

ผลของการใช้แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงเสาเข็มในการประเมิน  
อาคารต้านแผ่นดินไหว



ณัฐนันท์ ท้าวพินวงศ์

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

พฤษภาคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

ผลของการใช้แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงเสาเข็มในการประเมินอาคารต้าน  
แผ่นดินไหว



ณัฐชนันท์ ท้าวพັນวงศ์

วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

พฤษภาคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

THE EFFECT OF USING THE BUILDING STRUCTURAL MODEL CONSIDERING PILE  
FOUNDATIONS IN SEISMIC ASSESSMENT



NATNATEE TAWPANWONG

A Thesis Submitted to University of Phayao  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Master of Engineering Degree in Civil Engineering  
May 2023

Copyright 2023 by University of Phayao

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของการใช้แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงเสาค้ำในการประเมินอาคารต้าน  
แผ่นดินไหว

ของ ธีรพันธุ์ ท้าวพินวงศ์

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร. ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร. ปรีดา ไชยมหาวัน)

..... อาจารย์บัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยพะเยา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมบูรณ์ เชื้อเงิน)

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธีรพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ)

- เรื่อง:** ผลของการใช้แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำเนื่องถึงเสาเข็มในการประเมินอาคารต้านแผ่นดินไหว
- ผู้วิจัย:** ณัฐณี ท้าวพันวงศ์, วิทยานิพนธ์: วศ.ม. (วิศวกรรมโยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2565
- อาจารย์ที่ปรึกษา:** รองศาสตราจารย์ ดร. ปรีดา ไชยมหาวัน
- คำสำคัญ:** การประเมินอาคารต้านแผ่นดินไหว, การวิเคราะห์โดยวิธีการผลัก, สถิติศาสตร์ไม่เชิงเส้น, ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้าง, การออกแบบอาคารต้านแผ่นดินไหว, แบบจำลองอาคารด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการศึกษาเปรียบเทียบผลการประเมิน และผลตอบสนองของโครงสร้างอาคารต้านแผ่นดินไหว ระหว่างแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำเนื่องถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม และแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่ค้ำเนื่องถึงเสาเข็ม โดยใช้สเปกตรัมผลตอบสนองแผ่นดินไหวในพื้นที่จังหวัดพะเยา และสเปกตรัมผลตอบสนองแผ่นดินไหวพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพฯ จึงทำให้มี 2 แบบจำลองด้วยกัน โดยในการศึกษานี้ได้เลือกอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 ชั้น ซึ่งเป็นอาคารพานิชย์ตามแบบของกรมโยธาธิการและผังเมือง โดยโครงสร้างอาคารที่มีฐานรากเสาเข็มได้ใช้สปริงเพื่อแทนผลของดินที่อยู่ด้านข้างเสาเข็มในระดับความลึกต่างๆ จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่มีฐานรากเสาเข็มมีสัดส่วนและรูปแบบการสั่นไหวที่แตกต่างจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่มีเสาเข็ม และทำให้คาบธรรมชาติในโหมดพื้นฐานเพิ่มขึ้น แบบจำลองที่มีเสาเข็มมีค่าสติเฟนสการต้านแรงด้านข้างตามแนวแกน Y ลดลง มีค่าแรงต้านสูงสุดของอาคารเพิ่มขึ้น และถูกประเมินด้วยแรงแผ่นดินไหวที่ลดลงจึงทำให้ได้ค่าระดับความเสียหายที่ลดลงด้วย ผู้วิจัยได้ทดลองทำแบบจำลองอาคารที่มีเสาเข็มพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพฯ และเปลี่ยนความยาวของเสาเข็มให้มีความยาวแตกต่างกัน พบว่าการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีฐานรากเสาเข็ม และอยู่ในพื้นที่ที่ดินอ่อน จะช่วยลดแรงแผ่นดินไหวที่ใช้ประเมิน แต่โครงสร้างอาคารจะมีการเสียรูปอาคารมากขึ้น ดังนั้นการจำลองโครงสร้างอาคารจำเป็นต้องพิจารณาพื้นที่ที่ตั้ง และความยาวของโครงสร้างฐานรากเสาเข็มเพื่อให้การประเมินสมรรถนะของโครงสร้างอาคารได้อย่างเหมาะสม

**Title:** THE EFFECT OF USING THE BUILDING STRUCTURAL MODEL CONSIDERING PILE FOUNDATIONS IN SEISMIC ASSESSMENT

**Author:** Natnatee Tawpanwong, Thesis: M.Eng. (Civil Engineering), University of Phayao, 2022

**Advisor:** Associate Professor Dr. Preeda Chaimahawan

**Keywords:** Seismic Evaluation, Push Over Analysis, Non-linear Static, Soil-Structure Interaction, Seismic building design, Computer modeling of building

#### ABSTRACT

This research presents a comparative study of the evaluation results and responses of the building between model building considering pile foundation and model building considering without pile foundation under seismic load using Phayao Province spectrum and using Bangkok spectrum. So, there are 2 models. In this study was selected commercial building 4 story reinforced concrete of the Department of Public Works and Town & Country Planning. The foundation model is constructed with frame element and spring represented pile embedded in soil under lateral load of the piles at different depths. Base on the study, it reveals that, the building model with pile has difference mode shapes and higher natural frequency in fundamental mode shape and model participation ratio compared with the building model without pile. Models with piles had lower Y-axis stiffness values for lateral forces, increased building maximum resistance values and were assessed with reduced seismic loads, resulting in a reduced level of damage. The researcher make a model of a building with piles in the Bangkok and with changing the length of the piles to be of different lengths. It was found that the analysis of structures with pile foundations and located in soft soil area would reduce the seismic force used to assess. But the building structure will have more building deformation. The building model should consider sub structure, especially in case consider location area and length of the pile foundation, to evaluate the seismic performance of the building properly.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยทางวิศวกรรมโยธา เรื่อง “ผลของการใช้แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงเสาเข็มในการประเมินอาคารต้านแผ่นดินไหว” เล่มนี้ไม่อาจสำเร็จล่วงได้หากปราศจากบุคคลหลายท่านและหลายหน่วยงาน รศ.ดร.ปรีดา ไชยมหาวัน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้มอบความรู้ด้านงานวิจัย ช่วยแก้ไข และให้โอกาสในการทำงานวิจัยเล่มนี้ในทางที่ดีเสมอมา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ได้สนับสนุนทุนการดำเนินงานวิจัย รวมถึง พี่ ๆ น้อง ๆ เพื่อน ๆ ทุกคนในคณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่คอยช่วยเหลือกันมาตลอด สุดท้ายขอขอบคุณคุณพ่อ คุณแม่ พี่สาว และครอบครัวที่เป็นแรงผลักดันและเป็นกำลังใจให้เสมอ จนกระทั่งการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สำเร็จล่วงไปได้ด้วยดี

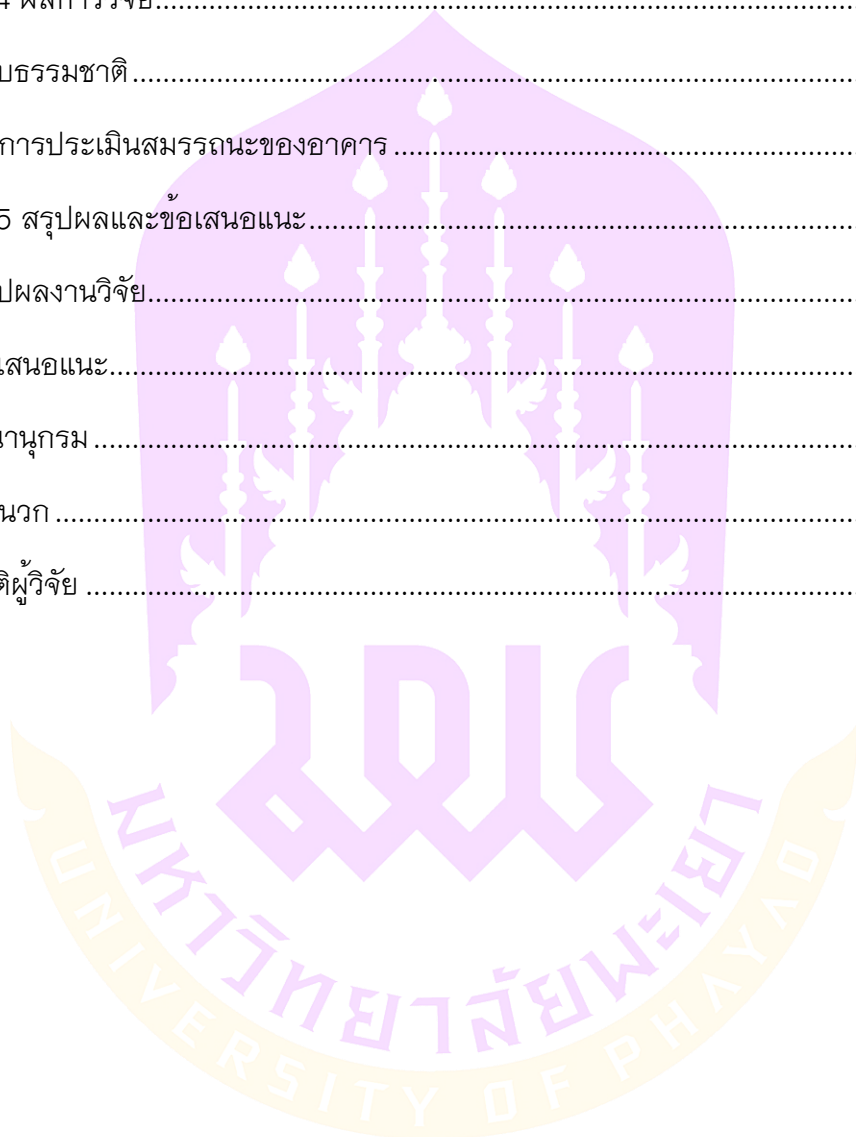
ณัฐนที ท้าวพันวงศ์



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์.....	2
ขอบเขตงาน.....	2
แนวทางการดำเนินงาน .....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
แผ่นดินไหวในประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียง .....	5
ข้อมูลแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียง.....	9
มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยพ.1302-52) .	15
มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยพ.1301/1302-61) .....	16
มาตรฐานการการประเมิน และการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยพ.1303-57) .....	31
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	42

บทที่ 3 วิธีการทดสอบ .....	52
แบบจำลองที่ใช้ศึกษา.....	52
การสร้างแบบจำลอง.....	57
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	72
คาบธรรมชาติดี.....	72
ผลการประเมินสมรรถนะของอาคาร .....	74
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	107
สรุปผลงานวิจัย.....	107
ข้อเสนอแนะ.....	109
บรรณานุกรม .....	110
ภาคผนวก.....	113
ประวัติผู้วิจัย .....	127



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แผนการดำเนินงาน .....	4
ตาราง 2 แสดงรายละเอียดบริเวณแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียง .....	11
ตาราง 3 แสดงรายละเอียดของแนวรอยเลื่อนมีพลัง (Active faults) ในประเทศไทย .....	14
ตาราง 4 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดินที่ ณ ที่ตั้งอาคาร $F_a$ .....	18
ตาราง 5 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดินที่ ณ ที่ตั้งอาคาร $F_v$ .....	19
ตาราง 6 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับพื้นที่ในโซนต่าง ๆ (อัตราส่วนความหน่วง 2.5%) ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ .....	27
ตาราง 7 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ ด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับพื้นที่ในโซนต่าง ๆ (อัตราส่วนความหน่วง 5.0%) ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ .....	27
ตาราง 8 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ ด้วยวิธีพลศาสตร์สำหรับ พื้นที่ในโซนต่าง ๆ (อัตราส่วนความหน่วง 2.5%) ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ .....	30
ตาราง 9 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ ด้วยวิธีพลศาสตร์สำหรับ พื้นที่ในโซนต่าง ๆ (อัตราส่วนความหน่วง 5.0%) ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ .....	30
ตาราง 10 การจำกัดความเสียหาย และระดับสมรรถนะของอาคาร .....	33
ตาราง 11 ระดับสมรรถนะของโครงสร้าง และความเสียหาย .....	35
ตาราง 12 ความเกร็งประสิทธิผล .....	41
ตาราง 13 ค่า $n_h$ ที่แนะนำโดย Davisson (1970) .....	47
ตาราง 14 ค่า $n_h$ ที่แนะนำสำหรับดินทรายโดย Prakash and Sharma (1990) .....	47
ตาราง 15 ความสัมพันธ์ระหว่าง SPT-N กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดิน .....	48
ตาราง 16 ค่าตัวคูณลดกำลังสำหรับเสาเข็มกลุ่มในชั้นดินเหนียว Prakash and Sharma (1990) .....	49

ตาราง 17 ค่าตัวคุณลดกำลังสำหรับเสาเข็มกลุ่มในชั้นดินทราย Prakash and Sharma (1990)	49
ตาราง 18 แบบจำลองที่ใช้ในศึกษา.....	52
ตาราง 19 รายงานผลการเจาะสำรวจดินในสนาม ณ โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยพะเยา .....	63
ตาราง 20 รายงานผลการเจาะสำรวจดินในสนาม โครงปรับปรุงหอประชุมพญาไท กรมสามัญศึกษา เขตพญาไท กรุงเทพฯ .....	64
ตาราง 21 แสดงสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการประเมิน และออกแบบ สำหรับอำเภอเมืองจังหวัดพะเยา .....	66
ตาราง 22 แสดงสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการประเมิน และออกแบบ สำหรับพื้นที่แ่งกรุงเทพฯ โซน 5.....	68
ตาราง 23 คาบธรรมชาติที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้าง (1).....	72
ตาราง 24 คาบธรรมชาติที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้าง (2) .....	73
ตาราง 25 เปรียบเทียบความเร่ง ณ จุดสมรรถนะของแบบจำลอง.....	80
ตาราง 26 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นกับเสาเข็ม .....	106
ตาราง 27 เปรียบเทียบผลของแบบจำลอง.....	108



## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพ 1 กราฟแสดงจำนวนของเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียงในช่วงปี ค.ศ. 1998–2021 .....	7
ภาพ 2 กราฟแสดงขนาดของเหตุการณ์แผ่นดินไหว (วงกลมสีเขียว) ที่เกิดขึ้นในประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียง ในปี ค.ศ. 1998–2021 .....	8
ภาพ 3 แผนที่แสดงเหตุการณ์แผ่นดินไหว (วงกลมสีเขียว) ที่เกิดขึ้นในประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียงในช่วงปี ค.ศ. 1998–2021.....	9
ภาพ 4 แผนที่แสดงแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว (seismic source zones) ในประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียง(A–M)และแนวรอยเลื่อนมีพลัง(active faults)(เส้นสีแดง) .....	10
ภาพ 5 แผนที่แสดงแนวรอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย (เส้นสีแดง) ที่ถูกพบในปัจจุบัน รวมถึงแนวรอยต่ออนาน–อุตรดิตถ์ ที่แบ่งระหว่างแผ่นอินโดจีนและแผ่นฉานไทย (เส้นประสีดำ) ....	13
ภาพ 6 ภาพถ่ายดาวเทียม LANDSAT แสดงร่องรอยการเลื่อนตัว (surface rupture) (เส้นสีแดง) ของแนวรอยเลื่อนแม่ทา (สามเหลี่ยมสีเหลือง) ในบริเวณ จ.เชียงใหม่ ใกล้กับสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวของกรมอุตุนิยมวิทยา (สามเหลี่ยมสีน้ำเงิน) .....	14
ภาพ 7 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าสำหรับพื้นที่ทั่วประเทศ (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} \leq S_{DS}$ .....	20
ภาพ 8 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับพื้นที่ทั่วประเทศ (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} > S_{DS}$ .....	21
ภาพ 9 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์สำหรับพื้นที่ทั่วประเทศ (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} \leq S_{DS}$ .....	21
ภาพ 10 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์สำหรับพื้นที่ทั่วประเทศ (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า $S_{D1} > S_{DS}$ .....	22
ภาพ 11 การแบ่งโซนพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพฯ เพื่อการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว.....	23
ภาพ 12 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าสำหรับโซน 1–6 ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ .....	25

ภาพ 13 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับโซน 7-10 ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ .....	26
ภาพ 14 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์สำหรับ โซน 1-2 ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ.....	28
ภาพ 15 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิง พลศาสตร์สำหรับ โซน 3-10 ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ .....	29
ภาพ 16 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการประเมิน และออกแบบเสริมกำลัง.....	38
ภาพ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรง และการเสียรูปแบบทั่วไป .....	42
ภาพ 18 แบบจำลองโครงสร้าง 2 มิติสำหรับการออกแบบ .....	43
ภาพ 19 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม LAC3D .....	44
ภาพ 20 แบบจำลองที่คำนึงถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างดิน ฐานราก และโครงสร้าง .....	45
ภาพ 21 แบบจำลอง FEM ที่ประยุกต์ใช้ GRCS ใต้ฐานเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว.....	46
ภาพ 22 ค่าคงที่สำหรับต้านทานแรงกดแนวราบ .....	48
ภาพ 23 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับอำเภอเมือง จังหวัดพะเยา จากข้อมูลเจาะสำรวจดิน ที่ 35 หลุม.....	50
ภาพ 24 สมรรถนะอาคารในชั้นดินประเภทต่าง ๆ .....	51
ภาพ 25 ตี๊กแถวอนุรักษ์ ภาคเหนือ 4 ชั้น .....	53
ภาพ 26 แปลนเสาตอม่อ และฐานราก .....	53
ภาพ 27 แปลนเสา คาน พื้น ชั้นที่ 1 .....	54
ภาพ 28 แปลนเสา คาน พื้น ชั้นลอย .....	54
ภาพ 29 แปลนเสา คาน พื้น ชั้นที่ 2.....	55
ภาพ 30 แปลนเสา คาน พื้น ชั้นที่ 3 .....	55
ภาพ 31 แปลนเสา คาน พื้น ชั้นที่ 4 .....	56
ภาพ 32 แปลนคานหลังคา .....	56
ภาพ 33 แบบจำลองที่กำหนดเหล็กเสริม และขนาดหน้าตัดเสาแล้ว .....	57

ภาพ 34 แบบจำลองแสดงค่าน้ำหนักบรรทุก SDL.....	58
ภาพ 35 แบบจำลองแสดงค่าน้ำหนักบรรทุก Live load.....	58
ภาพ 36 แบบจำลองแสดงค่าน้ำหนักบรรทุก BW load.....	59
ภาพ 37 กำหนดคุณสมบัติของจุดหมุนของเสา.....	60
ภาพ 38 กำหนดคุณสมบัติของจุดหมุนของคาน.....	60
ภาพ 39 แบบจำลองแสดงจุดหมุนของเสา และคาน.....	61
ภาพ 40 กำหนดความแข็งแกร่งประสิทธิภาพของคาน.....	62
ภาพ 41 กำหนดความแข็งแกร่งประสิทธิภาพของเสา.....	62
ภาพ 42 กราฟสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการประเมิน และออกแบบที่อยู่ในพื้นที่จังหวัด พะเยา.....	67
ภาพ 43 กราฟสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการประเมิน ที่อยู่ในรูปแบบของความเร่ง ( $S_d$ ) และการเคลื่อนที่เชิงสเปกตรัม ( $S_a$ ) ในพื้นที่จังหวัดพะเยา.....	67
ภาพ 44 กราฟสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการประเมิน และออกแบบที่อยู่ในพื้นที่พื้นที่แ่ง กรุงเทพฯ โซน 5.....	68
ภาพ 45 กราฟสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการประเมิน ที่อยู่ในรูปแบบของความเร่ง ( $S_d$ ) และการเคลื่อนที่เชิงสเปกตรัม ( $S_a$ ) ในพื้นที่แ่งกรุงเทพฯ โซน 5.....	69
ภาพ 46 แบบจำลองที่ค้ำถึงเสาเข็ม และกำหนดค่าสตีเฟนเนสของสปริง (K) ในเสาเข็ม ของ แบบจำลองที่อยู่ในพื้นที่จังหวัดพะเยา เสาเข็มยาว 6.00 เมตร.....	69
ภาพ 47 แบบจำลองที่ค้ำถึงเสาเข็ม และกำหนดค่าสตีเฟนเนสของสปริง (K) ในเสาเข็ม ของ แบบจำลองที่อยู่ในพื้นที่จังหวัดพะเยา เสาเข็มยาว 9.00 เมตร.....	70
ภาพ 48 แบบจำลองที่ค้ำถึงเสาเข็ม และกำหนดค่าสตีเฟนเนสของสปริง (K) ในเสาเข็ม ของ แบบจำลองที่อยู่ในพื้นที่จังหวัดพะเยา เสาเข็มยาว 12.00 เมตร.....	70
ภาพ 49 แบบจำลองที่ค้ำถึงเสาเข็ม และกำหนดค่าสตีเฟนเนสของสปริง (K) ในเสาเข็ม ของ แบบจำลองที่อยู่ในพื้นที่แ่งกรุงเทพฯ.....	71
ภาพ 50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านกับการเคลื่อนที่ของยอดอาคารตาม แนวแกน x.....	75

ภาพ 51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านกับการเคลื่อนที่ของยอดอาคารตามแนวแกน $y$ .....	75
ภาพ 52 สมรรถนะอาคารตามแนวแกน $x$ .....	76
ภาพ 53 สมรรถนะอาคารตามแนวแกน $y$ .....	76
ภาพ 54 การเคลื่อนที่สูงสุดของแต่ละชั้นตามแนวแกน $x$ .....	77
ภาพ 55 การเคลื่อนที่สูงสุดของแต่ละชั้นตามแนวแกน $y$ .....	78
ภาพ 56 การเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างชั้นตามแนวแกน $x$ .....	78
ภาพ 57 การเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างชั้นตามแนวแกน $y$ .....	79
ภาพ 58 จุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม กรณีผลัดตามแกน $x$ .....	84
ภาพ 59 จุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม กรณีผลัดตามแกน $y$ .....	85
ภาพ 60 รูปแบบการวิบัติสุดท้ายของแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม กรณีผลัดตามแกน $x$ .....	86
ภาพ 61 รูปแบบการวิบัติสุดท้ายของแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม กรณีผลัดตามแกน $y$ .....	86
ภาพ 62 จุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มยาว 6.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน $x$ .....	87
ภาพ 63 จุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มยาว 6.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน $y$ .....	88
ภาพ 64 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่จุดสมรรถนะของเสาเข็มจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่มีเสาเข็มยาว 6.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน $x$ .....	88
ภาพ 65 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่จุดสมรรถนะของเสาเข็มจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่มีเสาเข็มยาว 6.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน $y$ .....	89
ภาพ 66 รูปแบบการวิบัติสุดท้ายของแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มยาว 6.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน $x$ .....	90





ภาพ 93 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่การวิบัติสุดท้ายของเสาเข็มจากแบบจำลองโครงสร้างอาคาร พื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ กรณีผลัดตามแกน y.....	105
ภาพ 94 แปลนพื้นที่ชั้นที่ 1.....	114
ภาพ 95 แปลนพื้นที่ชั้นลอย.....	114
ภาพ 96 แปลนพื้นที่ชั้นที่ 2.....	115
ภาพ 97 แปลนพื้นที่ชั้นที่ 3.....	115
ภาพ 98 แปลนพื้นที่ชั้นที่ 4.....	116
ภาพ 99 แปลนหลังคา.....	116
ภาพ 100 รูปด้าน 1.....	117
ภาพ 101 รูปด้าน 2.....	117
ภาพ 102 รูปด้าน 3.....	118
ภาพ 103 รูปด้าน 4.....	118
ภาพ 104 รูปตัด 1.....	119
ภาพ 105 รูปตัด 2.....	119
ภาพ 106 รายละเอียดการเสริมเหล็กเสา.....	120
ภาพ 107 รายละเอียดการเสริมเหล็กฐานราก.....	121
ภาพ 108 รายละเอียดการเสริมเหล็กคาน.....	122
ภาพ 109 รายละเอียดการเสริมเหล็กพื้น บันได.....	123
ภาพ 110 กำหนดคุณสมบัติวัสดุของคอนกรีต.....	124
ภาพ 111 กำหนดคุณสมบัติวัสดุของเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD30.....	124
ภาพ 112 กำหนดคุณสมบัติวัสดุของเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SR24.....	125
ภาพ 113 กำหนดชุดการรวมแรงในแนวตั้ง GRAV.....	125
ภาพ 114 กำหนดชุดการรวมแรงผลัด PUSHX.....	126
ภาพ 115 กำหนดชุดการรวมแรงผลัด PUSHY.....	126

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ภัยพิบัติแผ่นดินไหวเป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของพื้นดิน อันเนื่องมาจากการปลดปล่อยพลังงานที่สะสมไว้ภายในโลกออกมาอย่างฉับพลันเพื่อปรับสมดุลของเปลือกโลกให้คงที่ ในปัจจุบันจะเห็นได้ว่าประเทศไทยในบางพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหวโดยเฉพาะภาคเหนือ และภาคตะวันตก เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2557 เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 6.3 ริกเตอร์ ศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหว อยู่ที่ตำบลดงมะตะ อำเภอมะนัง จังหวัดเชียงราย ทรัพย์สิน สถานที่ราชการ โบราณสถาน ศาสนสถาน เส้นทางคมนาคม และอาคารต่าง ๆ เกิดความเสียหายเป็นอย่างมาก จากเหตุการณ์ดังกล่าวทำให้เกิดการตื่นตัวเพื่อเตรียมพร้อมรับมือแผ่นดินไหว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเมืองสำคัญที่มีประชาชนหนาแน่น มีแหล่งท่องเที่ยว และเศรษฐกิจของประเทศ การเตรียมรับมือนั้นมีหลายวิธี ซึ่งการประเมินอาคารต้านแผ่นดินไหว เป็นอีกหนึ่งวิธีที่จะทำให้รู้ความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารที่มีอยู่เดิม ทราบจุดอ่อนแอของอาคาร เพื่อที่จะสามารถซ่อมแซมหรือเสริมกำลังให้กับอาคารได้ ซึ่งปกติจะทำแบบจำลองเฉพาะโครงสร้างบนดิน (super structure) และให้ฐานรากเป็นแบบยึดแน่น (Fixed-base) ที่เสาคอม่อ โดยสมมติให้โครงสร้างที่อยู่ใต้ดิน (sub structure) ฐานราก และเสาเข็ม เคลื่อนตัวไปพร้อมกับดิน และทำการประเมินโครงสร้างด้วยแรงแผ่นดินไหว ไม่ว่าจะเป็นแรงแบบสถิต หรือแรงแบบพลศาสตร์ จากสเปกตรัมผลตอบสนอง สำหรับโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม นิยมแยกประเมินต่างหากเฉพาะด้วยแบบจำลองเสาเข็ม หรือแบบจำลองฐานราก

ซึ่งความจริงแล้วการแยกประเมินโครงสร้างเฉพาะโครงสร้างบนดินนั้น อาจไม่เป็นไปตามสมมุติฐานเสมอไป เนื่องจากฐานรากเสาเข็มอาจมีการเคลื่อนตัวที่ไม่พร้อมกันกับโครงสร้างดินเมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว จึงทำให้นักวิชาการประเมินอาคารต้านทานแผ่นดินไหวที่ใช้เฉพาะแบบจำลองโครงสร้างบนดินอย่างเดียว หรือการแยกโครงสร้างประเมินนั้นอาจไม่เพียงพอ ที่จะจำลองพฤติกรรมโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหวได้ด้วยแบบจำลองทั้งโครงสร้างที่อยู่บนดินและใต้ดิน หรืออาจเรียกแบบจำลองนี้ว่า “ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้าง” (Soil-Structure Interaction (SSI)) Bielak (1978) ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้าง โดยแสดงให้เห็นว่าผลจากการวิเคราะห์ด้วยปฏิสัมพันธ์ระหว่างดิน

และโครงสร้าง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่มากกว่าแบบจำลองให้ฐานรากเป็นแบบยึดแน่น จากการศึกษาของ Ghannad and Jahankhah (2007) ได้แสดงผลตอบสนองของโครงสร้างที่ใช้แบบจำลองฐานยึดแน่นนั้นมีค่าที่น้อยกว่า เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างให้รวมผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้างอาคาร Moghaddasi, et al. (2011) ได้ศึกษาสถิติของแบบจำลองที่รวมผลดินและโครงสร้างอาคารจากผลตอบสนองคลื่นแผ่นดินไหวกว่า 40 คลื่น และพบว่า ผลของปฏิสัมพันธ์ดินและโครงสร้างนั้นทำให้ผลตอบสนองในโครงสร้างมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณี และจากงานวิจัยของ Sae-Long, et al., (2020); Sae-Long, et al. (2021) ซึ่งใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ จำลองโครงคานเสาอาคาร และเชื่อมต่อกับโครงสร้างดินด้วยสปริง สามารถทำนายพฤติกรรมไม่เชิงเส้นระหว่างโครงสร้างที่อยู่บนดินและใต้ดินได้

การสร้างแบบจำลองทั้งโครงสร้างบนดินและโครงสร้างใต้ดินพร้อมกันนั้นยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก เนื่องจากใช้เวลาในการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ผล ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทดลองทำการสร้าง และประเมินความสามารถต้านทานแผ่นดินไหวของอาคารโดยใช้แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม เพื่อวิเคราะห์ความถูกต้อง และเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม

### วัตถุประสงค์

งานวิจัยผลของการใช้แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงเสาเข็มในการประเมินอาคารต้านแผ่นดินไหวมีวัตถุประสงค์ ดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาแนวทางการประเมินอาคารต้านแผ่นดินไหวด้วยแบบจำลองที่โครงสร้างต้านบนเพียงอย่างเดียว และโครงสร้างต้านบนพร้อมกับเสาเข็ม
2. เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของแบบจำลองที่อยู่ในพื้นที่แตกต่างกัน และความยาวของเสาเข็มที่ต่างกัน ของแบบจำลองโครงสร้างที่มีทั้งโครงสร้างต้านบน และเสาเข็มพร้อมกัน

### ขอบเขตงาน

งานวิจัยผลของการใช้แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงเสาเข็มในการประเมินอาคารต้านแผ่นดินไหว ประกอบด้วยขอบเขตงานดังต่อไปนี้

1. สร้างแบบจำลองที่คำนึงถึงผลของโครงสร้างต้านบนเพียงอย่างเดียว และโครงสร้างต้านบนร่วมกับเสาเข็มด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

2. ใช้คุณสมบัติของดินที่ได้จากการผลเจาะสำรวจดินในสนาม โดยเน้นพื้นที่จังหวัดพะเยา

3. ใช้ข้อมูลสเปกตรัมผลตอบสนองของแผ่นดินไหว ตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ของกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.1301/1302-2561) โดยเน้นพื้นที่ของอาคารที่ตั้งอยู่ในจังหวัดพะเยา

4. ใช้แบบจำลองอาคารที่คำนึงถึงความยาวเสาเข็มที่แตกต่างกัน และใช้พื้นที่ที่แตกต่างกันในการพิจารณาได้แก่ แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงเสาเข็มพื้นที่จังหวัดพะเยาเป็นตัวแทนอาคารที่ตั้งอยู่ในชั้นดินแข็ง และแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงเสาเข็มพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ เป็นตัวแทนอาคารที่ตั้งอยู่ในชั้นดินอ่อน เพื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองที่แตกต่างกัน

#### แนวทางการดำเนินงาน

งานวิจัยผลของการใช้แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงเสาเข็มในการประเมินอาคารต้านแผ่นดินไหว มีแนวทางการดำเนินงานดังต่อไปนี้

1. ค้นคว้า และศึกษางานวิจัยและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง
2. ตรวจสอบแบบจำลองอาคาร คุณสมบัติวัสดุ และผลการเจาะสำรวจดินในสนาม
3. ทำแบบจำลองอาคารในโปรแกรม Etabs ทำการตั้งค่าข้อมูล และคุณสมบัติของวัสดุต่าง ๆ ของแบบจำลอง
4. ทำการประเมินแบบจำลองทั้งที่คำนึงถึงเสาเข็ม ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม รวมถึงแบบจำลองที่มีความยาวเข็มแตกต่างกัน และพื้นที่ที่แตกต่างกัน
5. สรุปและวิเคราะห์การประเมินของแบบจำลอง
6. จัดทำรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

#### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยผลของการใช้แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงเสาเข็มในการประเมินอาคารต้านแผ่นดินไหว มีประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับดังต่อไปนี้

1. ทำให้ได้กระบวนการในการประเมินอาคารต้านแผ่นดินไหวที่มีความใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงมากยิ่งขึ้น
2. ได้ทราบพฤติกรรมของแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงเสาเข็ม และไม่คำนึงถึงเสาเข็ม ในการประเมินอาคารต้านแผ่นดินไหว



## บทที่ 2

### เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

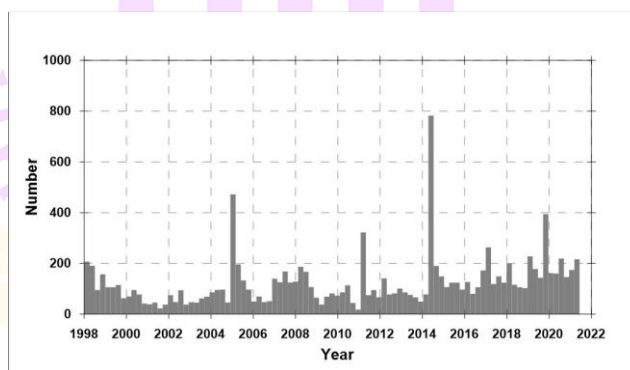
#### แผ่นดินไหวในประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียง

แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในบริเวณประเทศไทยมีอัตราการเกิดแผ่นดินไหวที่ต่ำ (low seismicity) เนื่องจากไม่ได้อยู่ในแนวรอยต่อของแผ่นเปลือกโลก ส่วนใหญ่แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กถึงขนาดกลาง (small-moderate earthquakes) เกิดขึ้นในบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตกของประเทศไทย นอกจากนี้ยังมีแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในบริเวณใกล้เคียง เช่น แนวมุดตัวสุมาตรา-อันดามัน โดยเฉพาะในบริเวณหมู่เกาะนิโคบาร์-อันดามัน ซึ่งถือเป็นพื้นที่เสี่ยงที่สุดที่จะมีโอกาสเกิดแผ่นดินไหวขนาด  $M > 7$  ได้ในรอบ 10 ปี Sukrungsri and Pailoplee (2015) แหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในประเทศพม่า ลาว เวียดนาม หรือทางตอนใต้ของประเทศจีน ที่ซึ่งมีศักยภาพในการเกิดแผ่นดินไหวขนาดรุนแรง-ขนาดใหญ่ (strong-major earthquakes) และอาจส่งผลกระทบต่อประเทศไทย สำหรับเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาดใหญ่สุดที่เคยตรวจวัดและบันทึกได้ในประเทศไทย คือเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 6.3 ในปี ค.ศ. 2014 จุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวอยู่ในบริเวณ อ.แม่ลาว จ.เชียงราย เกิดจากการเลื่อนตัวในแนวระดับแบบเหลี่ยมซ้ายของแนวรอยเลื่อนแม่ลาว แรงสั่นสะเทือนครอบคลุม 7 จังหวัดทางตอนเหนือของประเทศไทย สร้างความเสียหายเป็นบริเวณกว้าง อาคารบ้านเรือนเสียหายประมาณ 9,000 หลัง และมีอพาร์ทเมนท์ซอกเกิดขึ้นตามมาอีกเป็นจำนวนมากไม่ต่ำกว่า 1,000 เหตุการณ์ ในปี ค.ศ. 1983 เคยเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 5.9 บริเวณ อ.ศรีสวัสดิ์ จ.กาญจนบุรี ซึ่งถือเป็นเหตุการณ์แผ่นดินไหวหลัก (main shock) ที่มีขนาดรุนแรงรองลงมาจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 6.3 อย่างไรก็ตามเหตุการณ์แผ่นดินไหวดังกล่าวเกิดในบริเวณใกล้กับเขื่อนศรีนครินทร์ ซึ่งเป็นเขื่อนขนาดใหญ่บรรจุน้ำที่ระดับความสูงเกินกว่า 100 เมตร ประกอบกับเหตุการณ์แผ่นดินไหวดังกล่าวเกิดขึ้นหลังจากการสร้างเขื่อนไม่นานนัก และไม่เคยมีประวัติการเกิดแผ่นดินไหวขนาดรุนแรงในบริเวณดังกล่าวมาก่อน ซึ่งจากการศึกษาวิจัยพบว่าแผ่นดินไหวขนาด 5.9 ที่เกิดขึ้นนี้อาจถูกกระตุ้น จากน้ำหนักของเขื่อนขนาดใหญ่ที่กดทับในบริเวณรอยเลื่อนศรีสวัสดิ์ ที่ซึ่งไม่ได้เกิดจากการเลื่อนตัวตามธรรมชาติของแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว สำหรับขนาดแผ่นดินไหวหลักที่รองลงมาเป็นอันดับ 3 คือเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 5.6 ในปี ค.ศ. 1975 บริเวณพรมแดนไทย-พม่า หรือในบริเวณจังหวัดตาก ที่ซึ่งเครือข่ายตรวจวัดในอดีตยังไม่มีความแม่นยำมากนัก เกิดจากการเลื่อนตัวในแนวระดับของรอย

เลื่อนเมฆทางตะวันตกของประเทศไทย จุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวของเหตุการณ์ดังกล่าวอยู่ห่างจากจังหวัดกรุงเทพมหานครประมาณ 500 กิโลเมตร แรงสั่นสะเทือนทำให้อาคารสูงในหลายพื้นที่ บริเวณกรุงเทพมหานครสามารถรับรู้แรงสั่นสะเทือนได้ นอกจากนี้ยังมีเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 5.1-5.2 เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1994 - 1995 บริเวณจังหวัดแพร่ เชียงราย และเชียงใหม่ ที่ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายเล็กน้อยในบริเวณใกล้กับจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว สำหรับเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาดเล็กในประเทศไทย เช่นแผ่นดินไหวขนาด 4.9 บริเวณ อ.ศรีสวัสดิ์ จ.กาญจนบุรี ในปี ค.ศ. 2018 เกิดจากการเลื่อนตัวของแนวรอยเลื่อนศรีสวัสดิ์ แรงสั่นสะเทือนสามารถรับรู้ได้ในหลายพื้นที่ในบริเวณใกล้กับจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว แต่ไม่ได้สร้างความเสียหายต่ออาคารหรือสิ่งปลูกสร้าง และในปี ค.ศ. 2019 เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 4.9 บริเวณ อ.วังเหนือ จ.ลำปาง เกิดจากการเลื่อนตัวของแนวรอยเลื่อนพะเยาทางตอนเหนือของประเทศไทย แรงสั่นสะเทือนรับรู้ได้ในหลายพื้นที่และเกิดอาฟเตอร์ช็อกขนาดเล็กตามมาอีกเป็นจำนวนมาก แม้ว่าเหตุการณ์แผ่นดินไหวเล็ก (M4.0-4.9) ในประเทศไทย ส่วนใหญ่จะไม่ได้ก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงต่ออาคารบ้านเรือนแต่ประชาชนสามารถรับรู้แรงสั่นสะเทือนได้ในหลายพื้นที่ จึงมักทำให้เกิดความตื่นตระหนก ในช่วง 5 ปีที่ผ่านมาประเทศไทยเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาดมากกว่า 4.0 จำนวนไม่น้อยกว่า 9 ครั้ง เริ่มจากในปี ค.ศ. 2015 เกิดแผ่นดินไหวขนาด 4.8 และ 4.5 จากการเลื่อนตัวของแนวรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ จุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวอยู่ในบริเวณ อ.สังขละบุรี จ.กาญจนบุรี ซึ่งอยู่ห่างไกลจากแหล่งชุมชน ทำให้รับรู้แรงสั่นสะเทือนได้น้อยและไม่พบความเสียหายจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งนี้ ในปี ค.ศ. 2017 เกิดแผ่นดินไหวขนาด 4.0-4.2 จำนวน 5 ครั้ง ที่ซึ่งจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวอยู่ทางตอนเหนือของประเทศไทย บริเวณจังหวัดเชียงราย เชียงใหม่ น่าน และตาก ส่วนใหญ่สามารถรับรู้แรงสั่นสะเทือนได้ แต่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหาย สำหรับในปี ค.ศ. 2019 ที่ผ่านมามีเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 4.0 ที่จ.เลย ทางด้านตะวันออกของภาคเหนือ ซึ่งในปัจจุบันยังไม่พบแนวรอยเลื่อนมีพลังในบริเวณดังกล่าว

