

การเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยระบบ Outrigger
ร่วมกับแดมเปอร์แบบแรงเสียดทาน

ENHANCING SEISMIC PERFORMANCE OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS WITH
FRICTION DAMPED-OUTRIGGER SYSTEMS



รวีโรจน์ สุวรรณไตรย์

RAWIROT SUWANNATRAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2568

KMITL-2025-EN-M-097-084

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ENHANCING SEISMIC PERFORMANCE OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS WITH
FRICTION DAMPED-OUTRIGGER SYSTEMS

RAWIROT SUWANNATRAI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF
ENGINEERING IN CIVIL ENGINEERING ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND
CONSTRUCTION MANAGEMENT

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2025

KMITL-2025-EN-M-097-084

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2025

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยระบบ Outrigger ร่วมกับแดมเปอร์แบบแรงเสียดทาน
นักศึกษา	นายวีโรจน์ สุวรรณไตรย์
รหัสประจำตัว	66016077
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อม และการจัดการงานก่อสร้าง
พ.ศ.	2568
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ภาณุมาศ ไทรงาม

บทคัดย่อ

ในอดีตแผ่นดินไหวสร้างผลกระทบต่อให้กับอาคารและโครงสร้างพื้นฐานมากมายทั่วโลก โครงสร้างอาคารจำนวนมากถูกทำลายด้วยเหตุผลหลายประการเช่น ระบบต้านทานแรงด้านข้างไม่เพียงพอหรือไม่ได้ออกแบบให้อาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว อุปกรณ์สลายพลังงานหรือ Damper ถูกใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการรับแรงแผ่นดินไหวให้กับโครงสร้างอาคาร นอกจากนี้ระบบ Outrigger ก็เป็นอีกระบบที่ใช้ในการต้านแรงด้านข้าง อย่างไรก็ตามการรวมกันของสองระบบนี้ยังขาดการศึกษาอยู่ ดังนั้นการศึกษานี้จึงแนะนำการเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (RC) ด้วยระบบ Friction damped-outrigger และได้ทำการศึกษารูปแบบของ damped-outrigger สำหรับอาคารสูงโดยทำการจำลอง Truss 4 รูปแบบจะเลือก Truss ที่เหมาะสมเพื่อศึกษาความแตกต่างของความแข็งและกำลังต้านทานแรงโดยใช้ระเบียบวิธี Finite element เพื่อศึกษาผลกระทบของระบบ Friction damped-outrigger อาคารสูง 72 เมตร RC Brace frame ถูกใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของ damped-outrigger อาคารนี้ถูกออกแบบสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี Nonlinear time history analysis เพื่อศึกษาผลตอบสนองและประสิทธิภาพหลังจากที่ได้ติดตั้ง damped-outrigger นอกจากนี้ friction damper ถูกติดตั้งกับ outrigger เพื่อสลายพลังงานจากแผ่นดินไหว จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพด้านการต้านแผ่นดินไหวของอาคารที่ใช้ระบบ Friction damped-outrigger เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับอาคารที่ไม่ได้ติดตั้ง

คำสำคัญ: ระบบ damped-outrigger, อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก, อุปกรณ์สลายพลังงานแบบแรงเสียดทาน, การวิเคราะห์เชิงตัวเลข, รูปแบบของ outrigger, โครงแกงแนง



Thesis	Enhancing Seismic Performance of Reinforced Concrete Buildings with Friction Damped-Outrigger Systems
Student	Mr. Rawirod Suwannatrai
Student ID.	66016077
Degree	Master of Engineering
Program	(Civil Engineering Environmental Engineering and Construction Management)
Year	2025
Thesis Advisor	Asst. Prof Dr. Panumas Saingam

ABSTRACT

In the past, earthquakes have affected numerous buildings and infrastructures worldwide. Many structures were damaged due to insufficient lateral resistance systems or a lack of seismic resistance. Energy-dissipation devices or dampers are used to improve the seismic performance of the structures. In addition, the outrigger system is another system, which is used to resist the lateral force. However, the combination of these two systems has not been investigated clearly yet. Therefore, this study introduces enhancing the seismic performance of reinforced concrete (RC) buildings with friction-damped-outrigger systems. The impact of the topology of damped-outriggers on high-rise buildings is investigated. Four types of trusses are varied to investigate the difference in the stiffness and energy dissipation of the outrigger by using the finite element method. To investigate the effect of the friction damped-outrigger systems, A 72-meter-tall RC building was exemplified.

Nonlinear response history analysis (NLRHA) was performed to investigate the seismic performance of the buildings and efficiency after the installation of outriggers. In addition, a friction damper was installed on the outrigger to dissipate energy to improve

additionally the seismic performance of the damped-outriggers RC buildings. The result shows that the seismic performance of the reinforced concrete (RC) buildings with friction-damped-outrigger systems is improved when compared to the RC structures without the system.

Keyword: Damped-outrigger system, RC building, Friction damper, Numerical analysis, Truss outrigger shape, Bracing



กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบคุณ ผศ.ดร. ภาณุมาศ ไทรงาม สำหรับการแนะนำและสนับสนุนแนวความคิดงานวิทยานิพนธ์นี้ และอีกทั้งยังให้ความรู้ทางด้านทฤษฎีและปฏิบัติอย่างตลอดระยะเวลาการศึกษา จนผู้จัดทำสามารถทำงานวิทยานิพนธ์นี้แล้วเสร็จ ขอขอบคุณ Hnin Hnin Hlaing นักศึกษาปริญญาเอก ที่ได้ให้ความช่วยเหลือการสืบค้นข้อมูลสำหรับทำวิจัยนี้ และให้คำแนะนำที่มีประโยชน์สำหรับงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณทุกการศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ช่วยเหลือในเรื่องค่าใช้จ่ายในการศึกษาแต่ละภาค การศึกษาซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อความก้าวหน้าในการศึกษาและการทำวิจัย ท้ายที่สุดผู้จัดทำขอขอบคุณต่อบิดามารดาที่ได้ให้ทั้งกำลังใจและอยู่เบื้องหลังความสำเร็จมาโดยตลอด วิทยานิพนธ์ฉบับนี้อาจไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ หากขาดการสนับสนุนและความช่วยเหลือจากทุกท่านที่กล่าวมา

นายรวีโรจน์ สุวรรณไตรย์

The author would like to express sincere gratitude to Asst. Prof. Dr. Panumas Saingam for his invaluable guidance and support throughout the development of this thesis. His knowledge and encouragement, both in theoretical and practical aspects, have been instrumental in the successful completion of this research. Special thanks are also extended to Ms. Hnin Hnin Hlaing, a Ph.D. student, for her assistance in literature research and for providing helpful suggestions that contributed significantly to this study. The author would like to thank the School of Engineering for providing financial support throughout each academic semester, which has played a crucial role in the advancement of this research and the author's academic journey. Lastly, heartfelt appreciation is extended to the author's parents, whose unwavering encouragement and support have been the foundation behind every achievement. This thesis could not have been completed without the generous support and assistance of all the individuals mentioned above.

Rawirod Suwannatrai

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1	1
1.1 ความสำคัญการต้านทานแรงด้านข้างของอาคารสูง	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
บทที่ 2	4
2.1 ประเภทของระบบโครงสร้างอาคาร	4
2.2 ระบบโครงสร้าง Outrigger	8
2.2.1. การจัดแบ่งตามวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง.....	9
2.2.2. การจัดแบ่งตามพฤติกรรมของโครงสร้าง	10
2.2.3 วิธีการติดตั้ง Outrigger ระหว่างโครงสร้างภายในกับโครงสร้างภายนอก	11
2.3 การหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้ง Outrigger	12
2.4 ระบบ Damper สำหรับ Outrigger.....	16
2.5 รูปแบบของ Outrigger (Topology of Outrigger).....	22
บทที่ 3	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการ.....	28
3.2.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง (Literature review).....	28
3.2.2 กำหนดอาคารตัวอย่าง.....	28
3.2.3 กำหนดรูปแบบโครง Truss สำหรับ Outrigger	37
3.2.4 การวิเคราะห์ Truss Outrigger ด้วยวิธี Pushover และ Cyclic loading	38
3.2.4 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของอาคาร	40
3.2.5 การติดตั้ง Friction damper เข้ากับ Outrigger.....	43
บทที่ 4	44
4.1 ผลการวิเคราะห์ Outrigger Truss.....	44
4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Modal Analysis.....	53
4.3 ผลลัพธ์ Pushover Analysis กับอาคารตัวอย่าง.....	56
4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Nonlinear time history analysis.....	62
4.4.1 ผลลัพธ์ Displacement แต่ละชั้นของอาคาร.....	65
4.4.2 ผลลัพธ์ Story drift ratio แต่ละชั้นของอาคาร.....	74
4.4.3 ผลลัพธ์ Roof Acceleration	81
บทที่ 5	82
เอกสารอ้างอิง Reference.....	85

สารบัญตาราง

รายการ	หน้า
ตารางที่ 2.1 Effective modal mass ratio [7]	15
ตารางที่ 2.2 ข้อมูลอาคารและความสูงที่เหมาะสมของ Outrigger	23
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดขนาดชิ้นส่วนของอาคารตัวอย่าง	28
ตารางที่ 3.2 รายการชิ้นส่วนโครงสร้าง	29
ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของเหล็ก A36	38
ตารางที่ 4.1 ค่าคาบการสั่นของอาคารแต่ละ Mode	54
ตารางที่ 4.2 รายการตัวอย่างการวิเคราะห์	63
ตารางที่ 4.3 คลื่นแผ่นดินไหว	64

สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบโครงสร้างภายใน [6].....	4
รูปที่ 2.2 ระบบโครงสร้างภายนอก [6].....	5
รูปที่ 2.3 แสดงการติดตั้ง Steel Frame + BRBs [2].....	6
รูปที่ 2.4 แสดงการติดตั้ง Steel Frame + Friction Damper [3].....	7
รูปที่ 2.5 แสดงการติดตั้ง Steel Frame + Viscous damper [4].....	8
รูปที่ 2.6 แสดงภาพโครงสร้าง Outrigger และการเทียบผลของค่า inter-story drift และ core bending moment [12].....	9
รูปที่ 2.7 แนวคิดของระบบ Damped Outrigger [8].....	11
รูปที่ 2.8 หลักการทำงานของ virtual outriggers (offset outriggers) [14].....	12
รูปที่ 2.9 แสดงความสูงที่เหมาะสมของ Outrigger 1 ชั้น[15].....	13
รูปที่ 2.10 แสดงความสูงที่เหมาะสมที่เปลี่ยนไปตาม Ad [15].....	14
รูปที่ 2.11 แสดงค่าคาบการสั่นของ Mode 1 และ 2 [16].....	15
รูปที่ 2.12 แสดงแผนภาพอิสระของ Outrigger building system [16].....	16
รูปที่ 2.13 รูปแบบของ Damp outrigger [8].....	17
รูปที่ 2.14 โครงสร้างทดสอบ Damped Outrigger [17].....	18
รูปที่ 2.15 แสดงค่าการเคลื่อนตัวของในแต่ละชั้นจากการทดสอบ [17].....	19
รูปที่ 2.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของแรงและการเคลื่อนตัวของ Friction damper [17].....	19
รูปที่ 2.17 แสดงกราฟค่า Inter story drift กับ ความเร่งที่หลังคา [17].....	20
รูปที่ 2.18 แสดงค่าความสูงที่เหมาะสมของ Outrigger เทียบกับ Roof story drift [17].....	20
รูปที่ 2.19 แสดงค่าการเคลื่อนตัวของ BRBs Damper เทียบกับค่า α [17].....	21
รูปที่ 2.20 แสดงค่าคาบการสั่น Mode 1 และ 2 เทียบกับค่า α [17].....	21
รูปที่ 2.21 ตารางแสดงรูปแบบของโครง Truss [19].....	23
รูปที่ 2.22 แสดง Pushover Curve ของ BOX section [19].....	24
รูปที่ 2.23 แสดง Pushover Curve ของ UD section [19].....	25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน	27
รูปที่ 3.2 แสดงแปลนอาคารตัวอย่าง.....	29
รูปที่ 3.3 แสดงรูปอาคารที่ไม่ได้ติดตั้ง Outrigger.....	30
รูปที่ 3.4 แสดงรูปอาคาร Outrigger1 0.6 Traditional.....	30
รูปที่ 3.5 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger1 0.6+Brace.....	31
รูปที่ 3.6 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger1 0.6+Damper.....	31
รูปที่ 3.7 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger1 0.8 Traditional.....	32
รูปที่ 3.8 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger1 0.8+Brace.....	32
รูปที่ 3.9 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger1 0.8+Damper.....	33
รูปที่ 3.10 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger2 0.6 Traditional.....	33
รูปที่ 3.11 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger2 0.6+Brace.....	34
รูปที่ 3.12 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger2 0.6+Damper.....	34
รูปที่ 3.13 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger2 0.8 Traditional.....	35
รูปที่ 3.14 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger2 0.8+Brace.....	35
รูปที่ 3.15 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger2 0.8+Damper.....	36
รูปที่ 3.16 แสดงชั้น Outrigger แบบที่ 1.....	36
รูปที่ 3.17 แสดงชั้น Outrigger แบบที่ 2.....	37
รูปที่ 3.18 แสดงรูปแบบ Truss แบบ T1 และแบบ T2.....	37
รูปที่ 3.19 แสดงรูปแบบ Truss แบบ T3 และแบบ T4.....	38
รูปที่ 3.20 A36 Stress Strain Curve.....	39
รูปที่ 3.21 Multilinear isotopic hardening curve.....	39
รูปที่ 3.22 Load Protocol ACI 374.1-05.....	40
รูปที่ 3.23 ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหวที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย (5% damping).....	41
รูปที่ 3.24 ผลตอบสนองของคลื่นแผ่นดินไหวเป้าหมาย (5% damping).....	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 3.25 รายละเอียดการติดตั้ง Damped Outrigger ใน Model จำลอง.....	44
รูปที่ 3.26 รายละเอียดการกำหนด Link Element สำหรับ Friction damper	44
รูปที่ 4.1 Pushover Truss T1	45
รูปที่ 4.2 Cyclic Loading Truss T1.....	46
รูปที่ 4.3 Pushover Up Truss T2.....	46
รูปที่ 4.4 Pushover Down Truss T2	46
รูปที่ 4.5 Cyclic Loading Truss T2.....	47
รูปที่ 4.6 Pushover Up Truss T3.....	47
รูปที่ 4.7 Pushover Down Truss T3	47
รูปที่ 4.8 Cyclic Loading Truss T3.....	48
รูปที่ 4.9 Pushover Truss T4.....	48
รูปที่ 4.10 Cyclic Loading Truss T4.....	48
รูปที่ 4.11 Pushover curve a. Truss T1 b. Truss T2.....	49
รูปที่ 4.12 Pushover curve a. Truss T3 b. Truss T4.....	49
รูปที่ 4.13 Hysteresis curve a. Truss T1 b. Truss T2.....	50
รูปที่ 4.14 Hysteresis curve a. Truss T3 b. Truss T4.....	50
รูปที่ 4.15 ค่าความแข็งของ Truss แต่ละแบบ.....	51
รูปที่ 4.16 ค่าการสลายพลังงาน ของ Truss แต่ละแบบ.....	52
รูปที่ 4.17 Force Displacement ของ Outrigger แต่ละแบบ.....	52
รูปที่ 4.18 Hysteresis curve ของ Truss แต่ละแบบ.....	53
รูปที่ 4.19 ค่าการสั่นของอาคารตัวอย่างแต่ละหลัง	54
รูปที่ 4.20 รูปร่างการสั่นใน Mode 1 และ Mode 2 ของ Outrigger 1,2 0.6H.....	55
รูปที่ 4.21 รูปร่างการสั่นใน Mode 3 และ Mode 1 ของ Outrigger 1,2 0.6H , 0.8H	55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
รูปที่ 4.22	รูปร่างการสั่นใน Mode 2 และ Mode 3 ของ Outrigger 1,2 0.8H.....	56
รูปที่ 4.23	Performance curve [25].....	57
รูปที่ 4.24	Pushover curve Base Shear Vs Displacement	57
รูปที่ 4.25	Pushover curve Base Shear Vs Roof Drift	58
รูปที่ 4.26	Initial Stiffness of the building	58
รูปที่ 4.27	ความเสียหายของอาคารเทียบกับ Roof Drift.....	59
รูปที่ 4.28	ความเสียหายของอาคาร a. Bare b. O1 0.6+D250.....	60
รูปที่ 4.29	ความเสียหายของอาคาร a. O1 0.6+T b. O2 0.6+D250	60
รูปที่ 4.30	ความเสียหายของอาคาร a. O2 0.6+T b. O1 0.8+D250.....	61
รูปที่ 4.31	ความเสียหายของอาคาร a. O1 0.8+T b. O2 0.8+D250.....	61
รูปที่ 4.32	ความเสียหายของอาคาร O2 0.8+T.....	62
รูปที่ 4.33	ตัวอย่างคลื่นแผ่นดินไหว.....	62
รูปที่ 4.34	Response Spectra 5% Damped.....	65
รูปที่ 4.35	Displacement Outrigger 1 a. Brace b. Traditional.....	66
รูปที่ 4.36	Displacement Outrigger 1 a. D100 b. D250.....	66
รูปที่ 4.37	Displacement a. Outrigger 1 +D1000 b. Outrigger 2 +B.....	67
รูปที่ 4.38	Displacement a. Outrigger 2+T b. Outrigger 2 +D100	67
รูปที่ 4.39	Displacement a. Outrigger 2+D250 b. Outrigger 2 +D1000	68
รูปที่ 4.40	การเคลื่อนตัวที่หลังคาของ Outrigger แบบที่ 1	68
รูปที่ 4.41	การเคลื่อนตัวที่หลังคาของ Outrigger แบบที่ 2	69
รูปที่ 4.42	Summary Displacement Outrigger 1.....	69
รูปที่ 4.43	Summary Displacement Outrigger 2.....	70
รูปที่ 4.44	Displacement Outrigger 1,2 a. 0.6 +B, b. 0.8 +B	71
รูปที่ 4.45	Displacement Outrigger 1,2 a. 0.6 +T, b. 0.8 +T	71

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 4.46 Displacement Outrigger 1,2 a. 0.6 +D100, b. 0.8 +D100.....	72
รูปที่ 4.47 Displacement Outrigger 1,2 a. 0.6 +D250, b. 0.8 +D250.....	72
รูปที่ 4.48 Displacement Outrigger 1,2 a. 0.6 +D1000, b. 0.8 +D1000	73
รูปที่ 4.49 ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของ Outrigger แบบที่ 1 และ แบบที่ 2.....	73
รูปที่ 4.50 Story Drift a. Outrigger1 +B, b. Outrigger1 +T	74
รูปที่ 4.51 Story Drift a. Outrigger1 +D100, b. Outrigger1 +D250.....	75
รูปที่ 4.52 Story Drift a. Outrigger1 +D1000, b. Outrigger2 +B	75
รูปที่ 4.53 Story Drift a. Outrigger2 +T, b. Outrigger2 +D100	76
รูปที่ 4.54 Story Drift a. Outrigger2 +D250, b. Outrigger2 +D1000	76
รูปที่ 4.55 Maximum Story Drift Outrigger 1.....	77
รูปที่ 4.56 Maximum Story Drift Outrigger 2.....	77
รูปที่ 4.57 Story Drift Outrigger 1,2 a. 0.6 +B, b. 0.8 +B.....	78
รูปที่ 4.58 Story Drift Outrigger 1,2 a. 0.6 +T, b. 0.8 +T.....	78
รูปที่ 4.59 Story Drift Outrigger 1,2 a. 0.6 +D100 b. 0.8 +D100	79
รูปที่ 4.60 Story Drift Outrigger 1,2 a. 0.6 +D250, b. 0.8 +D250	79
รูปที่ 4.61 Story Drift Outrigger 1,2 a. 0.6 +D1000, b. 0.8 +D1000.....	80
รูปที่ 4.62 Maximum Story Drift Outrigger 1,2.....	80
รูปที่ 4.63 ความเร่งสูงสุดที่หลังค้ำของ Outrigger แบบที่ 1	81
รูปที่ 4.64 ความเร่งสูงสุดที่หลังค้ำของ Outrigger แบบที่ 2	82
รูปที่ 4.65 ความเร่งสูงสุดที่หลังค้ำระหว่าง Outrigger แบบที่ 1 และแบบที่ 2.....	82

บทที่ 1

บทนำ (INTRODUCTION)

1.1 ความสำคัญการต้านทานแรงด้านข้างของอาคารสูง

ในปัจจุบันนี้การย้ายถิ่นฐานของประชากรจากที่ต่างเข้ามาในตัวเมืองใหญ่มีมากขึ้นประกอบกับขนาดของพื้นที่อยู่อาศัยในตัวเมืองเริ่มมีขนาดที่น้อยลงจนทำให้ต้องหาวิธีเพิ่มพื้นที่อยู่อาศัยต่อพื้นที่ทั้งหมด ดังนั้นตึกสูงจึงเข้ามาแก้ปัญหานี้ด้วยที่มีอัตราส่วนพื้นที่ใช้สอยต่อพื้นที่ดินทั้งหมดที่สูงกว่าอาคารเตี้ยทำให้มีประสิทธิภาพมากกว่า แต่ก็มีก็มีปัญหาตามมาเมื่อเลือกใช้ตึกสูงเช่นด้านการต้านทานแรงลมและแรงแผ่นดินไหวเช่น ในเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่อ.แม่ลาวในปี 2014 [1] ที่สร้างความเสียหายให้กับอาคารเตี้ยเช่น อาคารโรงเรียนสูง 4 ชั้น และบ้านพักอาศัย และเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ประเทศเมียนมาเมื่อปี 2025 ที่สร้างความเสียหายให้กับอาคารสูง 30ชั้น จนอาคารเกิดการพังทลายลงมา ดังนั้นเมื่ออาคารมีความสูงที่มากก็จะทำให้ค่าคาบของอาคารสูงขึ้นจนทำให้ค่า Stiffness ของอาคารนั้นต่ำลง การเพิ่ม Stiffness ของอาคารทำได้หลายวิธีเช่น การขยายขนาดของโครงสร้างซึ่งก็จะทำให้ต้องใช้วัสดุในการก่อสร้างเพิ่มขึ้นตามหลักการที่ถูกเรียกว่า “premium for height” ซึ่งถูกพูดถึงครั้งแรกโดย Fazlur Khan [5] การเลือกใช้ระบบโครงสร้างอาคารต้านทานแรงด้านข้างเช่น การเสริมกำลังให้กับอาคารด้วยระบบต้านทานแรงด้านข้าง (Damper) เนื่องจากแรงและแรงแผ่นดินไหวนั้นเมื่อกระทำกับอาคารก็จะส่งผลให้อาคารเกิดการสั่นขึ้นมาทำให้ต้องมีระบบที่จะเพิ่มความหน่วงให้กับโครงสร้างด้วยเช่นการติดตั้งระบบต้านทานการหมุนแบบต่างๆ เช่น (BRBs Friction damper Viscous damper) [2-4]เพื่อให้อาคารมีอัตราความหน่วง (Damping ratio) เพิ่มขึ้น แต่การติดตั้งระบบ Damper กับอาคารสูงอาจจะเกิดการสั่นเปลืองเนื่องจากจะต้องติดตั้งหลายชั้นและอาจทำให้ด้านนอกของอาคารไม่มีความสวยงาม ดังนั้นจึงมีการศึกษาหาวิธีระบบโครงสร้างอาคารสูงขึ้น [5-6] เพื่อให้อาคารสามารถต้านทานแรงด้านข้างได้ แต่แรงด้านข้างสามารถสร้างการสั่นไหวให้กับอาคารได้จึงต้องมีระบบสลายพลังงานมาเพิ่ม Damping ratio เพื่อลดการสั่นไหวเช่นระบบ Tune mass damper (TMD) [7], Damp Outrigger[8] และ Viscous Damper[9]

ระบบ Outrigger [10] เป็นระบบต้านแรงด้านข้างสำหรับอาคารสูงโดยจะมีลักษณะเป็น Truss หรือ คานลึก ระบบนี้จะมีถ่ายแรงจากแกนอาคารมายังเสารอบนอก (Perimeter column) เมื่ออาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดการเอียงตัวเนื่องจากแรงด้านข้างจะทำให้เสาอบนอกเกิดการยึดตัวและหดตัว โดยระบบนี้สามารถลดค่าการเคลื่อนตัวและค่า Overturning moment ของอาคารได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่ระบบนี้ยังไม่สามารถสร้างอัตราส่วนความหน่วงเพื่อลดการสั่นของโครงสร้างได้ ดังนั้น จึงมีการติดตั้ง Damper ชนิดต่างๆ เข้ากับ Outrigger เพื่อสร้างอัตราส่วนความหน่วงขึ้นจึงมีชื่อเรียกว่า Damp Outrigger [8]

ในการศึกษานี้จะทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบโครงสร้างของอาคารสูงที่ใช้ระบบ Steel Truss Outrigger ซึ่งรูปแบบของ Truss Outrigger แต่ละรูปแบบก็จะมีความแข็ง (Stiffness) ที่แตกต่างกันรวมไปถึงประสิทธิภาพในด้านการรับแรงสั่นไหวที่เกิดจากผลของแรงแผ่นดินไหว ดังนั้นจึงมีการนำอุปกรณ์สลายพลังงาน (Damper) มาติดตั้งร่วมกับ Outrigger ด้วยซึ่งจะเรียกว่า (Damp Outrigger) [8] ระบบการทำงานของอุปกรณ์สลายพลังงานจะทำการสลายพลังงานที่เกิดจากสั่นไหวและลดการเคลื่อนตัวของอาคารลง ระบบโครงสร้างอาคารที่จะนำมาเป็นอาคารตัวอย่างจะใช้ระบบโครงสร้างแบบ RC Brace Frame สูง 20 ชั้น มีการติดตั้ง Truss Outrigger จำนวน 1 ชั้น และทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธี Nonlinear time series analysis เพื่อหาประสิทธิภาพของอาคารต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1. เพื่อศึกษาหารูปแบบของ Truss Outrigger ที่มีประสิทธิภาพในการต้านแรงแผ่นดินไหวที่ดีที่สุด
- 1.2.2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารเมื่อทำการติดตั้ง Damp Outrigger ที่ตำแหน่งต่างกัน
- 1.2.3. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการรับแรงแผ่นดินไหวของอาคารที่ไม่ได้ติดตั้ง, ติดตั้ง Outrigger, และติดตั้ง Damp outrigger
- 1.2.4. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการรับแรงแผ่นดินไหวของอาคารเมื่อติดตั้ง Outrigger truss ที่มีรูปแบบแตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1. ใช้อาคารระบบโครงสร้าง RC Brace frame สูง 20 ชั้น เป็นอาคารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2. ใช้ Steel truss outrigger ติดตั้งกับอาคารตัวอย่างเพื่อหาผลตอบสนองของอาคาร

1.3.3. ใช้ Friction damper ขนาด 100, 250 และ 1000 kN เป็นตัวหน่วงให้กับ ระบบ

Damp outrigger

1.3.4. ระดับความสูงของ Damp Outrigger เท่ากับ 0.60 และ 0.80 เท่าของความสูงอาคาร

1.3.5 ใช้วิธี Nonlinear time history analysis ในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของอาคาร



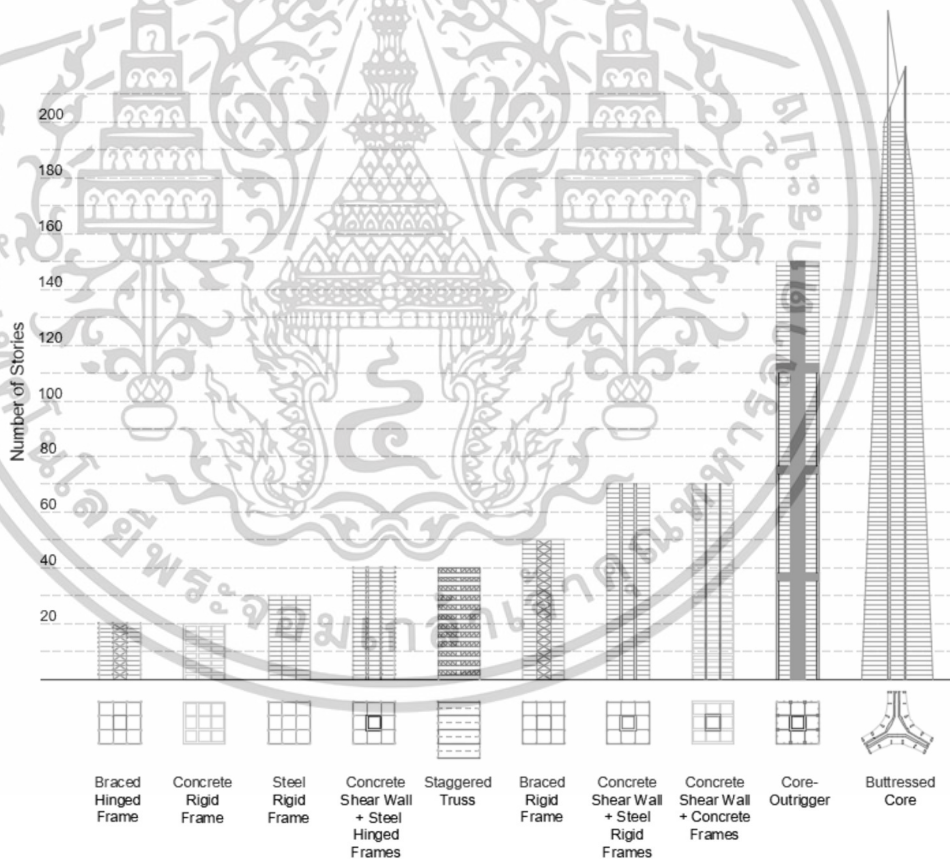
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์ (LITERATURE REVIEW)

2.1 ประเภทของระบบโครงสร้างอาคาร

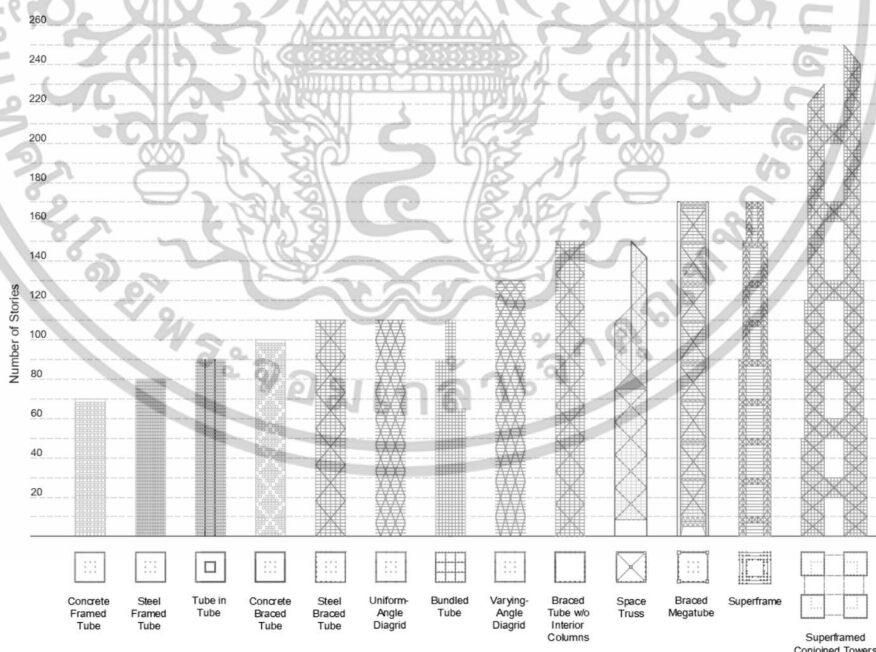
ระบบโครงสร้างอาคารสูงในปัจจุบันประกอบไปด้วยโครงสร้างภายในและโครงสร้างภายนอก ในการศึกษาของ Mir M. Ali [5-6] ได้นำเสนอและปรับปรุงระบบโครงสร้างอาคารสูงที่ใช้ในปัจจุบัน โดยจำแนกระบบโครงสร้างแต่ละประเภทตามความสูง ระบบโครงสร้างภายในส่วนใหญ่จะใช้ระบบ Rigid frame และระบบ Shear wall เป็นต้น ตามแสดงในรูปที่ 2.1 ระบบโครงสร้างนี้จะทำหน้าที่ต้านแรงด้านข้างที่กระทำกับตัวอาคารเช่น แรงลม แรงแผ่นดินไหว



รูปที่ 2.1 ระบบโครงสร้างภายใน [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

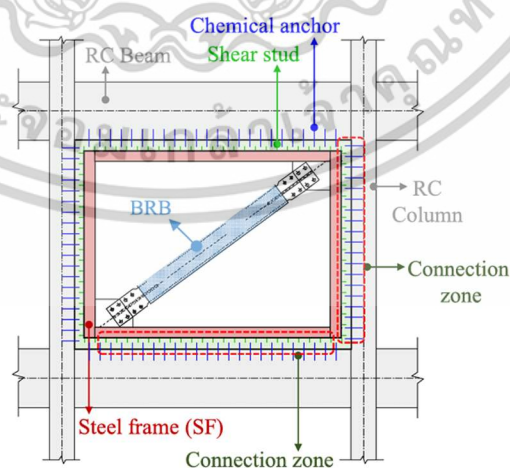
โดยในแผนภูมินี้ระบบอาคารประเภทต่างๆจะแบ่งตามความสูงที่มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้วิศวกรโครงสร้างได้เลือกใช้ สำหรับข้อดีและข้อเสียของระบบโครงสร้าง RC rigid frame จะมีข้อดีในด้านการก่อสร้างง่ายและสามารถที่จะกำหนดแผนผังอาคารได้ง่าย ส่วนข้อเสียคือมีค่าใช้จ่ายของแบบหล่อคอนกรีตที่สูงและก่อสร้างได้ช้าเนื่องจากต้องรอให้คอนกรีตได้กำลังก่อนการถอดแบบหล่อ และในส่วนของระบบ shear wall จะมีข้อดีคือ shear wall จะทำหน้าที่ต้านทานแรงด้านข้าง อย่างไรก็ตามอาคารที่ใช้ระบบ shear wall นี้จะมีข้อจำกัดในการใช้พื้นที่เนื่องจากต้องมีพื้นที่ให้ shear wall ระบบ Core Outrigger มีข้อดีในการช่วยลดค่า Displacement Story drift ratio ลง และลดค่า Overturning moment ทำให้สามารถออกแบบฐานรากให้เล็กกลงและประหยัดงบประมาณในการก่อสร้างได้ แต่ก็มีข้อเสียในระยะเวลาการก่อสร้างเมื่อก่อสร้างไปถึงชั้นที่มี Outrigger จะใช้เวลาในการก่อสร้างมากกว่าการก่อสร้างชั้นที่ไม่มี Outrigger และพื้นที่ใช้สอยที่ต้องเสียไปเพื่อติดตั้ง Outrigger โดยชั้นที่ติดตั้ง Outrigger สามารถใช้ทำเป็นห้องหลบภัยหรือห้องเครื่องจักรได้ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอระบบโครงสร้างภายนอก เช่น Frame Tube, Tube in tube, Brace tube ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบกล่องโดยจะมีแกนอาคารที่เป็นระบบโครงสร้างภายในอยู่ตรงกลางทำให้ไม่ต้องมีเสาภายในซึ่งจะช่วยให้มีพื้นที่ใช้สอยเพิ่มขึ้น ส่วนบริเวณขอบของอาคารจะประกอบไปด้วยโครง brace ลักษณะต่างๆที่ขึ้นอยู่กับกรอบแบบทางด้านงานสถาปัตยกรรม ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ระบบโครงสร้างภายนอก [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับการเสริมกำลังให้กับระบบโครงสร้างอาคารเดิมที่มีความสูงไม่มากด้วยวิธีต่างๆ เช่นการติดตั้ง Steel Brace[15] และการติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงาน (Damper) เช่น Viscous Damper, Buckling-restrained-brace (BRBs) และ Friction damper [2-4] เพื่อลดความเสียหายให้กับอาคาร ในการศึกษาของ Rawirod, et al. [11] ได้ศึกษาและเสริมกำลังให้กับอาคารโรงเรียนสูง 4 ชั้น ด้วยระบบ Steel Brace โดยได้นำเสนอสมการสำหรับคำนวณหาปริมาณของ Steel Brace ซึ่งใช้ความแข็งแรงอาคารเดิมและความแข็งแรงของ Steel Brace มาคำนวณเพื่อเพิ่มความแข็งแรงโดยรวมของโครงสร้างตามการเคลื่อนตัวเป้าหมายที่ต้องการ จากการเสริมกำลังด้วย Steel Brace แล้ววิเคราะห์อาคารด้วยวิธี Equivalent linear static พบว่าสามารถลดค่า Story Drift ของอาคารได้ต่ำกว่าเป้าหมายที่ตั้งไว้และสามารถเพิ่มความแข็งแรงของอาคารได้สูง 78% เมื่อเทียบกับความแข็งแรงของอาคารเดิม แต่ระบบ Steel brace ก็มีข้อเสียถ้าเกิดการวิบัติแล้วจะต้องเปลี่ยนใหม่และถ้า Steel brace ค่าความแข็งแรงที่สูงเกินไปก็จะสร้างความเสียหายให้กับโครงสร้างหลักได้ ดังนั้นจึงมีการคิดค้นอุปกรณ์สลายพลังงานขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหานี้ Saingam, Panumas, et al.(2020) [2] ได้ศึกษาการเสริมกำลังให้กับอาคารโรงเรียนสูง 4 ชั้น ด้วย Buckling-restrained-brace (BRBs) ซึ่งในการศึกษานี้ได้เสริม Steel Frame ร่วมกับ BRBs ด้วยทำให้สามารถที่จะลดขนาดของ BRBs ลดได้เนื่องจากผลของพฤติกรรม Composite ระหว่าง Steel Frame กับชิ้นส่วนเสากับคาน นอกจากนี้ยังได้นำเสนอสมการคำนวณปริมาณของ BRBs จากผลของพฤติกรรม Composite ด้วยวิธี Constant drift method (CD Method) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี NLRHA (Nonlinear time history analysis) พบว่าสามารถลดค่าการเคลื่อนตัวของอาคารลงได้ตามเป้าหมายการเคลื่อนตัวที่ตั้งไว้



รูปที่ 2.3 แสดงการติดตั้ง Steel Frame + BRBs [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธี CD method ยังถูกใช้ในการคำนวณหาปริมาณของ Friction damper และ Viscous damper อีกด้วย ในการศึกษาของ Saingam, Panumas, et al.(2021) [3] ที่ได้ทำการทดสอบ Friction damper เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของ Friction pad แต่ละชนิดที่ทำจาก Polymer และ โลหะ นอกจากนี้ยังได้นำเสนอสมการสำหรับคำนวณหาปริมาณของ Friction damper ด้วยวิธี CD method โดยนำมาติดตั้งกับอาคารสูง 4 ชั้นและวิเคราะห์ด้วย NLRHA เพื่อหาประสิทธิภาพของอาคาร เมื่อทำการติดตั้ง Friction damper จากการเสริมกำลังด้วย Damper นี้สามารถลดค่า Story drift ลง เหลือ 0.5% drift ซึ่งสามารถลดความเสียหายของอาคารลดได้และ Damper ชนิดนี้เกิดความเสียหาย น้อยกว่า BRBs ที่เมื่อเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่แล้วต้องมีการเปลี่ยนใหม่ทั้งหมดอีกทั้งยังมีราคาที่ถูกจึง เหมาะที่จะนำมาเสริมกำลังให้กับอาคารต่างๆ

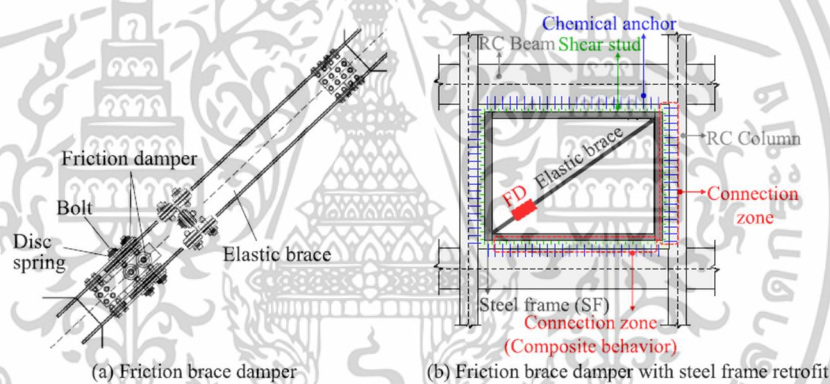
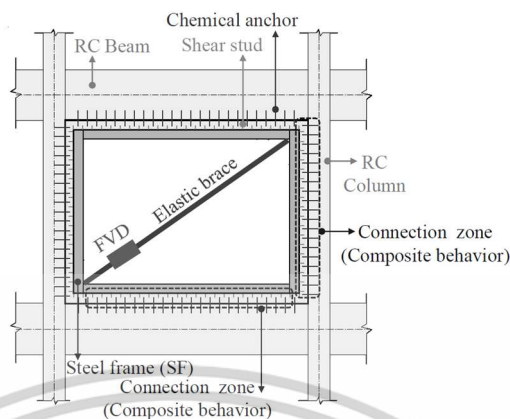


Fig. 16. Retrofit of RC frame using friction brace dampers with steel frames.

