

การวิเคราะห์รอยต่ออาคารสำเร็จรูปภายใต้แรงแผ่นดินไหว

ANALYSIS OF PREFABRICATION BUILDING JOINTS

UNDER SEISMIC LOADS

ฉัตรสุมาลย์ วรรณสิงห์

รินทร์วรี ก้านจักร

วิลาสินี กัดสิงห์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

ANALYSIS OF PREFABRICATION BUILDING JOINTS  
UNDER SEISMIC LOADS

CHATSUMAL WANNASING

RINWAREE KHANJAK

WILASINEE KLADSING

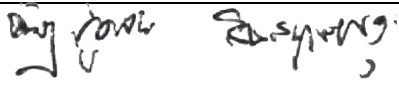
A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2022

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การวิเคราะห์รอยต่ออาคารสำเร็จรูปภายใต้แรงแผ่นดินไหว  
ANALYSIS OF PREFABRICATION BUILDING JOINTS UNDER SEISMIC  
LOADS

นักศึกษา นางสาวฉัตรสุมาลย์ วรรณสิงห์ รหัสนักศึกษา 62010143  
นางสาวรินทร์วรี ก้านจักร รหัสนักศึกษา 62010776  
นางสาววิลาสินี กลัดสิงห์ รหัสนักศึกษา 62010831

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ณัฐดนัย สิ้นสมุทรผดุง

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ณัฐดนัย สิ้นสมุทรผดุง ผศ.ดร.อำพน จรัสจรวงเกียรติ ดร.ภาณุมาศ ไทรงาม	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว

(ผศ.ดร.ชลิตา อุตะเถา)  
หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่.....

# การวิเคราะห์รอยต่ออาคารสำเร็จรูปภายใต้แรงแผ่นดินไหว

นางสาวฉัตรสุมาลย์ วรรณสิงห์ รหัสนักศึกษา 62010143  
นางสาวรินทร์วรี ก้านจักร รหัสนักศึกษา 62010776  
นางสาววิลาสินี กลัดสิงห์ รหัสนักศึกษา 62010831

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ณัฐดนัย สินสมุทรผดุง  
ปีการศึกษา 2565

## บทคัดย่อ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการที่อยู่อาศัยเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากจำนวนประชากรเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในกรุงเทพมหานครซึ่งมีข้อจำกัดการใช้ที่ดินส่งผลให้เกิดการพัฒนาที่อยู่อาศัยจากอาคารแนวราบไปสู่อาคารแนวสูงแทน แต่อาคารระบบก่อสร้างดั้งเดิมมักเกิดปัญหาด้านคุณภาพทำให้มีการปรับเปลี่ยนวิธีการก่อสร้างมาเป็นระบบก่อสร้างอาคารสำเร็จรูปมากขึ้น เพราะการนำชิ้นส่วนสำเร็จรูปที่มีมาตรฐานจากโรงงานมาประกอบกัน ณ สถานที่ก่อสร้าง เป็นอาคารที่มีคุณภาพและมาตรฐาน ซึ่งในประเทศไทยนั้น ระบบก่อสร้างอาคารสำเร็จรูปมักพบในกลุ่มที่พักอาศัยแนวราบ และยังไม่เป็นที่แพร่หลายในอาคารแนวสูง อีกทั้ง จากการศึกษาสถิติการเกิดแผ่นดินไหวของประเทศไทยในอดีต เกิดแผ่นดินไหวขนาดปานกลางถึงรุนแรง ในปี พ.ศ. 2557 เกิดแผ่นดินไหวขนาด 6.3 Magnitude ที่จังหวัดเชียงราย ได้สร้างความตระหนักถึงปัญหาดังกล่าวในประเทศไทย ดังนั้น อาคารสำเร็จรูปที่มีลักษณะเป็นแนวสูงภายใต้แรงแผ่นดินไหวควรได้รับการศึกษา การศึกษานี้มุ่งเน้นไปยังพฤติกรรมภายใต้แรงแผ่นดินไหวของอาคารสำเร็จรูปและวิเคราะห์รอยต่อของอาคารสำเร็จรูปซึ่งเป็นบริเวณอ่อนไหวในกรณีเกิดแผ่นดินไหว โดยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element) สามมิติแบบแผ่นบาง (Shell element) ซึ่งวิเคราะห์แบบจำลองอาคารกับคลื่นแผ่นดินไหวสำคัญต่างๆ ด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ และนำผลการวิเคราะห์ไปวิเคราะห์โครงสร้างเฉพาะรอยต่อของอาคารสำเร็จรูป ณ ตำแหน่งวิกฤตของโครงสร้างอาคาร เพื่อหาจุดที่โครงสร้างอาคารน่าจะเกิดความเสียหายมากที่สุดและตรวจสอบความเครียดและการรับแรงแผ่นดินไหวของรอยต่ออาคารสำเร็จรูปภายใต้แรงแผ่นดินไหว

**คำสำคัญ:** อาคารสำเร็จรูป, พฤติกรรมภายใต้แผ่นดินไหว, ไฟไนต์เอลิเมนต์, วิธีวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์

# Analysis of Prefabrication Building Joints under Seismic Loads

Ms. Chatsumal Wannasing Student ID. 62010143

Ms. Rinwaree Khanjak Student ID. 62010776

Ms. Wilasinee Kladsing Student ID. 62010831

Advisor: Asst. Prof. Dr. Natdanai Sinsamutpadung

Academic Year 2022

## ABSTRACT

Currently Thailand has increasing demand for residence due to increasing population especially in Bangkok, which has lands use restrictions, resulting in the development of low-rise buildings to high-rise buildings. But conventional construction system often has quality problems, Therefore, the prefabrication building construction system is used more because the assembly of standard prefabricated parts from the manufactory at the construction site result in the quality and standard buildings. In Thailand prefabrication building construction systems are used in low-rise buildings and not widespread in high-rise buildings yet. In addition, according to a study of statistics of earthquakes in Thailand in the past found that the moderation of the earthquakes in 2014 approximate 6.3 Magnitude which occurred in Chiang Rai that make people aware problems in Thailand. Therefore, high-rise prefabrication building under earthquake should be investigated. This study focuses on behavior under earthquake of prefabrication buildings and analyze the prefabrication building joints which are sensitive when earthquake by modeling finite element model with a three-dimensional shell element that analyzed the building model with major seismic waves by dynamic method. Then, take analysis results to analyze the prefabrication building joints at the critical joint of the building model to find the point where the building structure is most probably to be damaged and investigate strain and the earthquake resistance of the prefabrication joints.

**KEYWORDS:** prefabrication building, behavior under earthquake, finite element method, dynamic methods

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผศ.ดร.ณัฐดนัย สิ้นสมุทรผดุงที่กรุณาให้คำปรึกษาปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง คอยแนะนำช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหา คอยให้ความรู้ เอาใจใส่ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือจนสำเร็จได้ด้วยดี พวกเราผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความรู้ในทุก ๆ รายวิชาที่ศึกษาเพื่อเป็นพื้นฐาน โดยคณาจารย์ท่านต่าง ๆ ได้ถ่ายทอดความรู้ทั้งทางด้านวิชาการ ความรู้ทั่วไป และประสบการณ์ต่าง ๆ จนสามารถนำมาใช้ในการทำงานและการดำเนินชีวิตได้อย่างดีเยี่ยม ตลอดจนขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ร่วมเป็นกรรมการในการทดสอบ

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือซึ่งกันและกันในการทำโครงการ รวมถึงตลอดระยะเวลาที่ได้เรียนรู้ศึกษาในภาควิชาโยธาจนตลอดมา

ขอขอบคุณผู้ตอบแบบสอบถามทุกท่านที่ได้กรุณาให้ข้อมูลโดยการตอบแบบสอบถามตามความเป็นจริงและครบถ้วน

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดาอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งเป็นผู้ให้ความรักและกำลังใจในการสนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนของคณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้คณะผู้จัดทำมีวันนี้ได้ คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างสูง

ฉัตรสุมาลย์ วรรณสิงห์

รินทร์วีร์ ก้านจักร

วิลาสินี กัลดสิงห์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VI
สารบัญรูป .....	VII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ .....	1
1.2 จุดประสงค์ของการทำวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย .....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย .....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	
2.1 แผ่นดินไหว .....	5
2.1.1 สาเหตุของการเกิดแผ่นดินไหว .....	5
2.1.2 สถิติการเกิดแผ่นดินไหวในไทย .....	6
2.2 คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้วิเคราะห์ .....	9
2.2.1 คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro .....	9
2.2.2 คลื่นแผ่นดินไหว Kobe .....	10
2.2.3 คลื่นแผ่นดินไหว Takatori .....	10
2.2.4 คลื่นแผ่นดินไหวพะเยา .....	11
2.2.5 คลื่นแผ่นดินไหวกาญจนบุรี .....	11
2.3 อาคารสำเร็จรูป (Prefabrication Building) .....	11
2.4 หลักการของเสาแข็งแรงและคานอ่อน (Strong columns and weak beam) .....	12
2.5 เหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน (Hot-Rolled Structural Steel) .....	12
2.6 พฤติกรรมการชุบแข็งแบบวัฏจักร (Cyclic hardening behaviors) .....	13
2.7 พารามิเตอร์การชุบแข็ง (Hardening parameters) .....	14
2.8 Effective notch strain range .....	15
2.9 วิธีวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างแบบประวัติเวลาไม่เชิงเส้น (Nonlinear Time History Analysis) .....	16

2.10	วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) .....	17
2.10.1	ข้อดีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	18
2.10.2	ข้อจำกัดการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	18
2.10.3	ขั้นตอนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	18
2.11	โปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์ .....	19
2.11.1	ส่วนของการสร้างแบบจำลอง .....	19
2.11.2	ส่วนของการคำนวณผล .....	20
2.11.3	ส่วนของการแสดงผลของโปรแกรม .....	20
2.12	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินการศึกษา		
3.1	รูปแบบงานวิจัย .....	22
3.2	การรวบรวมข้อมูล .....	22
3.3	เครื่องมือวิจัย .....	22
3.4	ขั้นตอนการทำงานวิจัย .....	22
3.4.1	สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของอาคารสำเร็จรูป .....	22
3.4.2	วิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของอาคารสำเร็จรูป .....	26
3.4.3	วิเคราะห์โครงสร้างเฉพาะรอยต่อ .....	26
3.4.4	ตรวจสอบความต้านทานต่อแรงแผ่นดินไหวของรอยต่ออาคารสำเร็จรูป .....	29
3.5	แผนการดำเนินงาน .....	30
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน		
4.1	กล่าวนำ .....	31
4.2	สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของอาคารสำเร็จรูปโครงสร้างเหล็กโดยใช้ฟังก์ชัน แบบแผ่นบาง (Shell Elements) .....	31
4.3	วิเคราะห์แบบจำลองอาคารสำเร็จรูปพร้อมกับคลื่นแผ่นดินไหว.....	33
4.3.1	วิเคราะห์แบบจำลองอาคารร่วมกับคลื่นแผ่นดินไหวเพื่อศึกษาการกระจัด .....	33
4.3.1.1	วิเคราะห์แบบจำลองอาคารกรณีไม่มีผนัง .....	33
4.3.1.2	วิเคราะห์แบบจำลองอาคารกรณีมีผนัง .....	37
4.3.2	วิเคราะห์โครงสร้างเฉพาะรอยต่อ .....	41
4.3.2.1	วิเคราะห์แบบจำลองอาคารเพื่อศึกษาพฤติกรรมแบบวัฏจักรของ เหล็ก .....	41
4.3.2.2	วิเคราะห์แบบจำลองอาคารสำเร็จรูปพร้อมกับคลื่นแผ่นดินไหวเพื่อ ศึกษาพฤติกรรมของเหล็กในรูปของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก .....	43

บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	
5.1 สรุปผลการศึกษา .....	54
5.2 ข้อเสนอแนะการศึกษา .....	55
บรรณานุกรม	56
ภาคผนวก	58
ประวัติผู้เขียน	59

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สถิติการเกิดแผ่นดินไหวในประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2518-2565 .....	6
ตารางที่ 3.1 ขนาดหน้าตัดเสา คาน และรายละเอียดแบบจำลอง .....	24
ตารางที่ 3.2 ค่าคุณสมบัติของวัสดุ .....	25
ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์การชุบแข็ง (Hardening parameters) .....	25
ตารางที่ 3.4 ค่าความเค้นสูงสุดตำแหน่งที่พิจารณาของการวิเคราะห์ Mesh Sensitivity .....	29
ตารางที่ 3.5 แผนการดำเนินงาน .....	30
ตารางที่ 4.1 กรณีวิเคราะห์แบบจำลองอาคารสำเร็จรูป .....	32
ตารางที่ 4.2 การกระจัดสูงสุดของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูปที่วิเคราะห์ร่วมกับคลื่นแผ่นดินไหว ตัวอย่าง กรณีมีผนังกับไม่มีผนัง .....	41

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro .....	9
รูปที่ 2.2 คลื่นแผ่นดินไหว Kobe .....	10
รูปที่ 2.3 คลื่นแผ่นดินไหว Takatori .....	10
รูปที่ 2.4 คลื่นแผ่นดินไหวพะเยา .....	11
รูปที่ 2.5 คลื่นแผ่นดินไหวกาญจนบุรี .....	11
รูปที่ 2.6 การจัดตำแหน่งของข้อหมุนพลาสติกโดยหลักการของเสาแข็งแรงและคานอ่อน (Strong columns and weak beam) .....	12
รูปที่ 2.7 ชิ้นงานทดสอบประเภทแท่งกลมสำหรับการทดสอบวัสดุ .....	14
รูปที่ 2.8 พารามิเตอร์การชุบแข็ง (Hardening parameters) .....	15
รูปที่ 2.9 คำอธิบายแบบกราฟิกของช่วงความเค้น-ความเครียดที่มีประสิทธิผล .....	16
รูปที่ 2.10 หน้าจอของโปรแกรม ABAQUS/CAE .....	20
รูปที่ 3.1 แบบแปลนอาคารเป้าหมาย .....	23
รูปที่ 3.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของอาคารสำเร็จรูป .....	24
รูปที่ 3.3 รายละเอียดแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของอาคารสำเร็จรูป .....	25
รูปที่ 3.4 จุดต่อวิกฤตของโครงสร้างระดับ Global .....	27
รูปที่ 3.5 ตัดโครงสร้างเพื่อทำการวิเคราะห์ระดับ Local .....	27
รูปที่ 3.6 การวิเคราะห์ Mesh Sensitivity ในระดับ Local .....	28
รูปที่ 3.7 การวิเคราะห์แนวโน้ม Mesh Sensitivity .....	29
รูปที่ 4.1 แบบจำลองอาคารสำเร็จรูปกรณีไม่มีผนัง .....	31
รูปที่ 4.2 แบบจำลองอาคารสำเร็จรูปกรณีมีผนัง .....	32
รูปที่ 4.3 ตำแหน่งที่มีค่าการกระจัดมากที่สุดของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูปกรณีไม่มีผนัง .....	33
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป เปรียบเทียบแกน X และ Z ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro กรณีไม่มีผนัง .....	34
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain (%) และเวลาของ แบบจำลองอาคารสำเร็จรูปเปรียบเทียบแกน X และ Z ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro กรณีไม่มีผนัง .....	34
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kobe กรณีไม่มีผนัง .....	35

รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Takatori กรณีไม่มีผนัง .....	35
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวพะเยากรณีไม่มีผนัง .....	36
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวกาญจนบุรีกรณีไม่มีผนัง .....	36
รูปที่ 4.10 ตำแหน่งที่มีค่าการกระจัดมากที่สุดของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูปกรณีมีผนัง .....	37
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป เปรียบเทียบแกน X และ Z ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro กรณีมีผนัง .....	38
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain (%) และเวลาของ แบบจำลองอาคารสำเร็จรูปเปรียบเทียบแกน X และ Z ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro กรณีมีผนัง .....	38
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kobe กรณีมีผนัง .....	39
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Takatori กรณีมีผนัง .....	39
รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวพะเยา กรณีมีผนัง .....	40
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวกาญจนบุรี กรณีมีผนัง .....	40
รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain range (%) และเวลา ของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวพะเยา กรณีมีผนัง .....	42
รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวพะเยา กรณีมีผนัง .....	42
รูปที่ 4.19 กราฟวิวิจักษณ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป .....	43
รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain (%) และเวลา ของแบบจำลองอาคารรูปสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro กรณีไม่มีผนัง .....	44
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain range (%) และ จำนวนรอบของแบบจำลองอาคารรูปสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro กรณีไม่มี ผนัง .....	44
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain (%) และเวลา ของแบบจำลองอาคารรูปสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kobe กรณีไม่มีผนัง .....	45



รูปที่ 4.39 กราฟแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain range (%) และ จำนวนรอบของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวจากญจนบุรี กรณีมีผนัง ..... 53

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันมีการเพิ่มขึ้นของประชากรโลก จะเห็นได้ชัดจากกรุงเทพมหานครในฐานะที่เป็นเมืองหลวงและศูนย์กลางสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศเป็นศูนย์กลางรวมความเจริญด้านเทคโนโลยี การศึกษาและแหล่งงานทำให้ผู้คนหลั่งไหลเข้ามาเพื่อประกอบอาชีพ เพื่อการศึกษา ส่งผลให้อัตราการเพิ่มของประชากรในกรุงเทพมหานครสูงขึ้นเรื่อย ๆ ส่งผลให้ความต้องการที่อยู่อาศัยเพิ่มมากขึ้นด้วย ทำให้จึงเป็นแหล่งอุปสงค์สำคัญของธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ แต่เนื่องจากความหนาแน่นของประชากรในเขตกรุงเทพมหานครเป็นไปอย่างรวดเร็ว ประกอบกับข้อจำกัดทางด้านการใช้ที่ดิน ส่งผลให้เกิดการพัฒนาที่อยู่อาศัยในรูปแบบใหม่ โดยเปลี่ยนรูปแบบการใช้ที่ดินจากพื้นที่แนวราบ ไปสู่พื้นที่แนวสูงแทน ทำให้ผู้ประกอบการต่างพัฒนารูปแบบการใช้ที่ดินบริเวณศูนย์กลางธุรกิจในการก่อสร้างที่อยู่อาศัยที่มีลักษณะเป็นแนวสูง (high-rise) เช่น อาคารชุด อพาร์ทเมนต์ หรือแฟลต เป็นต้น เพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์จากที่ดินได้สูงสุด

เนื่องจากระบบก่อสร้างดั้งเดิมหรือการก่อสร้างระบบเปียกที่ทำโครงสร้างอาคารแบบหล่อในที่ คือ ประกอบไม้แบบ ผูกเหล็ก แล้วจึงเทคอนกรีตสร้างเป็นเสา คาน และพื้น รวมถึงก่อผนังอิฐและฉาบปูนทับอีกครั้ง เกิดปัญหาขาดแคลนแรงงานฝีมือจากภาคการก่อสร้าง ทำให้มาตรฐานและคุณภาพงานด้อยลง จึงเริ่มมีผู้คิดค้นการผลิตวัสดุแยกเป็นชิ้นส่วนสำเร็จรูปจากโรงงานแล้วมาประกอบให้เป็นรูปร่างที่สถานที่ก่อสร้าง โดยชิ้นส่วนแต่ละชิ้นถูกกำหนดในตำแหน่งของตัวเองและเพิ่มความมั่นคงด้วย Joint ลักษณะต่างๆ เพื่อเชื่อมต่อทุกส่วนเข้าด้วยกันจนเป็นอาคารที่สมบูรณ์ เรียกว่า ระบบก่อสร้างอาคารสำเร็จรูป (Prefabrication หรือ Prefab) ซึ่งก่อนชิ้นส่วนสำเร็จรูปจะออกจากโรงงานไปยังสถานที่ก่อสร้างจะต้องมีการตรวจสอบคุณภาพอย่างละเอียด ไม่ให้มีข้อบกพร่อง มีกระบวนการผลิตที่เคร่งครัดและการควบคุมสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมระหว่างการผลิต ทำให้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปมีความแข็งแรงทนทาน มีคุณภาพและมาตรฐาน ทั้งนี้ยังมีการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างระบบก่อสร้างดั้งเดิมและระบบก่อสร้างอาคารสำเร็จรูปพบว่า ระบบก่อสร้างอาคารสำเร็จรูปมีข้อได้เปรียบอยู่มากทั้งระยะเวลาก่อสร้างที่เสร็จเร็วกว่า ต้นทุนรวมประหยัดกว่า และใช้แรงงานน้อยกว่า บริษัทอสังหาริมทรัพย์จึงเริ่มหันมาปรับเปลี่ยนวิธีการก่อสร้างบางส่วนจากระบบก่อสร้างดั้งเดิมมาเป็นการก่อสร้างด้วยระบบก่อสร้างอาคารสำเร็จรูปซึ่งช่วยอำนวยความสะดวกให้กระบวนการก่อสร้างได้มาก แต่ในประเทศไทยนั้น อาคารสำเร็จรูปมักพบในกลุ่มอาคารที่พักอาศัยแนวราบ เช่น

บ้านเดี่ยว บ้านแฝด ทาวน์โฮม เป็นต้น ซึ่งไม่เพียงพอสอดคล้องความต้องการที่พักอาศัยโดยเฉพาะในจังหวัด กรุงเทพมหานคร ดังนั้น อาคารสำเร็จรูปที่มีลักษณะเป็นแนวสูงชั้นควรได้รับการศึกษา