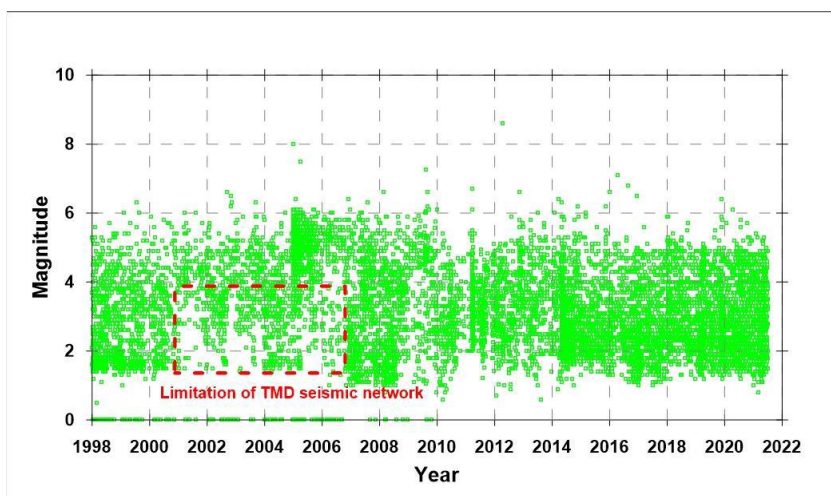
สำหรับเหตุการณ์แผ่นดินไหวในประเทศไทยและบริเวณใกล้เคียง จากฐานข้อมูลแผ่นดินไหวของกรมอุตุนิยมวิทยาพบว่า เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นถูกตรวจวัดและบันทึกมาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี ค.ศ. 1998 - 2020 (ภาพ 1) แผ่นดินไหวที่ถูกตรวจวัดและบันทึกได้ในช่วงก่อนปี ค.ศ. 2004 จะมีจำนวนไม่มากนัก เนื่องจากเครือข่ายตรวจวัดแผ่นดินไหวของกรมอุตุนิยมวิทยาในช่วงเวลาดังกล่าวยังไม่ได้ถูกพัฒนาให้ครอบคลุมแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวทั่วประเทศ ทำให้ข้อมูลแผ่นดินไหวที่ตรวจวัดได้ไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะแผ่นดินไหวขนาดเล็ก ซึ่งตรวจวัดได้แค่บางเหตุการณ์ (ภาพ 2) หลังจากเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวใหญ่ทางตอนเหนือ

ของเกาะสุมาตราในปี ค.ศ. 2004 ทำให้เกิดอาฟเตอร์ช็อกตามมาเป็นจำนวนมาก ที่เครือข่ายตรวจวัดแผ่นดินไหวของกรมอุตุนิยมวิทยาสามารถตรวจวัดเหตุการณ์เหล่านี้ได้ ทำให้ในช่วงปี ค.ศ. 2005–2006 มีจำนวนเหตุการณ์แผ่นดินไหวถูกตรวจวัดและบันทึกได้เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน นอกจากนี้ใน ปี ค.ศ. 2014 ประเทศไทยยังเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 6.3 ซึ่งถือเป็นแผ่นดินไหวขนาดรุนแรง จุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวอยู่ในบริเวณ อ.แม่ลาว จ.เชียงราย และเกิดอาฟเตอร์ช็อกตามมาอีกเป็นจำนวนมากไม่ต่ำกว่า 1000 เหตุการณ์ประกอบกับในช่วงเวลาดังกล่าว สถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวของกรมอุตุนิยมวิทยาได้ถูกติดตั้งเพิ่มเติมในหลายพื้นที่ทั่วประเทศไทย ทำให้สามารถตรวจวัดและบันทึกเหตุการณ์แผ่นดินไหวได้เป็นจำนวนมาก เครือข่ายตรวจวัดที่มีความหนาแน่นและครอบคลุมแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวจะสามารถตรวจจับคลื่นแผ่นดินไหวขนาดเล็ก ๆ ได้เป็นอย่างดี ทำให้ข้อมูลแผ่นดินไหวที่ถูกตรวจวัดและบันทึกมีความสมบูรณ์เพิ่มมากขึ้น สำหรับในช่วงปี ค.ศ. 2011 และ 2019 จำนวนเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ส่วนใหญ่เป็นอาฟเตอร์ช็อกของเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 6.7 ในปี ค.ศ. 2011 ที่ประเทศพม่า และแผ่นดินไหวขนาด 6.4 ในปี ค.ศ. 2019 ที่ประเทศลาว ตามลำดับ ที่ซึ่งข้อมูลทั้งหมดที่ถูกบันทึกโดยฐานข้อมูลแผ่นดินไหวของกรมอุตุนิยมวิทยาจะประกอบไปด้วย 2 รูปแบบหลัก ๆ คือ ข้อมูลเหตุการณ์แผ่นดินไหว (seismicity) ในปี ค.ศ. 1998 – 2020 และข้อมูลคลื่นสั้นสะเทือน (waveform) ในปี ค.ศ. 2007 – 2020



ภาพ 1 กราฟแสดงจำนวนของเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียง ในช่วงปี ค.ศ. 1998–2021

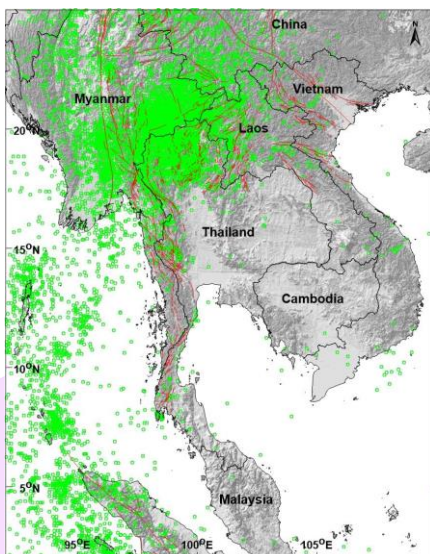
ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา (2564)



ภาพ 2 กราฟแสดงขนาดของเหตุการณ์แผ่นดินไหว (วงกลมสีเขียว) ที่เกิดขึ้นในประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียง ในปี ค.ศ. 1998–2021

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา (2564)

จากภาพ 3 จะเห็นว่าการกระจายตัวของเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ถูกตรวจวัดและบันทึกได้จากฐานข้อมูลแผ่นดินไหวของกรมอุตุนิยมวิทยาส่วนใหญ่เป็นเหตุการณ์แผ่นดินไหวบนแผ่นดิน (intraplate earthquake) ทางตอนเหนือของประเทศไทย ครอบคลุมแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในบริเวณประเทศพม่าเป็นส่วนใหญ่ รวมถึงประเทศลาวและประเทศจีนตอนใต้ สำหรับในบริเวณประเทศไทย การกระจายตัวของเหตุการณ์แผ่นดินไหวส่วนใหญ่อยู่ทางภาคเหนือและภาคตะวันตก มีแผ่นดินไหวในบริเวณภาคใต้บ้างแต่ไม่มากนัก สอดคล้องกับข้อมูลแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวหรือรอยเลื่อนมีพลัง ซึ่งส่วนใหญ่จะพบอยู่ในบริเวณภาคเหนือของประเทศไทย สำหรับการกระจายตัวของเหตุการณ์แผ่นดินไหวในทะเลหรือในบริเวณแนวมุดตัวของแผ่นเปลือกโลก (subduction zone) จะเห็นว่าจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวที่ถูกบันทึกในฐานข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยาส่วนใหญ่จะอยู่ห่างกันและจำนวนไม่ได้หนาแน่นมากนัก อาจเนื่องมาจากแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวดังกล่าวอยู่ห่างไกลจากเครือข่ายตรวจวัดแผ่นดินไหวของกรมอุตุนิยมวิทยาในประเทศไทย ทำให้ไม่สามารถตรวจวัดและบันทึกเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาดเล็ก ๆ ได้อย่างสมบูรณ์



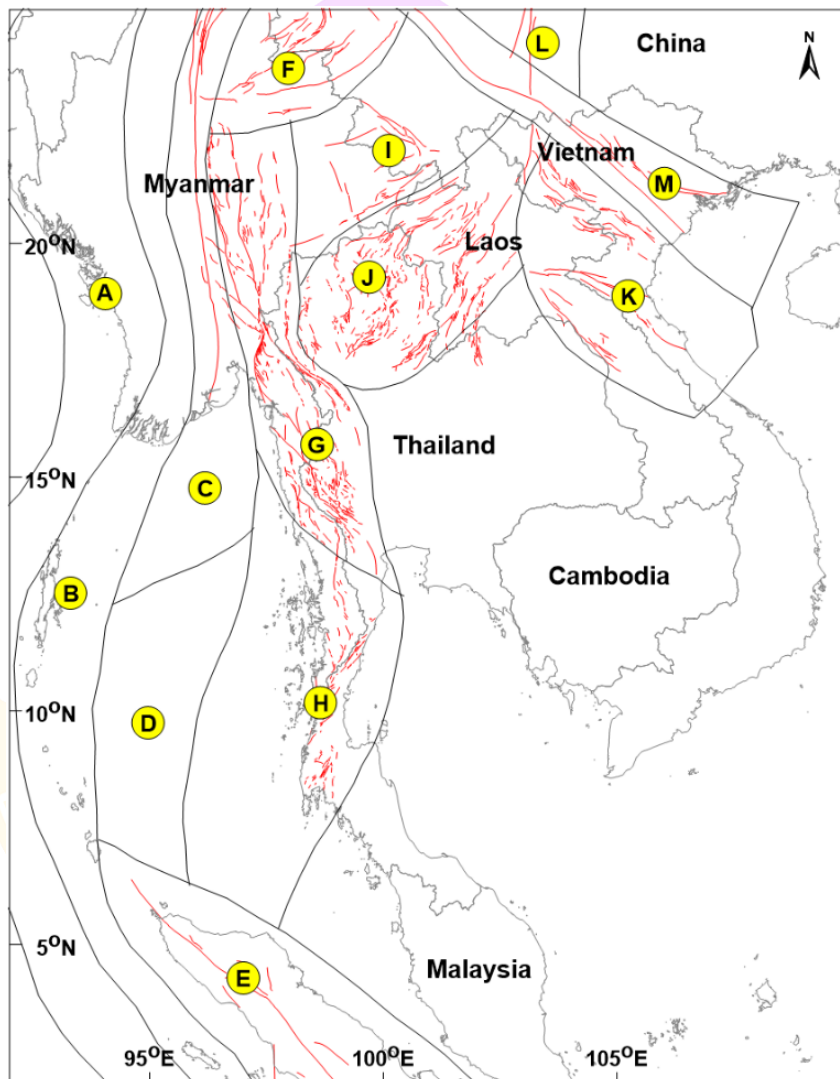
ภาพ 3 แผนที่แสดงเหตุการณ์แผ่นดินไหว (วงกลมสีเขียว) ที่เกิดขึ้นในประเทศไทย และพื้นที่ใกล้เคียงในช่วงปี ค.ศ. 1998–2021

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา (2564)

### ข้อมูลแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียง

สำหรับประเทศไทยตั้งอยู่ภายในแผ่นยูเรเชียใกล้กับแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวที่สำคัญหลายบริเวณโดยเฉพาะในบริเวณแนวมุดตัวที่พาดผ่านตั้งแต่ทางตอนเหนือของอินเดีย มายังตะวันตกของพม่า และทางตะวันตกของเกาะอันดามัน-นิโคบาร์ และผ่านไปทางตะวันออกและทางใต้ตามแนวร่องของสุมาตรา-ชวา (Sumatra–Java trench) ซึ่งถือเป็นแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวที่ใหญ่ที่สุดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในทางธรณีแปรสัณฐานประเทศไทยตั้งอยู่ในบริเวณที่ประกอบไปด้วยแผ่นเปลือกโลก 2 แผ่นวางต่อกันคือ ฉานไทย (Shan–Thai) ทางด้านตะวันตก และอินโดจีน (Indo–China) ทางด้านตะวันออก ที่ซึ่งถูกแบ่งตามแนวรอยต่อแนวนอน-อุตรดิตถ์ ผลกระทบที่เกิดจากการชนกันของฉานไทยซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแผ่นเปลือกโลกยูเรเชียกับแผ่นเปลือกโลกทางตะวันตกของประเทศพม่า ทำให้เกิดการแยกออกของแอ่งในทางภาคเหนือของประเทศไทย ซึ่งจะพบการเลื่อนตัวในแนวระดับแบบเหลื่อมขวา (right-lateral strike slip) ในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ และแบบเหลื่อมซ้าย (left-lateral strike slip) ในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่แบบอัดเข้าหากันในแนวเหนือ-ใต้ และแยกออกจากกันแนวตะวันออก-ตะวันตก จากการศึกษาวิจัยด้านแผ่นดินไหวในอดีต Pailoplee,

Channarong and Chutakositkanon (2013) ได้จำแนกแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว (seismic source zones) ในประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียงที่มีลักษณะทางธรณีแปรสัณฐาน (tectonic setting) และพฤติกรรมการเกิดแผ่นดินไหว (earthquake activities) ที่แตกต่างกัน โดยแบ่งออกเป็น 13 บริเวณ ดังภาพ 4 (A-M) และ รายละเอียดดังตาราง 2



ภาพ 4 แผนที่แสดงแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหว (seismic source zones) ในประเทศไทย และพื้นที่ใกล้เคียง(A-M)และแนวรอยเลื่อนมีพลัง(active faults)(เส้นสีแดง)

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา (2564)

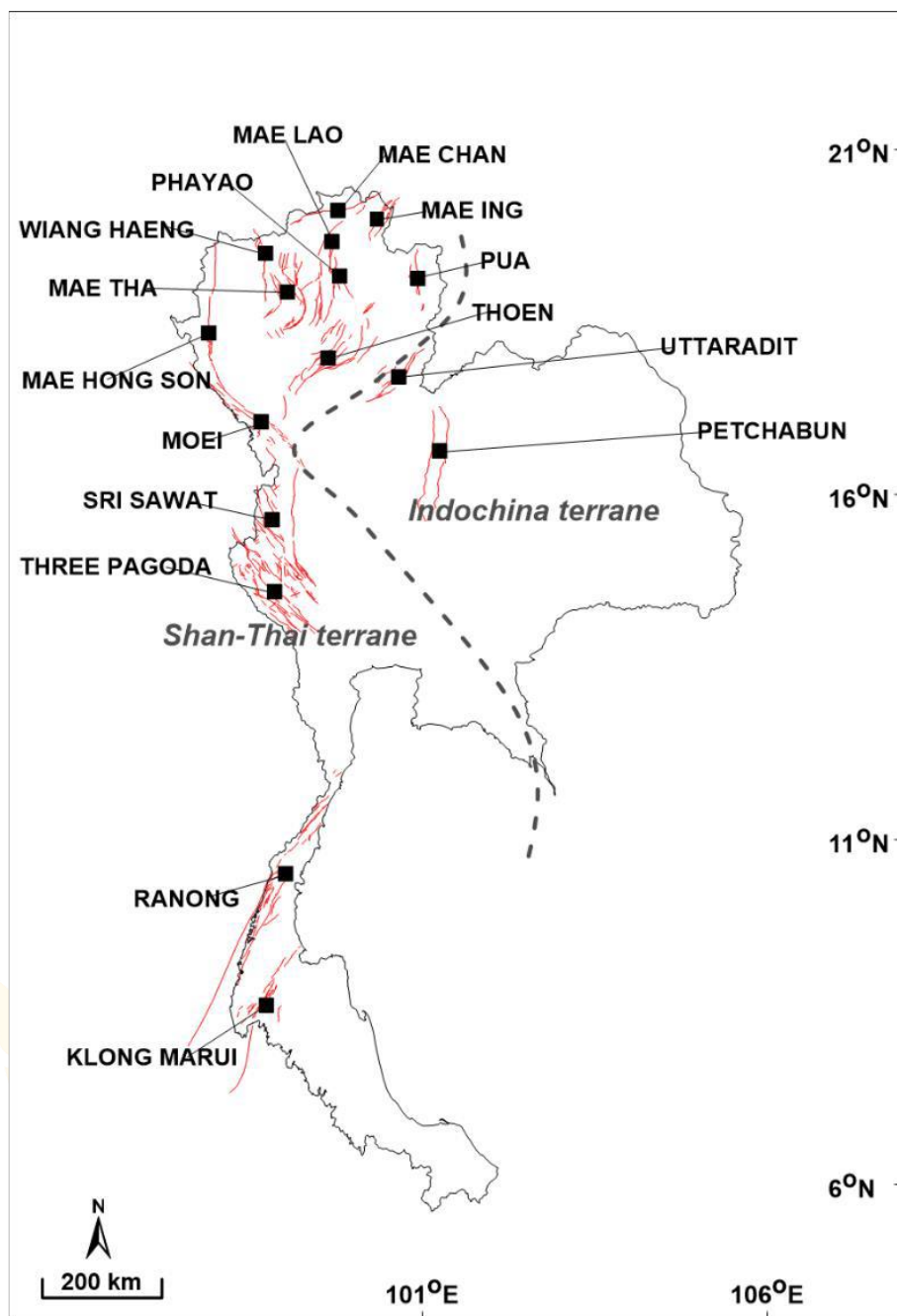
ตาราง 2 แสดงรายละเอียดบริเวณแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวในประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียง

Code	Seismic source zone
Zone A	Sumatra–Andaman Interplate
Zone B	Sumatra–Andaman Intraslab
Zone C	Sagaing Fault Zone
Zone D	Andaman Basin
Zone E	Sumatra Fault Zone
Zone F	Hsenwi–Nanting Fault Zones
Zone G	Western Thailand
Zone H	Southern Thailand
Zone I	Jinghong–Mengxing Fault Zones
Zone J	Northern Thailand – Dein Bein Phu
Zone K	Song Da – Song Ma Fault Zones
Zone L	Xianshuihe Fault Zone
Zone M	Red River Fault Zone

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา (2564)

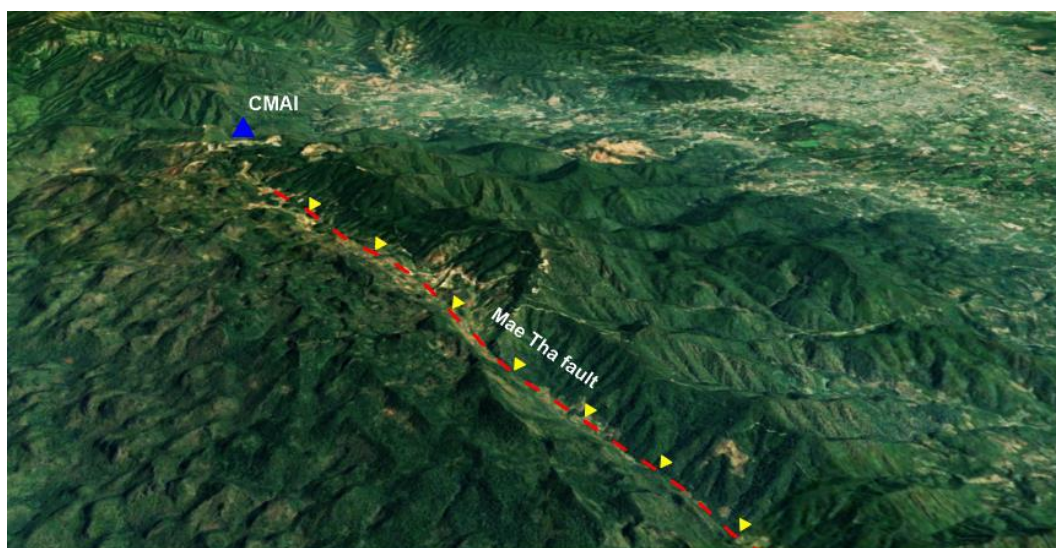
จากข้อมูลแผ่นดินไหวในอดีต พบว่าแนวรอยเลื่อนในบริเวณภาคเหนือและภาคตะวันตกของประเทศไทยมีอัตราการเลื่อนตัวที่ต่ำ (low slip rates) และมีช่วงของคาบอุบัติซ้ำ (return period) ที่ยาวนานของการเกิดแผ่นดินไหวใหญ่ สำหรับแนวรอยเลื่อนทางตะวันตกของประเทศไทยพบการเลื่อนตัวในแนวระดับแบบเหลี่ยมขวาในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ที่สัมพันธ์กับแนวรอยเลื่อนสกายในประเทศพม่า และยังพบร่องรอยการเลื่อนตัวของชั้นดินตะกอนและลักษณะภูมิประเทศแบบเนินเขาขวาง (Shutter ridge), หนองน้ำยุบตัว (Sag pond), ทางน้ำหักงอ (Offset stream) ที่แสดงให้เห็นว่าเคยเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวใหญ่ในบริเวณดังกล่าว สำหรับในบริเวณภาคใต้ของประเทศไทย พบลักษณะภูมิประเทศแบบ ผารอยเลื่อน (fault scarps) และผาสามเหลี่ยม (triangular facets) ซึ่งแสดงถึงการขยับตัวของแนวรอยเลื่อนในบริเวณภาคใต้ ในปัจจุบันแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวหรือแนวรอยเลื่อนมีพลัง (active faults) ถูกกำหนดโดยหน่วยงานกรมทรัพยากรธรณี ซึ่งได้ทำการศึกษาข้อมูลการเกิดแผ่นดินไหว

ในอดีต (Paleo-seismological data) และได้ชุดร่องสำรวจหาหลักฐานการเคลื่อนตัวของแนวรอยเลื่อนต่างๆในประเทศไทย ที่ซึ่งในปี ค.ศ. 2019 ได้มีการประกาศแนวรอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทยทั้งหมด 16 รอยเลื่อน โดยเพิ่มเติมแนวรอยเลื่อนเวียงแหงที่ค้นพบใหม่ พาดผ่านในบริเวณ อ.เวียงแหง จ.เชียงใหม่ แนวรอยเลื่อนมีพลังทั้งหมดในประเทศไทยประกอบด้วยแนวรอยเลื่อนในทางภาคเหนือ 12 รอยเลื่อน คือรอยเลื่อนแม่จัน, แม่อิง, แม่ฮ่องสอน, เมย, แม่ทา, เกิน, พะเยา, บัว, อุตรดิตถ์, แม่ลาว, และเวียงแหง ภาคตะวันตก 2 รอยเลื่อน คือรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์กับรอยเลื่อนศรีสวัสดิ์ และภาคใต้ 2 รอยเลื่อน คือรอยเลื่อนระนองและรอยเลื่อนคลองมะรุ่ย (ภาพ 5) ที่ซึ่งแนวรอยเลื่อนดังกล่าวมีอัตราการเคลื่อนตัว (slip rate) และทิศทางของการเคลื่อนตัว (source mechanism) ที่แตกต่างกัน สำหรับภาคเหนือของประเทศไทย ลักษณะการเคลื่อนตัวหรือชนิดของแนวรอยเลื่อนมีทั้งแบบรอยเลื่อนปกติ (normal faults) และรอยเลื่อนในแนวระดับแบบเหลื่อมซ้าย (left-lateral strike-slip) ส่วนแนวรอยเลื่อนทั้งหมดในภาคตะวันตกจะมีการเคลื่อนตัวในแนวระดับแบบเหลื่อมขวา (Right-lateral strike slip) สำหรับแนวรอยเลื่อนในภาคใต้นั้นได้มีการสำรวจเพิ่มเติมในทะเล พบส่วนที่ลากยาวเข้าไปในทะเลอันดามันและพบการเคลื่อนตัวในแนวระดับแบบเหลื่อมซ้าย อย่างไรก็ตามจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม (remote sensing) พบว่ามีหลายบริเวณในประเทศไทยที่แสดงถึงร่องรอยการเคลื่อนตัว (surface rupture) ของแผ่นเปลือกโลก (ภาพ 6) ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะภูมิประเทศแบบต่าง ๆ เช่น เนินเขาขวาง หนองน้ำยุบตัว ทางน้ำหักงอ ผารอยเลื่อน และพาสามเหลี่ยม แต่ในบางบริเวณยังไม่ได้มีการชุดร่องสำรวจ ทำให้ยังไม่พบรอยเลื่อนมีพลังในบริเวณดังกล่าว ประกอบกับในบางบริเวณอาจมีแนวรอยเลื่อนที่อยู่ในระดับลึก (Blind thrust faults) ซึ่งมองไม่เห็นร่องรอยบนพื้นผิว ที่ซึ่งแนวรอยเลื่อนที่ยังสำรวจไม่พบนี้อาจเป็นแนวที่เชื่อมต่อกับแนวรอยเลื่อนขนาดใหญ่ หรือแนวรอยเลื่อนอื่น ๆ ภายในหรือภายนอกประเทศ ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวได้มากขึ้นหรือสามารถเกิดแผ่นดินไหวได้ใหญ่ขึ้น ดังนั้นในปัจจุบันจึงได้มีการสำรวจแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวเพิ่มเติมในประเทศไทยโดยหน่วยงานกรมทรัพยากรธรณี สำหรับรายละเอียดข้อมูลรอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทยในปัจจุบันแสดงดังตาราง 3



ภาพ 5 แผนที่แสดงแนวรอยเลื่อนมีพลังในประเทศไทย (เส้นสีแดง) ที่ถูกพบในปัจจุบัน รวมถึงแนวรอยต่อนาน-อุตรดิตถ์ ที่แบ่งระหว่างแผ่นอินโดจีนและแผ่นฉานไทย (เส้นประสีดำ)

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา (2564)



ภาพ 6 ภาพถ่ายดาวเทียม LANDSAT แสดงร่องรอยการเลื่อนตัว (surface rupture) (เส้นสีแดง) ของแนวรอยเลื่อนแม่ทา (สามเหลี่ยมสีเหลือง) ในบริเวณ จ.เชียงใหม่ ใกล้กับสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวของกรมอุตุนิยมวิทยา (สามเหลี่ยมสีน้ำเงิน)

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา (2564)

ตาราง 3 แสดงรายละเอียดของแนวรอยเลื่อนมีพลัง (Active faults) ในประเทศไทย

No.	Fault zone	Fault Type	Region
1	แม่จัน	Left-lateral strike slip	เชียงราย เชียงใหม่
2	แม่อิง	Left-lateral strike slip	เชียงราย
3	แม่ฮ่องสอน	Normal fault	แม่ฮ่องสอน ตาก
4	เมย	Right-lateral strike slip	ตาก กำแพงเพชร
5	แม่ทา	Right/Left-lateral strike slip	เชียงใหม่ ลำพูน เชียงราย
6	เถิน	Left-lateral strike slip	ลำปาง แพร่
7	พะเยา	Normal fault	พะเยา เชียงราย ลำปาง
8	บัว	Normal fault	น่าน
9	อุตรดิตถ์	Left-lateral strike slip	อุตรดิตถ์

ตาราง 3 (ต่อ)

No.	Fault zone	Fault Type	Region
10	เจดีย์สามองค์	Right-lateral strike slip	กาญจนบุรี
11	ศรีสวัสดิ์	Right-lateral strike slip	กาญจนบุรี กำแพงเพชร อุทัยธานี ตาก
12	ระนอง	Left-lateral strike slip	ระนอง ชุมพร ประจวบคีรีขันธ์ พังงา
13	คลองมะรุ่ย	Left-lateral strike slip	สุราษฎร์ธานี กระบี่ พังงา ภูเก็ต
14	เพชรบูรณ์	Normal fault	เพชรบูรณ์ เลย
15	แม่ลาว	Left-lateral strike slip	เชียงราย
16	เวียงแหง	Normal fault	เชียงใหม่

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา (2564)

#### มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1302-52)

กรมโยธาธิการและผังเมือง (2552) ในปัจจุบันเป็นที่ตระหนักกันดีแล้วว่า แผ่นดินไหวรุนแรงในระดับที่สร้างความเสียหายแก่อาคาร บ้านเรือน และสิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ จนส่งผลให้ผู้คนเป็นจำนวนมากบาดเจ็บหรือเสียชีวิตได้นั้น มีโอกาสเกิดขึ้นได้จริงในพื้นที่บางส่วนของประเทศไทย ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องเตรียมพร้อมเพื่อรับมือกับภัยพิบัติดังกล่าว

มาตรการเตรียมพร้อมที่มีประสิทธิภาพที่สุดมาตรการหนึ่ง คือ การออกแบบก่อสร้างอาคารให้สามารถต้านทานแผ่นดินไหวที่รุนแรงได้ ด้วยเหตุนี้ในปี พ.ศ. 2540 จึงได้มีการออกกฎกระทรวงฉบับที่ 49 ภายใต้ พ.ร.บ. ควบคุมอาคารฯ มากำหนดให้มีการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวในพื้นที่จังหวัดภาคเหนือ และ จังหวัด กาญจนบุรี ซึ่งในเวลาต่อมา กฎกระทรวงดังกล่าวได้ถูกแทนที่โดยกฎกระทรวง พ.ศ. 2550 ซึ่งปรับปรุงขยายพื้นที่ควบคุมให้ครอบคลุมถึงกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล และจังหวัดในภาคใต้

กฎกระทรวงดังกล่าวนับได้ว่าเป็นก้าวสำคัญของการดำเนินการลดภัยพิบัติแผ่นดินไหวของประเทศไทย อย่างไรก็ตาม ข้อกำหนดต่าง ๆ ในการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว ที่ระบุไว้ในกฎกระทรวงนั้น อ้างอิงมาจากมาตรฐานแม่แบบในต่างประเทศที่ค่อนข้างล้าสมัย ส่งผลให้การออกแบบมีข้อจำกัดหลายประการ และไม่สอดคล้องกับองค์ความรู้ที่มีอยู่ในปัจจุบัน

มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว นี้จึงได้ถูกจัดทำขึ้นเพื่อให้มีความสมบูรณ์ ทันสมัย และสอดคล้องกับหลักวิชาการในปัจจุบัน ทัดเทียมกับมาตรฐานในระดับสากล โดย คณะทำงานจัดทำมาตรฐาน ได้พิจารณาเลือกมาตรฐาน ASCE7-05 ของประเทศสหรัฐอเมริกามาใช้เป็นมาตรฐานแม่แบบ และได้ดำเนินการปรับแก้ข้อกำหนด สัมประสิทธิ์ ค่าตัวประกอบ สูตรและสมการออกแบบบางส่วน เพื่อให้มาตรฐานฉบับนี้มีความสอดคล้องและเหมาะสมกับสภาพการณ์ของประเทศไทย

### มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1301/1302-61)

มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1302 -52) ได้ประกาศใช้เมื่อปี พ.ศ.2552 และภายหลังการประกาศใช้มาจนถึงปัจจุบัน ปรากฏว่า มีเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของประชาชนในพื้นที่ต่าง ๆ หลายครั้ง ทำให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน ประกอบกับมีข้อมูลแผ่นดินไหวและผลการศึกษาทางธรณีวิทยาเพิ่มเติม จึงได้มีการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1302 -52) ให้สอดคล้องกับสภาพการณ์และข้อมูลเกี่ยวกับแผ่นดินไหวในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังได้นำมาตรฐานประกอบการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1301-54) มาปรับปรุง และรวบรวมไว้ในมาตรฐานนี้ด้วย ซึ่งจะทำให้ผู้คำนวณและออกแบบโครงสร้างอาคารมีความสะดวกต่อการใช้งานมากยิ่งขึ้น และสามารถนำมาตรฐานไปใช้ปฏิบัติให้การก่อสร้างอาคารมีความปลอดภัยและเป็นไปตามหลักมาตรฐานสากล

มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวนี้เป็นข้อกำหนดเพิ่มเติมจาก กฎกระทรวงกำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคารและพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 เพื่อให้การออกแบบและคำนวณโครงสร้างอาคารควบคุมตามกฎหมายกระทรวง มีความมั่นคง แข็งแรงและปลอดภัย

มาตรฐานนี้กำหนดหลักเกณฑ์และวิธีการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวโดยที่ค่าแรงแผ่นดินไหวเพื่อใช้ในการออกแบบอาคาร (เช่น ค่าแรงสถิตเทียบเท่า) ได้ถูกกำหนดขึ้นด้วยสมมติฐานว่าอาคาร ได้รับการออกแบบให้มีความเหนียวสามารถโยกไหวตัวเกินพิกัดยืดหยุ่นของโครงสร้าง และสามารถสลายพลังงานของการสั่นไหวในระดับที่เหมาะสม โดยที่ยังไม่เกิดการพังถล่ม ดังนั้นผู้ออกแบบจึงจำเป็นต้องปฏิบัติตาม

ข้อกำหนดในการออกแบบรายละเอียดขององค์อาคารและโครงสร้างโดยรวม เพื่อให้อาคารมีพฤติกรรมเป็นไปตามที่สมมุติไว้ ทั้งนี้รวมถึง กรณีที่ผลเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกทุกประเภทอื่น ๆ ที่มีต่อองค์อาคารนั้น ๆ หรือโครงสร้างนั้น ๆ มีค่าสูงกว่าผลเนื่องจากแผ่นดินไหว

#### 1. ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว

เมื่อเกิดการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว อาคารต่าง ๆ จะมีการตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนแตกต่างกันไป โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก คือ ระดับความรุนแรงจากแผ่นดินไหว คาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร อัตราส่วนความหน่วงของอาคาร และปัจจัยประกอบอื่น ๆ ในมาตรฐานนี้ ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวและผลตอบสนองของอาคาร แสดงอยู่ในรูปของ “ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม” ซึ่งเป็นค่าบนพื้นดินและมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามคาบการสั่นและอัตราส่วนความหน่วงของอาคาร

โดยทั่วไปอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าอัตราส่วนความหน่วงลดลงเมื่ออาคารมีความสูงเพิ่มขึ้นสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีความสูงไม่เกิน 60 เมตร ให้ใช้ค่าอัตราส่วนความหน่วงไม่เกินร้อยละ 5 ส่วนอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความสูงเกินกว่า 60 เมตร ให้ใช้ค่าอัตราส่วนความหน่วงไม่เกินร้อยละ 2.5 อาคารที่ใช้โครงสร้างเหล็กให้ใช้ค่าอัตราส่วนความหน่วงไม่เกินร้อยละ 2.5

##### 1.1 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับพื้นที่ทั่วประเทศยกเว้นแอ่งกรุงเทพฯ

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา (Maximum Considered Earthquake) ที่คาบการสั่น 0.2 วินาที ( $S_0$ ) และ คาบการสั่น 1 วินาที ( $S_1$ ) ณ อำเภอ และจังหวัดต่าง ๆ ทั่วประเทศไทย ยกเว้นในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯที่มีลักษณะดินอ่อนเป็นพิเศษ ค่าความเร่งตอบสนองนี้ ได้มาจากการวิเคราะห์ความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหว โดยสมมุติให้สภาพชั้นดินในทุก ๆ พื้นที่เป็นแบบดินแข็งหรือหิน ที่มีความเร็วคลื่นเฉือนโดยเฉลี่ยในช่วงจาก ผิวดินถึงความลึก 30 เมตร ( $\bar{v}_s$ ) เท่ากับ 760 เมตรต่อวินาที โดยอำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยามีค่า  $S_0 = 0.781$  และค่า  $S_1 = 0.146$

##### 1.2 ประเภทของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร

สภาพของชั้นดิน ณ บริเวณที่ตั้งของอาคาร สามารถเปลี่ยนแปลงระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวได้ ดังนั้นการนำค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม มาใช้ในการออกแบบ จึงจำเป็นต้องปรับแก้ค่าให้เหมาะสมกับสภาพดิน ณ บริเวณที่ตั้งของอาคารนั้น ๆ ประเภทของชั้นดินสามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ประเภท คือ A(ดินแข็ง) B(หิน) C(ดินแข็ง) D(ดินปกติ) E(ดินอ่อน) หรือ F(ดินที่มีลักษณะพิเศษ) ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลดิน และไม่สามารถทำการสำรวจดินได้ ให้สมมุติว่าประเภทของชั้นดินเป็นแบบประเภท D

### 1.3 การปรับแก้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา บริเวณที่ตั้งของอาคาร สามารถปรับแก้ค่าให้เหมาะสมกับประเภทของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร ได้ด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (1)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (2)$$

โดยที่  $S_{MS}$  คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที ที่ถูกปรับแก้ เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร

$S_{M1}$  คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 1.0 วินาที ที่ถูกปรับแก้ เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร

$F_a$  คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 0.2 วินาที

$F_v$  คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งอาคาร สำหรับคาบการสั่น 1 วินาที

ค่าสัมประสิทธิ์  $F_a$  และ  $F_v$  แสดงไว้ในตาราง 4 และ 5 ตามลำดับ

ตาราง 4 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดินที่ ณ ที่ตั้งอาคาร  $F_a$

ประเภท ของชั้นดิน	ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่ พิจารณาที่คาบ 0.2 วินาที				
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์การตอบสนองของดินเป็นกรณี ๆ ไป				

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2561)

ตาราง 5 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดินที่ ณ ที่ตั้งอาคาร  $F_v$

ประเภท ของชั้นดิน	ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่ พิจารณาที่คาบ 1.0 วินาที				
	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์การตอบสนองของดินเป็นกรณี ๆ ไป				

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2561)

#### 1.4 การปรับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 0.2 วินาที ( $S_{DS}$ ) และที่คาบการสั่น 1 วินาที ( $S_{D1}$ ) คำนวณจากสมการ

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (3)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (4)$$

#### 1.5 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ  $S_g$  ซึ่งเป็นค่าบนพื้นดิน จำแนกเป็นค่าสำหรับวิธีการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าและด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ ซึ่งขึ้นกับตำแหน่ง ณ ที่ตั้งของอาคาร ดังนี้

##### 1.5.1 พื้นที่ทั่วประเทศยกเว้นแอ่งกรุงเทพ

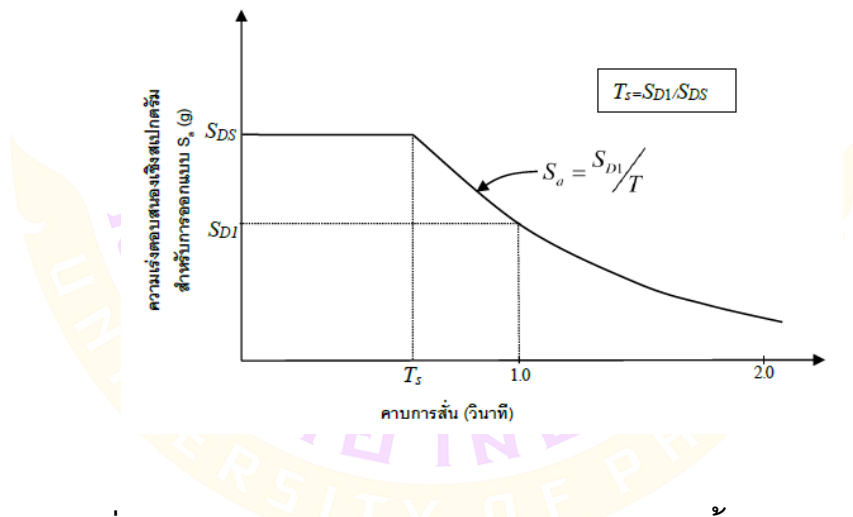
1. ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ สำหรับวิธีแรงสถิตเทียบเท่าให้ใช้ตามภาพ 7 สำหรับพื้นที่ที่มีค่า  $S_{D1} \leq S_{DS}$  และให้ใช้ตามภาพ 8 สำหรับ

พื้นที่ที่มีค่า  $S_{D1} > S_{DS}$  โดยที่  $S_{DS}$  และ  $S_{D1}$  คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบตามหัวข้อ 1.4

2. ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ให้ใช้ตามภาพ 9 สำหรับพื้นที่ที่มีค่า  $S_{D1} \leq S_{DS}$  และให้ใช้ตามภาพ 10 สำหรับพื้นที่ที่มีค่า  $S_{D1} > S_{DS}$  โดยที่  $S_{DS}$  และ  $S_{D1}$  คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบตามหัวข้อ 1.4