รูปที่ 2.4 แสดงการติดตั้ง Steel Frame + Friction Damper [3]

อีกการศึกษาของ Saingam, Panumas, et al.(2021) [4] ที่ได้เสริมกำลังให้กับอาคารเก่าด้วย ระบบ Viscous damper ร่วมกับ Steel Frame โดยจะใช้พฤติกรรม Composite มาช่วยลดขนาดของ Damper และยังได้นำเสนอสมการที่มีพื้นฐานมาจาก CD method สำหรับคำนวณปริมาณของ Damper ที่จะใส่เข้าไปกับอาคารโรงเรียนสูง 4 ชั้น จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี NLRHA การติดตั้ง Steel Frame ร่วมกับ Damper นอกจากจะสามารถลดการเคลื่อนที่ของอาคารลดได้อย่างมีนัยสำคัญแล้วยังสามารถลด ขนาดของ Damper ลงได้

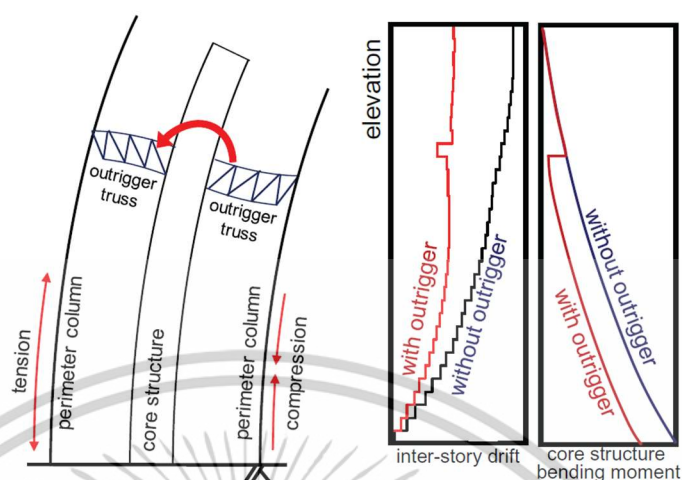


รูปที่ 2.5 แสดงการติดตั้ง Steel Frame + Viscous damper [4]

จากการเสริมกำลังให้กับอาคารเก่าด้วย Steel Frame + Damper ชนิดต่างๆ [16-18] ถึงแม้ว่าจะก่อสร้างยากกว่าการติดตั้ง damper เพียงอย่างเดียวแต่วิธีนี้ก็สามารถที่จะลดค่าใช้จ่ายของ damper ลงได้เนื่องจากผลของพฤติกรรม Composite ระหว่าง RC Frame กับ Steel Frame ทำให้ขนาดของ damper ลดลงแต่ก็ยังคงความสามารถที่จะลดค่าการเคลื่อนที่ของอาคารลงได้อย่างมีนัยสำคัญ

2.2 ระบบโครงสร้าง Outrigger

ระบบโครงสร้าง Outrigger เป็นระบบต้านแรงด้านข้างโดยมีลักษณะเป็นคานกลีหรือโครง Truss ที่เชื่อมต่อแกนอาคาร (Core) เข้ากับเสารอบนอก (Perimeter column) เมื่อโครงสร้างอาคารเกิดการเสียรูปเนื่องจากแรงด้านข้างจะทำให้แกนอาคารเอียงตัวและส่งแรงผ่าน Outrigger จนทำให้เสารอบนอกเกิดการยืดและหดตัวจากแรงคู่ควบจากแกนอาคารทำให้อาคารสามารถต้านทานโมเมนต์ได้มากขึ้นทำให้ขนาดฐานรากของอาคารมีขนาดที่เล็กลงจากการลดลงของ Overturning Moment และลดการเคลื่อนตัวของอาคารตามที่แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงภาพโครงสร้าง Outrigger และการเทียบผลของค่า inter-story drift และ core bending moment [12]

สำหรับระบบอาคารสูงที่ใช้ Outrigger ในการรับแรงด้านข้างสามารถแบ่งออกได้ตามวัสดุที่ใช้ เช่น คอนกรีต เหล็ก และ Composite ในการศึกษาของ Alhaddad, Wael, et al. [13] ได้แบ่งประเภทของ Outrigger ดังนี้คือ

2.2.1. การจัดแบ่งตามวัสดุที่ใช้ก่อสร้าง

2.2.1.1. Steel Outrigger: ระบบ Outrigger ประเภทนี้ถูกใช้อย่างแพร่หลายตามอาคารสูงโดยรูปแบบของ Outrigger จะเป็นรูปแบบ Truss โดยจะมีข้อดีที่มีน้ำหนักที่เบากว่า และมีช่องเปิดที่มากกว่า Concrete Outrigger

2.2.1.2. Concrete Outrigger: คือ ระบบโครงสร้างที่นำคอนกรีตมาใช้ก่อสร้างตัว Outrigger โครงสร้างของระบบนี้จะมีรูปแบบของกำแพงหรือคานลึก (Concrete wall, Deep beam) โดยระบบนี้จะมีข้อดีที่มีค่าความแข็ง (Stiffness) ที่สูงกว่าประเภทอื่น แต่ก็มีข้อเสียเช่นมีความเปราะจากตัววัสดุที่ใช้ทำ และช่องเปิดที่น้อยหรือไม่สามารถเจาะช่องเปิดที่ตัว Deep beam ได้

2.2.1.3. Hybrid Outrigger: คือ ระบบโครงสร้างที่นำข้อดีของคอนกรีตและเหล็กมารวมกัน การก่อสร้างระบบนี้จะเป็นการสร้างรวมกันของ steel truss และ concrete wall

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

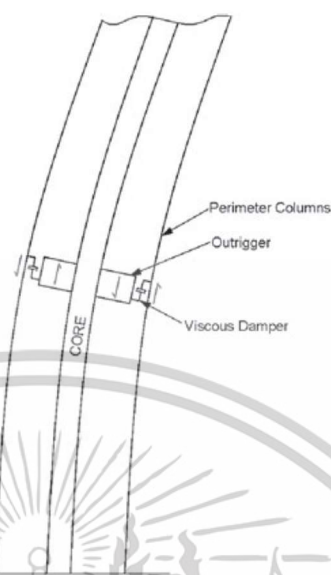
สามารถช่วยให้ตัวชิ้นส่วนของ steel truss สามารถรับแรงอัดได้มากขึ้นและหลีกเลี่ยงการเกิด buckling

2.2.2. การจัดแบ่งตามพฤติกรรมของโครงสร้าง

2.2.2.1 Rigid outriggers (traditional outriggers): ระบบโครงสร้างนี้จะสร้างความแข็งแรงแบบ linear elastic เพื่อให้ Outrigger มีค่าการเสียรูปที่น้อย เพื่อต้านแรงด้านข้างเช่น แรงลมและแรงแผ่นดินไหวทำให้ลดค่าการเคลื่อนตัวของอาคารและค่า Overturning Moment ได้มากที่สุด

2.2.2.2 Flexible Outriggers: ระบบโครงสร้างนี้จะถูกออกแบบค่าความแข็งของ Outrigger โดยไม่ให้มีความแข็งมากจนเกินไป เพื่อควบคุมผลกระทบต่างๆเช่น การถ่ายแรงและการสั่นของอาคารให้เหมาะกับแรงด้านข้างที่กระทำกับอาคาร เช่นแรงลม แรงแผ่นดินไหว ลักษณะของระบบโครงสร้างประเภทนี้จะเป็นระบบ truss เช่น Vierendeel truss

2.2.2.3 Damped Outrigger: ระบบโครงสร้างนี้เมื่ออาคารเกิดการสั่นไหวจนทำให้ outrigger เกิดการเคลื่อนตัว ผลจากการเคลื่อนตัวนี้จะถูกทำให้ลดลงด้วย Damper ที่ติดตั้งอยู่ปลาย outrigger ตามรูปที่ 4 ซึ่งสามารถลดผลของพลศาสตร์ของโครงสร้างที่เกิดจากการสั่นไหวได้เช่น แรง การเคลื่อนตัว และความเร่ง และเพิ่มอัตราส่วนความหน่วงให้กับอาคารได้ ระบบ Damper ที่ใช้กับตัว Outrigger เช่น Viscous damper, Viscoelastic damper, Friction damper, Buckling restrained brace

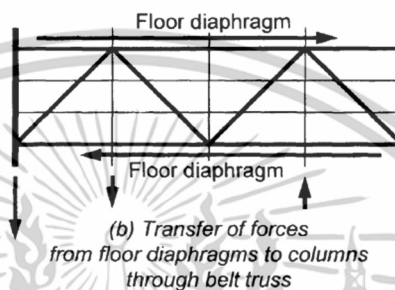
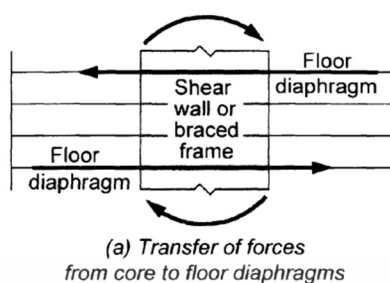


รูปที่ 2.7 แนวคิดของระบบ Damped Outrigger [8]

2.2.3 วิธีการติดตั้ง Outrigger ระหว่างโครงสร้างภายในกับโครงสร้างภายนอก

2.2.2.1 Direct or Conventional outrigger: การติดตั้งประเภทนี้ Outrigger จะติดตั้งเข้ากับระบบโครงสร้างภายใน (shear wall , braced frame) และระบบโครงสร้างภายนอกได้โดยตรง นอกจากนี้การติดตั้ง belt truss เข้ากับเสาภายนอกสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกระจายแรงจากตัว Outrigger ลงสู่เสาได้ดียิ่งขึ้น

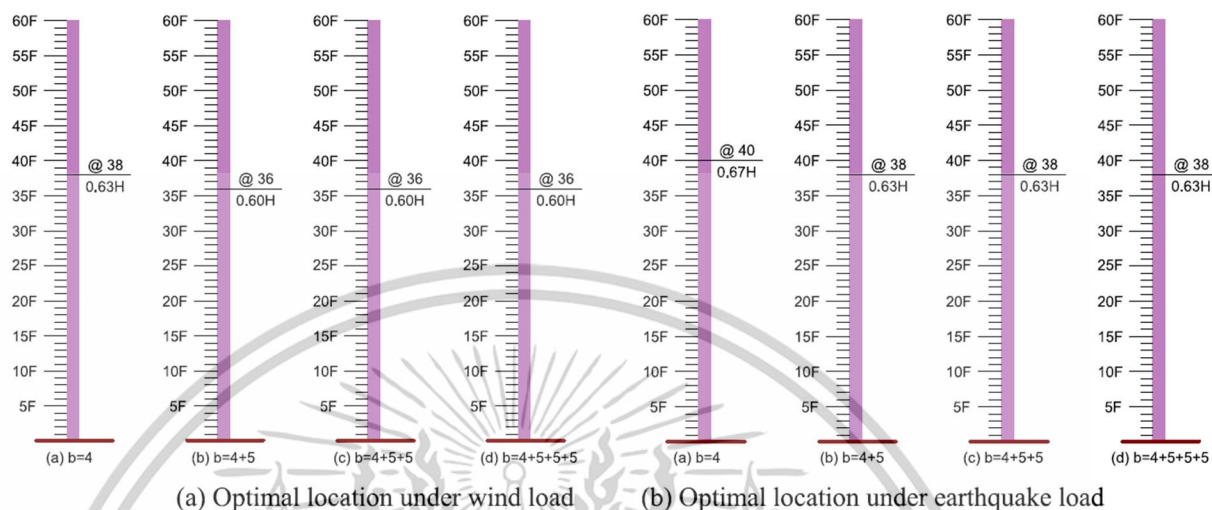
2.2.2.4 Indirect or virtual outriggers (offset outriggers): ระบบนี้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย R. SHANKAR NAIR โดยระบบนี้จะใช้ระบบ Diaphragm ของพื้นในการถ่ายแรงไปที่ belt truss ตามที่แสดงในรูปที่ 2.8 ข้อดีของระบบนี้คือจะไม่มีโครงสร้างแนวตั้งมากั้นพื้นที่ภายในของอาคารทำให้สามารถใช้พื้นที่ได้เต็มประสิทธิภาพ แต่ประสิทธิภาพในด้านการต้านแรงด้านข้างยังด้อยกว่าแบบ Conventional outrigger



รูปที่ 2.8 หลักการทำงานของ virtual outriggers (offset outriggers) [14]

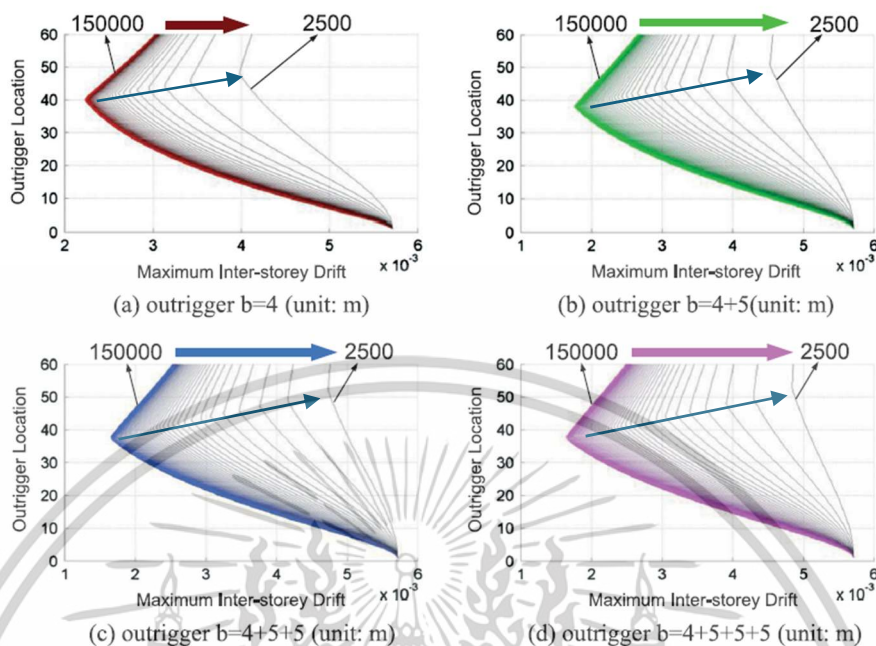
2.3 การหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้ง Outrigger

ตำแหน่งของ Outrigger มีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมของโครงสร้างอาคาร และราคาค่าก่อสร้าง Outrigger นั้นมีราคาที่สูงดังนั้นจึงได้มีการวิจัยหาความสูงที่เหมาะสมของ Outrigger ขึ้นเพื่อเป็นแนวทางให้กับวิศวกรผู้ออกแบบเลือกใช้ มีหลายงานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับการหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับ Outrigger การหาตำแหน่งที่เหมาะสมของ Outrigger นั้นจะต้องมีการวิเคราะห์ที่ซับซ้อน ในอดีตนั้นการหาตำแหน่งที่เหมาะสมจะใช้วิธีลองผิดลองถูก (Trial and error) แต่สำหรับในปัจจุบันมีคอมพิวเตอร์มีส่วนอย่างมากในการวิเคราะห์โครงสร้างดังนั้นจึงมีการใช้วิธี Optimization เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสม เช่น Zhou, Ying et. al. [15] ได้ใช้วิธี Inter-story drift-based parameter analysis ทำการวิเคราะห์หาความสูงที่เหมาะสมโดยใช้ค่า Inter-story drift เป็นค่าควบคุม อาคารสูง 240 เมตรถูกนำมาใช้เป็นอาคารตัวอย่างและแรงด้านข้าง เช่น แรงลมและแรงแผ่นดินไหว เพื่อทำการวิเคราะห์หาความสูงที่เหมาะสม การศึกษานี้ได้แสดงค่าความสูงที่เหมาะสมของ outrigger ในกรณีที่ได้รับแรงลมและแรงแผ่นดินไหว โดยความสูงที่เหมาะสมของ Outrigger 1 ชั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงความสูงที่เหมาะสมของ Outrigger 1 ชั้น[15]

จากรูปแสดงให้เห็นว่าความสูงที่เหมาะสมคือประมาณ 0.6 เท่าของความสูงอาคารเมื่อติดตั้ง Outrigger 1 ชั้น นอกจากนี้ตามที่แสดงในรูปที่ 2.10 ผู้วิจัยได้ทำการปรับพื้นที่ชั้นส่วน Ad (Diagonal area) ของ Outrigger จาก $150,000 \text{ mm}^2$ ลดลงเรื่อยๆ จนถึง $2,500 \text{ mm}^2$ จากการลดขนาดชั้นส่วนนี้แสดงให้เห็นว่า stiffness ของ Outrigger มีผลต่อความสูงที่เหมาะสมของ outrigger มาก เมื่อ Stiffness ลดลงจะทำให้ตำแหน่งที่เหมาะสมของ Outrigger สูงขึ้น นอกจากนี้ยังได้นำเสนอว่าตำแหน่งของ Outrigger ไม่จำเป็นต้องอยู่กึ่งกลางอาคารเสมอไป และตำแหน่งที่เหมาะสมของ Outrigger ก็มีปัจจัยมาจาก Stiffness ของแกนอาคาร (Core Structure), รูปแบบแรงต้านข้าง และจำนวนชั้นของ Outrigger สำหรับอาคารสูงในงานวิจัยนี้ได้มีการแนะนำให้ใช้ Outrigger ตั้งแต่ 2 ชั้นขึ้นไปเพื่อลดค่า Inter Story Drift ได้มีประสิทธิภาพดีที่สุด แต่การศึกษานี้ก็ยังไม่มีการติดตั้ง Damper เข้ากับ Outrigger เพื่อสลายพลังงานจากแรงต้านข้าง ทำให้ความสูงที่เหมาะสมของ Damp outrigger อาจจะไม่ได้อยู่ที่ชั้นดังที่การศึกษานี้ได้นำเสนอ



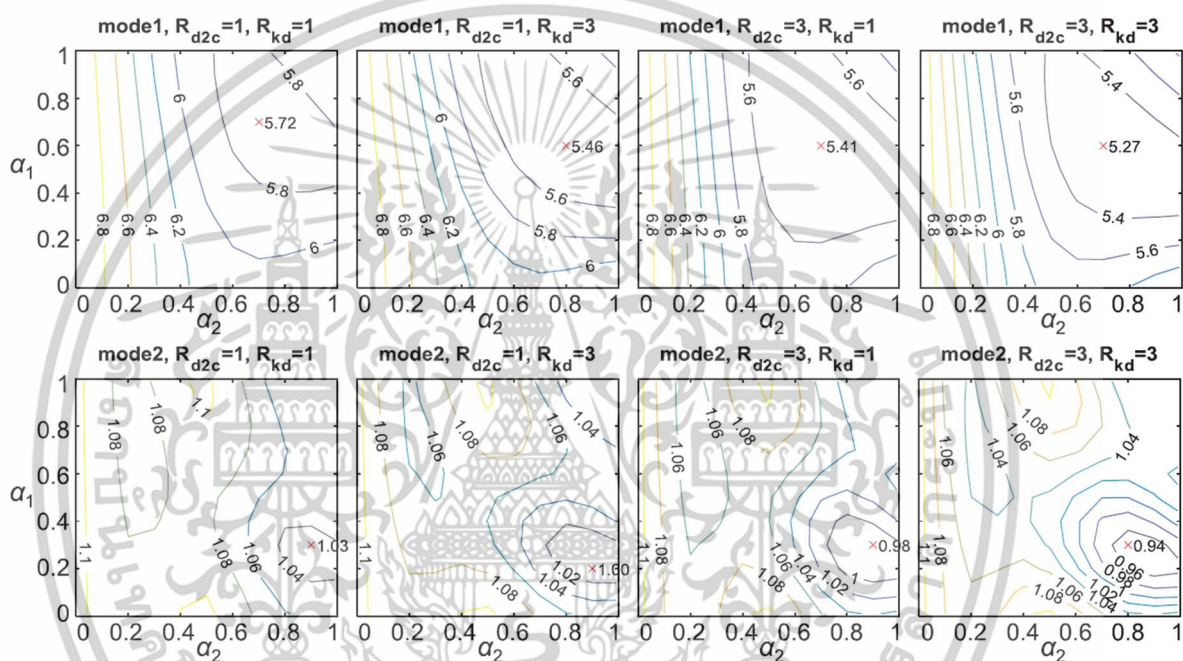
รูปที่ 2.10 แสดงความสูงที่เหมาะสมที่เปลี่ยนไปตาม Ad [15]

ในการศึกษาของ Lin et al. (2019) [16] ได้นำเสนอวิธีการหาความสูงที่เหมาะสมของ Damp Outrigger จำนวน 2 ชั้น โดยใช้ Buckling-Restrained Braces (BRBs) เป็นตัวสลายพลังงาน จากศึกษาครั้งนี้ได้ใช้วิธีหาพลังงานที่สลายไปจากการเสีรูปร่างของ BRBs มากที่สุดมากำหนดความสูงที่เหมาะสมของ Damp Outrigger ในงานวิจัยนี้ได้ใช้อาคาร 4 หลังเป็นอาคารตัวอย่างดังนี้ อาคาร 16 ชั้น 64 เมตร อาคาร 32 ชั้น 128 เมตร อาคาร 64 ชั้น 256 เมตร อาคาร 96 ชั้น 350 เมตร โดยอาคาร 16 ชั้น และ 96 ชั้น ถูกใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรม Higher mode effect จากการติดตั้ง damp outrigger จากการศึกษาผลของ Higher mode effect ด้วยวิธี Modal analysis พบว่าอาคาร 96 ชั้นจะมีค่า Effective modal mass มากกว่าอาคาร 16 ชั้น ใน Mode 2,3 และ 4 ซึ่งบ่งชี้ว่าอาคาร 96 ชั้นนั้นจะมีพฤติกรรมการสั่นไหวใน Mode ที่สูงกว่าเมื่อมีแรงด้านข้างมากระทำ ขณะที่อาคาร 16 ชั้น จะสั่นไหวใน Mode แรก ตามตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 Effective modal mass ratio [16]

Mode	Vibration period (sec)		Effective modal mass ratio (%)	
	16-story	96-story	16-story	96-story
1st	1.031	7.528	71.4	68.7
2nd	0.240	1.308	18.8	20.7
3rd	0.098	0.481	6.3	7.0
4th	0.048	0.244	3.5	3.6

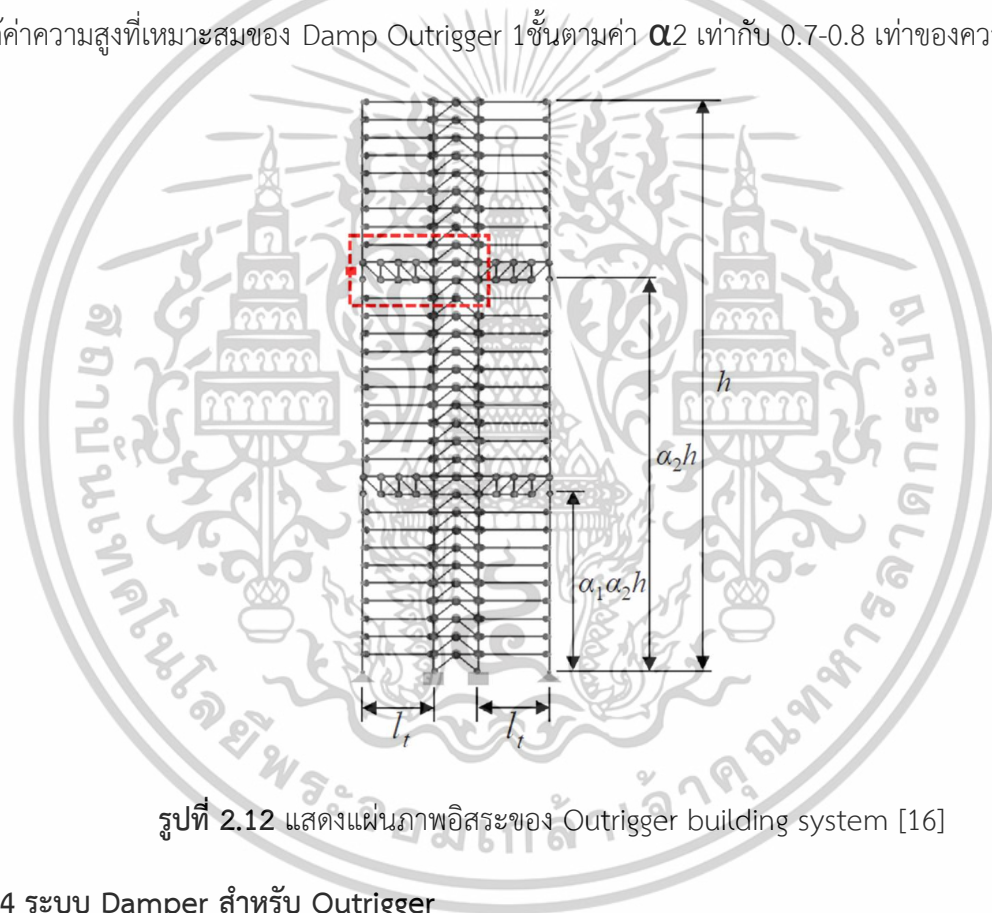
Fig. 14. The 1st and 2nd mode vibration periods of 64-story model when $R_{kd} = 1$ and 3, and $R_{d2c} = 1$ and 3 (unit: sec).

รูปที่ 2.11 แสดงค่าคาบการสั่นของ Mode 1 และ 2 [16]

นอกจากนี้ยังได้นำเสนอผลวิเคราะห์ความสูงที่เหมาะสมของ Damp Outrigger จำนวน 2 ชั้น โดยค่าตัวแปรที่ใช้กำหนดขนาดของ Damper ดังนี้ $R_{d2c} (= k_{d2}/k_c)$ คือ อัตราส่วนของความแข็งแนวแกน BRBs (Axial Stiffness) Outrigger ชั้นบน k_{d2} กับค่าความแข็งแนวแกนของเสารอบนอก (Perimeter column Axial Stiffness k_c) และ $R_{kd} (= k_{d1}/k_{d2})$ คือ อัตราส่วนของ ความแข็งแนวแกน BRBs (Axial Stiffness) Outrigger ชั้นล่าง k_{d1} กับ ความแข็งแนวแกน BRBs (Axial Stiffness) Outrigger ชั้นบน k_{d2} จากผลการวิเคราะห์เมื่อพิจารณาให้ลดค่า Inter story drift และ Roof Displacement ต่ำที่สุดและกำหนดค่า $R_{d2c} = 1$ (ค่าความแข็งของ BRBs และ เสารอบนอก มีขนาดเท่ากัน) และ $R_{kd} = 1$ (ใช้ Damper ขนาดเดียวกัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ค่า α_2 และ α_1 ระหว่าง 0.7-0.8 และ 0.4-0.7 ตามลำดับเมื่อคำนวณตามสมการในรูปที่ 2.12 จะได้ความสูงที่เหมาะสมของ Damp Outrigger ชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 เท่ากับ 0.28 - 0.56 และ 0.7-0.8 เท่าของความสูงอาคาร ตามลำดับ แต่การใช้ Outrigger 2 ชั้น สำหรับอาคารที่มีจำนวนชั้นไม่สูงมากเช่น อาคาร 20-30 ชั้นนั้นอาจไม่จำเป็นเนื่องจากการใช้ Outrigger 1 ชั้นก็เพียงพอแล้วที่จะลดค่าการเคลื่อนตัวและยังควบคุมขนาดของเสารอบนอกที่รองรับ Outrigger ไม่ให้มีแรงกระทำมากเกินไปเนื่องจากการติดตั้ง Outrigger 2 ชั้นจะทำให้เกิดแรงแนวแกนกับเสารอบนอกที่ชั้นล่างมากกว่าการติดตั้ง Outrigger 1 ชั้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.12 ให้ค่า α_1 มีค่าเท่ากับ 0 จะทำให้เหลือ Outrigger แค่ชั้นบน ก็จะได้ค่าความสูงที่เหมาะสมของ Damp Outrigger 1 ชั้นตามค่า α_2 เท่ากับ 0.7-0.8 เท่าของความสูงอาคาร



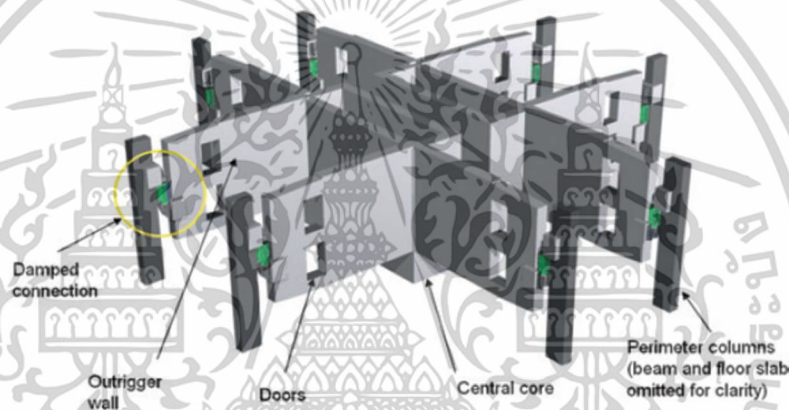
รูปที่ 2.12 แสดงแผนภาพอิสระของ Outrigger building system [16]

2.4 ระบบ Damper สำหรับ Outrigger

ระบบอาคารแบบ Outrigger ถูกออกแบบมาเพื่อรับแรงด้านข้างเช่น แรงลม และ แรงแผ่นดินไหว เมื่อแรงเหล่านี้มากกระทำกับจะทำให้เกิดการสั่นไหวขึ้นซึ่งอาจทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายได้ ดังนั้น Smith และ Willford [8] ได้มีการนำเสนอแนวคิด Damped Outrigger system ที่นำระบบ Damper เข้ามาติดกับ Outrigger เพื่อลดผลของการสั่นไหว และเพิ่มอัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio) ได้สูงถึง 5-10เท่า โดยระบบนี้จะถูกเรียกว่า Damp Outrigger ชนิดตัวหน่วง Damper

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่นำมาติดตั้งกับ Outrigger มีหลายระบบโดยสามารถแบ่งออกเป็น Damper ที่ขึ้นอยู่กับความเร็ว (velocity depend) เช่น Viscous damper, Magnetorheological Dampers Damper ที่ขึ้นกับการเคลื่อนที่ เช่น Buckling-restrained-brace (BRBs), Friction damper [13] โดยระบบ Damper เหล่านี้ ก็จะมีรูปแบบการใช้งานที่และการบำรุงรักษาที่แตกต่างกันออกไป โดย Damper ที่นิยมนำมาติดตั้ง Damp Outrigger คือ Viscous damper แต่ Damper นี้ก็มีราคาที่สูงจนอาจทำให้ต้นทุนการก่อสร้างสูงขึ้น ข้อดีของการติดตั้ง Damp Outrigger คือสามารถลดการสั่นสะเทือน ลดค่า Displacement, Story drift ratio และ ค่า Overturning Moment ลดได้ แต่ระบบนี้จะทำให้เกิดแรง Axial force ที่เสารอบนอก ซึ่งจำเป็นที่จะต้องออกแบบให้สามารถรับแรงเหล่านี้ได้



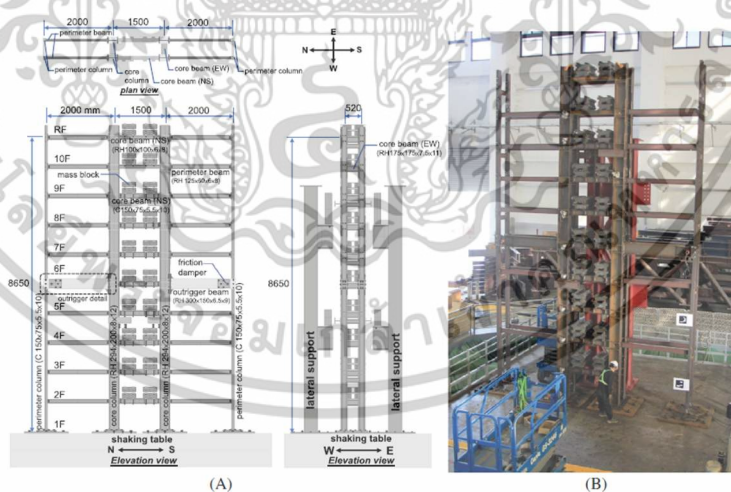
รูปที่ 2.13 รูปแบบของ Damp outrigger [8]

การติดตั้ง damper เข้ากับ Outrigger จะติดตั้งที่ปลายของ Outrigger โดยจะมีจุดต่อ Corbel มารับตัว Damper ที่เสารอบนอกตามรูปที่ 2.13 ประสิทธิภาพของระบบ Damp outrigger ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยดังนี้

1. ค่า Flexural, Shear Stiffness ของแกนอาคาร
2. Axial Stiffness ของเสารอบนอกและระยะห่างของเสากับแกนอาคาร
3. จำนวนชั้น, ตำแหน่ง และค่า Stiffness ของ Outrigger