ในปัจจุบันโลกของเราต้องเผชิญกับภัยธรรมชาติต่างๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้ ไม่ว่าจะเป็น น้ำท่วม วาตภัย สึนามิ รวมไปถึงแผ่นดินไหว ซึ่งแผ่นดินไหวเป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่ก่อให้เกิดความสูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สินอย่างมหาศาล โดยแผ่นดินไหวเกิดจากการสั่นสะเทือนของพื้นดิน เนื่องมาจากการปลดปล่อยพลังงานเพื่อระบายความร้อน ที่สะสมไว้ภายในโลกออกมาอย่างฉับพลัน เพื่อปรับความสมดุลของเปลือกโลกให้คงที่ ซึ่งผลกระทบที่ตามมาจากการเกิดแผ่นดินไหว เช่น ทำให้เกิดพื้นดินแตกแยก ภูเขาไฟระเบิด คลื่นสึนามิ แผ่นดินถล่ม เส้นทางการคมนาคมเสียหายและถูกตัดขาด ถนนและทางรถไฟปิดเบี่ยงโค้งงอ โครงสร้างอาคารสิ่งก่อสร้างพังทลาย และในกรณีที่แผ่นดินไหวมีความรุนแรงมาก เมืองทั้งเมืองอาจถูกทำลายหมด และมีผู้เสียชีวิตเป็นจำนวนมาก ซึ่งมีหลายๆ ประเทศได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหว เช่น เมืองโทโฮกุ ประเทศญี่ปุ่น เกิดแผ่นดินไหวขนาด 9 Magnitude และประเทศไทยเองก็เคยได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหว เช่น จังหวัดเชียงใหม่ เกิดแผ่นดินไหวขนาด 6.3 Magnitude

จากการศึกษาสถิติการเกิดแผ่นดินไหวในประเทศไทยแล้ว พบว่า ในปี พ.ศ. 2468 เกิดแผ่นดินไหวขนาด 6.5 Magnitude ที่จังหวัดน่าน ซึ่งเกิดในพื้นที่ห่างไกลจากผู้คนจึงทำให้ทราบข้อมูลความเสียหายที่เกิดขึ้นไม่มากนัก และหลังจากปี พ.ศ. 2468 ประเทศไทยเกิดแผ่นดินไหวขึ้นราว ๆ 4-5 Magnitude จำนวนหลายครั้ง จนกระทั่งปี พ.ศ. 2557 เกิดแผ่นดินไหวขนาด 6.3 Magnitude ที่จังหวัดเชียงราย ซึ่งถือว่าเป็นการเกิดแผ่นดินไหวครั้งใหญ่ที่สุดของประเทศไทย โดยแผ่นดินไหวในครั้งนี้ส่งผลให้จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ รับรู้ถึงแรงสั่นสะเทือนนี้ แสดงให้เห็นว่าแผ่นดินไหวมีความรุนแรงขึ้นเรื่อยๆ และไม่สามารถควบคุมได้ ในปี พ.ศ. 2561 จึงได้มีการพัฒนามาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวขึ้น ซึ่งมีการกำหนดค่าความรุนแรงของแผ่นดินไหวสำหรับทุก ๆ อำเภอในประเทศไทย ซึ่งจะทำให้ผู้คำนวณและออกแบบโครงสร้างมีความสะดวกต่อการใช้งานมากยิ่งขึ้นและสามารถนำมามาตรฐานไปใช้ปฏิบัติให้การก่อสร้างอาคารมีความปลอดภัยและเป็นไปตามหลักมาตรฐานสากล

สำหรับประเทศไทยนั้น ยังไม่เคยมีการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของอาคารสำเร็จรูปภายใต้แผ่นดินไหวอย่างจริงจัง และยังไม่มีการออกแบบอาคารสำเร็จรูปเพื่อต้านทานแผ่นดินไหวโดยตรง นอกจากนี้ระบบก่อสร้างอาคารสำเร็จรูปโดยใช้ชิ้นส่วนสำเร็จรูปมาต่อกัน จำเป็นจะต้องมีรอยต่อเพื่อเชื่อมต่อทุกชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน ซึ่งรอยต่อนี้เป็นบริเวณที่อ่อนไหวในกรณีเกิดแผ่นดินไหวขึ้น ดังนั้นพฤติกรรมของอาคารสำเร็จรูปที่มีลักษณะเป็นแนวสูงภายใต้แรงแผ่นดินไหวและรอยต่อของอาคารสำเร็จรูปซึ่งเป็นบริเวณอ่อนไหวต่อแรงแผ่นดินไหวควรได้รับการศึกษาและตรวจสอบ

ทางผู้วิจัยได้เห็นถึงปัญหาและความสำคัญของปัญหาดังกล่าว จึงเป็นเหตุให้ทำการวิจัยในหัวข้อนี้ ซึ่งมีจุดประสงค์ของการทำวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับนั้นได้แสดงในหัวข้อต่อไป

## 1.2 จุดประสงค์ของการทำวิจัย

เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมความเครียดเฉพาะจุดของอาคารสำเร็จรูปโครงสร้างเหล็ก 5 ชั้น ภายใต้แรงแผ่นดินไหวโดยใช้แบบจำลองวัสดุแบบ Cyclic Hardening

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาโครงการบริการวิชาการ การพัฒนาต้นแบบรอยต่อโครงสร้างอาคารประกอบสำเร็จ ของผศ.ดร. ณัฐรัตน์ สนิสมทรผดุง วิจัยพัฒนาร่วมกับ บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด (CPAC Co.,Ltd) เพื่อใช้ข้อมูลหน้าตัดคานและเสาสร้างแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป 5 ชั้น ซึ่งเป็นอาคารสำเร็จรูปจากเหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน

1.3.2 สร้างแบบจำลองอาคารโครงสร้างเหล็กโดยใช้ระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข (Finite Element Method) โดยใช้ฟังก์ชันแบบแผ่นบาง (Shell Element)

1.3.3 วิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ (Dynamic Analysis Method) และกำหนดพฤติกรรมพลาสติกของเหล็ก โดยใช้โปรแกรม ABAQUS

1.3.4 คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างอาคาร ได้แก่ El-Centro wave, Kobe wave, Takatori wave, Kanchanaburi wave และ Phayao wave

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยสามารถจัดแบ่งกระบวนการศึกษาได้ 4 ขั้นตอน ได้แก่

1.4.1 สร้างแบบจำลองโดยวิธีคำนวณเชิงตัวเลข (Finite Element Method, FEM) เป็นตัวแทนให้กับอาคารสำเร็จรูป

1.4.2 วิเคราะห์แบบจำลองอาคารร่วมกับคลื่นแผ่นดินไหวด้วยวิธีวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ (Dynamic Analysis Method) โดยใช้โปรแกรม ABAQUS

1.4.3 วิเคราะห์โครงสร้างเฉพาะรอยต่อโดยพิจารณาจากการหาจุดวิกฤตของรอยต่อของโครงสร้างอาคารสำเร็จรูป

1.4.4 พิจารณาและประเมินประสิทธิภาพพร้อมต่อของอาคารสำเร็จรูป

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แก่

- 1.5.1 สามารถทราบถึงพฤติกรรมของอาคารสำเร็จรูปแนวสูงภายใต้แรงแผ่นดินไหว
- 1.5.2 สามารถประเมินความเสียหายของอาคารสำเร็จรูปแนวสูงภายใต้แรงแผ่นดินไหวได้
- 1.5.3 สามารถวิเคราะห์รอยต่ออาคารสำเร็จรูปภายใต้แรงแผ่นดินไหวได้

## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทัศน์

#### 2.1 แผ่นดินไหว

แผ่นดินไหว เป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของพื้นดิน อันเนื่องมาจากการปลดปล่อยพลังงานเพื่อลดความเครียดที่สะสมไว้ภายในโลกออกมาเพื่อปรับสมดุลของเปลือกโลกให้คงที่ ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ยังไม่สามารถทำนายเวลา สถานที่ และควบคุมความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้ ดังนั้นจึงควรศึกษาเรียนรู้ เพื่อให้เข้าใจถึงกระบวนการเกิดแผ่นดินไหวที่แท้จริง เพื่อเป็นแนวทางในการลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้น

##### 2.1.1 สาเหตุของการเกิดแผ่นดินไหว

การเกิดแผ่นดินไหวมีสาเหตุมาจาก 2 สาเหตุใหญ่ สาเหตุแรกเกิดจากการกระทำของมนุษย์ ได้แก่ การทดลองระเบิดปรมาณู การทดลองระเบิดนิวเคลียร์ใต้ดิน การเก็บน้ำในเขื่อน และแรงระเบิดจากการทำเหมืองแร่ เป็นต้น ส่วนสาเหตุที่สองเป็นสาเหตุหลักของการเกิดแผ่นดินไหว โดยเป็นการเกิดตามธรรมชาติอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก ทั้งนี้ ทฤษฎีกลไกการเกิดแผ่นดินไหวที่ยอมรับกันในปัจจุบันมี 2 ทฤษฎี คือ

1) ทฤษฎีว่าด้วยการขยายตัวของเปลือกโลก โดยแผ่นดินไหวเกิดจากการที่เปลือกโลกเกิดการคดโค้ง โกงตัวอย่างฉับพลัน และเมื่อวัตถุขาดออกจากกันจึงปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแผ่นดินไหว

2) ทฤษฎีว่าด้วยการคืนตัวของวัตถุ โดยแผ่นดินไหวเกิดจากการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน กล่าวคือ เมื่อรอยเลื่อนเกิดการเคลื่อนตัวถึงจุดหนึ่งวัตถุจะขาดออกจากกันและเสียรูปอย่างมาก พร้อมทั้งปลดปล่อยพลังงานมหาศาลออกมาในรูปของคลื่นแผ่นดินไหว และหลังจากนั้นวัตถุจะคืนตัวกลับสู่สภาพเดิม

## 2.1.2 สถิติการเกิดแผ่นดินไหวในไทย

สถิติการเกิดแผ่นดินไหวในไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2518-2565 ที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ในประเทศไทย ที่ระดับความรุนแรง 4.0-5.0 แมกนิจูด ซึ่งอยู่ในระดับที่รับรู้ถึงแรงสั่นสะเทือน และทำให้วัตถุแกว่งไกวได้ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สถิติการเกิดแผ่นดินไหวในประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2518-2565

วันที่	ขนาด (แมกนิจูด)	จุดศูนย์กลาง	ความเสียหาย
20 ต.ค. 2565	4.1	อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่	รู้สึกสั่นไหว บ้านเรือนสั่น หลายพื้นที่ใน จ.เชียงใหม่ และรู้สึกสั่นไหว อ.บ้านธิ จ.ลำพูน อ.ศรีสัชนาลัย จ.สุโขทัย และ อ.ดอกคำใต้ จ.พะเยา
18 ต.ค. 2562	4.1	อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่	รู้สึกสั่นไหว บ้านเรือนสั่น อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่ จ.ลำพูน และ จ.เชียงราย
14 มี.ค. 2562	4.2	อ.วังเหนือ จ.ลำปาง	รู้สึกสั่นไหว บ้านเรือนสั่น อ.วังเหนือ จ.ลำปาง จ.เชียงใหม่ จ.พะเยา และ จ.เชียงราย
20 ก.พ. 2562	4.9	อ.วังเหนือ จ.ลำปาง	ประชาชนบางส่วนในพื้นที่สามารถรับรู้ได้ถึงแรงสั่นสะเทือน แต่ยังไม่มียางานความเสียหาย
30 ธ.ค. 2561	4.9	อ.ศรีสวัสดิ์ จ.กาญจนบุรี	รู้สึกสั่นไหวบริเวณ จ.กาญจนบุรี จ.ชัยนาท จ.อุทัยธานี จ.สุพรรณบุรี และ จ.นครปฐม
5 พ.ค. 2557	6.3	อ.พาน จ.เชียงราย	บ้านเรือน สิ่งปลูกสร้าง ในจังหวัดเชียงรายและใกล้เคียงเสียหาย รับรู้แรงสั่นสะเทือนถึงตึกสูงในกรุงเทพฯ
4 มิ.ย. 2555	4.0	อ.เมือง จ.ระนอง	รู้สึกสั่นไหวที่ ต.เขานิเวศน์ ต.บางนอน อ.เมืองระนอง จ.ระนอง
16 เม.ย. 2555	4.3	อ.ถลาง จ.ภูเก็ต	รู้สึกไหวในหลายพื้นที่ใน จ.ภูเก็ต บ้านเรือนแตกกร้าวหลายหลัง และเกิดอาฟเตอร์ช็อกมากกว่า 26 ครั้ง
23 ธ.ค. 2551	4.1	อ.พระแสง จ.สุราษฎร์ธานี	รู้สึกสั่นไหวในบริเวณ อ.พระแสง จ.สุราษฎร์ธานี

19 มิ.ย. 2550	4.5	อ.แมริม จ.เชียงใหม่	รู้สึกสันตะเทือนได้ที่ อ.แมริม จ.เชียงใหม่ และ จ.ลำพูน
22 เม.ย. 2550	4.5	อ.เวียงป่าเป้า จ.เชียงราย	รู้สึกสันตะเทือนได้ที่ อ.เวียงป่าเป้า จ.เชียงราย และ จ.พะเยา
13 ธ.ค. 2549	5.1	อ.แมริม จ.เชียงใหม่	รู้สึกสันตะเทือนได้เกือบทั่วไปใน จ.เชียงใหม่ และ อาคารสูงใน จ.เชียงราย
17 พ.ย. 2549	4.4	อ.พาน จ.เชียงราย	รู้สึกสันตะเทือนได้ที่ อ.พาน และ อ.เมือง จ.เชียงราย
15 ธ.ค. 2548	4.1	จ.เชียงราย	รู้สึกสันตะเทือนได้ที่ อ.เมือง อ.เทิง จ.เชียงราย
4 ธ.ค. 2548	4.1	จ.เชียงราย	รู้สึกสันตะเทือนได้บนอาคารสูง จ.เชียงใหม่ และ จ.ลำพูน
18 ธ.ค. 2545	4.3	อ.เชียงดาว จ.เชียงใหม่	รู้สึกได้ที่ อ.เชียงดาว จ.เชียงราย
2 ก.ค. 2545	4.7	อ.เชียงแสน จ.เชียงราย	รู้สึกได้ที่ อ.เชียงแสน อ.เมือง อ.เชียงของ จ.เชียงราย, อ.เมือง จ.พะเยา, อ.เมือง จ.น่าน มีความเสียหายเล็กน้อยบริเวณ อ.เชียงแสน อ.เชียงของ
22 ก.พ. 2544	4.3	เขื่อนเขาแหลม จ.กาญจนบุรี	รู้สึกได้ที่ อ.ทองผาภูมิ จ.กาญจนบุรี
13 ก.ค. 2541	4.1	อ.ฝาง จ.เชียงใหม่	รู้สึกได้ที่ อ.ฝาง จ.เชียงใหม่ และ จ.เชียงราย
2 ก.พ. 2540	4.0	อ.สอง จ.แพร่	รู้สึกได้ที่ อ.สอง จ.แพร่
21 ธ.ค. 2538	5.2	อ.พร้าว จ.เชียงใหม่	รู้สึกได้ที่ จ.เชียงใหม่ เชียงราย พะเยา ลำปาง ลำพูน และแม่ฮ่องสอน มีผู้สูงอายุเสียชีวิตที่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 1 คน จากการล้มศีรษะ กระแทกพื้น มีความเสียหายเล็กน้อยที่บริเวณใกล้ ศูนย์กลาง
9 ธ.ค. 2538	5.1	อ.ร้องกวาง จ.แพร่	รู้สึกได้ที่ อ.เชียงใหม่ เชียงราย ลำพูน ลำปาง พะเยา แพร่ อุตรดิตถ์ และน่าน เสียหายเล็กน้อย ที่ จ.แพร่

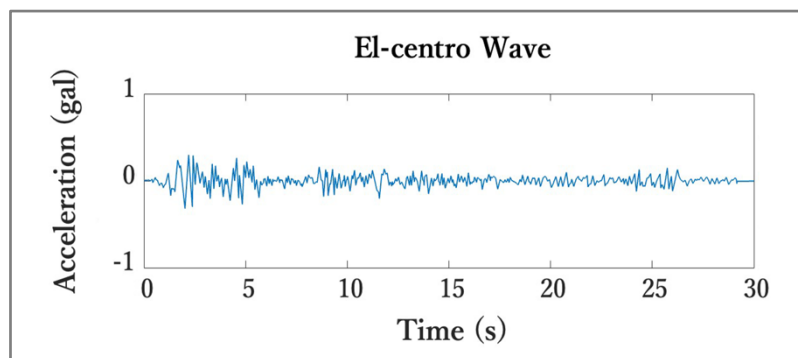
5 พ.ย. 2538	4.0	อ.ฝาง จ.เชียงใหม่	รู้สึกได้ที่ อ.ฝาง จ.เชียงใหม่
17 ต.ค. 2538	4.3	อ.ปาย แม่ฮ่องสอน	รู้สึกได้ที่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่
11 ก.ย. 2537	5.1	อ.แม่สรวย จ.เชียงราย	รู้สึกได้ที่ จ.เชียงราย มีความเสียหายต่อสิ่งก่อสร้าง ใกล้ศูนย์กลาง เช่น โรงพยาบาลพาน วัด และ โรงเรียน
8 พ.ค. 2537	4.5	จ.เชียงใหม่	รู้สึกได้ที่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ จ.ลำปาง จ.ลำพูน
5 พ.ย. 2534	4.0	จ.แม่ฮ่องสอน	รู้สึกสั่นไหวที่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ และ อ.ขุนยวม จ.แม่ฮ่องสอน
3 พ.ย. 2533	4.0	จ.กาญจนบุรี	รู้สึกสั่นไหวที่ อ.ศรีสวัสดิ์ จ.กาญจนบุรี
12 ต.ค. 2533	4.0	จ. เพชรบูรณ์	รู้สึกสั่นไหวที่ อ.หล่มสัก อ.หล่มเก่า จ.เพชรบูรณ์
28 พ.ค. 2533	4.2	จ.กาญจนบุรี	รู้สึกสั่นไหวที่ อ.ศรีสวัสดิ์ จ.กาญจนบุรี
15 ธ.ค. 2532	4.0	จ.กาญจนบุรี	รู้สึกสั่นไหวที่ อ.ศรีสวัสดิ์ จ.กาญจนบุรี
29 พ.ย. 2531	4.5	จ.กาญจนบุรี	สึกสั่นไหวที่ อ.ศรีสวัสดิ์ และ อ.ทองผาภูมิ
25 ก.ค. 2531	4.2	จ.พะเยา	รู้สึกสั่นไหวที่ จ.เชียงใหม่
19 ก.พ. 2531	4.2	จ.เชียงใหม่	รู้สึกสั่นไหวที่ จ.เชียงใหม่
30 ส.ค. 2526	4.2	จ.กาญจนบุรี	รู้สึกสั่นไหวที่ จ.กาญจนบุรี
18 ก.ค.2526	4.7	จ.กาญจนบุรี	รู้สึกสั่นไหวที่ อ.บ้านโป่ง จ.ราชบุรี
22 เม.ย. 2526	5.2	จ.กาญจนบุรี	รู้สึกแผ่นดินไหวตลอดภาคกลาง และภาคเหนือ ส่วนอาคารในกรุงเทพฯ เสียหายเล็กน้อย
22 เม.ย. 2526	5.9	จ.กาญจนบุรี	รู้สึกแผ่นดินไหวตลอดภาคกลาง และภาคเหนือ ส่วนอาคารในกรุงเทพฯ เสียหายเล็กน้อย
15 เม.ย. 2526	5.5	จ.กาญจนบุรี	รู้สึกแผ่นดินไหวชัดเจนในกรุงเทพฯ
20 มิ.ย. 2525	4.3	จ.เชียงใหม่	รู้สึกสั่นไหวที่ จ.เชียงใหม่ เชียงราย ลำพูน และลำปาง มีเสียงดังคล้ายฟ้าร้อง
22 ธ.ค. 2522	4.0	จ.แพร่	รู้สึกสั่นไหวที่ จ.แพร่
10 ก.พ. 2522	4.2	จ.เชียงใหม่	รู้สึกสั่นไหวที่ จ.เชียงใหม่ นาน 5 วินาที
24 ก.ค. 2521	4.0	จ.ตาก	รู้สึกสั่นไหวที่ อ.สามเงา อ.อุ้มผาง และ อ.แม่สอด จ.ตาก

26 พ.ค. 2521	4.8	อ.พร้าว จ.เชียงใหม่	รู้สึกสั่นไหวนาน 15 วินาที ที่ จ.เชียงราย เชียงใหม่ และลำปาง
17 ก.พ. 2518	5.6	พม่า-ไทย (จ.ตาก)	รู้สึกได้ทั้งภาคเหนือและภาคกลาง รวมถึง กทม. มีความเสียหายเล็กน้อย

แผ่นดินไหวในประเทศไทยที่เกิดขึ้นเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 เวลา 18:08 น. โดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่อำเภอพาน จังหวัดเชียงราย นับเป็นเหตุแผ่นดินไหวครั้งรุนแรงที่สุดในรอบ 50-100 ปี ซึ่งมีขนาดความรุนแรงมากถึง 6.3 แมกนิจูด สร้างความเสียหายให้แก่บ้านเรือนของประชาชน สิ่งปลูกสร้างในจังหวัดเชียงราย และจังหวัดใกล้เคียงไม่น้อย รวมถึงตึกสูงในกรุงเทพฯ ก็รับรู้ถึงแรงสั่นสะเทือนนี้ด้วย