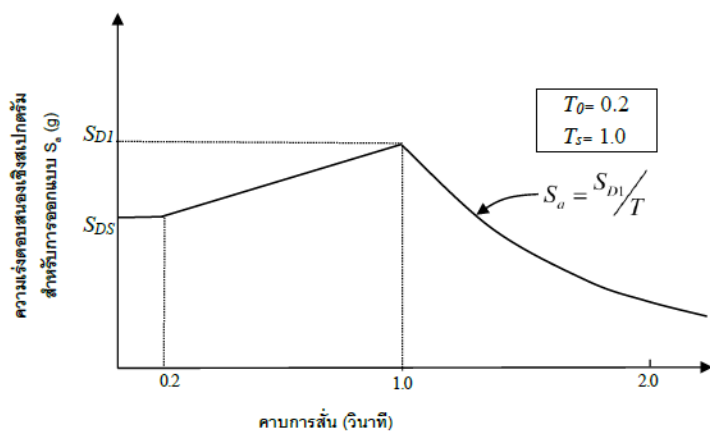
ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่แสดงเป็นค่าที่สอดคล้องกับค่าอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับร้อยละ 5 สำหรับอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับร้อยละ 2.5 ให้ปรับค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมโดยหารด้วย 0.85 สำหรับกรณีที่คาบการสั่น  $T \geq T_0$  หรือในกรณีที่คาบการสั่น  $T < T_0$  ให้คำนวณ  $S_o$  ตามสมการที่ 5

$$S_o = S_{DS} \left[ (3.88) \frac{T}{T_s} + 0.4 \right] \quad (5)$$



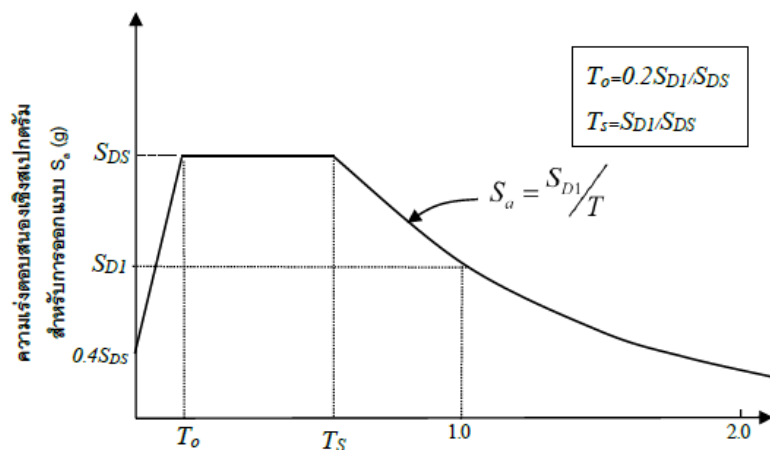
ภาพ 7 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับพื้นที่ทั่วประเทศ (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า  $S_{D1} \leq S_{DS}$

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2561)



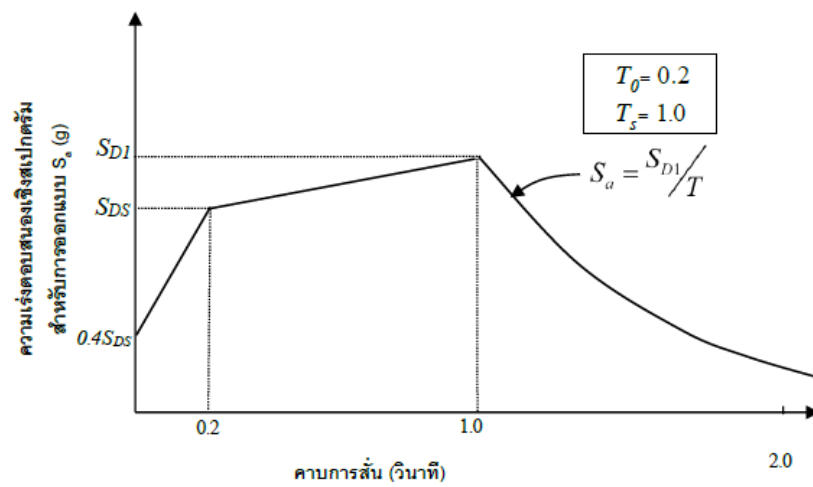
ภาพ 8 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า สำหรับพื้นที่ทั่วประเทศ (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า  $S_{D1} > S_{DS}$

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2561)



ภาพ 9 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ สำหรับพื้นที่ทั่วประเทศ (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า  $S_{D1} \leq S_{DS}$

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2561)

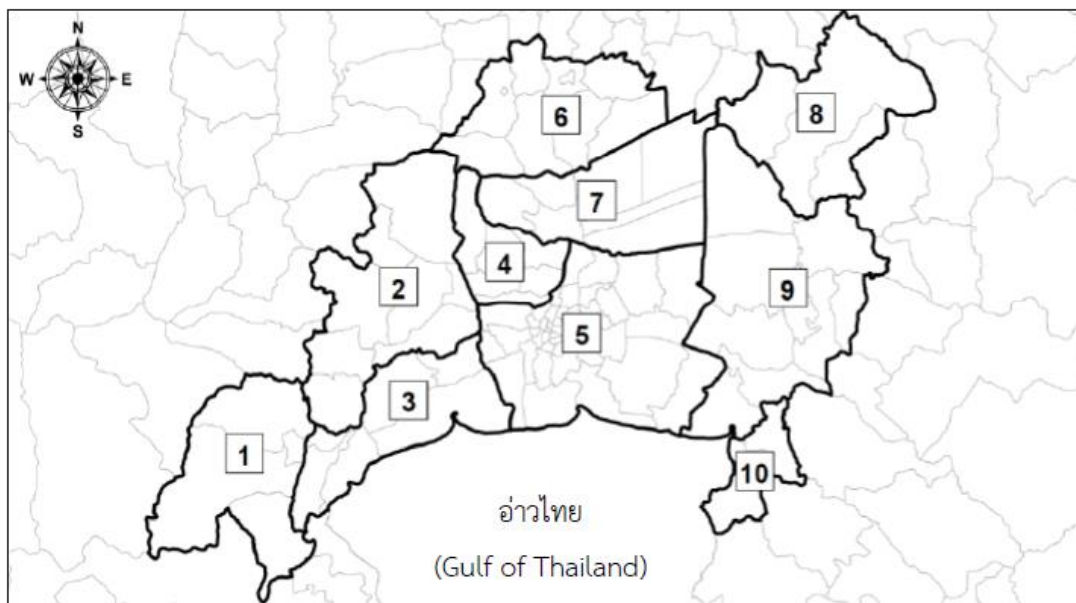


ภาพ 10 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์  
สำหรับพื้นที่ทั่วประเทศ (ยกเว้นแอ่งกรุงเทพ) ที่มีค่า  $S_{D1} > S_{DS}$

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2561)

### 1.5.2 พื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ

พื้นที่ในแอ่งกรุงเทพครอบคลุมกรุงเทพมหานคร และจังหวัดปริมณฑล  
หลายจังหวัด พื้นที่นี้ได้ถูกแบ่งย่อยเป็น 10 โซน ดังภาพ 11 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม  
สำหรับการออกแบบ ในพื้นที่ 10 โซนนี้ขึ้นกับวิธีการออกแบบ ดังนี้



ภาพ 11 การแบ่งโซนพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพฯ เพื่อการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหว

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2561)

- โซน 1 จังหวัดเพชรบุรี - อ.เขาย้อย  
จังหวัดราชบุรี - อ.ปากท่อ, อ.วัดเพลง, อ.เมืองราชบุรี
- โซน 2 จังหวัดราชบุรี - อ.ดำเนินสะดวก, อ.บางแพ  
จังหวัดนครปฐม - อ.สามพราน, อ.พุทธมณฑล, อ.นครชัยศรี, อ.ดอนตูม,  
อ.บางเลน, อ.เมืองนครปฐม
- โซน 3 จังหวัดสมุทรสาคร - ทั้งจังหวัด  
จังหวัดสมุทรสงคราม - ทั้งจังหวัด
- โซน 4 จังหวัดนนทบุรี - ทั้งจังหวัด
- โซน 5 จังหวัดกรุงเทพมหานคร - ทั้งจังหวัด  
จังหวัดสมุทรปราการ - ทั้งจังหวัด
- โซน 6 จังหวัดพระนครศรีอยุธยา - อ.ลาดบัวหลวง, อ.บางไทร, อ.บางปะอิน,  
อ.วังน้อย, อ.เสนา, อ.อุทัย, อ.ท่าเรือ, อ.บางบาล, อ.เมืองพระนครศรีอยุธยา

โซน 7 จังหวัดประทุมธานี – ทั้งจังหวัด

โซน 8 จังหวัดนครนายก – อ.บ้านนา, อ.ปากพลี, อ.เมืองนครนายก

โซน 9 จังหวัดนครนายก – อ.องครักษ์

จังหวัดปราจีนบุรี – อ.บ้านสร้าง

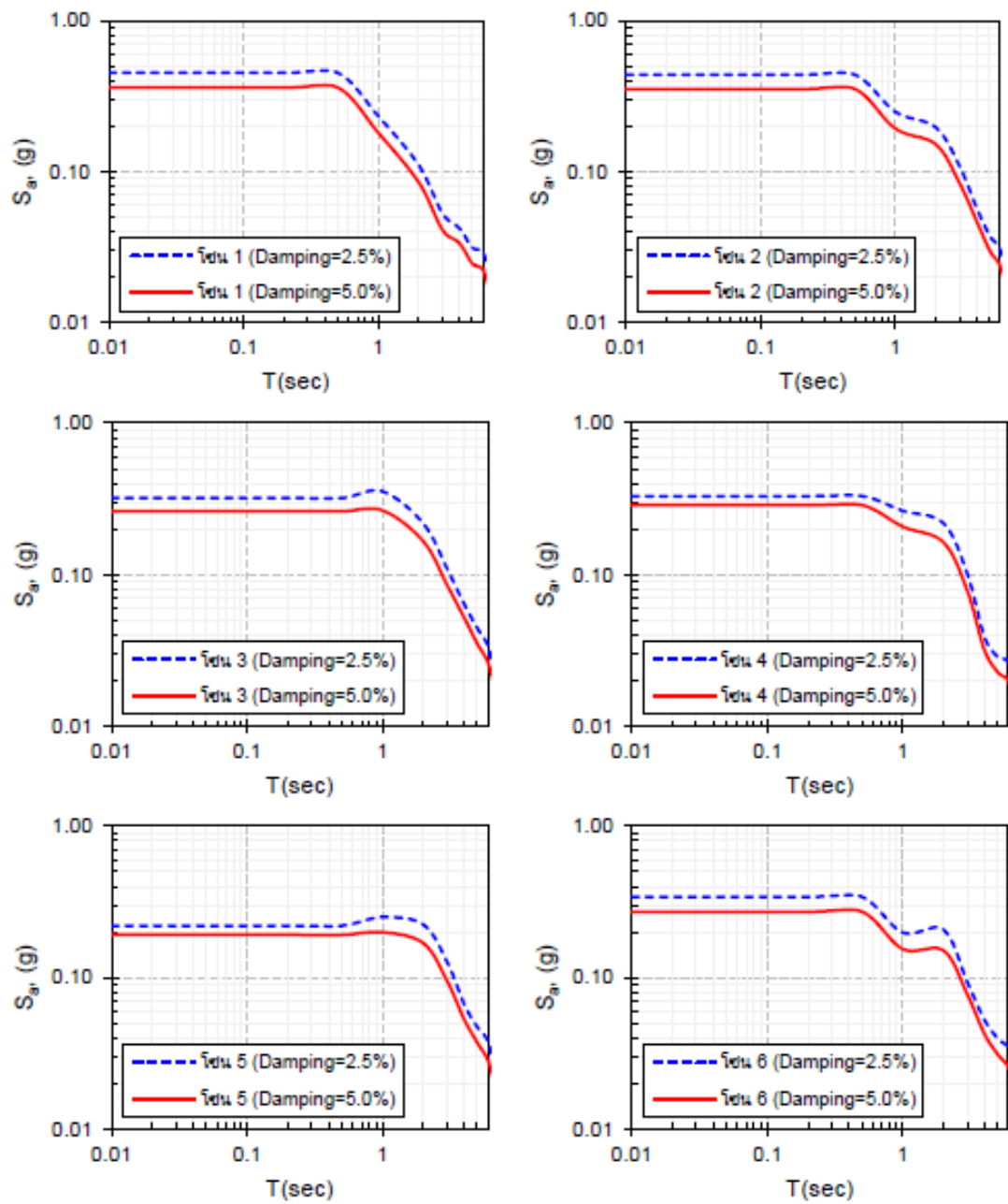
จังหวัดฉะเชิงเทรา – อ.บางน้ำเปรี้ยว, อ.บางคล้า, อ.ราชสาส์น,

อ.คลองเขื่อน, อ.บ้านโพธิ์, อ.บางปะกง, อ.เมืองฉะเชิงเทรา

โซน 10 จังหวัดชลบุรี – อ.พานทอง, อ.เมืองชลบุรี

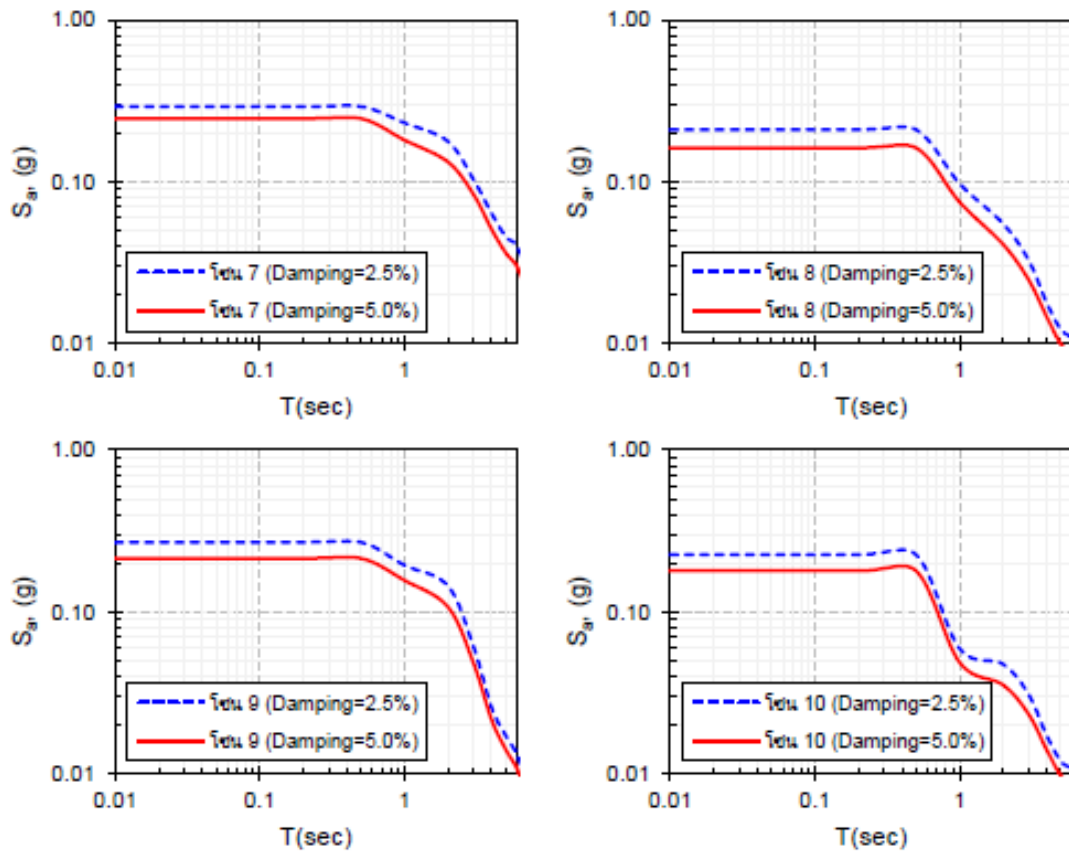
1. สำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า ให้ใช้ตามความเร่ง  
ตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่กำหนดในภาพ 12 ถึง 13 หรือใช้ตามค่าที่แสดง  
ในตาราง 6 ถึง 7





ภาพ 12 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า  
สำหรับโซน 1-6 ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2561)



ภาพ 13 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า  
สำหรับโซน 7-10 ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2561)

ตาราง 6 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ ด้วยวิธีแรงสถิต  
เทียบเท่าสำหรับพื้นที่ในโซนต่าง ๆ (อัตราส่วนความหน่วง 2.5%) ของพื้นที่ใน  
แฉงกรุงเทพ

โซน	$S_a$ (0.01s)	$S_{DS}$ (0.2s)	$S_a$ (0.5s)	$S_{D1}$ (1.0s)	$S_a$ (2.0s)	$S_a$ (3.0s)	$S_a$ (4.0s)	$S_a$ (5.0s)	$S_a$ (6.0s)
1	0.451	0.451	0.451	0.233	0.110	0.053	0.042	0.031	0.029
2	0.439	0.439	0.439	0.249	0.196	0.108	0.058	0.038	0.030
3	0.320	0.320	0.320	0.353	0.217	0.109	0.064	0.044	0.034
4	0.330	0.330	0.330	0.264	0.218	0.100	0.039	0.029	0.027
5	0.220	0.220	0.220	0.250	0.223	0.126	0.067	0.047	0.038
6	0.340	0.340	0.340	0.198	0.207	0.093	0.053	0.040	0.035
7	0.291	0.291	0.291	0.231	0.177	0.103	0.064	0.046	0.040
8	0.210	0.210	0.210	0.097	0.055	0.033	0.018	0.012	0.011
9	0.269	0.269	0.269	0.194	0.144	0.061	0.026	0.017	0.013
10	0.225	0.225	0.225	0.059	0.047	0.031	0.017	0.012	0.010

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2561)

ตาราง 7 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ ด้วยวิธีแรงสถิต  
เทียบเท่าสำหรับพื้นที่ในโซนต่าง ๆ (อัตราส่วนความหน่วง 5.0%) ของพื้นที่ใน  
แฉงกรุงเทพ

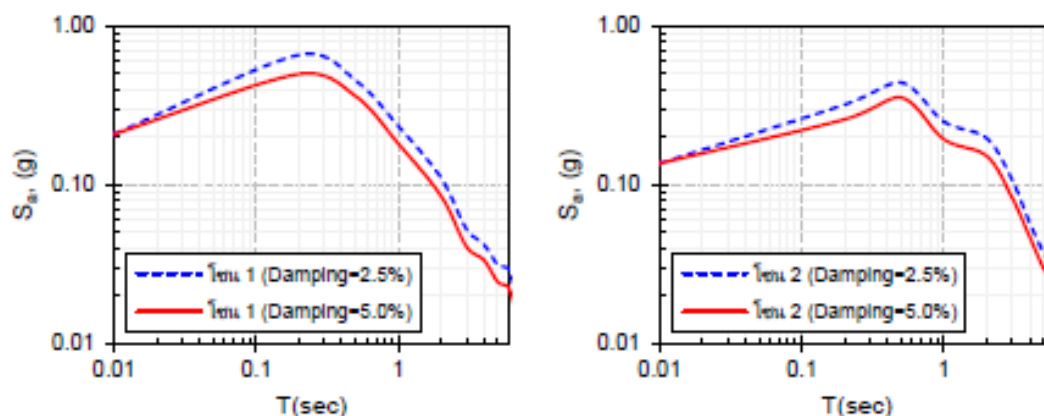
โซน	$S_a$ (0.01s)	$S_{DS}$ (0.2s)	$S_a$ (0.5s)	$S_{D1}$ (1.0s)	$S_a$ (2.0s)	$S_a$ (3.0s)	$S_a$ (4.0s)	$S_a$ (5.0s)	$S_a$ (6.0s)
1	0.360	0.360	0.360	0.181	0.085	0.041	0.034	0.024	0.022
2	0.352	0.352	0.352	0.193	0.151	0.084	0.047	0.030	0.024
3	0.262	0.262	0.262	0.265	0.166	0.085	0.052	0.035	0.026
4	0.287	0.287	0.287	0.207	0.163	0.078	0.032	0.023	0.020
5	0.191	0.191	0.191	0.199	0.168	0.094	0.053	0.037	0.028
6	0.272	0.272	0.272	0.154	0.150	0.077	0.042	0.031	0.026
7	0.246	0.246	0.246	0.181	0.132	0.084	0.051	0.036	0.030

ตาราง 7 (ต่อ)

โซน	$S_a$ (0.01s)	$S_{DS}$ (0.2s)	$S_a$ (0.5s)	$S_{D1}$ (1.0s)	$S_a$ (2.0s)	$S_a$ (3.0s)	$S_a$ (4.0s)	$S_a$ (5.0s)	$S_a$ (6.0s)
8	0.162	0.162	0.162	0.075	0.041	0.025	0.015	0.010	0.008
9	0.214	0.214	0.214	0.156	0.107	0.048	0.022	0.014	0.011
10	0.179	0.179	0.179	0.049	0.035	0.023	0.014	0.010	0.008

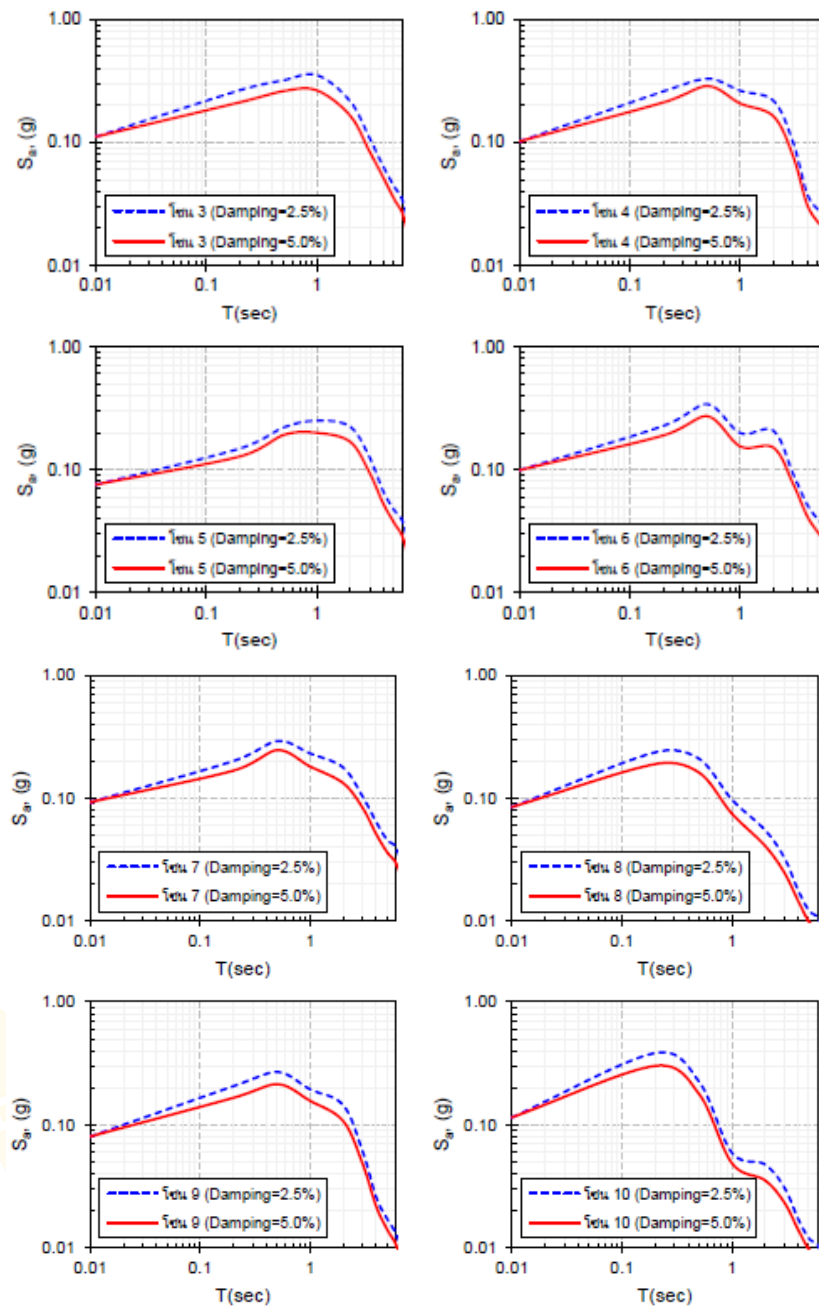
ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2561)

2. สำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ ให้ใช้ตามความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่กำหนดในภาพ 14 ถึง 15 หรือใช้ตามค่าที่แสดงในตาราง 8 ถึง 9



ภาพ 14 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ สำหรับโซน 1-2 ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพ

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2561)



ภาพ 15 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิง พลาศาสตร์  
สำหรับโซน 3-10 ของพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพฯ

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2561)

ตาราง 8 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ ด้วยวิธีพลศาสตร์  
สำหรับพื้นที่ในโซนต่าง ๆ (อัตราส่วนความหน่วง 2.5%) ของพื้นที่ในแอ่ง  
กรุงเทพ

โซน	$S_a$ (0.01s)	$S_{DS}$ (0.2s)	$S_a$ (0.5s)	$S_{D1}$ (1.0s)	$S_a$ (2.0s)	$S_a$ (3.0s)	$S_a$ (4.0s)	$S_a$ (5.0s)	$S_a$ (6.0s)
1	0.208	0.654	0.451	0.233	0.110	0.053	0.042	0.031	0.029
2	0.136	0.318	0.439	0.249	0.196	0.108	0.058	0.038	0.030
3	0.111	0.266	0.320	0.353	0.217	0.109	0.064	0.044	0.034
4	0.102	0.260	0.330	0.264	0.218	0.100	0.039	0.029	0.027
5	0.075	0.148	0.220	0.250	0.223	0.126	0.067	0.047	0.038
6	0.099	0.226	0.340	0.198	0.207	0.093	0.053	0.040	0.035
7	0.093	0.200	0.291	0.231	0.177	0.103	0.064	0.046	0.040
8	0.085	0.236	0.210	0.097	0.055	0.033	0.018	0.012	0.011
9	0.080	0.205	0.269	0.194	0.144	0.061	0.026	0.017	0.013
10	0.115	0.383	0.225	0.059	0.047	0.031	0.017	0.012	0.010

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2561)

ตาราง 9 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ ด้วยวิธีพลศาสตร์  
สำหรับพื้นที่ในโซนต่าง ๆ (อัตราส่วนความหน่วง 5.0%) ของพื้นที่ในแอ่ง  
กรุงเทพ

โซน	$S_a$ (0.01s)	$S_{DS}$ (0.2s)	$S_a$ (0.5s)	$S_{D1}$ (1.0s)	$S_a$ (2.0s)	$S_a$ (3.0s)	$S_a$ (4.0s)	$S_a$ (5.0s)	$S_a$ (6.0s)
1	0.208	0.495	0.360	0.181	0.085	0.041	0.034	0.024	0.022
2	0.136	0.257	0.352	0.193	0.151	0.084	0.047	0.030	0.024
3	0.111	0.212	0.262	0.265	0.166	0.085	0.052	0.035	0.026
4	0.102	0.211	0.287	0.207	0.163	0.078	0.032	0.023	0.020
5	0.075	0.128	0.191	0.199	0.168	0.094	0.053	0.037	0.028
6	0.099	0.189	0.272	0.154	0.150	0.077	0.042	0.031	0.026
7	0.093	0.167	0.246	0.181	0.132	0.084	0.051	0.036	0.030

ตาราง 9 (ต่อ)

โซน	$S_a$ (0.01s)	$S_{DS}$ (0.2s)	$S_a$ (0.5s)	$S_{D1}$ (1.0s)	$S_a$ (2.0s)	$S_a$ (3.0s)	$S_a$ (4.0s)	$S_a$ (5.0s)	$S_a$ (6.0s)
8	0.085	0.189	0.162	0.075	0.041	0.025	0.015	0.010	0.008
9	0.080	0.165	0.214	0.156	0.107	0.048	0.022	0.014	0.011
10	0.115	0.301	0.179	0.049	0.035	0.023	0.014	0.010	0.008

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2561)

### มาตรฐานการการประเมิน และการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1303-57)

กฎหมายว่าด้วยการควบคุมอาคารเป็นกฎหมายที่มีวัตถุประสงค์และเจตนารมณ์ในการควบคุมอาคารให้มีความมั่นคงแข็งแรงและปลอดภัย ซึ่งในปี 2540 ได้มีการออกกฎกระทรวง ฉบับที่ 49 (พ.ศ. 2540) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 กำหนดให้การก่อสร้างอาคารใน 9 จังหวัดทางภาคเหนือ และจังหวัดกาญจนบุรี รวม 10 จังหวัด ซึ่งเป็นเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ต้องมีการคำนวณออกแบบโครงสร้างอาคาร เพื่อให้ต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวดังกล่าวได้ โดยได้ยกเว้นให้อาคารในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวที่ได้รับใบอนุญาตหรือใบรับแจ้งการก่อสร้าง หรืออาคารที่มีอยู่ก่อนวันที่กฎกระทรวงใช้บังคับให้ได้รับการยกเว้น ต่อมาได้มีการปรับปรุงแก้ไขข้อกำหนดบางประการ โดยกฎกระทรวงกำหนดการรับน้ำหนักความต้านทาน ความคงทนของอาคาร และพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2550 แต่อย่างไรก็ตาม อาคารเท่าที่ไม่อยู่ภายใต้บังคับของกฎกระทรวงดังกล่าวควรมีการประเมินความมั่นคงแข็งแรงว่ามีความปลอดภัยจากแผ่นดินไหวมากน้อยเพียงใด และหากผลการประเมินแสดงว่าอาคารนั้นมีความมั่นคงแข็งแรงไม่เพียงพอต่อการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวในระดับที่เหมาะสมแล้ว ก็ควรเสริมความมั่นคงแข็งแรงให้สามารถต้านทานแรงดังกล่าวได้ ประกอบกับได้มีการออกกฎกระทรวงกำหนดหลักเกณฑ์การอนุญาตตัดแปลงอาคารเพื่อเสริมความมั่นคงแข็งแรงของอาคารให้สามารถต้านแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว พ.ศ. 2555 ซึ่งจะต้องมีการประเมินและคำนวณออกแบบการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของอาคาร แต่เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานสำหรับการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร อีกทั้งการจะนำมาตรฐานต่างประเทศมาใช้ ก็ต้องมีการประยุกต์

เปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมกับสภาพความรุนแรงของแผ่นดินไหวและสภาพการก่อสร้างอาคารของประเทศไทยด้วย กรมโยธาธิการและผังเมืองจึงจัดทำมาตรฐานสำหรับการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคาร ซึ่งจะทำให้ประเทศไทยมีแนวทางในการประเมิน และการเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างอาคารในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว อันเป็นการเพิ่มความปลอดภัยในชีวิตและทรัพย์สินของประชาชนในพื้นที่ดังกล่าว

#### 1. ระดับสมรรถนะของอาคาร

ระดับสมรรถนะของอาคาร จำแนกได้ 4 ระดับ คือระดับอาคารปฏิบัติงานได้ (Operational level) ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediate Occupancy Level – IO) ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (Life Safety Level – LS) และระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse Prevention Level – CP) ตารางที่ 9 นิยามระดับความเสียหายโดยประมาณของอาคาร ในส่วนโครงสร้างและส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง ซึ่งอาจคาดหมายได้จากอาคาร ที่ทำการเสริมความมั่นคงแข็งแรงในระดับที่กำหนดไว้ในมาตรฐานนี้ โดยที่แต่ละ ระดับสมรรถนะสามารถนิยามได้ดังนี้

1.1 ระดับอาคารปฏิบัติงานได้ หมายถึง ระดับสมรรถนะอาคารที่ขึ้นส่วนโครงสร้างมีระดับสมรรถนะโครงสร้างแบบเข้าใช้อาคารได้ทันที ดังนิยามในข้อ 2.1 ในขณะที่ส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างเกิดความเสียหายน้อยมาก โดยอาคารมีสภาพสามารถใช้งานได้ตามปกติ แต่อาจไม่ได้เต็มที่ อาจต้องพึ่งระบบฉุกเฉิน เช่น ระบบไฟฟ้า และระบบสาธารณูปโภคสำรองจัดเป็นระดับสมรรถนะอาคารที่มีความเสี่ยงต่อการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินในระดับต่ำที่สุด

1.2 ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที หมายถึง ระดับสมรรถนะอาคารที่ขึ้นส่วนโครงสร้างมีระดับสมรรถนะโครงสร้างแบบเข้าใช้อาคารได้ทันที ดังนิยามในข้อ 2.1 ในขณะที่ส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างเกิดความเสียหายเล็กน้อย อาคารมีสภาพที่สามารถกลับเข้าใช้งานได้ อย่างปลอดภัยทันทีหลังเกิดแผ่นดินไหวแม้ว่าระบบต่าง ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างอาจใช้งานไม่ได้ เช่น เครื่องจักรเกิดการขัดข้องเนื่องจากชิ้นส่วนภายในชำรุด ระบบไฟฟ้ากำลังมีปัญหาในการจ่ายไฟ เป็นต้น แม้ว่าอาคารมีสภาพใช้อาศัยงานได้ทันทีแต่อาจมีความจำเป็นต้องดำเนินการซ่อมแซม และบูรณะระบบต่าง ๆ ที่ได้รับความเสียหายก่อนกลับเข้าใช้งานตามปกติ จัดเป็นระดับสมรรถนะอาคารที่มีความเสี่ยงต่อการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินในระดับที่ต่ำมาก

1.3 ระดับปลอดภัยต่อชีวิต หมายถึง ระดับสมรรถนะอาคารที่ขึ้นส่วนโครงสร้างมีระดับสมรรถนะโครงสร้างแบบปลอดภัยต่อชีวิต ตามที่ระบุในข้อ 2.2 ซึ่งจำเป็นต้องทำการ

ซ่อมแซมและบูรณะอาคารค่อนข้างมากก่อนกลับเข้าใช้งานได้ตามปกติ เป้าหมายระดับนี้จัดว่ามีความเสี่ยงต่อการสูญเสียชีวิต และทรัพย์สินในระดับต่ำ

1.4 ระดับป้องกันการพังทลาย เป็นระดับสมรรถนะที่เกิดความเสียหาย โดยรวมที่รุนแรงมากแต่สามารถทำการอพยพเพื่อหลีกเลี่ยงการเสียชีวิตของผู้ใช้อาคารส่วนใหญ่ได้ เนื่องจากอาคารยังไม่พังทลาย แต่อาจมีความเสี่ยงต่อการสูญเสียชีวิตของผู้ใช้อาคารบางส่วน เนื่องจากการพังทลายของชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง

ตาราง 10 การจำกัดความเสียหาย และระดับสมรรถนะของอาคาร

	ระดับป้องกันการพังทลาย	ระดับปลอดภัยต่อชีวิต	ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที	ระดับอาคารปฏิบัติงานได้
ความเสียหายโดยรวม	รุนแรงมาก	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำมาก
โครงสร้างทั่วไป	<ul style="list-style-type: none"> <li>- อาคารมีสติฟเนสและกำลังค้ำงค้ำงอยู่น้อยมากแต่เสา และกำแพงยังสามารถแบกทานน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วงต่อไปได้</li> <li>- มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นเกิดขึ้นมากแบบถาวร</li> <li>- ทางออกบางแห่งถูกกีดขวางโดยชิ้นส่วนที่พังลงมา</li> <li>- กำแพงอิฐก่อและผนังกันตก (parapets) พังเสียหาย</li> <li>- อาคารใกล้เคียงล้ม</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- โครงสร้างอาคารทุกชั้นมีสติฟเนสและกำลังค้ำงค้ำงไว้ได้พอสมควร</li> <li>- องค์อาคารที่รับน้ำหนักจากแรงโน้มถ่วงคงความสามารถแบกทานน้ำหนักบรรทุกทุกดังกล่าวได้</li> <li>- ไม่มีการพังทลายของกำแพงหรือผนังกันตกในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของชิ้นส่วน</li> <li>- มีการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นเล็กน้อยแบบถาวร</li> <li>- มีความเสียหายต่อผนังกันห้อง</li> <li>- อาคารอาจแยกการซ่อมแซมได้อย่างประหยัด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่มีการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นแบบถาวร</li> <li>- โครงสร้างโดยรวมยังคงสติฟเนสและกำลังส่วนใหญ่ของเดิมไว้ได้</li> <li>- ผนังรอบอาคาร (facades) ผนังกันห้อง และฝ้าเพดานรวมทั้งชิ้นส่วนโครงสร้างเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก</li> <li>- ลีฟต์สามารถเริ่มต้นใช้ใหม่ได้ทันที</li> <li>- ระบบดับเพลิงสามารถทำงานได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่มีการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นอย่างถาวร</li> <li>- โครงสร้างโดยรวมยังคงสติฟเนส และกำลังส่วนใหญ่ของเดิมไว้ได้</li> <li>- ผนังรอบอาคาร ผนังกันห้องและฝ้าเพดานรวมทั้งชิ้นส่วนโครงสร้าง เกิดรอยร้าวขนาดเล็กมาก</li> <li>- ระบบที่สำคัญต่อการดำเนินการปกติทั้งหมดสามารถทำงานได้</li> </ul>

ตาราง 10 (ต่อ)

	ระดับป้องกันการ พังทลาย	ระดับปลอดภัยต่อชีวิต	ระดับเข้าใช้อาคาร ได้ทันที	ระดับอาคาร ปฏิบัติงานได้
ส่วนที่ไม่ใช่ โครงสร้าง (nonstructural components)	- มีความเสียหายมาก	- ขึ้นส่วนทาง สถาปัตยกรรม ระบบ เครื่องจักร และไฟฟ้ามี ความเสียหาย แต่ไม่มี ความเสี่ยงจากวัตถุตก หล่นลงมา	- อุปกรณ์ และ สิ่งของภายใน โดยทั่วไปยังคงอยู่แต่ อาจไม่สามารถใช้ งานได้เนื่องจาก ความเสียหายด้าน กลไกหรือระบบ สาธารณูปโภคใช้ งานไม่ได้	- ไม่มีความเสียหาย เกิดขึ้น - ส่วนของระบบ ไฟฟ้า และ สาธารณูปโภคต่าง ๆ สามารถใช้งานได้ ถึงแม้ว่าอาจต้องใช้ ระบบฉุกเฉินช่วย สนับสนุน

**ที่มา:** กรมโยธาธิการและผังเมือง (2557)

## 2. ระดับสมรรถนะของโครงสร้าง

ระดับสมรรถนะของโครงสร้างอาคารจำแนกเป็น 3 ระดับ คือ ระดับเข้าใช้อาคารได้ทันที ระดับปลอดภัยต่อชีวิต และระดับป้องกันการพังทลาย

ตาราง 11 กำหนดลักษณะความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นแก่ชิ้นส่วนโครงสร้างที่ระดับสมรรถนะต่าง ๆ โดยที่ชิ้นส่วนที่มีผลต่อสติฟเนสต้านข้าง การกระจายแรงในโครงสร้าง หรือการรับแรงเนื่องจากการเสีรูปต้านข้างของโครงสร้าง ต้องจำแนกเป็นชิ้นส่วนหลักหรือชิ้นส่วนรองสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีความจำเป็นต่อการต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจัดว่าเป็นชิ้นส่วนหลัก ส่วนชิ้นส่วนโครงสร้างที่ไม่มีความจำเป็นต่อการต้านทานแรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง เพื่อให้โครงสร้างอาคารเป็นไปตามระดับสมรรถนะที่เลือกใช้ จัดว่าเป็นชิ้นส่วนรอง

### 2.1 ระดับสมรรถนะโครงสร้างแบบเข้าใช้อาคารได้ทันที

ระดับสมรรถนะโครงสร้างแบบเข้าใช้อาคารได้ทันที หมายถึงสถานะความเสียหายของโครงสร้างภายหลังเหตุการณ์แผ่นดินไหวซึ่งอาคารยังคงความปลอดภัย และสามารถใช้งานอาคารได้ทันที โดยระบบโครงสร้างอาคารยังคงรักษาสภาพใกล้เคียงกับสภาพเมื่อก่อนเกิดแผ่นดินไหวทั้งด้านกำลังความต้านทานและสติฟเนส แต่อาจต้องทำการซ่อมแซม

โครงสร้างรองเล็กน้อย ซึ่งโดยทั่วไปไม่จำเป็นต้องดำเนินการก่อนกลับเข้าใช้งานในอาคาร ทั้งนี้ความเสี่ยงโดยรวมต่อการบาดเจ็บที่อาจถึงขั้นสูญเสียชีวิตอันเนื่องมาจากความเสียหายของโครงสร้างคาดว่าจะอยู่ในระดับต่ำมาก

## 2.2 ระดับสมรรถนะโครงสร้างแบบปลอดภัยต่อชีวิต

ระดับสมรรถนะโครงสร้างแบบปลอดภัยต่อชีวิต หมายถึงสถานะความเสียหายของโครงสร้างภายหลังเหตุการณ์แผ่นดินไหวซึ่งอาคารมีชิ้นส่วนโครงสร้างที่เกิดความเสียหายเป็นนัยสำคัญโดยไม่มีเศษวัตถุร่วงหล่นลงมา แต่ยังคงกำลังความต้านทานเพียงพอแก่การป้องกันการพังทลายบางส่วนหรือทั้งหมด ทั้งนี้ความเสี่ยงโดยรวมต่อการบาดเจ็บที่อาจถึงขั้นสูญเสียชีวิตอันเนื่องมาจากความเสียหายของโครงสร้างคาดว่าจะอยู่ในระดับต่ำ