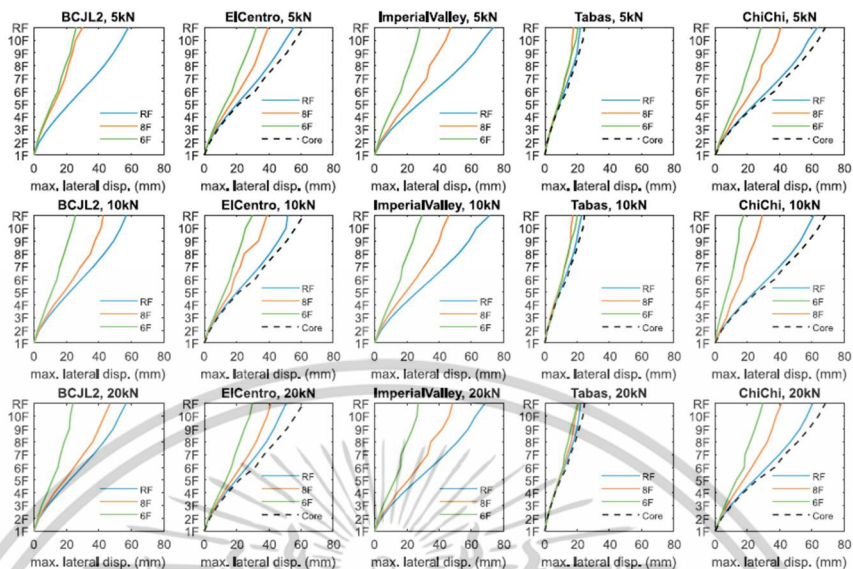
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ในหลายการศึกษาได้มีการนำ Damper ชนิดต่างๆ เข้ามาติดตั้งให้กับ Outrigger เช่น Viscous Damper, Buckling-restrained-brace (BRBs) และ Friction damper [16-18, 25] ในการศึกษาของ Lin, Pao-Chun et. al. (2022) [17] ที่ทำการทดสอบโครงสร้างอาคารด้วย Shaking table โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหว El Centro, Chichi, Tabas, Imperial Valley และ BCJ-L2 เพื่อหาประสิทธิภาพและความสูงที่เหมาะสมของ Damped Outrigger ที่ใช้ Friction damper เป็นตัวสลายพลังงาน โครงสร้างทดสอบสูง 9 เมตรที่ถูกย่อขนาดลงมาจากอาคารสูง 20 ชั้น ตามที่แสดงในรูปที่ 2.14 และทำการติดตั้ง Damped outrigger ที่ชั้น RF 8F และ 6F จากผลการทดสอบพบว่าค่า Roof drift ลดลงมากที่สุดเมื่อติดตั้ง Damped outrigger ที่ชั้น 6 หรือ 0.60 เท่าของความสูงอาคารตามที่แสดงในรูปที่ 2.15 แต่เมื่อเทียบกับการสลายพลังงานของ Friction damper แล้ว Damper จะสลายพลังงานได้ดีที่สุดเมื่อทำการติดตั้ง Damped outrigger ที่ชั้น 8F หรือ 0.80 เท่าของความสูงอาคารตามที่แสดงในรูปที่ 2.16 เนื่องจากการเคลื่อนที่ของชั้นที่มากทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของตัว damper จนเกิดการสลายพลังงานขึ้น ซึ่งใกล้เคียงกับอีกการศึกษาของ Lin et al. (2019) [16] ที่ได้ทำการหาความสูงที่เหมาะสมของ Damp Outrigger ด้วยวิธีการหาการสลายพลังงานจาก Damper ที่สูงที่สุด และในการศึกษานี้ [17] ก็ยังมีการทำการวิเคราะห์ RSA (Response spectra analysis) เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยซึ่งจากการเปรียบเทียบผลพบว่ามีผลสอดคล้องกัน

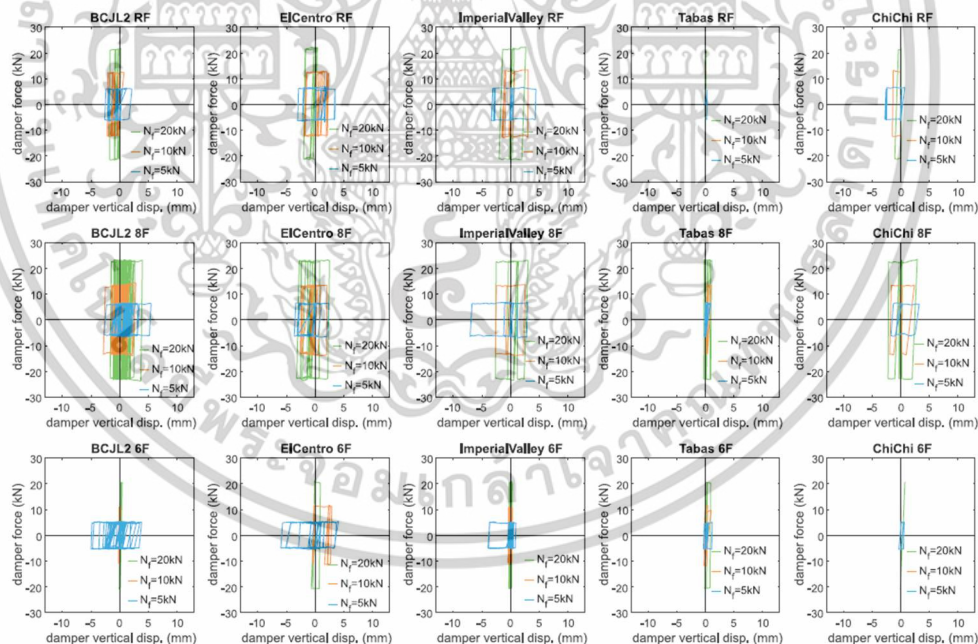


รูปที่ 2.14 โครงสร้างทดสอบ Damped Outrigger [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แสดงค่าการเคลื่อนตัวของในแต่ละชั้นจากการทดสอบ [17]



รูปที่ 2.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของแรงและการเคลื่อนตัวของ Friction damper [17]

ในการศึกษาของ Lin et al. (2018) [17] ได้ทำการหาประสิทธิภาพการรับแรงแผ่นดินไหวของอาคารสูง 16, 32, และ 64 ชั้น มีความสูง 64, 128 และ 256 เมตร ตามลำดับ ระบบต้านทานแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านข้างเป็นระบบ Core Brace Frame Tube in tube และติดตั้ง Damp Outrigger 1 ชั้น โดยใช้ Buckling-Restrained Braces (BRBs) เป็นตัวสลายพลังงานให้กับอาคาร การศึกษานี้ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์จำนวน 2 วิธีได้แก่ RSA (Response spectra analysis) และวิธี NLRHA (Nonlinear Time History Analysis) โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 8 คลื่นมาทำการวิเคราะห์ จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี NLRHA ตามที่แสดงในรูปที่ 2.17 พบว่าค่าอัตราส่วนการเคลื่อนตัวที่หลังคาสูงสุด (θ_{max}) เมื่อติดตั้ง Outrigger ลดลงในบางคลื่นแผ่นดินไหวเมื่อเทียบกับการไม่ติดตั้ง Outrigger แต่ค่าความเร่งสูงสุดที่วัดได้บนหลังคา a_{max} ลดลงเมื่อทำการติดตั้ง Outrigger

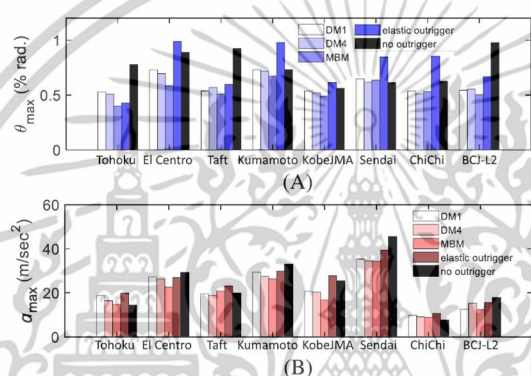


FIGURE 10 The A. θ_{max} and B. a_{max} responses from nonlinear response history analysis results [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

รูปที่ 2.17 แสดงกราฟค่า Inter story drift กับ ความเร่งที่หลังคา [17]

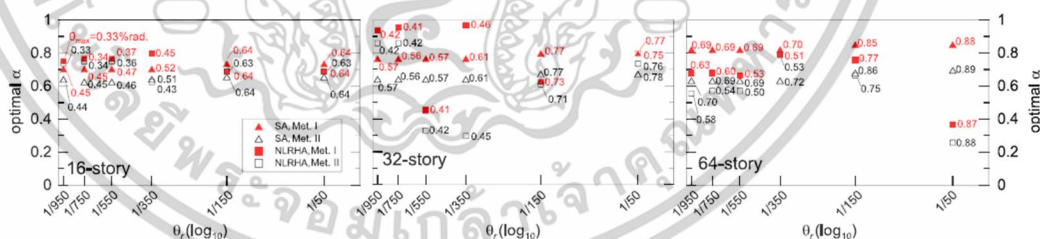


FIGURE 14 Relationships between optimal α and θ , of 16, 32, and 64-story models as obtained from spectral analysis and nonlinear response history analysis [Colour figure can be viewed at wileyonlinelibrary.com]

รูปที่ 2.18 แสดงค่าความสูงที่เหมาะสมของ Outrigger เทียบกับ Roof story drift [17]

จากการวิเคราะห์ความเหมาะสมสูงที่เหมาะสมของ Damp Outrigger ที่ใช้ BRBs เป็นตัวสลายพลังงาน เมื่อพิจารณาให้ค่าอัตราส่วนการเคลื่อนตัวที่หลังคาสูงสุดลดลงมากที่สุดจะได้ค่า α อยู่ระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.6-0.8 หรือ 0.6-0.8 เท่าของความสูงอาคารเมื่อวัดจากระดับพื้นดิน นอกจากนี้จากรูปที่ 2.19 และ 2.20 เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วน Axial stiffness ของ BRBs ต่อ Flexural Stiffness ของ Outrigger (R_{dt}) แล้ว นั้นยิ่งค่า R_{dt} มีค่าที่น้อย (Outrigger มีค่า Stiffness สูง) จะทำให้ Damper เกิดการเคลื่อนตัว (Yield Deformation) ที่สูงขึ้น ขณะที่ค่าคาบการสั่น (Vibration Period) เมื่อ Outrigger มีค่า Stiffness ที่สูงขึ้นจะไม่ทำให้ค่าคาบการสั่นเปลี่ยนแปลง

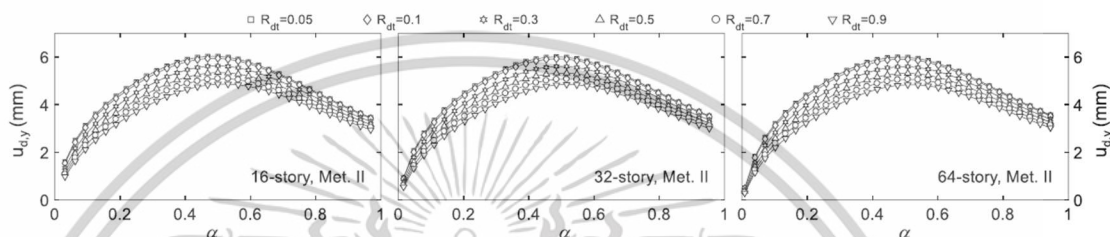


FIGURE 16 Relationships between $u_{d,y}$ and α for different R_{dt} of 16, 32, and 64-story models

รูปที่ 2.19 แสดงค่าการเคลื่อนตัวของ BRBs Damper เทียบกับค่า α [17]

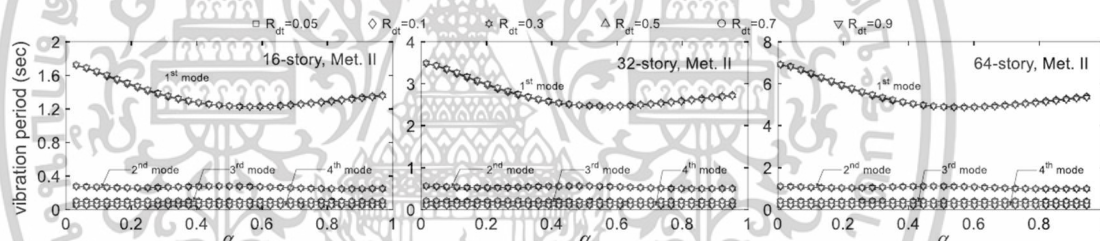


FIGURE 17 Relationships between vibration period and α for different R_{dt} of 16, 32, and 64-story models

รูปที่ 2.20 แสดงค่าคาบการสั่น Mode 1 และ 2 เทียบกับค่า α [17]

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาข้อดีและข้อเสียของ BRBs ที่เมื่อมีแรงลมหรือแรงแผ่นดินไหวขนาดเล็ก BRBs จะทำหน้าที่เป็น Outrigger แบบดั้งเดิม และมี hysteresis loop ที่เสถียร แต่ก็ยังเป็นระบบสลายพลังงานที่มีราคาที่สูงอยู่และเมื่อ BRBs เกิดการคราก (Yield) ต้องมีการเปลี่ยน Damper ใหม่ทำให้ระบบ Damper แบบอื่นๆที่มีราคาที่ถูกกว่าและค่าซ่อมบำรุงรักษาที่ถูกกว่าอาจเป็นตัวเลือกที่ดีเช่น Friction Damper

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 รูปแบบของ Outrigger (Topology of Outrigger)

รูปแบบของ Outrigger เป็นสิ่งสำคัญที่สามารถเพิ่มค่าความแข็งแรงให้กับ Outrigger ได้ นอกจากนี้ การศึกษาที่เกี่ยวกับรูปแบบของ Outrigger ค่อยข้างน้อยเมื่อเทียบกับการศึกษาหาตำแหน่งที่เหมาะสมของ outrigger ในการศึกษาของ Alhaddad et al. (2020) [18] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบ Outrigger และ Belt truss สำหรับอาคารสูง โดยเน้นแนวทางการออกแบบโครงสร้างและขนาดของ โครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดของระบบ Outrigger ในงานวิจัยนี้ได้ให้คำนิยามของ Topology และ Size ดังนี้

2.5.1 Topology ของระบบ Outrigger ในระบบโครงสร้างโดยรวมสามารถแยกออกได้เป็น ตำแหน่งและจำนวนของ Outrigger หรือ Belt truss , ส่วนประกอบต่างๆของ Outrigger

2.5.2 Topology ในส่วนประกอบของระบบ Outrigger สามารถแยกออกได้เป็น รูปแบบของ Outrigger Truss หรือกำแพง, ระบบโครงสร้างภายในเช่น ระบบแกนอาคาร, Steel frame brace, Shear wall, Moment-resisting frame, Mega column เป็นต้น

2.5.3 Size ของ Outrigger และ Belt truss หมายถึง ปริมาณวัสดุในระบบ เช่น ขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วน Outrigger

ขั้นตอนการออกแบบเพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมมีดังนี้

1. กำหนดตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเช่น ความสูงและพื้นที่หน้าตัด ของ Outrigger
2. การสร้างแบบจำลองโครงสร้างโดยใช้เทคนิคต่างๆ เช่น แบบจำลองอย่างง่าย
3. กำหนดปัญหาที่จะทำการวิเคราะห์หาค่าที่ กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เช่นการลดการเคลื่อนตัวด้านข้าง และ ข้อจำกัด เช่น ความแข็งแรงของ Outrigger ความสูงของอาคาร เป็นต้น
4. เลือกวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมเช่น วิธีเชิงตัวเลขหรือ optimization algorithms เพื่อหาคำตอบจากข้อจำกัดต่างๆที่ได้กำหนดขึ้นมา

นอกจากนี้ยังได้แนะนำวิธีหาคำตอบที่เหมาะสม (Optimum Solution) จากการหาขนาดพื้นที่หน้าตัดและความสูงที่เหมาะสมดังนี้

1. วิธีตรง (Direct Searching Technique) วิธีนี้โดยหลักแล้วเป็นวิธีที่ใช้ขั้นตอนทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการหาคำตอบจากชุดสมการ เทคนิคนี้สามารถนำไปใช้กับปัญหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบื้องต้นของขั้นตอนการออกแบบเบื้องต้นซึ่งต้องพิจารณาตัวแปรและเกณฑ์ต่างๆ น้อยกว่า การใช้เทคนิคนี้จะช่วยให้ได้คำตอบในรูปแบบปิด

2. วิธีลองผิดลองถูก (Trial-and-Error Searching Technique.) เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะไม่ต้องใช้ตัวแปรเยอะ การวิเคราะห์จะทำการป้อนค่าตัวแปรเข้าไปในโปรแกรมวิเคราะห์ เช่น FEM แล้วทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แต่ละ Case ที่ป้อนตัวแปรเข้าไปและหาค่าที่ดีที่สุด แต่วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้เวลานานและใช้ทรัพยากรด้านการคำนวณที่สูง
3. วิธี Optimality Criteria (OC) Techniques. วิธีนี้เป็นวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพทางอ้อม เหมาะกับปัญหาที่มีข้อจำกัดและจำนวนตัวแปรที่มาก เช่นการออกแบบอาคารสูงเป็นต้น วิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการหาความสูงที่เหมาะสม ขนาด และรูปร่างของ Outrigger

นอกจากนี้ในการศึกษานี้ยังได้ทำสรุปรงานวิจัยอื่นๆที่ทำการศึกษาหาความสูงที่เหมาะสม Outrigger กับโครงสร้างอาคารชนิดต่างๆ เช่น RC core wall, Steel braced core และ Outrigger จำนวนหลายชั้นกับอาคารสูง โดยมีเกณฑ์หลักเช่น การลดค่าเคลื่อนตัวของอาคาร, ลดน้ำหนักอาคาร, ลด Overturning moment ของอาคาร และลดค่าคาบธรรมชาติลง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลอาคารและความสูงที่เหมาะสมของ Outrigger [18]

TABLE 3: Steel braced core with one steel outrigger truss.

Ref	H of the building (m)	X/H from the bottom (stories)	Main criterion
[36]	87	0.68	Top drift
[15]	70	0.6 (1)	Weight optimization
[16]	136	0.55- to 0.65 (1) X zipper core	
[7]	150	The lower third of the building	Progressive collapse

ในการศึกษาของ Goman W.M. Ho [19] ที่ได้ทำการวิเคราะห์รูปแบบโครง Truss สำหรับ Outrigger จำนวน 4 แบบ ตามรูปที่ 2.21

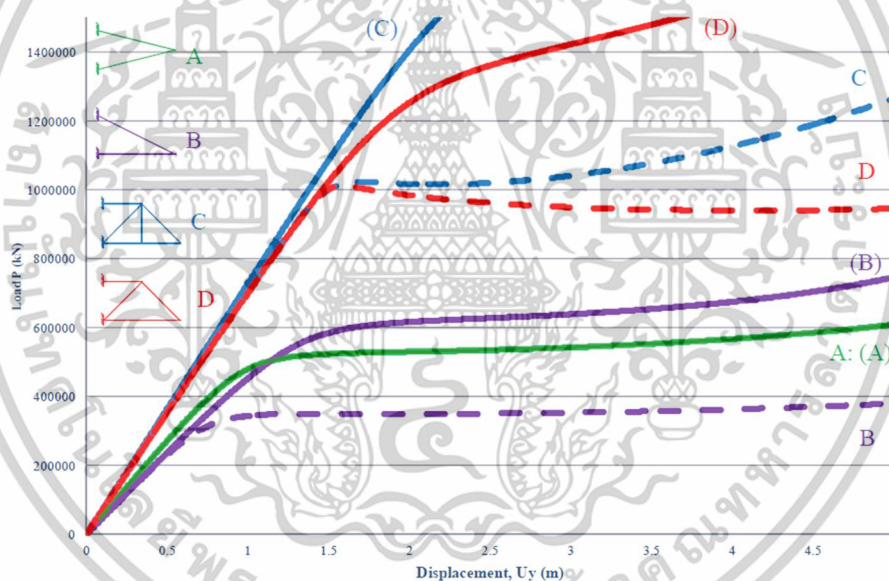
Table 1. Summary on Outrigger Topology by Ho (2016) studies

Topology	A	B	C	D
Material	1.00	1.04	1.80	1.49
Stiffness	√	√	√√√	√√
Strength	√√√	√√	√	√

รูปที่ 2.21 ตารางแสดงรูปแบบของโครง Truss [19]

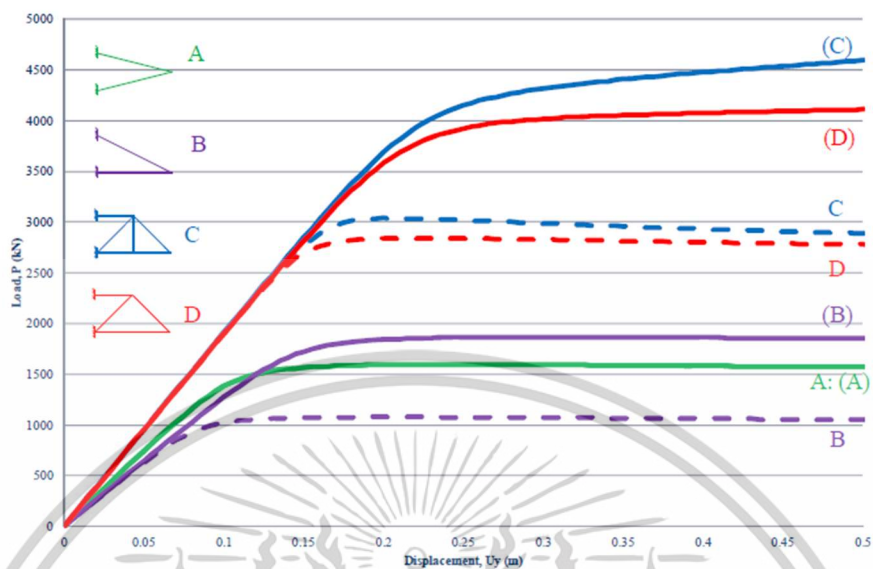
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นส่วนของ Truss จะใช้ BOX 1000x1000x50mm และ UB 304x12x42mm เพื่อศึกษาพฤติกรรมของหน้าตัด จากการวิเคราะห์ Topology B ได้แสดงให้เห็นว่าในหน้าตัด UB จะมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยเมื่อรับแรงทิศทางขึ้นน้อยกว่ามากในทิศทางลง ขณะที่ในหน้าตัด BOX จะมีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยไม่ต่างกันมากเนื่องจากความแข็ง (Stiffness) ของหน้าตัดที่มาก จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อพิจารณาผลของการวิเคราะห์ 2nd order analysis (Geometric Effect หรือ P delta effect) ผลของวัสดุไม่เชิงเส้น (Nonlinear Material) รูปแบบของ Outrigger ที่ดีที่สุดคือแบบ A และ แบบ B รองลงมา เนื่องจากเป็นรูปแบบที่สามารถรับแรงวิกฤตได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับแบบ C และ D แต่ก็ยังมีค่าความแข็งที่ต่ำกว่า ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้แนะนำให้เพิ่มขนาดของชิ้นส่วนแทนการเปลี่ยนรูปร่างของ Truss เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และการศึกษานี้ยังได้แนะนำให้ออกแบบ Outrigger ให้มีความสมมาตรเพื่อรับแรงแบบวัฏจักร (Cyclic Loading) เช่นแรงแผ่นดินไหว หรือแรงลม เป็นต้น



รูปที่ 2.22 แสดง Pushover Curve ของ BOX section [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 แสดง Pushover Curve ของ UD section [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

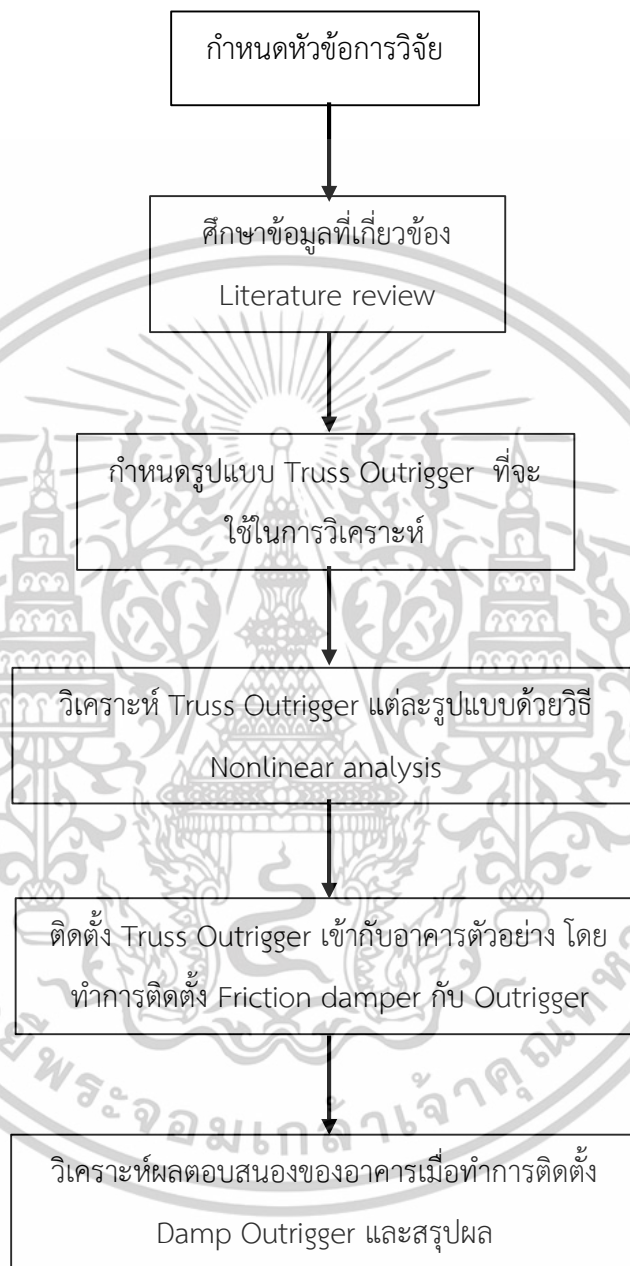
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย (RESEARCH METHODOLOGY)

ในการศึกษานี้จะทำการศึกษาระบบโครงสร้างของอาคารสูงที่ใช้ระบบโครงสร้างรับแรงด้านข้างด้วย Truss Outrigger จากการศึกษาของ Goman W.M. Ho [19] ได้แสดงให้เห็นว่า รูปแบบของ Truss Outrigger แต่ละรูปแบบมีค่าความแข็งแรงและค่าความแข็งที่ต่างกัน ส่วนแรงด้านข้างเช่น แรงลมและแรงแผ่นดินไหวต่างก็สร้างการสั่นไหวให้กับโครงสร้าง ดังนั้นการติดตั้งอุปกรณ์สลายพลังงานให้กับ Outrigger เพื่อให้อาคารมีค่าอัตราส่วนความหน่วงเพิ่มขึ้นเป็นสิ่งที่จำเป็นที่ทำให้อาคารสลายพลังงานจากแรงด้านข้างได้มีประสิทธิภาพ การศึกษานี้จะใช้ Friction Damper มาติดตั้งให้กับ Outrigger เนื่องจากมีราคาที่ถูกและบำรุงรักษาได้ง่าย อาคารสูง 20 ชั้น ที่ใช้ระบบโครงสร้าง RC Brace Frame ที่มีขนาดของแกนอาคารที่คงที่ถูกลำเอียงมาใช้เป็นอาคารตัวอย่างสำหรับงานวิจัยนี้ โดยทำการติดตั้ง Damp Outrigger จำนวน 1 ชั้น ที่ความสูง 0.60H และ 0.80H ตามคำแนะนำของ Lin, Pao-Chun et al. [12] และทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธี Nonlinear time series analysis, เพื่อหาประสิทธิภาพของอาคารต่อไป

3.1 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานจะเป็นไปตามรูปที่ 11 ซึ่งขั้นแรกจะเป็นการกำหนดหัวข้อการวิจัยและศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากนั้นก็ทำการกำหนดรูปแบบ Truss Outrigger ตามการใช้งานทั่วไปเพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าความแข็งของตัว Truss ด้วยวิธี Nonlinear analysis ขั้นต่อไปจะเป็นการนำ Truss Outrigger มาติดตั้งกับอาคารตัวอย่าง โดย Outrigger แต่ละตัวจะทำการติดตั้ง Friction damper เข้าไปด้วยเพื่อเพิ่มอัตราส่วนความหน่วงให้กับอาคาร จากนั้นทำการวิเคราะห์อาคารเพื่อหาผลตอบสนองด้วย Nonlinear time series analysis และทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองและสรุปผล



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการ

3.2.1 ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

การศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระบบอาคารสูง, ระบบโครงสร้าง Truss Outrigger และ อุปกรณ์สลายพลังงาน (Damper)

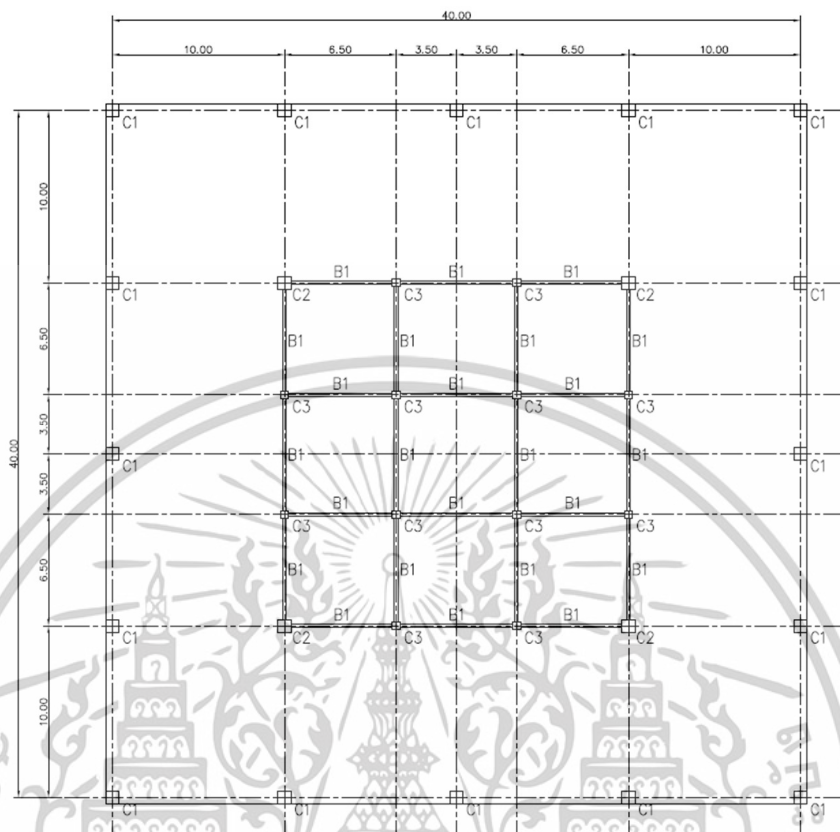
3.2.2 กำหนดอาคารตัวอย่าง

ในการศึกษานี้จะใช้อาคารโครงสร้าง RC Brace Frame สูง 20 ชั้น โดยแต่ละชั้นสูง 3.6 เมตร เป็นอาคารตัวอย่าง โดยแกนอาคารจะใช้โครง Brace เป็นระบบต้านแรงด้านข้าง รายละเอียดขนาดชั้นส่วนของอาคารจะแสดงในตารางที่ 3.1 ชั้นส่วนของอาคารจะเป็น Fiber section รูปแบบอาคารจะแสดงในรูปที่ 3.2-3.15 วัสดุสำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี nonlinear time history จะใช้ Mander material model สำหรับคอนกรีต สำหรับ Plastic hinge ของชั้นส่วนคอนกรีตจะใช้ข้อมูลจากการทดสอบของตุรกี [2-4] ส่วนชั้นส่วนที่เป็นเหล็กจะใช้ Fiber section ตำแหน่งของ Plastic hinge จะอยู่ที่ปลายชั้นส่วนห่างจากปลายชั้นส่วนอยู่ 0.1 และ 0.9 เท่าของความยาวชั้นส่วน

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดขนาดชั้นส่วนของอาคารตัวอย่าง

Section	Material	Floor
C80x80	Concrete f'c 600ksc	0-25
	Concrete f'c 450ksc	26-30
W50	Concrete f'c 600ksc	0-25
	Concrete f'c 450ksc	26-30
PS-Slab 0.25m.	Concrete f'c 320ksc	0-30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงแปลนอาคารตัวอย่าง

ตารางที่ 3.2 รายการชิ้นส่วนโครงสร้าง

Code	Material	Dimension	Rebar ratio
C1	Concrete 60MPa	75x75cm	1.50%
C2	Concrete 60MPa	75x75cm	1.50%
C3	Concrete 60MPa	45x45cm	1.50%
B1	A36	H200x200	-

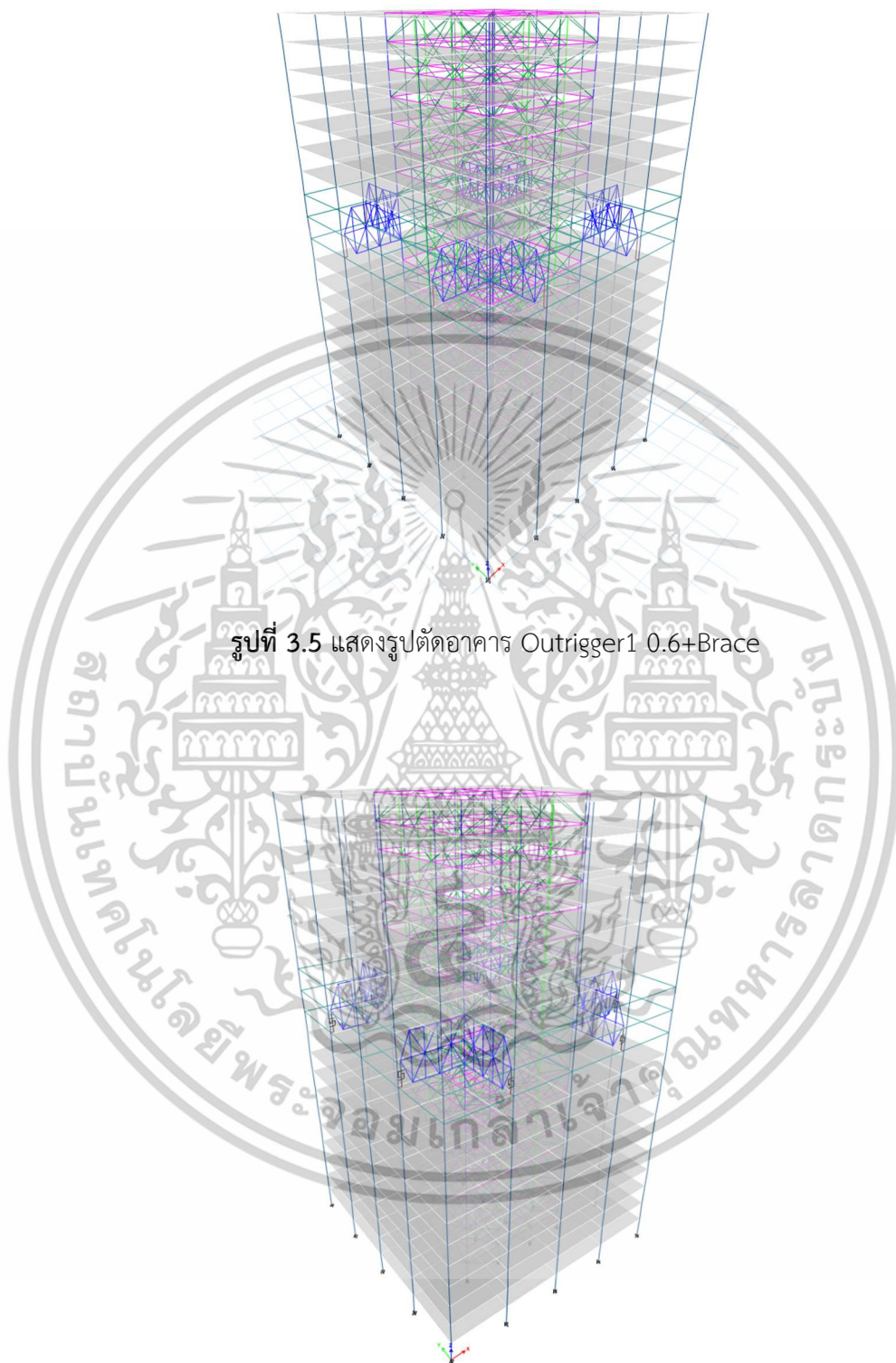
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงรูปอาคารที่ไม่ได้ติดตั้ง Outrigger

รูปที่ 3.4 แสดงรูปอาคาร Outrigger1 0.6 Traditional

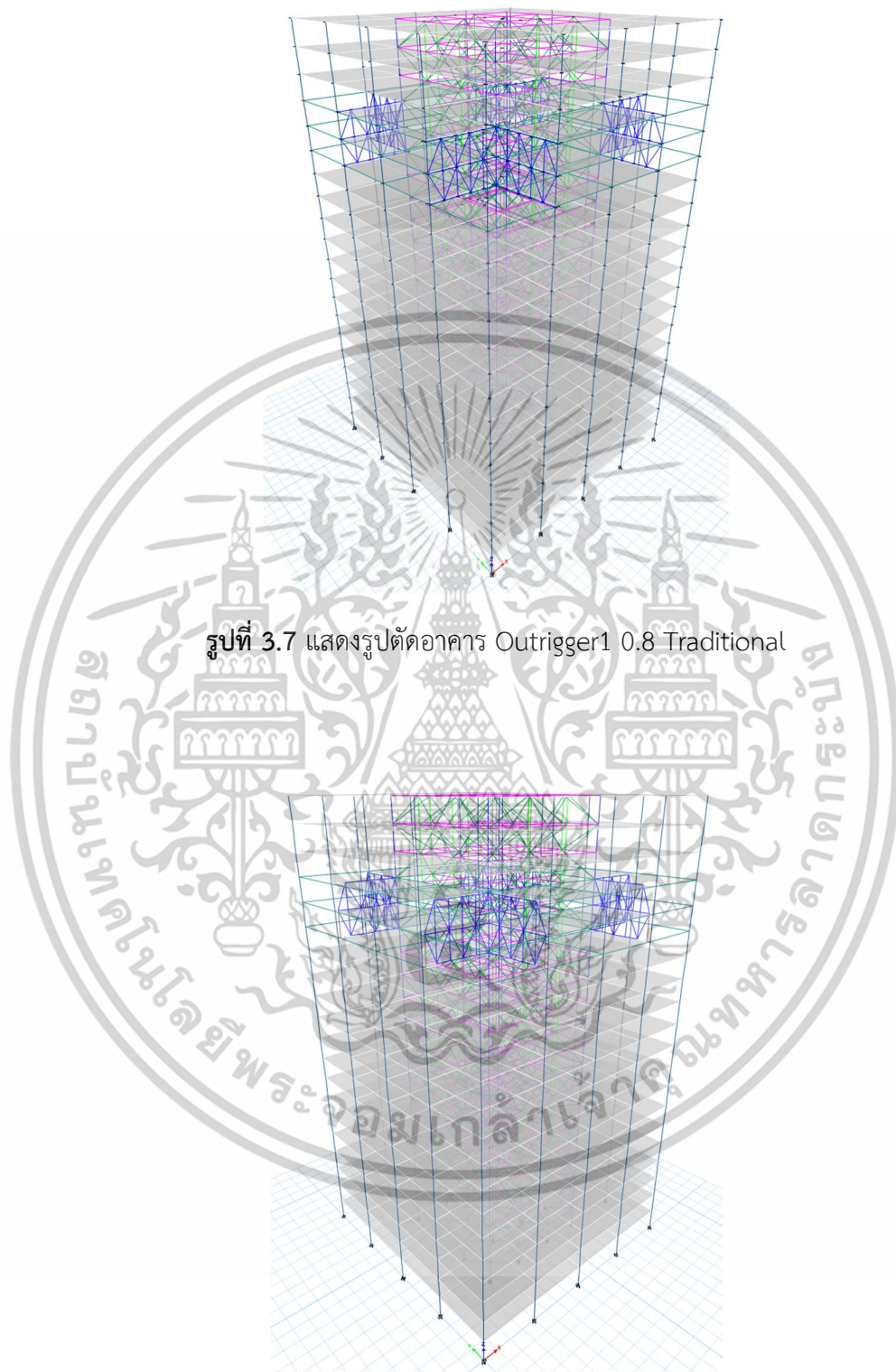
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger1 0.6+Brace