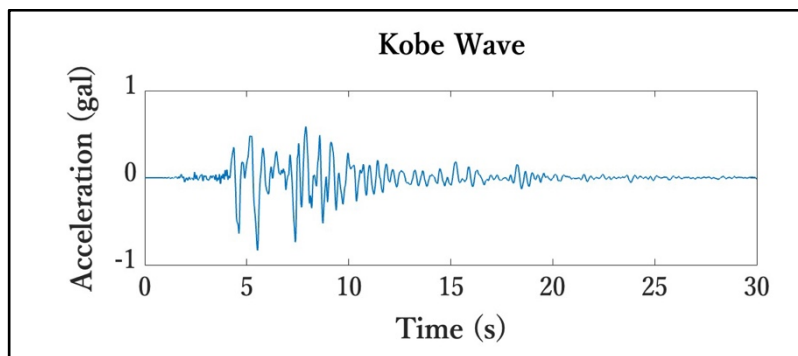
## 2.2 คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้วิเคราะห์

### 2.2.1 คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro



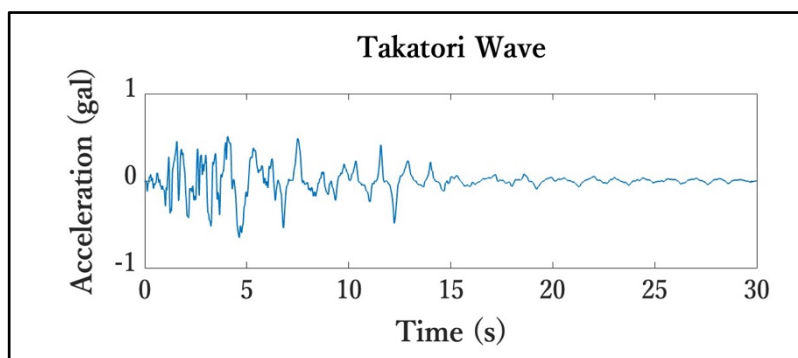
รูปที่ 2.1 คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro

### 2.2.2 คลื่นแผ่นดินไหว Kobe



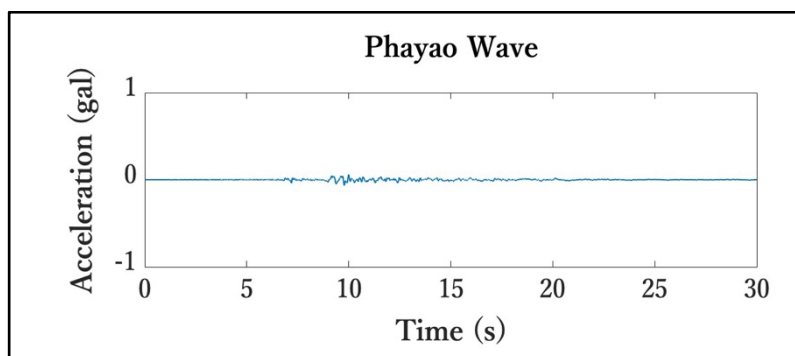
รูปที่ 2.2 คลื่นแผ่นดินไหว Kobe

### 2.2.3 คลื่นแผ่นดินไหว Takatori



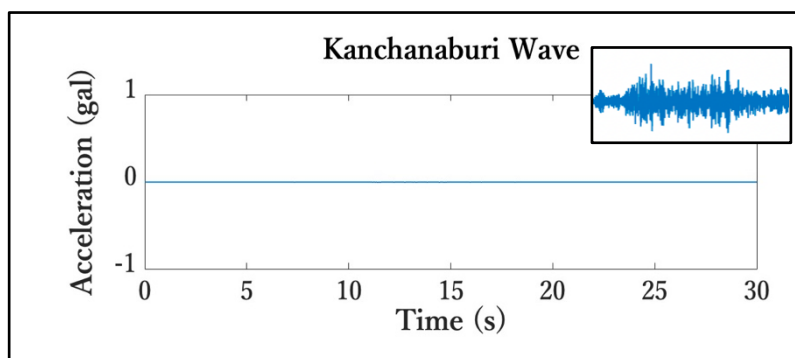
รูปที่ 2.3 คลื่นแผ่นดินไหว Takatori

#### 2.2.4 คลื่นแผ่นดินไหวพะเยา



รูปที่ 2.4 คลื่นแผ่นดินไหวพะเยา

#### 2.2.5 คลื่นแผ่นดินไหวกาญจนบุรี



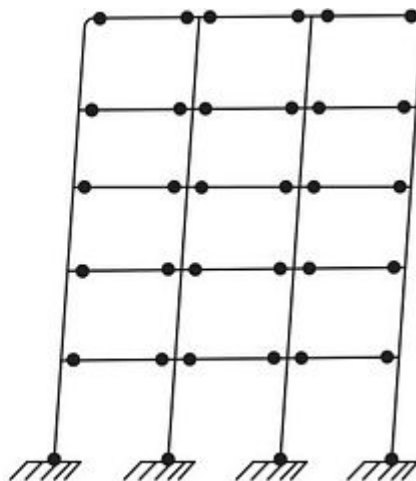
รูปที่ 2.5 คลื่นแผ่นดินไหวกาญจนบุรี

### 2.3 อาคารสำเร็จรูป (Prefabrication Building)

อาคารสำเร็จรูป (Prefabrication Building หรือ Prefab) หมายถึง อาคารที่ผลิตและสร้างโดยระบบก่อสร้างจากชิ้นส่วนสำเร็จรูปหรือโครงสร้างสำเร็จรูป เช่น ฐานราก เสา คาน พื้น และผนัง ซึ่งถูกผลิตจากโรงงานแล้วจึงขนส่งชิ้นส่วนเหล่านี้มาประกอบติดตั้งในสถานที่ก่อสร้างเพื่อสร้างอาคารที่สมบูรณ์

## 2.4 หลักการของเสาแข็งแรงและคานอ่อน (Strong columns and weak beam)

โครงสร้างอาคารรับแรงแผ่นดินไหวจะต้องออกแบบให้มีกำลังสามารถต้านทานแรงกระทำด้านข้างเนื่องจากแผ่นดินไหวได้ ในขณะเดียวกันจะต้องออกแบบให้มีความเหนียว (Ductility) ต่อการโยกไหวภายใต้แรงกระทำในลักษณะกลับไปได้ การออกแบบที่ดีจะมีการกำหนดจุดที่จะเกิดข้อหมุนพลาสติก (Plastic hinge) เพื่อการกระจายพลังงานจากแรงแผ่นดินไหวให้เกิด ณ ตำแหน่งปลายคาน ในขณะที่เสาจะถูกออกแบบให้มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น (Elastic) ที่มีกำลังและความมั่นคงต่อแรงกระทำด้านข้างได้ หลักการออกแบบนี้เรียกว่า หลักการของเสาแข็งแรงและคานอ่อน (Strong columns and weak beam) ซึ่งกำหนดใน ACI 318-99 ดังนั้นบริเวณข้อหมุนพลาสติกเหล่านี้จำเป็นต้องมีการจัดรายละเอียดเป็นพิเศษ เพื่อให้มีความเหนียวและสามารถดูดซับพลังงานได้ ลักษณะการวางตำแหน่งของข้อหมุนโดยหลักการของเสาแข็งแรงและคานอ่อน แสดงในรูปที่ 2.6 โดยที่จุดสีดำในรูปแสดงถึงตำแหน่งของข้อหมุนพลาสติก



รูปที่ 2.6 การจัดตำแหน่งของข้อหมุนพลาสติกโดยหลักการของเสาแข็งแรงและคานอ่อน  
(Strong columns and weak beam)

## 2.5 เหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน (Hot-Rolled Structural Steel)

เหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน คือ เหล็กรูปพรรณโครงสร้างที่ผ่านกรรมวิธีการผลิตโดยรีดให้หน้าตัดและรูปทรงเป็นไปตามที่ต้องการ ภายใต้อุณหภูมิสูง ซึ่งการทำผ่านกระบวนการในขณะที่อุณหภูมิสูง ทำให้สามารถรีดเหล็กที่มีขนาดใหญ่และหนา ส่งผลให้สามารถสร้างเหล็กรูปพรรณที่มี

ลักษณะการใช้งานและรูปทรงที่หลากหลาย โดยข้อดีของเหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อนคือมีความแข็งแรง สามารถรับแรงสั่นสะเทือนและแผ่นดินไหวดีกว่าโครงสร้างระบบอื่น ดังนั้นในประเทศญี่ปุ่นจึงนิยมนำเหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อนมาใช้ในส่วนโครงสร้างอาคาร

นอกจากนี้ เหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อนยังนำมาใช้กับระบบก่อสร้างอาคารสำเร็จรูป โดยมีข้อดีคือ สามารถใช้ควบคู่กับการผลิตเหล็กได้ทุกขนาด สามารถเชื่อมต่อชิ้นส่วนให้เป็นรูปร่างต่างๆ ก่อน รวมถึงสามารถจัดเตรียมพื้นผิวหรือคุณสมบัติกันไฟกันสนิมของเหล็ก ให้พร้อมตั้งแต่ในโรงงาน ก่อนขนย้ายไปยังสถานที่ก่อสร้าง

สำหรับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในประเทศไทยจะอ้างอิงมาตรฐานที่ออกโดยสำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม (สมอ.) คือ มาตรฐานอุตสาหกรรม หรือ มอก. (TIS) ซึ่งระบุเกรดเหล็กไว้ 2 ประเภท 7 เกรด ดังนี้ SS400, SS490, SS540, SM400, SM490, SM520 และ SM570 โดยเหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อนที่จะกล่าวถึงในปริญญานิพนธ์เล่มนี้คือ SM490 เหล็กโครงสร้างการเชื่อมใช้สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างอาคาร สะพาน และเรือ ซึ่งต้องการคุณสมบัติทางกลและประสิทธิภาพการเชื่อมสูง

## 2.6 พฤติกรรมการชุบแข็งแบบวัฏจักร (Cyclic hardening behaviors)

พฤติกรรมการชุบแข็งแบบวัฏจักร (Cyclic hardening behaviors) เป็นการแข็งตัวของวัสดุเนื่องจากแรงกระทำซ้ำๆ เมื่อวัสดุรับแรงกระทำแบบซ้ำๆ (Repeated load) หลายๆ ครั้งหรือภาระกรรมแบบไม่คงที่ (Variable load) อยู่ตลอดเวลาอาจทำให้ชิ้นส่วนเกิดการล้าจนเกิดความเสียหายเนื่องจากความล้าได้แม้ว่าชิ้นส่วนนั้นจะรับแรงกระทำในช่วงยืดหยุ่น (Elastic) หรือต่ำกว่าจุดคราก (Yielding point) ก็ตาม โดยพฤติกรรมการชุบแข็งของวัสดุทางอุดมคติในโปรแกรม ABAQUS ภายใต้คุณสมบัติของพลาสติก 3 ประเภทหลักคือ

1) แบบจำลองการชุบแข็งแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) มีประโยชน์สำหรับกรณีที่เกี่ยวข้องกับการชิงพลาสติกโดยรวม หรือกรณีที่มีการดึงที่แต่ละจุด โดยพื้นฐานแล้วอยู่ในทิศทางเดียวกันในพื้นที่ความเครียดตลอดการวิเคราะห์ จึงไม่เหมาะกับพฤติกรรมที่เป็นวัฏจักร การชุบแข็งแบบไอโซทรอปิกจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของช่วงอีลาสติก โดยการระบุโดยตรงเป็นฟังก์ชันในรูปแบบตารางหรือโดยใช้ตัวเลขชี้กำลังอย่างง่ายดังสมการ

$$\sigma^0 = \sigma|_0 + Q_\infty \left(1 - e^{-b\bar{\epsilon}^p}\right)$$

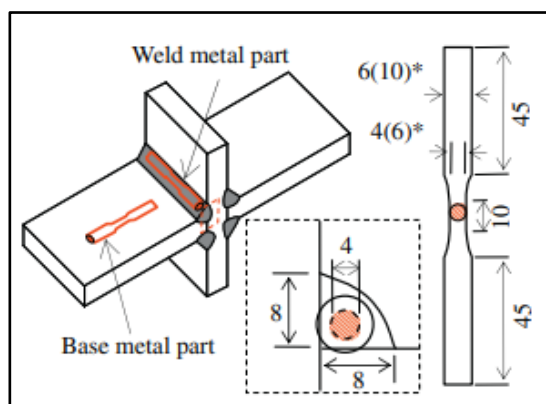
2) แบบจำลองการชุบแข็งแบบจลนศาสตร์ (Kinematic) จะใช้แบบจำลองจลนศาสตร์เชิงเส้นเพื่อกำหนดอัตราคงที่ของการชุบแข็งแบบวิฏจักร เหมาะสำหรับการจำลองพฤติกรรมแบบไม่ยืดหยุ่นของวัสดุที่ต้องรับแรงกระทำแบบวนซ้ำ การชุบแข็งด้วยจลนศาสตร์จะอธิบายการแปลงของพื้นผิวในพื้นที่ความเค้น โดยไม่อาศัยอุณหภูมิ โดยใช้กฎการชุบแข็งแบบเส้นตรงของซิกเลอร์

3) แบบจำลองการชุบแข็งแบบผสม (Combined) คุณลักษณะที่รวมกันสามารถใช้เพื่อกำหนดการชุบแข็งแบบไอโซโทรปิกและการชุบแข็งแบบจลนศาสตร์ไม่เชิงเส้นร่วมกัน การรวมกันขององค์ประกอบไอโซโทรปิกร่วมกับองค์ประกอบจลนศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นสามารถใช้ในการทำนายหลังการเขย่าหลายรอบ (Cyclic hardening with Plastic shakedown) ได้

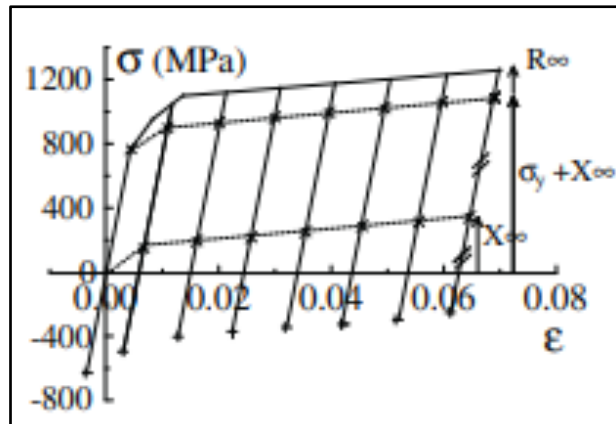
## 2.7 พารามิเตอร์การชุบแข็ง (Hardening parameters)

จากการศึกษาความล้ารอบต่ำและรอบสูงของเหล็กความแข็งแรงสูงบริเวณข้อต่อที่ใช้ประกอบคานและเสาของสะพาน โดยการทดสอบความล้ารอบต่ำได้ดำเนินการในข้อต่อไม้กางเขนที่รับน้ำหนักซึ่งมีการเจาะและความแข็งแรงที่ไม่สมบูรณ์ โดยติดตั้งตัวอย่างทดสอบทั้ง 2 ด้านของรอยต่อเข้ากับเครื่องแปลงความถี่ที่มีระยะความยาวเกจ 50 มิลลิเมตร และกำหนดค่าของอัตราการกระจัดอยู่ที่ 0.10-0.33 มิลลิเมตร ถูกนำไปใช้กับชิ้นงานทดสอบแต่ละชิ้นที่มีอัตราการกระจัดที่ 0.0017-0.0082 มิลลิเมตร/วินาที การทดสอบความล้ารอบสูง ดำเนินการโดยควบคุมแรงและช่วงความเค้น (75-270 MPa) ที่ได้คำนวณโดยการหารช่วงแรงค่าที่วัดได้ด้วยพื้นที่ส่วนที่เป็นคอคอด

จากการทดสอบดังกล่าว จึงได้พารามิเตอร์การชุบแข็ง (hardening parameter) สำหรับวัสดุแต่ละชนิดและยึดตามกราฟแรงดึงที่มีการถ่ายแรงแบบวนซ้ำจนกว่าจะถึงค่าความต้านแรงอัด แสดงดังรูปที่ 2.7-2.8



รูปที่ 2.7 ชิ้นงานทดสอบประเภทแท่งกลมสำหรับการทดสอบวัสดุ (หน่วย มม.)

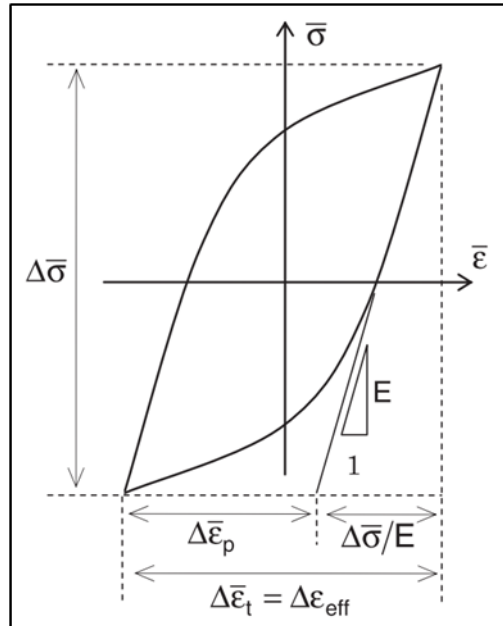


Material		$\sigma_y$ (MPa)	Isotropic hardening		Kinematic hardening	
			$R_\infty$ (MPa)	b	$X_\infty$ (MPa)	$\gamma$
SM490 (BM)		304	143	4	233	33
Weld metal (WM)	O45	435	387	1	292	106
	O25-c	367	95	3	284	163
	O25-b	351	223	1	283	124
SBHS500-1 (BM)		493	143	2	201	97
Weld metal (WM)	U10	446	96	1	212	96
	U20	362	98	1	180	69
SBHS500-2 (BM)		452	143	4	190	36
Weld metal (WM)	O25-a	544	285	2	168	100
	U25	328	113	1	215	92

รูปที่ 2.8 พารามิเตอร์การชุบแข็ง (Hardening parameters)

## 2.8 Effective notch strain range

ช่วงความเครียดรวมที่เทียบเท่าสูงสุดที่คำนวณในองค์ประกอบตามรอยบากถูกใช้เป็นช่วงความเครียดของรอยบากที่มีประสิทธิภาพในการศึกษานี้ ความเครียดทั้งหมดที่เทียบเท่ากันคือผลรวมของส่วนประกอบยืดหยุ่นและพลาสติก ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และสมการ (1)-(3)



รูปที่ 2.9 คำอธิบายแบบกราฟิกของช่วงความเค้น-ความเครียดที่มีประสิทธิภาพ

$$(1) \Delta \varepsilon_{\text{eff}} = \Delta \bar{\varepsilon}_t = \frac{\Delta \bar{\sigma}}{E} + \Delta \bar{\varepsilon}_p,$$

$$(2) \Delta \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\Delta \sigma_x - \Delta \sigma_y)^2 + (\Delta \sigma_y - \Delta \sigma_z)^2 + (\Delta \sigma_z - \Delta \sigma_x)^2 + 6(\Delta \tau_{xy}^2 + \Delta \tau_{yz}^2 + \Delta \tau_{zx}^2)]}$$

$$(3) \Delta \bar{\varepsilon}_p = \frac{1}{3} \times \sqrt{2 [(\Delta \varepsilon_{p,x} - \Delta \varepsilon_{p,y})^2 + (\Delta \varepsilon_{p,y} - \Delta \varepsilon_{p,z})^2 + (\Delta \varepsilon_{p,z} - \Delta \varepsilon_{p,x})^2 + \frac{3}{2} (\Delta \gamma_{p,xy}^2 + \Delta \gamma_{p,yz}^2 + \Delta \gamma_{p,zx}^2)]}$$

ส่วนประกอบยืดหยุ่นสามารถคำนวณได้โดยการหารช่วงความเครียดเทียบเท่าที่กำหนดในสมการ (2) โดย Young's modulus และส่วนประกอบที่เป็นพลาสติกสามารถคำนวณได้โดยสมการ (3)

## 2.9 วิธีวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างแบบประวัติเวลาไม่เชิงเส้น (Nonlinear Time History Analysis)

การวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างแบบประวัติเวลาไม่เชิงเส้นใช้การผสมผสานระหว่างการบันทึกการเคลื่อนที่ภาคพื้นดินกับแบบจำลองโครงสร้างที่มีรายละเอียด ดังนั้นจึงสามารถสร้าง

ผลลัพธ์จากความไม่แน่นอนค่อนข้างต่ำได้ ในการวิเคราะห์แบบการตอบสนองของโครงสร้างที่ไม่เป็นเชิงเส้น แบบจำลองโครงสร้างที่มีรายละเอียดซึ่งอยู่ภายใต้บันทึกการเคลื่อนที่ของพื้นดินจะสร้างการประมาณการเสียรูปของส่วนประกอบสำหรับระดับความเป็นอิสระแต่ละระดับในแบบจำลอง และการตอบสนองแบบโหมตจะรวมกันโดยใช้โครงร่างต่างๆ เช่น รากที่สอง-ผลรวมของกำลังสอง

ในการวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างที่ไม่เป็นเชิงเส้น คุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นของโครงสร้างจะถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์โดเมนเวลา แนวทางนี้เป็นวิธีที่เข้มงวดที่สุด และจำเป็นสำหรับรหัสอาคารบางประเภทสำหรับอาคารที่มีการกำหนดค่าที่ผิดปกติหรือมีความสำคัญเป็นพิเศษ อย่างไรก็ตามการตอบสนองที่คำนวณได้นั้นอ่อนไหวมากต่อลักษณะของการเคลื่อนที่ภาคพื้นดินแต่ละรายการที่ใช้เป็นอินพุตของคลื่นไหวสะเทือน ดังนั้นจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์หลายครั้งโดยใช้บันทึกการเคลื่อนที่ภาคพื้นดินที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ค่าประมาณที่เชื่อถือได้ของการกระจายความน่าจะเป็นของการตอบสนองเชิงโครงสร้าง เนื่องจากคุณสมบัติของการตอบสนองต่อแผ่นดินไหวขึ้นอยู่กับความรุนแรงหรือความรุนแรงของการสั่นไหวของแผ่นดินไหว

