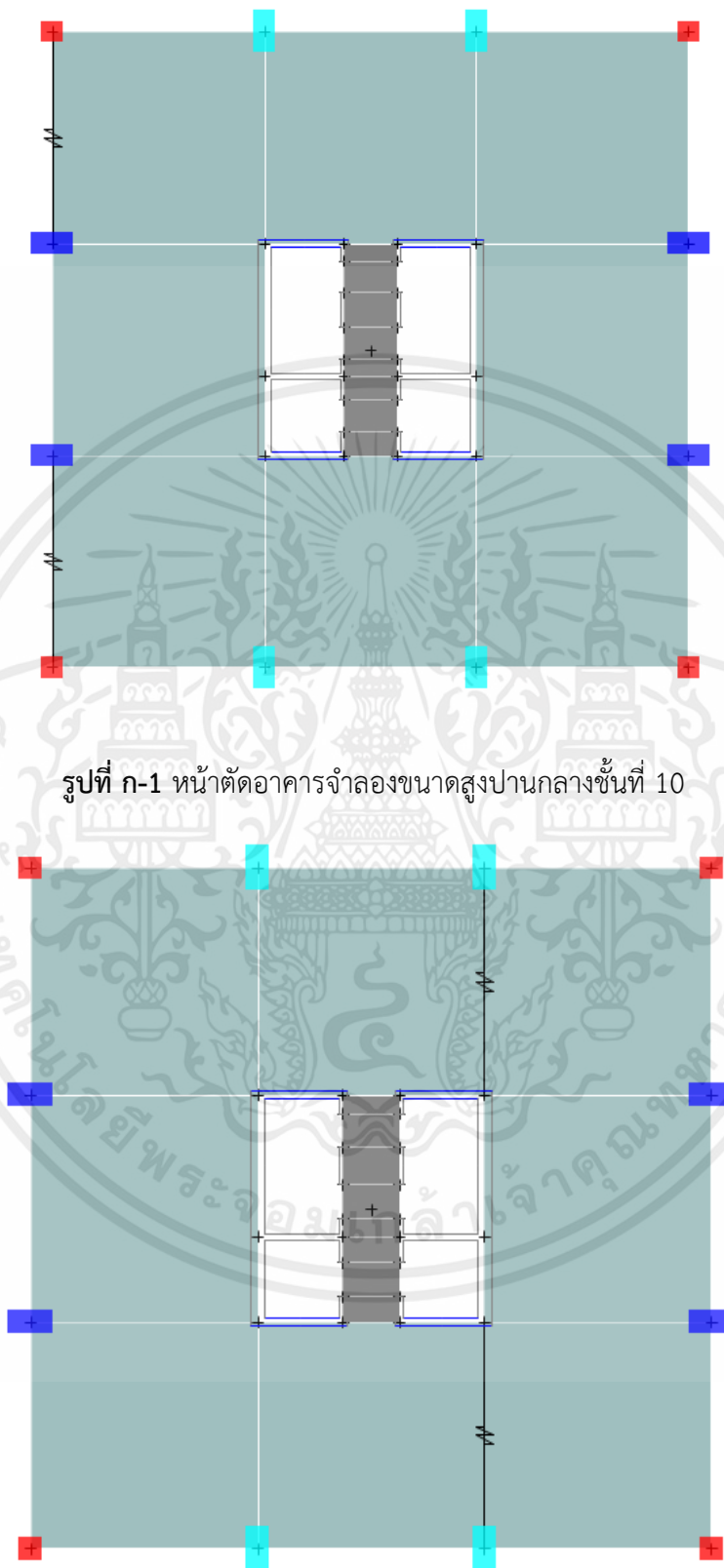
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 8

รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 9

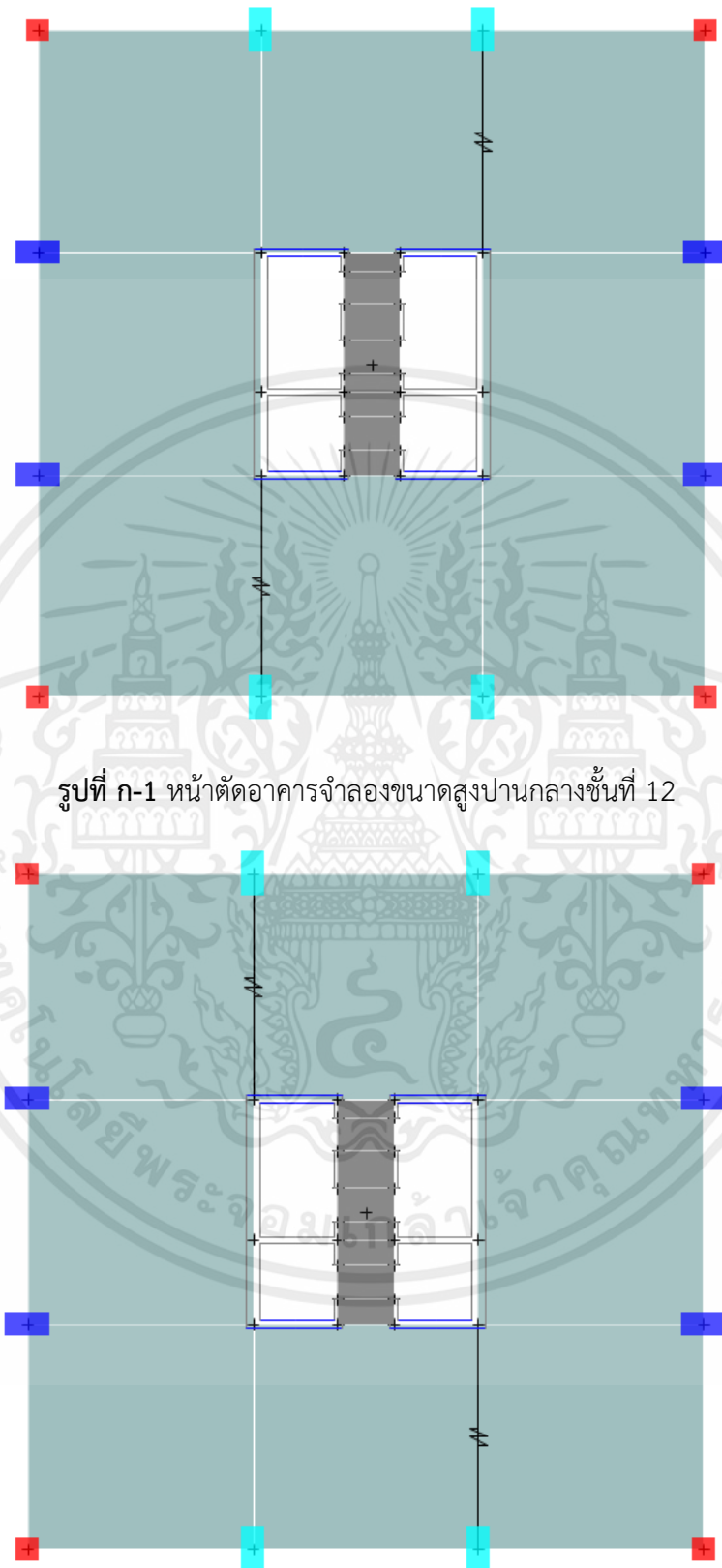
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 10

รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 11

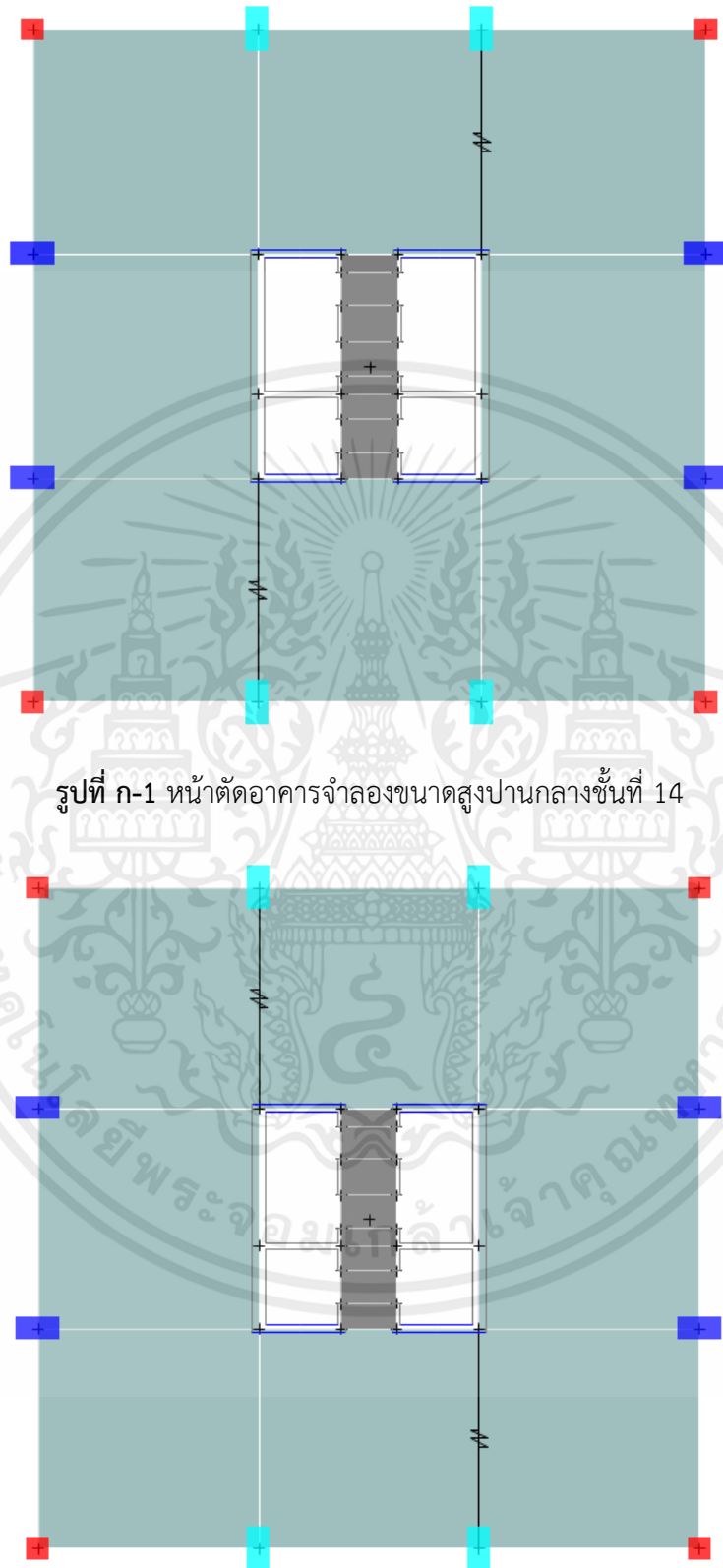
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 12

รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 13

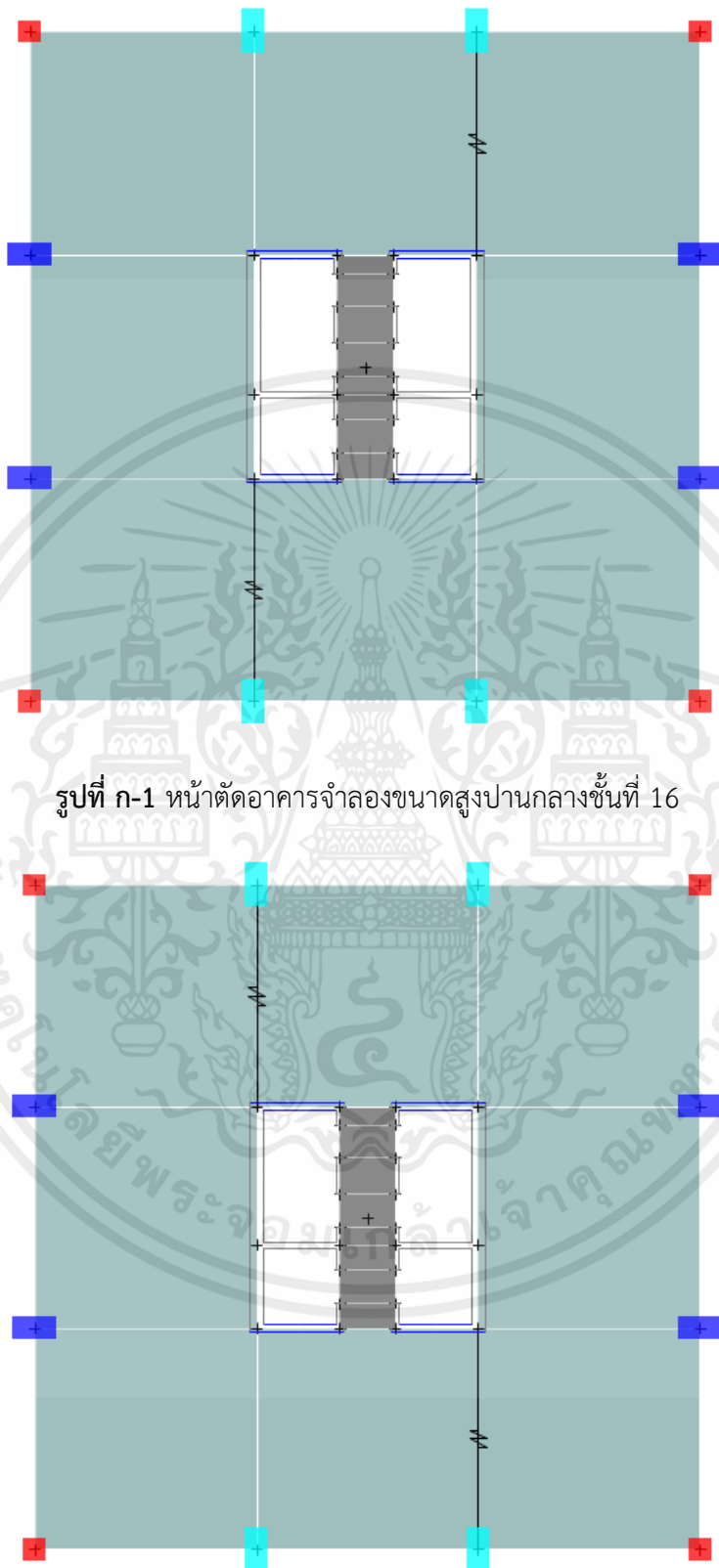
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 14

รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 15

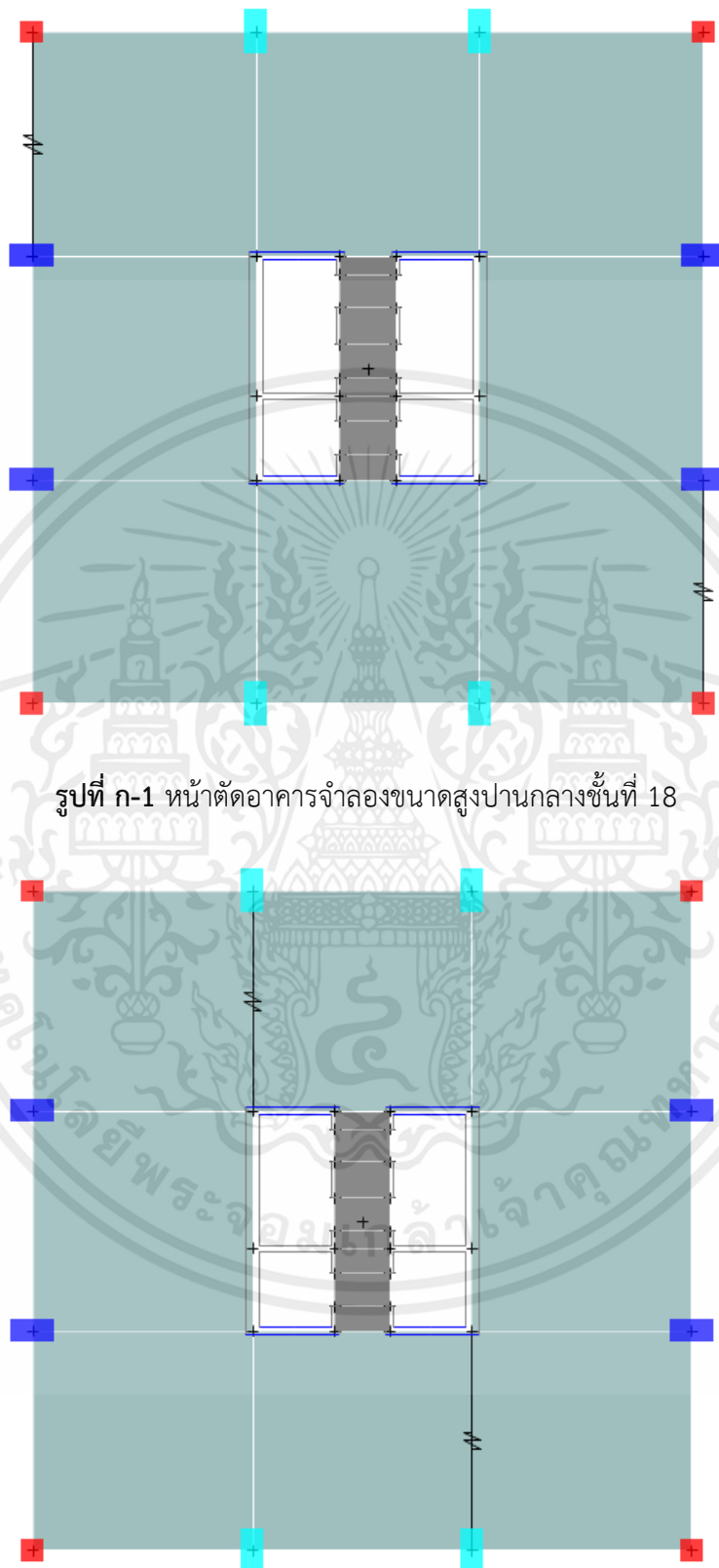
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 16

รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 17

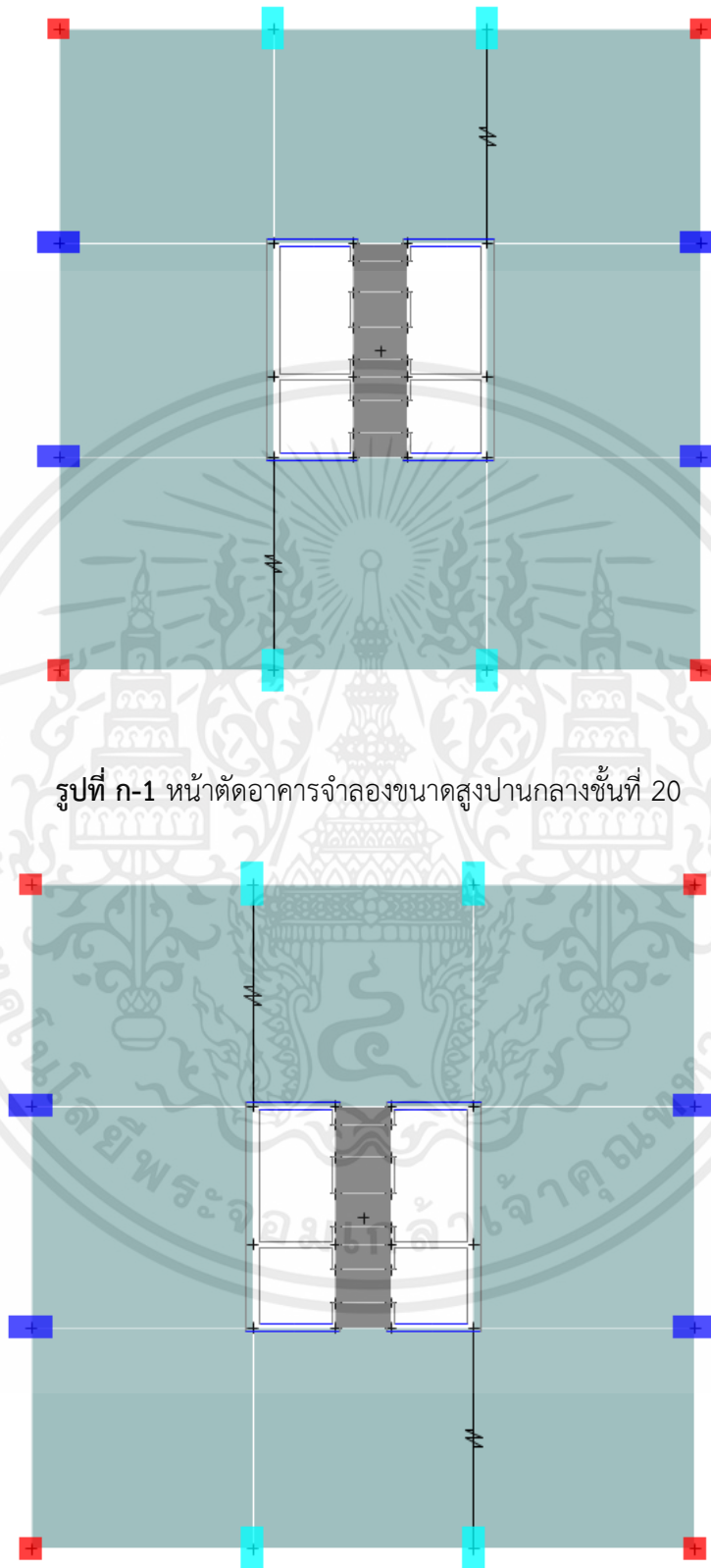
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 18

รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 19

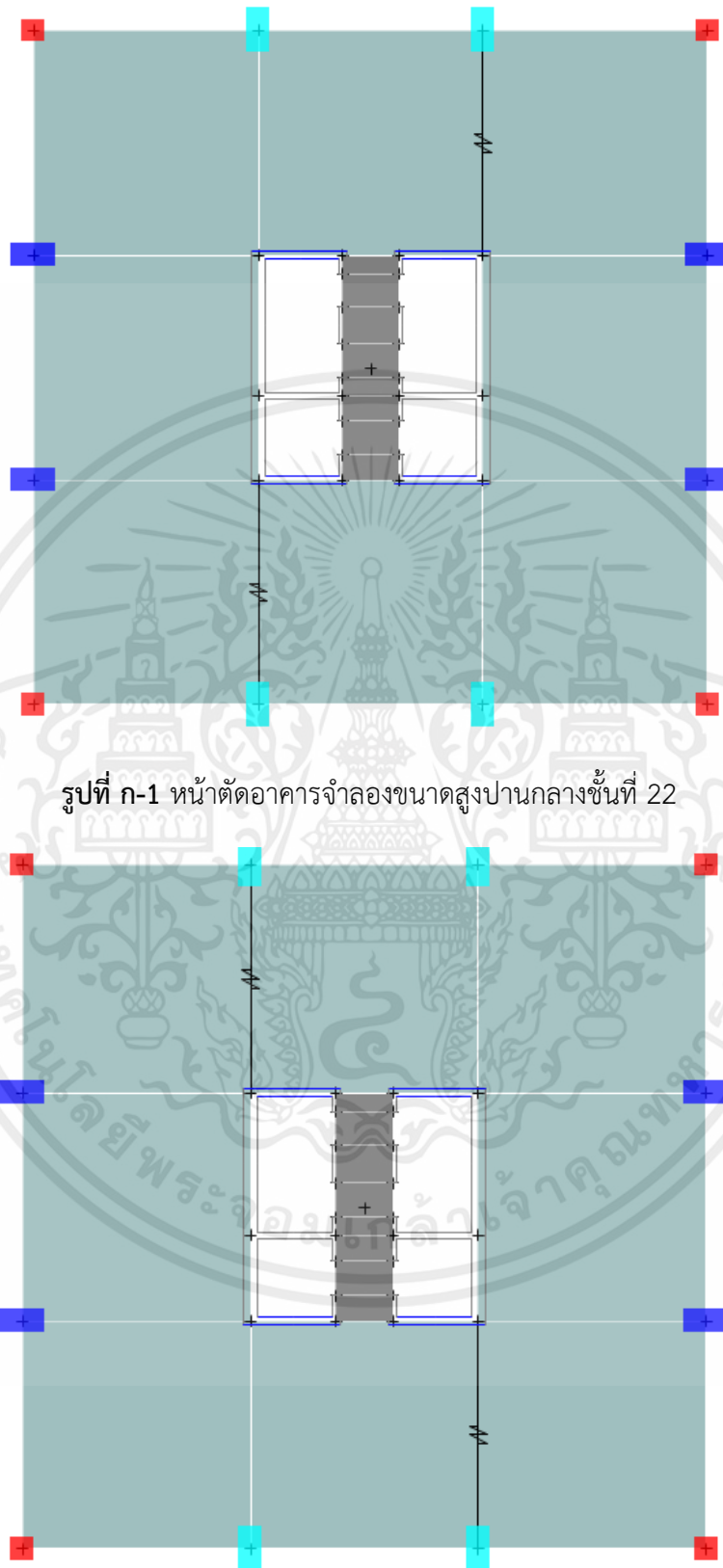
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 20

รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 21

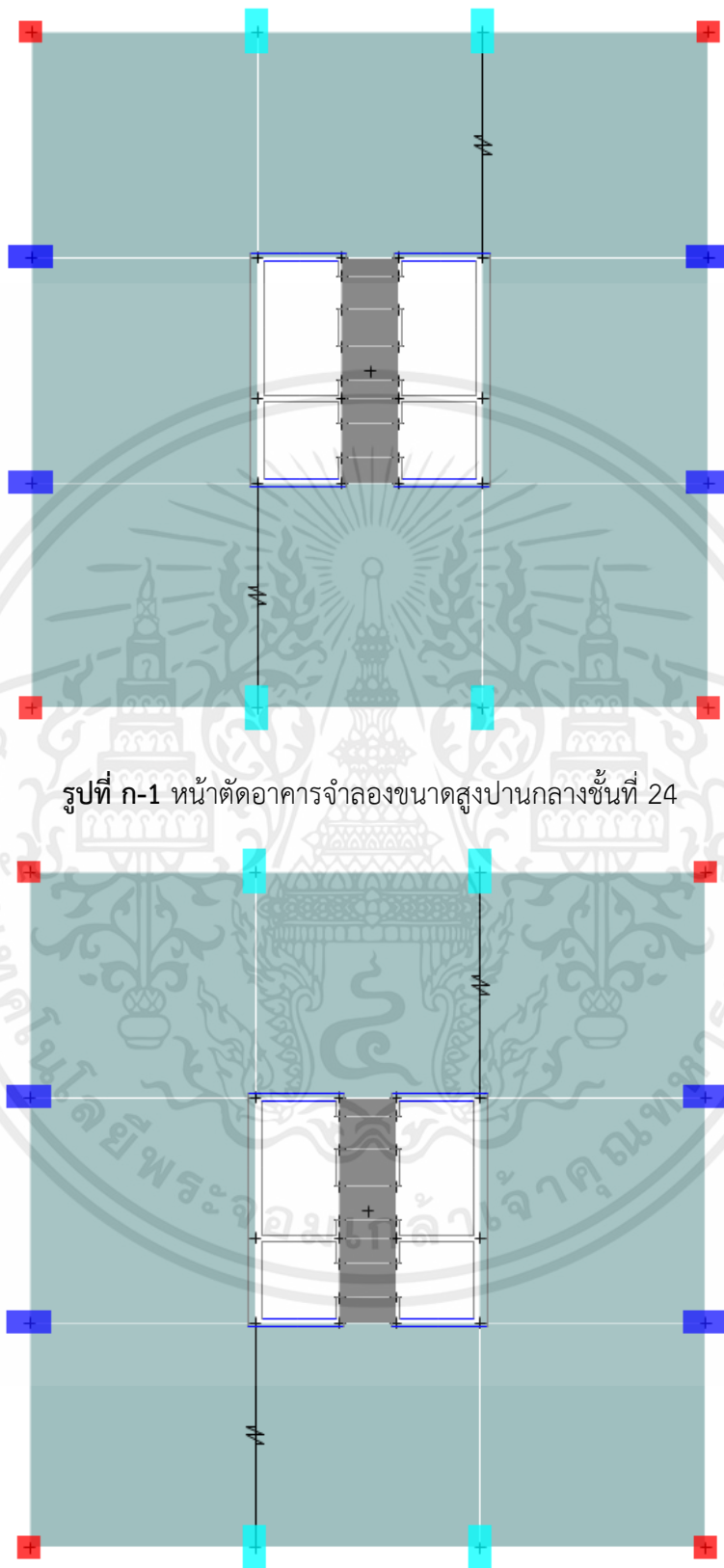
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 22

รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 23

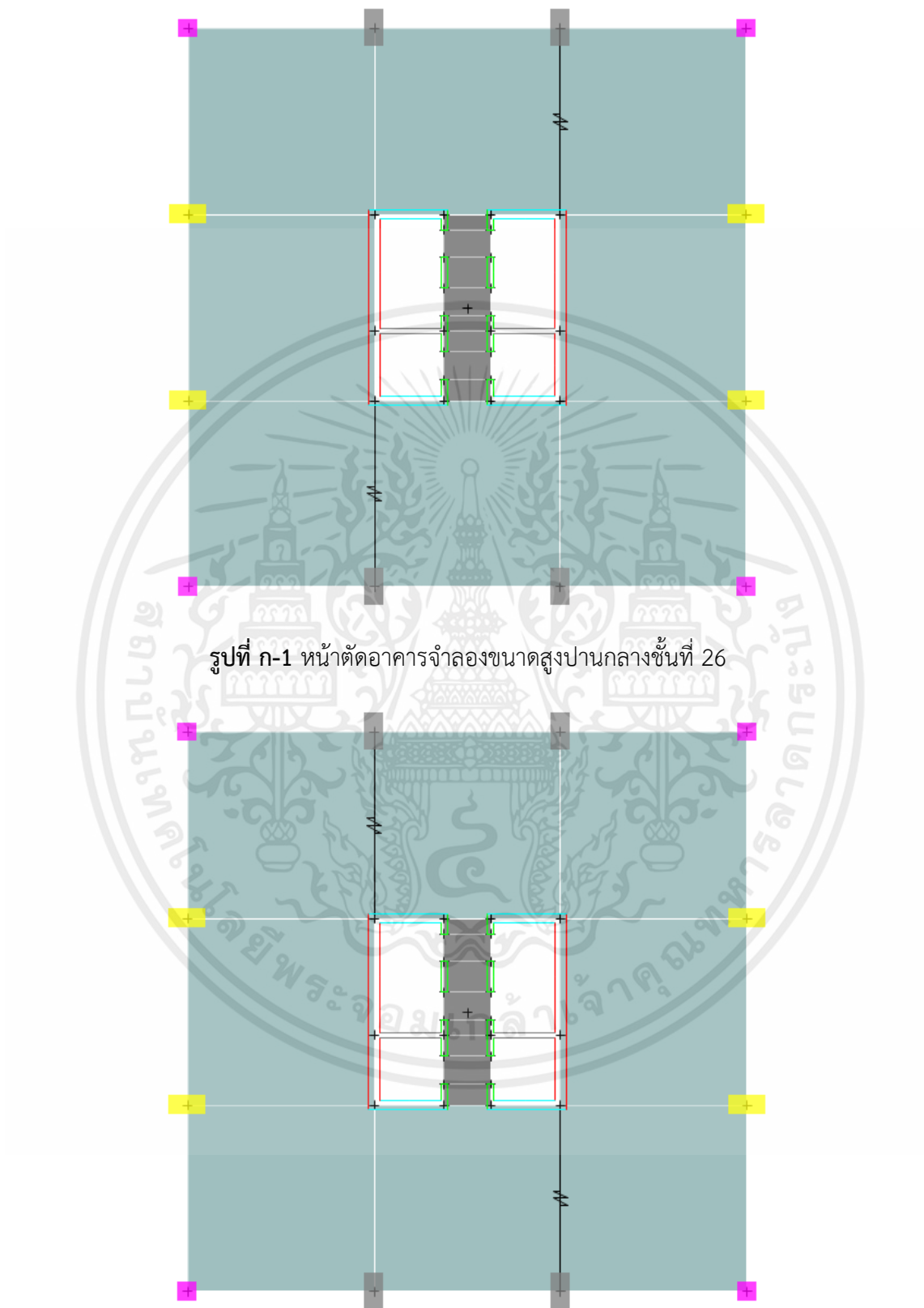
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 24

รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 25

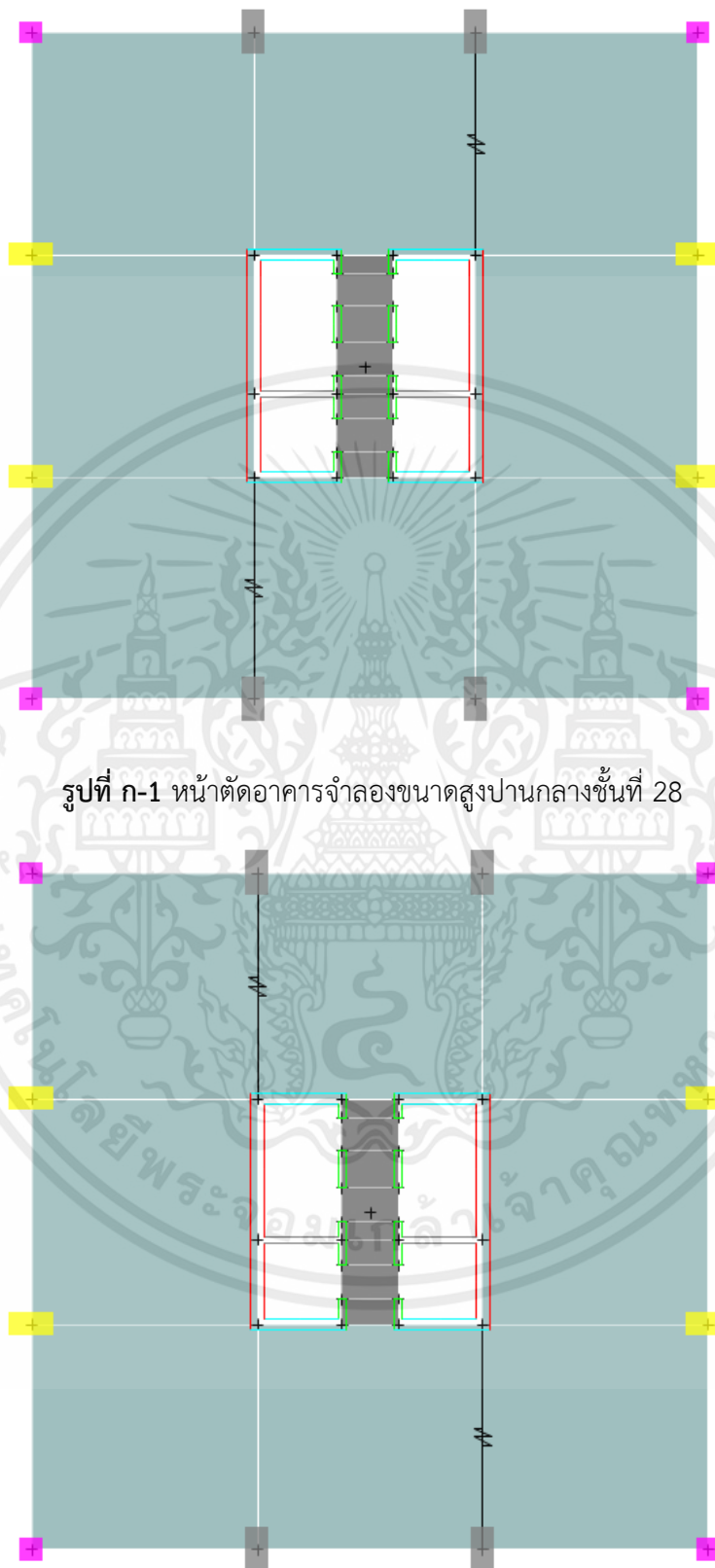
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 26

รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 28

รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 29

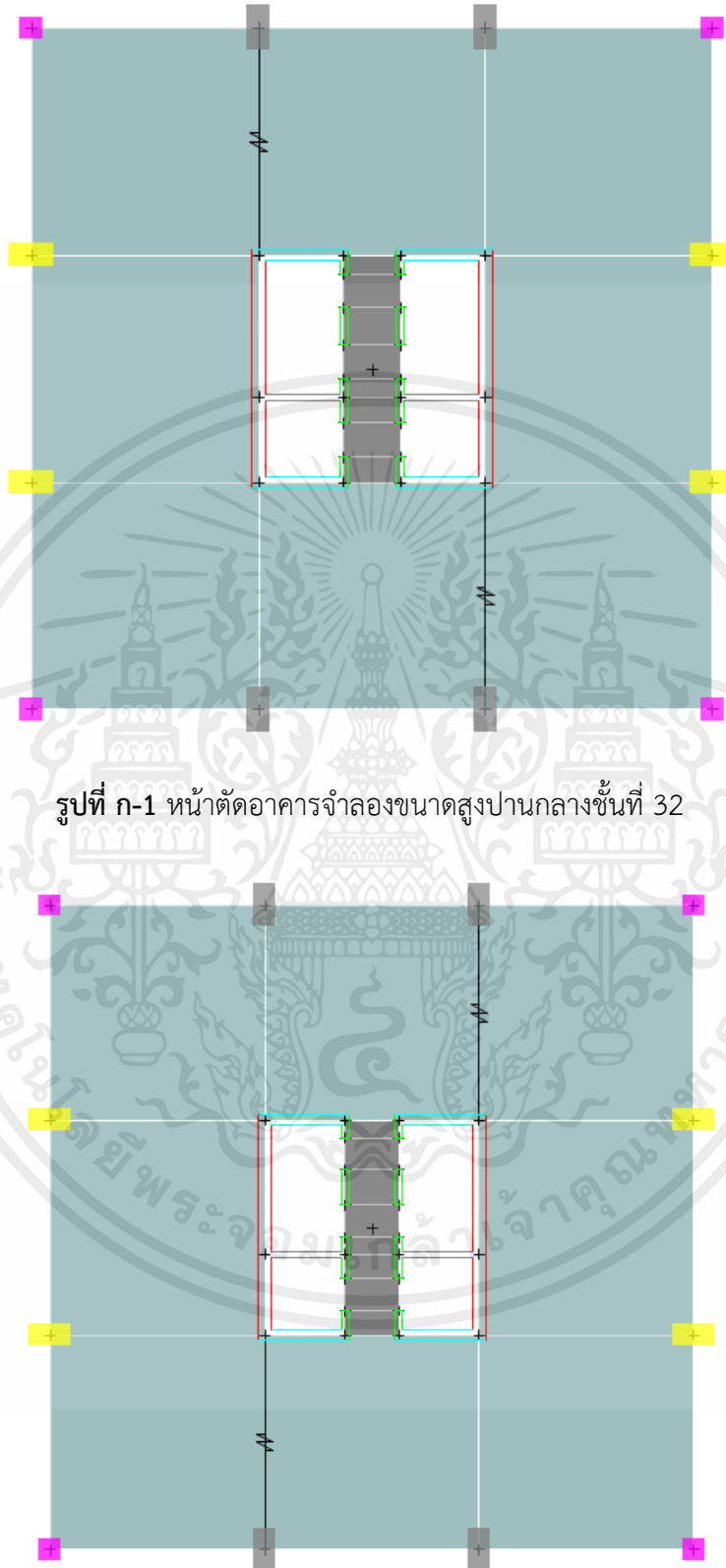
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 30

รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 31

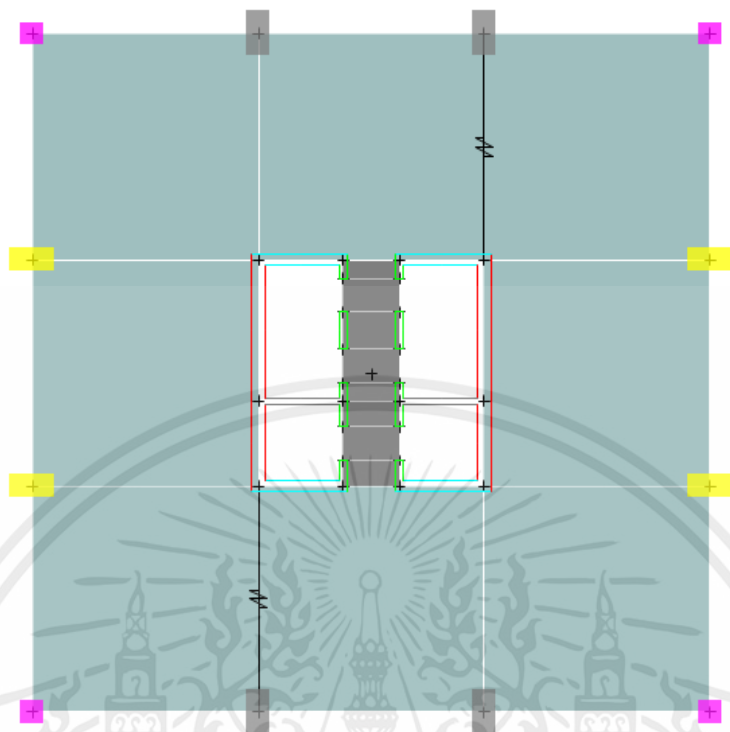
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



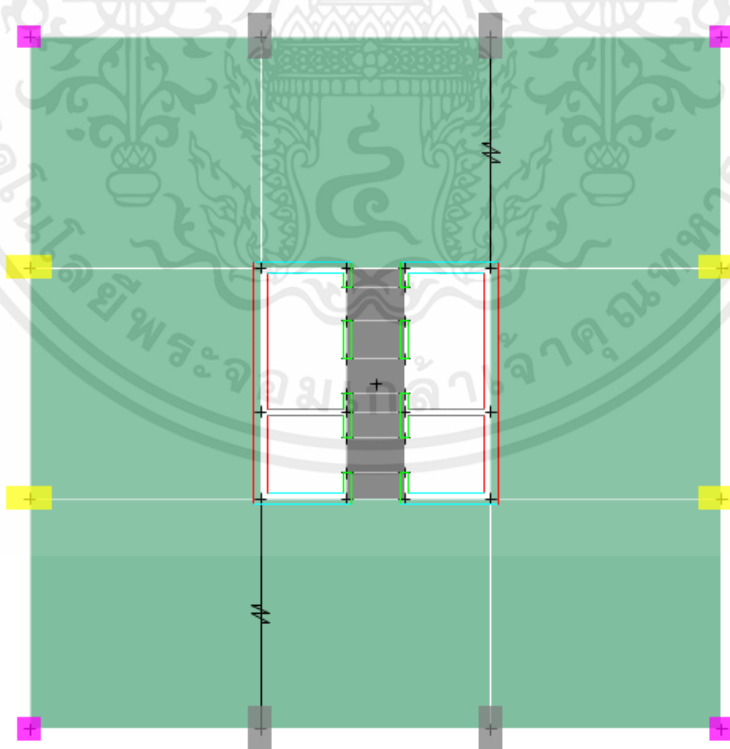
รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 32

รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

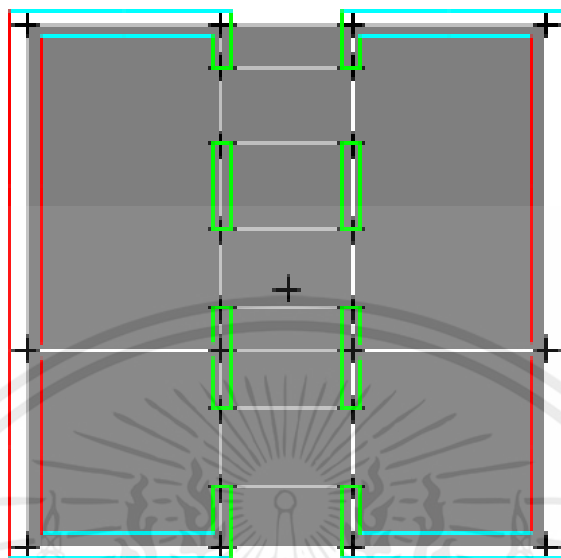


รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 34



รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-1 หน้าตัดอาคารจำลองขนาดสูงปานกลางชั้นที่ 36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้