รูปที่ 3.6 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger1 0.6+Damper

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger1 0.8 Traditional

รูปที่ 3.8 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger1 0.8+Brace

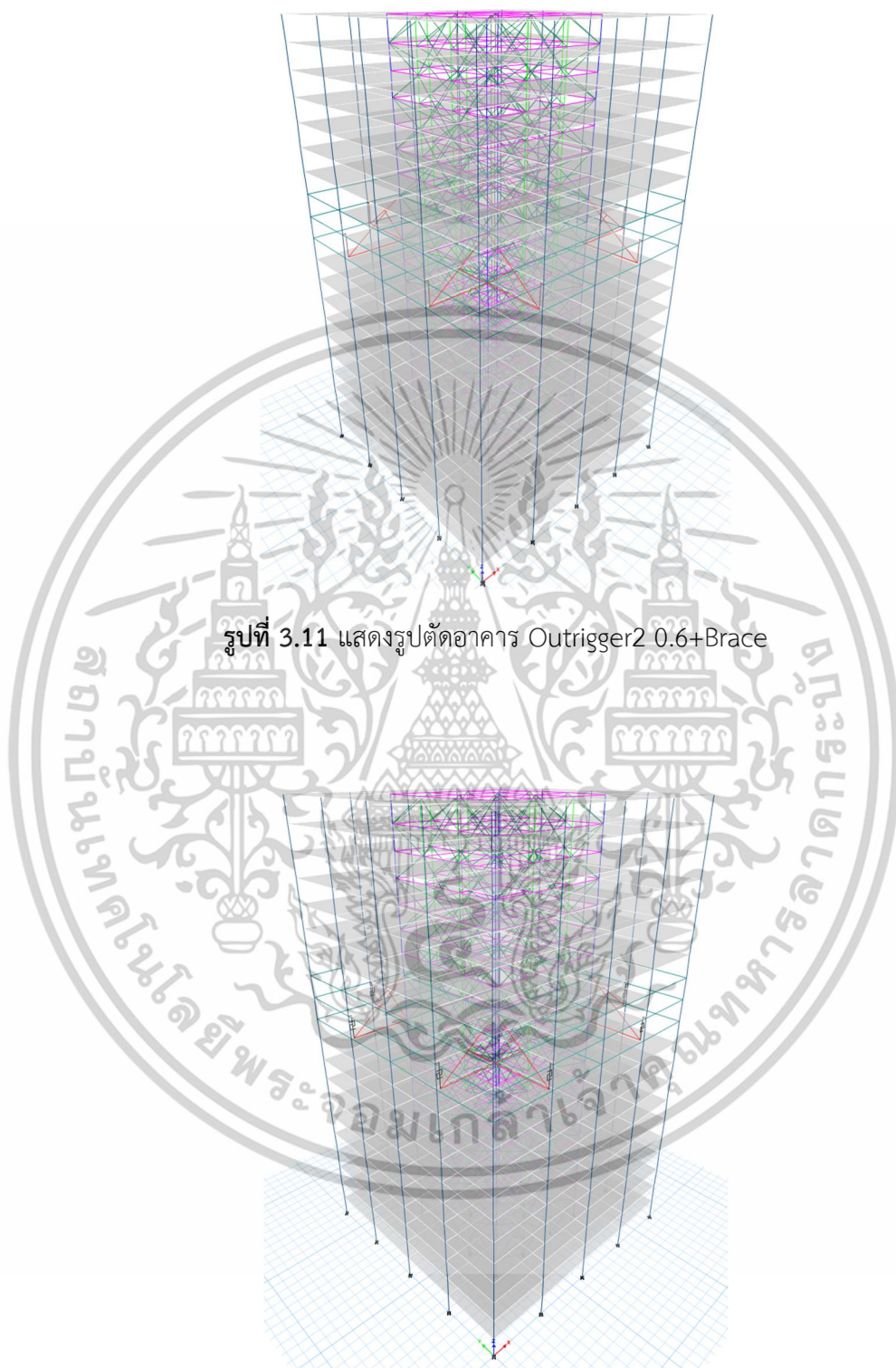
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger1 0.8+Damper

รูปที่ 3.10 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger2 0.6 Traditional

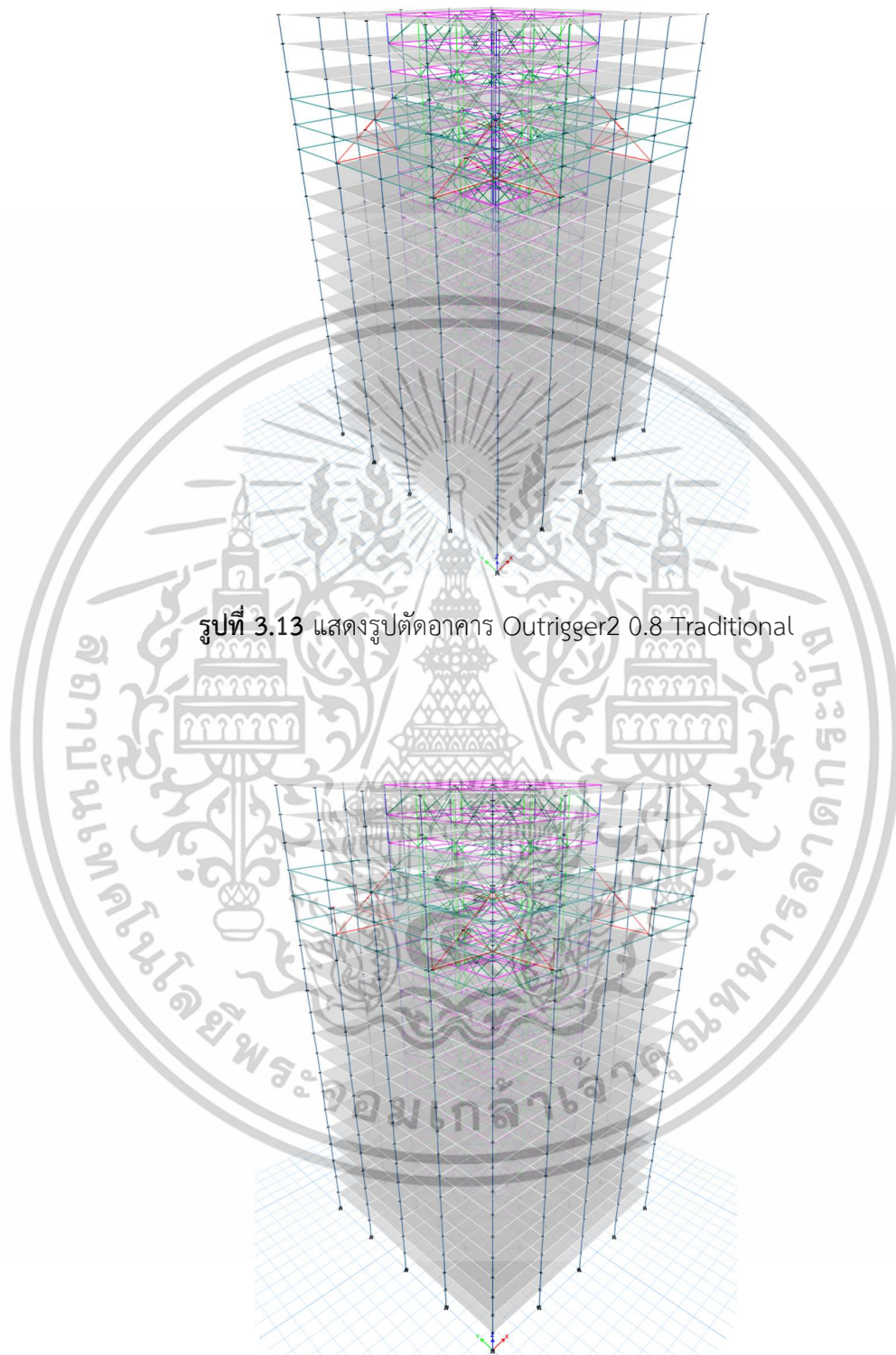
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger2 0.6+Brace

รูปที่ 3.12 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger2 0.6+Damper

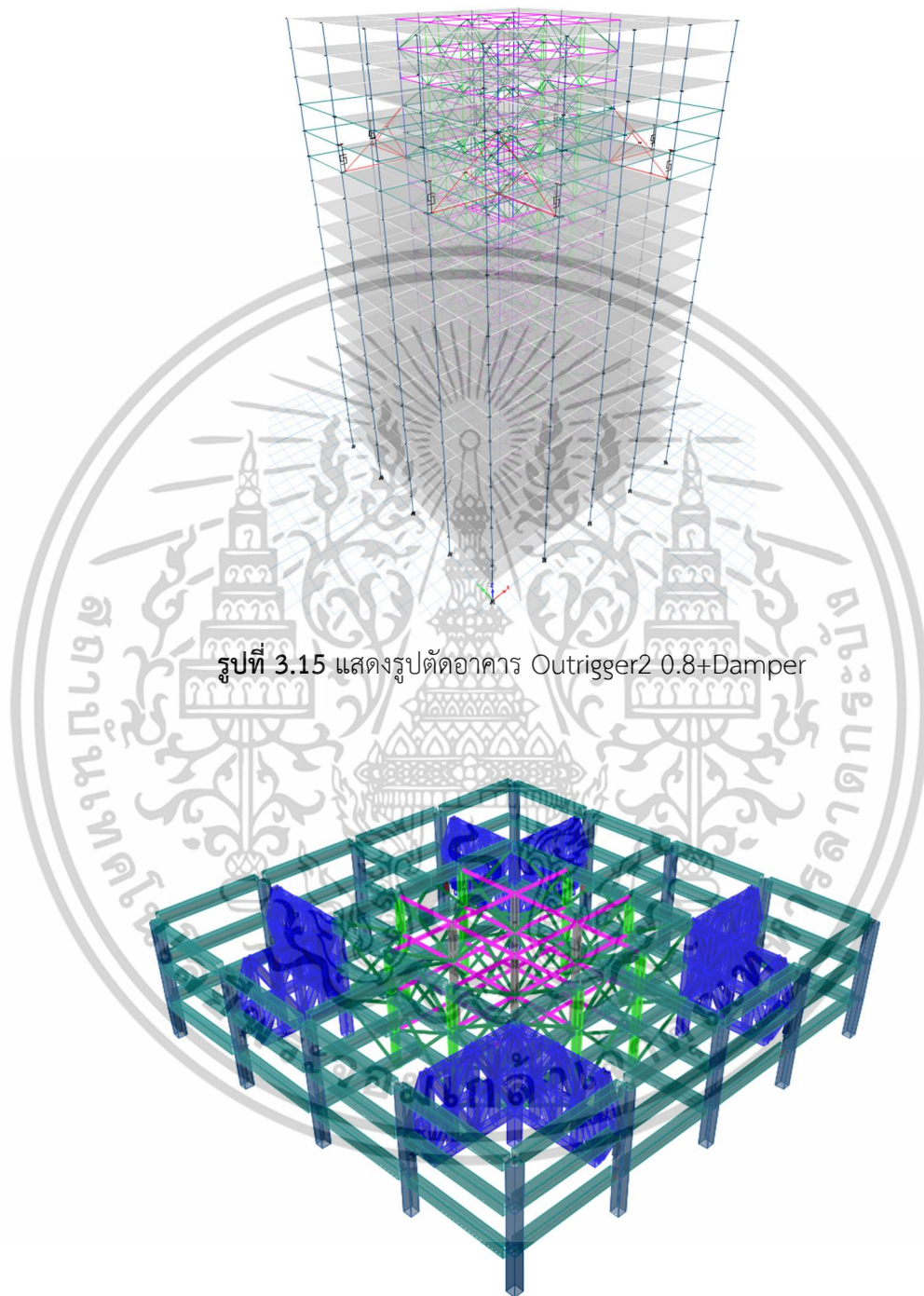
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger2 0.8 Traditional

รูปที่ 3.14 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger2 0.8+Brace

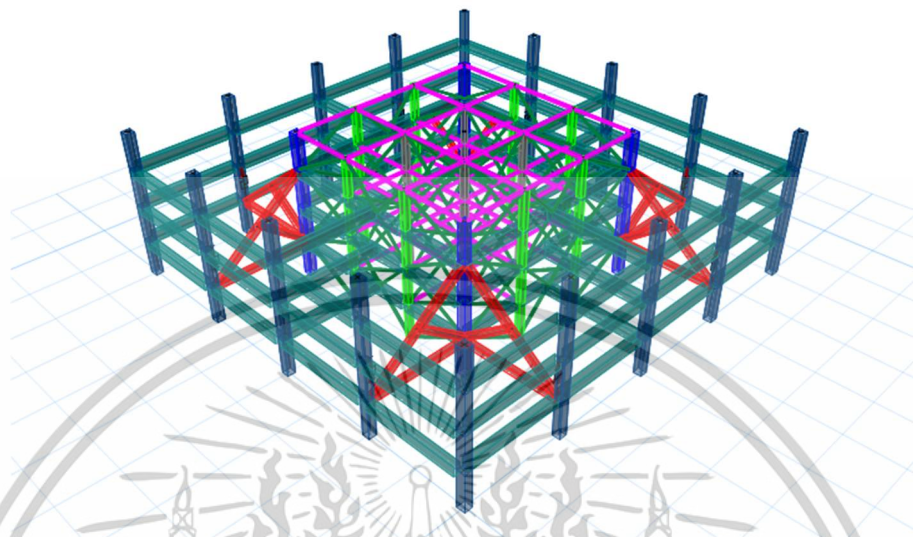
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แสดงรูปตัดอาคาร Outrigger2 0.8+Damper

รูปที่ 3.16 แสดงชั้น Outrigger แบบที่ 1

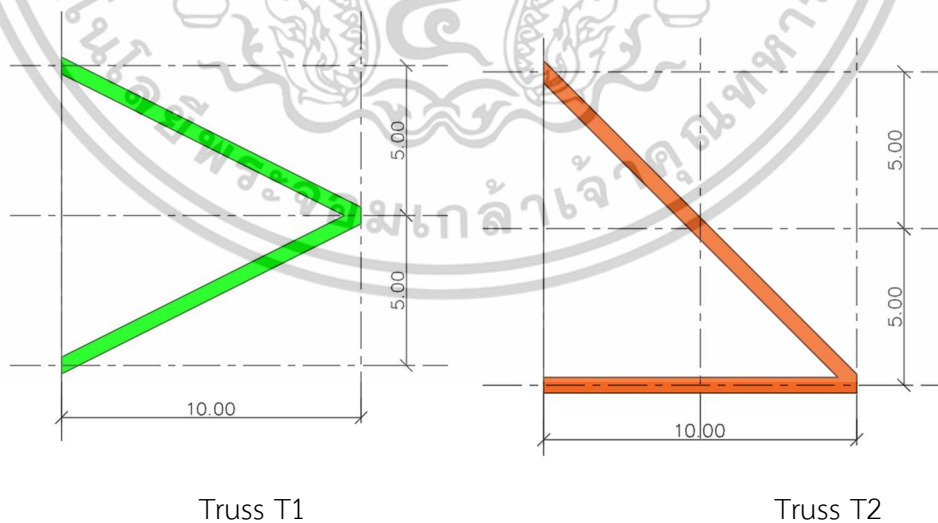
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 แสดงชั้น Outrigger แบบที่ 2

3.2.3 กำหนดรูปแบบโครง Truss สำหรับ Outrigger

ในการศึกษานี้จะกำหนดรูปแบบโครง Truss ที่ใช้ในทั่วไปสำหรับอาคารสูงโดยเน้นไปในด้านความแข็ง (Stiffness) เพื่อลดการเคลื่อนตัวของอาคารได้มากที่สุด โดยรูปแบบของ Truss จะแสดงในรูปที่ 3.18 และ 3.19

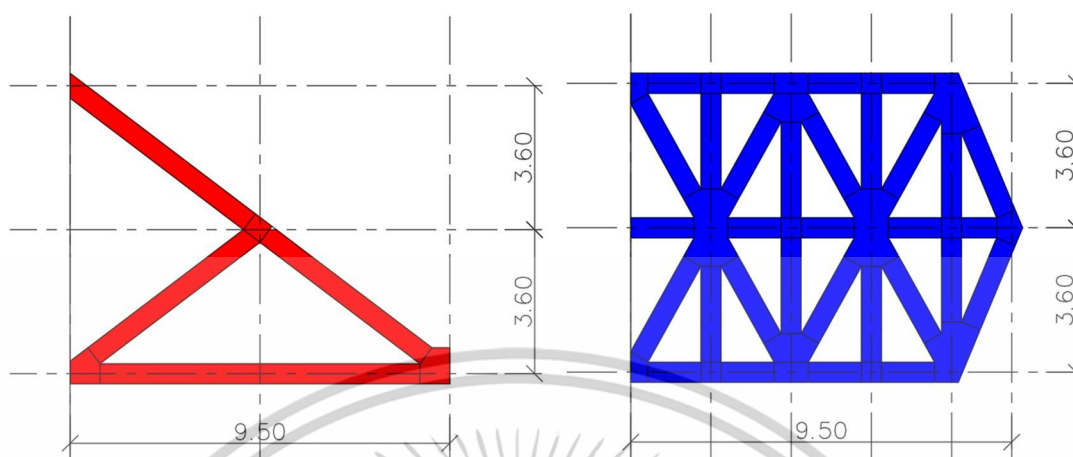


Truss T1

Truss T2

รูปที่ 3.18 แสดงรูปแบบ Truss แบบ T1 และแบบ T2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Truss T3

Truss T4

รูปที่ 3.19 แสดงรูปแบบ Truss แบบ T3 และแบบ T4

จากรูปด้านบนจะแสดงรูปแบบ Truss ที่จะนำไปเป็นตัว Outrigger ชิ้นส่วนของ Truss เป็นเหล็ก BOX 500x500x20mm. โดยจุดต่อระหว่างชิ้นส่วนถูกกำหนดให้เป็นจุดต่อแบบ Rigid joint และจุดต่อที่แกนอาคารถูกกำหนดเป็น Fixed

3.2.4 การวิเคราะห์ Truss Outrigger ด้วยวิธี Pushover และ Cyclic loading

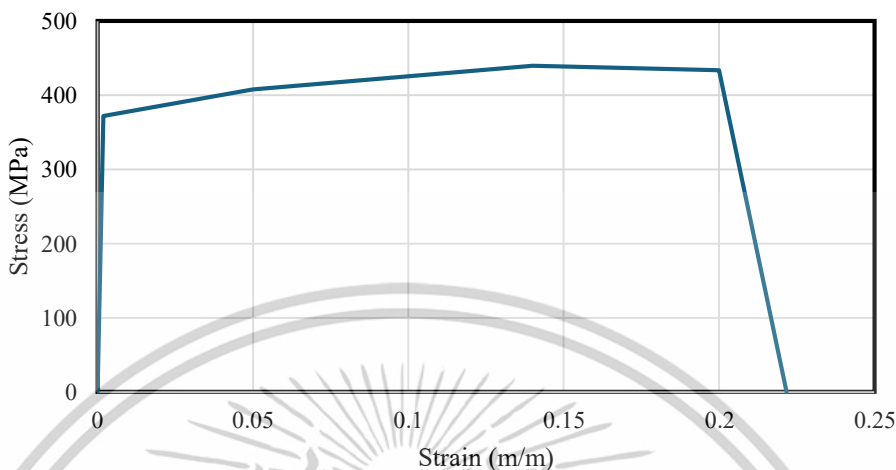
การวิเคราะห์ Truss Outrigger ด้วยวิธี Pushover เพื่อหาค่า stiffness ของ Truss Outrigger แต่ละตัวโดยทำการใส่ค่า Displacement ที่ปลายของ Truss outrigger เท่ากับ 350mm ทิศทางการใส่ Displacement จะใส่ในทิศทางขึ้นและลง รูปแบบวัสดุที่จะใช้ในการวิเคราะห์คือ Multilinear isotopic hardening ที่คิดผลของวัสดุในช่วง Strain-Hardening และใช้เหล็ก A36 ค่าคุณสมบัติวัสดุจะแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติของเหล็ก A36 [20]

Mechanical Properties of A36 steel	
Tensile Strength, Yield (MPa)	250
Tensile Strength, Ultimate (MPa)	450
Modulus of Elasticity (GPa)	200
Poisson's Ratio	0.26

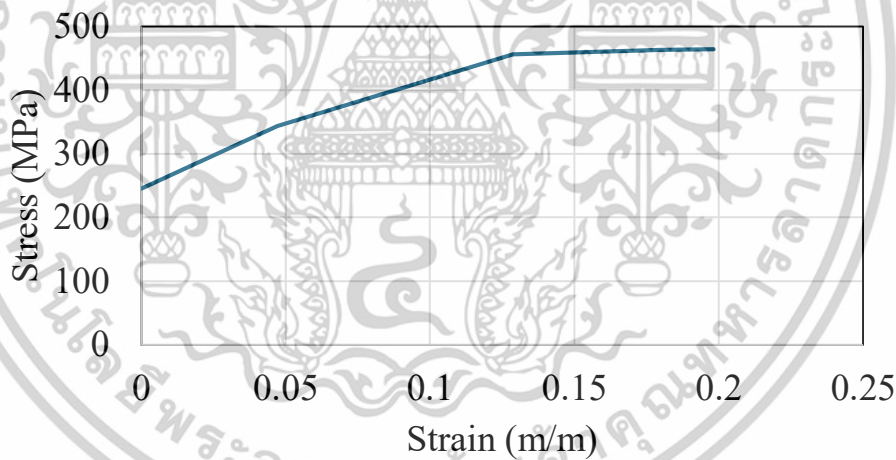
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A36 Stress-Strain



รูปที่ 3.20 A36 Stress Strain Curve

Multilinear isotropic hardening

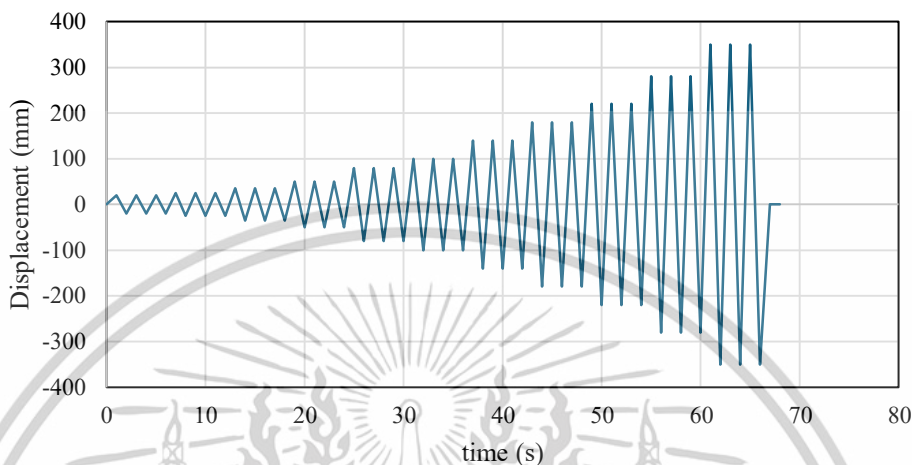


รูปที่ 3.21 Multilinear isotropic hardening curve

การวิเคราะห์ Truss Outrigger ด้วยวิธี Cyclic loading เพื่อทำการหาประสิทธิภาพการสลายพลังงานของ Truss แต่ละตัวเมื่อรับแรงแบบวัฏจักร มาตรฐานที่ใช้ในการกำหนดแรงจะใช้ ACI 374.1-05 โดยค่า Displacement สูงสุดคือ 350mm หลังจากที่ทำกรวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำ FEM ก็จะมีเลือก Truss จำนวน 2 ตัวเพื่อนำมาติดตั้งกับอาคาร 20 ชั้น เพื่อหาประสิทธิภาพของ Damp Outrigger ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Loading Protocol based on ACI 374.1-05

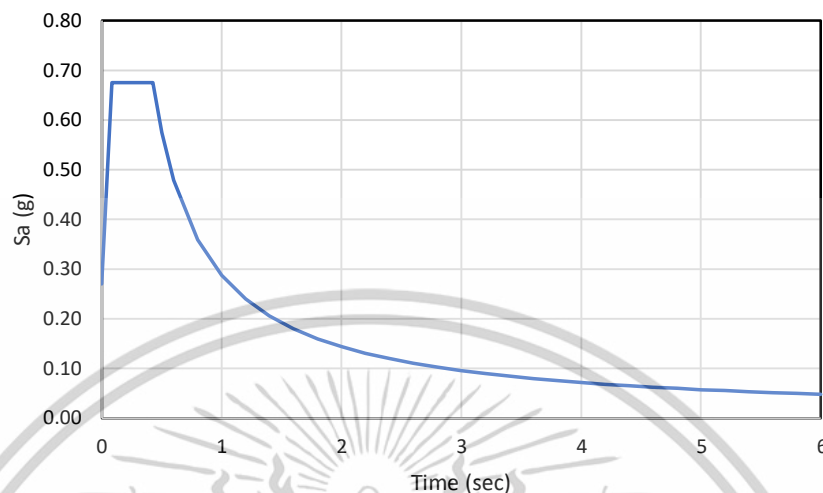


รูปที่ 3.22 Load Protocol ACI 374.1-05

3.2.4 การวิเคราะห์ผลตอบสนองของอาคาร

การออกแบบแรงแผ่นดินไหวถูกคำนวณมาจาก มยผ 1301-1302/61 [21] โดยบริเวณที่จะใช้ในการออกแบบแรงแผ่นดินไหวคือ อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย โดยมีค่าความเร่งที่คาบสั้น 0.20sec เท่ากับ 0.884g และค่าความเร่งที่คาบ 1 วินาที เท่ากับ 0.220g เนื่องจากอาคารถูกกำหนดให้เป็นอาคารสำนักงานดังนั้นค่าตัวประกอบความสำคัญของอาคาร (I) เท่ากับ 1 โครงสร้างอาคารเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีแกนอาคารเป็นกำแพงรับแรงเฉือน (Shear wall) ในการศึกษาจะกำหนดให้ระบบโครงสร้างสำหรับออกแบบแรงแผ่นดินไหวเป็นระบบกำแพงรับแรงเฉือนแบบธรรมดา (Ordinary Steel Concentric Braced Frame) $R = 3.5$ $\Omega = 2$ $Cd = 3.5$ เมื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณแรงแผ่นดินไหวจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติและค่าความเร่งตามรูปที่ 3.23

RSA Mae Lao



รูปที่ 3.23 ผลตอบสนองแรงแผ่นดินไหวที่อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย (5% damping)

3.2.4.1 วิธี Modal response spectrum analysis

อ้างอิงตาม ASCE 7-22 [22] วิธีนี้เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ โดยจะต้องทำการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อหาค่าคาบธรรมชาติ (natural time period) และและรูปแบบโหมดธรรมชาติ (Mode Shape) ของโครงสร้าง จำนวนของโหมดที่ต้องพิจารณาจะต้องพิจารณาผลตอบสนองของโครงสร้างในแต่ละโหมดโดยให้ค่าผลรวมน้ำหนักประสิทธิผลเชิงโหมด (Modal mass participation ไม่น้อยกว่า 90% ของน้ำหนักประสิทธิผลของอาคาร

การคำนวณค่าตอบสนองของอาคาร เช่น การเคลื่อนตัวของอาคาร แรงต่าง จะใช้วิธีรวมผลของแต่ละโหมดด้วยวิธี Square Root of Sum of Squares, SRSS หรือ Complete Quadratic Combination, CQC

3.2.4.2 วิธี Nonlinear time history analysis

การวิเคราะห์โครงสร้างแบบไม่เชิงเส้นแบบประวัติเวลาการวิเคราะห์หาค่าการตอบสนองทุกช่วงเวลาที่เกิดการสั่นไหวของโครงสร้างที่ถูกกระทำโดยความเร่งของพื้นดิน (Ground motion) การวิเคราะห์จะใช้วิธีการคำนวณปริพันธ์เชิงตัวเลข (Numerical integration) จากสมการที่ 1

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_g(t) \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากอาคารจะมีค่าอัตราความหน่วงจากวัสดุที่ใช้ก่อสร้างอาคารตั้งนั้นจึงสามารถจัดรูปสมการใหม่ จะได้

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = -\ddot{u}_g(t) \quad (3.2)$$

โดย M = Mass matrix

C = Damping matrix

K = Stiffness matrix

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}$$

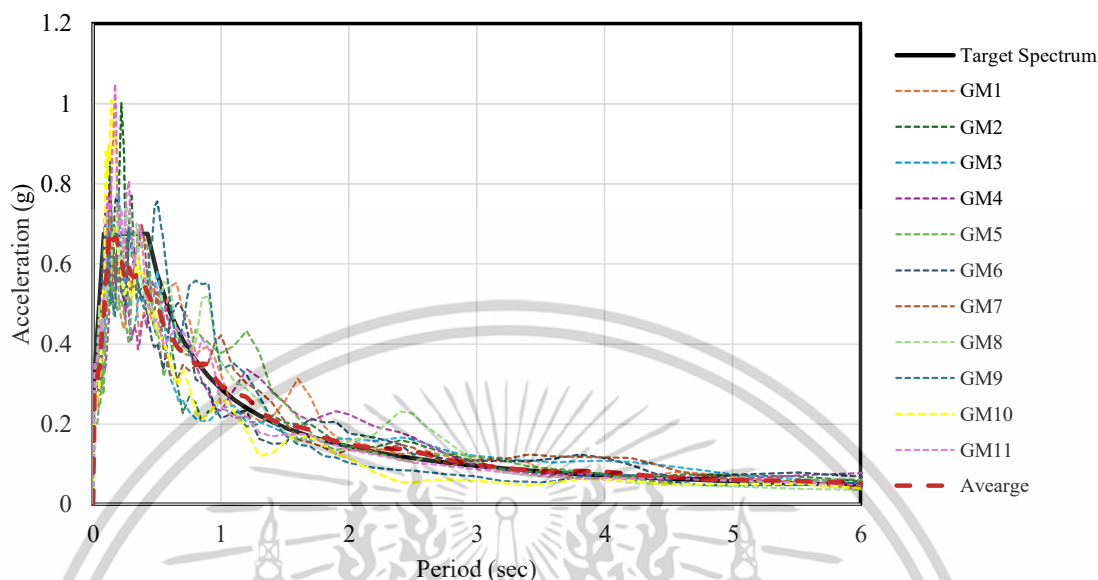
ξ = Damping ratio

$\ddot{u}_g(t)$ = ค่าความเร่งของพื้นดิน Ground motion

การเลือกคลื่นแผ่นดินไหวเพื่อที่จะนำมาวิเคราะห์จะต้องใช้ไม่น้อยกว่า 11 คลื่น โดยต้องเลือกคลื่นที่มีขนาดและระดับความรุนแรงการสั่นไหว สอดคล้องกับผลตอบสนอง (Target Response spectrum) สูงสุดที่กำลังพิจารณา

ในการศึกษาจะใช้คลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 11 คลื่นเพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างแบบ Nonlinear time history analysis โดยได้ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวมาจาก PEER NGA West 2 [24] เพื่อให้ขนาดของคลื่นแผ่นดินไหวมีความรุนแรงเท่ากับเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่อำเภอแม่ลาว ดังนั้นคลื่นแผ่นดินไหวแต่ละคลื่นมีขนาด 6.5-7.5 magnitude และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์ความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave) ของดิน Class D คือ 180-360 m/s เมื่อนำค่าผลตอบสนองของแผ่นดินไหวแต่ละคลื่นมาคูณกับค่า Scale factor เพื่อให้ได้ค่าใกล้เคียงกับ Target design spectrum โดยค่าเฉลี่ยของผลตอบสนองจะมีค่าไม่น้อย 90% ของ Target design spectrum

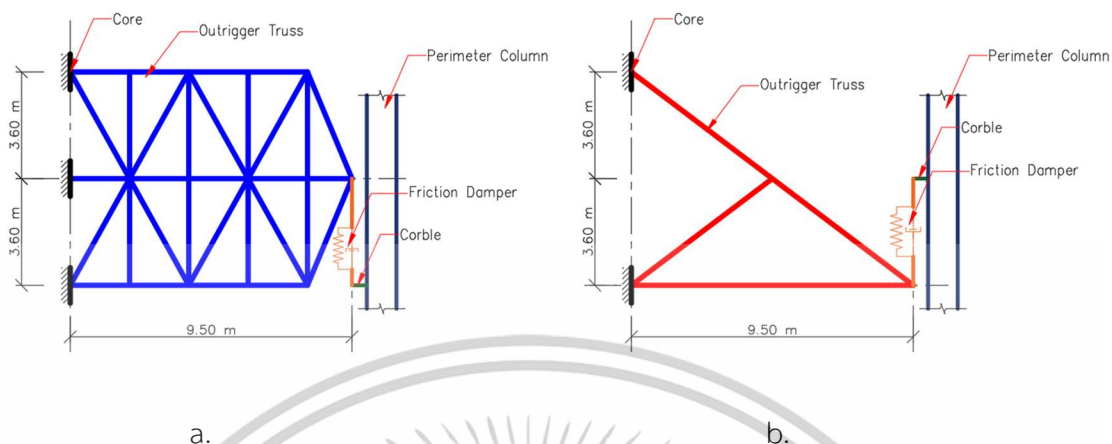
The 5% damped response spectra of the scaled ground motions



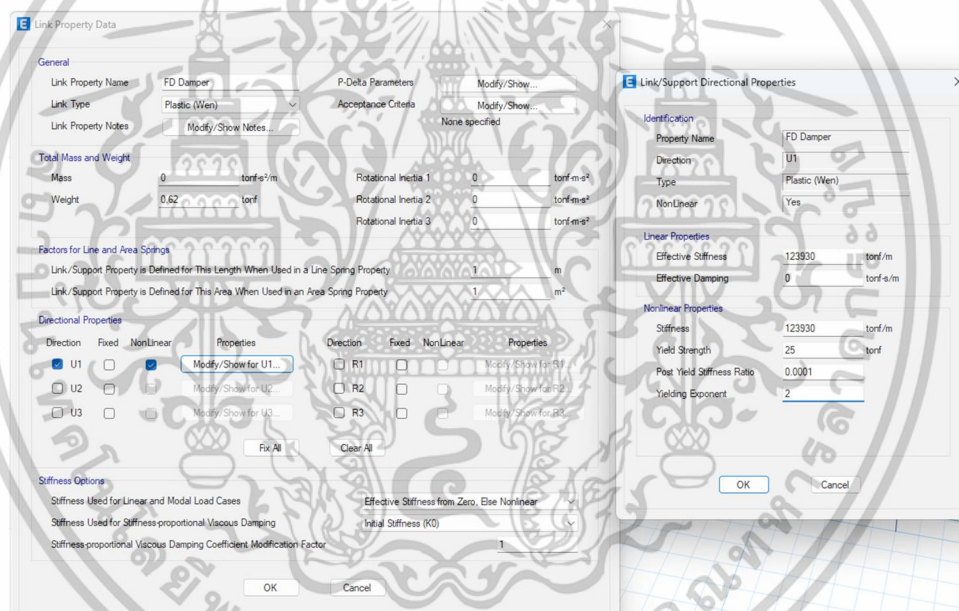
รูปที่ 3.24 ผลตอบสนองของคลื่นแผ่นดินไหวเป้าหมาย (5% damping)

3.2.5 การติดตั้ง Friction damper เข้ากับ Outrigger

Friction damper เป็นระบบสลายพลังงานด้วยแรงเสียดทาน วัสดุที่ใช้ทำหน้าสัมผัส (Friction surface) เช่น โลหะ หรือ Polymer ระบบสลายพลังงานนี้มีราคาที่ถูกและบำรุงรักษาได้ง่ายกว่าระบบอื่น การติดตั้ง Friction damper เข้ากับ Outrigger ใน Modal จะแสดงในรูปที่ 3.25a-b จากรูปจะทำการกำหนดชิ้นส่วน Truss outrigger เป็น Fiber section และอุปกรณ์สลายพลังงาน Friction damper เป็น Link element โดยเลือกชนิดของ link เป็น Plastic WEN จุดต่อของ Damper เป็น Pinned-Pinned และหูช้างที่ต่อระหว่างเสารอบนอก (Perimeter column) กับ Friction damper จะใช้ Rigid member ในการเชื่อมต่อ



รูปที่ 3.25 รายละเอียดการติดตั้ง Damped Outrigger ใน Model จำลอง



รูปที่ 3.26 รายละเอียดการกำหนด Link Element สำหรับ Friction damper

จากรูปที่ 3.24 Parameter ของ link element สำหรับ Friction damper Brace จะใช้เหล็ก H-beam 400x400x13x21mm ยาว 3.6 เมตร ซึ่งจะมีค่าค่าความแข็งของ Brace เท่ากับ 123,930 tonf/m ส่วนค่า Slip force ของ Friction damper จะป้อนค่าที่ Yield strength เนื่องจาก Friction damper Hysteresis loop จะมีรูปแบบเป็นสี่เหลี่ยมดังนั้น ค่า Post Yield Stiffness Ratio จะมีค่าเข้าใกล้ 0 ในการศึกษานี้จะใช้ค่าเท่ากับ 0.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์