## 2.10 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM)

การแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมมีส่วนอย่างมากในการสร้างเสริมปรับปรุงความเป็นอยู่ของมนุษย์ให้ดียิ่งขึ้น ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้จากกฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์และทำการประดิษฐ์ขึ้นมาในลักษณะของสมการต่างๆ ได้ ซึ่งอาจอยู่ในรูปแบบสมการอนุพันธ์ (Differential Equation) หรือในรูปแบบของสมการอินทิกรัล (Integral Equation) เป็นต้น โดยปกติแล้วปัญหานั้นจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกันรวมทั้งเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมาะสม ค่าของผลเฉลยแม่นยำตรงซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่แท้จริงของปัญหาดังกล่าว จะประกอบด้วยค่าของตัวแปรที่มีขนาดต่างกันและเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งต่างๆ ของรูปร่างปัญหานั้น หรือค่าผลเฉลยแม่นยำตรงประกอบด้วยค่าทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่าแทนที่จะทำการหาค่าแม่นยำตรงที่ประกอบด้วยค่าจำนวนมาก ซึ่งปัญหานี้ในทางปฏิบัติจะทำได้ หลักการคือทำการเปลี่ยนค่าแม่นยำตรงทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านี้นี้มาเป็นค่าโดยประมาณที่มีจำนวนที่นับได้ด้วยการแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหานั้น ออกเป็นเอลิเมนต์ซึ่งมีขนาดต่างกัน ผลเฉลยโดยประมาณของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขที่กำหนดสำหรับปัญหานั้นๆ ซึ่งหมายความว่าหลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะเริ่มต้นจากการพิจารณาแต่ละเอลิเมนต์แล้วทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ แสดงตัวอย่างของรูปร่างและเอลิเมนต์โดยสมการที่สร้างขึ้นมานั้นจำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่พิจารณาอยู่ ฉะนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมา ประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการชุดใหญ่ ซึ่งความหมายทางกายภาพของการทำเช่นนี้ก็คล้ายกับ

การนำเอาหลายๆ เอลิเมนต์มารวมกันเข้าก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะของปัญหาทั้งหมด จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ลงในสมการชุดใหญ่แล้วจึงทำการแก้ระบบสมการทั้งหมด ก่อให้เกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการตามตำแหน่งต่างๆ ของรูปร่างปัญหา

### 2.10.1 ข้อดีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเทคโนโลยีที่ทันสมัย ทำให้การขึ้นรูปแบบจำลองทำได้ง่าย สะดวก รวดเร็ว และเป็นเสมือนโครงสร้างจริง ส่งผลให้การคำนวณแม่นยำมากขึ้น ทดลองซ้ำได้ไม่จำกัดจำนวนครั้ง สามารถปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ (parameter) ได้สะดวกเป็นไปตามคุณสมบัติที่แท้จริงของวัสดุที่ต้องการศึกษา กำหนดทิศทาง และปริมาณแรงที่กระทำต่อโครงสร้างได้ สามารถประเมินผลลัพธ์ที่ได้หลายรูปแบบ เช่น ระยะกระจัด (Displacement) ความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) เป็นต้น

### 2.10.2 ข้อจำกัดการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การสร้างแบบจำลองใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำได้ยากต้องอาศัยทักษะและประสบการณ์มาก อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่ใช้คำนวณต้องมีประสิทธิภาพสูง

### 2.10.3 ขั้นตอนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีดังนี้

#### 2.10.3.1 ขั้นตอนของการเตรียมแบบจำลอง (Preprocessing phase)

- 1) การสร้างรูปร่างของแบบจำลอง (Geometric construction)
- 2) การแบ่งโดเมนของแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ต่อกันโดยแต่เอลิเมนต์จะประกอบไปด้วยโหนด (Discretization)

2.10.3.2 การกำหนด shape function ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมทางกายภาพของเอลิเมนต์หรือผลเฉลยของเอลิเมนต์

- 1) สร้างสมการสำหรับเอลิเมนต์
- 2) กำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้น สภาวะโหนด และสภาวะขอบเขตให้กับปัญหา
- 3) กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ (Material properties)

2.10.3.3 ขั้นตอนการหาคำตอบ (Solution phase) การแก้หาคำตอบของสมการซึ่งอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นหรือสมการไม่เชิงเส้น ซึ่งคำตอบคือค่าการกระจัดที่โหนดต่างๆ

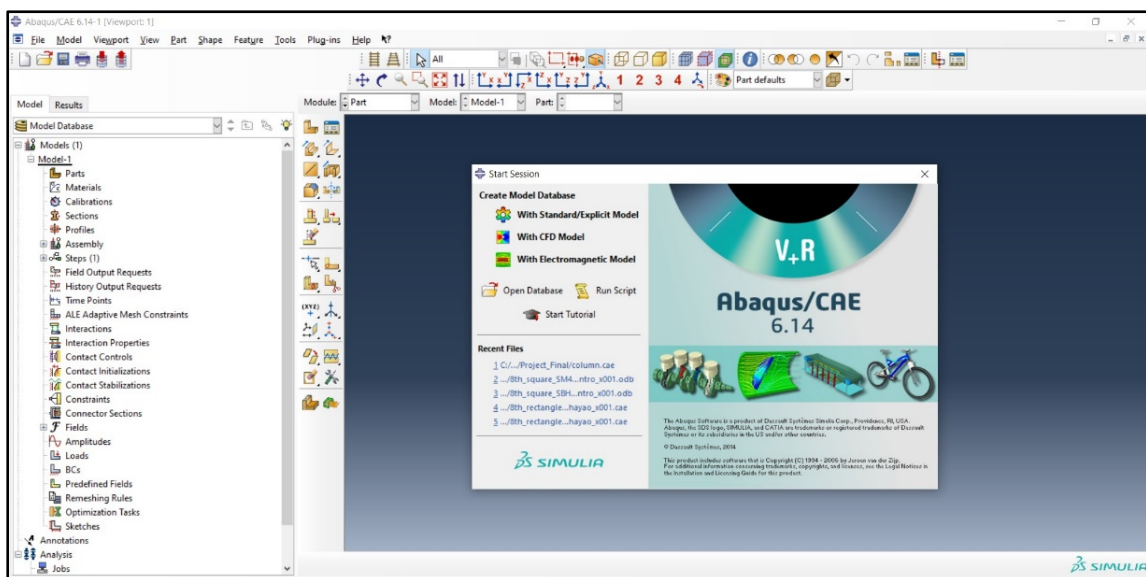
2.10.3.4 การวิเคราะห์ผลลัพธ์ (Post processing phase) การวิเคราะห์หาผลลัพธ์ที่เราสนใจเพิ่มเติม เช่น ค่าความเค้นหลัก เป็นต้น

## 2.11 โปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) ชื่อ ABAQUS เป็นเครื่องมือหลักในการวิจัยดังนั้นจึงควรทำความเข้าใจกับการใช้งานโปรแกรมนี้ โปรแกรม ABAQUS เป็นโปรแกรมคำนวณที่อาศัยหลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณและวิเคราะห์ผล ซึ่งเป็นหนึ่งในโปรแกรมด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ที่นิยมใช้งานทั้งในส่วนของงานวิจัยและภาคอุตสาหกรรม สามารถวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมได้อย่างหลากหลาย เช่น ปัญหาด้านการชน การสั่นสะเทือน ความร้อนของไหลและการเสียหายแบบต่างๆ เป็นต้น โปรแกรมนี้ประกอบไปด้วยส่วนหลักของโปรแกรมที่สำคัญดังนี้

### 2.11.1 ส่วนของการสร้างแบบจำลอง

ในส่วนนี้เป็นการสร้างแบบจำลองขึ้นเพื่อเตรียมการทดสอบโดยสามารถทำได้ 2 แบบ คือ แบบแรกโดยการใช้ ABAQUS/CAE ซึ่งมีลักษณะที่คล้ายกับการเขียนรูปในโปรแกรมเขียนแบบหรืออาจจะเขียนจากโปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับทางการเขียนแบบ (CAD) เช่น Solid Work ก็ได้แล้วจึงดึงเข้ามาใช้ในโปรแกรม ABAQUS/CAE แบบที่สองเขียนโดยการใช้คำสั่งในภาษาของโปรแกรม ABAQUS โดยจะเขียนในลักษณะเป็น Text File Format หรือเรียกว่า Input File ซึ่งไฟล์ที่ได้จะมีนามสกุลเป็น \*.inp ตัวอย่างหน้าจอของ ABAQUS/CAE แสดงดังรูปที่ 2.10 ในส่วนนี้นอกจากจะต้องสร้างภาพของโครงสร้างให้มีขนาดและลักษณะเหมือนจริงแล้วยังต้องทำการใส่เงื่อนไขอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น คุณสมบัติของวัสดุเงื่อนไขขอบเขตลักษณะของภาระที่กระทำเงื่อนไขของผิวสัมผัส ชนิดของเอลิเมนต์ จำนวนของเอลิเมนต์ ชนิดของการวิเคราะห์ ข้อมูลที่ต้องการเก็บ เป็นต้น ซึ่งเงื่อนไขทั้งหมดที่ใช้ในโปรแกรมจะมีผลต่อการคำนวณและผลที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 2.10 หน้าจอของโปรแกรม ABAQUS/CAE

### 2.11.2 ส่วนของการคำนวณผล

ส่วนนี้คือขั้นตอนการประมวลผลโดยโปรแกรมจะนำข้อมูลและเงื่อนไขที่สร้างไว้ในแบบจำลองมาทำการคำนวณและประมวลผลตามวิธีการที่ได้เขียนไว้ในโปรแกรมส่วนแรก ในส่วนนี้สามารถทำได้สองวิธี คือ วิธีแรกโดยใช้ ABAQUS/CAE วิธีที่สองโดยการใส่ ABAQUS/Command ซึ่งโปรแกรมจะทำการคำนวณค่าตามที่ได้กำหนดเงื่อนไขและขอบเขตของตัวแปรต่างๆ

### 2.11.3 ส่วนของการแสดงผลของโปรแกรม

ส่วนของการแสดงผลคือ ส่วนที่โปรแกรมแสดงผลการคำนวณที่ได้ออกมาโดยอาจแสดงผลในรูปแบบของภาพชิ้นงานในลักษณะต่างๆ การกระจายตัวของตัวแปรที่ต้องการ หรือกราฟ เป็นต้น ในโปรแกรมนี้ส่วนที่ใช้แสดงผล คือ ABAQUS/Viewer โดยจะนำข้อมูลหรือผลที่ได้จากการประมวลผลในส่วน 2 เรียกว่าไฟล์ ODB มาเปิดแสดงผล เพื่อทำการบันทึกค่าตัวแปรต่างๆ รวมถึงข้อมูลที่โปรแกรมทำบันทึกไว้ขณะทำการทดสอบ จากนั้นจะนำข้อมูลไปใช้ในการคำนวณหาค่าพลังงานดูดซับต่อไป

## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kawin Saiprasertkit, Takeshi Hanji and Chitoshi Miki et al. (2012) ได้ศึกษาการทดสอบที่เหมาะสมของแนวคิดรอยบากที่มีประสิทธิภาพกับความล้ารอบต่ำและรอบสูงกับชิ้นงานบริเวณที่รับน้ำหนักข้อต่อไม้กางเขน โดยสร้างแบบจำลองของชิ้นงานขึ้นมาเป็น Finite Element Model ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของชิ้นงานเมื่อชิ้นงานถูกโหลดกระทำซ้ำหลายครั้งเกินกว่าจุดคราก และมีการพิจารณาพฤติกรรมการชุบแข็ง (hardening behavior) แบบวิภูจักร การทดสอบใช้ค่าพารามิเตอร์การชุบแข็ง (Hardening parameters) สำหรับวัสดุ SM490 และ SBHS500 โดยมีพารามิเตอร์การชุบแข็งแบบ isotropic และ kinematic เป็นโลหะฐานและมีการใช้แนวคิด Effective notch strain approach ในการศึกษา

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการศึกษา

#### 3.1 รูปแบบงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมความเครียดเฉพาะจุดของอาคารสำเร็จรูปโครงสร้างเหล็ก 5 ชั้นภายใต้แรงแผ่นดินไหวโดยใช้แบบจำลองวัสดุแบบ Cyclic Hardening โดยทำการวิเคราะห์แบบจำลองอาคารร่วมกับคลื่นแผ่นดินไหว ดังนี้ El-Centro wave, Kobe wave, Takatori wave, Kanchanaburi wave และ Phayao wave ด้วยวิธีวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ (Dynamic Analysis Method) และวิเคราะห์รอยต่อของอาคารสำเร็จรูปโดยใช้โปรแกรม ABAQUS

#### 3.2 การรวบรวมข้อมูล

การรวบรวมข้อมูลได้ทำการศึกษาค้นคว้าจากหนังสือ วิทยานิพนธ์ และเอกสารวิชาการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยรายละเอียดของการศึกษาค้นคว้าได้แสดงไว้ในบทที่ 2

#### 3.3 เครื่องมือวิจัย

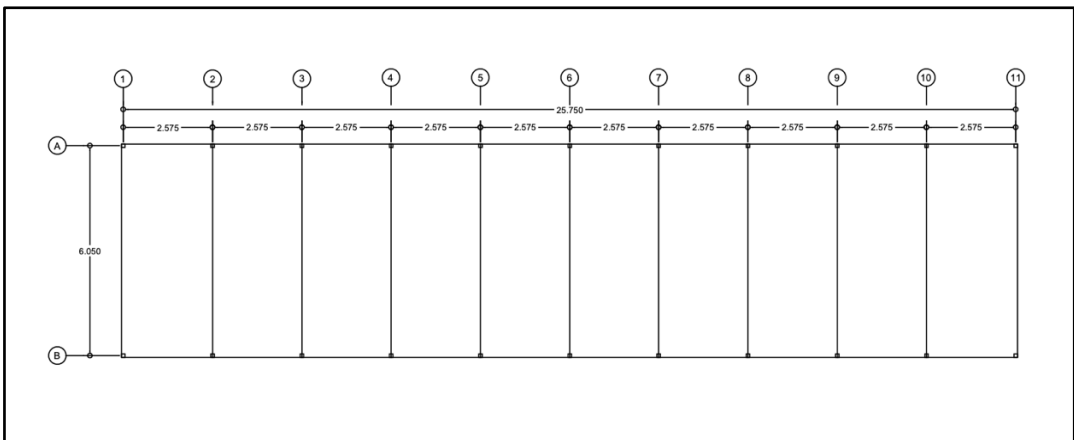
งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมและประเมินกำลังของอาคารสำเร็จรูปแนวสูงภายใต้แรงแผ่นดินไหว และทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยโปรแกรม ABAQUS โดยวิธีเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Analysis Method)

#### 3.4 ขั้นตอนการทำงานวิจัย

##### 3.4.1 สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของอาคารสำเร็จรูป

3.4.1.1 ศึกษาข้อมูลอาคารสำเร็จรูปจากโครงการบริการวิชาการ การพัฒนาต้นแบบรอยต่อโครงสร้างอาคารประกอบสำเร็จ ของผศ.ดร. ณัฐดนัย สีนสมุทรผดุง วิจัยพัฒนาร่วมกับบริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด (CPAC Co.,Ltd)

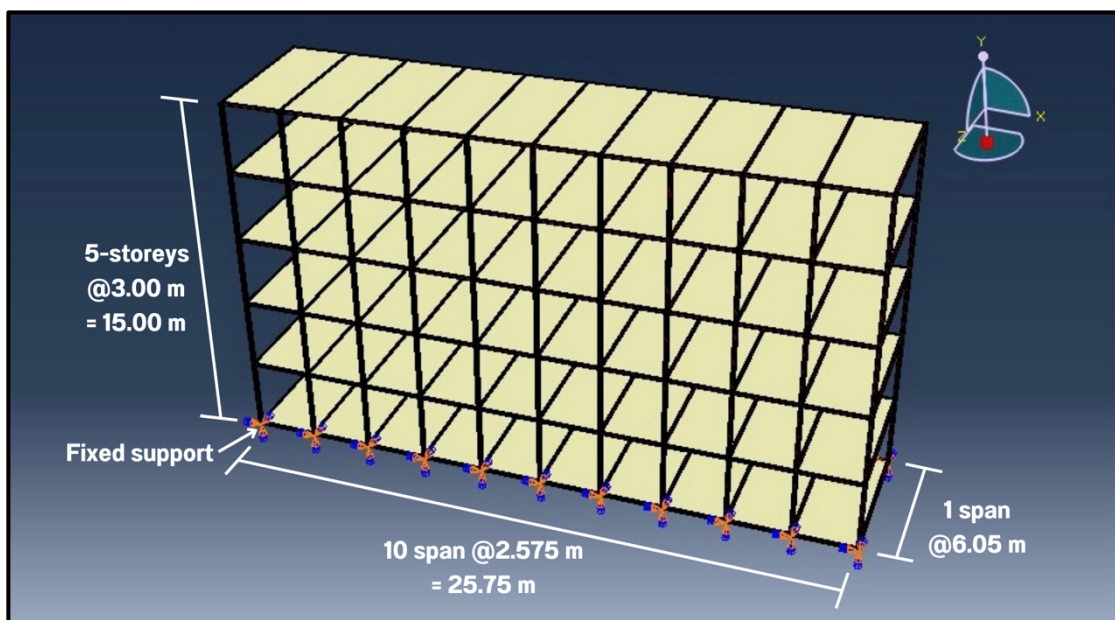
ศึกษาโครงการเพื่อเป็นแหล่งอ้างอิงของการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ รายละเอียดที่ได้จากการศึกษาโครงการมีดังนี้ น้ำหนักบรรทุกตายตัว (Dead Load) ด้วยแรงโน้มถ่วง น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) หน้าตัดคาน เสา และพื้น โดยจะใช้แบบอาคารเป้าหมายแสดงดังรูปที่ จากแปลนอาคารแสดงดังรูปที่ จะได้อาคารที่จะนำมาสร้างแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป โครงสร้างเหล็ก 5 ชั้น ความสูงต่อชั้น 3.00 เมตร ความกว้างอาคาร 6.05 เมตร และระยะช่วง Span ยาว 2.575 เมตร แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบแปลนอาคารเป้าหมาย

#### 3.4.1.2 สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์อาคารสำเร็จรูปโครงสร้างเหล็ก

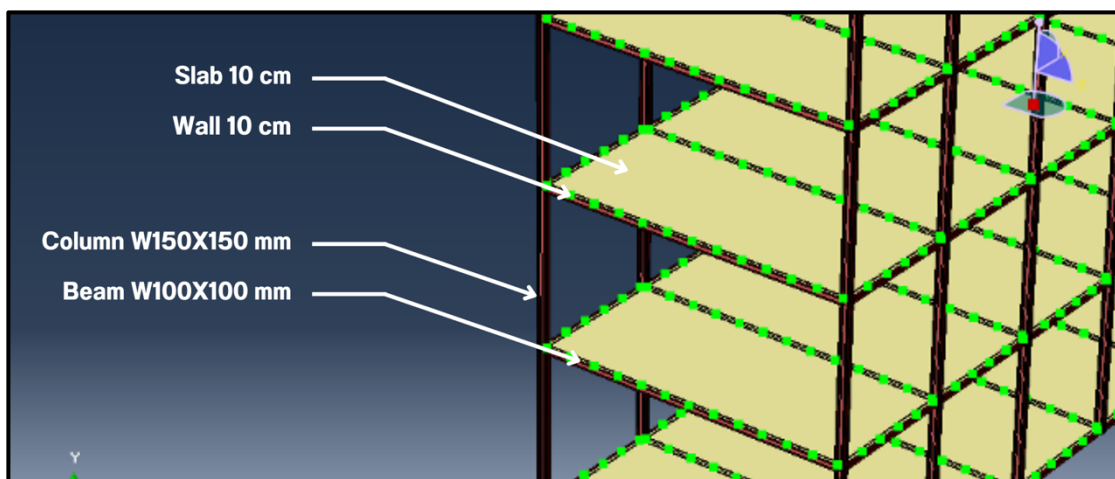
การสร้างแบบจำลองอาคารสำเร็จรูปโครงสร้างเหล็กใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้แบบจำลองอาคารรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาด 6.05 x 25.75 เมตร แสดงดังรูปที่ 3.2 และใส่ค่าพฤติกรรมการแข็งตัวเป็นวัฏจักร (Cyclic hardening behaviors) ของเหล็ก โดยในการวิเคราะห์จะใช้โปรแกรม ABAQUS ในการสร้างแบบจำลองจะเป็นชิ้นงาน 3 มิติ ชิ้นส่วนย่อยถูกเลือกให้เป็นแบบแผ่นบาง (Shell Element) โดยจะแบ่งชิ้นงานเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ ต่อเนื่องกันซึ่งขนาดของแบบจำลองจะมีขนาดเท่ากับชิ้นงานจริงและสามารถเปลี่ยนค่าสัดส่วน (Dimension) ต่างๆ ของแบบจำลองได้อย่างง่าย เช่น ความลึกของคาน เป็นต้น และวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีพลศาสตร์ (Dynamic Analysis) โดยรายละเอียดแบบจำลองที่สร้างได้จากโปรแกรม แสดงดังตารางที่ 3.1-3.3 และรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของอาคารสำเร็จรูป