## 2.3 ระดับสมรรถนะโครงสร้างแบบป้องกันการพังทลาย

ระดับสมรรถนะโครงสร้างแบบป้องกันการพังทลาย หมายถึงสถานะความเสียหายของโครงสร้างภายหลังเหตุการณ์แผ่นดินไหวซึ่งอาคารเกิดความเสียหายในชิ้นส่วนโครงสร้างมาก และยังคงความสามารถแบกทานน้ำหนักบรรทุกจากแรงโน้มถ่วงได้ อย่างไรก็ตามอาคารมีสภาพใกล้พังทลายบางส่วนหรือทั้งหมด ทำให้ไม่ปลอดภัยที่จะใช้งานต่อไปและมีความเสี่ยงถึงชีวิตได้

ตาราง 11 ระดับสมรรถนะของโครงสร้าง และความเสียหาย

ชิ้นส่วน Elements	ระดับป้องกันการ พังทลาย	ระดับปลอดภัยต่อชีวิต	ระดับเข้าใช้อาคารได้ ทันที
โครงสร้าง ดัดคอนกรีต	<p>ชิ้นส่วนหลัก</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- เกิดรอยแตกกว้างอย่างรุนแรงและเกิดจุดหมุนพลาสติกสำหรับชิ้นส่วนที่มีความเหนียว</li> <li>- เกิดการแตกร้าวอย่างจำกัด (limited cracking)</li> </ul> <p>รวมถึงเกิดการพังเสียหายบริเวณรอยต่อทาบในเสาที่ไม่มีมีความเหนียว</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีความเสียหายอย่างรุนแรงต่อคานที่หุ้มและมีรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือน (shear cracking) (ความกว้างไม่เกิน 3 มิลลิเมตร) สำหรับเสาที่มีความเหนียว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เกิดรอยแตกร้าวเล็กน้อย</li> <li>- เกิดการครากอย่างจำกัดที่อาจเกิดขึ้นได้ในบางตำแหน่ง</li> <li>- ไม่มีการกะเทาะของคอนกรีต (มีความเครียดต่ำกว่า 0.003)</li> </ul>

ตาราง 11 (ต่อ)

ชิ้นส่วน Elements	ระดับป้องกันการ พังทลาย	ระดับปลอดภัยต่อชีวิต	ระดับเข้าใช้อาคารได้ ทันที	
โครงสร้าง ดัดคอนกรีต	ชิ้นส่วน รอง	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีความเสียหายอย่างรุนแรงบริเวณเสาสั้น</li> <li>- เกิดการกะเทาะรุนแรงของคอนกรีตหุ้มในเสาและคาน มีความเสียหายที่รอยต่ออย่างรุนแรงเกิดการโก่งเดาะในเหล็กเสริมบางส่วน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เกิดรอยร้าวที่จุดต่อ (joint cracks) มีความกว้างไม่เกิน 3 มิลลิเมตร</li> <li>- เกิดรอยแตกร้าวอย่างรุนแรงและเกิดจุดหมุนพลาสติกสำหรับชิ้นส่วนที่มีความเหนียว</li> <li>- เกิดการแตกร้าวอย่างจำกัด รวมถึงเกิดการพังเสียหายบริเวณรอยต่อทาบในเสาที่ไม่มีความเหนียว</li> <li>- มีความเสียหายอย่างรุนแรงบริเวณเสาสั้น</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีการกะเทาะของคอนกรีตเล็กน้อยที่บางตำแหน่งในเสาและคานที่มีความเหนียว</li> <li>- เกิดรอยแตกร้าวเนื่องจากการตัดในคานและเสา</li> <li>- การแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนตรงรอยต่อมีความกว้างน้อยกว่า 1.5 มิลลิเมตร</li> </ul>
โครงสร้าง ดัดคอนกรีต	การ เคลื่อนที่ ระหว่าง ชั้น	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ร้อยละ 4 แบบชั่วคราวหรือแบบถาวร</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ร้อยละ 2 แบบชั่วคราว</li> <li>- ร้อยละ 1 แบบถาวร</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ร้อยละ 1 แบบชั่วคราว</li> <li>- การเคลื่อนที่แบบถาวรมีค่าน้อยมาก</li> </ul>
กำแพง คอนกรีต	ชิ้นส่วน หลัก	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เกิดรอยแตกร้าวขนาดใหญ่เนื่องจากแรงคัด และแรงเฉือนจนทำให้เศษวัสดุร่วงหล่นได้</li> <li>- เกิดการเลื่อนไถลตรงรอยต่อ</li> <li>- เกิดการแตกอัดในคอนกรีตรุนแรงและเกิดการโก่งเดาะในเหล็กเสริม</li> <li>- บริเวณรอบช่องเปิดพังเสียหาย</li> <li>- มีความเสียหายที่องค์อาคารขอบ (boundary</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- องค์อาคารขอบ เกิดการแตกร้าวและปูนกะเทาะออกบ้าง รวมถึงมีการโก่งเดาะของเหล็กเสริมในวงจำกัด</li> <li>- เกิดการเลื่อนไถลตรงรอยต่อเล็กน้อย</li> <li>- บริเวณรอบช่องเปิดมีความเสียหาย</li> <li>- มีรอยแตกร้าวจากการคัดและการอัด (crushing) บ้าง</li> <li>- คานยึดต่อกำแพงมีรอยแตกร้าวเนื่องจากแรงเฉือนและแรงคัดอย่างรุนแรง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กบนกำแพงความกว้างน้อยกว่า 1.5 มิลลิเมตร</li> <li>- เกิดรอยแตกร้าวในคานยึดต่อกำแพง มีความกว้างน้อยกว่า 3 มิลลิเมตร</li> </ul>

ตาราง 11 (ต่อ)

ชิ้นส่วน Elements	ระดับป้องกันการ พังทลาย	ระดับปลอดภัยต่อชีวิต	ระดับเข้าใช้อาคารได้ ทันที
กำแพง คอนกรีต	ชิ้นส่วน รอง element) ของกำแพง อย่างรุนแรง - คานยึดต่อกำแพงแตก เสียหายจนหมดสภาพ - กำแพงแตกร้าว และ หมดสภาพ	- มีการแตกหักบ้างแต่สภาพ คอนกรีตโดยรวมยังคงอยู่ - เกิดรอยแตกร้าวขนาดใหญ่ เนื่องจากแรงดัดและแรงเฉือน - เกิดการเลื่อนไถลตรง รอยต่อ - เกิดการแตกหักอย่างรุนแรง - บริเวณรอบช่องเปิดพัง เสียหาย - มีความเสียหายที่องค์ อาคาร ขอบของกำแพงอย่าง รุนแรง - คานยึดต่อกำแพงแตกร้าว และหมดสภาพ	- เกิดรอยแตกร้าว เล็กน้อยในกำแพง - เกิดการเลื่อนไถลตรง รอยต่อโครงสร้าง เล็กน้อย - เกิดรอยแตกร้าวใน คานยึดต่อกำแพง มี ความกว้างน้อยกว่า 3 มิลลิเมตร - เกิดการกะเทาะ เล็กน้อย
กำแพง คอนกรีต	การ เคลื่อนที่ ระหว่าง ชั้น - ร้อยละ 2 แบบชั่วคราว หรือแบบถาวร	- ร้อยละ 1 แบบชั่วคราว - ร้อยละ 0.5 แบบถาวร	- ร้อยละ 0.5 แบบ ชั่วคราว - การเคลื่อนที่แบบ ถาวรมีค่าน้อยมาก
ฐานราก	ทั่วไป - เกิดการทรุดตัว และ เอียงตัวมาก	- เกิดการทรุดตัวน้อยกว่า 150 มิลลิเมตร และผลต่าง การทรุดตัวน้อยกว่า 12 มิลลิเมตร ภายในช่วง 10 เมตร	- เกิดการทรุดตัวน้อย และเกิดการเอียงตัวน้อย มากไม่มีนัยสำคัญ

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2557)

### 3. สเปกตรัมผลตอบสนองทั่วไป

สเปกตรัมผลตอบสนองแบบทั่วไปสำหรับการประเมินและออกแบบการเสริมความมั่นคงแข็งแรงโครงสร้างให้มีค่าครึ่งหนึ่งของสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์ ใน มยพ.1302-52 ตามสมการที่ 6 และ 7

$$S_{XS} = 0.5S_{DS} \quad (6)$$

$$S_{X1} = 0.5S_{D1} \quad (7)$$

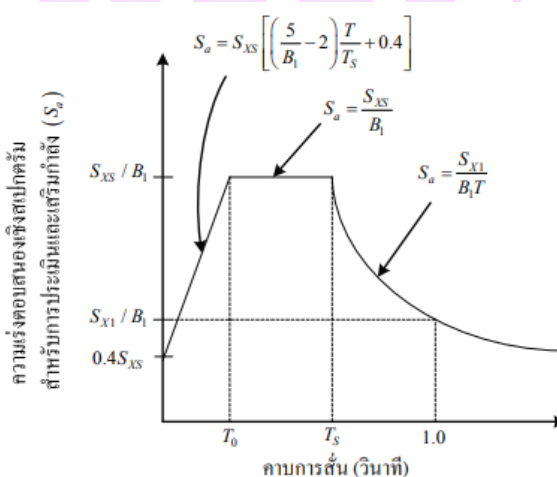
โดยที่  $S_{DS}$  คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (g)

$S_{D1}$  คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 1 วินาที (g)

$S_{XS}$  คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการประเมิน และออกแบบเสริมกำลังที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (g)

$S_{X1}$  คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการประเมิน และออกแบบเสริมกำลังที่คาบการสั่น 1 วินาที (g)

สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการประเมิน และออกแบบเสริมกำลัง เป็นไปตามภาพ 16 โดยที่  $T_s = S_{X1} / S_{XS}$



ภาพ 16 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการประเมิน และออกแบบเสริมกำลัง

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2557)

ระดับความรุนแรงที่กำหนด มีความสอดคล้องกับระดับแผ่นดินไหวที่คาบการกลับประมาณ 225 ปี ซึ่งมาตรฐานนี้ยอมให้ใช้ระดับความรุนแรงที่ต่ำกว่าค่าสำหรับการออกแบบอาคารใหม่ของ มยพ.1302-52 เพราะอาคารเก่าที่ไม่ได้ออกแบบให้สามารถต้านทานแผ่นดินไหวไว้ตั้งแต่แรกย่อมมีกำลังต้านทานที่น้อยกว่าอาคารใหม่ ยากต่อการปรับปรุงให้มีความแข็งแรงเทียบเท่าอาคารใหม่ได้ อีกทั้งได้ผ่านการใช้งานมาแล้วระยะหนึ่ง ส่งผลให้ระยะเวลาการใช้งานที่เหลืออยู่จนอาคารหมดอายุมีค่าน้อยกว่าอาคารใหม่ เหตุการณ์แผ่นดินไหวที่ระดับความรุนแรงนี้เรียกว่า แผ่นดินไหวระดับความปลอดภัยขั้นพื้นฐาน

การสร้างสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์จำเป็นต้องทราบประเภทชั้นดิน ซึ่งให้อ้างอิงวิธีการจำแนกประเภทชั้นดินตาม ภาคผนวก ก ของ มยพ.1302-52

#### 4. การจำลองโครงสร้าง และการออกแบบ

ในการเสริมความแข็งแรงให้แก่องค์อาคารคอนกรีตในอาคารเดิม ให้ยึดถือตามมาตรฐานสากล ยกเว้นในกรณีที่มาตราฐานนี้กำหนดไว้เป็นอย่างอื่น ผลจากการประเมินโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหวจะต้องบ่งชี้องค์อาคารที่มีการวิบัติแบบเปราะ หรือแบบมีความเหนียวต่ำ ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่ถูกควบคุมโดยแรงตามที่กำหนดใน มยพ.1303-57

การประเมินชิ้นส่วนโครงสร้างจะต้องคำนึงถึงแรงที่ต้องต้านทานและกำลังต้านทานที่แปรเปลี่ยนตามความยาวของชิ้นส่วน ซึ่งอาจทำให้เกิดการวิบัติที่ช่วงกลางของชิ้นส่วนได้ เช่น เมื่อมีแรงทางด้านข้างและน้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้งกระทำพร้อมกันอาจทำให้เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดที่กลางช่วงคานได้หรือตรงตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของหน้าตัดหรือปริมาณเหล็กเสริมที่ทำให้กำลังรับน้ำหนักลดลง และตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดหรือเหล็กเสริมอย่างทันทีทันใด รวมถึงตำแหน่งที่ต่อทาบเหล็กเสริมที่อาจทำให้เกิดความเข้มข้นของหน่วยแรง (stress concentrations) มากเป็นพิเศษ

ค่าสตีเฟนสของชิ้นส่วนภายใต้ แรงเฉือน แรงดัด แรงตามแนวแกน และการรูดไถลของเหล็กเสริม ต้องเป็นค่าที่สอดคล้องกับระดับการเสียรูปของชิ้นส่วนนั้นภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกแนวตั้ง และแรงแผ่นดินไหว และต้องคำนึงถึงหน่วยแรงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงเชิงปริมาตรเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการหดตัว (shrinkage) อีกด้วย

##### 4.1 วิธีแบบเชิงเส้น

เมื่อใช้การวิเคราะห์วิธีแบบเชิงเส้นใน มยพ.1303-57 ให้ใช้ค่าสตีเฟนสประสิทธิผลของชิ้นส่วนโครงสร้างแบบซีแคนที่มีค่าเท่ากับความชันซึ่งลากจากจุดเริ่มต้นไปที่

จุดคราก (secant value to the yield point) อย่างไรก็ตามอนุญาตให้ใช้ค่าสตีเฟนส์ที่สูงกว่านี้ได้ เมื่อมีผลการวิเคราะห์ที่ยืนยันได้ว่าค่าสตีเฟนส์นั้นสอดคล้องกับระดับของแรงที่ใช้ในการออกแบบ ในกรณีที่ไม่มีผลการวิเคราะห์ที่ละเอียดกว่านี้ ให้ใช้ค่าสตีเฟนส์ประสิทธิผลซึ่งคำนวณจากค่าความเกร็งประสิทธิผล (effective rigidity) ตามตารางที่ 12

#### 4.2 วิธีแบบไม่เชิงเส้น

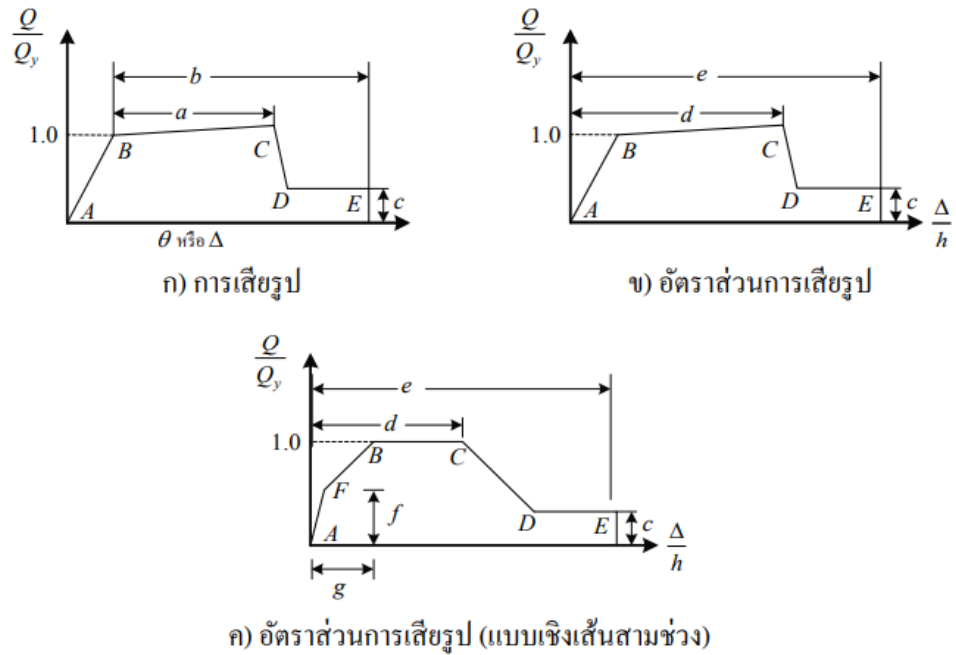
เมื่อใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบไม่เชิงเส้นใน มยพ.1303-57 ต้องจำลองพฤติกรรมของชิ้นส่วนด้วยความสัมพันธ์ระหว่างแรง และการเสียรูปแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งได้มาจากผลการทดสอบหรือตามที่กำหนดใน มยพ.1303-57 สำหรับวิธีสถิตไม่เชิงเส้นให้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปทั่วไปดังภาพ 17 หรือใช้ความสัมพันธ์อื่นที่สามารถแสดงพฤติกรรมภายใต้การเสียรูปที่เพิ่มขึ้นในทิศทางเดียว (monotonically increasing deformation) สำหรับวิธีพลศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น ความสัมพันธ์ระหว่างแรง และการเสียรูปต้องแสดงทั้งพฤติกรรมภายใต้การเคลื่อนที่ในทิศทางเดียว (monotonic loading) และการเสียรูปแบบสลับทิศทางหลายรอบ (multiple reversed deformation cycles)

ภาพ 17 กำหนดลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปแบบทั่วไปที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจากจุด A (เมื่อไม่มีแรงกระทำ) ไปที่จุด B ซึ่งเป็นจุดครากประสิทธิผล ต่อจากนั้นมีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นจากจุด B ไปที่จุด C โดยมีค่าสตีเฟนส์ที่ลดลงเมื่อการเสียรูปมากกว่าจุด C แรงต้านทานมีค่าลดลงอย่างทันทีทันใดไปสู่จุด D ซึ่งอาจมีแรงต้านทานคงค้างบ้าง และจุด E ซึ่งเป็นจุดสุดท้ายที่สูญเสียแรงต้านทานโดยสิ้นเชิง ความชันระหว่างจุด A และจุด B ให้กำหนดตาม มยพ.1303-57 ความชันระหว่างจุด B และจุด C ที่ไม่ได้คำนึงถึงผลของแรงแนวตั้งภายใต้การเคลื่อนที่ทางด้านข้าง ( $P\Delta$  effect) กำหนดให้มีค่าระหว่างร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 10 ของค่าความชันเริ่มต้น (ช่วง AB) หรืออาจใช้ค่าความชันอื่นที่อ้างอิงตามผลการทดสอบหรือการวิเคราะห์ที่น่าเชื่อถือ ที่จุด C ค่าพิกัดทางแกน y มีค่าเท่ากับกำลังต้านทานสูงสุดของชิ้นส่วน และพิกัดทางแกน x มีค่าเท่ากับค่าการเสียรูปที่จุดเริ่มต้นของการสูญเสียกำลังต้านทาน ในการวิเคราะห์อนุญาตให้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรง และการเสียรูปที่แสดงเฉพาะจุด A B และ C เท่านั้นได้ หากสามารถแสดงให้เห็นว่าการเสียรูปของชิ้นส่วนยังไม่เกินจุด C ค่าตัวแปรสำหรับจุดต่าง ๆ ในภาพ 17 ให้เป็นไปตามที่กำหนดใน มยพ.1303-57 ให้ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูปแบบอื่นได้ถ้ามีผลการทดสอบหรือการวิเคราะห์ที่น่าเชื่อถือรองรับ

ตาราง 12 ความแข็งแรงประสิทธิผล

ชั้นส่วน	ความแข็งแรง สำหรับการดัด	ความแข็งแรง สำหรับการเฉือน	ความแข็งแรงตาม แนวแกน
คาน (ไม่อัดแรง)	$0.3E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	-
คาน (อัดแรง)	$E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	-
เสาที่รับแรงอัดจากน้ำหนัก บรรทุกเนื่องจากแรงโน้มถ่วง $\geq 0.5A_g f'_c$	$0.7E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$
เสาที่รับแรงอัดจากน้ำหนัก บรรทุกเนื่องจากแรงโน้มถ่วง $\leq 0.1A_g f'_c$ หรือเสาเข็มที่รับ แรงดึง	$0.3E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$ (เสารับ แรงอัด) $E_s A_s$ (เสารับแรง ดึง)
กำแพง (ไม่มีรอยแตกร้าว)	$0.8E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$
กำแพง (มีรอยแตกร้าว)	$0.5E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$
พื้นไร้คาน (ไม่อัดแรง)	ดูใน มยพ.1303- 57	$0.4E_c A_g$	-
พื้นไร้คาน (อัดแรง)	ดูใน มยพ.1303- 57	$0.4E_c A_g$	-

ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2557)



ภาพ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรง และการเสียรูปแบบทั่วไป

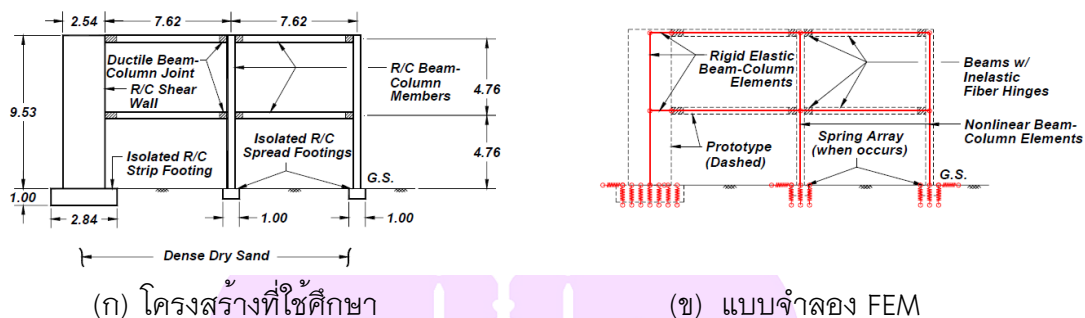
ที่มา: กรมโยธาธิการและผังเมือง (2557)

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการประเมินอาคารต้านแผ่นดินไหวโดยใช้แบบจำลองที่คำนึงถึงผลของปฏิสัมพันธ์ดินและโครงสร้าง พบว่ามีงานวิจัยที่น่าสนใจดังนี้

Hutchinson, Raychowdhury and Chang (2006) ได้ทำการศึกษาผลตอบสนองของแบบจำลองอาคารที่มีกำแพงรับแรงเฉือน และระบบโครง คาน เสา โดยรวมปฏิสัมพันธ์ระหว่าง ดิน ฐานราก และโครงสร้างไว้ในแบบจำลอง (soil–foundation–structure interaction (SFSI)) ทำการวิเคราะห์ภายใต้วิธีประวัติเวลาแบบไม่เชิงเส้น แบบจำลองของเขาใช้ลักษณะโครงสร้าง 2 มิติ โดยทำการออกแบบให้โครงคานเสาที่มีความเหนียว ผลการศึกษาพบว่าการหมุนของฐานราก การเคลื่อนตัวในแนวราบ และการหลุดตัว ถูกพิจารณาโดยพฤติกรรมเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองที่รวมปฏิสัมพันธ์ระหว่างดิน ฐานราก และโครงสร้าง ให้ผลที่ดีกว่าในการลดแรงแผ่นดินไหวออกแบบ และลดการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นได้

นอกจากนี้แล้ว ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและฐานรากมีผลให้มีการสลายพลังงานที่มากขึ้นให้โครงสร้างฐานราก (ภาพ 18)



(ก) โครงสร้างที่ใช้ศึกษา

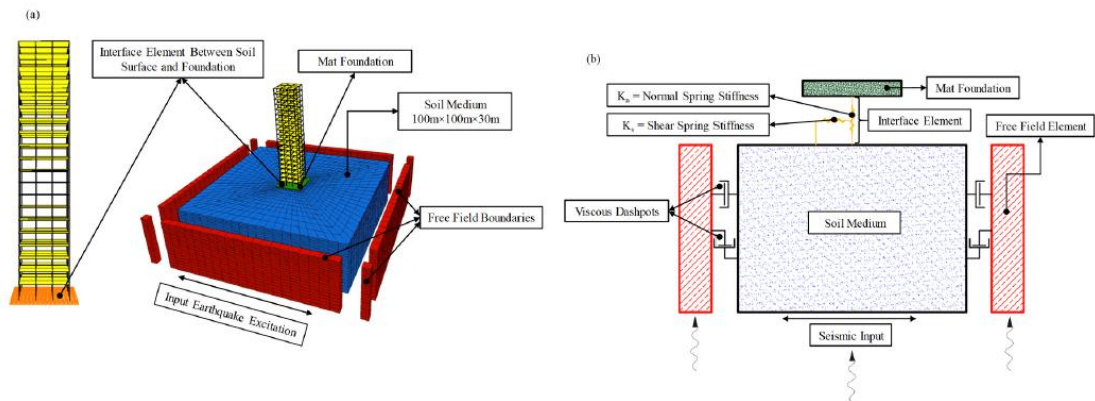
(ข) แบบจำลอง FEM

ภาพ 18 แบบจำลองโครงสร้าง 2 มิติสำหรับการออกแบบ

ที่มา: Hutchinson, Raychowdhury and Chang (2006)

Yeganeh and Fatahi (2019) ทำการศึกษาผลกระทบของแบบจำลองส่วนประกอบโครงสร้างดิน ต่อสมรรถนะของโครงสร้างที่ฐานรากได้เกิดการหมุน โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ FLAC3D ในการสร้างแบบจำลองอาคาร 20 ชั้นบนฐานรากตื้น (ภาพ 19) โดยเปรียบเทียบระหว่างจุดรองรับของฐานแบบยึดแน่น กับฐานรองรับแบบยึดหยุ่น (รวมผลของโครงสร้างดิน) โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่ใกล้เคียง Chi-Chi earthquake (Taiwan 1999) และคลื่นแผ่นดินไหว Kohriyama earthquake (Japan 2011) มาทำการศึกษาโดยลดความรุนแรงแผ่นดินไหวให้สอดคล้องกับกราฟสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ และปรับแก้คุณสมบัติต่างๆ ของอัลกอลกอริทึมโครงสร้างดินให้เหมาะสม สำหรับแบบจำลองโครงสร้างด้านบน (super structure) ได้กำหนดจุดหมุนพลาสติกให้กับโครงสร้างเพื่อให้โครงสร้างมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นด้วย ในการศึกษานี้ได้เก็บข้อมูล แรงเฉือนที่ฐาน การกระจายแรงเฉือนขึ้นในแต่ละชั้นความสูงของโครงสร้าง การเคลื่อนตัวสูงสุดและการเคลื่อนตัวอย่างถาวร และพบว่าฐานรากเกิดการหมุน ที่ระดับสมรรถนะปลอดภัยต่อชีวิตพบว่า การเคลื่อนตัวระหว่างชั้นไม่ผ่านเกณฑ์ในขณะที่โครงสร้างดินวิบัติก่อนที่อยู่ในสถานะพลาสติก ซึ่งการศึกษาของเขาพบว่าสถานะความแข็งของโครงสร้างดิน (soil hardening plasticity) นั้นมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่ออาคาร 20 ชั้นระบบโครงสร้างด้านแรงตัด โดยผลการศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับ

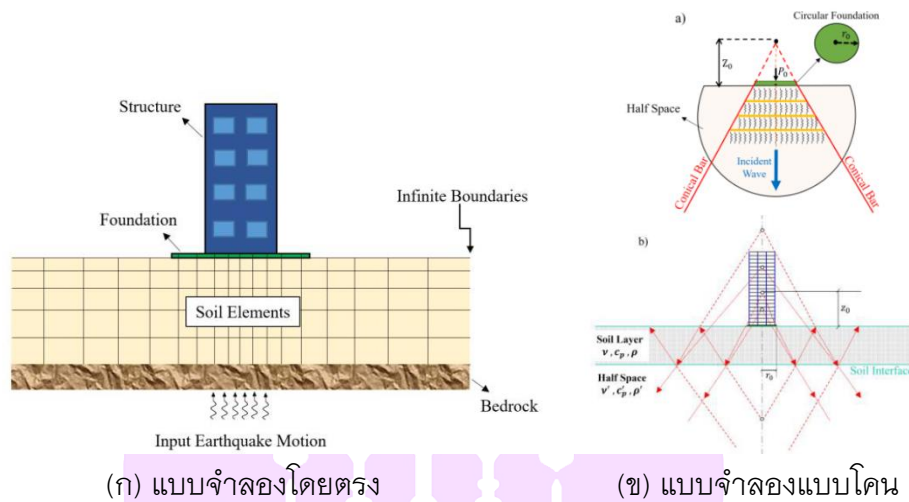
โครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันที่เป็นฐานแผ่และฐานรากมีการหมุนเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว



ภาพ 19 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรม LAC3D

ที่มา: Yeganeh and Fatahi (2019)

Khazaei, Amiri and Khalilpour (2017) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการประเมินโครงสร้างอาคารที่รวมปฏิสัมพันธ์ระหว่าง ดิน ฐานราก และโครงสร้างไว้ด้วยกัน (soil-foundation-structure interaction (SFSI)) โดยใช้แบบจำลองดิน 2 รูปแบบได้แก่ แบบจำลองดินโดยตรงที่มีขอบเขตที่แน่นอน (direct method) และแบบจำลองดินแบบโคน (cone method) (ภาพ 20) โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ (ABAQUS) โดยแบบจำลองโครงสร้างดินรูปโคนนี้เป็นแบบจำลองที่สร้างและพัฒนาขึ้นด้วยวิธีการประมาณค่า เพื่อการคำนึงถึงผลปฏิสัมพันธ์ระหว่าง ดิน ฐานราก และโครงสร้าง โดยใช้ได้ทั้งอาคารสูง และอาคารเตี้ย โดยทำการศึกษาผลกระทบของโครงสร้างดินแบบไม่เชิงเส้น ฐานรากมีลักษณะแข็งเกร็ง และกำหนดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างดินผิวสัมผัสของดิน กับฐานราก ภายใต้แรงแผ่นดินไหว โดยได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองแบบตรงและแบบโคน ด้วยชุดคลื่นแผ่นดินไหวรูปแบบต่าง ๆ ทำการเปรียบเทียบทั้งสองแบบจำลองเพื่อหาค่าส่วนเบี่ยงเบนกำลังสอง (root-mean square deviation) เพื่อแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองโครงสร้างดินแบบโคนนั้นสามารถให้ค่าได้ใกล้เคียงกับแบบจำลองโครงสร้างดินโดยตรง ซึ่งแบบจำลองโครงสร้างดินมีความรวดเร็วในการประมาณค่าและให้ความแม่นยำที่ดีกว่า

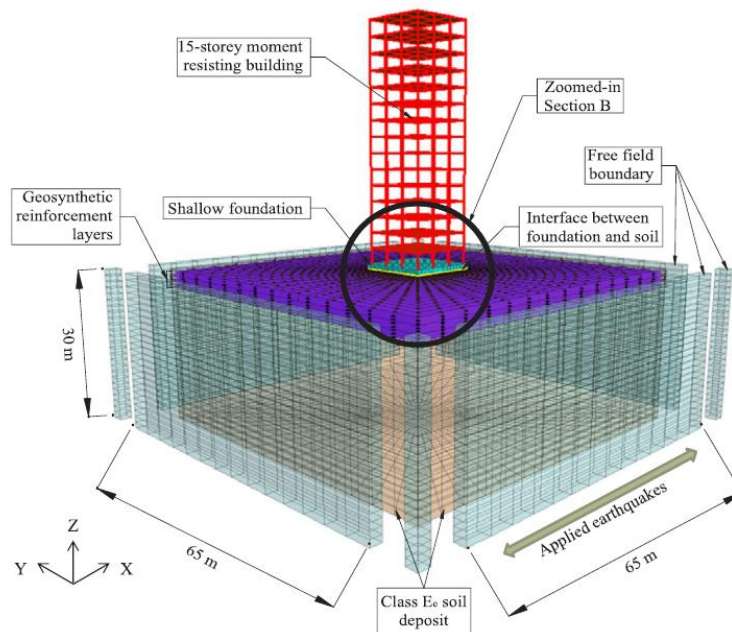


ภาพ 20 แบบจำลองที่คำนึงถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างดิน ฐานราก และโครงสร้าง

ที่มา: Khazaei, Amiri and Khalilpour (2017)

Xu and Fatahi (2019) ได้ทำการศึกษาดินฟ้าใยสังเคราะห์ (geosynthetics) เพื่อลดการเคลื่อนตัวที่ยังคงค้างในโครงสร้างดินภายหลังเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว เนื่องจากดินฟ้าใยสังเคราะห์ได้ถูกนำไปประยุกต์กับโครงสร้างดินหลายรูปแบบ เช่น การปรับปรุงพื้นดิน ควบคุมการกัดเซาะดิน เสถียรภาพดินลาด และการเสริมกำลังให้กับฐานราก โดยใช้ราคาไม่สูงมากนัก ในการศึกษาได้นำดินฟ้าใยสังเคราะห์นี้มาเสริมวัสดุคอมโพสิตให้กับดิน (geosynthetic reinforced composite soil, GRCS) เพื่อป้องกันแผ่นดินไหวให้ระบบฐานรากของอาคารความสูงปานกลางที่ใช้ฐานรากแผ่ ที่มีโอกาสเกิดการเคลื่อนตัวคงค้างหรือมีการหลุดตัวของฐานรากแบบจำลองโครงสร้างแบบ 3 มิติจากโปรแกรม FLAC3D ที่ใช้ในการศึกษาได้ทำการวิเคราะห์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ระบบโครงคานเสา (ภาพ 21) ภายใต้แรงแผ่นดินไหวประหัตเวลา 1978 Tabas, 1994 Northridge และ 1995 Kobe ผลตอบสนองของระหว่างปฏิสัมพันธ์ดิน ฐานราก และโครงสร้างโดยใช้วิธีแบบตรง (direct method) การวิเคราะห์เป็นแบบไม่เชิงเส้น ผลการศึกษาพบว่า GRCS สามารถเป็นทางเลือกหนึ่งของวิศวกรผู้ออกแบบในการเลือกใช้เพื่อจำกัดการหลุดตัวที่มากเกินไปเนื่องจากแรงแผ่นดินไหว นอกจากนี้แล้วการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นสูงสุด และการเคลื่อนตัวคงค้างซึ่งนิยมใช้ประเมินความสามารถอาคารต้านแผ่นดินไหว ได้ถูกควบคุมได้ด้วยแบบจำลองที่ใช้ GRCS ที่บริเวณใต้ฐาน GRCS สามารถเพิ่มสมรรถนะ

ให้กับโครงสร้างอาคารที่มีฐานรากตื้นด้านทานแผ่นดินไหวได้มากขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอาคารที่มีฐานรากลึกโดยที่มีค่าใช้จ่ายไม่สูงอีกด้วย



ภาพ 21 แบบจำลอง FEM ที่ประยุกต์ใช้ GRCS ใต้ฐานเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว

ที่มา: Xu and Fatahi (2019)

Sae-Long, et al. (2020) ได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองโครงสร้างอาคาร และเชื่อมต่อกับโครงสร้างดินด้วยสปริง สามารถทำนายพฤติกรรมไม่เชิงเส้นระหว่างโครงสร้างที่อยู่บนดินและใต้ดินได้

Davisson (1970) ได้เสนอสมการคำนวณค่าโมดูลัสต้านทานแนวราบของดิน (Modulus of horizontal subgrade reaction)  $k_s$  มีหน่วยเป็น แรง/ปริมาตร เช่น  $\text{ตัน/ม.}^3$  โดยที่ค่า  $k_s$  ขึ้นอยู่กับลักษณะของดินว่าเป็นดินเหนียวหรือเป็นดินทราย ในกรณีของดินเหนียวค่า  $k_s$  จะสมมุติให้มีค่าคงที่ตลอดชั้นดินโดยเป็นดังสมการที่ 8 และค่าคงที่สำหรับต้านทานแรงกดแนวราบ (constant of horizontal subgrade reaction) หรือ  $n_h$  ที่แนะนำดังตาราง 13

$$k_s = 67 \frac{S_u}{B} \quad (8)$$

โดย  $S_u$  หมายถึงกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ

$B$  หมายถึงขนาดความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

ตาราง 13 ค่า  $n_h$  ที่แนะนำโดย Davisson (1970)

ประเภทของดิน	$n_h$ (ตัน/ม. <sup>3</sup> )
กรวด (Granular)	284 – 2,838
ตะกอน (silt)	11 – 85
พีช (Peat)	6

Terzaghi (1955) ได้เสนอสมการคำนวณค่าโมดูลัสต้านทานแนวราบของดิน (Modulus of horizontal subgrade reaction)  $k_s$  สำหรับดินทราย ซึ่งมีค่าแปรตามความลึกของชั้นดิน โดยนิยามค่าคงที่สำหรับต้านทานแรงกดแนวราบ (constant of horizontal subgrade reaction) หรือ  $n_h$  ซึ่งมีหน่วยเป็น “แรง/ปริมาตร” เช่น ตัน/ม.<sup>3</sup> ทำให้เขียนค่าโมดูลัสต้านทานแนวราบของดินโดยเป็นดังสมการที่ 9 โดยมีค่าคงที่สำหรับต้านทานแรงกดแนวราบ (constant of horizontal subgrade reaction) หรือ  $n_h$  ที่แนะนำดังตาราง 14

$$k_s = \frac{n_h x}{B} \quad (9)$$

โดย  $x$  หมายถึงความลึก ณ จุดที่พิจารณา

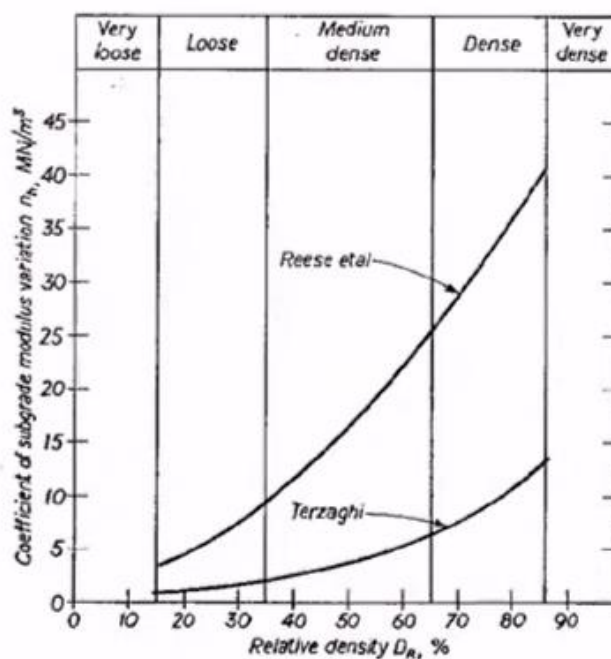
$B$  หมายถึงขนาดความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

$n_h$  หมายถึงค่าคงที่สำหรับต้านทานแรงแนวราบ

ตาราง 14 ค่า  $n_h$  ที่แนะนำสำหรับดินทรายโดย Prakash and Sharma (1990)

ความหนาแน่นสัมพัทธ์	หลวม (ตัน/ม. <sup>3</sup> )	ปานกลาง (ตัน/ม. <sup>3</sup> )	แน่น (ตัน/ม. <sup>3</sup> )
Terzaghi (1955)	74 – 218	218 – 738	738 – 1,447
Reese และคณะ (1974)	568	1,703	3,547

ค่าที่แนะนำโดย Terzaghi and Reese แสดงไว้ละเอียดขึ้นดังภาพ 22 โดย Tomlinson (1994) โดยค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ สามารถประมาณได้จากค่าตุ้มตอก (SPT-N value) ดังตาราง 15



ภาพ 22 ค่าคงที่สำหรับต้านทานแรงกดแนวราบ

ที่มา: Tomlinson (1994)

ตาราง 15 ความสัมพันธ์ระหว่าง SPT-N กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของดิน

ค่า SPT-N (ครั้งตอฟุต)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์	สภาพดิน
0 – 4	0 – 0.2	หลวมมาก
4 – 10	0.2 – 0.4	หลวม
10 – 30	0.4 – 0.6	ปานกลาง
30 – 50	0.6 – 0.8	แน่น
> 50	0.8 – 1.0	แน่นมาก

ประสิทธิภาพในการรับแรงทางข้างของเสาเข็มกลุ่ม (Lateral load of pile groups) ในกรณีที่เสาเข็มมากกว่า 1 ต้น อยู่ในฐานเดียวกัน หากเสาเข็มในฐานเรียงชิดกันเกินไป กำลังของเสาเข็มแต่ละต้นที่คำนวณได้จะมีกำลังที่ลดลง ในตารางที่ 16 และ 17 แสดงตัวคูณลดกำลังสำหรับเสาเข็มกลุ่มในชั้นดินเหนียว ชั้นดินทรายเพื่อการคำนวณการเคลื่อนตัวทางข้าง หากระยะเรียงของเสาเข็มแต่ละต้นมีค่ามากพอ เช่น ประมาณ 6-8 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง เสาเข็มก็จะรักษากำลังแบบเสาเดี่ยวไว้ได้

ตาราง 16 ค่าตัวคูณลดกำลังสำหรับเสาเข็มกลุ่มในชั้นดินเหนียว Prakash and Sharma (1990)

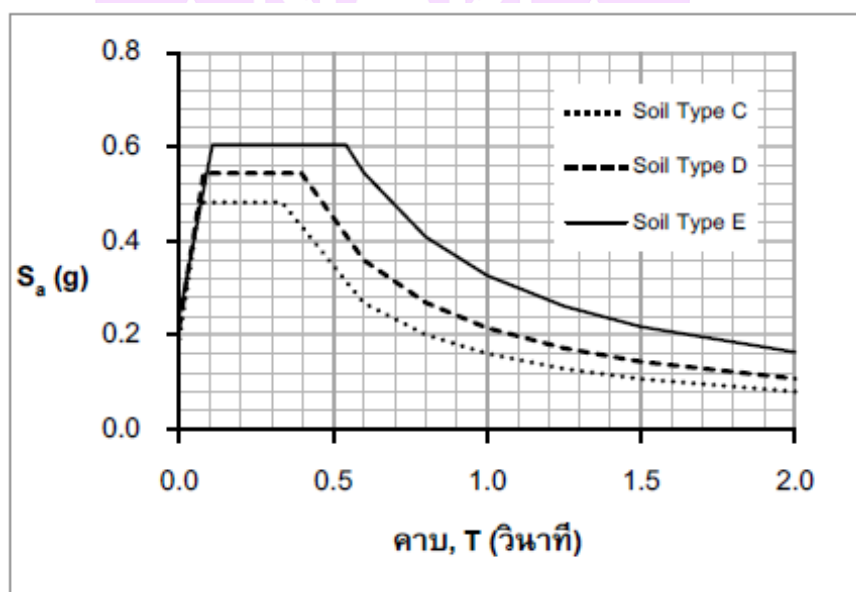
ระยะเรียงในทิศทางที่มีแรงกระทำ (S/B)	2 x 2	3 x 3	ค่าแนะนำ
3.0	0.42	0.39	0.40
3.5	0.50	0.42	0.45
4.0	0.57	0.44	0.50
4.5	0.61	0.47	0.55
5.0	0.63	0.48	0.55
6.0	-	-	0.65
8.0	-	-	1.00

หมายเหตุ: เมื่อ S คือ ระยะเรียงของเสาเข็ม (ม.), B คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (ม.)