4.1 ผลการวิเคราะห์ Outrigger Truss

การวิเคราะห์ Outrigger Truss แต่ละตัวนั้นถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS Finite element method (FEM). โดยจะแบ่งออกเป็นกรณีการวิเคราะห์ด้วยวิธี Pushover และ วิธี Cyclic Loading เพื่อหาค่าความแข็ง (Stiffness) และ ค่าการสลายพลังงานเมื่อรับแรงแบบวัฏจักร

จากการวิเคราะห์ Truss T1 เมื่อใส่แรงขึ้นและแรงลงพบว่าชั้นส่วนที่รับแรงอัดเกิดการโก่งเดาะขึ้นที่ตรงกลางชั้นส่วนตามรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปแบบ Truss T1 อาจจะมีการวิบัติได้หลังจากเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ และจากกราฟ Pushover ตามรูปที่ 4.11a จะได้ค่าความแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 625,000kN/m และแรงสูงสุดก่อนที่จะเกิดการครากเท่ากับ 29300 kN ในส่วนของกรณีการวิเคราะห์ Cyclic loading พบการวิบัติของชั้นส่วนทั้ง 2 ชั้นซึ่งเป็นการโก่งเดาะเฉพาะแห่งตามที่แสดงในรูปที่ 4.2 และจากการคำนวณค่าการสลายพลังงานตามรูปที่ 4.13a จะมีเท่ากับ 87,664 kJ ผลของการวิเคราะห์ของ Truss T2 ที่มีลักษณะที่ไม่สมมาตรพบว่ามีการวิบัติแบบการโก่งเดาะที่ชั้นส่วนรับแรงอัดในการใส่แรงขึ้นซึ่งค่าแรงสูงสุดก่อนเกิดการครากเมื่อรับแรงขึ้นเท่ากับ 23900 kN ทั้งแบบแรงขึ้นและแรงลงมีความแข็งเริ่มต้นเท่ากับ 482,700 kN/m จากกราฟ Pushover ของ Truss T2 และรูปลักษณะการวิบัติที่ได้จาก FEM ตามรูปที่ 4.3-4.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใส่แรงขึ้นจะทำให้ชั้นส่วนด้านบนเกิดการโก่งเดาะขึ้นและทำให้กราฟ Pushover เมื่อแรงถึงจุดครากก็จะมีค่าที่ลดลง ส่วนในการใส่แรงลงพบว่าชั้นส่วนด้านบนจะเกิดการยัดตัวและชั้นส่วนด้านล่างเกิดการวิบัติแบบตัดขึ้นซึ่งทำให้กราฟ Pushover ตามรูปที่ 4.11b มีลักษณะเป็น Bi-linear โดยมีแรงคงที่เนื่องจากชั้นส่วนด้านบนยังช่วยตั้งรับไม่ให้แรงตกลง ในส่วนผลการวิเคราะห์ Cyclic loading จากรูปที่ 4.13 b พบว่า Truss T2 สามารถสลายพลังงานได้เท่ากับ 99,174 kJ และเกิดการวิบัติแบบโก่งเดาะเฉพาะแห่งและโก่งเดาะนอกระนาบ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จากกรณีที่เกิดการโก่งเดาะตรงกลางของชั้นส่วนด้านบน Truss T2 ทางผู้วิจัยจึงได้เพิ่มชั้นส่วนทแยงเพื่อมาค้ำยันชั้นขึ้นด้านบนไม่ให้เกิดการโก่งเดาะและลดความยาวประสิทธิผลของชั้นส่วนรับแรงอัดใน Truss T3 จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Pushover ค่าแรงเมื่อถึงจุดครากมีค่าที่ใกล้เคียงกับ Truss T2 ตามแสดงในรูปที่ 4.12a แต่มีค่า Stiffness ที่สูงกว่า ถึง 576,000 kN/m หรือมากกว่า 19 % ส่วนโหมดการวิบัติจากรูปที่ 4.6-4.7

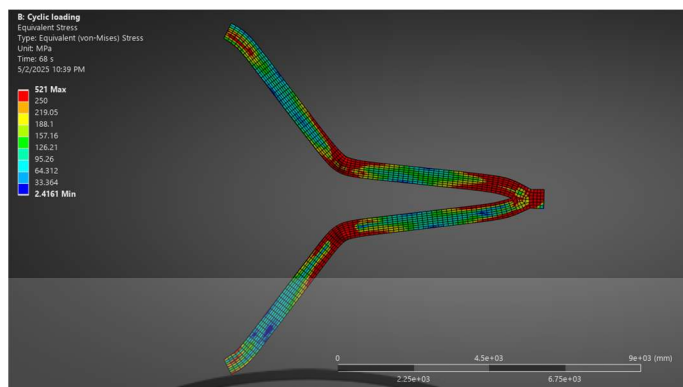
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากมีค้ำยันมารับแรงในแนวระนาบของ Truss ทำให้ไม่เกิดการโก่งเดาะในระนาบแต่ในด้านนอก ระนาบไม่มีการยึดรั้งทำให้เกิดการโก่งเดาะนอกระนาบแทนที่ขึ้นส่วนด้านบนเมื่อรับแรงขึ้น ส่วนแรงลง พบว่าเกิดการวิบัติแบบครากที่ขึ้นส่วนด้านบนที่รับแรงดึงและไม่มีพบการวิบัติแบบดัดที่ขึ้นส่วนด้านล่างที่เกิดแบบเดียวกับ Truss T2 ส่วนในผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Cyclic loading ในรูปที่ 4.8 และ 4.14a จะได้ค่าการสลายพลังงานเท่ากับ 108831 kJ ซึ่งสูงกว่า Truss T2 อยู่ที่ 9.7% และมีการวิบัติแบบโก่งเดาะ เฉพาะแห่ง จากการศึกษา [5,8] ที่ได้กล่าวว่า Outrigger truss, Damper และเสารอบนอกทำงานแบบ ถ่ายแรงระหว่างกันแบบอนุกรมเพื่อลดผลของ Overturning moment และควรออกแบบให้เป็น Rigid Outrigger หรือให้มีค่าความแข็งสูงสุด [12] ดังนั้น Truss T4 จึงถูกออกแบบมาให้มีค่าความแข็งที่สูงที่สุด ค่าความแข็งที่ได้จากการวิเคราะห์ Pushover เท่ากับ 1,536,955 kN/m โดยมีค่าที่มากกว่า Truss T3 ถึง 166% เนื่องจาก Truss T4 มีรูปแบบที่สมมาตรทำให้ กราฟ Pushover มีรูปแบบที่เหมือนกัน ตามที่แสดงในรูปที่ 4.12b ในกรณีแรงขึ้นและแรงลงซึ่งมีแรงที่จุดครากเท่ากับ 46,258 kN ส่วนของการ วิบัติพบว่าเกิดการครากของขึ้นส่วนด้านบนและด้านล่างที่อยู่ติดต่อกันตรงรับตามที่ตั้งได้จากแถบสี แดงตามที่แสดงในรูปที่ 4.9 ไม่พบการโก่งเดาะ ส่วนผลการวิเคราะห์ Cyclic loading พบว่าเกิดการวิบัติ แบบการโก่งเดาะเฉพาะแห่งที่ขึ้นส่วนด้านบนและขึ้นส่วนด้านล่างใกล้กับจุดรองรับตามรูปที่ 4.10 และมี ค่าการสลายพลังงานเท่ากับ 570989 kJ ซึ่งสูงกว่า Truss T3 ถึง 5เท่า ตามที่แสดงในรูปที่ 4.14b



รูปที่ 4.1 Pushover Truss T1

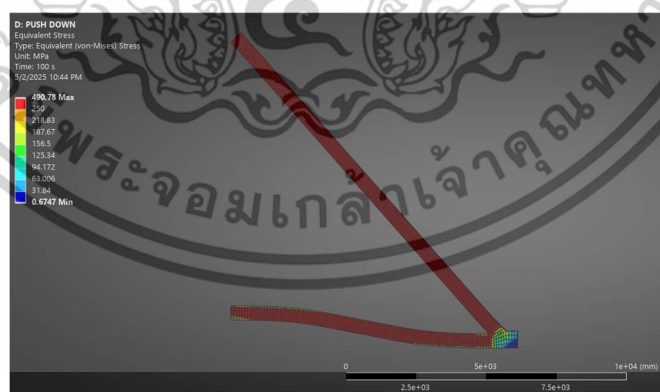
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 Cyclic Loading Truss T1

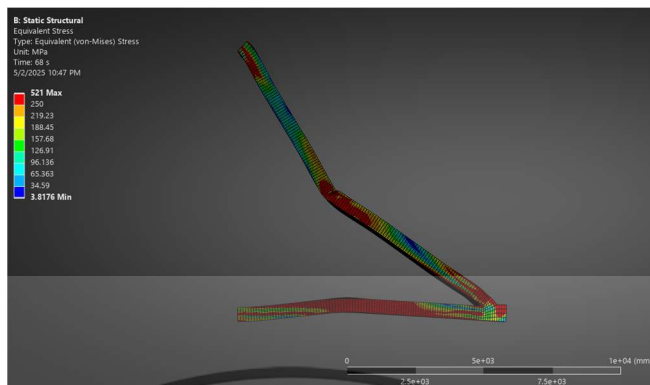


รูปที่ 4.3 Pushover Up Truss T2

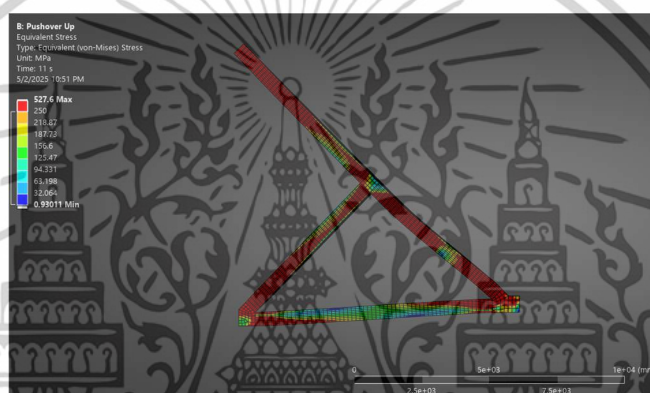


รูปที่ 4.4 Pushover Down Truss T2

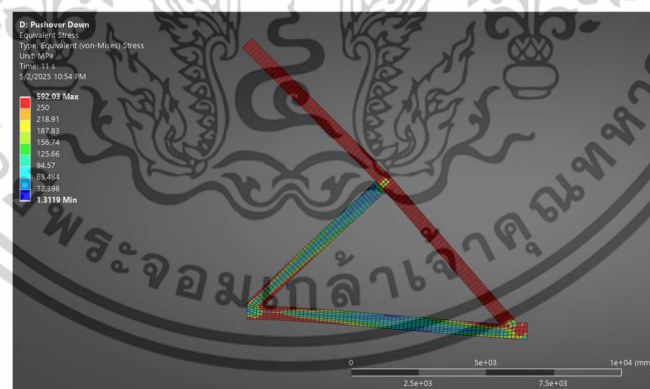
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 Cyclic Loading Truss T2

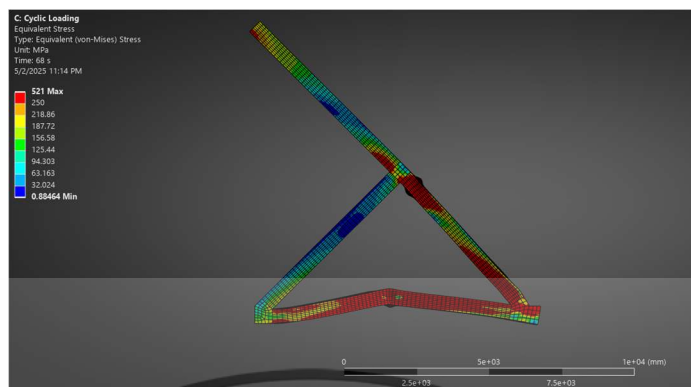


รูปที่ 4.6 Pushover Up Truss T3

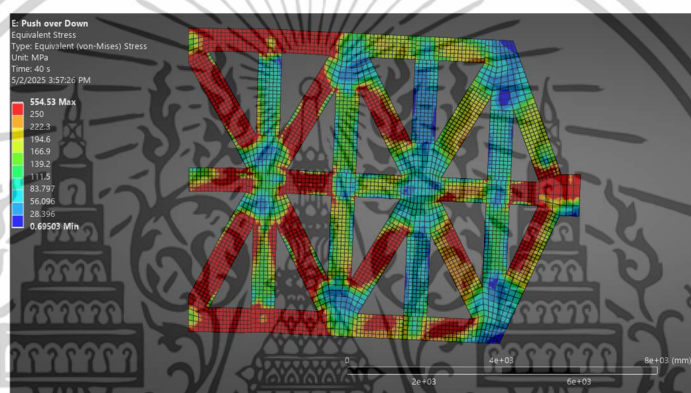


รูปที่ 4.7 Pushover Down Truss T3

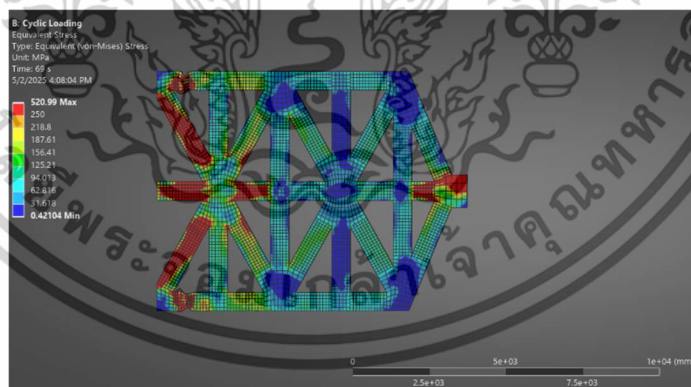
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 Cyclic Loading Truss T3

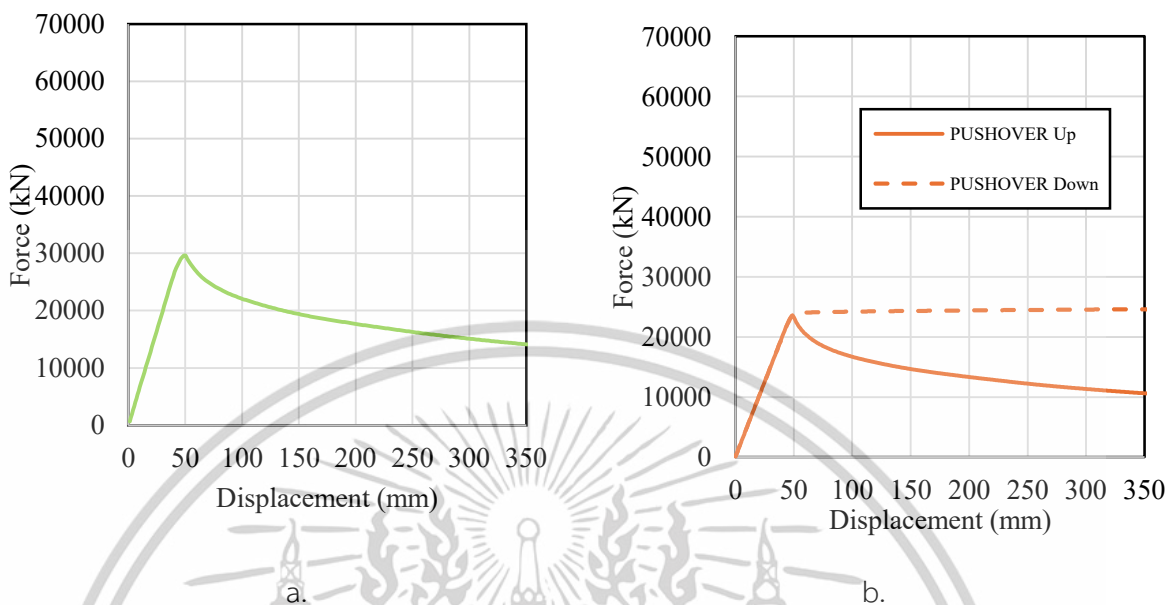


รูปที่ 4.9 Pushover Truss T4

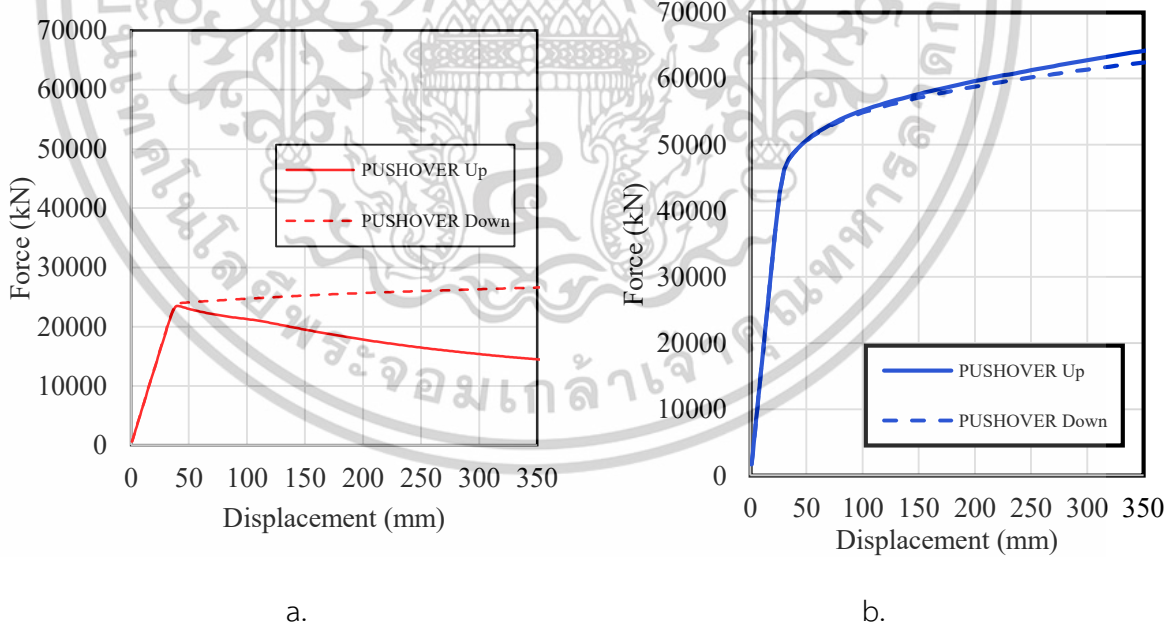


รูปที่ 4.10 Cyclic Loading Truss T4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

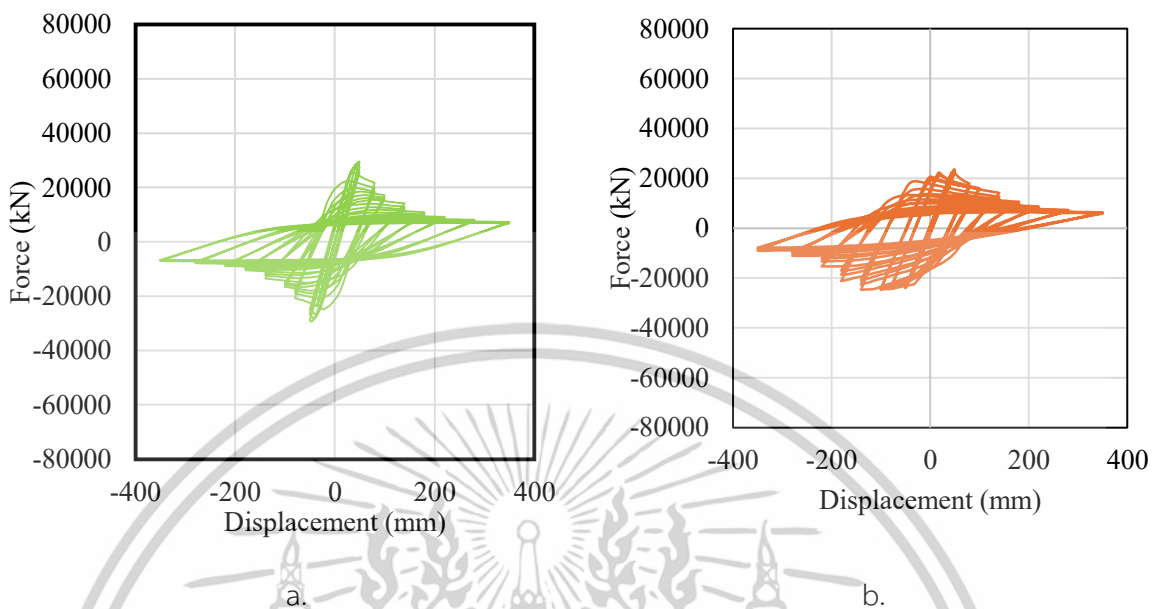


รูปที่ 4.11 Pushover curve a. Truss T1 b. Truss T2

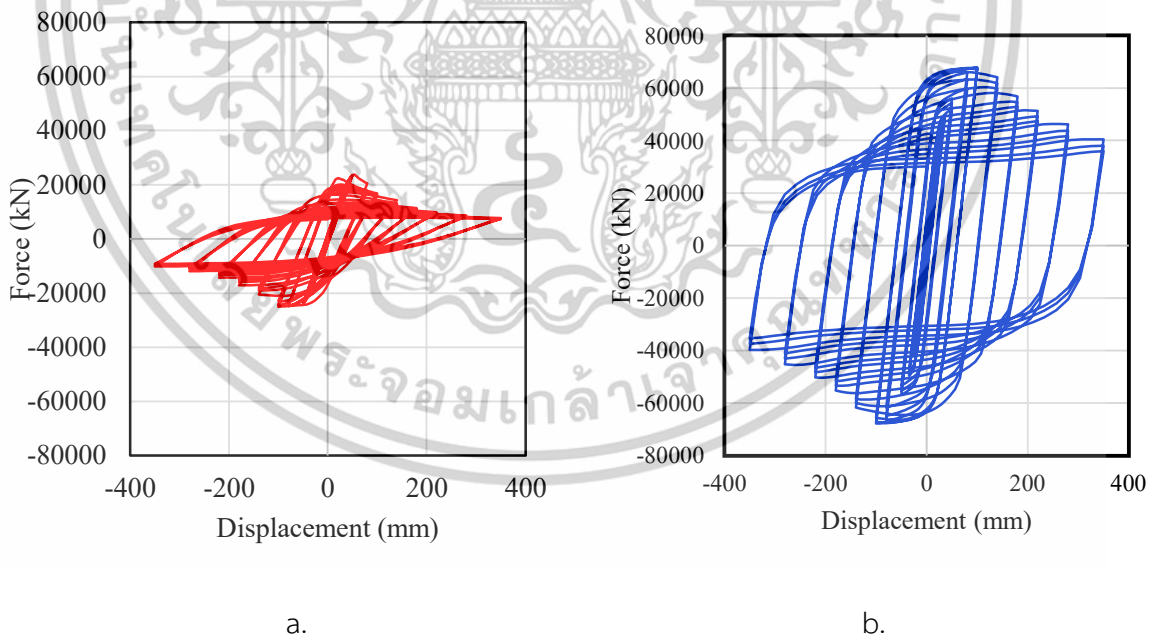


รูปที่ 4.12 Pushover curve a. Truss T3 b. Truss T4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



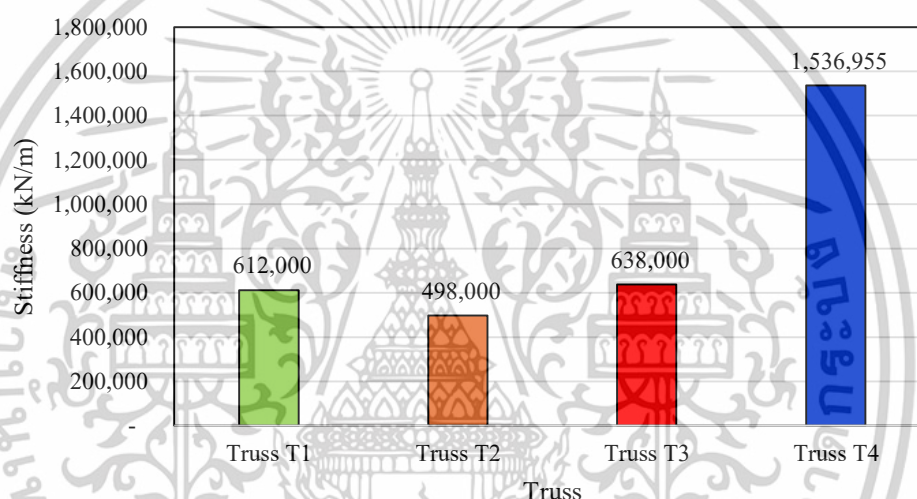
รูปที่ 4.13 Hysteresis curve a. Truss T1 b. Truss T2



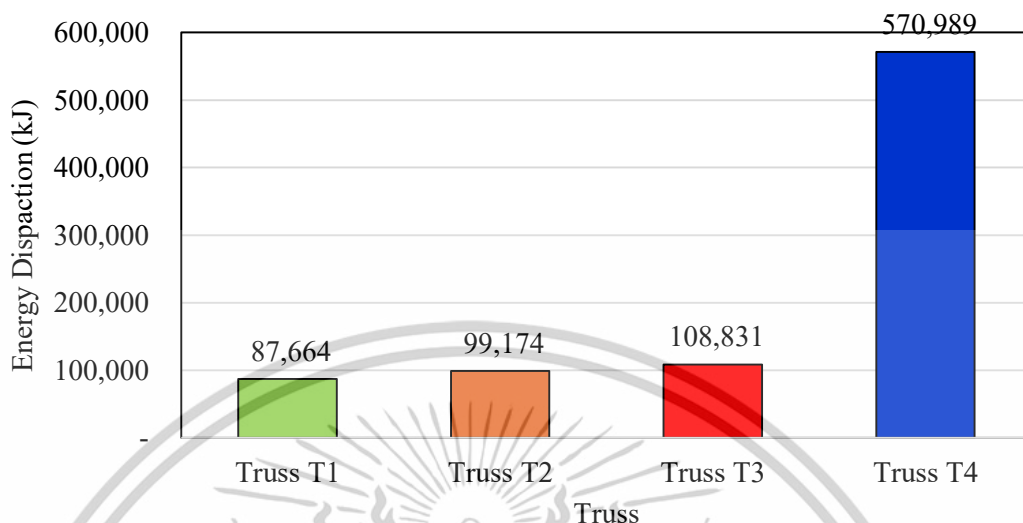
รูปที่ 4.14 Hysteresis curve a. Truss T3 b. Truss T4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

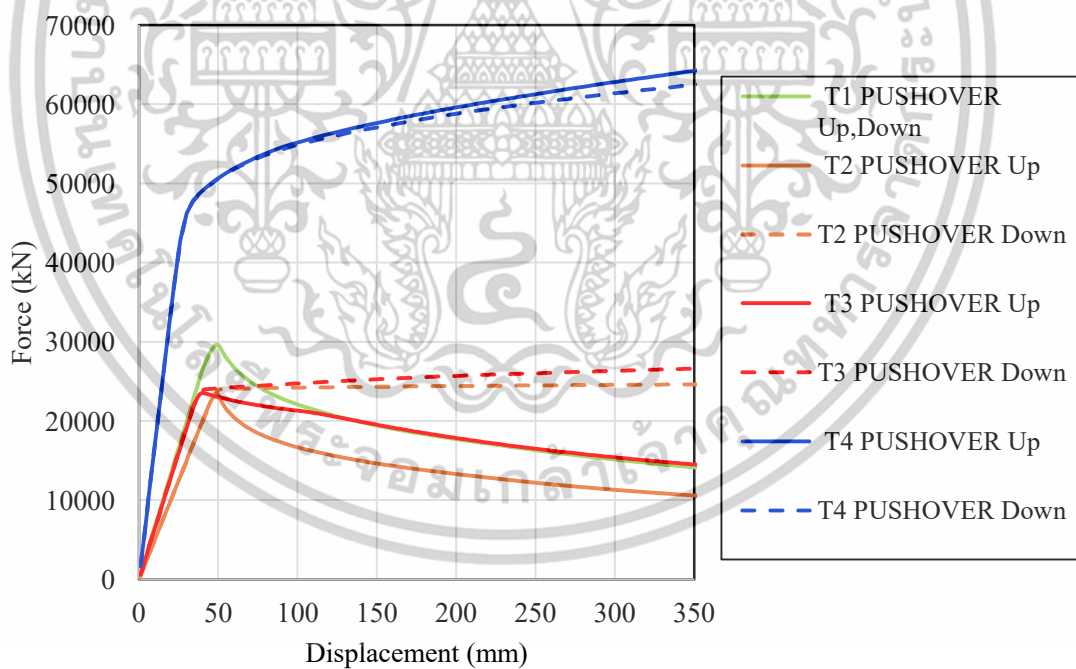
จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Pushover และ Cyclic loading ของ Truss T1 ถึง T4 เมื่อพิจารณาในกรณี Pushover ของ Truss แต่ละแบบนั้นจะเห็นได้ว่าชิ้นส่วนที่รับแรงจนเกินค่าแรงวิกฤตของชิ้นส่วนและจะเกิดการโก่งเดาะจนทำให้ค่าแรงในกราฟ Pushover ตกลงมาเมื่อแรงผ่านจุดคราก ดังนั้นควรออกแบบให้ Outrigger Truss เป็น Elastic เมื่อเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่เพื่อหลีกเลี่ยงผลการโก่งเดาะที่เกิดจากแรงแนวแกน (Axial Force) ที่สูงกว่าแรงวิกฤต (Critical load) ของชิ้นส่วนรับแรงอัด ในงานวิจัยนี้จะเลือก Truss T3 และ Truss T4 มาติดตั้งให้กับอาคารตัวอย่างสูง 20 ชั้นเพื่อวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของ damp outrigger ต่อไป



รูปที่ 4.15 ค่าความแข็งของ Truss แต่ละแบบ

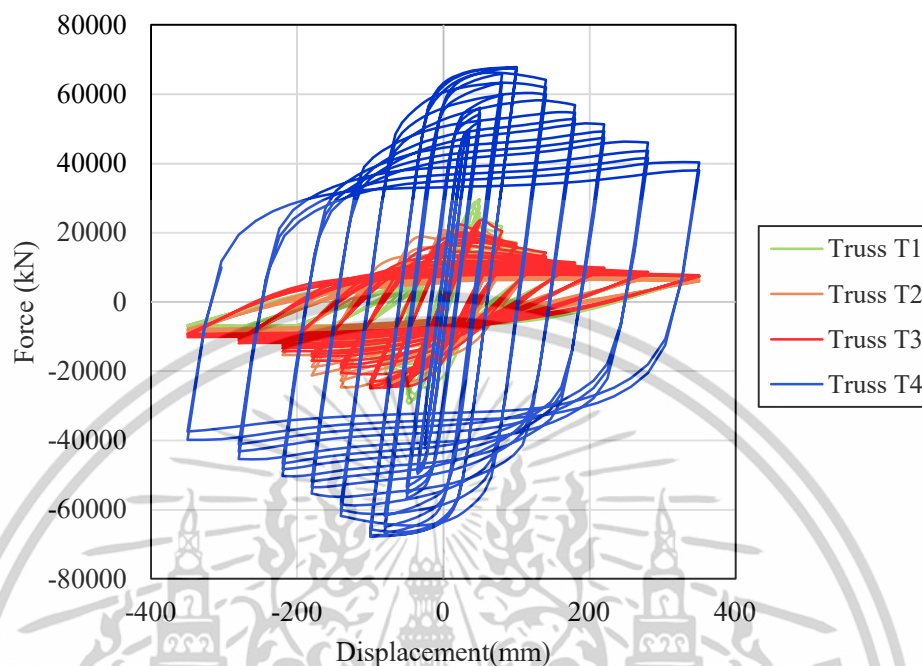


รูปที่ 4.16 ค่าการสลายพลังงาน ของ Truss แต่ละแบบ



รูปที่ 4.17 Force Displacement ของ Outrigger แต่ละแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



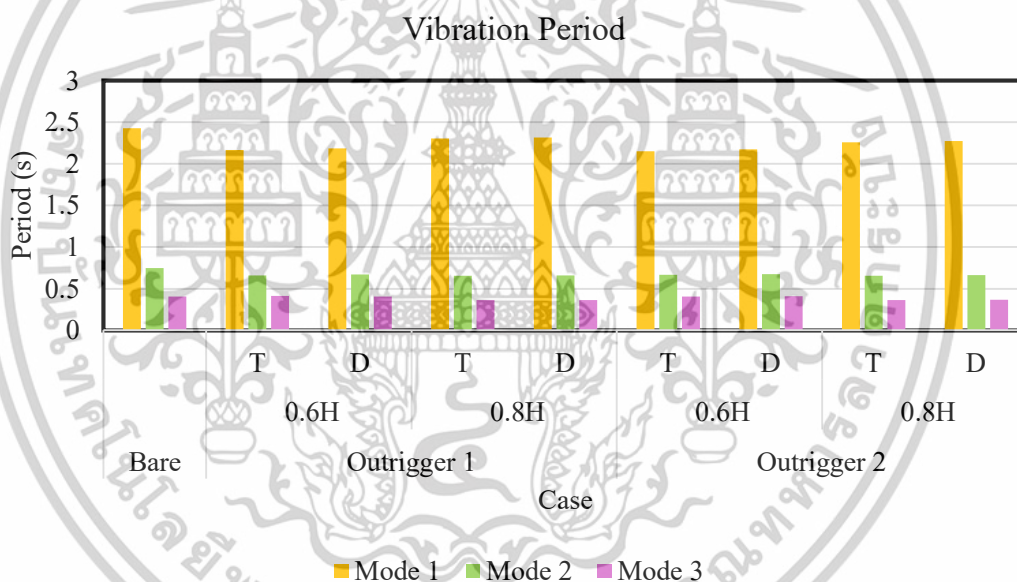
รูปที่ 4.18 Hysteresis curve ของ Truss แต่ละแบบ

4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Modal Analysis

วิธี Modal Analysis เป็นวิธีที่ใช้ในการหาคาบการสั่นของอาคาร (Vibration period) และรูปร่างการสั่นของอาคาร (Mode Shape) จากตารางที่ 4.1 เมื่อ T และ D คือ Outrigger แบบดั้งเดิมและ Damp Outrigger ตามลำดับ เมื่อพิจารณา Outrigger แบบที่ 1 ,แบบที่ 2 และ Mode 1 คาบการสั่นลดลงมากที่สุดเมื่อติดตั้ง Outrigger ที่ความสูง 0.6H เมื่อเทียบความสูงเดียวกันค่าคาบการสั่นเมื่อไม่ติดตั้ง Damper มีค่าที่น้อยกว่า จากการติดตั้ง Outrigger คนละความสูงกับพบว่าที่ความสูง 0.6H จะมีคาบการสั่นที่ต่ำกว่า 0.8H ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ความสูง 0.6H จะมีค่าความแข็งที่สูงกว่า 0.8H จึงทำให้ค่าการเคลื่อนที่ลดลงมากที่สุด

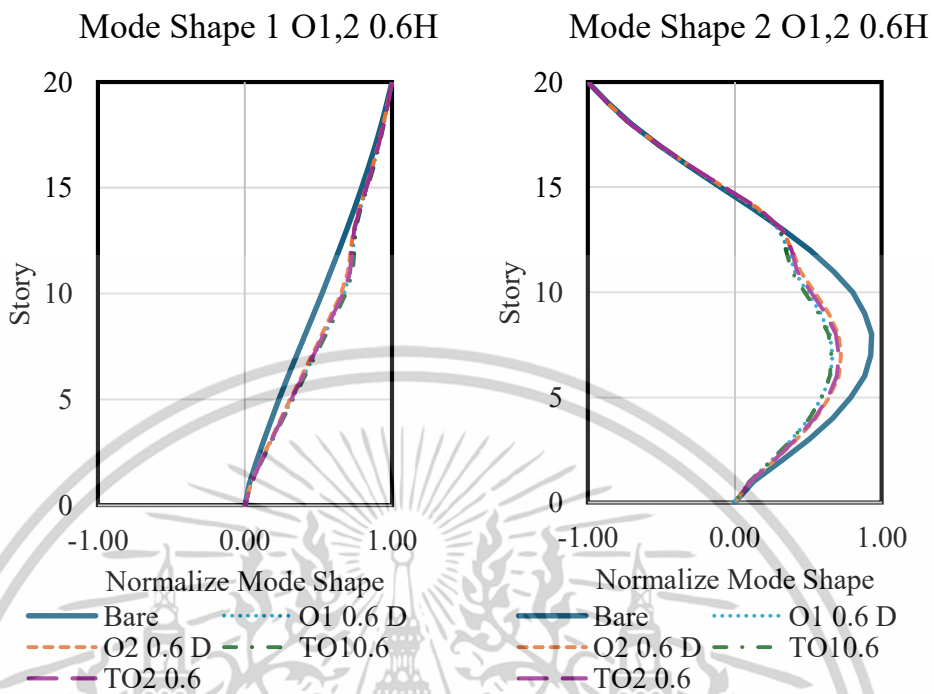
ตารางที่ 4.1 ค่าคาบการสั่นของอาคารแต่ละ Mode

	Bare	Outrigger 1				Outrigger 2			
		0.6H		0.8H		0.6H		0.8H	
		T	D	T	D	T	D	T	D
Mode 1	2.425	2.164	2.186	2.303	2.315	2.148	2.173	2.258	2.274
Mode 2	0.749	0.661	0.6714	0.654	0.661	0.667	0.674	0.657	0.664
Mode 3	0.405	0.414	0.408	0.363	0.366	0.408	0.409	0.366	0.369