ตารางที่ 3.1 ขนาดหน้าตัดเสา คาน และรายละเอียดแบบจำลอง

Floor	Steel Column		
	Cross section size (mm)		
	H x B	$t_w$	$t_f$
1F-6F	H150x150	7	10
Floor	Steel Beam		
	Cross section size (mm)		
	H x B	$t_w$	$t_f$
1F-6F	H100x100	6	8
DL wall (kg/m <sup>2</sup> )			180
LL (kg/m <sup>2</sup> )			400
LL roof (kg/m <sup>2</sup> )			200
Slab (cm)			10



รูปที่ 3.3 รายละเอียดแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของอาคารสำเร็จรูป

ตารางที่ 3.2 ค่าคุณสมบัติของวัสดุ

Properties	Material	Steel	Concrete
	Density (kg/m <sup>3</sup> )		7,850
Young's Modulus (MPa)		200,000	20,000
Poisson's Ratio		0.30	0.20

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์การชุบแข็ง (Hardening parameters)

Material	Yield stress at zero Plastic Strain, $\sigma_y$ (MPa)	Isotropic hardening		Kinematic hardening	
		$R_\infty$ (MPa)	b	$X_\infty$ (MPa)	$\gamma$
SM490	304	143	4	233	33

### 3.4.2 วิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของอาคารสำเร็จรูป

#### 3.4.2.1 วิธีเชิงพลศาสตร์ (Dynamic analysis)

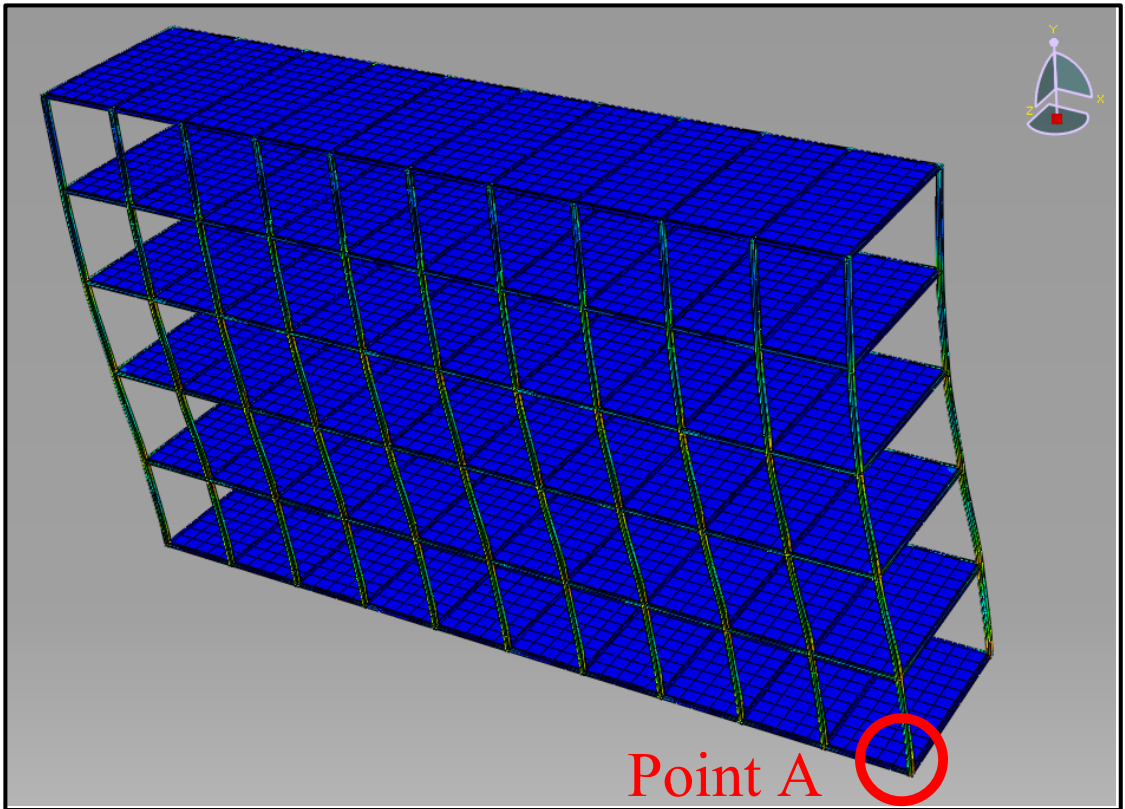
นำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของอาคารสำเร็จรูปโครงสร้างเหล็กที่สร้างเสร็จแล้วมาวิเคราะห์ร่วมกับคลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 5 คลื่น ได้แก่ El-Centro wave, Kobe wave, Takatori wave, Kanchanaburi wave และ Phayao wave โดยใช้ค่า Time Domain ของคลื่นแผ่นดินไหวดังกล่าวที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร่ง (Acceleration),  $\text{mm/s}^2$  กับเวลา (Time), s ดังรูปที่ 2.1-2.5 โดยแปลงเป็นหน่วยพื้นฐานของโปรแกรม แบบจำลองที่ทำการสร้างขึ้นจะถูกวิเคราะห์ด้วยตัวโปรแกรมและทำการเก็บข้อมูลที่วิเคราะห์เอาไว้ เมื่อมีการสั่งให้ประมวลผล เช่น ข้อมูลระยะการเคลื่อนตัวของโครงสร้างอาคารที่สัมพันธ์กับเวลา, การกระจายตัวของความเค้น (Stress) ของชิ้นส่วนย่อย ข้อมูลนี้จะถูกนำมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์และสามารถดึงข้อมูลจากโปรแกรมไปวิเคราะห์เพิ่มเติมได้

จะทำการวิเคราะห์หาแกนวิกฤตของโครงสร้างก่อนคือวิเคราะห์ร่วมกับคลื่นแผ่นดินไหว El-Centro 2 กรณี ได้แก่ คลื่นแผ่นดินไหวแกน X และคลื่นแผ่นดินไหวแกน Z เมื่อได้แกนวิกฤตของโครงสร้างแล้ว จะทำการวิเคราะห์โครงสร้างเฉพาะแกนวิกฤตร่วมกับคลื่นแผ่นดินไหวอีก 4 คลื่น

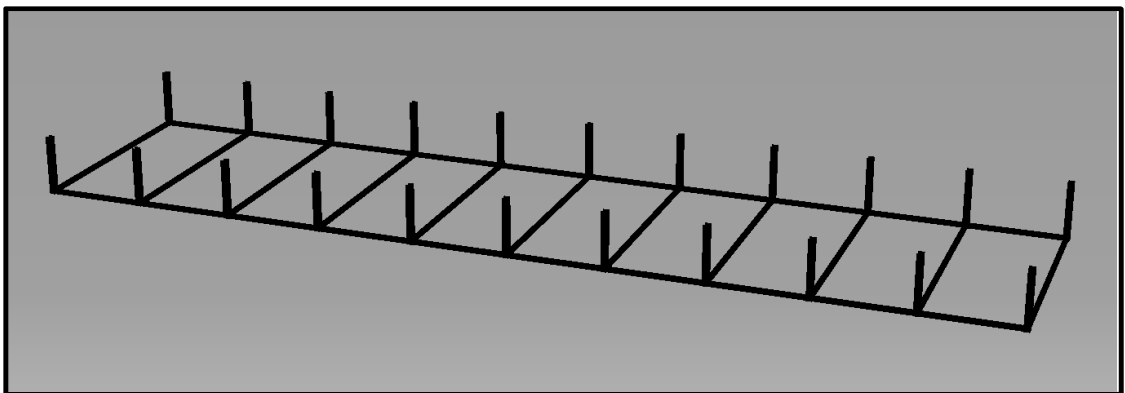
### 3.4.3 วิเคราะห์โครงสร้างเฉพาะรอยต่อ

การวิเคราะห์โครงสร้างเฉพาะรอยต่อจะพิจารณาจากการหาจุดวิกฤตของรอยต่อ โดยเริ่มจากนำข้อมูลที่ถูกระบุวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างภาพรวมมาระบุจุดต่อวิกฤตของโครงสร้างในกรณีนั้นๆ จากการวิเคราะห์จะได้ค่าความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ณ ตำแหน่งจุดต่อวิกฤตของโครงสร้าง

การระบุจุดวิกฤตของรอยต่อจะนำข้อมูลที่ถูกระบุวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างระดับ Global มาพิจารณาระยะการเคลื่อนตัวในแนวแกนที่อ่อนแอของโครงสร้างชั้นบนสุดโดยอ้างอิงจากจุดจุดหนึ่ง เนื่องจากโครงสร้างชั้นบนสุดมีการเคลื่อนตัวหรือการแกว่งตัวมากที่สุด เมื่อทราบเวลาที่เกิดระยะการเคลื่อนตัวมากที่สุดจึงพิจารณาว่าความเค้น (Stress) ณ เวลานั้นมากที่สุดเกิดขึ้น ณ จุดใด จุดนั้นคือตำแหน่งจุดต่อวิกฤตของโครงสร้าง จากนั้นจึงตัดโครงสร้างเพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างเฉพาะรอยต่อ แสดงดังรูปที่ 3.4-3.5

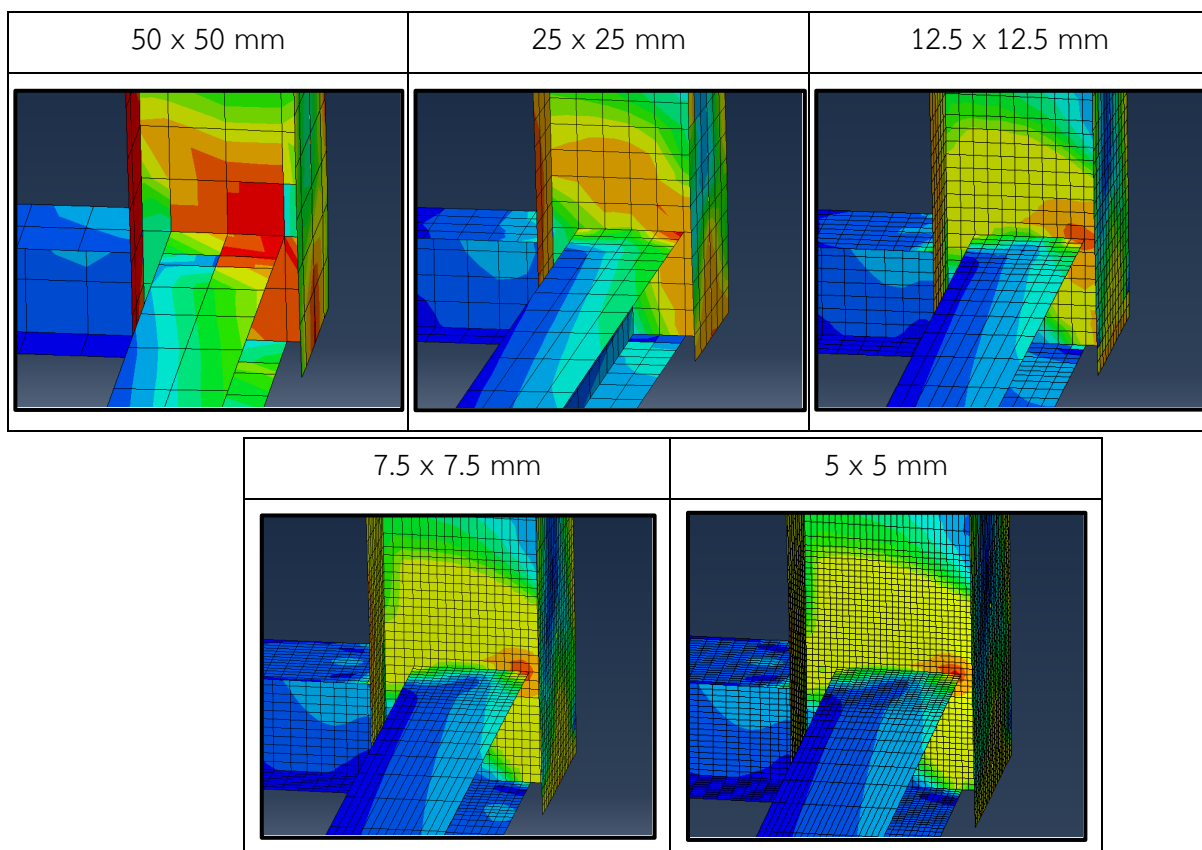


รูปที่ 3.4 จุดเชื่อมต่อวิกฤตของโครงสร้างระดับ Global



รูปที่ 3.5 ตัดโครงสร้างเพื่อทำการวิเคราะห์ระดับ Local

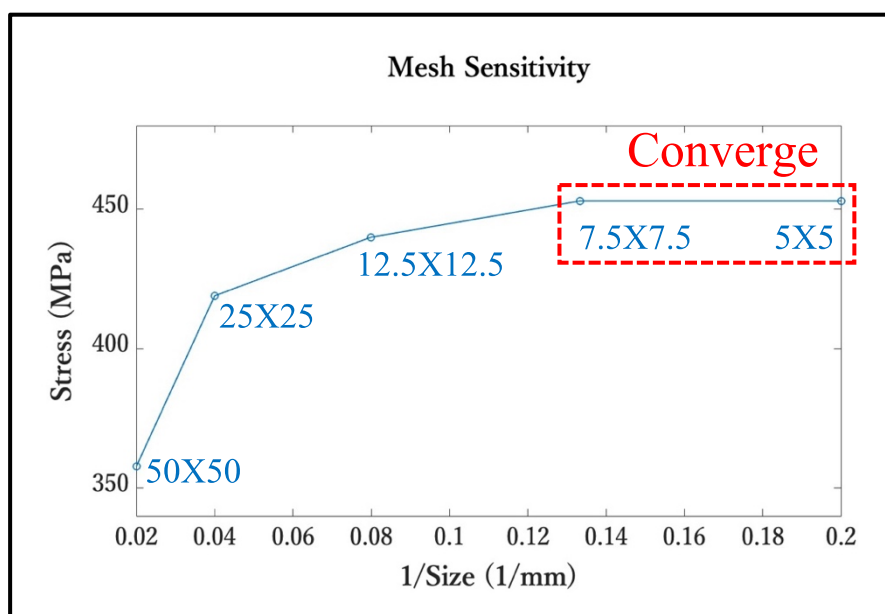
ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของอาคารนั้น ความแม่นยำมีความสำคัญในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ ซึ่งการทำให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำนั้นขึ้นอยู่กับกรัด Mesh ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ Mesh Sensitivity หลังจากตัดโครงสร้างแล้วจะวิเคราะห์ Mesh Sensitivity ในระดับ Local โดยแบ่งขนาดการตัด Mesh ออกเป็น 50 x 50 , 25 x 25 , 12.5 x 12.5 , 7.5 x 7.5 และ 5 x 5 มม. แล้วทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิตยศาสตร์ (Static) โดยใช้ข้อมูลเชิงพลศาสตร์ที่ใช้หาจุดวิกฤตของโครงสร้างระดับ Global เมื่อวิเคราะห์ครบทุกขนาดการตัด Mesh จึงวิเคราะห์ Mesh Sensitivity ทำให้ได้ขนาด Mesh ที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของโครงสร้างเฉพาะรอยต่อคือ ขนาด 7.5 x 7.5 มม. แสดงดังรูปที่ 3.6-3.7 และตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.6 การวิเคราะห์ Mesh Sensitivity ในระดับ Local

ตารางที่ 3.4 ค่าความเค้นสูงสุดตำแหน่งที่พิจารณาของการวิเคราะห์ Mesh Sensitivity

Size (mm)	Stress (MPa)
50 x 50	357.76
25 x 25	418.96
12.5 x 12.5	440.91
7.5 x 7.5	451.72
5 x 5	453.57



รูปที่ 3.7 การวิเคราะห์แนวโน้ม Mesh Sensitivity

เมื่อทราบขนาด Mesh ที่เหมาะสมแล้ว ทำการตัด Mesh แล้ววิเคราะห์โครงสร้าง เฉพาะรอยต่อร่วมกับคลื่นแผ่นดินไหวอีก 4 คลื่น

#### 3.4.4 ตรวจสอบความต้านทานต่อแรงแผ่นดินไหวของรอยต่ออาคารสำเร็จรูป

พิจารณาและตรวจสอบความต้านทานต่อแรงแผ่นดินไหวของรอยต่ออาคารสำเร็จรูป จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างเฉพาะจุด

### 3.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 3.5 แผนการดำเนินงาน

หัวข้องาน	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. หาข้อมูลเกี่ยวกับแผ่นดินไหว การออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว อาคารสำเร็จรูป และคลื่นแผ่นดินไหว	←→								
2. สร้างแบบจำลองอาคาร สำเร็จรูปโครงสร้างเหล็ก		←→							
3. ทำการวิเคราะห์อาคาร สำเร็จรูปโครงสร้างเหล็กกับคลื่นแผ่นดินไหว			←→						
4. สรุปผลการวิเคราะห์เบื้องต้น				←→					
5. จัดทำเล่มวิทยานิพนธ์บทที่ 1-3 และเตรียมการนำเสนอ				←→					
6. ทำการวิเคราะห์โครงสร้าง เฉพาะรอยต่อจากข้อมูลที่ ถูกวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ของ โครงสร้างภาพรวม						←→			
7. สรุปผลการวิเคราะห์							←→		
8. จัดทำเล่มวิทยานิพนธ์บทที่ 3-5 และเตรียมการนำเสนอ									←→

## บทที่ 4

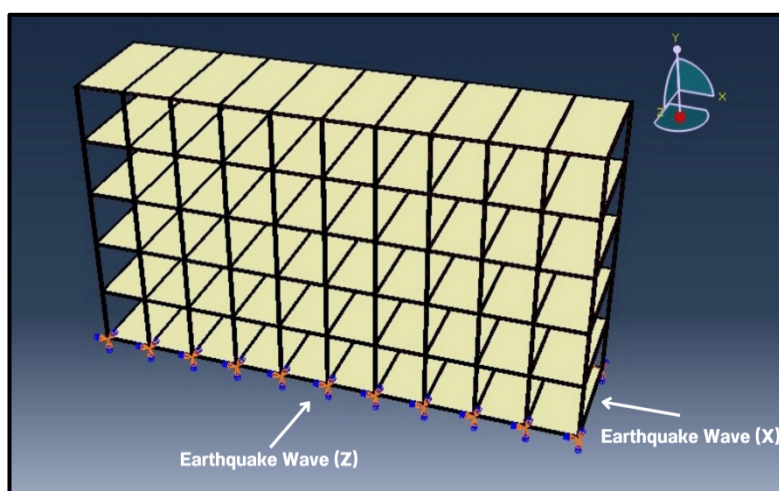
### ผลการดำเนินงาน

#### 4.1 กล่าวนำ

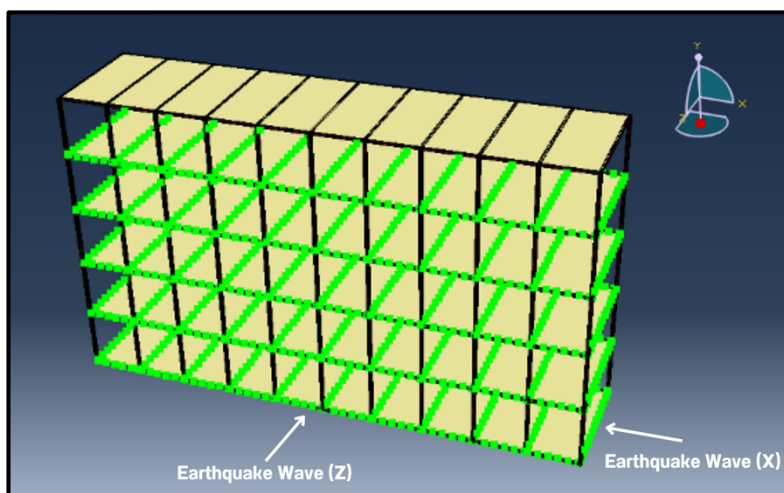
ในหัวข้อนี้เราใช้อาคารสำเร็จรูปขนาด  $6.05 \times 25.75$  เมตร สูง 5 ชั้น ชั้นละ 3 เมตร มาวิเคราะห์ร่วมกับคลื่นแผ่นดินไหว โดยคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นประกอบด้วย คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro, คลื่นแผ่นดินไหว Kobe, คลื่นแผ่นดินไหว Takatori, คลื่นแผ่นดินไหว Kanchanaburi และคลื่นแผ่นดินไหว Phayao เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมความเครียดเฉพาะจุดของอาคารสำเร็จรูปโครงสร้างเหล็กสูง 5 ชั้น

#### 4.2 สร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของอาคารสำเร็จรูปโครงสร้างเหล็กโดยใช้ฟังก์ชันแบบแผ่นบาง (Shell Element)

สร้างแบบจำลองอาคารสำเร็จรูปที่มีขนาด  $6.05 \times 25.75$  เมตร ดังรูปที่ 4.1-4.2 และแบ่งกรณีวิเคราะห์แบบจำลองอาคารสำเร็จรูปได้ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบบจำลองอาคารสำเร็จรูปกรณีไม่มีผนัง



รูปที่ 4.2 แบบจำลองอาคารสำเร็จรูปกรณีมีผนัง

ตารางที่ 4.1 กรณีวิเคราะห์แบบจำลองอาคารสำเร็จรูป

5-storey prefabricated building without wall			
Case	Width x Length (m x m)	Earthquake Wave	
1	6.05 x 25.75	El-Centro	X
2			Z
3		Kobe	W
4		Takatori	W
5		Kanchanaburi	W
6		Phayao	W
5-storey prefabricated building with wall			
Case	Width x Length (m x m)	Earthquake Wave	
7	6.05 x 25.75	El-Centro	X
8			Z
9		Kobe	W
10		Takatori	W
11		Kanchanaburi	W
12		Phayao	W