ตาราง 17 ค่าตัวคูณลดกำลังสำหรับเสาเข็มกลุ่มในชั้นดินทราย Prakash and Sharma (1990)

ระยะเรียงในทิศทางที่มีแรงกระทำ (S/B)	ตัวคูณลดกำลัง
3	0.50
4	0.60
5	0.68
6	0.70

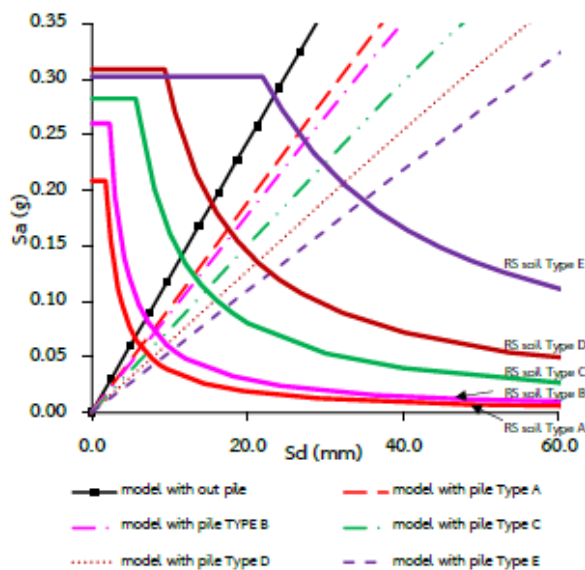
ปรีดา ไชยมหาวัน, ภัทรมน วงศ์ราษฎร์ และธนกร ชมภูรัตน์ (2017) ได้นำเสนอ แนวโน้มของกราฟสเปกตรัมผลตอบสนอง ที่ใช้สำหรับการออกแบบอาคารต้านทาน แผ่นดินไหวด้วยวิธีพลศาสตร์ ตามมาตรฐานของกรมโยธาธิการ (มยพ 1302-52) โดยกราฟ ดังกล่าวนี้สร้างขึ้นจากผลการเจาะสำรวจดินในสนาม ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดพะเยา ทั้งหมด 35 หลุมเจาะ ข้อมูลคุณสมบัติของดินภายในหลุมเจาะ ถูกนำมาใช้คำนวณเพื่อสร้าง เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งตอบสนองกับคาบธรรมชาติ เพื่อให้ได้กราฟสเปกตรัม ผลตอบสนองแบบจำเพาะเจาะจงในสถานที่ที่อาคารตั้งอยู่ ผลการศึกษาพบว่า กราฟที่ได้ มีแนวโน้มที่จะให้ค่าผลตอบสนองเป็นไปตามลักษณะของดินแบบ C ร้อยละ 60.0 รองลงมา กราฟเป็นไปตามลักษณะดินแบบ D ร้อยละ 34.3 และกราฟเป็นไปตามลักษณะดินแบบ E ร้อยละ 5.7 โดยกราฟมีลักษณะ  $S_{D1} \leq S_{DS}$  ทั้งหมด



ภาพ 23 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับอำเภอเมือง จังหวัดพะเยา จากข้อมูลเจาะสำรวจดินทั้ง 35 หลุม

ที่มา: ปรีดา ไชยมหาวัน, ภัทรมน วงศ์ราษฎร์ และธนกร ชมภูรัตน์ (2017)

ปรีดา ไชยมหาวัน และคณะ ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลการประเมิน และผลตอบสนองของโครงสร้างอาคารต้านแผ่นดินไหวโดยใช้สเปกตรัมในพื้นที่จังหวัดพะเยา ด้วยแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่มีเฉพาะโครงสร้างด้าบนเพียงอย่างเดียว และแบบจำลองที่มีทั้งโครงสร้างด้าบนและโครงสร้างฐานรากพร้อมกัน โดยโครงสร้างฐานรากได้ใช้เสาเข็มและสปริงเพื่อแทนผลของดินที่อยู่ด้านข้างเสาเข็ม ผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองอาคารที่มีทั้งโครงสร้างด้าบนและโครงสร้างเสาเข็มพร้อมกัน ทำให้คาบธรรมชาติในโหมดพื้นฐานเพิ่มขึ้น และมีรูปแบบและสัดส่วนการสั่นไหวที่แตกต่างจากแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม แบบจำลองที่มีเสาเข็มมีสตีฟเนสการต้านแรงด้านข้างลดลงแต่ไม่ได้ลดแรงต้านสูงสุดของอาคาร และถูกประเมินด้วยแรงแผ่นดินไหวที่ลดลงจึงพบระดับความเสียหายที่ลดลงด้วย และได้ทดลองเปลี่ยนลักษณะชั้นดินให้มีความแตกต่างกัน พบว่าการคำนึงถึงการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากจะช่วยลดแรงแผ่นดินไหวที่ใช้ประเมินได้มากในกรณีดินที่อ่อน แต่โครงสร้างอาคารจะมีการเสียรูปที่มากขึ้น ดังนั้นการจำลองโครงสร้างอาคารจำเป็นต้องพิจารณาโครงสร้างฐานรากในกรณีที่อาคารอยู่บนดินอ่อนเพื่อให้ประเมินสมรรถนะของอาคารได้อย่างเหมาะสม



ภาพ 24 สมรรถนะอาคารในชั้นดินประเภทต่าง ๆ

ที่มา: ปรีดา ไชยมหาวัน และคณะ

### บทที่ 3

#### วิธีการทดสอบ

##### แบบจำลองที่ใช้ศึกษา

แบบจำลองอาคารที่ใช้ทำการศึกษานี้เป็นแบบจากกรมโยธาธิการและผังเมือง โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทย แบบตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 ชั้น ใช้เป็นตัวแทนอาคารพาณิชย์ที่ก่อสร้างในพื้นที่ภาคเหนือที่มีความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหว และพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพฯ มีพื้นที่ใช้สอยประมาณ 946 ตร.ม. รับน้ำหนักบรรทุกจร 300 กก./ม<sup>2</sup> มีการออกแบบไว้ตั้งแต่ปี 2546 โดยแบบจำลองที่ศึกษานั้นมีแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มพื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดพะเยาเป็นตัวแทนอาคารที่ตั้งอยู่ในชั้นดินแข็ง และแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มพื้นที่ในแอ่งกรุงเทพฯเป็นตัวแทนอาคารที่ตั้งอยู่ในชั้นดินอ่อน ดังแสดงในตาราง 18

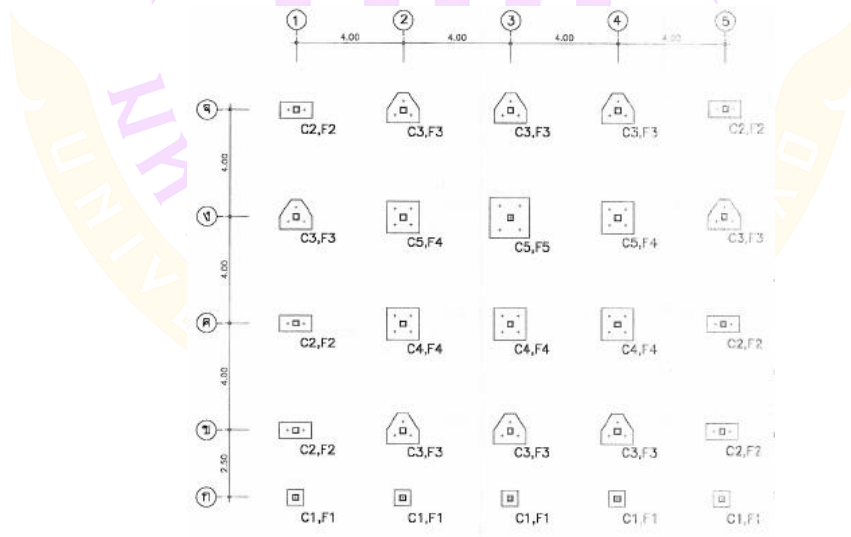
ตาราง 18 แบบจำลองที่ใช้ในศึกษา

แบบจำลอง	พื้นที่ที่ใช้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม และประเภทของชั้นดิน	ความยาวของเสาเข็ม
แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม	-	-
แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม	พื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา ประเภทของชั้นดินคือประเภท C	6.00 เมตร
แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม	พื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา ประเภทของชั้นดินคือประเภท C	9.00 เมตร
แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม	พื้นที่อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา ประเภทของชั้นดินคือประเภท C	12.00 เมตร
แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม	พื้นที่ในแอ่งกรุงเทพฯ โซน 5 จังหวัด กรุงเทพมหานคร	25.50 เมตร



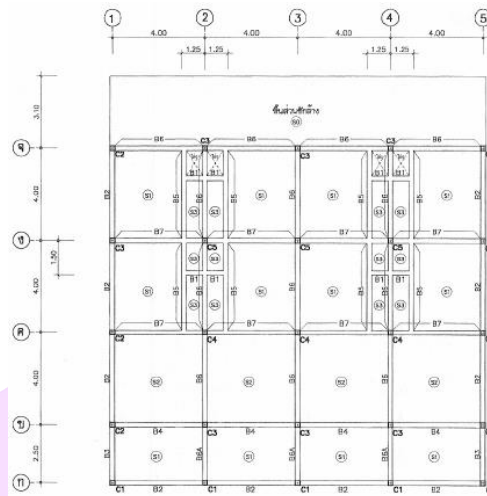
ภาพ 25 ตึกแถวอนุรักษ์ ภาคเหนือ 4 ชั้น

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)



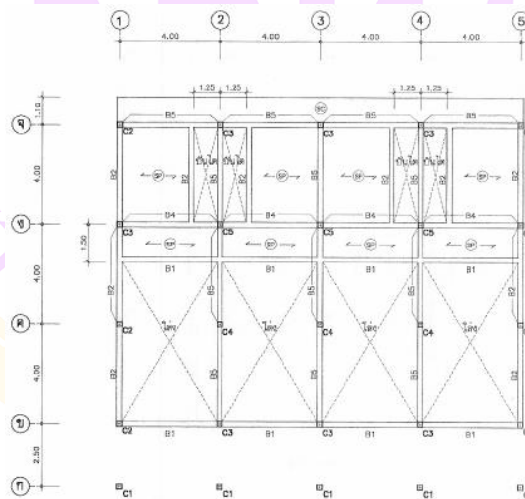
ภาพ 26 แปลนเสาตอม่อ และฐานราก

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)



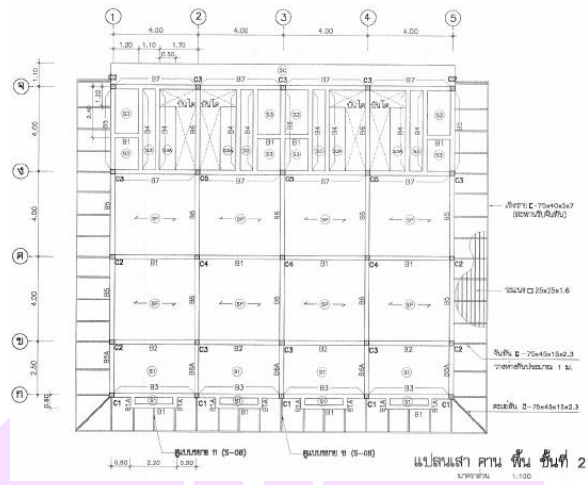
ภาพ 27 แพลนเสา คาน พื้น ชั้นที่ 1

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)



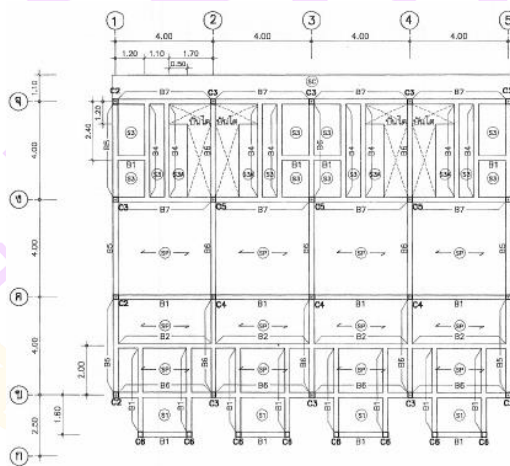
ภาพ 28 แพลนเสา คาน พื้น ชั้นลอย

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)



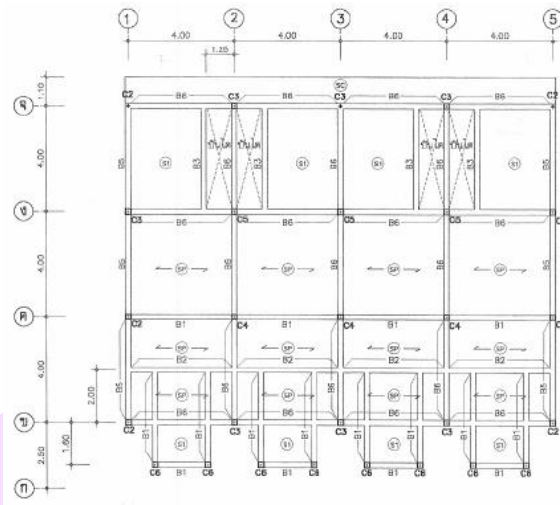
ภาพ 29 แปลนเสา คาน ชั้น ชั้นที่ 2

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)



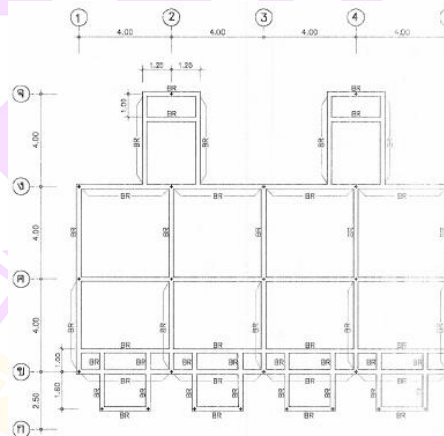
ภาพ 30 แปลนเสา คาน ชั้น ชั้นที่ 3

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)



ภาพ 31 แพลนเสา คาน พื้น ชั้นที่ 4

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)



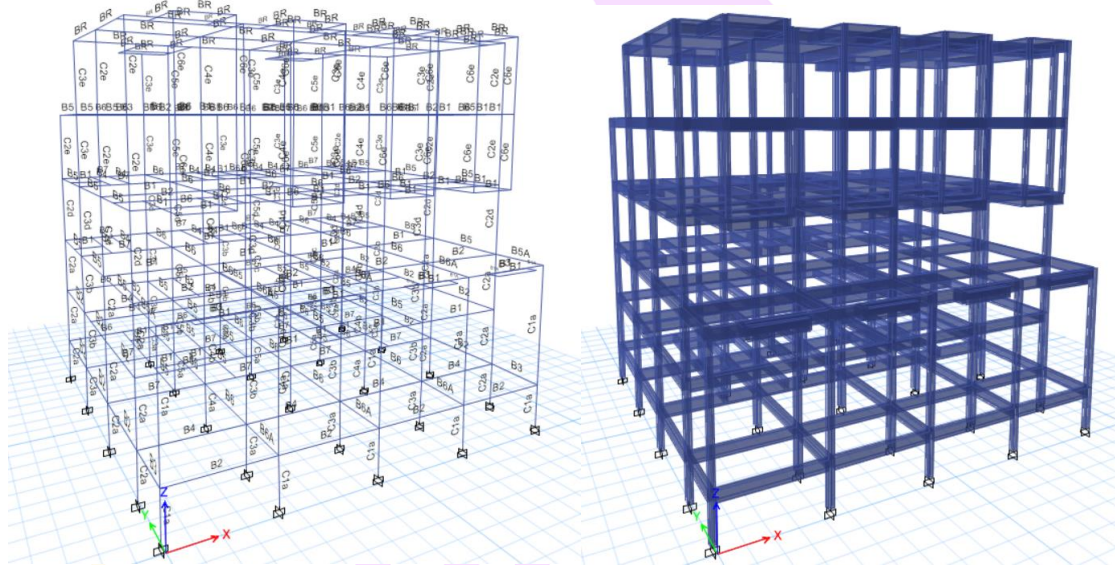
ภาพ 32 แพลนคานหลังคา

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)

## การสร้าแบบจำลอง

### 1. กำหนดคุณสมบัติวัสดุ

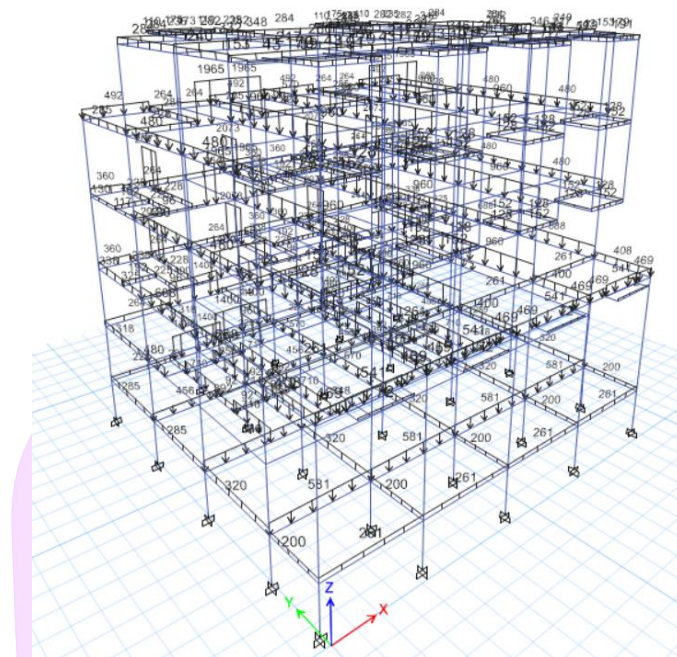
กำหนดให้คอนกรีตมีกำลังอัด  $240 \text{ กก./ซม.}^2$  กำลังดึงครากเหล็กข้ออ้อยสำหรับเหล็กชั้นคุณภาพ SD30 ใช้ค่า  $3,000 \text{ กก./ซม.}^2$  ซึ่งเป็นกำลังที่ระบุไว้ในแบบก่อสร้าง โมดูลัสยืดหยุ่นใช้  $233,928 \text{ กก./ซม.}^2$  และ  $2,040,000 \text{ กก./ซม.}^2$  สำหรับคอนกรีต และเหล็กเสริมตามลำดับ



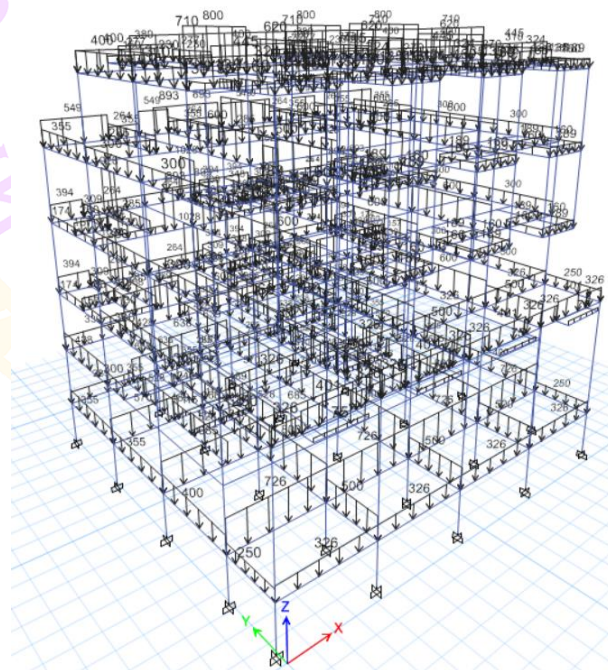
ภาพ 33 แบบจำลองที่กำหนดเหล็กเสริม และขนาดหน้าตัดเสาแล้ว

### 2. กำหนดน้ำหนักบรรทุก

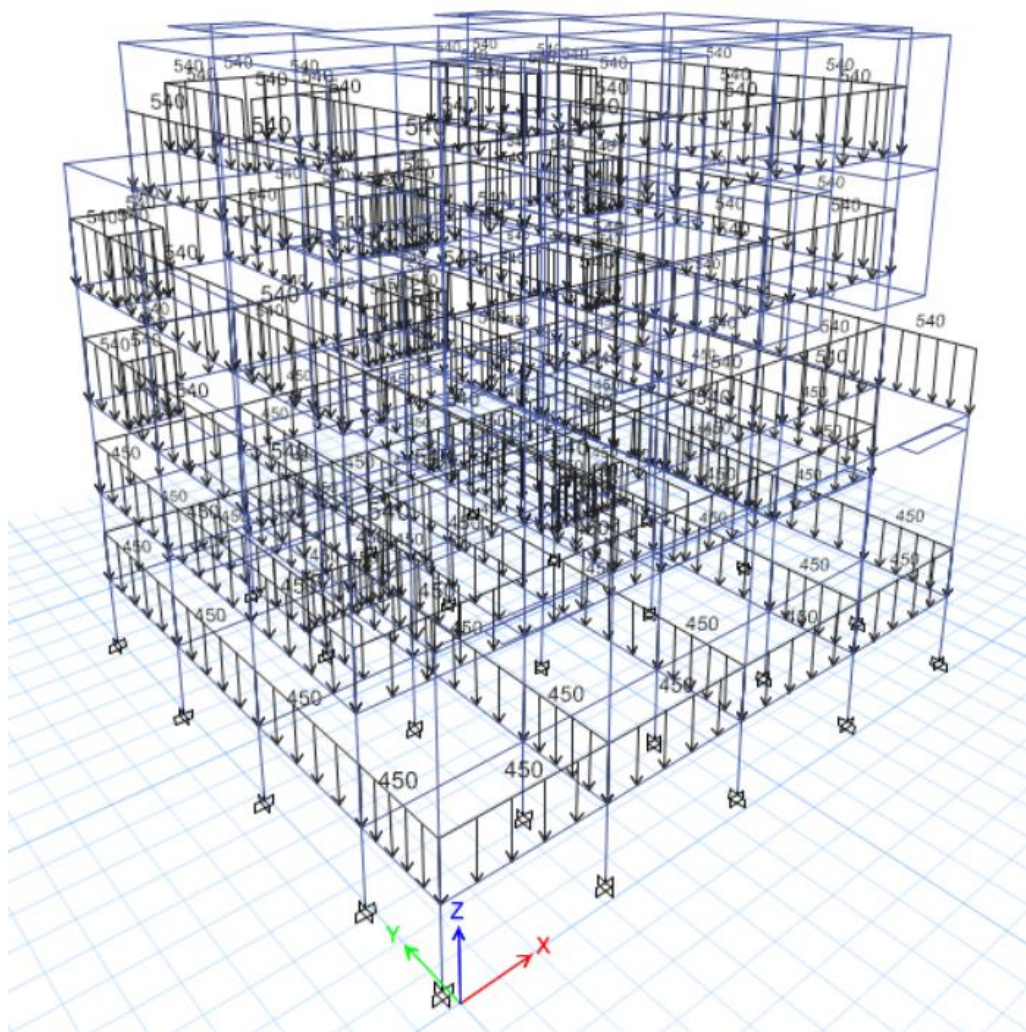
น้ำหนักบรรทุก และแรงกระทำในแนวตั้ง สำหรับอาคารนี้ได้แก่ น้ำหนักของโครงสร้าง เช่น เสา คาน พื้น น้ำหนักของสิ่งที่ไม่ใช่โครงสร้าง ได้แก่ ผนัง แผ่นพื้น เป็นต้น ซึ่งคำนวณจากขนาดของชิ้นส่วนและหน่วยน้ำหนักของวัสดุแต่ละชนิด และพิจารณาถึงน้ำหนักบรรทุกจรขนาด  $300 \text{ กก./ม.}^2$  โดยน้ำหนักบรรทุกจะกระทำเป็นแบบแผ่กระจาย (Uniform Load) บนคาน



ภาพ 34 แบบจำลองแสดงค่าน้ำหนักบรรทุก SDL



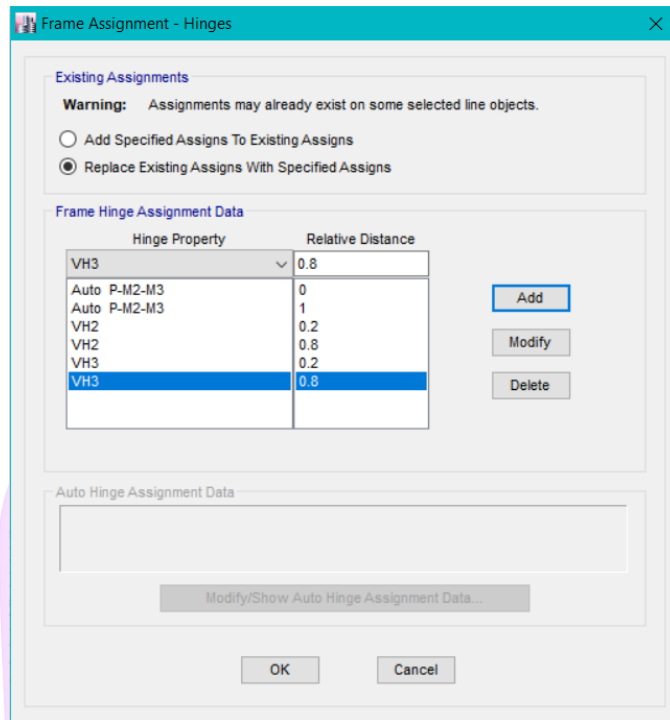
ภาพ 35 แบบจำลองแสดงค่าน้ำหนักบรรทุก Live load



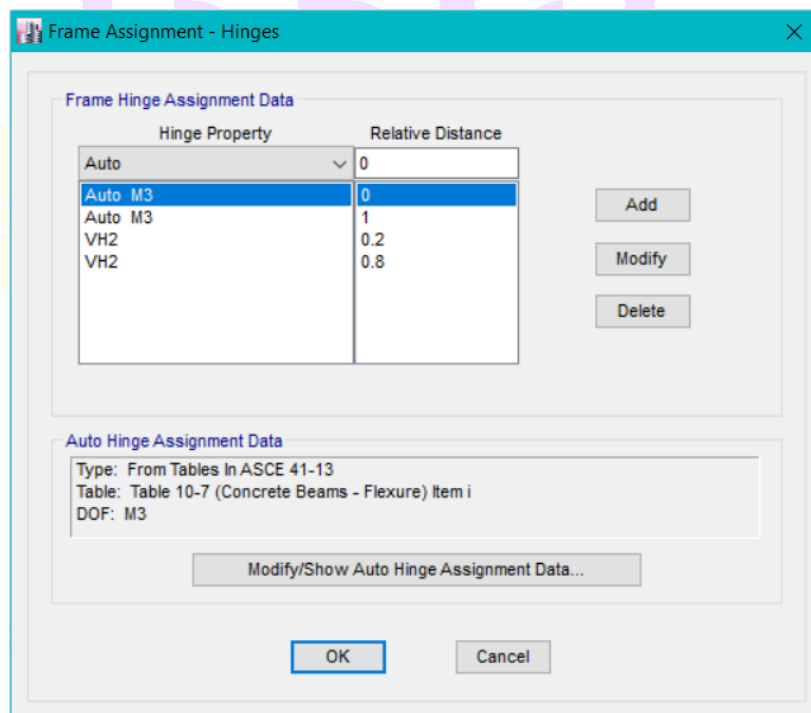
ภาพ 36 แบบจำลองแสดงค่าน้ำหนักบรรทุก BW load

### 3. กำหนดคุณสมบัติของจุดหมุน

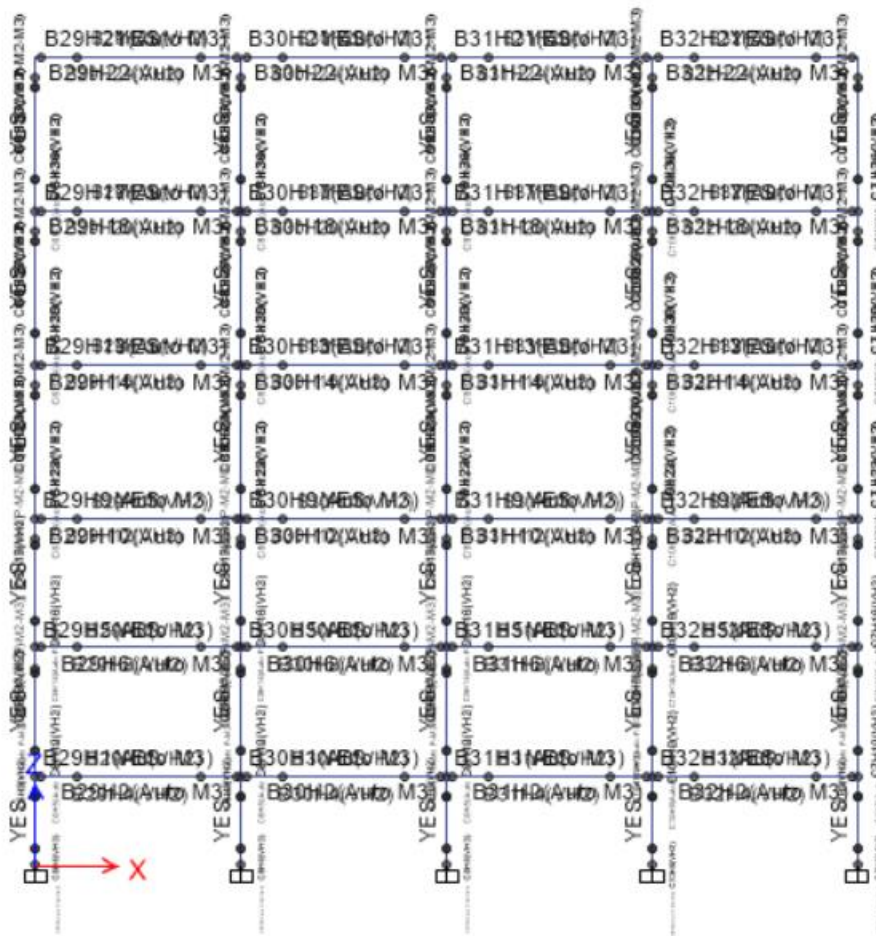
เนื่องจากการวิเคราะห์จะใช้วิธีฝึกโครงสร้างแบบไม่เชิงเส้น (non-linear push over analysis) จึงได้กำหนดจุดหมุนพลาสติกในตำแหน่งต่าง ๆ ให้กับโครงสร้าง โดยกำหนดจุดหมุนพลาสติกเนื่องจากแรงคัตที่ปลายของค้ำอาคารทั้งสองด้าน และกำหนดจุดหมุนพลาสติกสำหรับแรงเฉือนที่ระยะร้อยละ 20 ของความยาวชิ้นส่วนจากปลายของค้ำอาคารทั้งสองด้าน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูป ใช้ตามกำหนดใน มยพ. 1303-57 สำหรับการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น และได้กำหนดจุดหมุนพลาสติกในเสาเข็มด้วยเช่นกันเพื่อที่จะวิเคราะห์ให้เสาเข็มเป็นแบบไม่เชิงเส้น (non-linear push over analysis) จึงจะทำให้ได้ค่าการตอบสนองใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด



ภาพ 37 กำหนดคุณสมบัติของจุดหมุนของเสา



ภาพ 38 กำหนดคุณสมบัติของจุดหมุนของคาน



ภาพ 39 แบบจำลองแสดงจุดหมุนของเสา และคาน

#### 4. กำหนดความแข็งแรงประสิทธิภาพ

แนวทางการประเมินอาคารตาม มยพ.1303-57 นั้น ได้แนะนำให้ใช้สเปกตรัมผลตอบสนองที่มีความรุนแรงเพียงครึ่งเดียวของสเปกตรัมที่ใช้ออกแบบอาคาร เนื่องจากอาคารมีการก่อสร้างไปแล้ว ย่อมมีกำลังที่น้อยกว่าอาคารใหม่ ยากต่อการปรับปรุงให้มีความแข็งแรงเทียบเท่าอาคารใหม่ได้ ในแบบจำลองทั้งสองแบบนี้ได้ปรับลดสตีเฟนส ขององค์อาคารต่าง ๆ ตามข้อกำหนดของ มยพ.1303-57 เพื่อคำนึงถึงการแตกร้าวและเสียหายของโครงสร้างเสาและคานจากการรับแรงแผ่นดินไหว โดยปรับลดสตีเฟนสด้านการเฉือนในเสา และคานลงเหลือร้อยละ 40 และปรับลดสตีเฟนสสำหรับด้านการดัดลงเหลือร้อยละ 30 และ 70 สำหรับคานและเสตามลำดับ

Frame Assignment - Property Modifiers

Property/Stiffness Modifiers for Analysis

Cross-section (axial) Area	1
Shear Area in 2 direction	0.4
Shear Area in 3 direction	0.4
Torsional Constant	1
Moment of Inertia about 2 axis	0.3
Moment of Inertia about 3 axis	0.3
Mass	1
Weight	1

OK Close Apply

ภาพ 40 กำหนดความแข็งเกร็งประสิทธิผลของคาน

Frame Assignment - Property Modifiers

Property/Stiffness Modifiers for Analysis

Cross-section (axial) Area	1
Shear Area in 2 direction	0.4
Shear Area in 3 direction	0.4
Torsional Constant	1
Moment of Inertia about 2 axis	0.7
Moment of Inertia about 3 axis	0.7
Mass	1
Weight	1

OK Close Apply

ภาพ 41 กำหนดความแข็งเกร็งประสิทธิผลของเสา

### 5. ค่าสถิติพิเศษของสปริง (K) ในเสาเข็ม

สำหรับผลเจาะสำรวจดินนั้นได้ใช้ผลจากการเจาะสำรวจดินในสนาม ณ โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยพะเยา แสดงในตารางที่ 19 ได้เลือกใช้แบบจำลองกรณีโครงสร้างอาคารที่ค้ำถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มที่ใช้การจำลองเสาเข็มมีความยาวที่ 6.00 ม., 9.00 ม. และ 12.00 ม. ค่าโมดูลัสต้านทานแนวราบของดิน ( $k_s$ ) สำหรับเสาเข็มขนาด 22x22 ซม. กำหนดให้กำลังต้านแรงเฉือนในเสาเข็มเท่ากับ 4.80 ตัน และสำหรับผลเจาะสำรวจดินของพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ ได้ใช้ผลจากการเจาะสำรวจดินในสนาม ณ โครงปรับปรุงหอประชุมพญาไท กรมสามัญศึกษา เขตพญาไท กรุงเทพฯ แสดงในตารางที่ 20 พบว่า มีค่า SPT สูงสุดที่ระดับ 25.50 ม. จึงทำให้แบบจำลองกรณีโครงสร้างอาคารที่ค้ำถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มได้ใช้การจำลองเสาเข็มมีความยาว 25.50 ม. ค่าโมดูลัสต้านทานแนวราบของดิน ( $k_s$ ) สำหรับเสาเข็มขนาด 22x22 ซม. กำหนดให้กำลังต้านแรงเฉือนในเสาเข็มเท่ากับ 4.80 ตัน

ตาราง 19 รายงานผลการเจาะสำรวจดินในสนาม ณ โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยพะเยา

ความลึก (ม.)	ชนิดของ ดิน	SPT (ครั้ง/ฟุต) N	SPT (ครั้ง/ฟุต) N'	$S_u$ (ตัน/ม. <sup>2</sup> )	$n_h$ (ตัน/ม. <sup>3</sup> )	$k_s$ (เสาเข็ม 0.22x0.22ม.) (ตัน/ม. <sup>3</sup> )	สถิติพิเศษ ของสปริง (K)(T/m)
0.0	Clay	-	-	-	-	-	-
1.0	Clay	-	-	-	-	-	-
2.0	Sand	68.00	42.00	-	1,937.46	17,613.28	968.73
3.0	Sand	62.00	39.00	-	1,833.52	25,002.49	2,750.27
4.0	Sand	78.00	47.00	-	2,207.42	40,134.91	4,414.84
5.0	Sand	84.00	50.00	-	2,320.89	52,747.50	5,802.23
6.0	Clay	91.00	-	60.29	-	18,361.05	1,615.77
7.0	Clay	130.00	-	86.35	-	26,297.50	2,314.18
8.0	Sand	123.00	69.00	-	2,774.80	100,901.82	8,879.36
9.0	Sand	117.00	66.00	-	2,774.80	113,514.37	12,486.58
10.0	Sand	115.00	65.00	-	2,725.77	123,898.64	13,628.85
11.0	Sand	121.00	68.00	-	2,774.80	138,740.00	15,261.40
12.0	Sand	127.00	71.00	-	2,774.80	151,352.73	8,324.40

ตาราง 20 รายงานผลการเจาะสำรวจดินในสนาม โครงการปรับปรุงหอประชุมพญาไท กรม  
สามัญศึกษา เขตพญาไท กรุงเทพฯ

ความลึก (ม.)	ชนิดของ ดิน	SPT (ครั้ง/ฟุต) N	SPT (ครั้ง/ฟุต) N'	S <sub>u</sub> (ตัน/ม. <sup>2</sup> )	n <sub>h</sub> (ตัน/ม. <sup>3</sup> )	k <sub>s</sub> (เสาเข็ม 0.22x0.22ม.) (ตัน/ม. <sup>3</sup> )	สติฟเนสของ สปริง (K)(T/m)
0.0	Clay	-	-	-	-	-	-
1.0	Clay	-	-	-	-	-	-
2.0	Clay	-	-	1.10	-	335.00	14.74
3.0	Clay	-	-	0.90	-	274.09	24.12
4.0	Clay	-	-	1.23	-	374.59	32.96
5.0	Clay	-	-	1.56	-	475.09	41.81
6.0	Clay	-	-	1.90	-	578.64	50.92
7.0	Clay	-	-	1.76	-	536.00	47.17
8.0	Clay	-	-	1.63	-	496.41	43.68
9.0	Clay	-	-	1.50	-	456.82	40.20
10.0	Clay	-	-	1.63	-	496.41	43.68
11.0	Clay	-	-	1.76	-	536.00	47.17
12.0	Clay	-	-	1.90	-	578.64	50.92
13.0	Clay	-	-	3.03	-	923.69	81.28
14.0	Clay	-	-	7.02	-	2,136.39	188.00
15.0	Clay	-	-	11.00	-	3,350.00	294.80
16.0	Clay	-	-	9.33	-	2,841.41	250.04
17.0	Clay	19.00	17.00	8.76	-	2,667.82	234.77
18.0	Clay	20.00	18.00	9.30	-	2,832.27	249.24
19.0	Clay	32.00	24.00	8.56	-	2,606.91	229.41
20.0	Clay	28.00	22.00	6.43	-	1,958.23	172.32
21.0	Clay	6.00	11.00	2.90	-	883.18	77.72