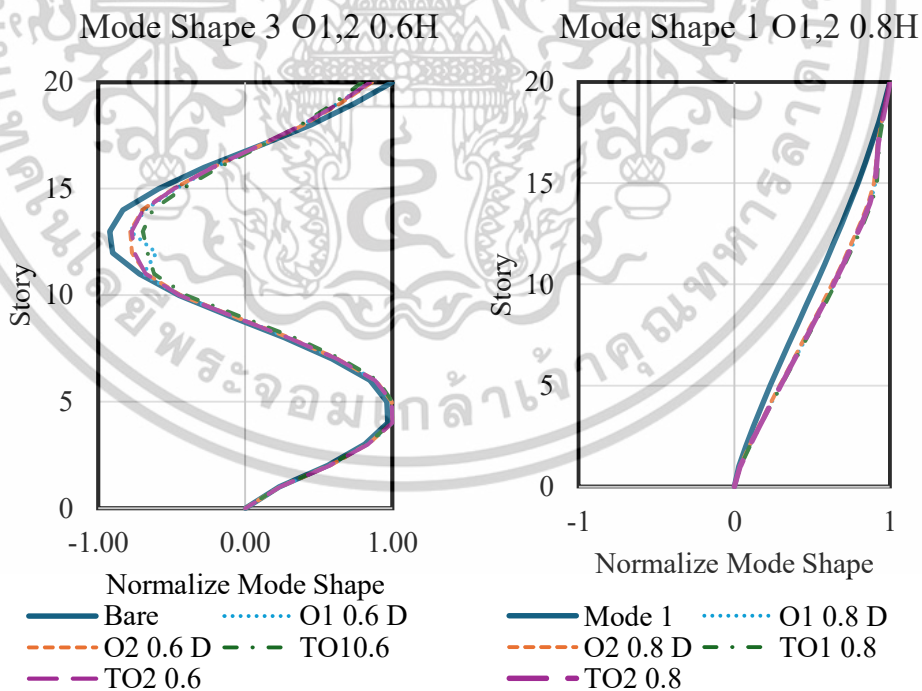


รูปที่ 4.19 ค่าการสั่นของอาคารตัวอย่างแต่ละหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

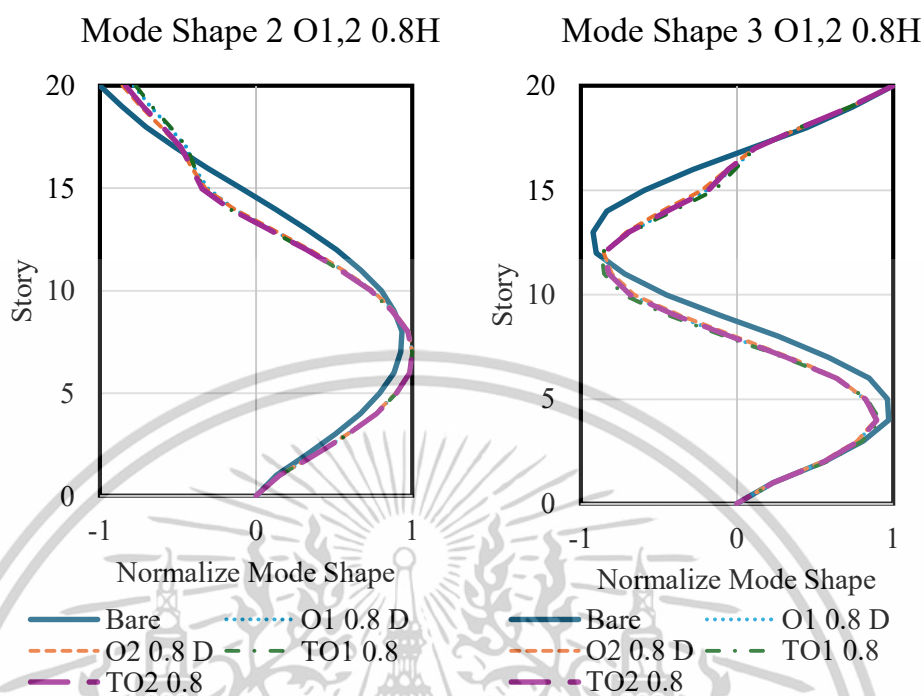


รูปที่ 4.20 รูปร่างการสั่นใน Mode 1 และ Mode 2 ของ Outrigger 1,2 0.6H



รูปที่ 4.21 รูปร่างการสั่นใน Mode 3 และ Mode 1 ของ Outrigger 1,2 0.6H , 0.8H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 รูปร่างการสั่นใน Mode 2 และ Mode 3 ของ Outrigger 1,2 0.8H

4.3 ผลลัพธ์ Pushover Analysis กับอาคารตัวอย่าง

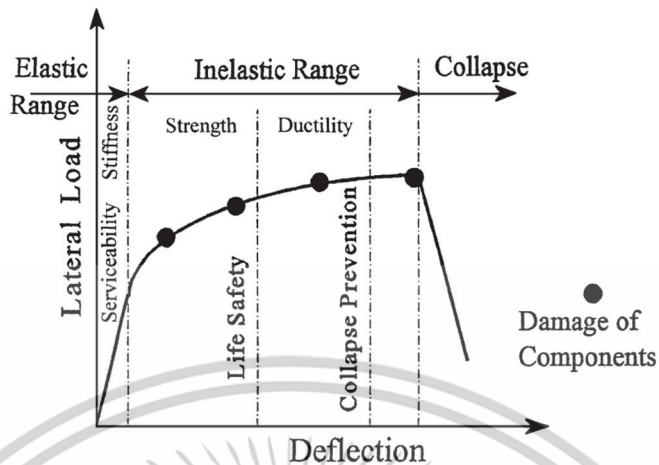
Pushover analysis เป็นวิธีการวิเคราะห์เพื่อประเมินประสิทธิภาพของอาคารรับแรงต้านข้าง โดยวิธีนี้สามารถทราบความเสียหายที่จุดต่อของชิ้นส่วนอาคาร ซึ่งระดับความเสียหายมีดังนี้

1. Immediate occupancy
2. Life safety
3. Collapse Prevention

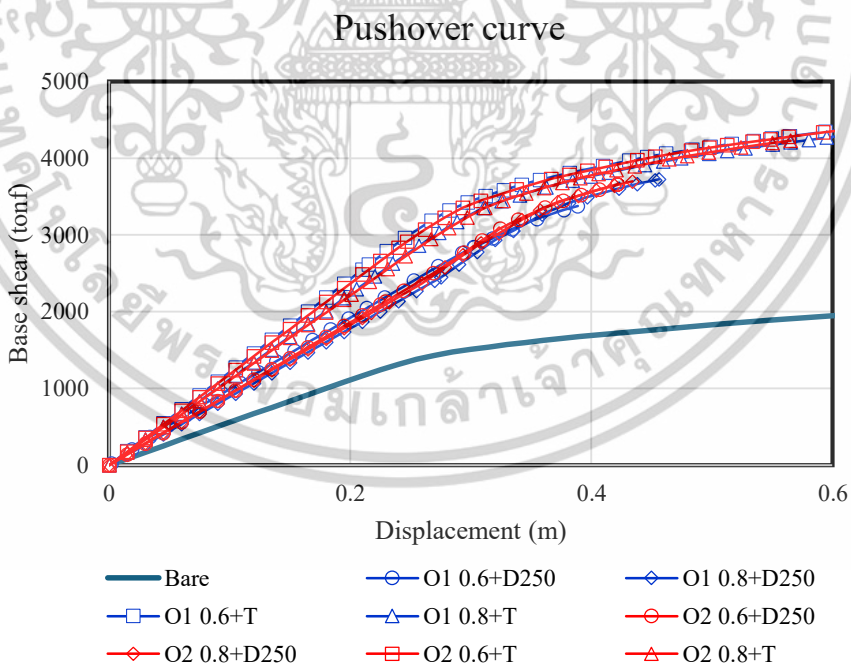
ซึ่งวิธีนี้สามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งคือ Performance-Based Seismic Design เมื่อทำการวิเคราะห์แล้วจะได้ Performance curve ตามรูปที่ 4.51

จากการวิเคราะห์อาคารตัวอย่างในการศึกษานี้ได้วิเคราะห์ Pushover กับอาคารที่ไม่ได้ติดตั้ง Outrigger อาคารที่ติดตั้ง Damp Outrigger โดยใช้ขนาด Damper เท่ากับ 250kN, Traditional Outrigger ที่ความสูง 0.6H และ 0.8H ตามที่แสดงในรูปที่ 4.56 จากรูปพบว่าไม่ว่าจะติดตั้งที่ความสูง 0.60H หรือ 0.80H Pushover curve จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

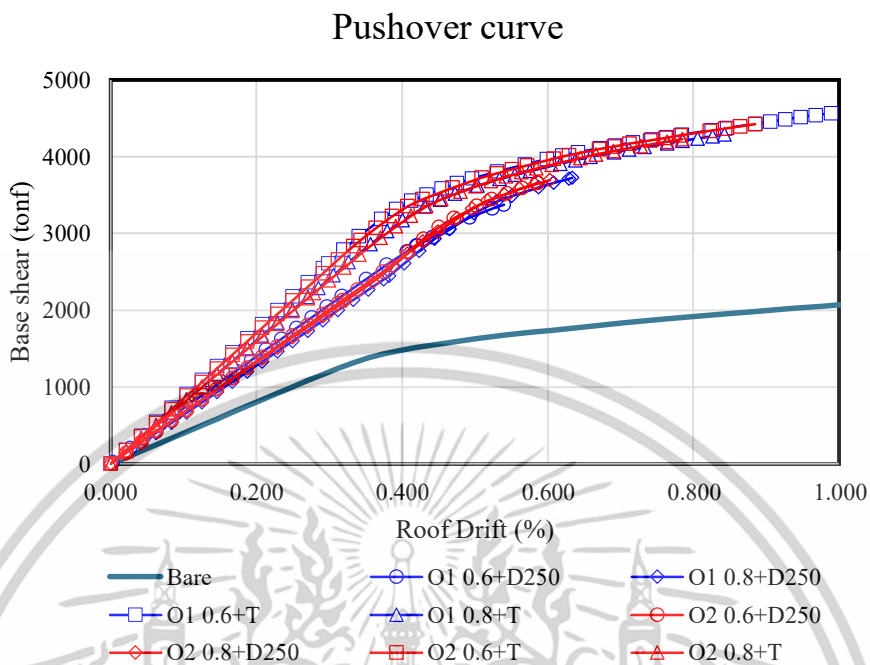


รูปที่ 4.23 Performance curve [25]

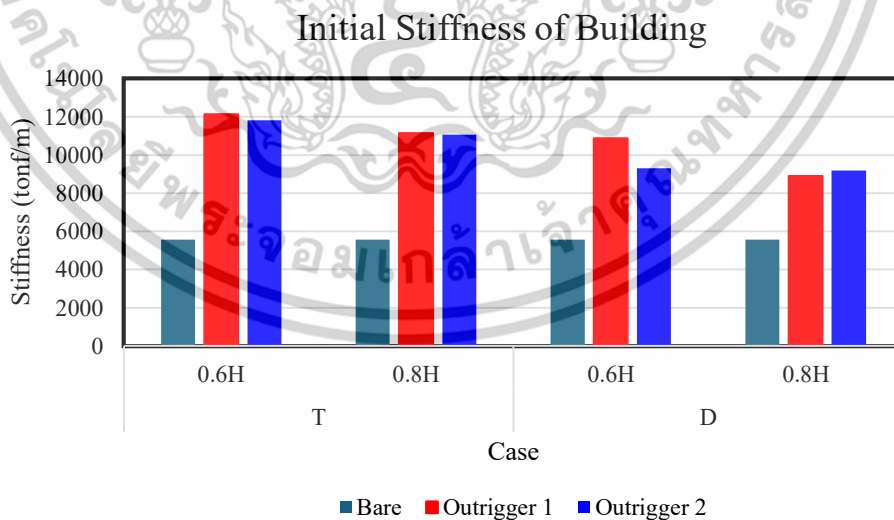


รูปที่ 4.24 Pushover curve Base Shear Vs Displacement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 Pushover curve Base Shear Vs Roof Drift

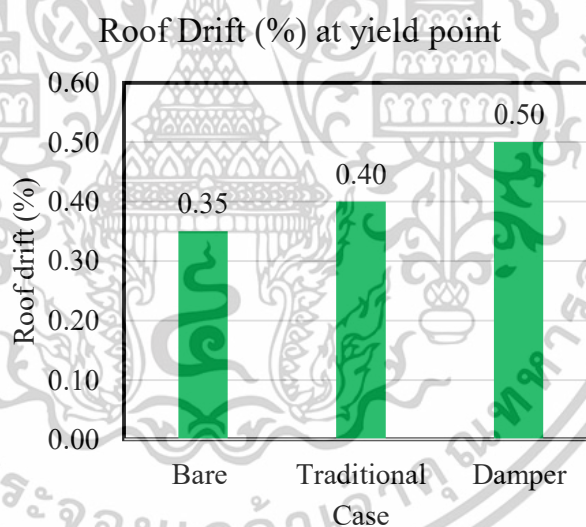


รูปที่ 4.26 Initial Stiffness of the building

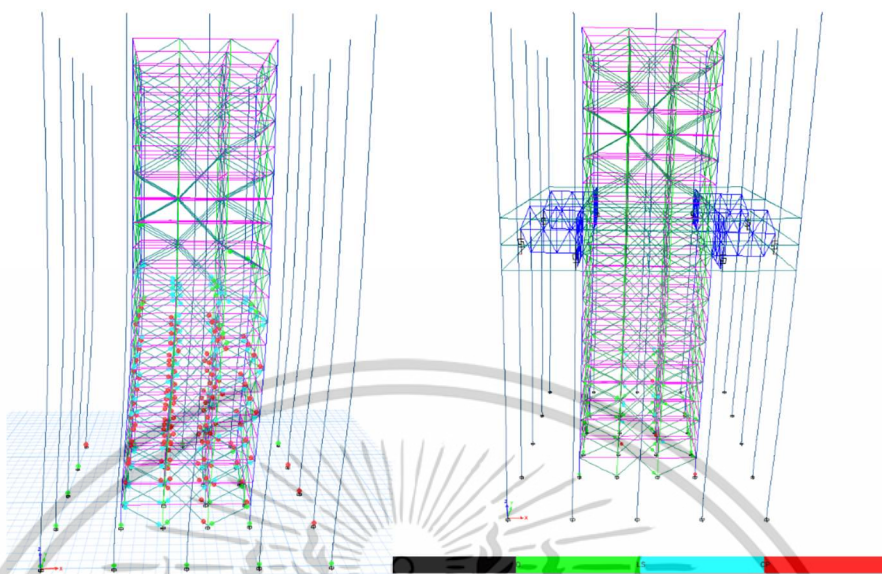
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.58 เมื่อติดตั้ง Damp Outrigger สามารถทำให้ค่าความแข็งโดยรวมของอาคารเพิ่มขึ้นประมาณ 71% เมื่อเทียบกับอาคารที่ไม่ได้ติดตั้ง ขณะที่ถ้าไม่ติดตั้ง Damper ค่าความแข็งจะสูงกว่า Damp Outrigger เนื่องจากจุดต่อระหว่าง Outrigger กับเสารอบนอกที่เป็นตัวช่วยให้ ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับอาคารที่ไม่ได้ติดตั้งแล้วพบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นประมาณ 107% โดยค่าความแข็ง Initial Stiffness แสดงในรูปที่ 4.58

เมื่อพิจารณาถึงความเสียหายของอาคารจาก Pushover curve ตามรูปที่ 4.59 โดยใช้ค่า Roof Drift (%) อาคารที่ไม่ติดตั้งจะเกิดความเสียหายที่ 0.35% เมื่อติดตั้ง Damp Outrigger เกิดความเสียหายที่ 0.50% และ อาคารที่ติดตั้ง Traditional Outrigger เกิดความเสียหายที่ 0.40% นี้แสดงให้เห็นว่าควรติดตั้ง Damper เพื่อลดความเสียหายให้กับอาคาร เมื่อพิจารณารูปที่ 4.60-4.64 พบว่าลักษณะการเสียรูปของอาคารเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Pushover analysis นั้นจะเป็นการเสียรูปแบบ Shear Deformation ซึ่งการเสียรูปแบบนี้จะเกิดขึ้นกับอาคารที่มีความสูงที่ไม่มากและมีค่าความแข็งที่สูง



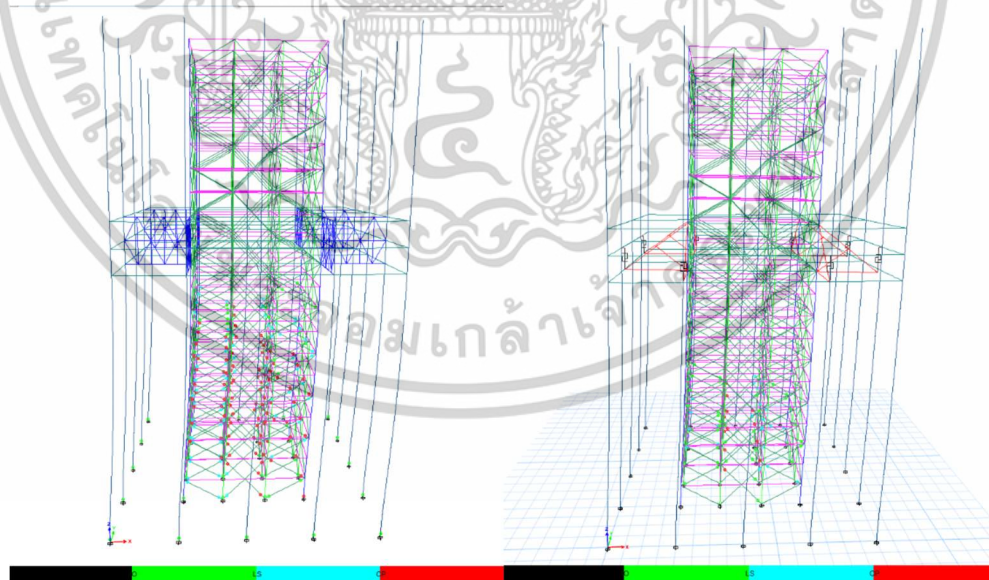
รูปที่ 4.27 ความเสียหายของอาคารเทียบกับ Roof Drift



a.

b.

รูปที่ 4.28 ความเสียหายของอาคาร a. Bare b. O1 0.6+D250

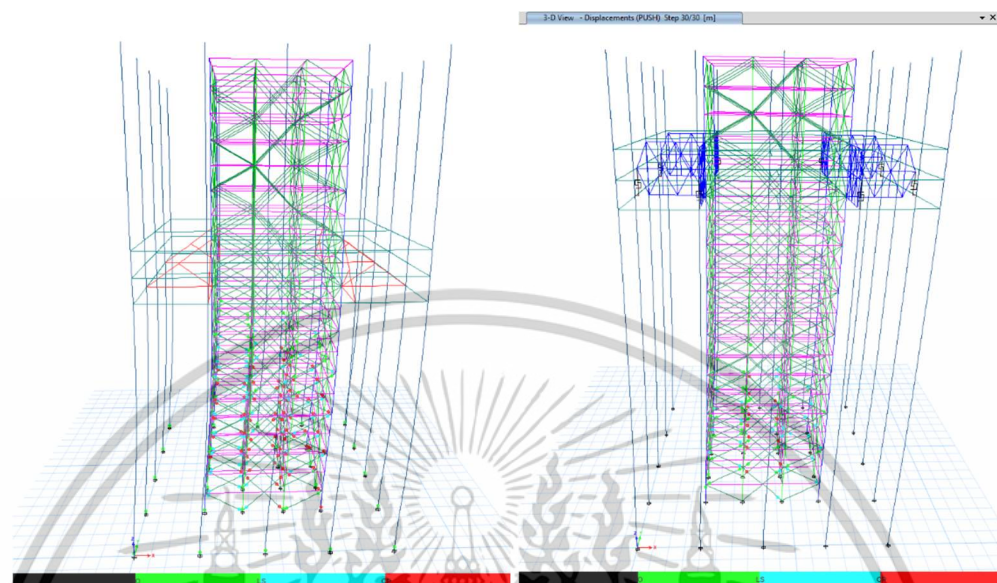


a.

b.

รูปที่ 4.29 ความเสียหายของอาคาร a. O1 0.6+T b. O2 0.6+D250

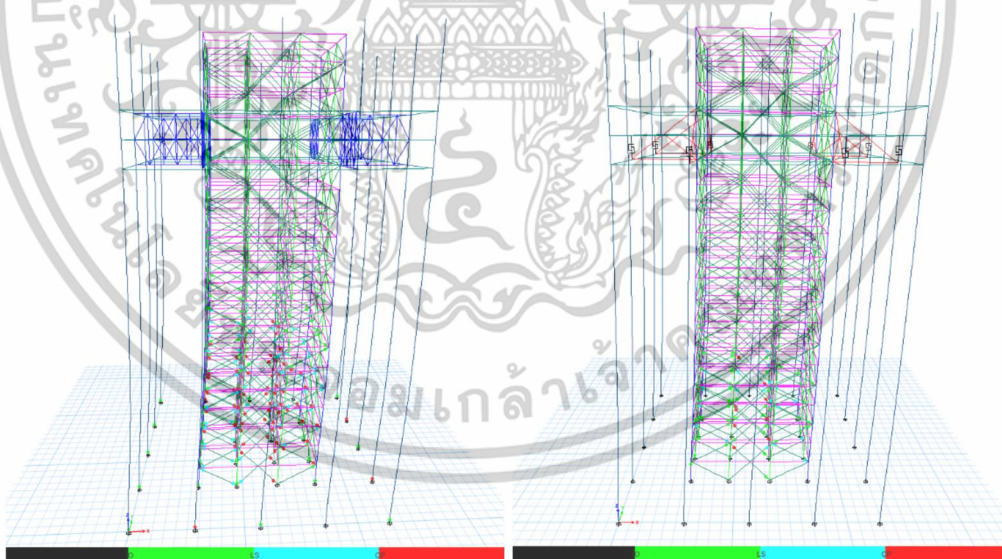
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



a.

b.

รูปที่ 4.30 ความเสียหายของอาคาร a. O2 0.6+T b. O1 0.8+D250

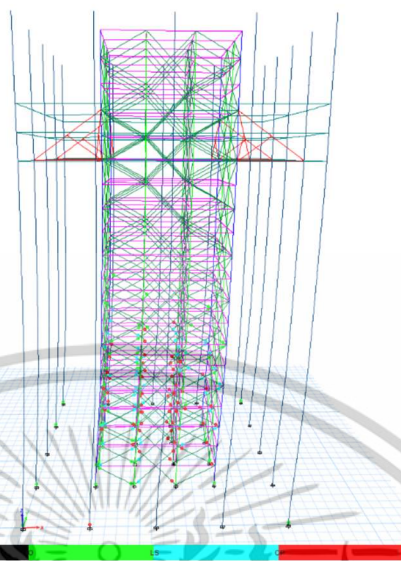


a.

b.

รูปที่ 4.31 ความเสียหายของอาคาร a. O1 0.8+T b. O2 0.8+D250

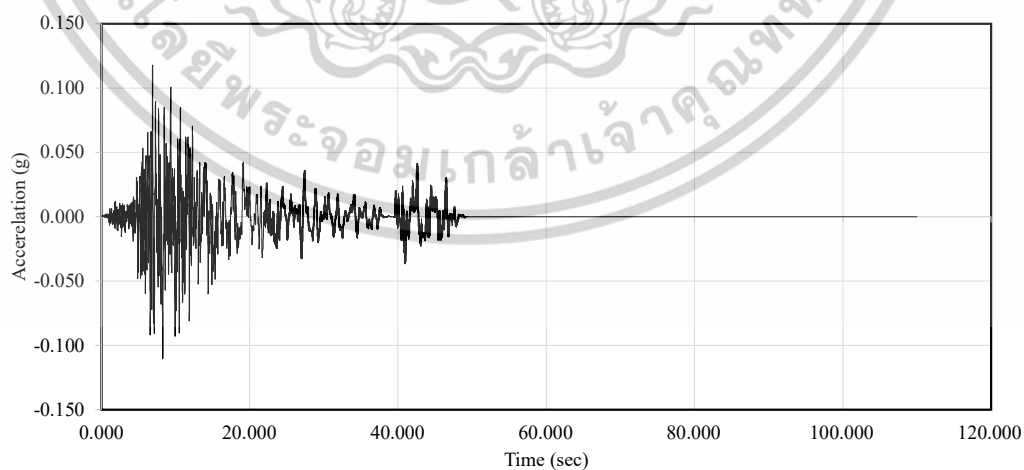
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 ความเสียหายของอาคาร O2 0.8+T

4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Nonlinear time history analysis

ผลวิเคราะห์นี้ได้มาจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Nonlinear time history analysis โดยได้แบ่งตัวอย่างการวิเคราะห์สำหรับงานวิจัยนี้ได้เป็น 21 ตัวอย่างซึ่งแบ่งออกเป็น อาคารที่ไม่ได้ติดตั้ง Outrigger อาคารที่ติดตั้ง Outrigger แบบที่ 1 และ 2 ตำแหน่งความสูง 0.6 และ 0.8 เท่าของความสูงอาคาร ขนาดของ Friction Damper 100kN, 250kN, และ 1000 kN



รูปที่ 4.33 ตัวอย่างคลื่นแผ่นดินไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 รายการตัวอย่างการวิเคราะห์

Case	Outrigger type	Outrigger location	Brace	Damper	Remark
Bare	-	-	-	-	Bare RC
O1 0.6+B	1	0.6	Brace	-	
O1 0.6+D100			-	10	
O1 0.6+D250			-	25	
O1 0.6+D1000			-	100	
O2 0.6+B	2	0.6	Brace	-	
O2 0.6+D100			-	10	
O2 0.6+D250			-	25	
O2 0.6+D1000			-	100	
O1 0.8+B	1	0.8	Brace	-	
O1 0.8+D100			-	10	
O1 0.8+D250			-	25	
O1 0.8+D1000			-	100	
O2 0.8+B	2	0.8	Brace	-	
O2 0.8+D100			-	10	
O2 0.8+D250			-	25	
O2 0.8+D1000			-	100	
O1 0.6+T	1	0.6	-	-	Traditional
O2 0.6+T	2		-	-	Traditional
O1 0.8+T	1	0.8	-	-	Traditional
O2 0.8+T	2		-	-	Traditional

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

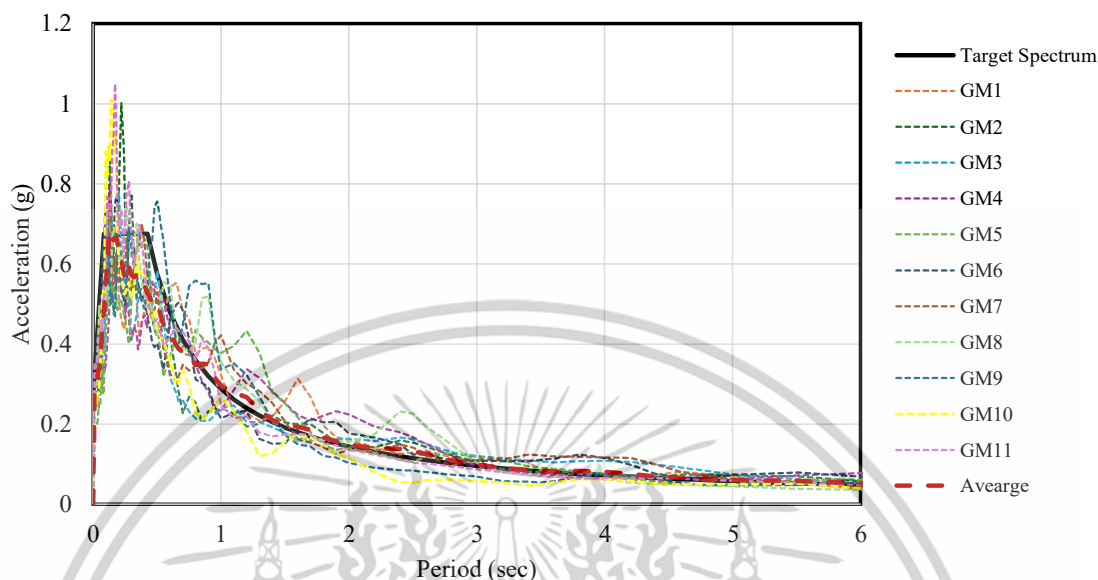
คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์ตาม ASCE 7-22 [22] ได้อธิบายว่าต้องใช้คลื่นแผ่นดินไหวอย่างน้อย 11 คลื่น โดยแต่ละคลื่นต้องมีขนาดและความรุนแรงเท่ากับ Design Spectrum ที่พิจารณาในการศึกษานี้ได้เลือกพื้นที่ อ.แม่ลาว มาเป็น Design Spectrum คลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 11 คลื่นได้มาจาก PEER data base [23] ตามที่แสดงในตารางที่ 4.1 ชนิดของรอยเลื่อนคือ Strike-slip

ตารางที่ 4.3 คลื่นแผ่นดินไหว

GM	Earthquake Name	Station Name	Year	Magnitude	Scale Factor
GM1	"Imperial Valley-06"	"Delta"	1979	6.53	0.5874
GM2	"Imperial Valley-06"	"El Centro Array #13"	1979	6.53	1.45
GM3	"Imperial Valley-06"	"Parachute Test Site"	1979	6.53	1.3645
GM4	"Superstition Hills-02"	"El Centro Imp. Co. Cent"	1987	6.54	0.5891
GM5	"Superstition Hills-02"	"Westmorland Fire Sta"	1987	6.54	0.6988
GM6	"Landers"	"Mission Creek Fault"	1992	7.28	1.6643
GM7	"Kobe_ Japan"	"Abeno"	1995	6.9	1.065
GM8	"El Mayor-Cucapah_ Mexico"	"MICHOACAN DE OCAMPO"	2010	7.2	0.4306
GM9	"El Mayor-Cucapah_ Mexico"	"El Centro - Imperial & Ross"	2010	7.2	0.4444
G10	"Chuetsu-oki_ Japan"	"Nagaoka Kouiti Town"	2007	6.8	1.2154
GM11	"Darfield_ New Zealand"	"RKAC"	2010	7	1.3734

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

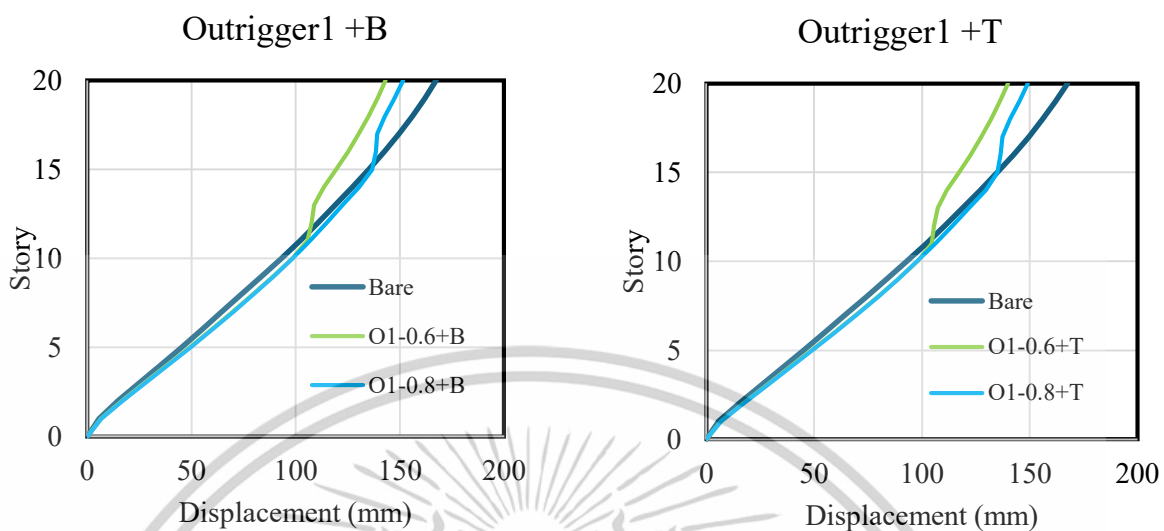
The 5% damped response spectra of the scaled ground motions



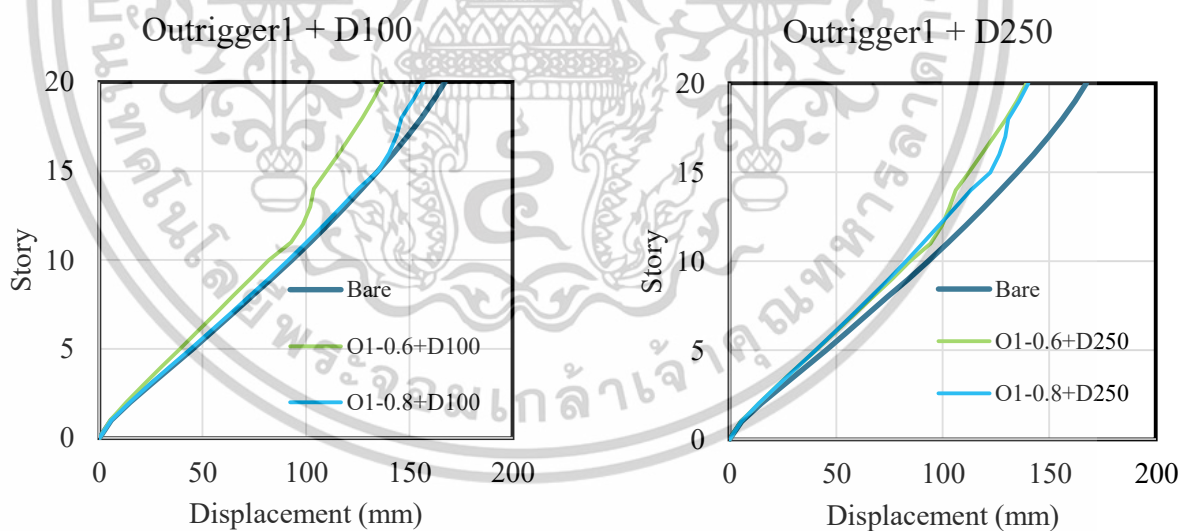
รูปที่ 4.34 Response Spectra 5% Damped

4.4.1 ผลลัพธ์ Displacement แต่ละชั้นของอาคาร

ผลของ Displacement เป็นข้อมูลที่จะบอกว่าอาคารเกิดการเคลื่อนตัวไปมากน้อยเท่าไรเมื่อมีแรงด้านข้างมากระทำ จากการวิเคราะห์ด้วยคลื่นแผ่นดินไหวจำนวนทั้งหมด 11 คลื่นถูกรวมกันโดยใช้วิธีเฉลี่ยค่าจากคลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 11 คลื่นเพื่อสร้างเป็น 1 ชุดข้อมูล จากข้อมูลตามรูปที่ 4.24-4.37 ชื่อข้อมูลแต่ละเส้น O1,O2 คือ Outrigger 1 และ 2 ตามลำดับ 0.6,0.8 คือความสูงของ Outrigger 0.6,0.8 เท่าของความสูงอาคาร B,T,D100,D250 และ D1000 คือ Brace, Traditional (แบบดั้งเดิม), ขนาด Damper 100kN, 250kN และ 1000kN จากกราฟรูปที่ 4.20-4.24 ค่าการเคลื่อนตัวแต่ละชั้นเมื่อติดตั้ง Outrigger แบบที่ 1 และแบบที่ 2 ที่มีความสูง 0.6,0.8 เท่าของความสูงอาคารนั้นจะมีค่าลดลงในชั้นที่ติดตั้ง Outrigger และค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ชั้นหลังของอาคารได้แสดงในรูปที่ 4.25 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการติดตั้ง Outrigger ที่ชั้น 0.6H สามารถลดค่าการเคลื่อนตัวของอาคารลงได้มากกว่าการติดตั้งที่ 0.8H ตรงตามการศึกษาก่อนหน้า [12,15-17]

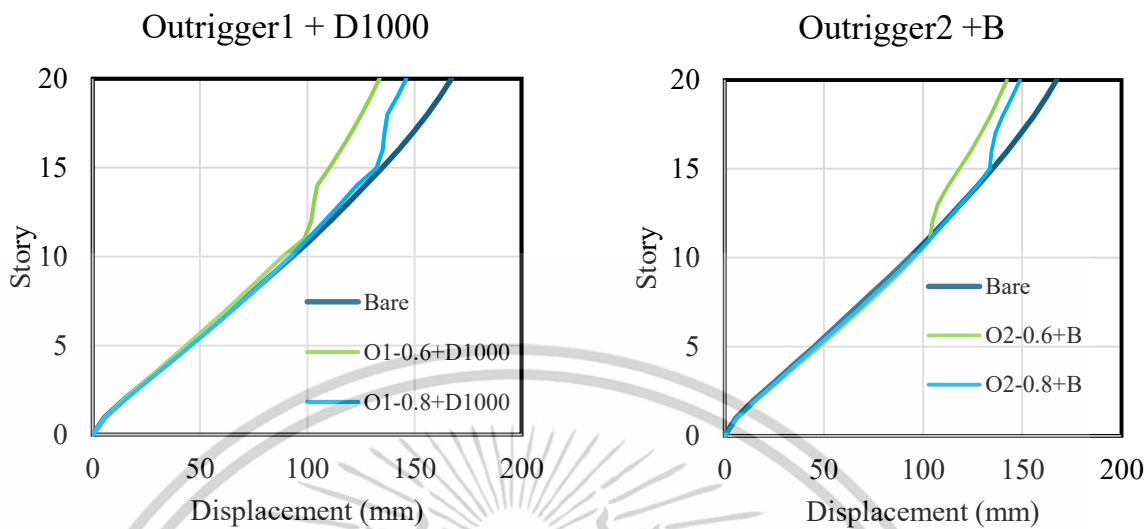


รูปที่ 4.35 Displacement Outrigger 1 a. Brace b. Traditional

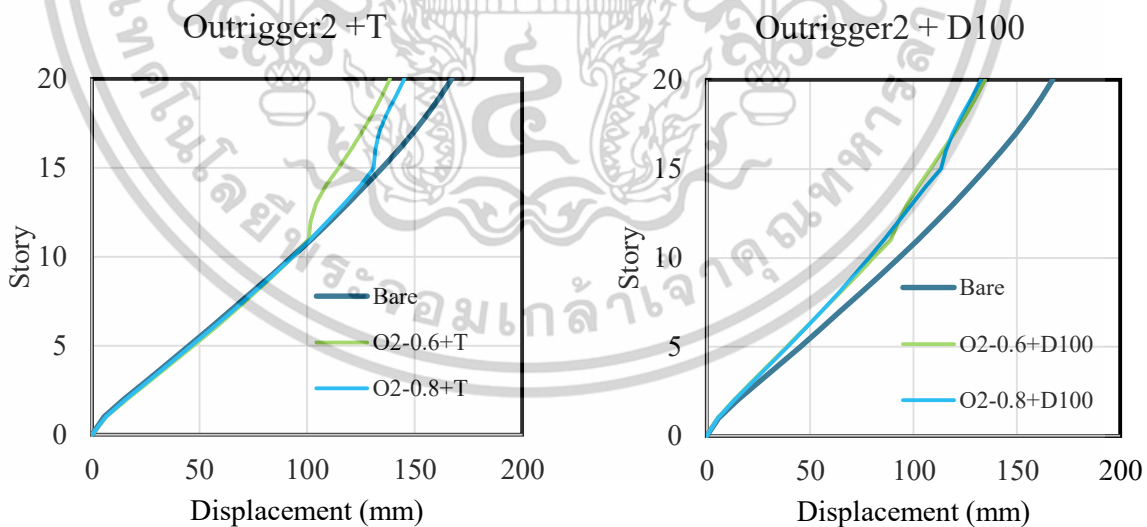


รูปที่ 4.36 Displacement Outrigger 1 a. D100 b. D250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