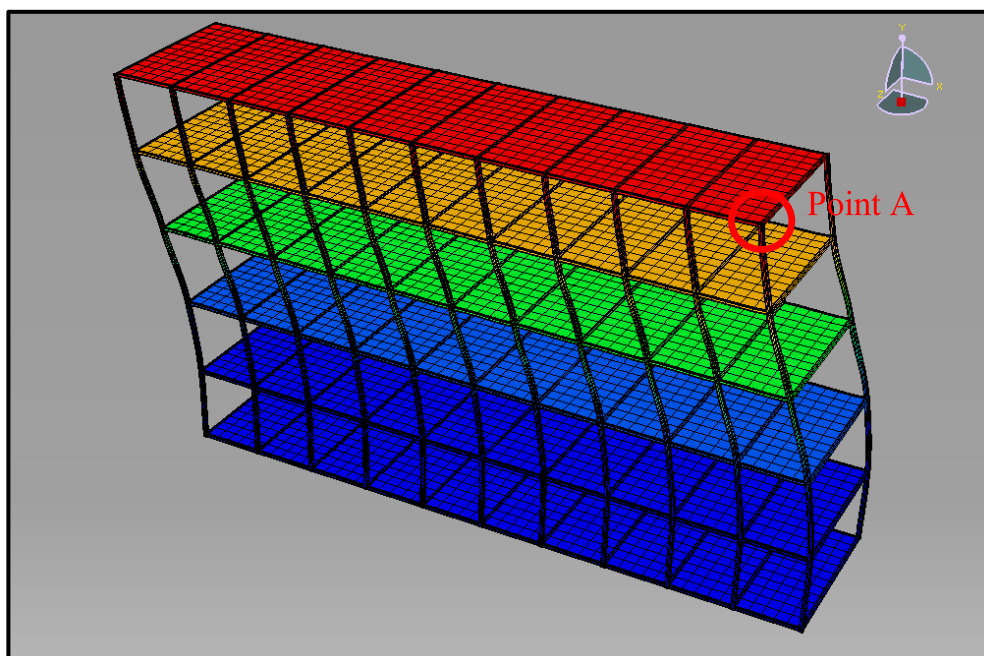
หมายเหตุ: W คือ ด้านที่วิกฤต

## 4.3 วิเคราะห์แบบจำลองอาคารสำเร็จรูปร่วมกับคลื่นแผ่นดินไหว

### 4.3.1 วิเคราะห์แบบจำลองอาคารร่วมกับคลื่นแผ่นดินไหวเพื่อศึกษาการกระจัด

#### 4.3.1.1 วิเคราะห์แบบจำลองอาคารกรณีไม่มีผนัง

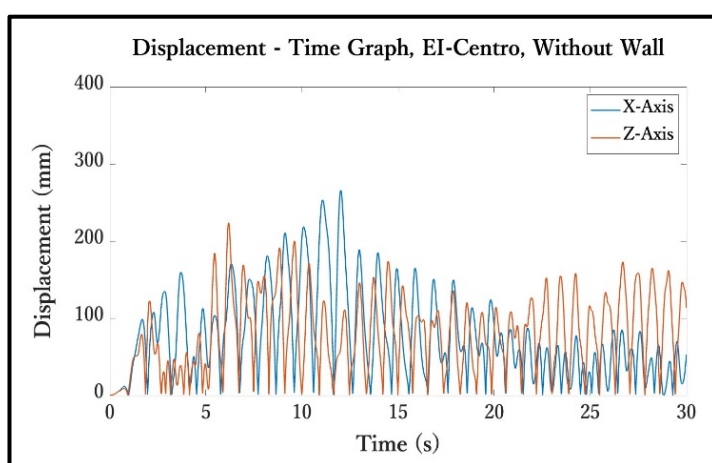
ตำแหน่งที่นำมาพิจารณาค่าการกระจัดของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูปกรณีไม่มีผนังคือ ตำแหน่งบนสุดหรือชั้นที่ 5 ของแบบจำลองอาคาร ซึ่งมีค่าการกระจัดมากที่สุด ดังรูปที่ 4.3 และเมื่อวิเคราะห์แบบจำลองอาคารร่วมกับคลื่นแผ่นดินไหวคลื่นตัวอย่างได้ผลการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 4.4-4.8 และตารางที่ 4.2



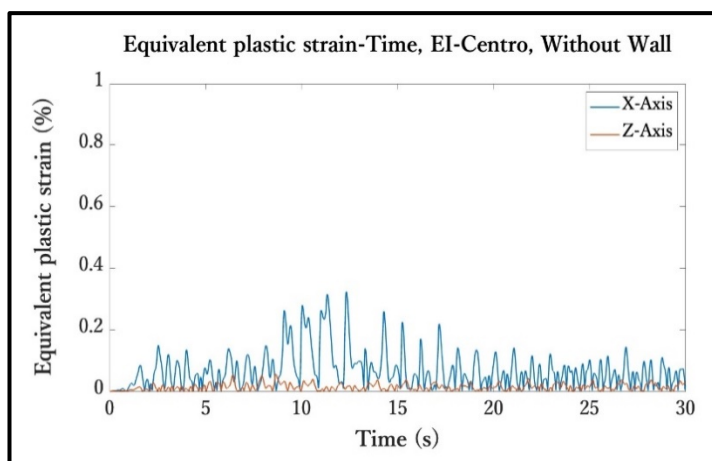
รูปที่ 4.3 ตำแหน่งที่มีค่าการกระจัดมากที่สุดของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูปกรณีไม่มีผนัง

## คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro

จากการวิเคราะห์หาแกนวิกฤตของโครงสร้างโดยวิเคราะห์ร่วมกับคลื่นแผ่นดินไหว El-Centro 2 กรณี ได้แก่ คลื่นแผ่นดินไหวแกน X และคลื่นแผ่นดินไหวแกน Z ซึ่งการกระจัดสูงสุดของอาคารสำเร็จรูปโครงสร้างเหล็กกรณีไม่มีผนัง คลื่นแผ่นดินไหวแกน X เท่ากับ 265.78 มม. และคลื่นแผ่นดินไหวแกน Z เท่ากับ 223.55 มม. จะได้แกนวิกฤตของโครงสร้างคือแกน X ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์โครงสร้างเฉพาะแกนวิกฤต X ร่วมกับคลื่นแผ่นดินไหวอีก 4 คลื่น



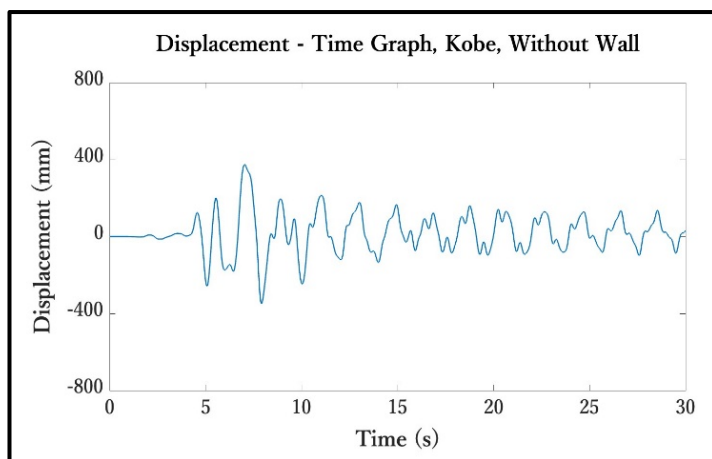
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูปเปรียบเทียบแกน X และ Z ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro กรณีไม่มีผนัง



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain (%) และเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูปเปรียบเทียบแกน X และ Z ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro กรณีไม่มีผนัง

## คลื่นแผ่นดินไหว Kobe

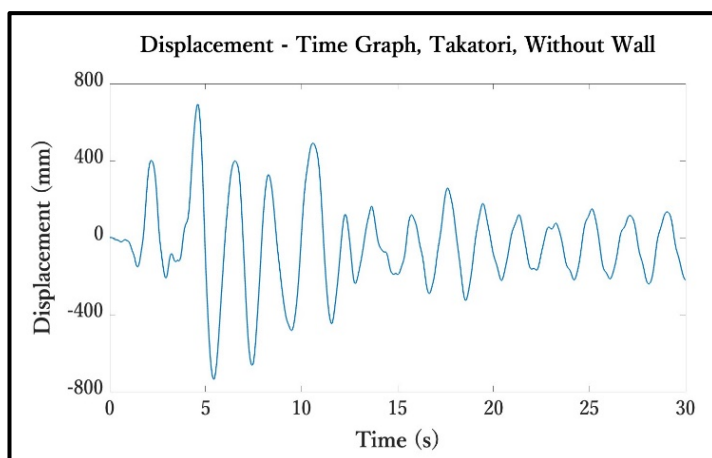
การกระจัดสูงสุดของอาคารสำเร็จรูปกรณีไม่มีผนัง เท่ากับ 374.13 มม.



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kobe กรณีไม่มีผนัง

## คลื่นแผ่นดินไหว Takatori

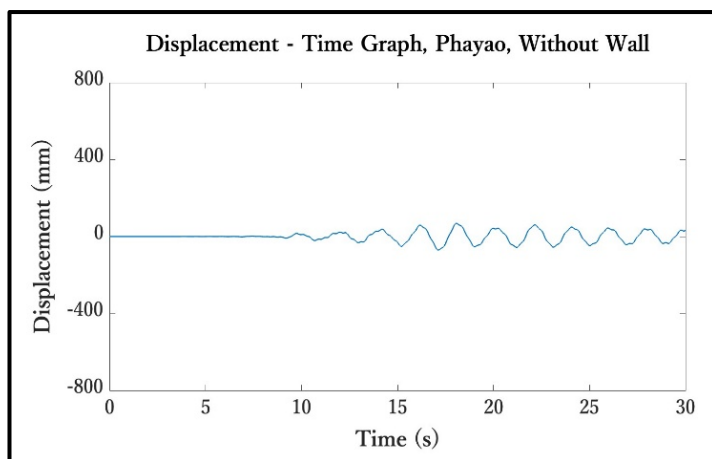
การกระจัดสูงสุดของอาคารสำเร็จรูปกรณีไม่มีผนัง เท่ากับ 736.45 มม.



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Takatori กรณีไม่มีผนัง

### คลื่นแผ่นดินไหวพะเยา

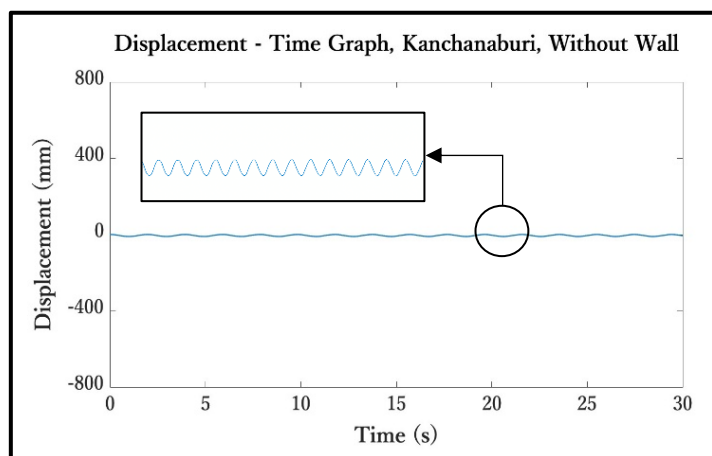
การกระจัดสูงสุดของอาคารสำเร็จรูปกรณีไม่มีผนัง เท่ากับ 70.25 มม.



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวพะเยา กรณีไม่มีผนัง

### คลื่นแผ่นดินไหวกาญจนบุรี

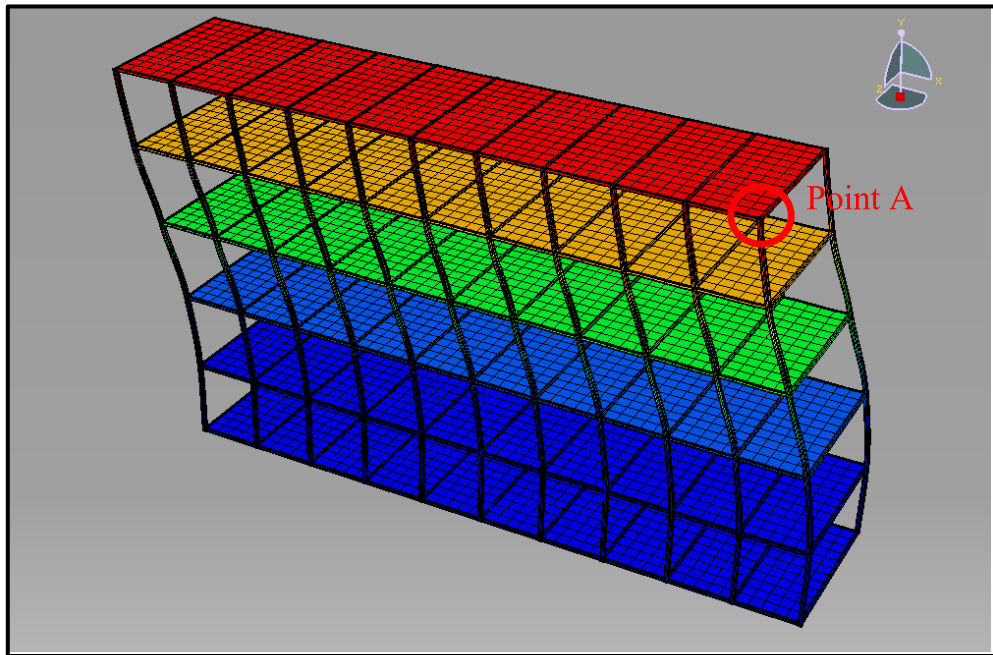
การกระจัดสูงสุดของอาคารสำเร็จรูปกรณีไม่มีผนัง เท่ากับ 10.30 มม.



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวกาญจนบุรี กรณีไม่มีผนัง

#### 4.3.1.2 วิเคราะห์แบบจำลองอาคารกรณีมีผนัง

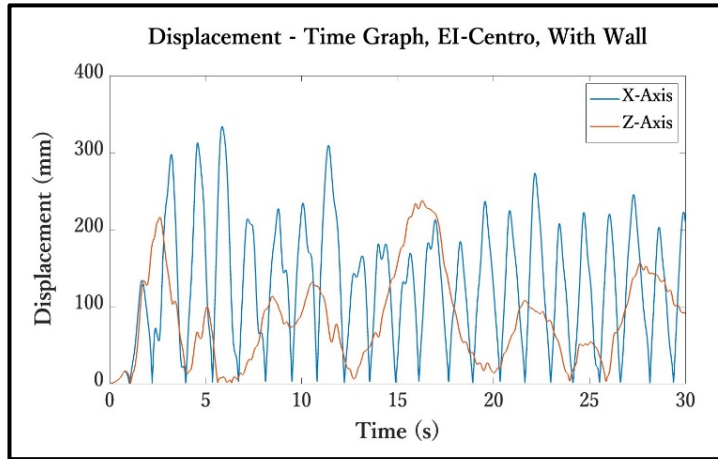
ตำแหน่งที่นำมาพิจารณาค่าการกระจัดของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูปกรณีมีผนัง คือ ตำแหน่งบนสุดหรือชั้นที่ 5 ของแบบจำลองอาคาร ซึ่งมีค่าการกระจัดมากที่สุด ดังรูปที่ 4.10 และเมื่อวิเคราะห์แบบจำลองอาคารร่วมกับคลื่นแผ่นดินไหวคลื่นตัวอย่างได้ผลการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 4.11-4.16 และตารางที่ 4.3



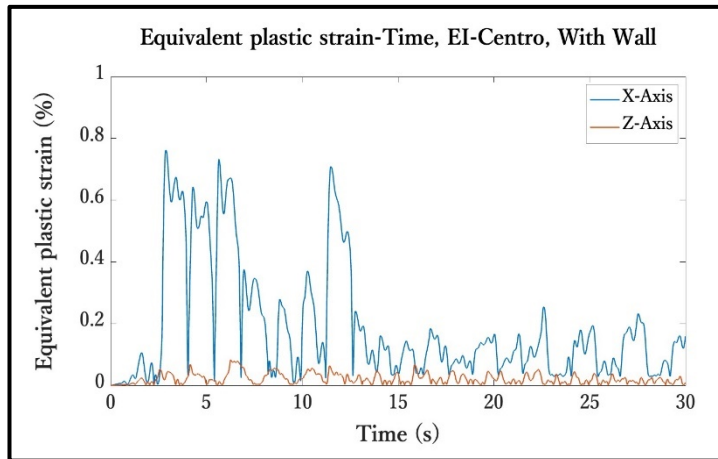
รูปที่ 4.10 ตำแหน่งที่มีค่าการกระจัดมากที่สุดของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูปกรณีมีผนัง

#### คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro

จากการวิเคราะห์หาแกนวิกฤตของโครงสร้างโดยวิเคราะห์ร่วมกับคลื่นแผ่นดินไหว El-Centro 2 กรณี ได้แก่ คลื่นแผ่นดินไหวแกน X และคลื่นแผ่นดินไหวแกน Z ซึ่งการกระจัดสูงสุดของอาคารสำเร็จรูปโครงสร้างเหล็กกรณีมีผนัง คลื่นแผ่นดินไหวแกน X เท่ากับ 334.04 มม. และคลื่นแผ่นดินไหวแกน Z เท่ากับ 279.60 มม. จะได้แกนวิกฤตของโครงสร้างคือแกน X ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์โครงสร้างเฉพาะแกนวิกฤต X ร่วมกับคลื่นแผ่นดินไหวอีก 4 คลื่น



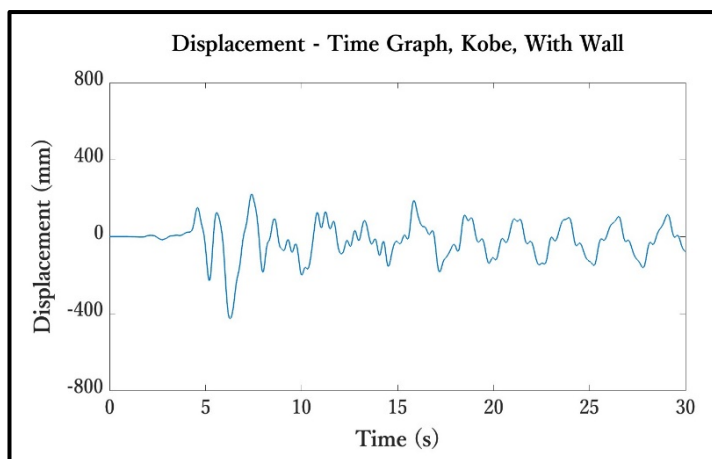
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป  
เปรียบเทียบแกน X และ Z ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro กรณีมีผนัง



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain (%) และเวลาของ  
แบบจำลองอาคารสำเร็จรูป เปรียบเทียบแกน X และ Z ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว  
El-Centro กรณีมีผนัง

## คลื่นแผ่นดินไหว Kobe

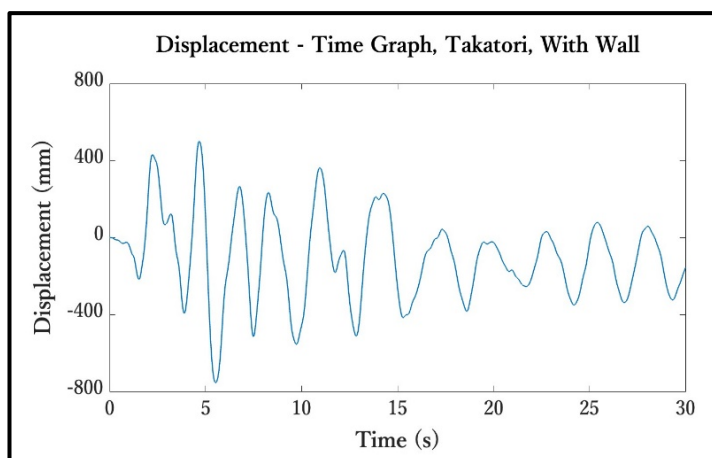
การกระจัดสูงสุดของอาคารสำเร็จรูปกรณีมีผนัง เท่ากับ 426.47 มม.



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kobe กรณีมีผนัง

## คลื่นแผ่นดินไหว Takatori

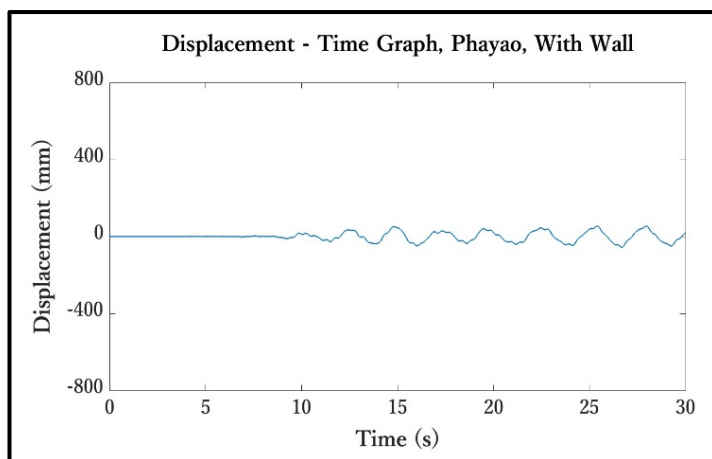
การกระจัดสูงสุดของอาคารสำเร็จรูปกรณีมีผนัง เท่ากับ 754.05 มม.