ตาราง 20 (ต่อ)

ความลึก (ม.)	ชนิดของดิน	SPT (ครั้ง/ฟุต) N	SPT (ครั้ง/ฟุต) N'	$S_u$ (ตัน/ม. <sup>2</sup> )	$n_h$ (ตัน/ม. <sup>3</sup> )	$k_s$ (เสาเข็ม 0.22x0.22ม.) (ตัน/ม. <sup>3</sup> )	สติฟเนสของสปริง (K)(T/m)
22.0	Clay	22.00	19.00	9.70	-	2,954.09	259.96
23.0	Clay	37.00	26.00	13.70	-	4,172.27	367.16
24.0	Clay	52.00	34.00	14.90	-	4,537.73	399.32
25.0	Clay	61.00	38.00	20.30	-	6,182.27	408.03
25.5	Clay	66.00	41.00	23.00	-	7,004.55	154.10

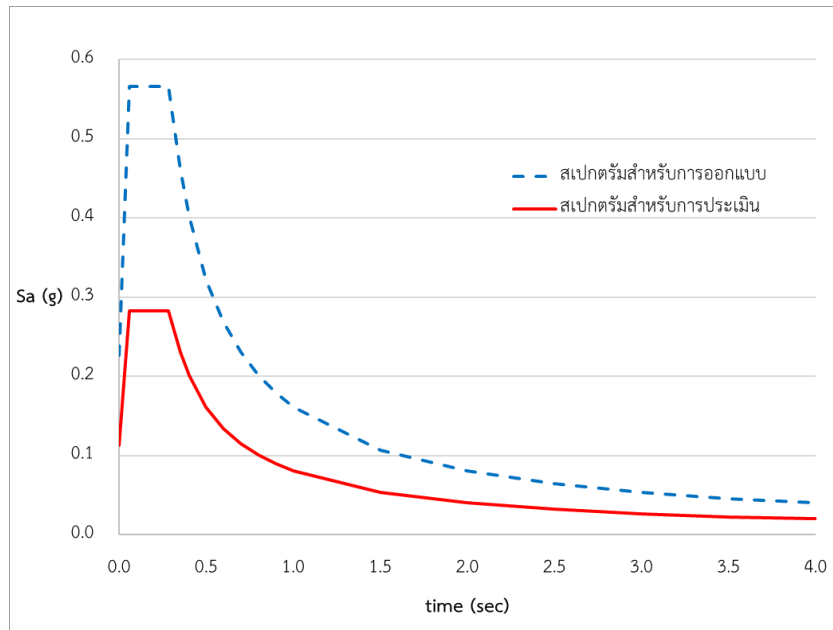
#### 6. สเปกตรัมผลตอบสนอง และกำหนดค่าสติฟเนสของสปริง (K) ในเสาเข็ม

แนวทางการประเมินอาคารตาม มยพ.1303-57 นั้น ได้แนะนำให้ใช้สเปกตรัมผลตอบสนองที่มีความรุนแรงเพียงครึ่งเดียวของสเปกตรัมที่ใช้ออกแบบอาคาร เนื่องจากอาคารมีการก่อสร้างไปแล้ว ย่อมมีกำลังที่น้อยกว่าอาคารใหม่ ยากต่อการปรับปรุงให้มีความแข็งแรงเทียบเท่าอาคารใหม่ได้ โดยกราฟสเปกตรัมสำหรับอำเภอเมือง จังหวัดพะเยา ได้ถูกกำหนดขึ้นมาจาก มยพ.1301/1302-61 ซึ่งเขตอำเภอเมือง จังหวัดพะเยาเป็นที่ตั้งอาคาร ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบสั้น 0.2 วินาที  $S_s = 0.781g$  คาบการสั่น 1 วินาที  $S_1 = 0.146g$  และกำหนดประเภทของชั้นดินคือประเภท C ทำให้ได้สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการประเมิน และออกแบบ ในตารางที่ 21 และภาพ 42 และทำการแปลงกราฟสเปกตรัมผลตอบสนองแกนนอน ซึ่งอยู่ในหน่วยของคาบของอาคาร (วินาที) ให้อยู่ในรูปของการเคลื่อนที่เชิงสเปกตรัม  $S_d$  ในตารางที่ 21 และภาพ 43

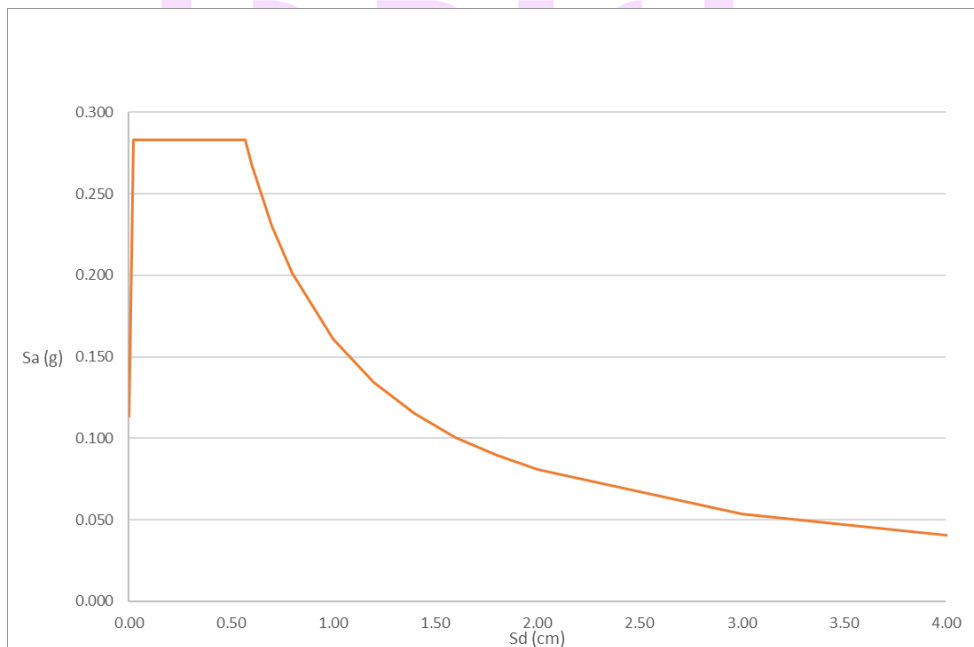
ส่วนกราฟสเปกตรัมสำหรับพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ โซน 5 จะใช้ค่าอัตราส่วนความหน่วงไม่เกินร้อยละ 5 สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความสูงไม่เกิน 60 เมตร ทำให้ได้สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการประเมิน และออกแบบ ในตารางที่ 22 และภาพ 44 และทำการแปลงกราฟสเปกตรัมผลตอบสนองแกนนอน ซึ่งอยู่ในหน่วยของคาบของอาคาร (วินาที) ให้อยู่ในรูปของการเคลื่อนที่เชิงสเปกตรัม  $S_d$  ในตารางที่ 22 และภาพ 45

ตาราง 21 แสดงสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการประเมิน และออกแบบ สำหรับ  
อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา

T (วินาที)	สำหรับการประเมิน	
	ออกแบบ	การประเมิน
	$S_d$ (g)	$S_d$ (cm)
0	0.227	0.00
0.05689	0.566	0.02
0.28447	0.566	0.57
0.3	0.537	0.60
0.35	0.460	0.70
0.4	0.403	0.80
0.5	0.322	1.00
0.6	0.268	1.20
0.7	0.230	1.40
0.8	0.201	1.60
0.9	0.179	1.80
1	0.161	2.00
1.5	0.107	3.00
2	0.081	4.00
2.5	0.064	5.00
3	0.054	6.00
3.5	0.046	7.00
4	0.040	8.01
5	0.032	10.01
6	0.027	12.01
7	0.023	14.01
8	0.020	16.01
9	0.018	18.01
10	0.016	20.01



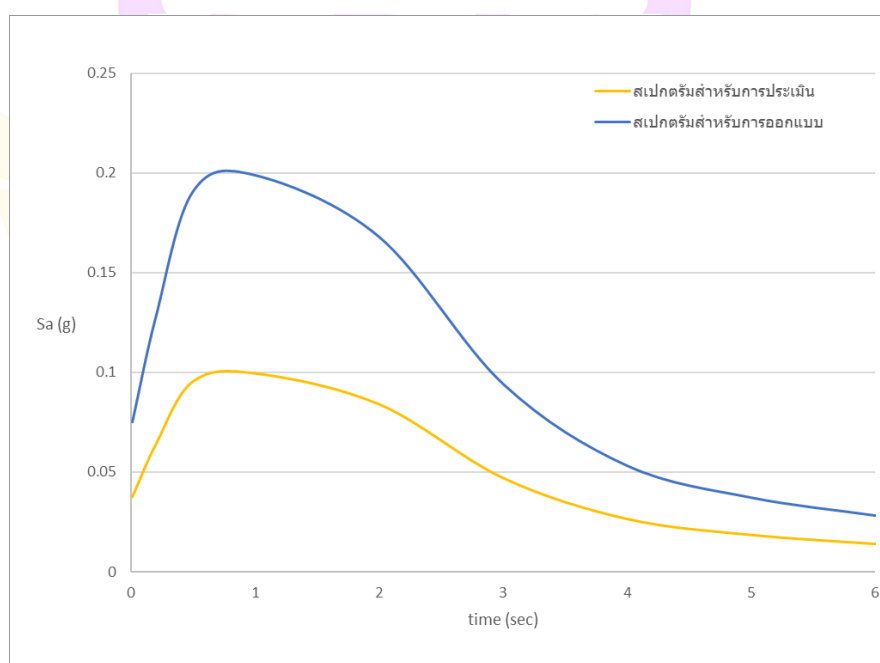
ภาพ 42 กราฟสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการประเมิน และออกแบบที่อยู่ในพื้นที่จังหวัดพะเยา



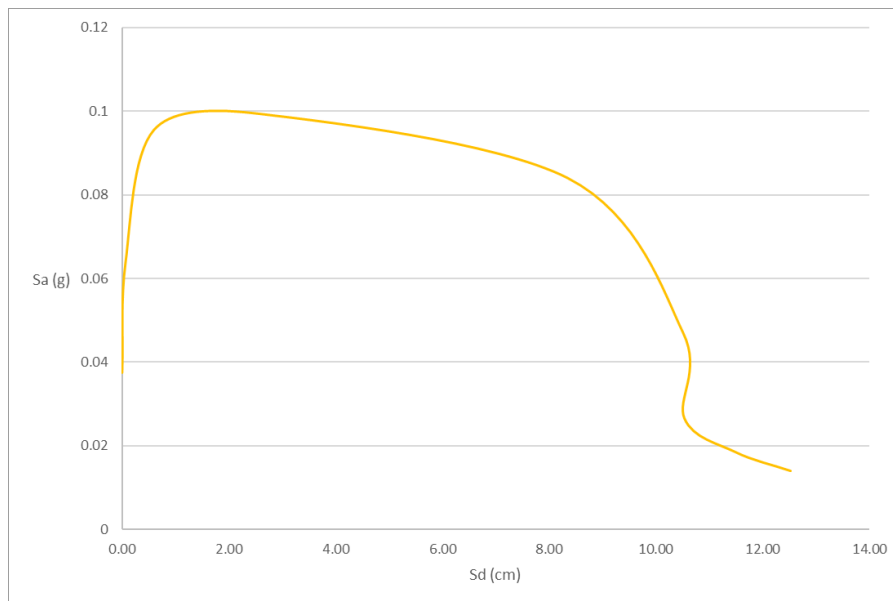
ภาพ 43 กราฟสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการประเมิน ที่อยู่ในรูปแบบของความเร่ง ( $S_a$ ) และการเคลื่อนที่เชิงสเปกตรัม ( $S_d$ ) ในพื้นที่จังหวัดพะเยา

ตาราง 22 แสดงสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการประเมิน และออกแบบ สำหรับพื้นที่  
 แอ่งกรุงเทพฯ โซน 5

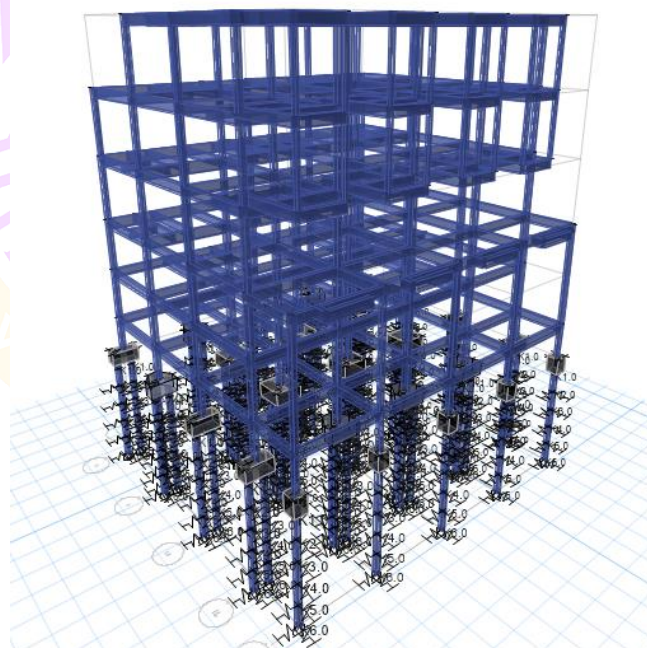
T (วินาที)	สำหรับการประเมิน		สำหรับการออกแบบ	
	$S_a$ (g)	$S_d$ (cm)	$S_a$ (g)	$S_d$ (cm)
0.01	0.075	0.0001	0.0375	0.0001
0.2	0.128	0.0636	0.064	0.0636
0.5	0.191	0.5933	0.0955	0.5933
1	0.199	2.4725	0.0995	2.4725
2	0.168	8.3493	0.084	8.3493
3	0.094	10.5111	0.047	10.5111
4	0.053	10.5360	0.0265	10.5360
5	0.037	11.4927	0.0185	11.4927
6	0.028	12.5239	0.014	12.5239



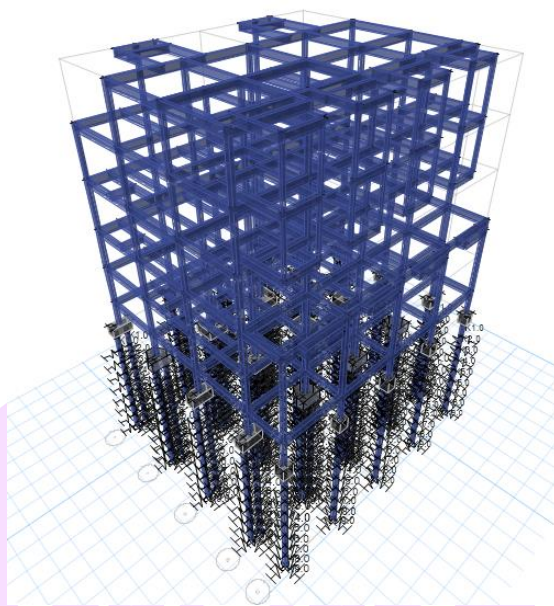
ภาพ 44 กราฟสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการประเมิน และออกแบบที่อยู่ในพื้นที่  
 พื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ โซน 5



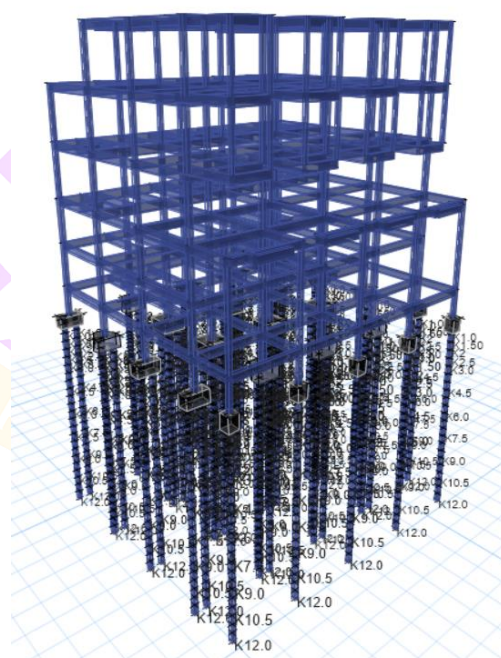
ภาพ 45 กราฟสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการประเมิน ที่อยู่ในรูปแบบของความเร่ง ( $S_a$ ) และการเคลื่อนที่เชิงสเปกตรัม ( $S_d$ ) ในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ โซน 5



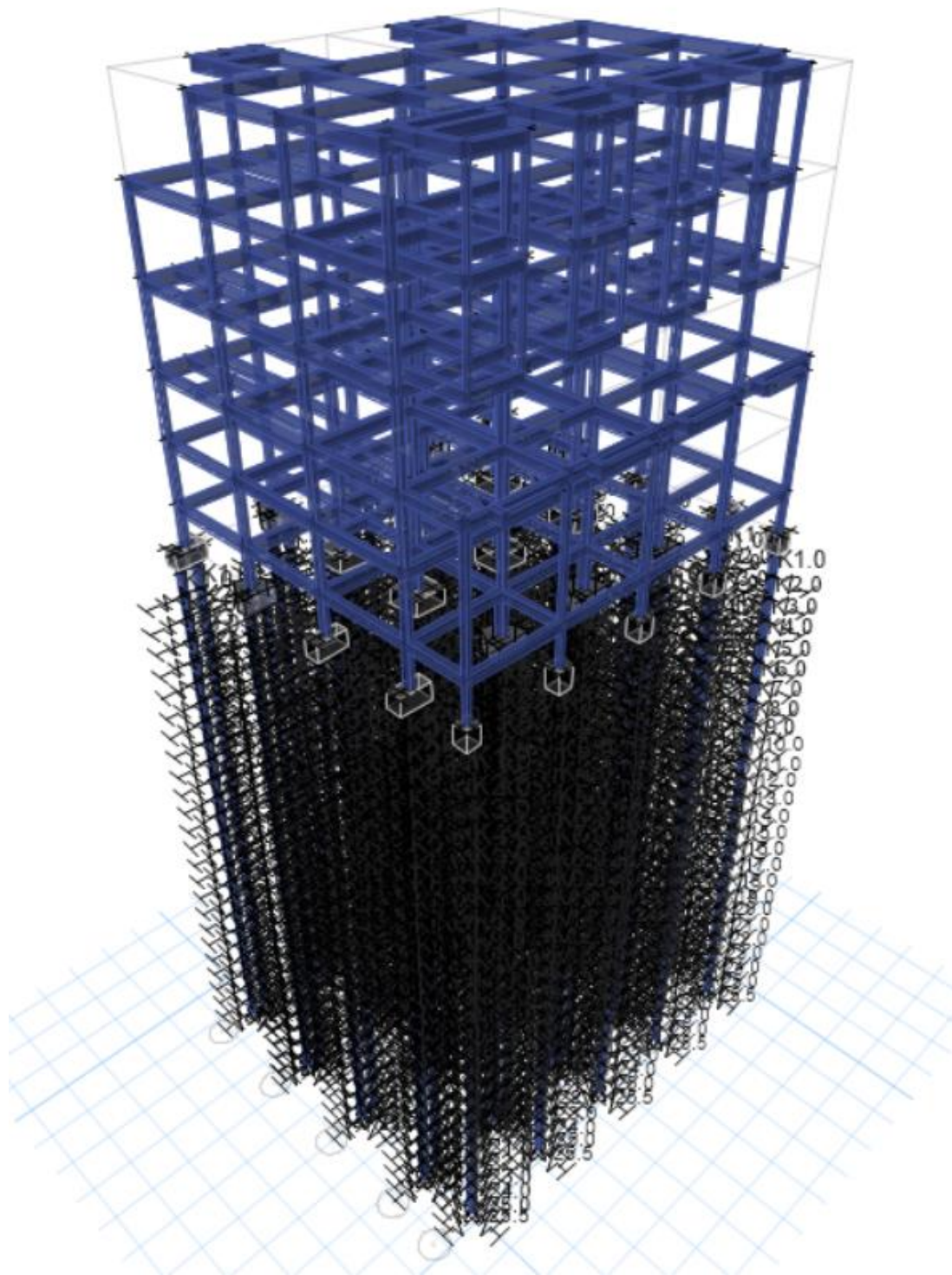
ภาพ 46 แบบจำลองที่คำนึงถึงเสาเข็ม และกำหนดค่าสตีฟเนสของสปริง (K) ในเสาเข็ม ของแบบจำลองที่อยู่ในพื้นที่จังหวัดพะเยา เสาเข็มยาว 6.00 เมตร



ภาพ 47 แบบจำลองที่ค้ำนึ่งถึงเสาเข็ม และกำหนดค่าสตีฟเนสของสปริง (K) ในเสาเข็ม  
ของแบบจำลองที่อยู่ในพื้นที่จังหวัดพะเยา เสาเข็มยาว 9.00 เมตร



ภาพ 48 แบบจำลองที่ค้ำนึ่งถึงเสาเข็ม และกำหนดค่าสตีฟเนสของสปริง (K) ในเสาเข็ม  
ของแบบจำลองที่อยู่ในพื้นที่จังหวัดพะเยา เสาเข็มยาว 12.00 เมตร



ภาพ 49 แบบจำลองที่คำนึงถึงเสาเข็ม และกำหนดค่าสตีฟเนสของสปริง (K) ในเสาเข็ม  
ของแบบจำลองที่อยู่ในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

#### คาบธรรมชาติน

คาบธรรมชาตินใน 12 โหมดของทั้ง 5 แบบจำลอง แสดงในตาราง 23 และตาราง 24 จะเห็นว่า แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มจะมีคาบธรรมชาติที่สูงกว่ากรณีแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่ค้ำถึงเสาเข็ม และมีโหมดพื้นฐานเป็นสัดส่วนหลักประมาณร้อยละ 65-71 ส่วนแบบจำลองอาคารที่มีเสาเข็มในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ โหมดพื้นฐานของแบบจำลองมีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีส่วนร่วมร้อยละร้อยละ 74-84 การสร้างกราฟเส้นโค้งกำลังจากการปลักในแต่ละแกน จะเลือกใช้โหมดที่มีสัดส่วนการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนมากที่สุด โดยแบบจำลองทั้งที่ไม่มีเสาเข็ม และแบบจำลองที่มีเสาเข็มในพื้นที่จังหวัดพะเยาได้เลือกใช้โหมด 1 และโหมด 2 ในการสร้างกราฟเส้นโค้งกำลังในแกน x และแกน y ตามลำดับ ส่วนแบบจำลองที่มีเสาเข็มในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ ได้เลือกใช้โหมด 1 และโหมด 3 ในการสร้างกราฟเส้นโค้งกำลังในแกน x และแกน y ตามลำดับ

ตาราง 23 คาบธรรมชาติที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้าง (1)

Mode	แบบจำลองไม่มีเสาเข็ม				แบบจำลองมีเสาเข็ม ยาว 6.00 ม. พื้นที่ในจังหวัดพะเยา ดิน Type C				แบบจำลองมีเสาเข็ม ยาว 9.00 ม. พื้นที่ในจังหวัดพะเยา ดิน Type C			
	คาบ Model participation				คาบ Model participation				คาบ Model participation			
	(วินาที)	x	y	R	(วินาที)	x	y	R	(วินาที)	x	y	R
1	1.726	0.696	0.000	0.012	1.843	0.690	0.000	0.024	1.858	0.683	0.000	0.024
2	1.455	0.000	0.653	0.000	1.614	0.000	0.720	0.000	1.636	0.000	0.717	0.000
3	1.399	0.012	0.000	0.678	1.592	0.024	0.000	0.742	1.612	0.024	0.000	0.737
4	0.635	0.094	0.000	0.000	0.679	0.118	0.000	0.000	0.685	0.120	0.000	0.000
5	0.581	0.000	0.133	0.000	0.661	0.000	0.153	0.000	0.670	0.000	0.150	0.000
6	0.560	0.000	0.000	0.117	0.642	0.000	0.000	0.125	0.649	0.000	0.000	0.122
7	0.396	0.025	0.000	0.004	0.424	0.056	0.000	0.004	0.429	0.059	0.000	0.003

ตาราง 23 (ต่อ)

Mode	แบบจำลองไม่มีเสาเข็ม				แบบจำลองมีเสาเข็ม ยาว 6.00 ม. พื้นที่ในจังหวัดพะเยา ดิน Type C				แบบจำลองมีเสาเข็ม ยาว 9.00 ม. พื้นที่ในจังหวัดพะเยา ดิน Type C			
	คาบ (วินาที)	Model participation			คาบ (วินาที)	Model participation			คาบ (วินาที)	Model participation		
	x	y	R	x	y	R	x	y	R			
8	0.352	0.000	0.038	0.000	0.397	0.000	0.056	0.000	0.402	0.000	0.054	0.000
9	0.343	0.000	0.000	0.025	0.385	0.009	0.000	0.042	0.389	0.009	0.000	0.042
10	0.306	0.005	0.000	0.003	0.333	0.056	0.000	0.000	0.338	0.050	0.000	0.000
11	0.285	0.000	0.016	0.000	0.309	0.005	0.000	0.011	0.310	0.003	0.000	0.011
12	0.262	0.000	0.000	0.005	0.307	0.000	0.019	0.000	0.308	0.000	0.018	0.000

ตาราง 24 คาบธรรมชาติที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้าง (2)

Mode	แบบจำลองมีเสาเข็ม ยาว 12.00 ม. พื้นที่ในจังหวัดพะเยา ดิน Type C				แบบจำลองมีเสาเข็ม ยาว 25.50 ม. พื้นที่แห่งกรุงเทพฯ			
	คาบ (วินาที)	Model participation			คาบ (วินาที)	Model participation		
	x	y	R	x	y	R		
1	1.872	0.675	0.000	0.024	2.372	0.749	0.000	0.064
2	1.655	0.000	0.713	0.000	2.271	0.065	0.000	0.794
3	1.629	0.024	0.000	0.731	2.255	0.000	0.844	0.000
4	0.691	0.121	0.000	0.000	0.888	0.083	0.000	0.002
5	0.678	0.000	0.148	0.000	0.859	0.000	0.057	0.000
6	0.655	0.000	0.000	0.120	0.808	0.001	0.000	0.042
7	0.434	0.062	0.000	0.003	0.529	0.012	0.000	0.000
8	0.406	0.000	0.053	0.000	0.473	0.000	0.008	0.000
9	0.393	0.009	0.000	0.041	0.459	0.000	0.000	0.007

ตาราง 24 (ต่อ)

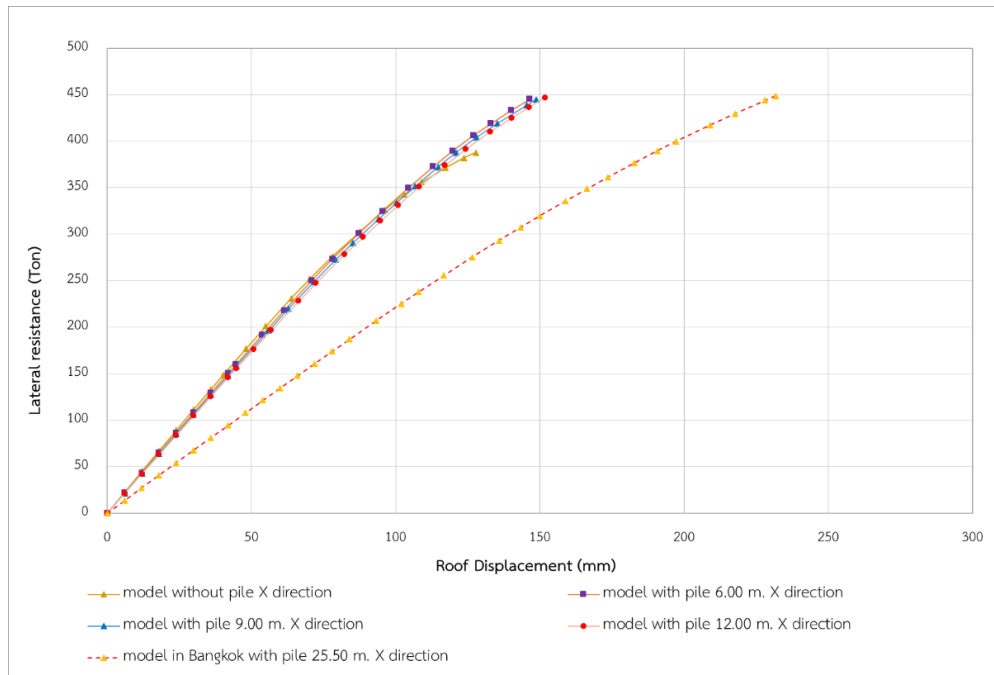
Mode	แบบจำลองมีเสาเข็ม ยาว 12.00 ม. พื้นที่ใน จังหวัดพะเยา ดินType C				แบบจำลองมีเสาเข็ม ยาว 25.50 ม. พื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ			
	คาบ (วินาที)	Model participation			คาบ (วินาที)	Model participation		
		x	y	R		x	y	R
10	0.342	0.044	0.000	0.000	0.375	0.001	0.000	0.000
11	0.312	0.002	0.000	0.011	0.331	0.000	0.002	0.000
12	0.310	0.000	0.017	0.000	0.327	0.000	0.000	0.001

#### ผลการประเมินสมรรถนะของอาคาร

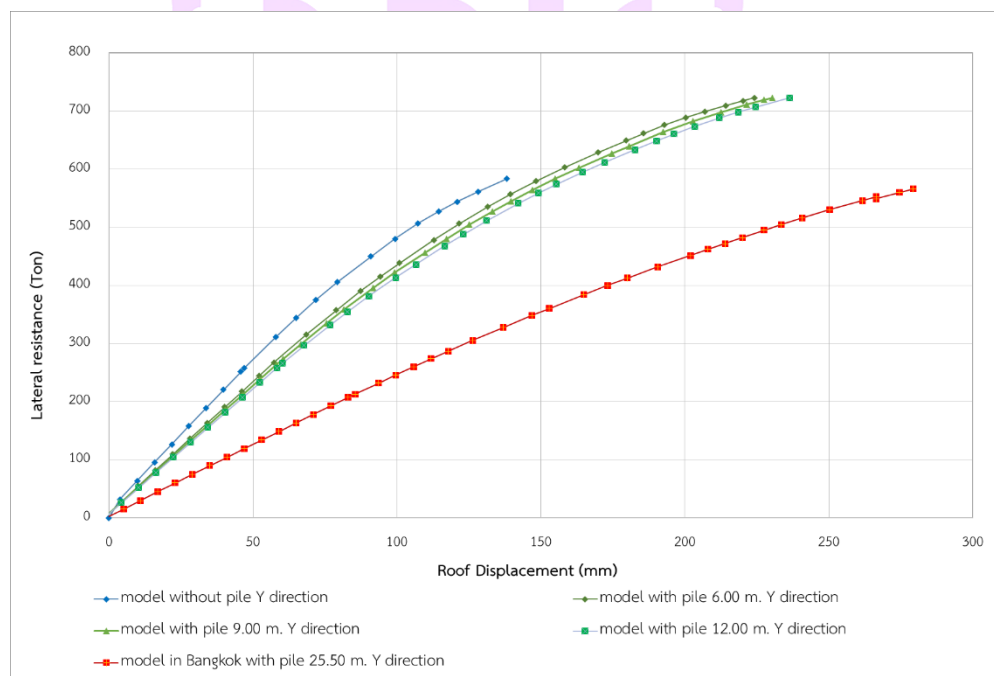
##### 1. กรณีแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม

ผลการผลัดโครงสร้างแบบสถิตไม่เชิงเส้น (nonlinear push-over) กรณีใช้แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม กำหนดฐานรองรับที่ต่อม่อเป็นแบบยึดแน่น พบว่าอาคารสามารถต้านแรงกระทำสูงสุดตามแนวแกน x ได้ 388 ตัน ที่การเคลื่อนตัวของยอดอาคาร 128 มม. โดยกราฟมีการเปลี่ยนความชันที่การเคลื่อนที่ประมาณ 85 มม. ส่วนกำลังต้านตามแนวแกน y ได้ 583 ตัน ที่การเคลื่อนตัวของยอดอาคาร 138 มม. โดยกราฟมีการเปลี่ยนแปลงความชันการเคลื่อนที่ประมาณ 65 มม. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านกับการเคลื่อนที่ของยอดอาคารแสดงดังภาพ 50 และภาพ 51

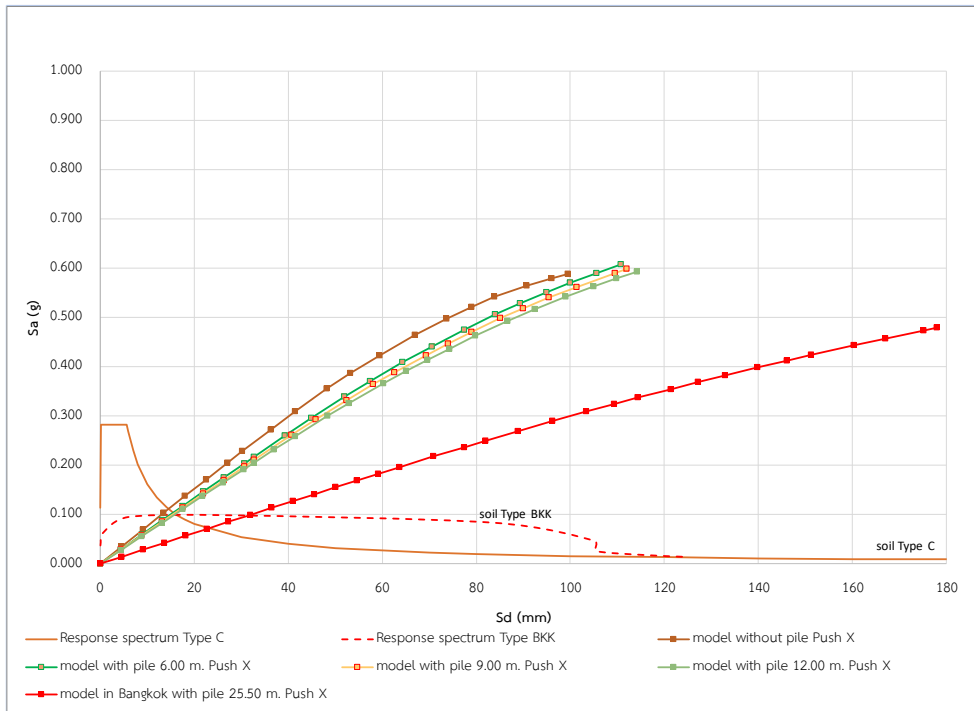
เมื่อนำกราฟเส้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านด้านข้างกับการเคลื่อนที่ของยอดอาคาร มาเปรียบเทียบกับกราฟแรงแผ่นดินไหวสำหรับการประเมิน โดยทำการแปลงค่าแกนนอนให้อยู่ในรูปของการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเชิงสเปกตรัม ( $S_d$ ) และแกนตั้งอยู่ในรูปของความเร่ง ( $S_a$ ) พบว่าจุดสมรรถนะ (จุดตัดกันระหว่างเส้นแรงพลักกับเส้นกราฟสเปกตรัม) อยู่ที่การเคลื่อนตัวเชิงสเปกตรัม 14.53 มม. ด้วยความเร่ง 0.111g สำหรับทิศทางตามแกน x (ภาพ 52) และการเคลื่อนตัวเชิงสเปกตรัม 11.61 มม. ด้วยความเร่ง 0.139g สำหรับทิศทางตามแกน y (ภาพ 53) จะเห็นว่ากราฟกำลังต้านแรงด้านข้างยังไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงความชันที่จุดสมรรถนะ โครงสร้างส่วนใหญ่จึงอยู่ในช่วงยืดหยุ่น ณ จุดสมรรถนะ



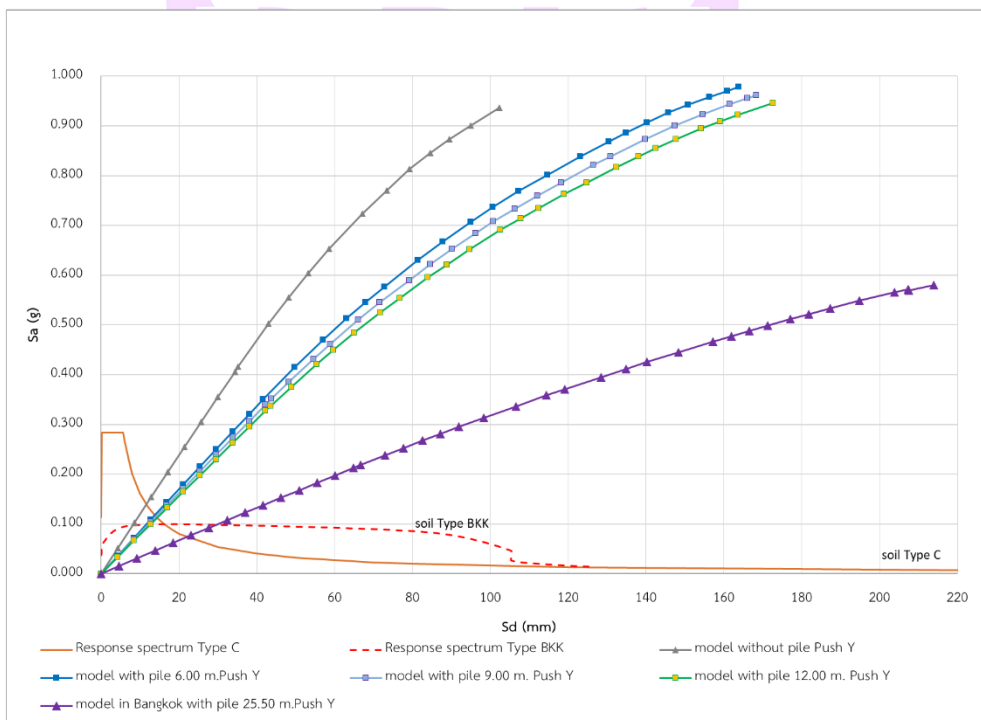
ภาพ 50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านกับการเคลื่อนที่ของยอดอาคารตามแนวแกน x



ภาพ 51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านกับการเคลื่อนที่ของยอดอาคารตามแนวแกน y