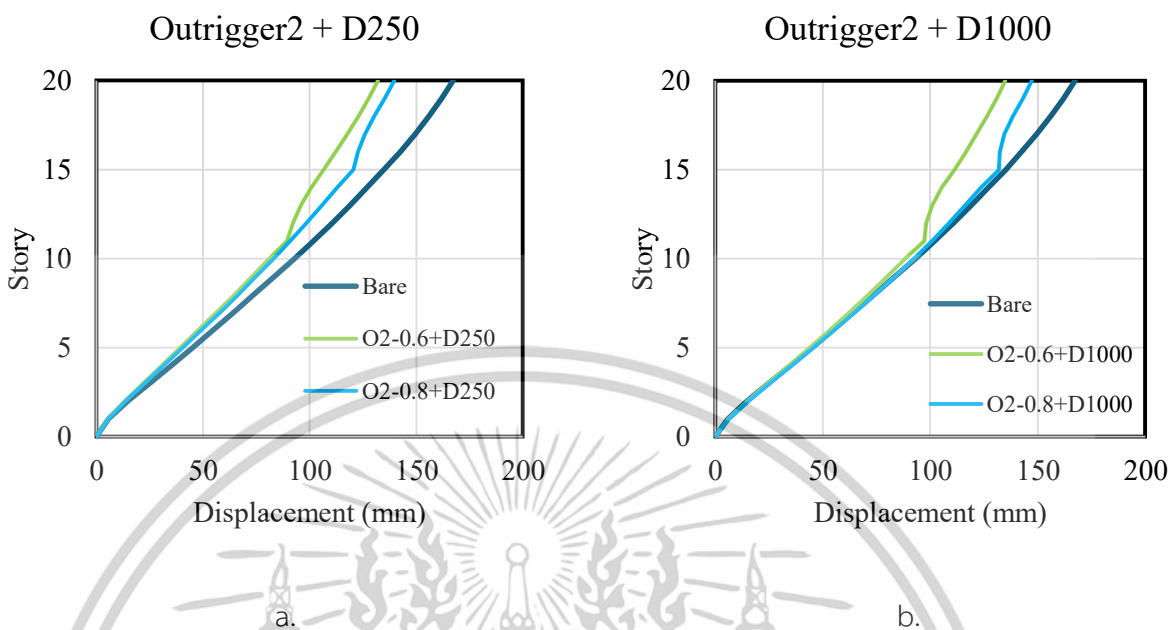


รูปที่ 4.37 Displacement a. Outrigger 1 +D1000 b. Outrigger 2 +B

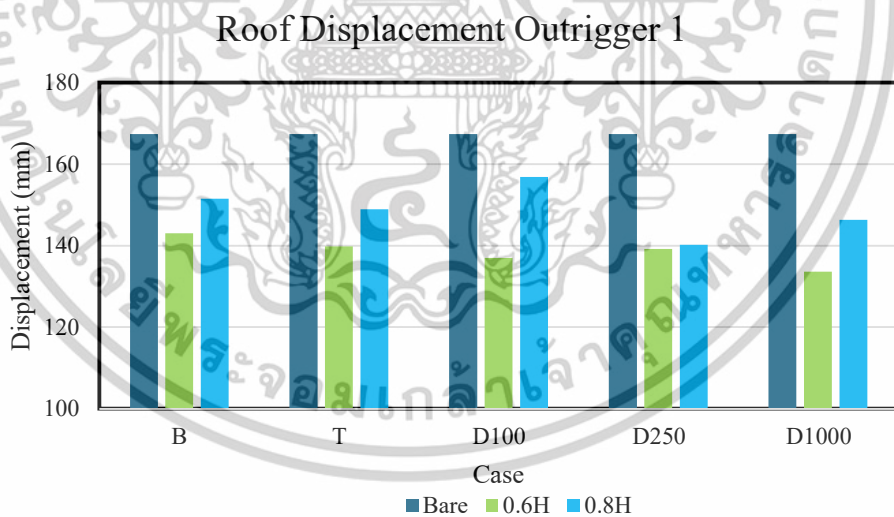


รูปที่ 4.38 Displacement a. Outrigger 2+T b. Outrigger 2 +D100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



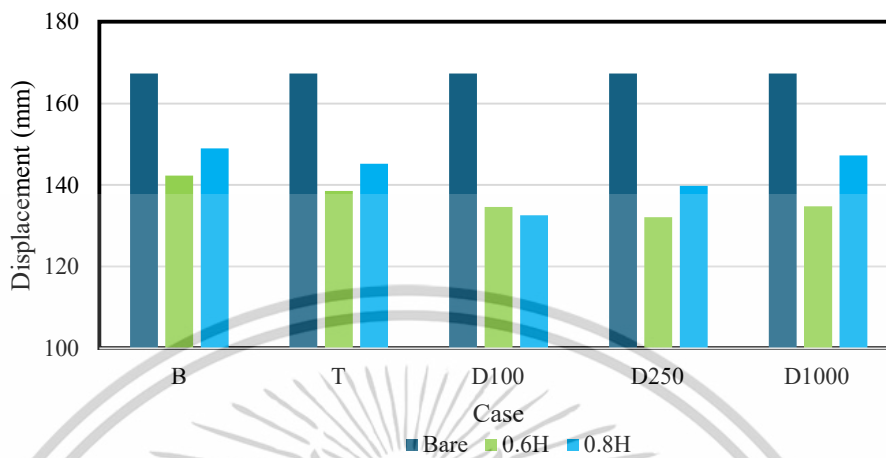
รูปที่ 4.39 Displacement a. Outrigger 2+D250 b. Outrigger 2 +D1000



รูปที่ 4.40 การเคลื่อนตัวที่หลังคาของ Outrigger แบบที่ 1

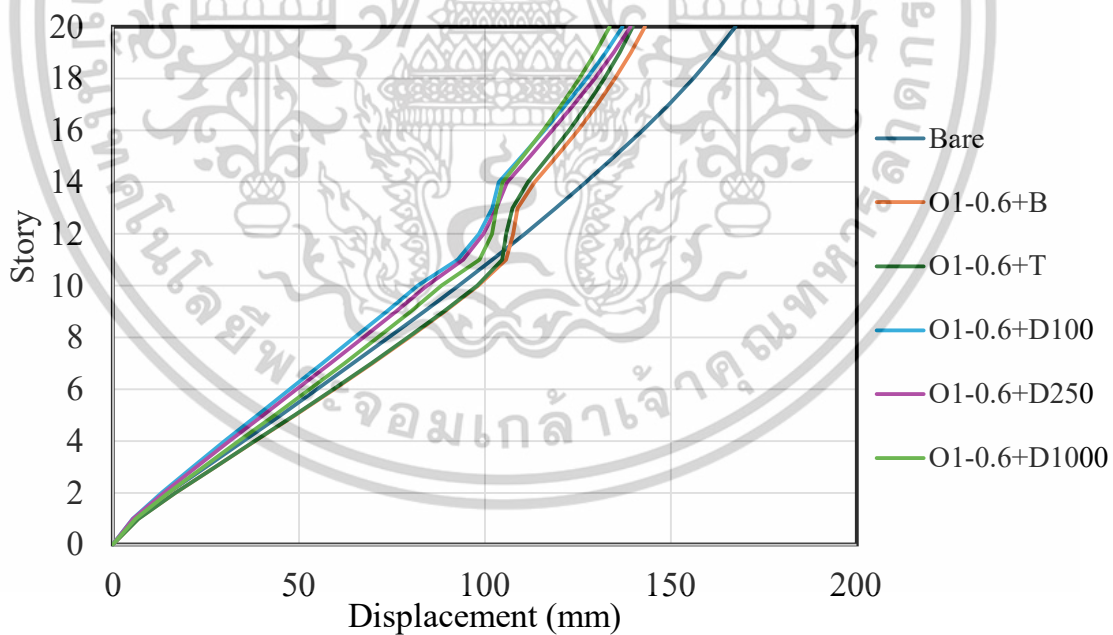
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Roof Displacement Outrigger 2



รูปที่ 4.41 การเคลื่อนตัวที่หลังคาของ Outrigger แบบที่ 2

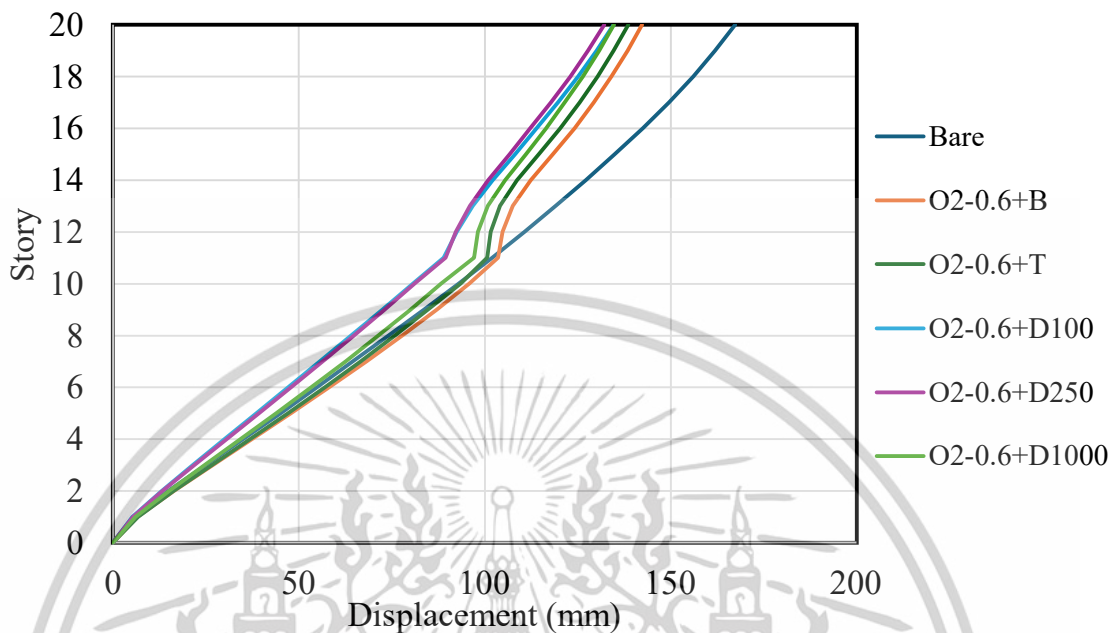
Summary Displacement Outrigger 1



รูปที่ 4.42 Summary Displacement Outrigger 1

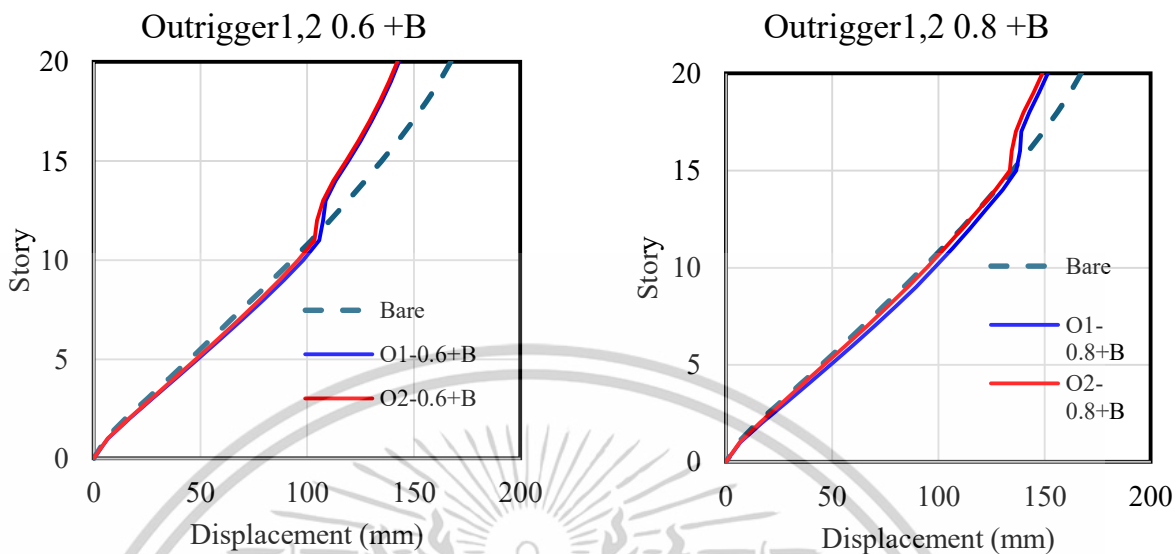
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Summery Displacement Outrigger 2

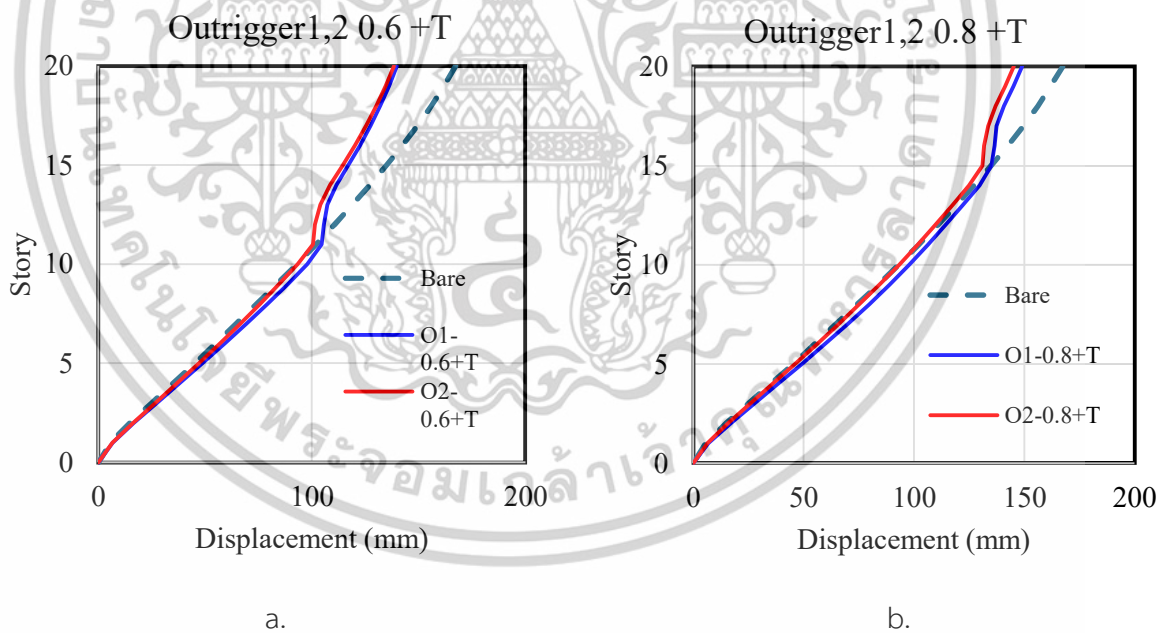


รูปที่ 4.43 Summery Displacement Outrigger 2

เปรียบเทียบ Displacement ระหว่าง Outrigger แบบที่ 1 และแบบที่ 2 ในการศึกษานี้ได้วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลค่าการเคลื่อนตัว (Displacement) ของ Outrigger แบบที่ 1 และ แบบที่ 2 เพื่อหาประสิทธิภาพของ Outrigger แต่ละแบบตามรูปที่ 4.33-4.38 ซึ่งเป็นค่าการเคลื่อนตัวแต่ละชั้น และรูปที่ 4.38 เป็นการเปรียบเทียบผลการเคลื่อนที่บนหลังคา ระหว่าง Outrigger แบบที่ 1 และ แบบที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า Outrigger แบบที่ 2 สามารถลดค่าการเคลื่อนตัวของอาคารลงได้ยกเว้นในการติดตั้ง Friction Damper ขนาด 1000kN สาเหตุอาจจะเกิดจากขนาดของ Damper ที่ใหญ่เกินไปจน Damper ไม่เกิดการเลื่อน

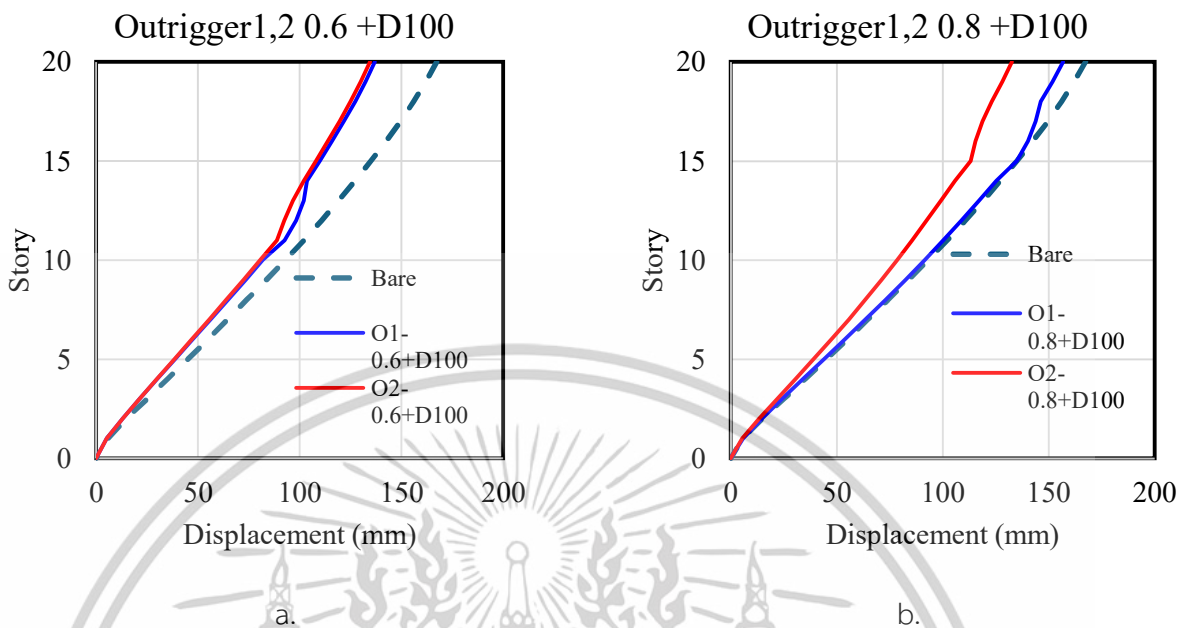


รูปที่ 4.44 Displacement Outrigger 1,2 a. 0.6 +B, b. 0.8 +B

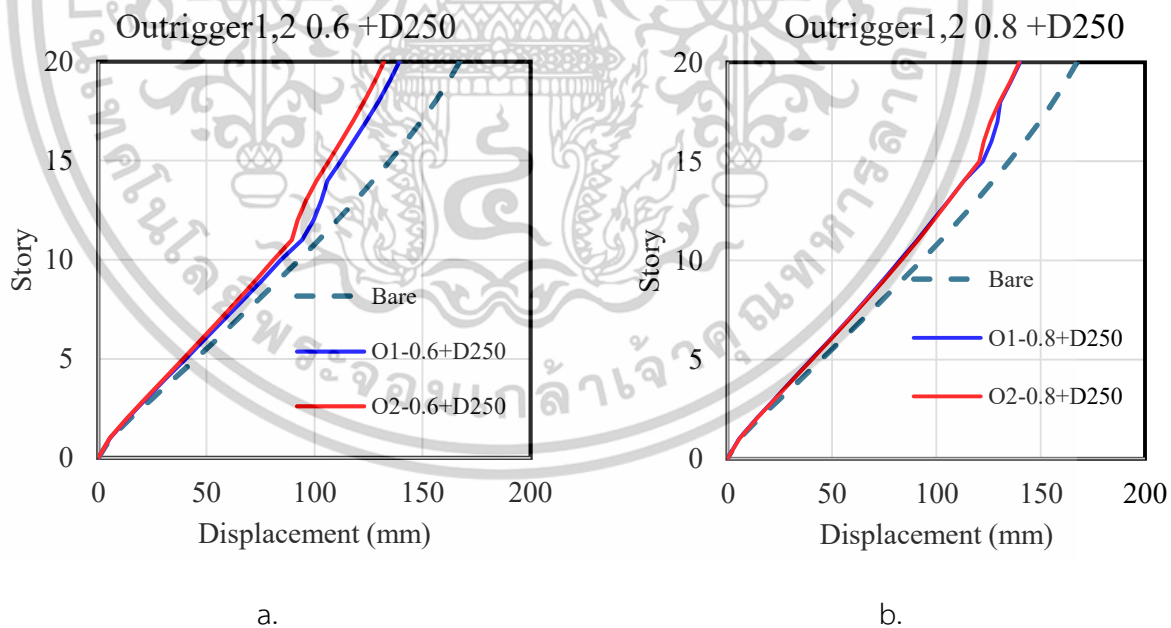


รูปที่ 4.45 Displacement Outrigger 1,2 a. 0.6 +T, b. 0.8 +T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

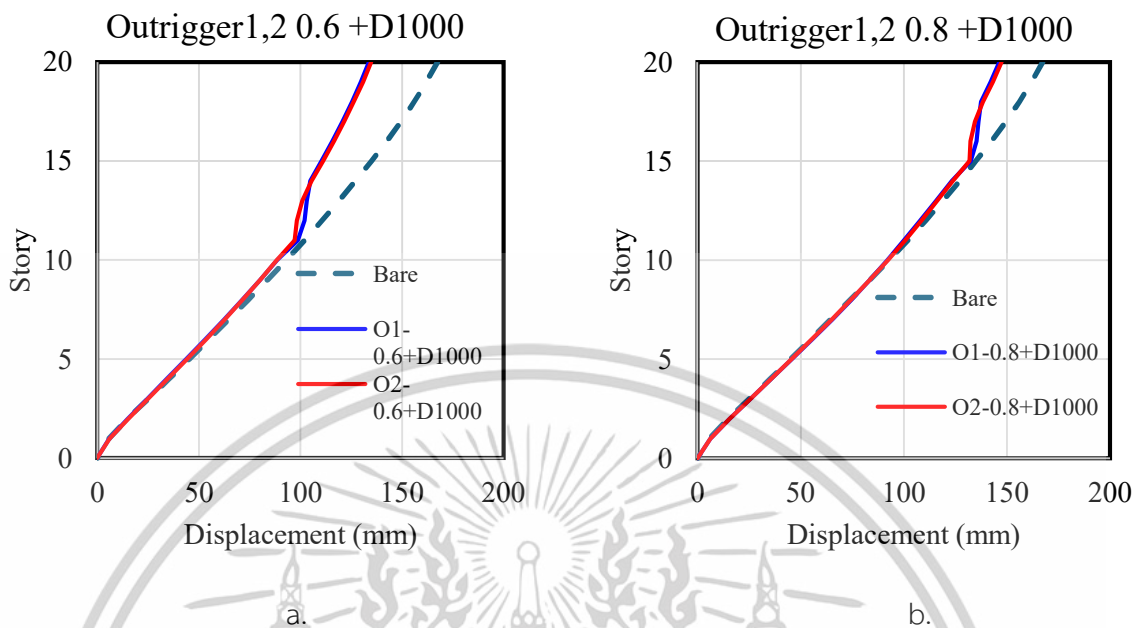


รูปที่ 4.46 Displacement Outrigger 1,2 a. 0.6 +D100, b. 0.8 +D100

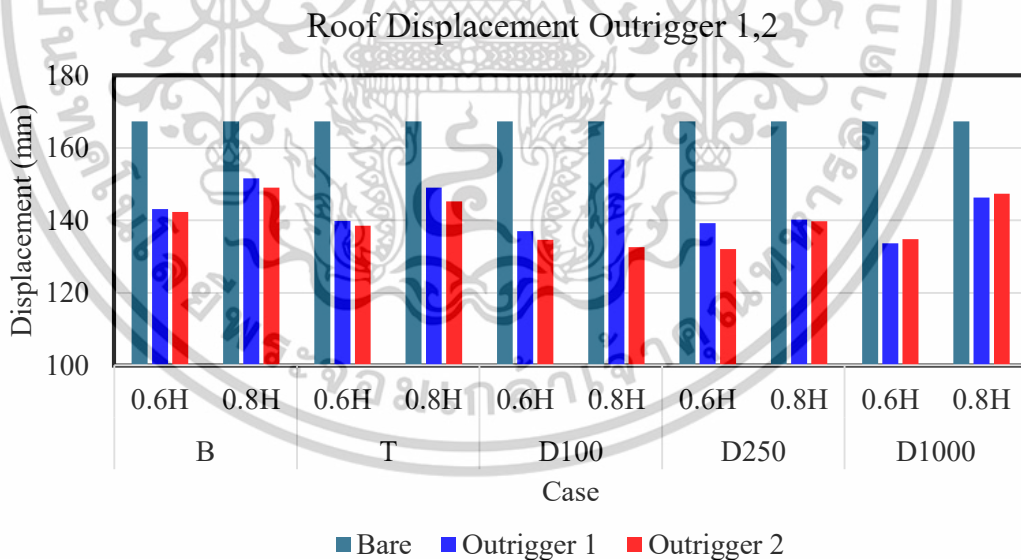


รูปที่ 4.47 Displacement Outrigger 1,2 a. 0.6 +D250, b. 0.8 +D250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.48 Displacement Outrigger 1,2 a. 0.6 +D1000, b. 0.8 +D1000



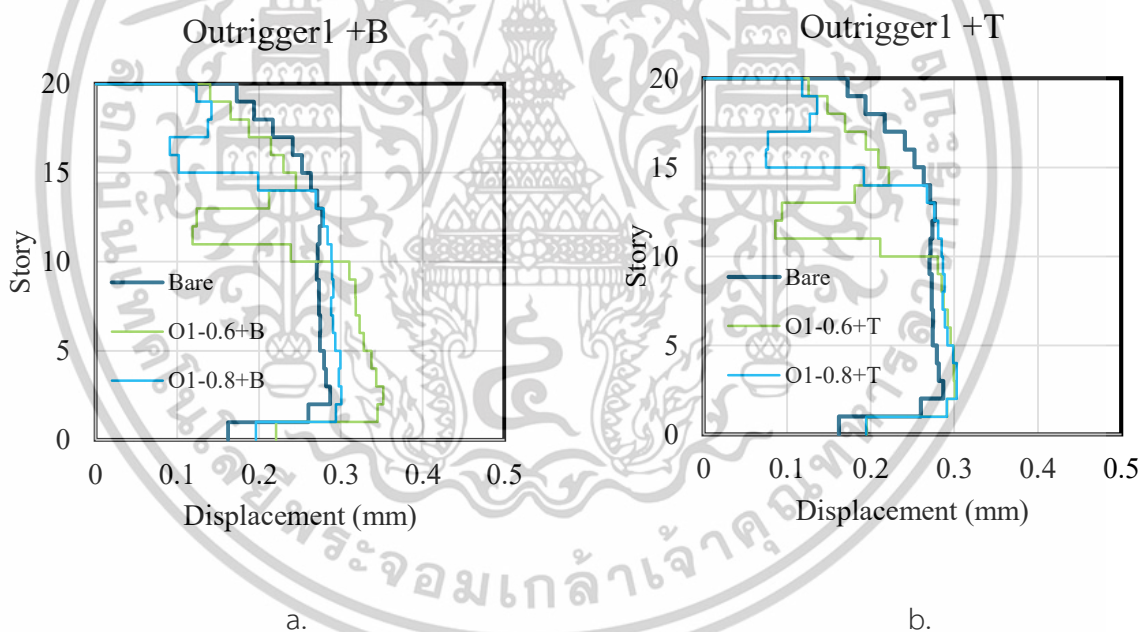
รูปที่ 4.49 ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของ Outrigger แบบที่ 1 และ แบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ผลลัพธ์ Story drift ratio แต่ละชั้นของอาคาร

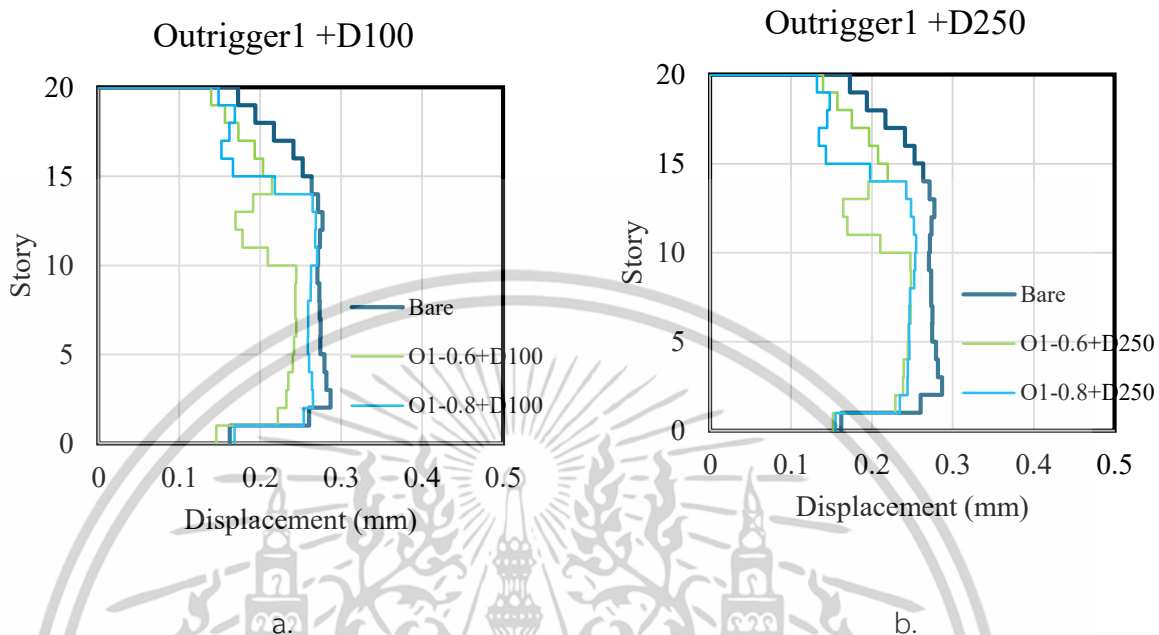
Story drift คือค่าที่ใช้วัดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นที่เกิดจากแรงด้านข้างมากระทำเช่น แรงลมและแรงแผ่นดินไหว ค่านี้ถูกใช้ประเมินความเสียหายของอาคารและกำหนดเกณฑ์ในการออกแบบอาคารด้านแรงด้านข้างเป็นค่าที่ไม่มีหน่วยแต่ละใช้ร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์ในการบอกค่า

ผลลัพธ์ Story drift % ของอาคารจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี NLRHA แสดงในรูปที่ 4.39-4.45 จากกราฟพบว่า Outrigger + Brace และ Traditional Outrigger ทั้งแบบที่ 1 และ 2 ค่า story drift ลดลงแค่ชั้นบนส่วนชั้นล่างมีค่ามากกว่าอาคารที่ไม่ได้ติดตั้ง Outrigger ในกรณีที่ติดตั้ง Damper ค่า Story drift จะลดลงเมื่อใช้ Damper ขนาด 100kN และ 250kN และความสูงของ Outrigger เท่ากับ 0.60, 0.80H ขณะที่ Damper ขนาด 1000kN จากรูปที่ 4.36a ที่ความสูง 0.60H พบว่ามีค่าลดลงเล็กน้อยและ 0.80H ค่าไม่มีการลดลง

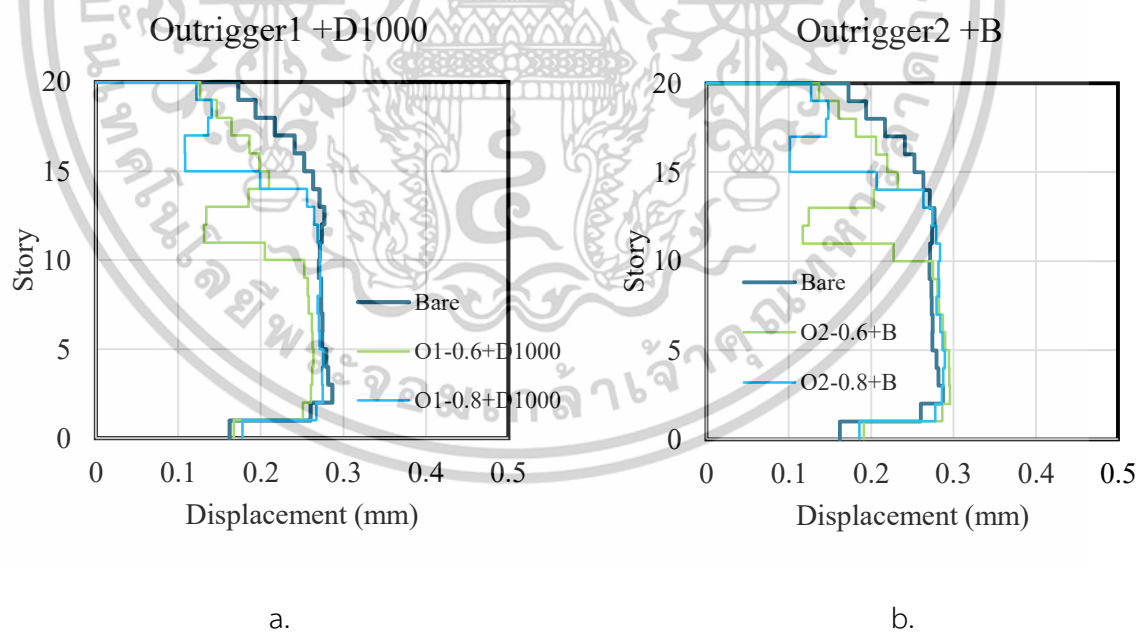


รูปที่ 4.50 Story Drift a. Outrigger1 +B, b. Outrigger1 +T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

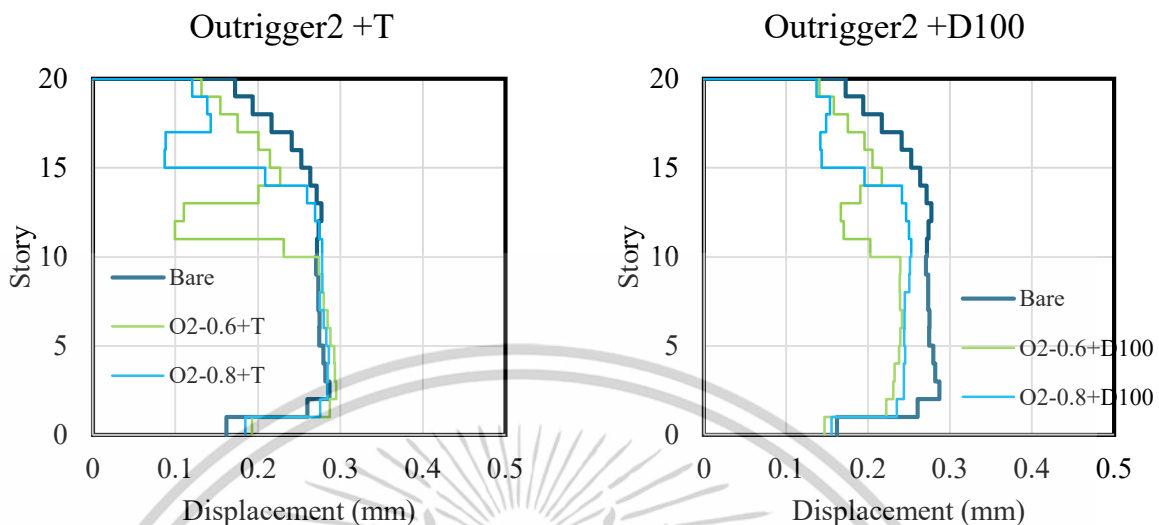


รูปที่ 4.51 Story Drift a. Outrigger1 + D100, b. Outrigger1 + D250

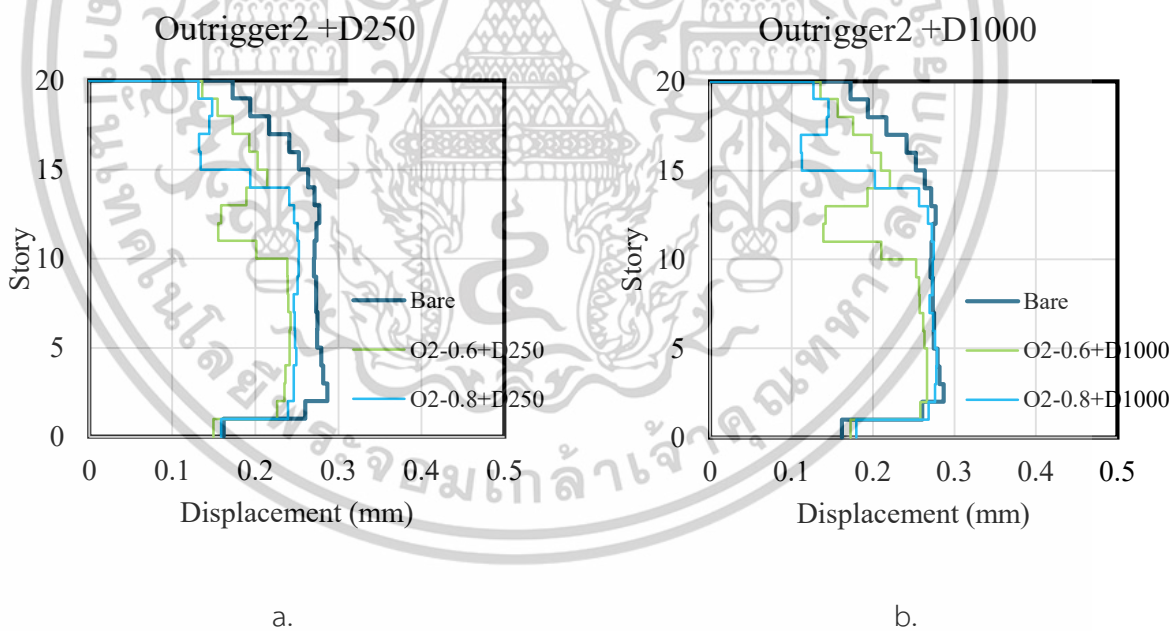


รูปที่ 4.52 Story Drift a. Outrigger1 + D1000, b. Outrigger2 + B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