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Takatori กรณีมีผนัง

## คลื่นแผ่นดินไหวพะเยา

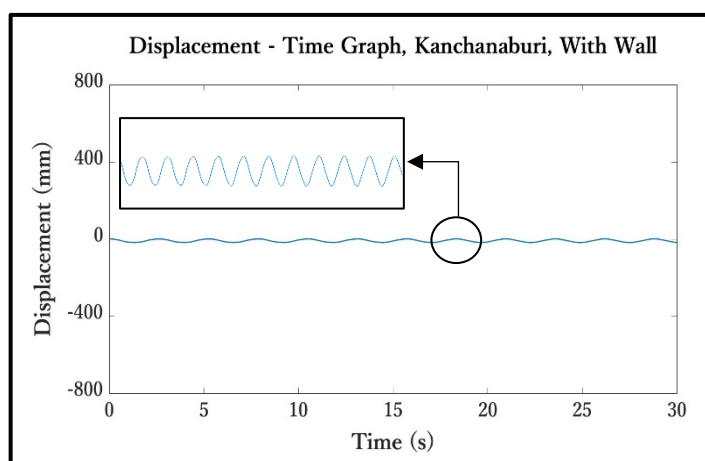
การกระจัดสูงสุดของอาคารสำเร็จรูปกรณีมีผนัง เท่ากับ 55.52 มม.



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวพะเยากรณีมีผนัง

## คลื่นแผ่นดินไหวกาญจนบุรี

การกระจัดสูงสุดของอาคารสำเร็จรูปกรณีมีผนัง เท่ากับ 18.60 มม.



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวกาญจนบุรีกรณีมีผนัง

**ตารางที่ 4.2** การกระจัดสูงสุดของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูปที่วิเคราะห์ร่วมกับคลื่นแผ่นดินไหว ตัวอย่าง และกรณีมีผนังกับไม่มีผนัง

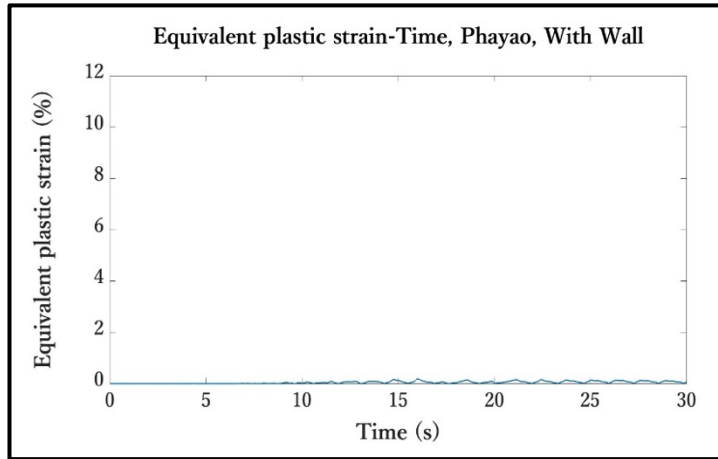
Displacement max (mm)		
Earthquake wave	5-storey prefabricated building without wall	5-storey prefabricated building with wall
El-centro	265.78	334.04
Kobe	374.13	426.47
Takatori	736.43	754.05
Phayao	70.25	55.52
Kanchanaburi	10.30	18.60

**4.3.2 วิเคราะห์โครงสร้างเฉพาะรอยต่อ**

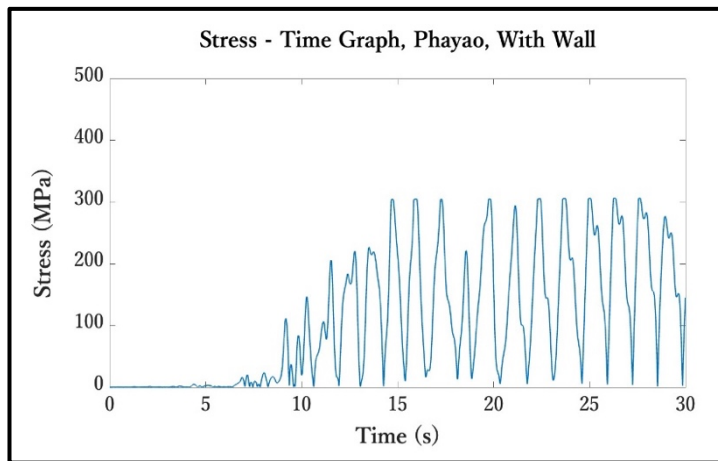
จากการพิจารณาเป็นตำแหน่งจุดข้อต่อวิกฤตของโครงสร้าง คือ บริเวณชั้นล่างสุดหรือชั้นที่ 1 ของแบบจำลองอาคาร ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเกิดความเค้นที่มากที่สุดของอาคาร แล้วตัดโครงสร้างเพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างเฉพาะรอยต่อด้วยขนาด Mesh ที่เหมาะสม คือ 7.5 x 7.5 มม. ร่วมกับคลื่นแผ่นดินไหว ได้ผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

**4.3.2.1 วิเคราะห์แบบจำลองอาคารเพื่อศึกษาพฤติกรรมแบบวิฆัจจกรของเหล็ก**

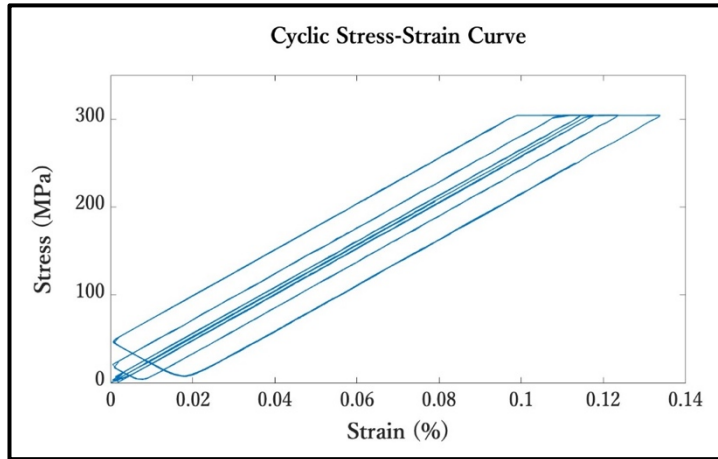
นำ Equivalent plastic strain และ Stress มาเขียนกราฟความสัมพันธ์โดยให้แกน X เป็น Stress และ แกน Y เป็น Equivalent plastic strain จะได้กราฟวิฆัจจกรความเค้น-ความเครียด ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain range (%) และเวลา  
ของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวพะเยา กรณีมีผนัง



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและเวลา  
ของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวพะเยา กรณีมีผนัง



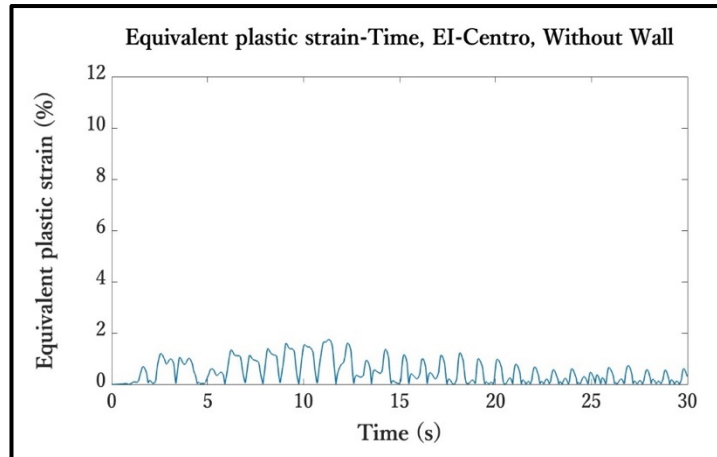
รูปที่ 4.19 กราฟวัฏจักรระหว่างความเค้นและความเครียดของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป

#### 4.3.2.2 วิเคราะห์แบบจำลองอาคารสำเร็จรูปร่วมกับคลื่นแผ่นดินไหวเพื่อศึกษาพฤติกรรมของเหล็กในรูปของการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก

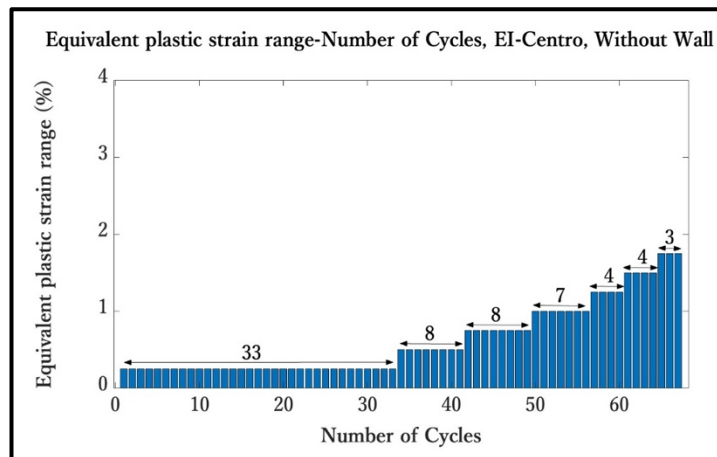
ค่า strain ที่ได้ทำการดึงมาจากโปรแกรมเป็นค่าที่ไม่ใช่ 3 มิติ ดังนั้นจึงต้องคำนวณ Equivalent plastic strain range โดยใช้นิยามของ Effective notch strain range เพื่อรวมค่า Strain ทั้ง 3 แกนเข้าด้วยกัน หลังจากนั้นนำค่าที่คำนวณได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับเวลา และ นำผลที่ได้แปลงเป็นกราฟแห่ง Equivalent plastic strain range - Number of Cycle ได้ดังต่อไปนี้

#### 4.3.2.2.1 วิเคราะห์แบบจำลองอาคารกรณีไม่มีผนัง

คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro

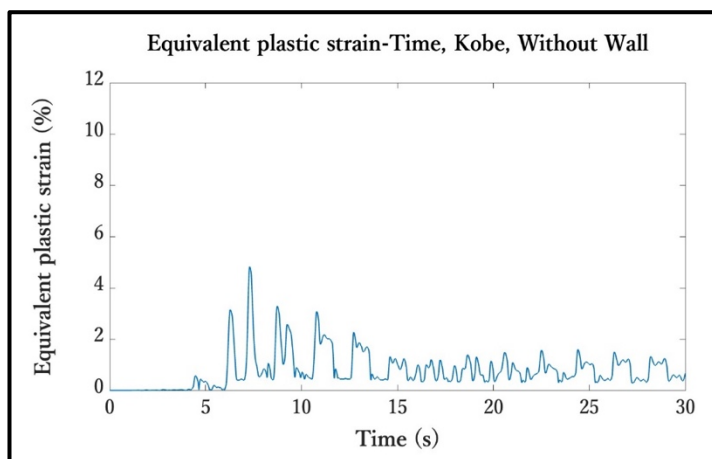


รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain (%) และเวลาของแบบจำลองอาคารรูปสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro กรณีไม่มีผนัง

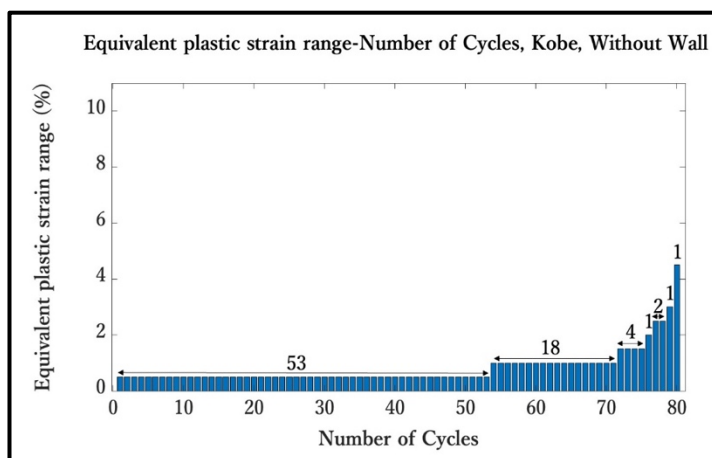


รูปที่ 4.21 กราฟแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain range (%) และจำนวนรอบของแบบจำลองอาคารรูปสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro กรณีไม่มีผนัง

## คลื่นแผ่นดินไหว Kobe

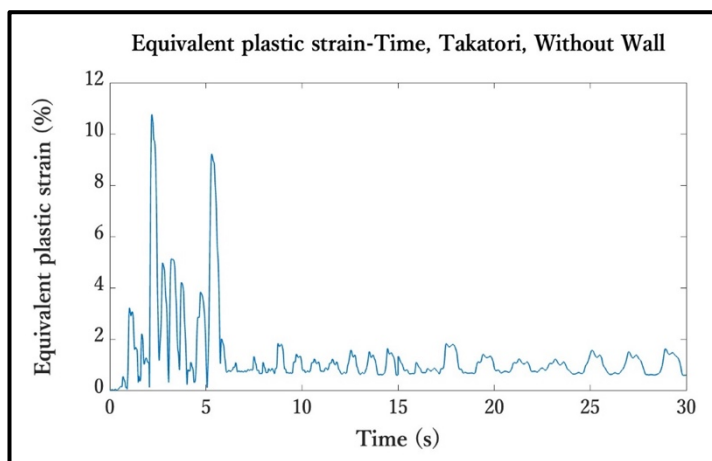


รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain (%) และเวลาของแบบจำลองอาคารรูปสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kobe กรณีไม่มีผนัง

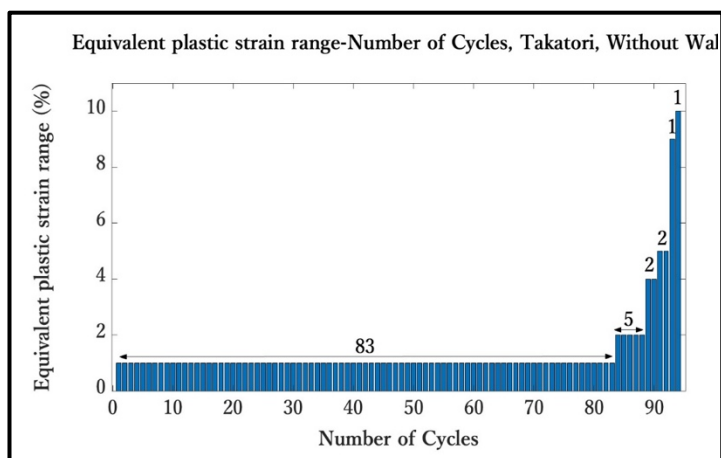


รูปที่ 4.23 กราฟแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain range (%) และจำนวนรอบของแบบจำลองอาคารรูปสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kobe กรณีไม่มีผนัง

## คลื่นแผ่นดินไหว Takatori

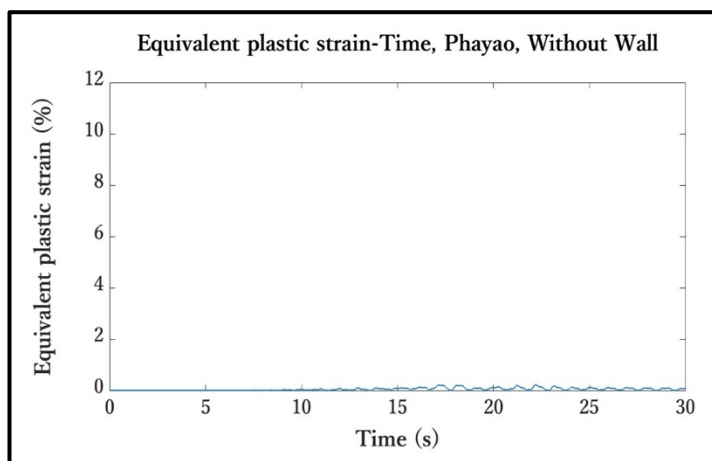


รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain (%) และเวลาของแบบจำลองอาคารอาคารรูปสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Takatori กรณีไม่มีผนัง

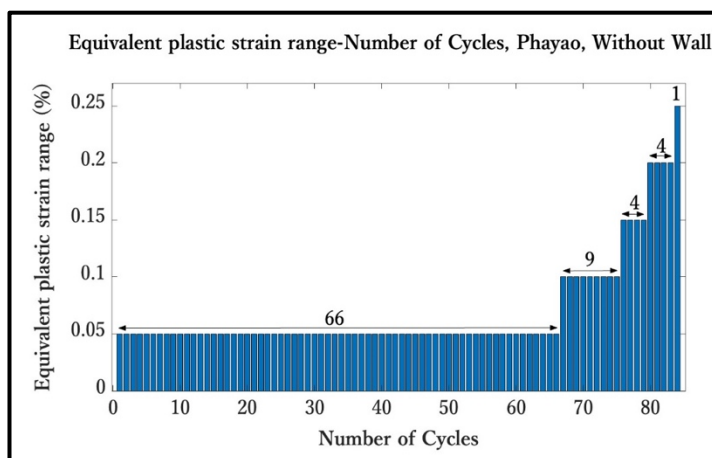


รูปที่ 4.25 กราฟแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain range (%) และจำนวนรอบของแบบจำลองอาคารรูปสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Takatori กรณีไม่มีผนัง

## คลื่นแผ่นดินไหวพะเยา

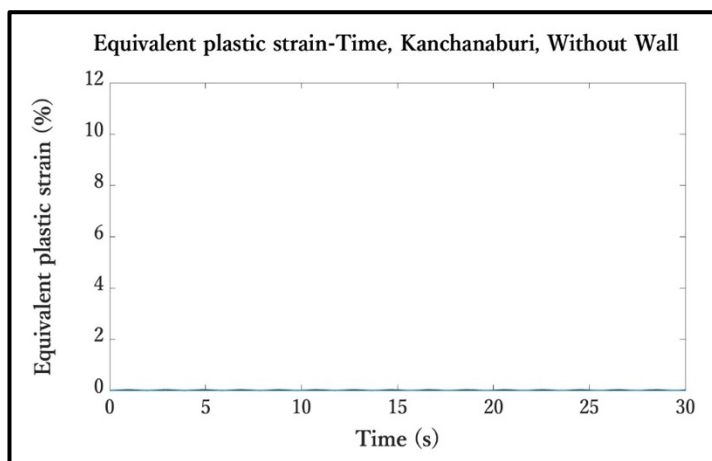


รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain (%) และเวลาของแบบจำลองอาคารรูปสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวพะเยา กรณีไม่มีผนัง

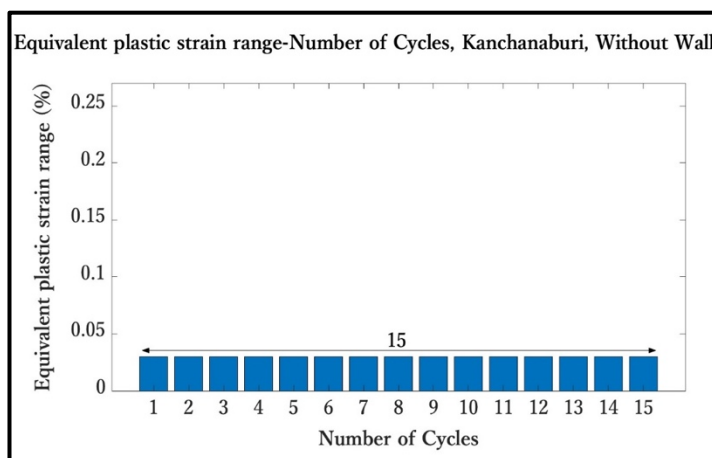


รูปที่ 4.27 กราฟแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain range (%) และจำนวนรอบของแบบจำลองอาคารรูปสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวพะเยากรณีไม่มีผนัง

## คลื่นแผ่นดินไหวกาญจนบุรี



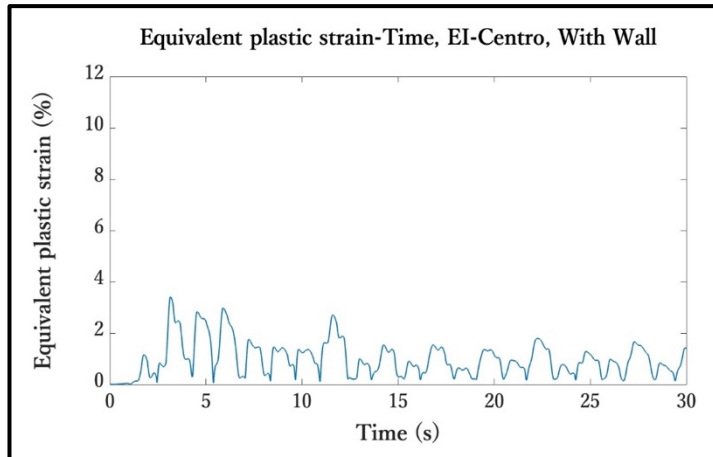
รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain (%) และเวลาของแบบจำลองอาคารรูปสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวกาญจนบุรีกรณีไม่มีผนัง



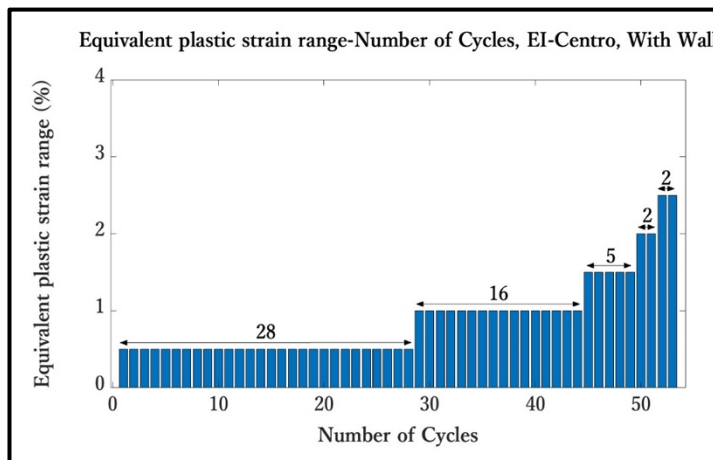
รูปที่ 4.29 กราฟแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain range (%) และจำนวนรอบของแบบจำลองอาคารรูปสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวกาญจนบุรี กรณีไม่มีผนัง