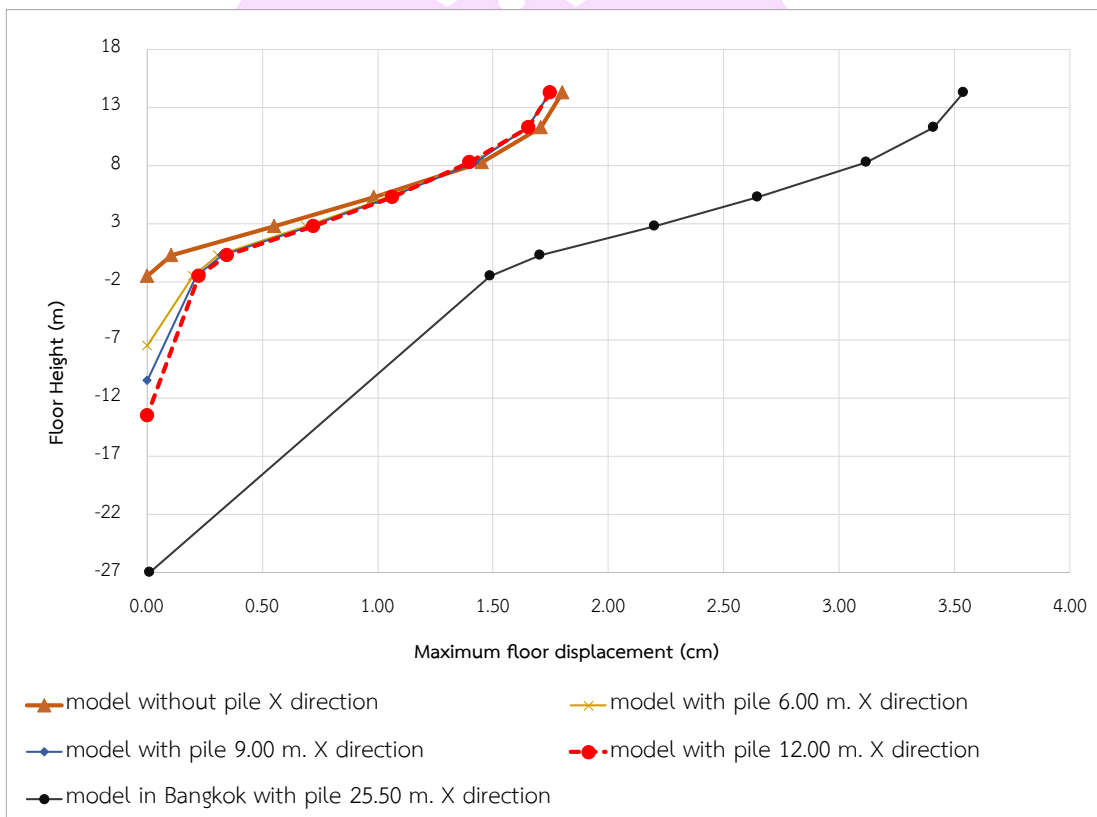


ภาพ 52 สมรรถนะอาคารตามแนวแกน x

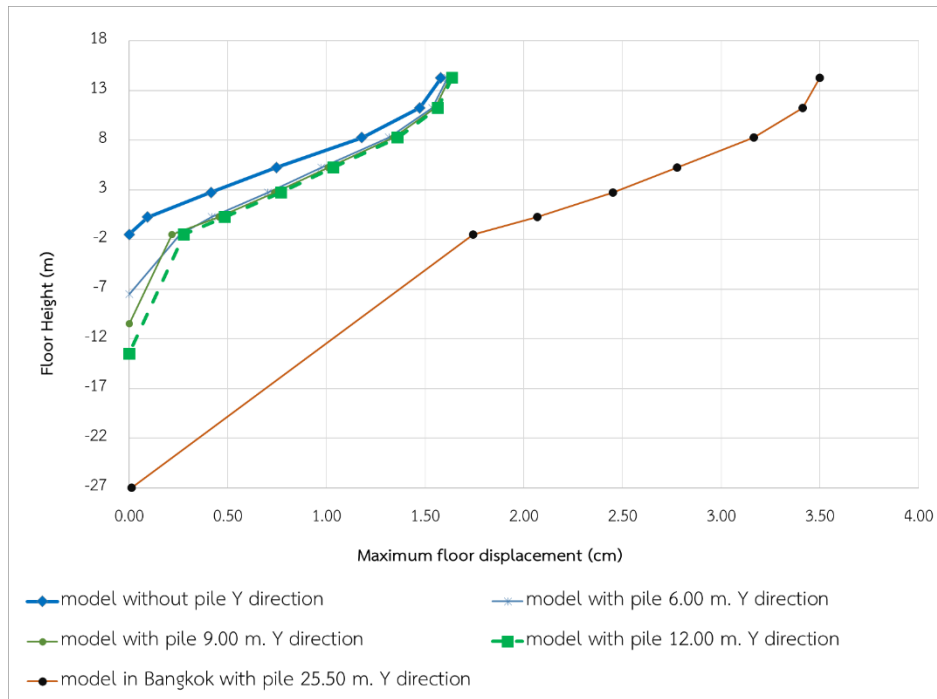


ภาพ 53 สมรรถนะอาคารตามแนวแกน y

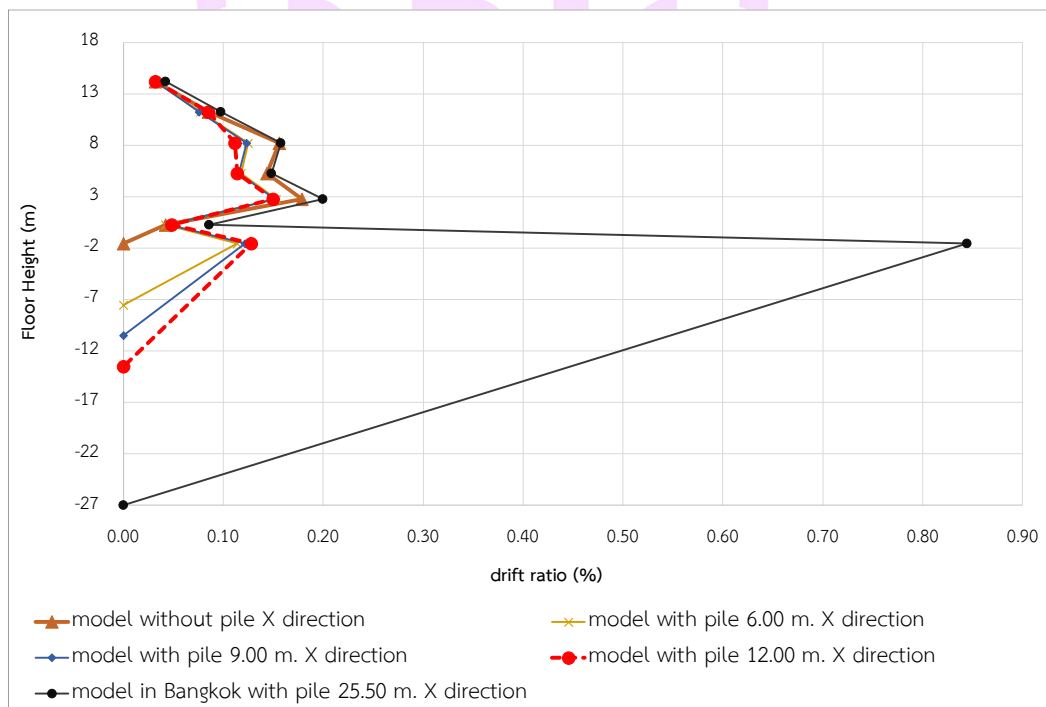
เมื่อตรวจสอบการเคลื่อนตัวในแต่ละชั้น ณ ตำแหน่งที่เป็นจุดสมรณะ พบว่าอาคารมีการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ชั้นบนสุด โดยเคลื่อนตามแนวแกน x เท่ากับ 18 มม. (ภาพ 54) และเคลื่อนตัวตามแกน y เท่ากับ 16 มม. (ภาพ 55) และเมื่อตรวจสอบการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ พบว่ามีค่าน้อยกว่า 1% ทั้งทิศทางตามแนวแกน x (ภาพ 56) และทิศทางตามแนวแกน y (ภาพ 57) ทำให้อาคารที่สร้างด้วยแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็มมีสมรรถนะเข้าใช้งานอาคารได้อย่างทันที (Immediately Operation, IO)



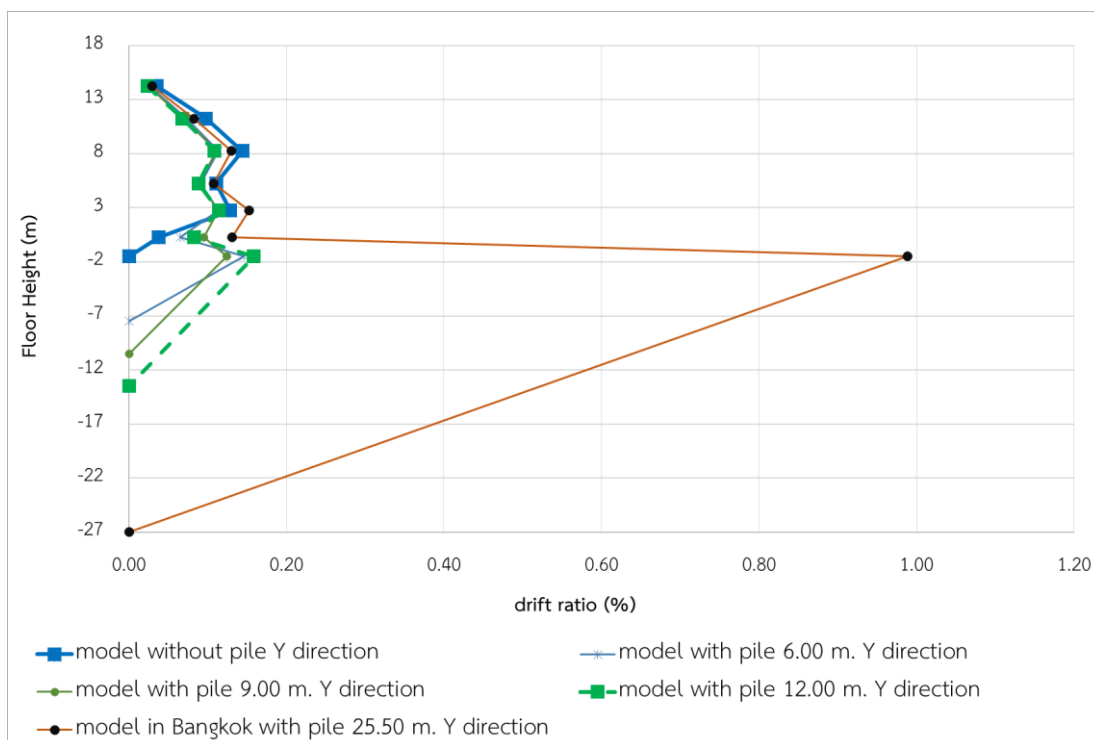
ภาพ 54 การเคลื่อนตัวสูงสุดของแต่ละชั้นตามแนวแกน x



ภาพ 55 การเคลื่อนที่สูงสุดของแต่ละชั้นตามแนวแกน y



ภาพ 56 การเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์ระหว่างชั้นตามแนวแกน x



ภาพ 57 การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้นตามแนวแกน y

## 2. กรณีแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำเนื่องถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม

2.1 สำหรับกรณีแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำเนื่องถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม บริเวณพื้นที่ในจังหวัดพะเยาความยาวเสาเข็ม 6.00 ม. พบว่า ลักษณะเส้นกราฟความสัมพันธ์ของแรงผลึกกับการเคลื่อนที่ของยอดอาคาร มีลักษณะเป็นเส้นตรงจนกระทั่งการเคลื่อนที่ของยอดอาคารประมาณ 42 มม. สำหรับการเคลื่อนที่ตามแนวแกน x (ภาพ 50) ส่วนการเคลื่อนที่ตามแนวแกน y (ภาพ 51) มีลักษณะเป็นเส้นตรงจนกระทั่งการเคลื่อนที่ของยอดอาคารประมาณ 45 มม. อย่างไรก็ตามกราฟมีความชันในทิศทางการผลึกตามแกน y มากกว่าแกน x เช่นเดียวกับแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม และมีความชันน้อยกว่าแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม โดยมีค่าแรงผลึกสูงสุดตามแกน x เท่ากับ 445 ตัน ที่การเคลื่อนที่ 146 มม. และค่าแรงผลึกสูงสุดตามแกน y เท่ากับ 722 ตัน ที่การเคลื่อนที่ 224 มม.

แบบจำลองที่มีเสาเข็มบริเวณพื้นที่ในจังหวัดพะเยาให้กำลังต้านแรงด้านข้างตามแนวแกน x แตกต่างจากแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม และยอดอาคารมีการเคลื่อนที่มากกว่าจาก 128 มม. เป็น 146 มม. คิดเป็นร้อยละ 14 และกำลังต้านด้านข้างตามแนวแกน y พบว่าแบบจำลองที่มีเสาเข็มพื้นที่จังหวัดพะเยาให้การเคลื่อนที่ของยอดอาคารได้มากกว่าแบบจำลอง

ที่ไม่มีเสาเข็มจาก 138 มม. เป็น 224 มม. คิดเป็นร้อยละ 62 ซึ่งความแตกต่างนี้อาจเกิดจากแบบจำลองที่มีเสาเข็มพื้นที่จังหวัดพะเยามีการเสียรูปของโครงสร้างร่วมกันระหว่างเสาเข็มกับการเสียรูปจากโครงสร้างอาคาร

เมื่อตรวจสอบจุดสมรรถนะจากผลของแผ่นดินไหวที่ประเมินพบว่ามี การเคลื่อนที่เชิงสเปกตรัม 15.53 มม. ด้วยความเร่ง 0.104g สำหรับทิศทางตามแกน x (ภาพ 52) และการเคลื่อนที่เชิงสเปกตรัม 13.78 มม. ด้วยความเร่ง 0.117g สำหรับทิศทางตามแกน y (ภาพ 53) ซึ่งจะเห็นว่า แบบจำลองที่มีเสาเข็มจะถูกประเมินด้วยแรงแผ่นดินไหวที่ต่ำกว่าแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็มอยู่พอสมควร หากเปรียบเทียบกันระหว่างทิศทางตามแกน x ของแบบจำลองที่มีเสาเข็มพื้นที่จังหวัดพะเยา กับแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม และทิศทางตามแกน y ของแบบจำลองที่มีเสาเข็ม กับแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม แสดงในตารางที่ 25 จากเส้นกราฟกำลังต้านแรงต้านข้างแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็มตัดกับเส้นกราฟสเปกตรัมในช่วงที่กราฟมีความชันสูง ในขณะที่แบบจำลองอาคารที่มีเสาเข็มตัดกับตำแหน่งกราฟสเปกตรัมในช่วงที่กราฟเริ่มมีความชันต่ำลง แต่กราฟกำลังต้าน ณ จุดสมรรถนะยังคงเป็นเส้นตรงแสดงให้เห็นว่าอาคารยังสามารถต้านแรงกระทำจากแผ่นดินไหวได้อย่างปลอดภัยทั้งสองแบบจำลอง

ตาราง 25 เปรียบเทียบความเร่ง ณ จุดสมรรถนะของแบบจำลอง

แบบจำลอง	x direction	y direction
ไม่มีเสาเข็ม	0.111g	0.139g
มีเสาเข็มยาว 6.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา	0.104g	0.117g
มีเสาเข็มยาว 9.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา	0.102g	0.115g
มีเสาเข็มยาว 12.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา	0.101g	0.112g
มีเสาเข็มพื้นที่แห่งกรุงเทพฯ	0.098g	0.099g

เมื่อตรวจสอบการเคลื่อนที่ในแต่ละชั้น ณ ตำแหน่งที่เป็นจุดสมรรถนะ พบว่าอาคารมีการเคลื่อนที่สูงสุดในชั้นบนสุด เท่ากับ 17 มม. และ 16 มม. สำหรับการผลัดในทิศทาง x (ภาพ 54) และ y (ภาพ 55) ตามลำดับ โดยแบบจำลองที่มีเสาเข็มให้ค่าการเคลื่อนที่สูงสุดในของแต่ละชั้น สูงกว่าแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็มทั้งสองทิศทาง โดยผลของการเรียงตัวของเสาเข็มและสปริงที่ใช้แทนดินทำให้รูปแบบการเคลื่อนที่ด้านข้างเปลี่ยนไป

เมื่อตรวจสอบเฉพาะเกณฑ์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ พบว่ามีค่าน้อยกว่าร้อยละ 1 ทั้งทิศทางตามแนวแกน x (ภาพ 56) และทิศทางตามแนวแกน y (ภาพ 57) ซึ่งทำให้อาคารที่

สร้างด้วยแบบจำลองที่มีเสาเข็มมีระดับสมรรถนะสามารถเข้าใช้งานอาคารได้อย่างทันที (Immediately Operation, IO) เช่นเดียวกับแบบจำลองอาคารที่ไม่มีเสาเข็ม

2.2 สำหรับกรณีแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำเนื่องถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มบริเวณพื้นที่ในจังหวัดพะเยาความยาวเสาเข็ม 9.00 ม. พบว่า ลักษณะเส้นกราฟความสัมพันธ์ของแรงผลึกกับการเคลื่อนที่ของยอดอาคาร มีลักษณะเป็นเส้นตรงจนกระทั่งการเคลื่อนที่ของยอดอาคารประมาณ 44 มม. สำหรับการเคลื่อนที่ตามแนวแกน x (ภาพ 50) ส่วนการเคลื่อนที่ตามแนวแกน y (ภาพ 51) มีลักษณะเป็นเส้นตรงจนกระทั่งการเคลื่อนที่ของยอดอาคารประมาณ 47 มม. โดยมีค่าแรงผลึกสูงสุดตามแกน x เท่ากับ 445 ตัน ที่การเคลื่อนที่ 146 มม. และค่าแรงผลึกสูงสุดตามแกน y เท่ากับ 723 ตัน ที่การเคลื่อนที่ 230 มม.

แบบจำลองที่มีเสาเข็มบริเวณพื้นที่ในจังหวัดพะเยาให้กำลังต้านแรงต้านข้างตามแนวแกน x แตกต่างจากแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม และยอดอาคารมีการเคลื่อนที่มากกว่าจาก 128 มม. เป็น 146 มม. คิดเป็นร้อยละ 14 และกำลังต้านข้างตามแนวแกน y พบว่าแบบจำลองที่มีเสาเข็มพื้นที่จังหวัดพะเยาให้การเคลื่อนที่ของยอดอาคารได้มากกว่าแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็มจาก 138 มม. เป็น 230 มม. คิดเป็นร้อยละ 66

เมื่อตรวจสอบจุดสมรรถนะจากผลของแผ่นดินไหวที่ประเมินพบว่ามี การเคลื่อนที่เชิงสเปกตรัม 15.77 มม. ด้วยความเร่ง 0.102g สำหรับทิศทางตามแกน x (ภาพ 52) และการเคลื่อนที่เชิงสเปกตรัม 14.08 มม. ด้วยความเร่ง 0.115g สำหรับทิศทางตามแกน y (ภาพ 53) ซึ่งจะเห็นว่า แบบจำลองที่มีเสาเข็มจะถูกประเมินด้วยแรงแผ่นดินไหวที่ต่ำกว่าแบบจำลองไม่มีเสาเข็มอยู่ แสดงในตารางที่ 25

เมื่อตรวจสอบการเคลื่อนที่ตัวในแต่ละชั้น ณ ตำแหน่งที่เป็นจุดสมรรถนะ พบว่าอาคารมีการเคลื่อนที่ตัวสูงสุดที่ชั้นบนสุด เท่ากับ 17 มม. และ 16 มม. สำหรับการผลึกในทิศทาง x (ภาพ 54) และ y (ภาพ 55) ตามลำดับ

เมื่อตรวจสอบเฉพาะเกณฑ์การเคลื่อนที่ตัวสัมพันธ์ พบว่ามีค่าน้อยกว่าร้อยละ 1 ทั้งทิศทางตามแนวแกน x (ภาพ 56) และทิศทางตามแนวแกน y (ภาพ 57) ซึ่งทำให้มีระดับสมรรถนะสามารถเข้าใช้งานอาคารได้อย่างทันที (Immediately Operation, IO)

2.3 สำหรับกรณีแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำเนื่องถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มบริเวณพื้นที่ในจังหวัดพะเยาความยาวเสาเข็ม 12.00 ม. พบว่า ลักษณะเส้นกราฟความสัมพันธ์ของแรงผลึกกับการเคลื่อนที่ของยอดอาคาร มีค่าแรงผลึกสูงสุดตามแกน x เท่ากับ 446 ตัน ที่การเคลื่อนที่ 151 มม. และค่าแรงผลึกสูงสุดตามแกน y เท่ากับ 723 ตัน ที่การเคลื่อนที่ 236 มม.

แบบจำลองที่มีเสาเข็มบริเวณพื้นที่ในจังหวัดพะเยาให้กำลังต้านแรงด้านข้างตามแนวแกน x แตกต่างจากแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม และยอดอาคารมีการเคลื่อนที่มากกว่าจาก 128 มม. เป็น 151 มม. คิดเป็นร้อยละ 18 และกำลังแรงต้านด้านข้างตามแนวแกน y พบว่าแบบจำลองที่มีเสาเข็มพื้นที่จังหวัดพะเยาให้การเคลื่อนที่ของยอดอาคารได้มากกว่าแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็มจาก 138 มม. เป็น 236 มม. คิดเป็นร้อยละ 71

เมื่อตรวจสอบจุดสมรรถนะจากผลของแผ่นดินไหวที่ประเมินพบว่ามี การเคลื่อนที่เชิงสเปกตรัม 15.96 มม. ด้วยความเร่ง 0.101g สำหรับทิศทางตามแกน x (ภาพ 52) และการเคลื่อนที่เชิงสเปกตรัม 14.38 มม. ด้วยความเร่ง 0.112g สำหรับทิศทางตามแกน y (ภาพ 53) ซึ่งจะเห็นว่า แบบจำลองที่มีเสาเข็มจะถูกประเมินด้วยแรงแผ่นดินไหวที่ต่ำกว่าแบบจำลองไม่มีเสาเข็มอยู่ แสดงในตารางที่ 25

เมื่อตรวจสอบการเคลื่อนที่ในแต่ละชั้น ณ ตำแหน่งที่เป็นจุดสมรรถนะ พบว่าอาคารมีการเคลื่อนที่สูงสุดในชั้นบนสุด เท่ากับ 17 มม. และ 16 มม. สำหรับการผลัดในทิศทาง x (ภาพ 54) และ y (ภาพ 55) ตามลำดับ

เมื่อตรวจสอบเฉพาะเกณฑ์การเคลื่อนที่ตัวสัมพัทธ์ พบว่ามีค่าน้อยกว่าร้อยละ 1 ทั้งทิศทางตามแนวแกน x (ภาพ 56) และทิศทางตามแนวแกน y (ภาพ 57) ซึ่งทำให้มีระดับสมรรถนะสามารถเข้าใช้งานอาคารได้อย่างทันที (Immediately Operation, IO)

2.4 สำหรับกรณีแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มบริเวณพื้นที่แห่งกรุงเทพฯพบว่า ลักษณะเส้นกราฟความสัมพันธ์ของแรงผลัดกับการเคลื่อนที่ของยอดอาคาร มีลักษณะเป็นเส้นตรงจนกระทั่งการเคลื่อนที่ของยอดอาคารประมาณ 88 มม. สำหรับการเคลื่อนที่ตามแนวแกน x (ภาพ 50) ส่วนการเคลื่อนที่ตามแนวแกน y (ภาพ 51) มีลักษณะเป็นเส้นตรงจนกระทั่งการเคลื่อนที่ของยอดอาคารประมาณ 96 มม. อย่างไรก็ตามมีความชันในทิศทางการผลัดตามแกน y มากกว่าแกน x เช่นเดียวกับแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม และแบบจำลองที่มีเสาเข็มพื้นที่จังหวัดพะเยา

แบบจำลองที่มีเสาเข็มพื้นที่แห่งกรุงเทพฯยังมีความชันน้อยกว่าแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม และแบบจำลองที่มีเสาเข็มพื้นที่จังหวัดพะเยา โดยมีค่าแรงผลัดสูงสุดตามแกน x เท่ากับ 449 ตัน ที่การเคลื่อนที่ 232 มม. และค่าแรงผลัดสูงสุดตามแกน y เท่ากับ 566 ตัน ที่การเคลื่อนที่ 279 มม.

แบบจำลองที่มีเสาเข็มพื้นที่แห่งกรุงเทพฯให้กำลังต้านแรงด้านข้างตามแนวแกน x ได้มากกว่าแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม และแบบจำลองที่มีเสาเข็มพื้นที่จังหวัดพะเยา รวมถึงยอดอาคารมีการเคลื่อนที่มากกว่าจาก 128 มม. เป็น 232 มม. และกำลังแรงต้านด้านข้างตาม

แนวแกน  $y$  พบว่าแบบจำลองที่มีเสาเข็มพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ ให้การเคลื่อนที่ของยอดอาคารได้มากกว่าแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม และแบบจำลองที่มีเสาเข็มพื้นที่จังหวัดพะเยา จาก 138 มม. และ 138 มม. เป็น 279 มม. ซึ่งความแตกต่างนี้อาจเกิดจาก แบบจำลองที่มีเสาเข็มมีการเสียรูปของโครงสร้างร่วมกันระหว่างเสาเข็มกับการเสียรูปจากโครงสร้างอาคาร และความแตกต่างกันของพื้นที่ที่ตั้งของแบบจำลองซึ่งทำให้ความยาวของเสาเข็ม และค่าสปีริงของสปริง ( $K$ ) ในเสาเข็มแตกต่างกัน

เมื่อตรวจสอบจุดสมรรถนะจากผลของแผ่นดินไหวที่ประเมิน พบว่ามีการเคลื่อนที่เชิงสเปกตรัม 31.51 มม. ด้วยความเร่ง 0.098g สำหรับทิศทางตามแกน  $x$  (ภาพ 52) และการเคลื่อนที่เชิงสเปกตรัม 29.69 มม. ด้วยความเร่ง 0.099g สำหรับทิศทางตามแกน  $y$  (ภาพ 53) ซึ่งจะเห็นว่า แบบจำลองที่มีเสาเข็มพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ จะถูกประเมินด้วยแรงแผ่นดินไหวที่ต่ำกว่าแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม และแบบจำลองที่มีเสาเข็มพื้นที่จังหวัดพะเยาอยู่พอสมควร แสดงในตารางที่ 25 จากเส้นกราฟกำลังต้านแรงด้านข้างแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็มตัดกับเส้นกราฟสเปกตรัมในช่วงที่กราฟมีความชันสูง ในขณะที่แบบจำลองอาคารที่มีเสาเข็มตัดกับตำแหน่งกราฟสเปกตรัมในช่วงที่กราฟเริ่มมีความชันต่ำลง แต่กราฟกำลังต้าน ณ จุดสมรรถนะยังคงเป็นเส้นตรงแสดงให้เห็นว่าอาคารยังสามารถต้านแรงกระทำจากแผ่นดินไหวได้อย่างปลอดภัยทั้ง 5 แบบจำลอง

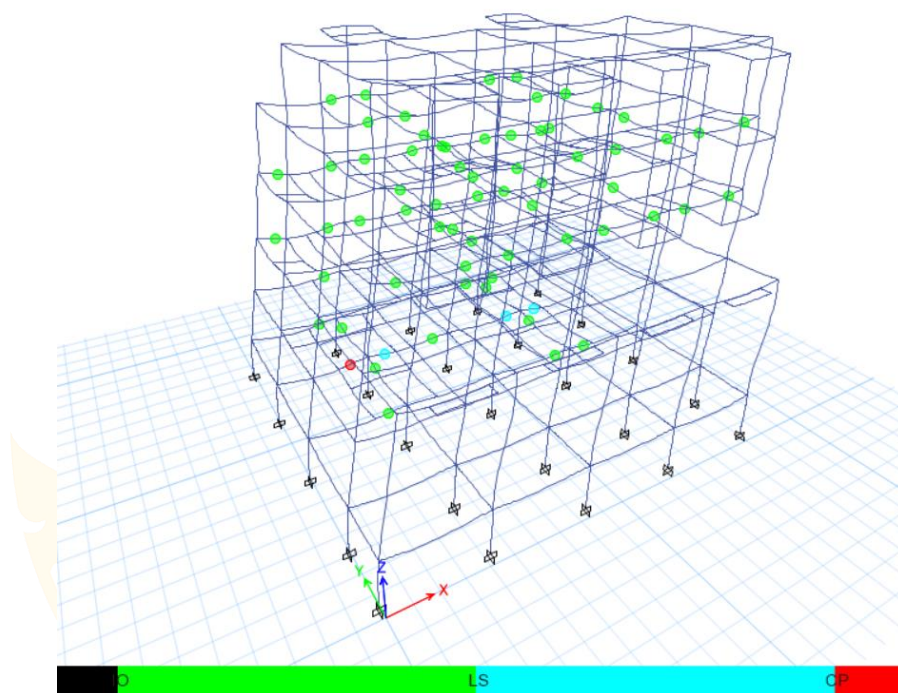
เมื่อตรวจสอบการเคลื่อนที่ในแต่ละชั้น ณ ตำแหน่งที่เป็นจุดสมรรถนะ พบว่าอาคารมีการเคลื่อนที่สูงสุดที่ชั้นบนสุด เท่ากับ 35 มม. และ 35 มม. สำหรับการผลัดในทิศทาง  $x$  (ภาพ 54) และ  $y$  (ภาพ 55) ตามลำดับ โดยแบบจำลองที่มีเสาเข็มให้ค่าการเคลื่อนที่สูงสุดของแต่ละชั้น สูงกว่าแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม และแบบจำลองที่มีเสาเข็มพื้นที่จังหวัดพะเยาทั้งสองทิศทาง โดยผลของการเรียงตัวของเสาเข็ม และสปริงที่ใช้แทนดินทำให้รูปแบบการเคลื่อนที่ด้านข้างเปลี่ยนไป

เมื่อตรวจสอบเฉพาะเกณฑ์การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ พบว่ามีค่าน้อยกว่าร้อยละ 1 ทั้งทิศทางตามแนวแกน  $x$  (ภาพ 56) และทิศทางตามแนวแกน  $y$  (ภาพ 57) ซึ่งทำให้อาคารที่สร้างด้วยแบบจำลองที่มีเสาเข็มมีระดับสมรรถนะสามารถเข้าใช้งานอาคารได้อย่างทันที (Immediately Operation, IO) เช่นเดียวกับแบบจำลองอาคารที่ไม่มีเสาเข็ม และแบบจำลองที่มีเสาเข็มพื้นที่จังหวัดพะเยา

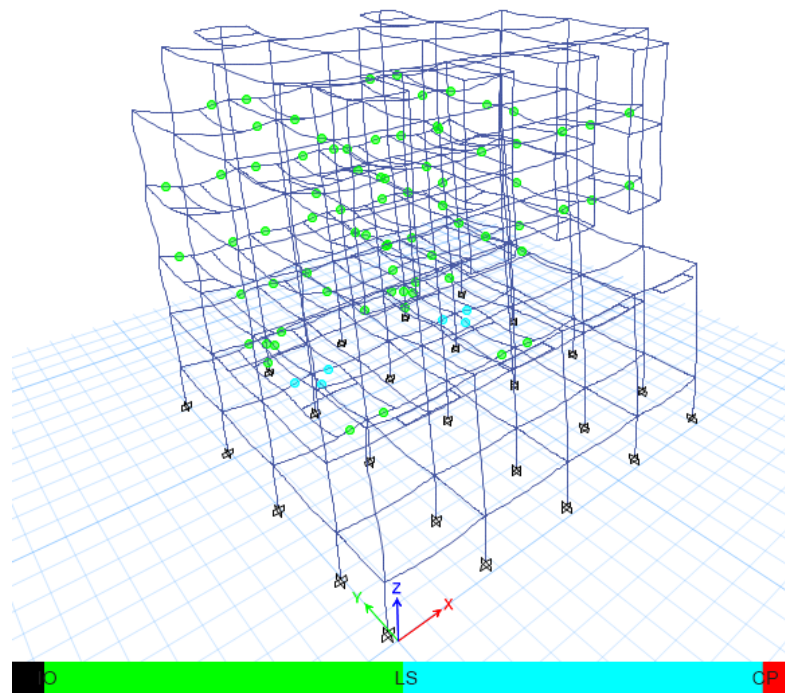
### 3. ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคาร

แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม เกณฑ์ของการเคลื่อนที่ของอาคารจะแสดงว่าอาคารอยู่ในระดับสามารถเข้าใช้งานอาคารได้อย่างทันทีหลังเหตุการณ์

แผ่นดินไหวรุนแรง ตาม มยผ.1303-57 แต่เมื่อตรวจสอบความเสียหายในองค์อาคารหลัก ณ แรงพลักที่จุดสมรรถนะพบว่า กรณีอาคารที่ไม่มีเสาเข็มพลักตามแกน x มีความเสียหายระดับ ป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention, CP) ที่คานรับพื้นชั้น 1 ที่เส้นกริด ง1-ง2 (ภาพ 58) โดยเป็นความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือน ส่วนตำแหน่งอื่น ๆ และกรณีอาคารที่ไม่มีเสาเข็มพลักตามแกน y เป็นความเสียหายในคานที่ระดับเข้าใช้งานอาคารได้อย่างทันที (Immediately Operation, IO) โดยเป็นความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือนทั้งหมด ซึ่งถือว่าอาคารมีความเสียหายเล็กน้อย สามารถซ่อมแซมได้ จึงสรุปได้ว่าการประเมินอาคารโดยใช้แบบจำลอง โครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็มอยู่ในระดับป้องกันการพังทลาย

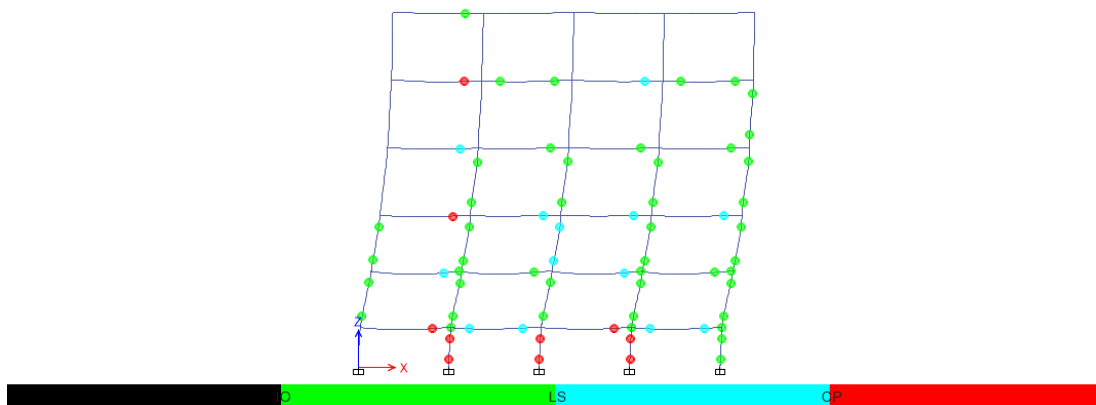


ภาพ 58 จุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็มกรณีพลักตามแกน x

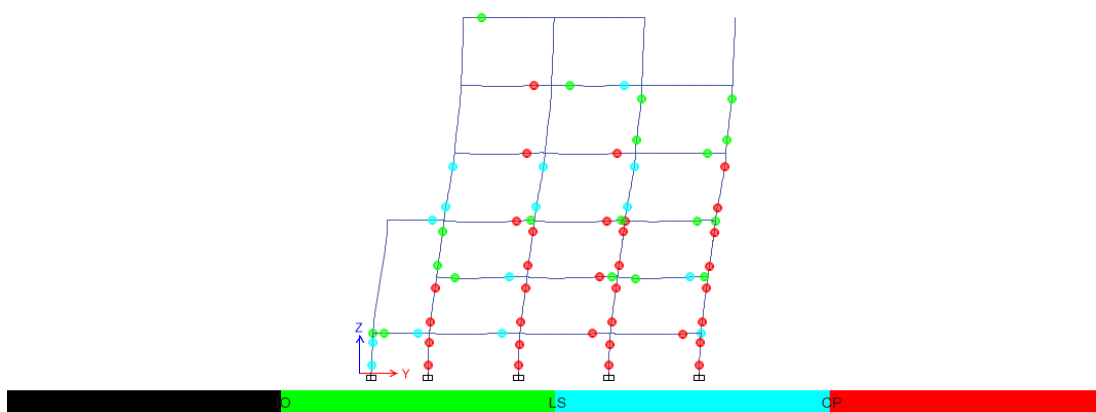


ภาพ 59 จุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม  
กรณีผลึกตามแกน  $y$

จากการศึกษาผลตอบสนองในกรณีที่มีความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีมากกว่าที่  
ประเมิน เมื่อเพิ่มแรงผลึกไปจนกระทั่งอาคารวิบัติลำดับสุดท้ายกรณีผลึกตามแกน  $x$  โดย  
เกณฑ์การวิบัติกำหนดจากจุดหมุนพลาสติกในองค์อาคารเกินกว่าจุดสุดท้ายที่สูญเสียแรงต้าน  
(จุด E ในภาพที่ 17) มีหลายจุดจนกระทั่งโครงสร้างอาคารไม่สามารถถ่ายเทแรงต้านไปยังองค์  
อาคารที่เหลือได้แล้ว โดยโปรแกรมจะหยุดการวิเคราะห์ผล พบว่า ความเสียหายของ  
แบบจำลองอาคารที่ไม่มีเสาเข็มจะเป็นการวิบัติด้วยแรงเฉือนในเสาตอม่อทั้งปลายล่างและ  
ปลายบน (ภาพ 60) มีความเสียหายระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention, CP) เป็น  
ส่วนใหญ่ของเสาตอม่อ ส่วนความเสียหายในเสาที่พบมีเกือบทุกชั้นซึ่งส่วนใหญ่มีความเสียหาย  
อยู่ในระดับสามารถเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediately Operation, IO) ส่วนกรณีผลึกตามแกน  
 $y$  พบว่า ความเสียหายจะเป็นการวิบัติด้วยแรงเฉือนในเสาตอม่อทั้งปลายล่างและปลายบน  
(ภาพ 61) มีความเสียหายระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention, CP) เป็นส่วนใหญ่  
ของเสาตอม่อ ส่วนความเสียหายในเสาที่พบในชั้นอื่นพบว่าส่วนใหญ่มีความเสียหายอยู่ใน  
ระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention, CP) เช่นเดียวกับเสาตอม่อ



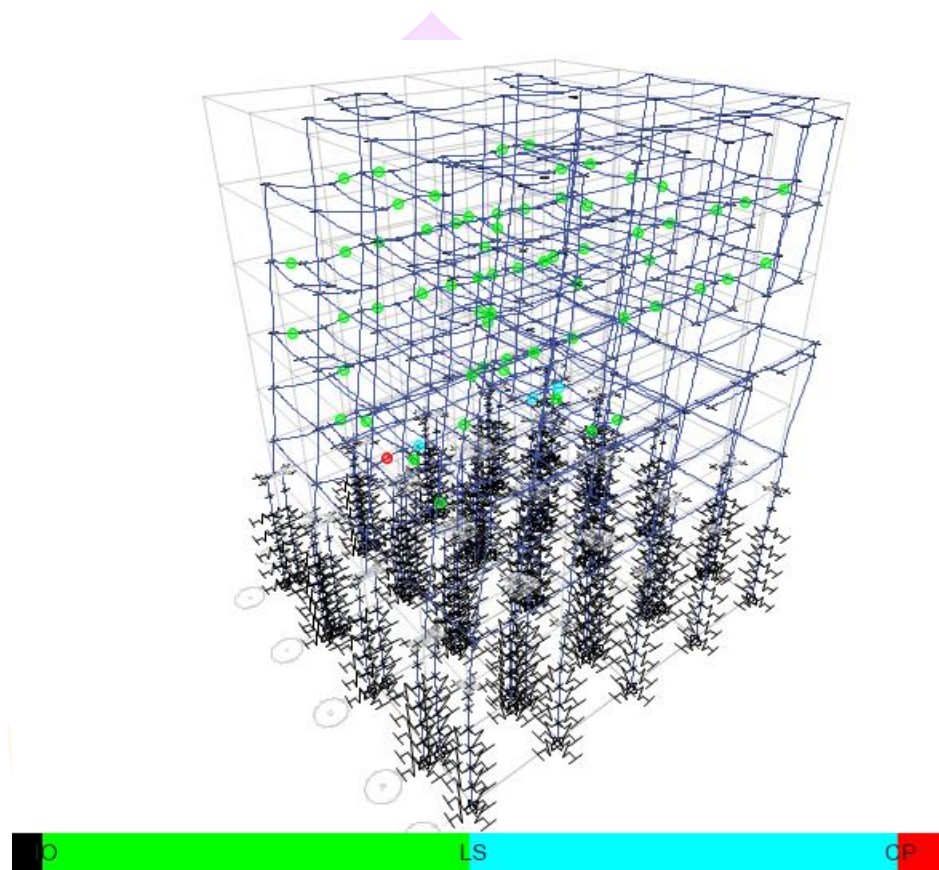
ภาพ 60 รูปแบบการวิบัติสุดท้ายของแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่ค้ำนึ่งถึงเสาเข็ม  
กรณีผลัดตามแกน x