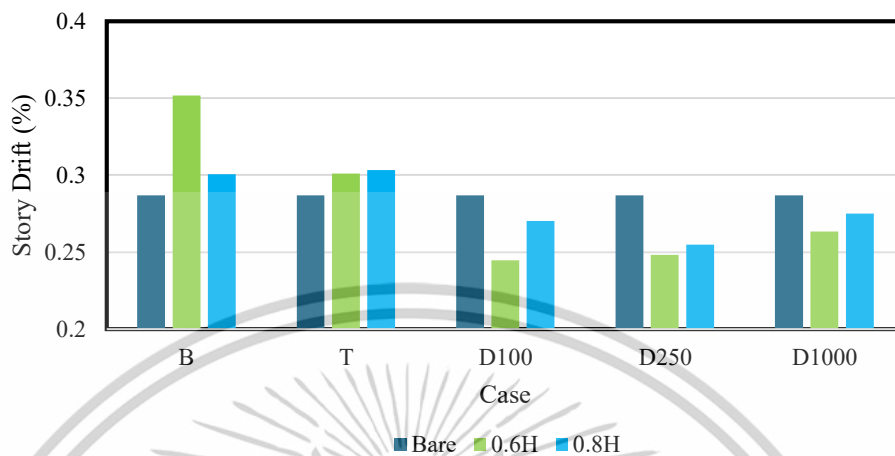
รูปที่ 4.53 Story Drift a. Outrigger2 +T, b. Outrigger2 +D100



รูปที่ 4.54 Story Drift a. Outrigger2 +D250, b. Outrigger2 +D1000

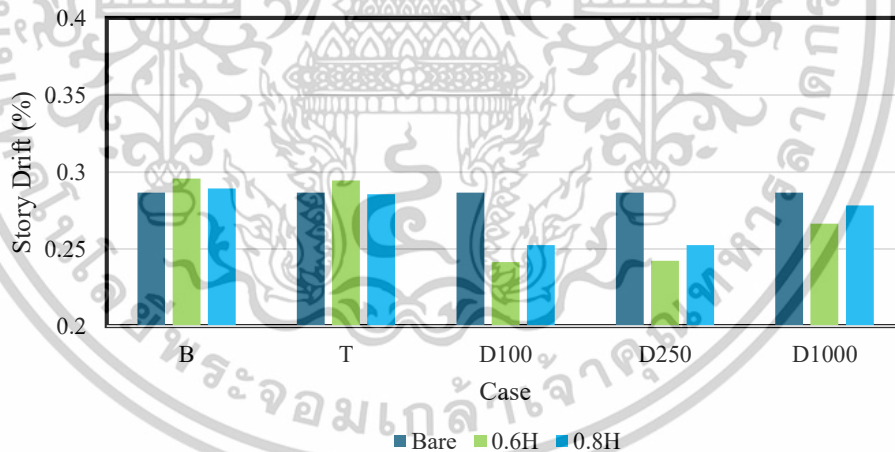
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Story Drift Outrigger 1



รูปที่ 4.55 Maximum Story Drift Outrigger 1

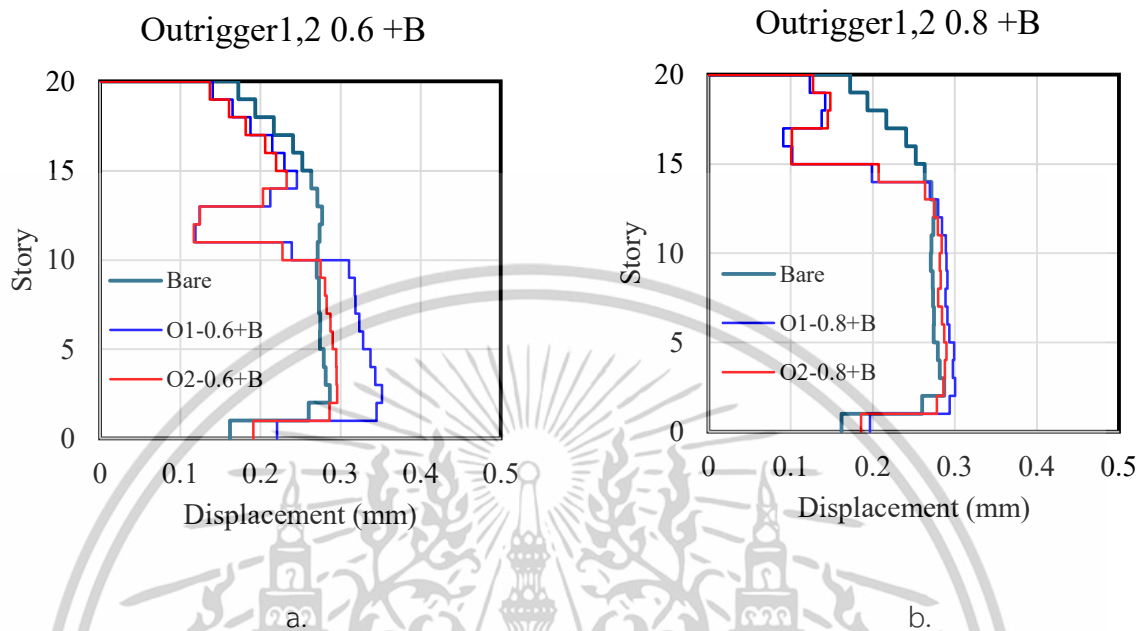
Story Drift Outrigger 2



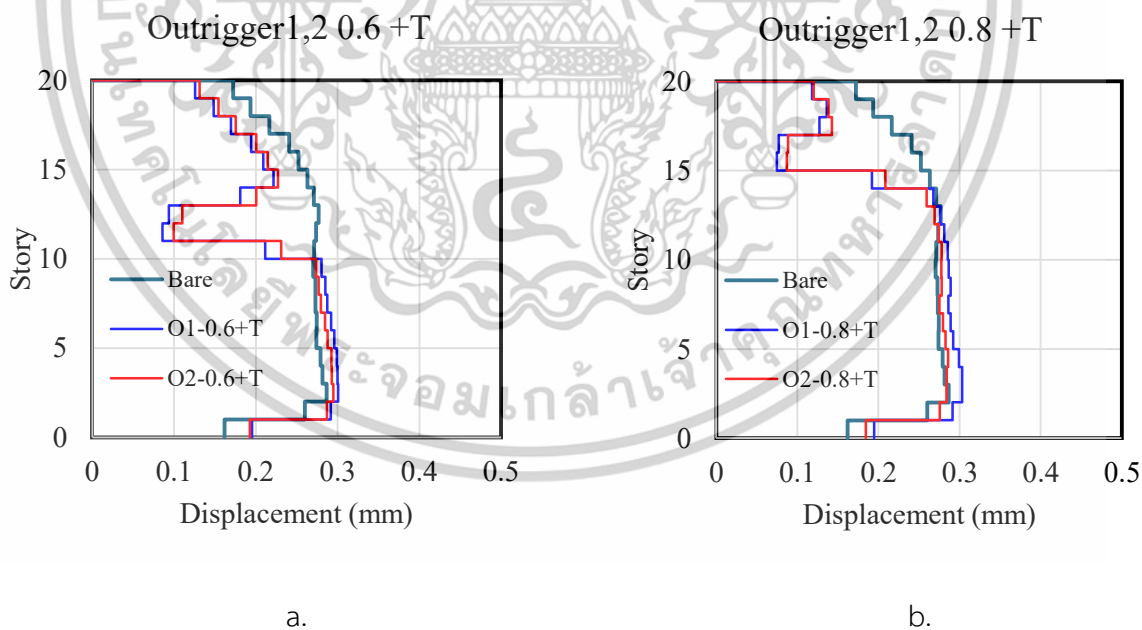
รูปที่ 4.56 Maximum Story Drift Outrigger 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบ Story drift ระหว่าง Outrigger แบบที่ 1 และ แบบที่ 2

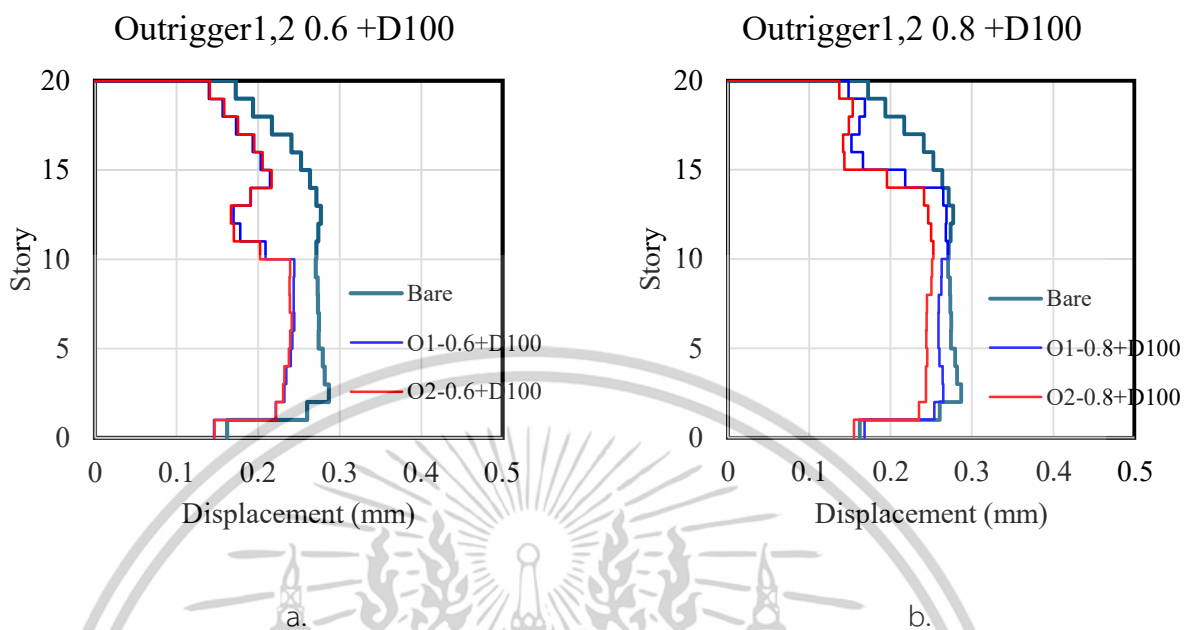


รูปที่ 4.57 Story Drift Outrigger 1,2 a. 0.6 +B, b. 0.8 +B

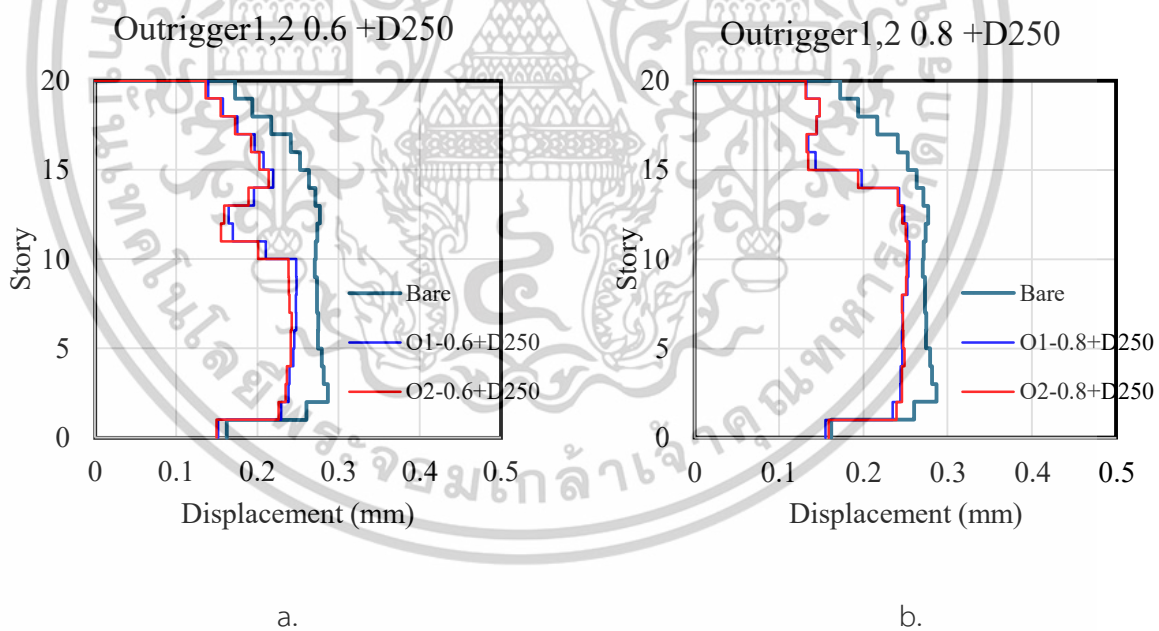


รูปที่ 4.58 Story Drift Outrigger 1,2 a. 0.6 +T, b. 0.8 +T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

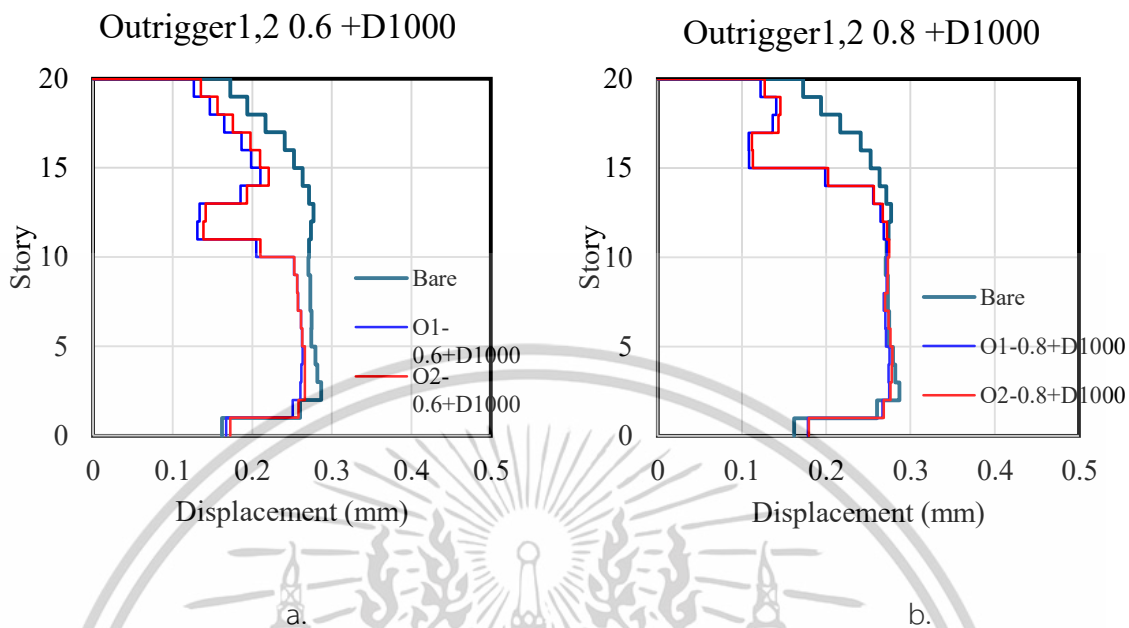


รูปที่ 4.59 Story Drift Outrigger 1,2 a. 0.6 +D100 b. 0.8 +D100

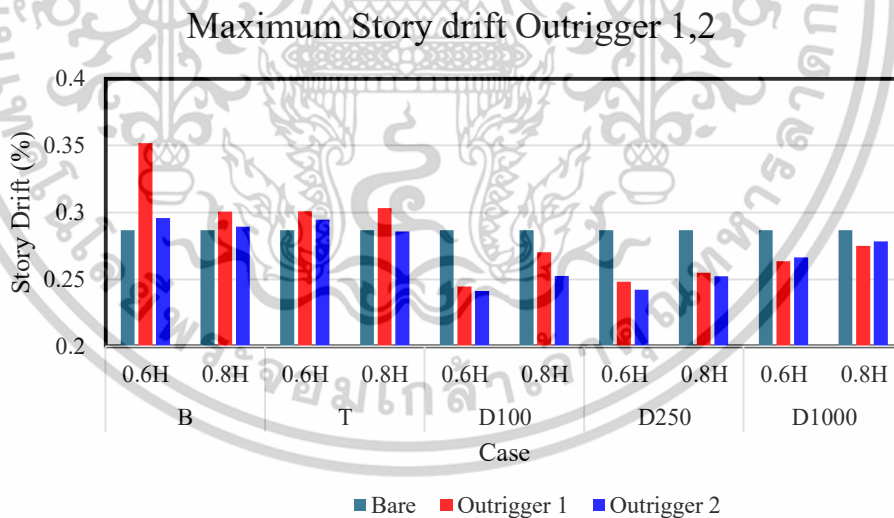


รูปที่ 4.60 Story Drift Outrigger 1,2 a. 0.6 +D250, b. 0.8 +D250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.61 Story Drift Outrigger 1,2 a. 0.6 +D1000; b. 0.8 +D1000

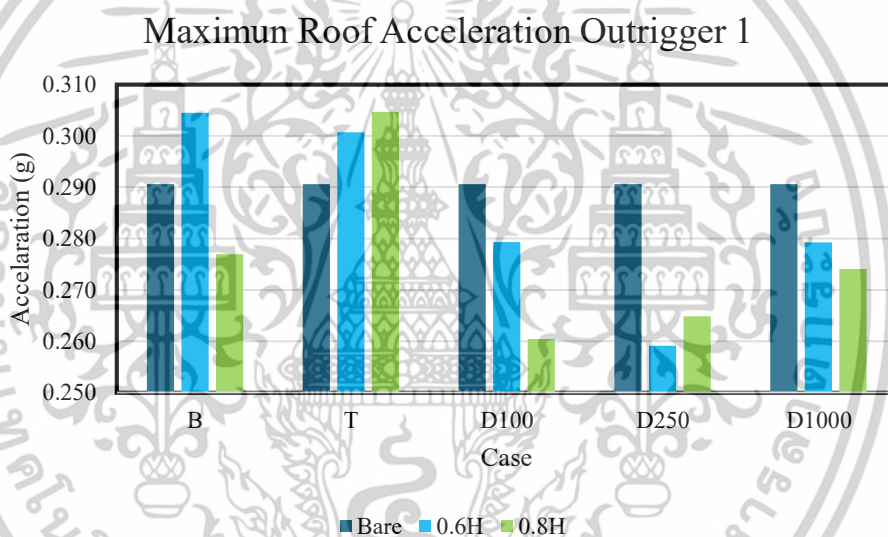


รูปที่ 4.62 Maximum Story Drift Outrigger 1,2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

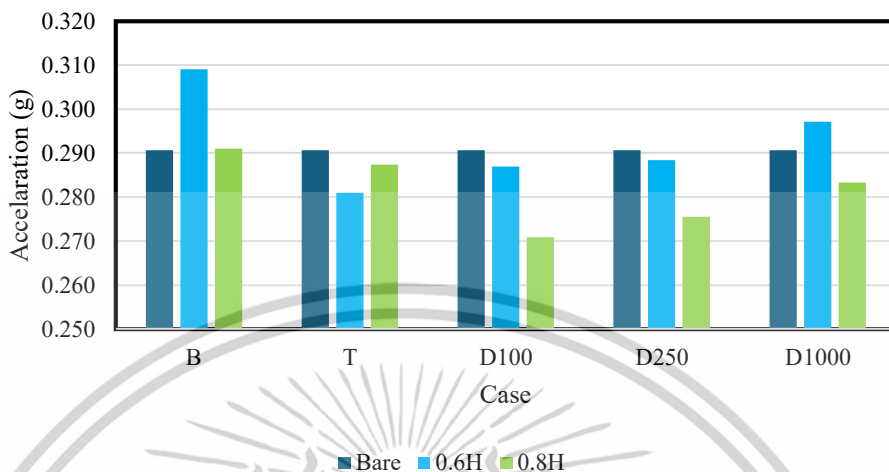
4.4.3 ผลลัพธ์ Roof Acceleration

Roof Acceleration คือค่าความเร่งที่หลังคาที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงด้านข้างมากระทำเช่น แรงลมหรือแรงแผ่นดินไหว จากรูปที่ 4.48-4.49 แสดงค่าความเร่งที่หลังคาเมื่อติดตั้ง Outrigger แบบที่ 1 และ แบบที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อติดตั้ง Damper เข้ากับ Outrigger จะทำให้ค่าความเร่งลดลงโดยค่าความเร่งลดลงมากที่สุดเมื่อติดตั้ง Damper Outrigger ที่ระดับ 0.8H เนื่องจาก Damper สามารถสลายพลังงานจากแผ่นดินไหวมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง Outrigger แบบที่ 1 และแบบที่ 2 ตามรูปที่ 4.50 พบว่าเมื่อใช้ Outrigger แบบที่ 1 และติดตั้ง Damper จะสามารถลดค่าความเร่งได้ดีที่สุด



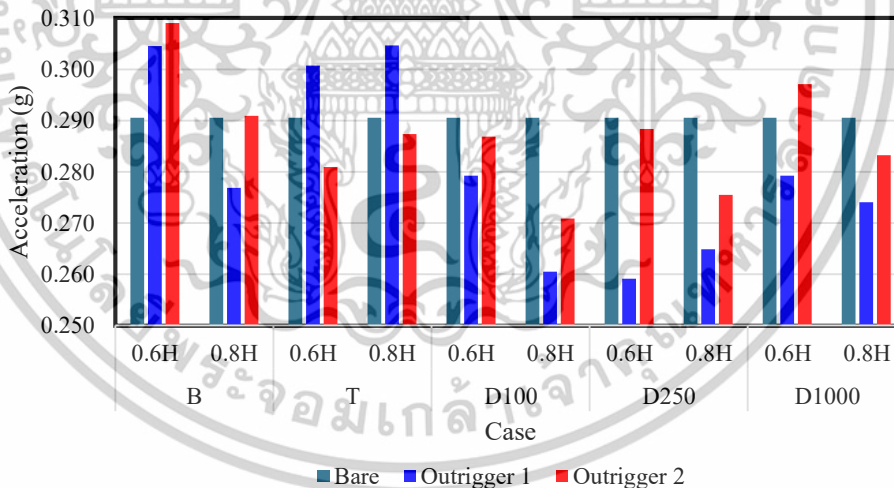
รูปที่ 4.63 ความเร่งสูงสุดที่หลังคาของ Outrigger แบบที่ 1

Maximun Roof Acceleration Outrigger 2



รูปที่ 4.64 ความเร่งสูงสุดที่หลังคาของ Outrigger แบบที่ 2

Maximun Roof Acceleration



รูปที่ 4.65 ความเร่งสูงสุดที่หลังคาระหว่าง Outrigger แบบที่ 1 และแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบของ Truss Outrigger จำนวน 4 รูปแบบ และเลือกแบบที่เหมาะสมที่สุดมาติดตั้งให้กับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กระบบ RC Brace Frame สูง 20 ชั้น 72 เมตร ที่ความสูง 0.60H 0.80H และวิเคราะห์หาผลตอบสนองของอาคารด้วยวิธี Pushover analysis เพื่อหาระดับความเสียหายของอาคารเมื่อติดตั้ง Damp Outrigger นอกจากนี้ยังได้ใช้วิธี Nonlinear time history analysis เพื่อหาประสิทธิภาพของอาคารทั้งแบบติดตั้งและไม่ได้ติดตั้ง Damp outrigger จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. จากผลการวิเคราะห์ Truss Outrigger ทั้ง 4 รูปแบบด้วยวิธี FEM พบว่าแบบที่ 4 เป็นแบบที่มีค่าความแข็งสูงสุด รองลงมาเป็นแบบที่ 3 โดยที่แบบที่ 3 สามารถป้องกันการวิบัติ แบบก็งเดาะเฉพาะแห่งได้ ขณะที่ แบบที่ 4 จะเกิดการโก่งเดาะเฉพาะแห่งที่ชิ้นส่วนใกล้กันจุดรองรับ ในด้านการสลายพลังงาน Truss แบบที่ 1-3 จะมีค่าการสลายพลังงานที่ใกล้เคียงกัน ส่วนแบบที่ 4 จะมีค่าที่สูงกว่าแบบที่ 3 อยู่ประมาณ 5 เท่า
2. จากผลการวิเคราะห์ Local analysis กับ Truss Outrigger ควรใช้ Truss ที่มีรูปแบบที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถรับแรงแบบวัฏจักร (Cyclic) ได้ดี อีกทั้งยังทำให้ Hysteresis loop มีรูปแบบที่เสถียร
3. จากการวิเคราะห์ด้วย Modal analysis ค่าคาบการสั่น (Vibration Period) เมื่อพิจารณาที่ Mode 1 พบว่าค่าคาบการสั่นเมื่อติดตั้ง Outrigger ที่ความสูง 0.60H จะสามารถลดค่าคาบการสั่นได้สูงที่สุด ขณะที่เมื่อพิจารณาค่าคาบการสั่นของ Outrigger แบบที่ 2 จะมีค่าที่น้อยกว่าแบบที่ 1 อยู่เล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Outrigger แบบที่ 2 จะสามารถลดค่าการเคลื่อนตัวลงได้ดีกว่า Outrigger แบบที่ 1
4. ผลของ Mode Shape พบว่าเมื่อติดตั้ง Outrigger กับอาคารจะทำให้ รูปร่างของ Mode Shape แต่ละชั้นนั้นแตกต่างกับอาคารที่ไม่ได้ติดตั้ง เนื่องจากเมื่อพิจารณาที่ Mode 1 และ 2 จะสังเกตเห็นว่า รูปร่างการสั่นเปลี่ยนแปลงในชั้นที่ติดตั้ง Outrigger ซึ่งเป็นชั้นที่มีค่าความแข็งมากที่สุด จึงมีส่วนทำให้ รูปร่างการสั่นเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. จากผลลัพธ์การวิเคราะห์ Pushover กับอาคารตัวอย่างพบว่าเมื่อติดตั้ง Outrigger จะสามารถเพิ่มค่าความแข็งโดยรวมของอาคารได้มาก แต่ความค่าแข็งโดยรวมของ Outrigger แบบที่ 2 จะมีค่าน้อยกว่าแบบที่ 1 ในกรณีที่ ความสูงของ Outrigger อยู่ที่ 0.6H ทั้งกรณีที่ติดตั้งและไม่ติดตั้ง Damper นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบความเสียหายของอาคารเทียบกับ Roof Drift พบว่าเมื่อติดตั้ง Outrigger จะเพิ่มค่า Roof Drift ขึ้นซึ่งหมายความว่าอาคารที่ติดตั้ง Outrigger จะวิบัติช้ากว่าอาคารที่ไม่ได้ติดตั้ง และเมื่อพิจารณารูปร่างอาคารหลังจากการวิเคราะห์ด้วย Pushover พบว่าอาคารทุกหลังเกิดการเสีรูปร่าง Shear Deformation
6. จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Nonlinear time history analysis ซึ่งได้แบ่งจำนวนอาคารออกเป็น 21 อาคารจาก ตำแหน่งและรูปแบบของ Outrigger ขนาด Friction damper เมื่อพิจารณาการเคลื่อนตัวของอาคารแต่ละชั้นเมื่อติดตั้ง Outrigger ทั้งแบบที่ 1 และ แบบที่ 2 ที่ 0.60H จะสามารถลดค่าการเคลื่อนตัวได้มากที่สุด และเมื่อพิจารณาขนาดของ Friction damper พบว่าเมื่อใช้ Damper ขนาด 100kN, 250kN และ 1000 kN จะสามารถลดค่าการเคลื่อนตัวได้มากกว่าที่ไม่ได้ติดตั้ง Damper และนอกจากนี้เมื่อพิจารณา Outrigger แต่ละแบบพบว่า Outrigger แบบที่ 2 สามารถลดค่าการเคลื่อนตัวได้มากกว่าแบบที่ 1 ซึ่งตรงกับผลของ Modal analysis
7. จากผลลัพธ์ Story drift ratio พบว่าเมื่อติดตั้ง Friction Damper ขนาด 100kN และ 250kN จะสามารถลดค่า Story drift มากที่สุดและเมื่อพิจารณาตำแหน่งของ Outrigger ที่ 0.60H และ 0.80H พบว่าเมื่อติดตั้ง Friction Damper ค่า Story drift ที่ 0.60H จะมีค่าน้อยกว่า ขณะที่เมื่อไม่ได้ติดตั้ง Damper พบว่าค่า Story drift ทั้งความสูง 0.60H และ 0.80H จะมีค่าที่ใกล้เคียงกับ และเมื่อพิจารณา Outrigger แต่ละแบบพบว่า แบบที่ 2 สามารถลดค่า Story drift ได้มากกว่าแบบที่ 1
8. เมื่อพิจารณาผลของ Roof Acceleration เมื่อติดตั้ง Outrigger แบบที่ 1 ค่าความเร่งจะลดลงมากกว่าแบบที่ 2 เมื่อติดตั้ง Friction damper ขณะที่เมื่อไม่ได้ติดตั้ง Damper จะทำให้ค่าความเร่งมีค่ามากกว่าอาคารที่ไม่ได้ติดตั้ง outrigger ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบ Damper สามารถสลายพลังงานและลดค่าความเร่งที่ได้ อย่างมีนัยสำคัญ

งานวิจัยในอนาคต

1. การศึกษารูปแบบของ Outrigger Truss สามารถใช้วิธี Topology Truss Analysis มาใช้ในการกำหนดรูปแบบของ Truss ได้ โดยวิธีนี้สามารถช่วยให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสมตามการใช้งานของอาคาร
2. ขนาดของแกนอาคารสามารถปรับขนาดให้เล็กลงได้เนื่องจากเมื่อติดตั้ง Truss Outrigger จะสามารถลดแรงภายในของแกนอาคารลดได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง Reference

- [1] Lukkunaprasit, Panitan, et al. "Performance of structures in the Mw 6.1 Mae Lao earthquake in Thailand on May 5, 2014 and implications for future construction." *Journal of Earthquake Engineering* 20.2 (2016): 219-242.
- [2] Saingam, Panumas, et al. "Composite behavior in RC buildings retrofitted using buckling-restrained braces with elastic steel frames." *Engineering Structures* 219 (2020): 110896.
- [3] Saingam, Panumas, et al. "Experimental dynamic characterization of friction brace dampers and application to the seismic retrofit of RC buildings." *Engineering Structures* 242 (2021): 112545.
- [4] Saingam, Panumas, et al. "Seismic Retrofit of RC Buildings with Viscous Dampers and Elastic Steel Frames including Effect of Composite Behavior." *J. Struct. Eng. B* 67 (2021): 569-580.
- [5] Ali, Mir M., and Kyoung Sun Moon. "Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects." *Architectural science review* 50.3 (2007): 205-223.
- [6] Ali, Mir M., and Kyoung Sun Moon. "Advances in structural systems for tall buildings: emerging developments for contemporary urban giants." *Buildings* 8.8 (2018): 104.
- [7] Gutierrez Soto, Mariantonieta, and Hojjat Adeli. "Tuned mass dampers." *Archives of Computational Methods in Engineering* 20 (2013): 419-431.
- [8] Smith, Rob J., and Michael R. Willford. "The damped outrigger concept for tall buildings." *The structural design of tall and special buildings* 16.4 (2007): 501-517.
- [9] Mcnamara, Robert J., and Douglas P. Taylor. "Fluid viscous dampers for high-rise buildings." *The structural design of tall and special buildings* 12.2 (2003): 145-154.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Choi, Hi Sun, et al. **Outrigger design for high-rise buildings**. Routledge, 2017.
- [11] Rawirod Suwannatrai, et al. “**Seismic Retrofit of RC frame building with steel brace**” NCCE 29 (2024) STR40-1 - STR40-7.
- [12] Lin, Pao-Chun, Ming-Ching Chen, and Meng-Lin Chung. "Shaking table test of a damped-outrigger system incorporating friction dampers." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 52.5 (2023): 1593-1616.
- [13] Alhaddad, Wael, et al. "A comprehensive introduction to outrigger and belt-truss system in skyscrapers." *Structures*. Vol. 27. Elsevier, 2020.
- [14] Nair, R. Shankar. "Belt Trusses and Basements as Virtual; Outriggers for Tall Buildings." *Engineering Journal* 35.4 (1998): 140-146.
- [15] Zhou, Ying, Cuiqiang Zhang, and Xilin Lu. "An inter-story drift-based parameter analysis of the optimal location of outriggers in tall buildings." *The Structural Design of Tall and Special Buildings* 25.5 (2016): 215-231.
- [16] Lin, Pao-Chun, Toru Takeuchi, and Ryota Matsui. "Optimal design of multiple damped-outrigger system incorporating buckling-restrained braces." *Engineering Structures* 194 (2019): 441-457.
- [17] Lin, Pao-Chun, Toru Takeuchi, and Ryota Matsui. "Seismic performance evaluation of single damped-outrigger system incorporating buckling-restrained braces." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 47.12 (2018): 2343-2365.
- [18] Alhaddad, Wael, et al. "Outrigger and Belt-Truss System Design for High-Rise Buildings: A Comprehensive Review Part II—Guideline for Optimum Topology and Size Design." *Advances in Civil Engineering* 2020.1 (2020): 2589735.
- [19] Ho, Goman WM. "Outrigger topology and behaviour." *Advanced Steel Construction* 12.2 (2016): 83-93.
- [20] **MatWeb**: Online Materials Information Resource

- [21] มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ. 1301/1302-61 ปี 2561, กรมโยธาธิการและผังเมืองกระทรวงมหาดไทย, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย
- [22] American Society of Civil Engineers. "Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures." American Society of Civil Engineers, 2022.
- [23] Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). PEER NGA Ground Motion Database, < <https://ngawest2.berkeley.edu/site> >
- [24] Asai, Tomoki, et al. "First mode damping ratio oriented optimal design procedure for damped outrigger systems with additional linear viscous dampers." *Engineering Structures* 247 (2021): 113229.
- [25] Ghobarah, Ahmed. "Performance-based design in earthquake engineering: state of development." *Engineering structures* 23.8 (2001): 878-884.
- [26] Wilson EL. CSI Analysis Reference Manual For SAP 2000, ETABS, SAFE, and CSI Bridge. Berkeley: Computers & Structures, Inc; 2015.
- [27] ANSYS, Inc. (2023). *ANSYS Mechanical User's Guide* (Version 2024 R2) [Computer software]. <https://www.ansys.com>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายรวีโรจน์ สุวรรณไตรย์
 วัน เดือน ปีเกิด 9 ตุลาคม 2542 ที่จังหวัดสกลนคร
 ที่อยู่ 118/8 ตำบล โคกศิลา อำเภอ เจริญศิลป์ จังหวัด สกลนคร 47290

ประวัติการศึกษา:

2566 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา (ต่อเนื่อง)
 (เกียรตินิยมอันดับ 1)
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2567 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สิ่งแวดล้อมและ
 การจัดการก่อสร้าง
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย:

2568 Saingam, P., Gadagamma, C. K., Hussain, Q., Hlaing, H. H.,
Suwannatrai, R., Qureshi, M. I., ... & Ejaz, A. (2025).
 Modeling and comparative analysis of sustainable cotton
 rope confinement: Full vs. STRip wrapping for enhanced
 concrete strength and ductility. *Case Studies in
 Construction Materials*, 22, e04134.

2567 Sirinipitakul, T., **Suwannatrai, R.**, Hlaing, H. H., & Saingam, P.
 (2024, April). Reduction of Damage Concentration in
 Seismic Retrofitted RC Building with Friction Dampers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- In *Proceedings of the 9th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE 2024)*, London, UK (pp. 14-16).
- 2567 Saingam, P., Gadagamma, C. K., Hussain, Q., Ejaz, A., Hlaing, H. H., **Suwannatrai, R.**, ... & Suparp, S. (2024). Large rupture strain cotton ropes hybridized with affordable fiberglass chopped strand mat sheets for enhanced compressive behavior of reinforced concrete columns. *Heliyon*, 10(21).
- 2567 **Rawirot Suwannatrai** Hnin Hnin Hlaing Tharathep Phuchanakit¹ Paloch Petpanvong and Panumas Saingam^{1,*} Seismic Retrofit of RC frame building with steel brace STR40-1 – STR40-7 การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 29
- 2566 Saingam, P., Hlaing, H. H., Suwannatrai, R., Ejaz, A., Hussain, Q., Khan, K., & Joyklad, P. (2023) "Enhancing the flexural Behavior of brick masonry walls with ferrocement overlays and low-cost anchors." *Case Studies in Construction Materials* 19 (2023): e02558.
- 2566 Hlaing, H. H., **Suwannatrai, R.**, Tammajak, N., Kriangkriatkong, P., Nakkahnong, A., & Saingam, P. (2023, December) "Seismic Retrofit of Shear Wall Medium-Rise RC Building with Buckling-Restrained Braces." *International Conference on Civil Engineering and Architecture*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้