#### 4.3.2.2.2 วิเคราะห์แบบจำลองอาคารกรณีมีผนัง

คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro

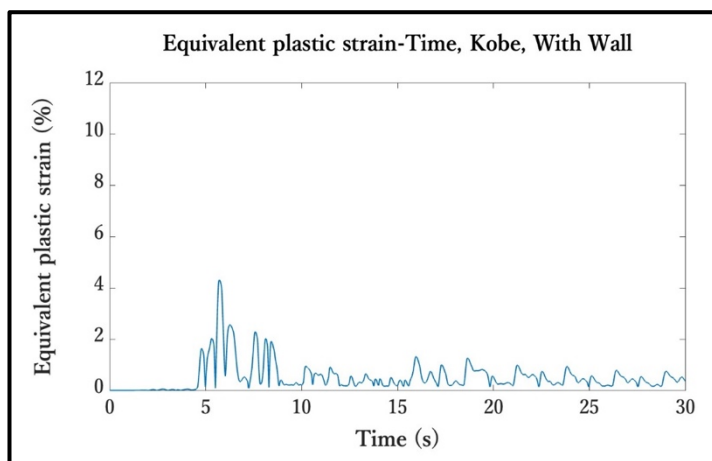


รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain (%) และเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro กรณีมีผนัง

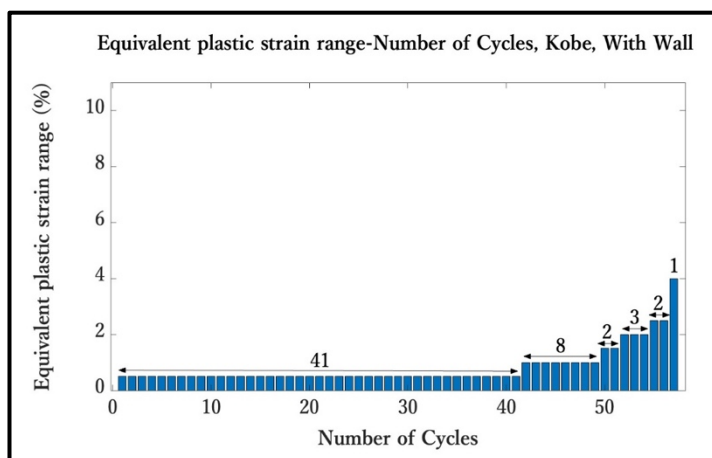


รูปที่ 4.31 กราฟแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain range (%) และจำนวนรอบของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว El-Centro กรณีมีผนัง

## คลื่นแผ่นดินไหว Kobe

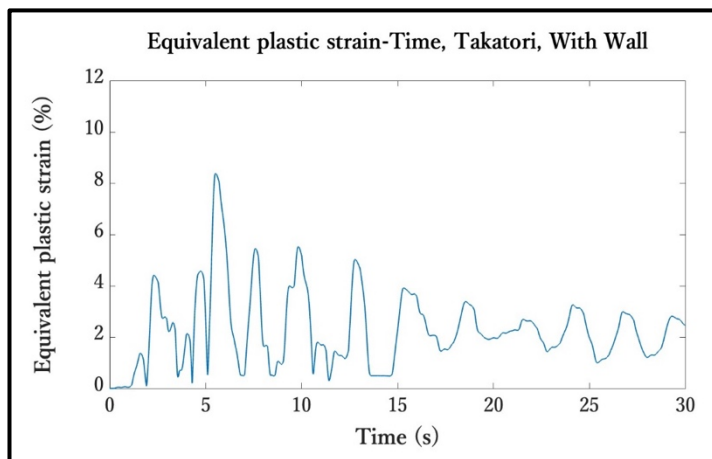


รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain (%) และเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kobe กรณีมีผนัง

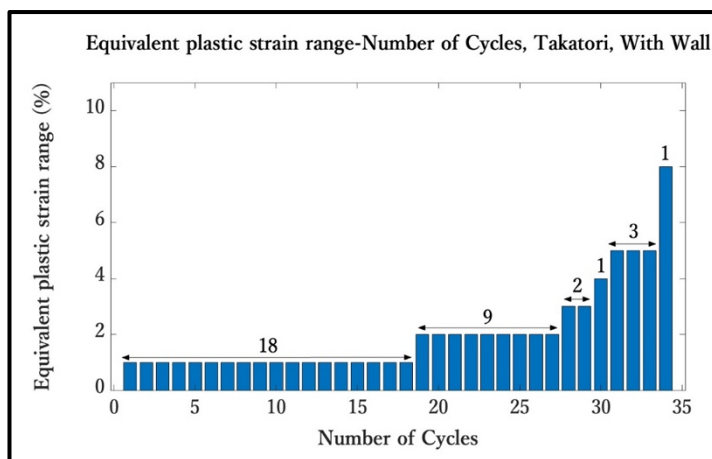


รูปที่ 4.33 กราฟแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain range (%) และจำนวนรอบของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Kobe กรณีมีผนัง

## คลื่นแผ่นดินไหว Takatori

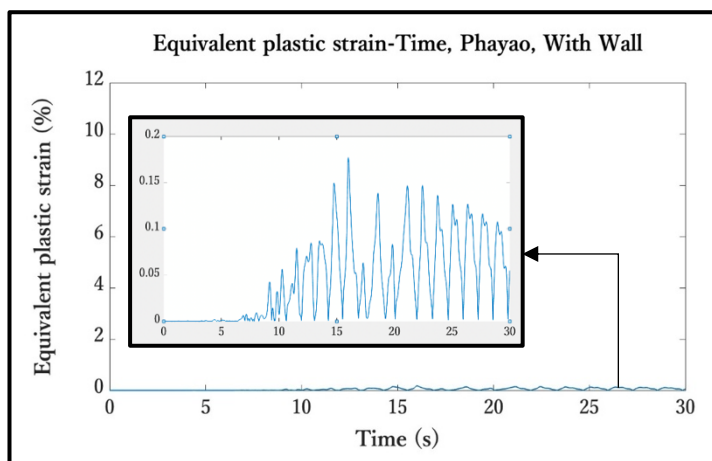


รูปที่ 4.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain range (%) และเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Takatori กรณีมีผนัง

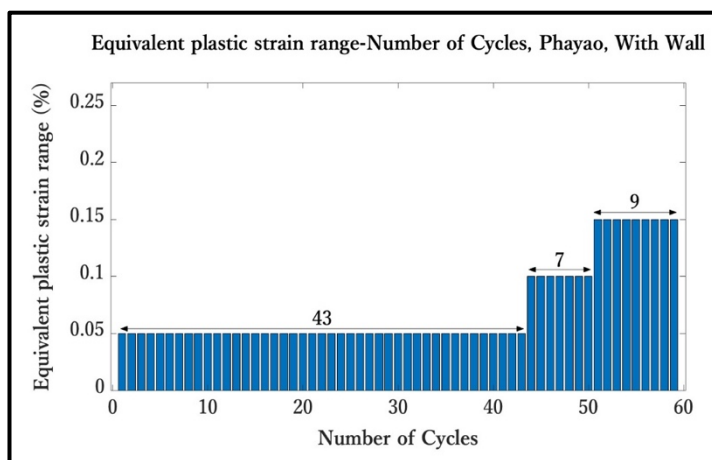


รูปที่ 4.35 กราฟแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain (%) และจำนวนรอบของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Takatori กรณีมีผนัง

## คลื่นแผ่นดินไหวพะเยา

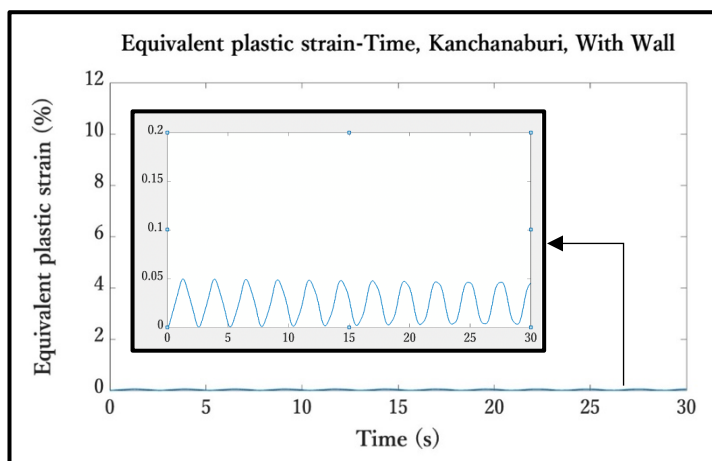


รูปที่ 4.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain range (%) และเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวพะเยา กรณีมีผนัง

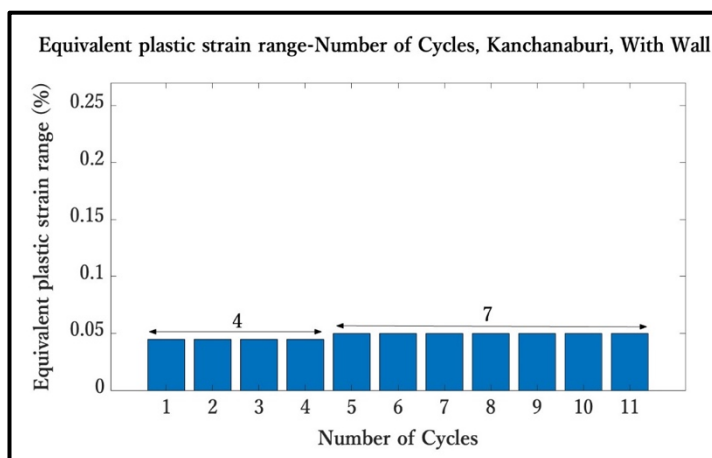


รูปที่ 4.37 กราฟแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain (%) และจำนวนรอบของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวพะเยา กรณีมีผนัง

## คลื่นแผ่นดินไหวกาญจนบุรี



รูปที่ 4.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain (%) และเวลาของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวกาญจนบุรี กรณีมีผนัง



รูปที่ 4.39 กราฟแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Equivalent plastic strain range (%) และจำนวนรอบของแบบจำลองอาคารสำเร็จรูป ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวกาญจนบุรี กรณีมีผนัง

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงาน

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมความเครียดเฉพาะจุดของอาคารสำเร็จรูปโครงสร้างเหล็ก 5 ชั้นภายใต้แรงแผ่นดินไหวโดยใช้แบบจำลองวัสดุแบบ Cyclic Hardening

เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ โดยมีลำดับหัวข้อการนำเสนอ ดังต่อไปนี้

- 5.1 สรุปผลการศึกษา
- 5.2 ข้อเสนอแนะการศึกษา

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษา การวิเคราะห์รอยต่ออาคารสำเร็จรูปภายใต้แรงแผ่นดินไหว เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมความเครียดเฉพาะจุดของอาคารสำเร็จรูปโครงสร้างเหล็ก 5 ชั้นภายใต้แรงแผ่นดินไหวโดยใช้แบบจำลองวัสดุแบบ Cyclic Hardening ได้ผลสรุปการศึกษาดังนี้

5.1.1 แบบจำลองอาคารสำเร็จรูปที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ สร้างด้วยองค์ประกอบแบบแผ่นบาง (Shell Element) และใช้แบบจำลองวัสดุแบบ Cyclic Hardening โดยใช้โปรแกรม Abaqus

5.1.2 ทำการวิเคราะห์แบบจำลองอาคารเชิงพลศาสตร์ร่วมกับคลื่นแผ่นดินไหวทั้งหมด 5 คลื่น เพื่อให้ได้พฤติกรรมความเค้นและความเครียดของโครงสร้างระดับ Global

5.1.3 วิเคราะห์เฉพาะจุดที่รอยต่อ โดยหารอยต่อวิกฤตจากพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของโครงสร้างระดับ Global จากนั้นตัดโครงสร้าง ทำการวิเคราะห์ Mesh Sensitivity หาขนาดการตัด Mesh ที่เหมาะสมเพื่อผลลัพธ์ที่ถูกต้องและแม่นยำ โดยขนาดการตัด Mesh ที่เหมาะสมคือ 7.5 x 7.5 mm. และทำการวิเคราะห์ในระดับ Local

5.1.4 พฤติกรรมความเครียดเฉพาะจุดของอาคารสำเร็จรูปโครงสร้างเหล็ก 5 ชั้นภายใต้แรงแผ่นดินไหวโดยใช้แบบจำลองวัสดุแบบ Cyclic Hardening ได้รับการตรวจสอบ

## 5.2 ข้อเสนอแนะการศึกษา

จากประสบการณ์ที่ได้เรียนรู้จากการทำงานวิจัยครั้งนี้ทำให้เราสามารถให้ข้อเสนอแนะ และแนวทางในการดำเนินการศึกษางานวิจัยในอนาคต ได้ดังนี้

5.2.1 ในส่วนขั้นตอนการใช้โปรแกรม ABAQUS การสร้างแบบจำลองอาคารที่มีการทำงานอย่างเป็นระบบจะสามารถช่วยลดความผิดพลาดของการสร้างแบบจำลองได้ ทำให้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

5.2.2 ในขั้นตอนการสร้างแบบจำลองส่วนของการตัด Mesh โดยการตัด Mesh ที่ละเอียดจะช่วยให้การวิเคราะห์อาคารได้ผลที่แม่นยำขึ้น ดังนั้นจึงควรตัด Mesh ให้ละเอียดยิ่งขึ้นและนำไปใช้ใน ระดับ Local

5.2.3 หากต้องการให้ผลการวิเคราะห์มีความละเอียดยิ่งขึ้น ควรสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์ ในระดับ Golden joint zoom in

## บรรณานุกรม

- [1] กรมทรัพยากรธรณี. (2565). สาเหตุของการเกิดแผ่นดินไหว. สืบค้นเมื่อ 15 ธันวาคม 2565, <https://www.dmr.go.th/สาเหตุที่ทำให้เกิดแผ่นดินไหว/>
- [2] กองเฝ้าระวังแผ่นดินไหวกรมอุตุนิยมวิทยา. (2565). สถิติข้อมูลแผ่นดินไหวที่มีผลกระทบต่อประเทศไทย. สืบค้นเมื่อ 15 ธันวาคม 2565, <https://earthquake.tmd.go.th/earthquakestat.html>
- [3] Gunawardena and Priyan Mendis. (2022) Prefabricated Building Systems. สืบค้นเมื่อ 15 ธันวาคม 2565, <https://www.mdpi.com/2673-8392/2/1/6>
- [4] วิกรม เหล่าวิสุทธิชัย และ บัณฑิต จุลาสัย. (2565) การก่อสร้างอาคารด้วยชิ้นส่วนสำเร็จรูป: การทบทวนวรรณกรรมในประเทศไทย. สืบค้นเมื่อ 15 ธันวาคม 2565, <https://so02.tci-thaijo.org>
- [5] ผศ.ดร. ณิชฐ์ดนัย สินสมุทรผดุง ร่วมกับ บริษัท CPAC. (2565) การพัฒนาต้นแบบรอยต่อโครงสร้างอาคารประกอบสำเร็จ ระยะที่ 1
- [6] ไพบุลย์ ปัญญาคะโป. (2546). การออกแบบของค้ำอาคารโดยใช้หลักการเสาค้ำแข็งแรงคานอ่อน. การออกแบบอาคาร Building Design (พิมพ์ครั้งที่ 2). (หน้า 193-200). สำนักพิมพ์รุ่งแสงการพิมพ์.
- [7] K.K.G.K. Danushka. (2015). Estimation of fatigue life of steel masts using Finite Element Modelling (master's thesis, University of Moratuwa). สืบค้นเมื่อ 15 ธันวาคม 2565, <http://dl.lib.uom.lk/handle/123/11659>

- [8] Kawin Saiprasertkit, Takeshi Hanji, and Chitoshi Miki. (2012). **Fatigue strength assessment of load-carrying cruciform joints with material mismatching in low- and high-cycle fatigue regions based on the effective notch concept**, International Journal of Fatigue 40, 120–128.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112311003446>
- [9] กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. (2561). **วิธีวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างแบบประวัติเวลาไม่เชิงเส้น**. มาตรฐานการออกแบบอาคารด้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (พิมพ์ครั้งที่ 1). (หน้า 84). บริษัท เอส.พี.เอ็ม. การพิมพ์ จำกัด.
- [10] ญัฐ ดวงรัตน์ประทีป, พิมพ์เดือน รังสิยากุล, ชาย รังสิยากุล และ กุลภพ สุทธิอาจ. (2560). **ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์** (บทความปริทัศน์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่). <https://www.dent.cmu.ac.th/cmdj/backend/web/uploads/ddd7daea68f4bc2117639110359376a6.pdf>

## ภาคผนวก

### การคำนวณ Equivalent plastic strain

การคำนวณ Equivalent plastic strain จากนิยาม Effective notch strain range ดังสมการ

$$\Delta \bar{\epsilon}_p = \frac{1}{3} \times \sqrt{2[(\Delta \epsilon_{p,x} - \Delta \epsilon_{p,y})^2 + (\Delta \epsilon_{p,y} - \Delta \epsilon_{p,z})^2 + (\Delta \epsilon_{p,z} - \Delta \epsilon_{p,x})^2] + \frac{3}{2}(\Delta \gamma_{p,xy}^2 + \Delta \gamma_{p,yz}^2 + \Delta \gamma_{p,zx}^2)}$$

$\Delta \bar{\epsilon}_p$  คือ The equivalent plastic strain range

$\Delta \epsilon$  คือ The normal plastic strain range

$\Delta \gamma_p$  คือ The shear plastic strain range

The subscripts x, y, and z are the x, y, and z directions

เมื่อดึงค่าจากโปรแกรม จะได้ค่า normal plastic strain range และ shear plastic strain range ในแต่ละทิศทาง (E11, E22, E33 และ E12 หรือ  $\Delta \epsilon_x$ ,  $\Delta \epsilon_y$ ,  $\Delta \epsilon_z$  และ  $\Delta \gamma_{xy}$ ) แต่ในที่นี้ค่า E33 หรือ  $\Delta \epsilon_z$  มีค่าเท่ากับ 0 เนื่องจากแบบจำลองชิ้นส่วนย่อยถูกเลือกให้เป็นแบบแผ่นบาง (Shell Element) ซึ่งจะไม่มีควมหนาของชิ้นส่วน

ตัวอย่างการคำนวณ

ข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม ดังตาราง

Time	E11	E12	E22	E33
5.85	0.0868	-0.0480	-0.0170	0
5.86	0.0862	-0.0475	-0.0169	0
5.87	0.0856	-0.0469	-0.0167	0

$$\begin{aligned} \Delta \bar{\epsilon}_p &= \frac{1}{3} \sqrt{2[(0.0868 - (-0.0170))^2 + (-0.0170 - 0)^2 + (0 - 0.0868)^2] + \frac{3}{2}(-0.0480)^2} \\ &= 0.070005 \times 100 = 7.0005 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \bar{\epsilon}_p &= \frac{1}{3} \sqrt{2[(0.0862 - (-0.0169))^2 + (-0.0169 - 0)^2 + (0 - 0.0862)^2] + \frac{3}{2}(-0.0475)^2} \\ &= 0.069490 \times 100 = 6.9490 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \bar{\epsilon}_p &= \frac{1}{3} \sqrt{2[(0.0856 - (-0.0167))^2 + (-0.0167 - 0)^2 + (0 - 0.0856)^2] + \frac{3}{2}(-0.0856)^2} \\ &= 0.068914 \times 100 = 6.8914 \end{aligned}$$

## ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล** นางสาวฉัตรสุมาลย์ วรรณสิงห์  
**วัน เดือน ปีเกิด** วันอังคาร ที่ 26 ธันวาคม 2543  
**ที่อยู่** บ้านเลขที่ 235 หมู่ 17 ตำบลห้วยโพธิ์ อำเภอเมือง  
จังหวัดกาฬสินธุ์ 46000
- ประวัติการศึกษา** พ.ศ. 2556 – 2562 โรงเรียนกาฬสินธุ์พิทยาสรรพ์ จังหวัดกาฬสินธุ์  
พ.ศ. 2562 – 2566 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
จังหวัดกรุงเทพมหานคร
- ชื่อ-นามสกุล** นางสาวรินทร์วรี ก้านจักร  
**วัน เดือน ปีเกิด** วันพฤหัสบดี ที่ 28 ธันวาคม 2543  
**ที่อยู่** บ้านเลขที่ 4/633 ซอย 26 หมู่บ้านสหกรณ์เคหสถาน 4 ถนนเสรีไทย  
แขวงคลองกุ่ม เขตบึงกุ่ม จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10240
- ประวัติการศึกษา** พ.ศ. 2556 – 2562 โรงเรียนสตรีวิทยา 2 จังหวัดกรุงเทพมหานคร  
พ.ศ. 2562 – 2566 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
จังหวัดกรุงเทพมหานคร
- ชื่อ-นามสกุล** นางสาววิลาสินี กัดสิงห์  
**วัน เดือน ปีเกิด** วันอังคาร ที่ 21 พฤศจิกายน 2543  
**ที่อยู่** บ้านเลขที่ 216 หมู่ที่ 8 ตำบลมะตอง อำเภอพรหมพิราม  
จังหวัดพิษณุโลก 65180
- ประวัติการศึกษา** พ.ศ. 2556 – 2562 โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา ภาคเหนือ จังหวัดพิษณุโลก  
พ.ศ. 2562 – 2566 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
จังหวัดกรุงเทพมหานคร