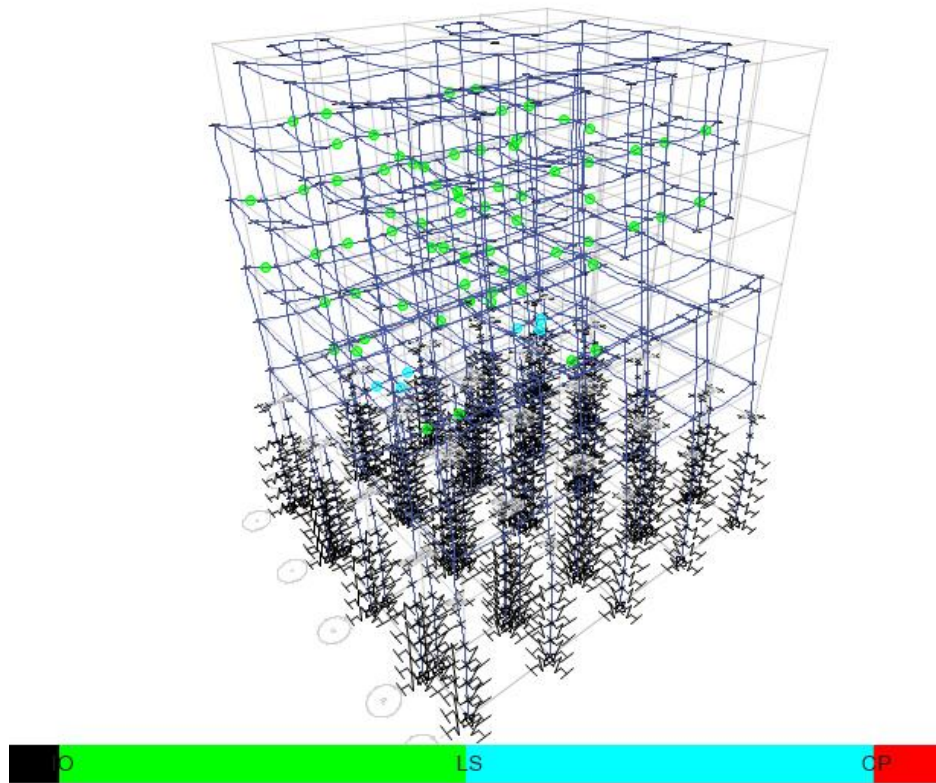
ภาพ 61 รูปแบบการวิบัติสุดท้ายของแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่ค้ำนึ่งถึงเสาเข็ม  
กรณีผลัดตามแกน y

3.1 แรงผลัดที่จุดสมรณะของแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำนึ่งถึงโครงสร้าง  
ฐานรากเสาเข็มยาว 6.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยาจะมีค่าต่ำลง เมื่อพิจารณาจุดหมุนพลาสติกที่  
เกิดขึ้นกรณีผลัดตามแกน x พบว่า คานรับพื้นชั้น 1 ที่เส้นกริด 1-2 (ภาพ 62) มีความ  
เสียหายระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention, CP) โดยเป็นความเสียหายเนื่องจาก  
แรงเฉือน เช่นเดียวกับแบบจำลองอาคารที่ไม่มีเสาเข็ม โดยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่เสาเข็มนั้น

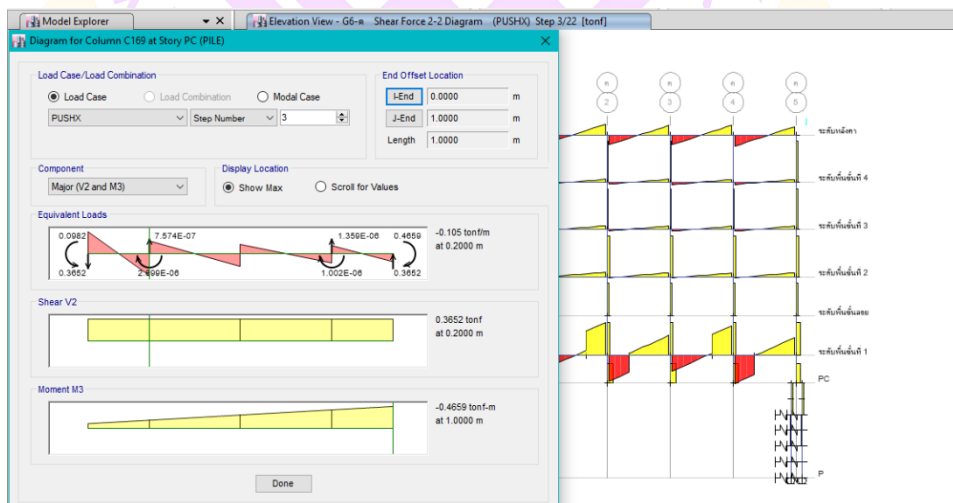
เท่ากับ 0.365 ตัน ยังไม่ถึงกำลังต้านแรงเฉือนในเสาเข็มที่รับได้ และกรณีผลักตามแกน y เป็นความเสียหายในคานที่ระดับเข้าใช้งานอาคารได้อย่างทันที (Immediately Operation, IO) โดยเป็นความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือนทั้งหมด โดยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่เสาเข็มเท่ากับ 0.135 ตัน ยังไม่ถึงกำลังต้านแรงเฉือนในเสาเข็มที่รับได้เช่นกันกับกรณีผลักตามแกน x



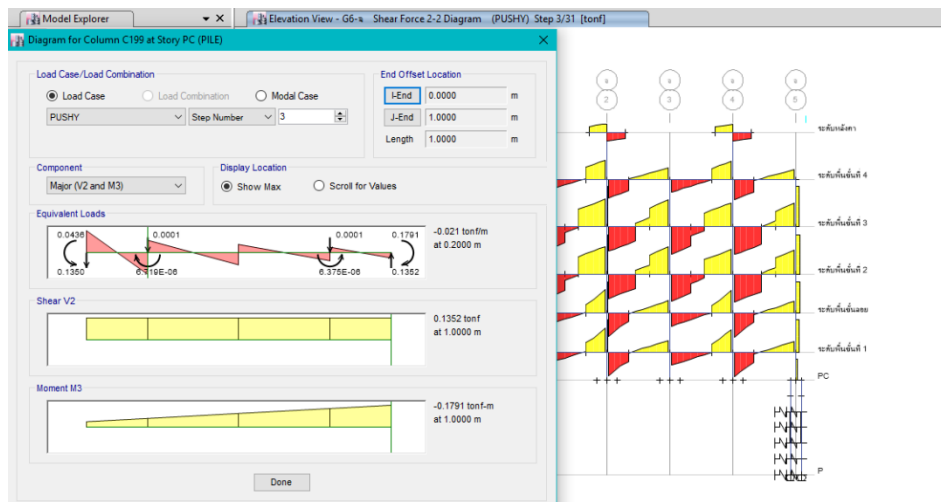
ภาพ 62 จุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำนั่งถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มยาว 6.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลักตามแกน x



ภาพ 63 จุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำนั่งถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มยาว 6.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน y

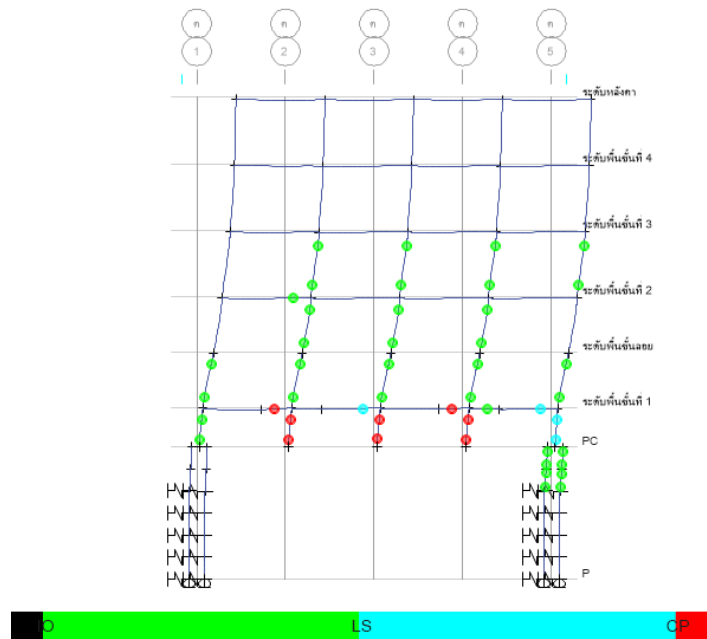


ภาพ 64 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่จุดสมรรถนะของเสาเข็มจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่มีเสาเข็มยาว 6.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน x

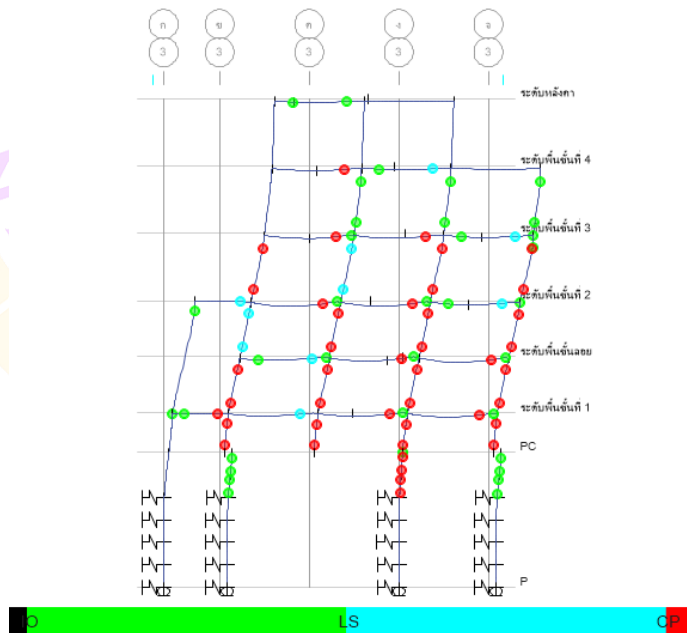


ภาพ 65 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่จุดสมรรถนะของเสาเข็มจากแบบจำลองโครงสร้างอาคาร ที่มีเสาเข็มยาว 6.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน y

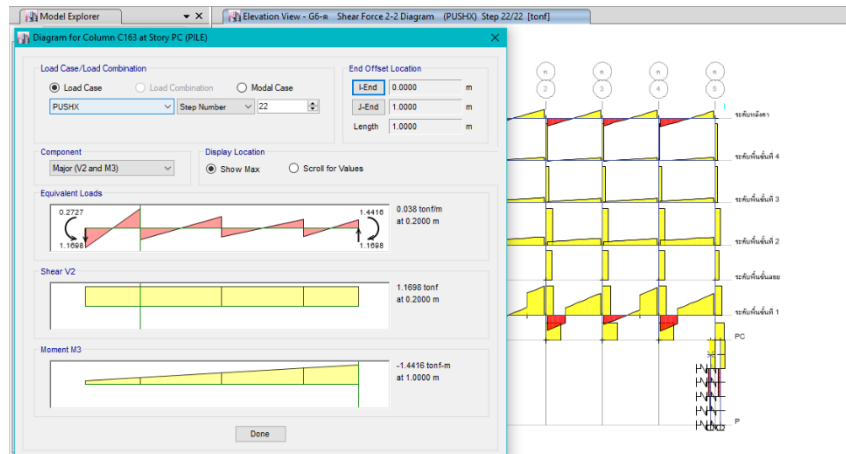
แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำเนื่องถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มยาว 6.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา เมื่อเพิ่มแรงผลัดไปจนกระทั่งอาคารวิบัติลำดับสุดท้ายกรณีผลัดตามแกน x พบว่า ความเสียหายจะเป็นการวิบัติด้วยแรงเฉือนในเสาทั้งปลายล่างและปลายบนเป็นส่วนใหญ่ (ภาพ 66) ซึ่งส่วนใหญ่มีความเสียหายระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention, CP) และพบความเสียหายที่บริเวณหัวเสาเข็มเป็นการวิบัติด้วยแรงเฉือนเท่ากับ 1.169 ตัน และแรงดัด ความเสียหายอยู่ในระดับสามารถเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediately Operation, IO) ส่วนกรณีผลัดตามแกน y พบว่า ความเสียหายจะเป็นการวิบัติด้วยแรงเฉือนในเสาตอม่อทั้งปลายล่างและปลายบน (ภาพ 67) มีความเสียหายระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention, CP) เป็นส่วนใหญ่ของเสาตอม่อ ส่วนความเสียหายในเสาที่พบในชั้นอื่นพบว่าส่วนใหญ่มีความเสียหายอยู่ในระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention, CP) และพบความเสียหายที่บริเวณหัวเสาเข็มเป็นการวิบัติด้วยแรงเฉือนเท่ากับ 0.191 ตัน และแรงดัด ความเสียหายส่วนใหญ่ของเสาเข็มอยู่ในระดับสามารถเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediately Operation, IO) โดยเกิดการวิบัติที่เสาเข็ม ที่เส้นกริด ง3 ความเสียหายอยู่ในระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention, CP)



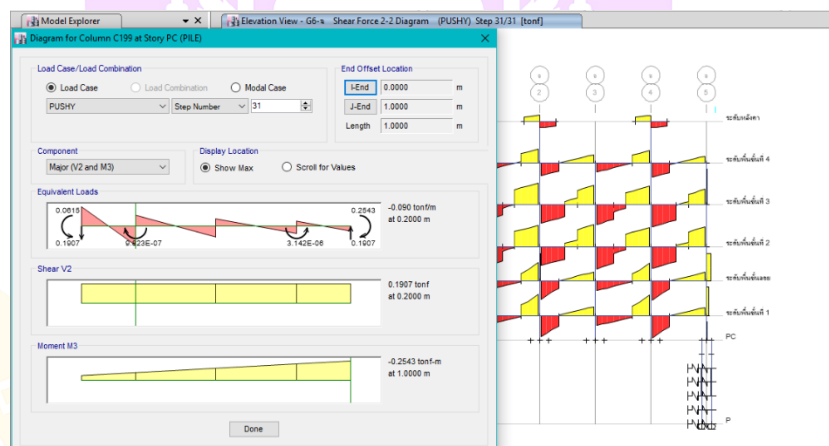
ภาพ 66 รูปแบบการวิบัติสุดท้ายของแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำนึ่งถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มยาว 6.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน x



ภาพ 67 รูปแบบการวิบัติสุดท้ายของแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำนึ่งถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มยาว 6.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน y



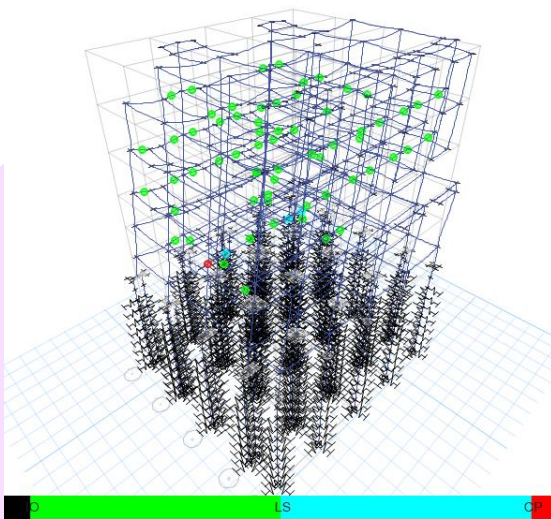
ภาพ 68 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่การวิบัติสุดท้ายของเสาเข็มจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่มีเสาเข็มยาว 6.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน x



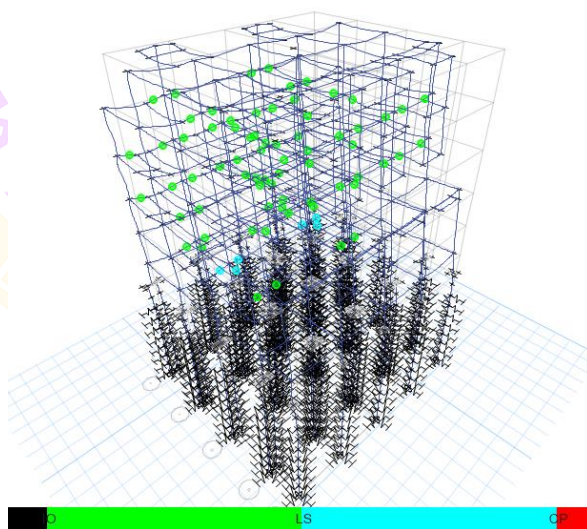
ภาพ 69 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่การวิบัติสุดท้ายของเสาเข็มจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่มีเสาเข็มยาว 6.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน y

3.2 แรงผลัดที่จุดสมรรถนะของแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำเนื่องถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มยาว 9.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยาจะมีค่าต่ำลง เมื่อพิจารณาจุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นกรณีผลัดตามแกน x พบว่า คานรับพื้นชั้น 1 ที่เส้นกริด ง1-ง2 (ภาพ 70) มีความเสียหายระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention, CP) โดยเป็นความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือน ส่วนแรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่เสาเข็มนั้นเท่ากับ 0.359 ตัน และกรณีผลัดตามแกน y

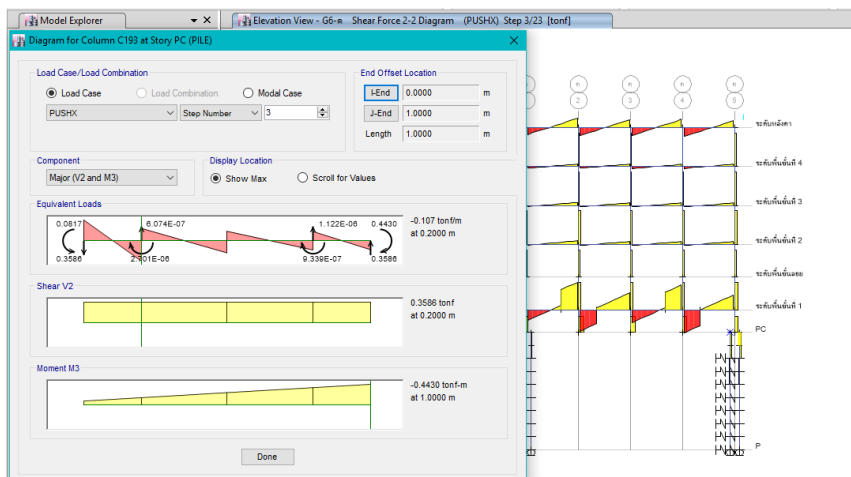
เป็นความเสียหายในคานที่ระดับเข้าใช้งานอาคารได้อย่างทันที (Immediately Operation, IO) โดยเป็นความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือนทั้งหมด โดยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่เสาเข็มเท่ากับ 0.133 ตัน ยังไม่ถึงกำลังต้านแรงเฉือนในเสาเข็มที่รับได้เช่นกันกับกรณีผลัดตามแกน x



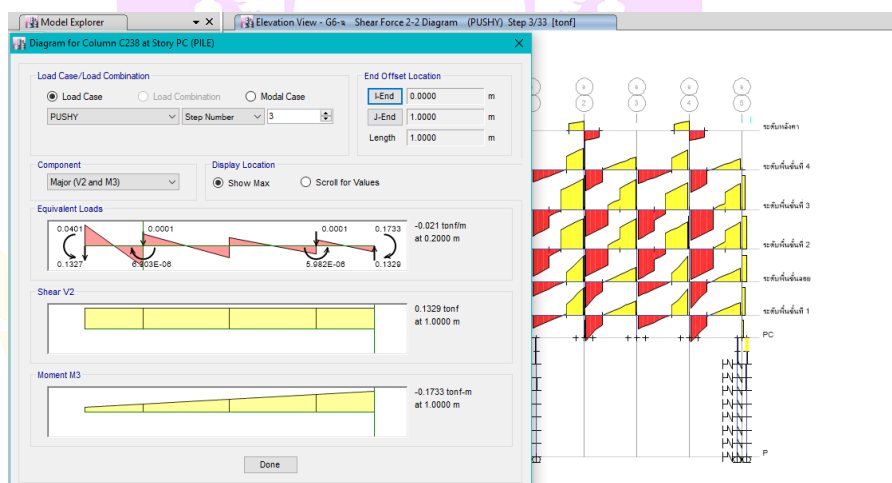
ภาพ 70 จุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำนั่งถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มยาว 9.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน x



ภาพ 71 จุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำนั่งถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มยาว 9.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน y



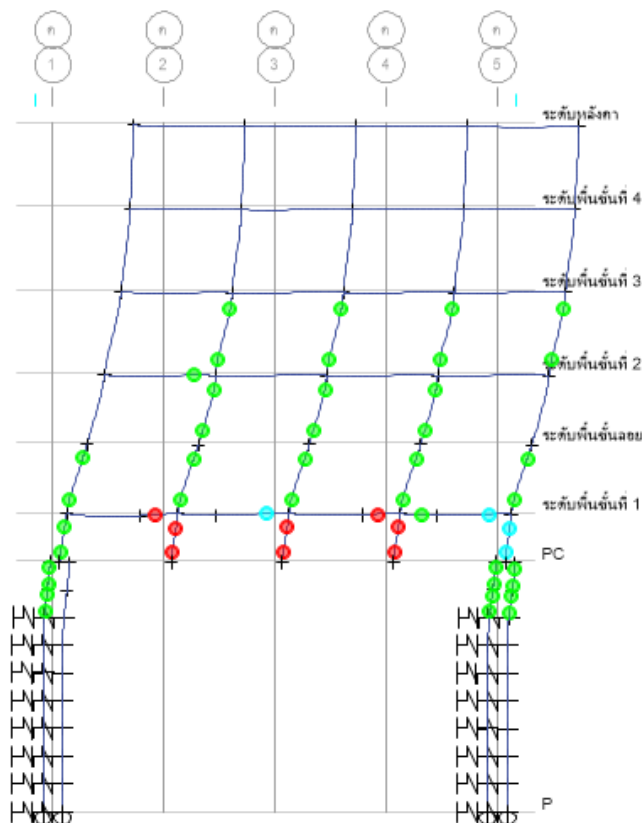
ภาพ 72 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่จุดสมรรถนะของเสาเข็มจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่มีเสาเข็มยาว 9.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน x



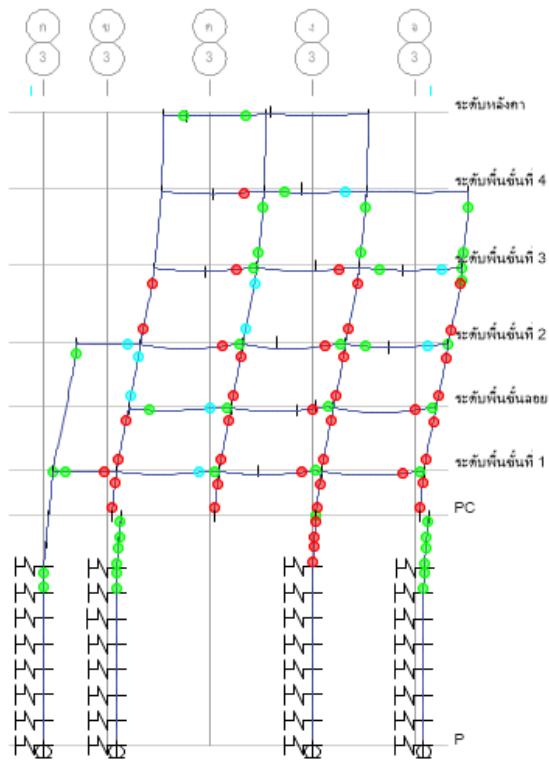
ภาพ 73 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่จุดสมรรถนะของเสาเข็มจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่มีเสาเข็มยาว 9.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน y

แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มยาว 9.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา เมื่อเพิ่มแรงผลัดไปจนกระทั่งอาคารวิบัติลำดับสุดท้ายกรณีผลัดตามแกน x พบว่า ความเสียหายจะเป็นการวิบัติด้วยแรงเฉือนในเสาทั้งปลายล่างและปลายบนเป็นส่วนใหญ่ (ภาพ 74) ซึ่งส่วนใหญ่มีความเสียหายระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention,

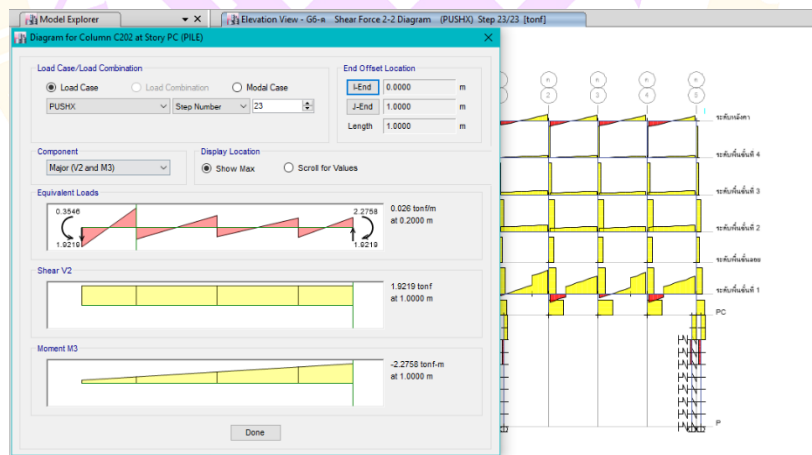
CP) และพบความเสียหายที่บริเวณหัวเสาเข็มเป็นการวิบัติด้วยแรงเฉือนเท่ากับ 1.922 ตัน และแรงดัด ความเสียหายอยู่ในระดับสามารถเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediately Operation, IO) ส่วนกรณีผลึกตามแกน y พบว่า ความเสียหายจะเป็นการวิบัติด้วยแรงเฉือนในเสาตอม่อทั้งปลายล่างและปลายบน (ภาพ 75) มีความเสียหายระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention, CP) เป็นส่วนใหญ่ของเสาตอม่อ ส่วนความเสียหายในเสาที่พบในชั้นอื่นพบว่าส่วนใหญ่มีความเสียหายอยู่ในระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention, CP) และพบความเสียหายที่บริเวณหัวเสาเข็มเป็นการวิบัติด้วยแรงเฉือนเท่ากับ 0.181 ตัน และแรงดัด ความเสียหายส่วนใหญ่ของเสาเข็มอยู่ในระดับสามารถเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediately Operation, IO) โดยเกิดการวิบัติที่เสาเข็ม ที่เส้นกริด ง3 ความเสียหายอยู่ในระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention, CP)



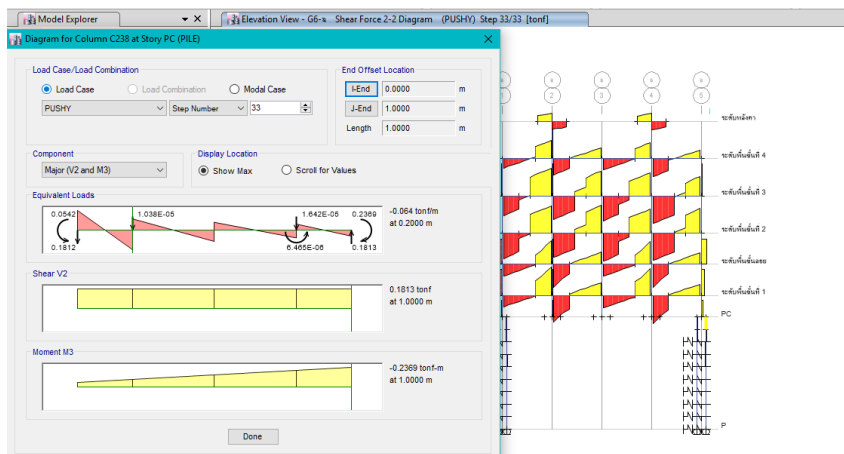
ภาพ 74 รูปแบบการวิบัติสุดท้ายของแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำนึ่งถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มยาว 9.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลึกตามแกน x



ภาพ 75 รูปแบบการวิบัติสุดท้ายของแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำเนื่องถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มยาว 9.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน y



ภาพ 76 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจากการวิบัติสุดท้ายของเสาเข็มจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่มีเสาเข็มยาว 9.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน x

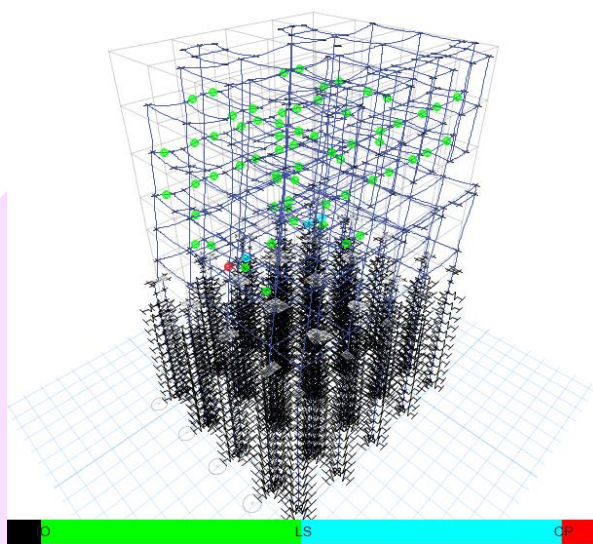


ภาพ 77 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่การวิบัติสุดท้ายของเสาเข็มจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่มีเสาเข็มยาว 9.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน y

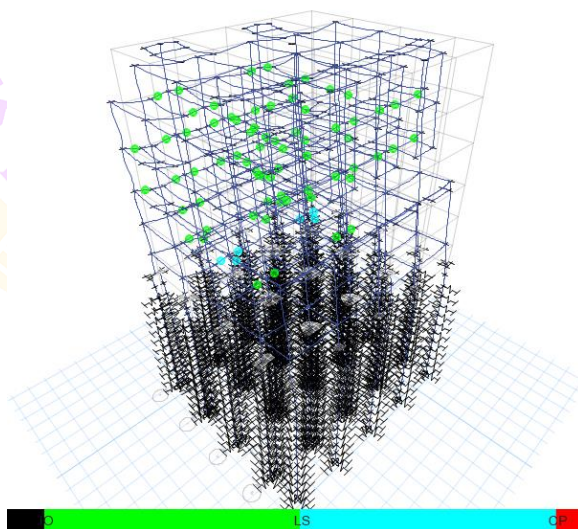
3.3 แรงผลัดที่จุดสมรณะของแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำเนื่องถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มยาว 12.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยาจะมีค่าต่ำลง เมื่อพิจารณาจุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นกรณีผลัดตามแกน x พบว่า คานรับพื้นชั้น 1 ที่เส้นกริด ง1-ง2 (ภาพ 78) มีความเสียหายระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention, CP) ส่วนแรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่เสาเข็มนั้นเท่ากับ 0.353 ตัน และกรณีผลัดตามแกน y เป็นความเสียหายในคานที่ระดับเข้าใช้งานอาคารได้อย่างทันที (Immediately Operation, IO) โดยเป็นความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือนทั้งหมด และแรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่เสาเข็มเท่ากับ 0.131 ตัน

แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำเนื่องถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มยาว 12.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา เมื่อเพิ่มแรงผลัดไปจนกระทั่งอาคารวิบัติลำดับสุดท้ายกรณีผลัดตามแกน x พบว่า ความเสียหายจะเป็นการวิบัติด้วยแรงเฉือนในเสาทั้งปลายล่างและปลายบนเป็นส่วนใหญ่ (ภาพ 82) ซึ่งส่วนใหญ่มีความเสียหายระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention, CP) และพบความเสียหายที่บริเวณหัวเสาเข็มเป็นการวิบัติด้วยแรงเฉือนเท่ากับ 1.161 ตัน และแรงดัด ความเสียหายอยู่ในระดับสามารถเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediately Operation, IO) ส่วนกรณีผลัดตามแกน y พบว่า ความเสียหายจะเป็นการวิบัติด้วยแรงเฉือนในเสาตอม่อทั้งปลายล่างและปลายบน (ภาพ 83) มีความเสียหายระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention, CP) เป็นส่วนใหญ่ของเสาตอม่อ ส่วนความเสียหายในเสาที่พบในชั้นอื่นพบว่าส่วนใหญ่มีความเสียหายอยู่ในระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention, CP) และพบความเสียหายที่บริเวณหัวเสาเข็มเป็นการวิบัติด้วยแรงเฉือนเท่ากับ 0.182 ตัน และแรงดัด

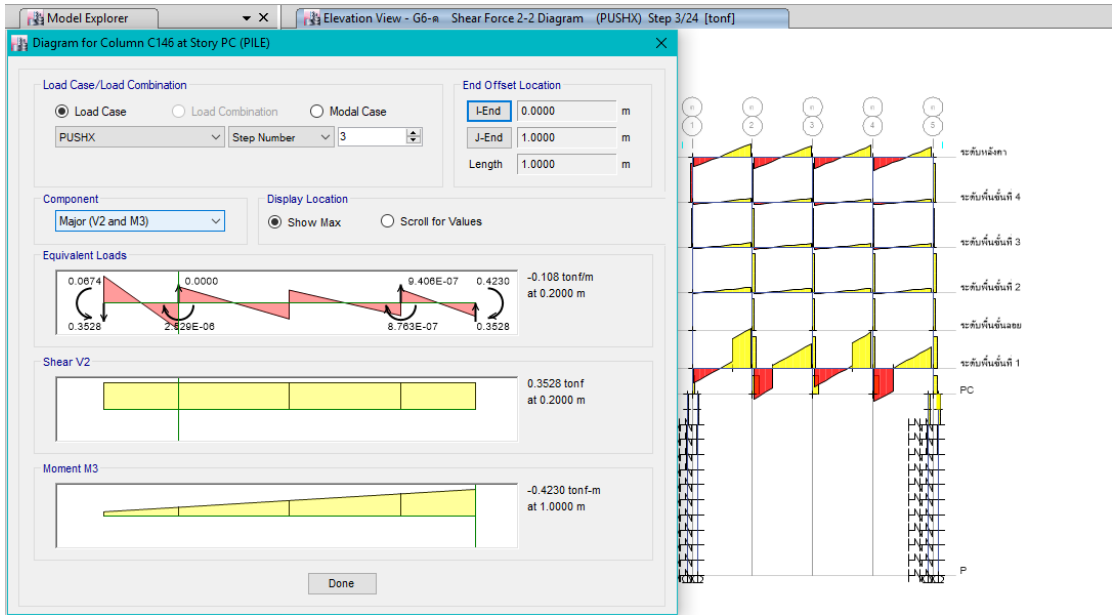
ความเสียหายส่วนใหญ่ของเสาเข็มอยู่ในระดับสามารถเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediately Operation, IO) โดยเกิดการวิบัติที่เสาเข็ม ที่เส้นกริด ง3 ความเสียหายอยู่ในระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention, CP)



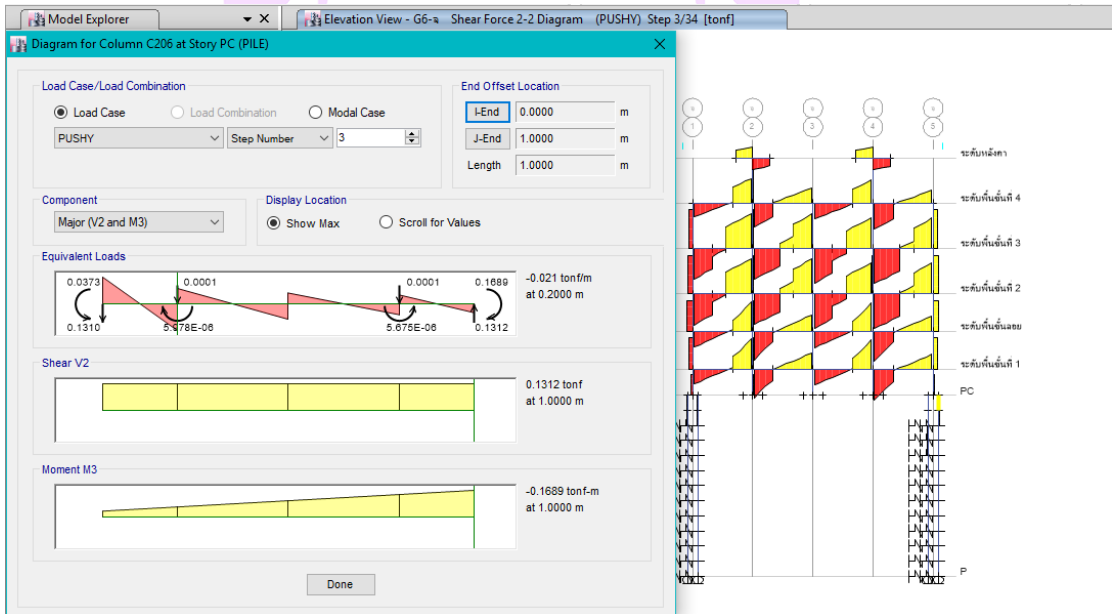
ภาพ 78 จุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำนั่งถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มยาว 12.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน x



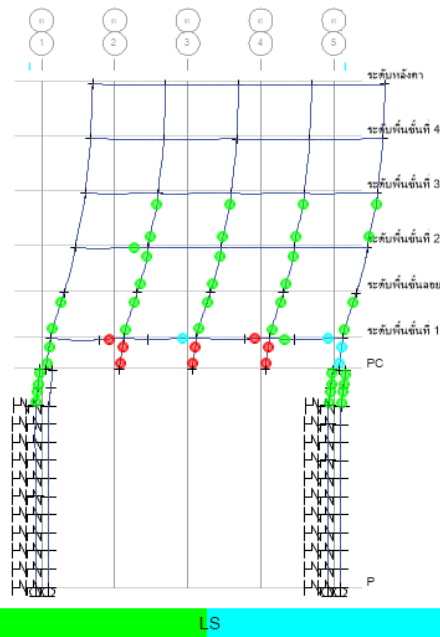
ภาพ 79 จุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำนั่งถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มยาว 12.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน y



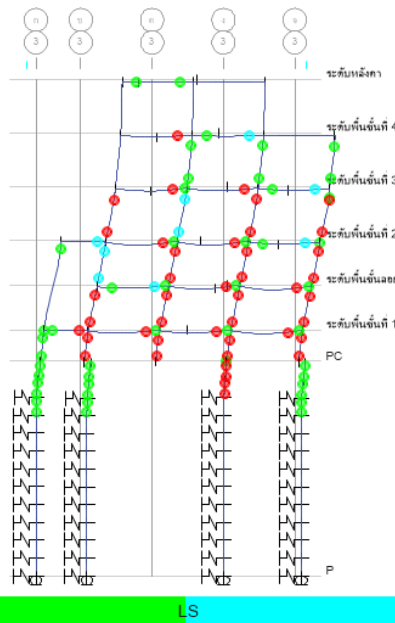
ภาพ 80 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่จุดสมรรถนะของเสาเข็มจากแบบจำลองโครงสร้างอาคาร  
ที่มีเสาเข็มยาว 12.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน x



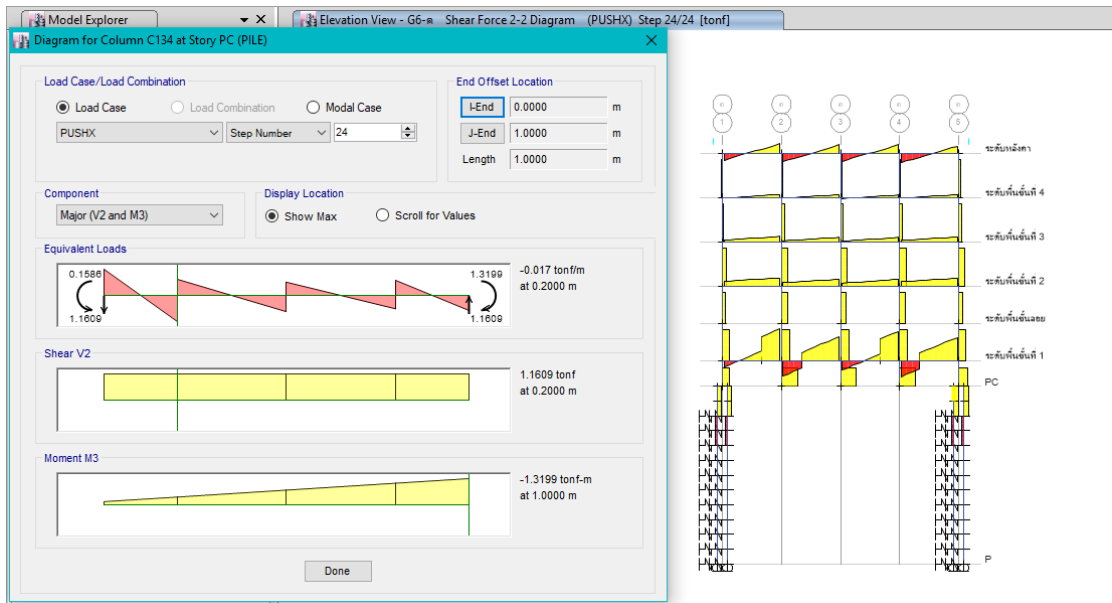
ภาพ 81 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่จุดสมรรถนะของเสาเข็มจากแบบจำลองโครงสร้างอาคาร  
ที่มีเสาเข็มยาว 12.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน y



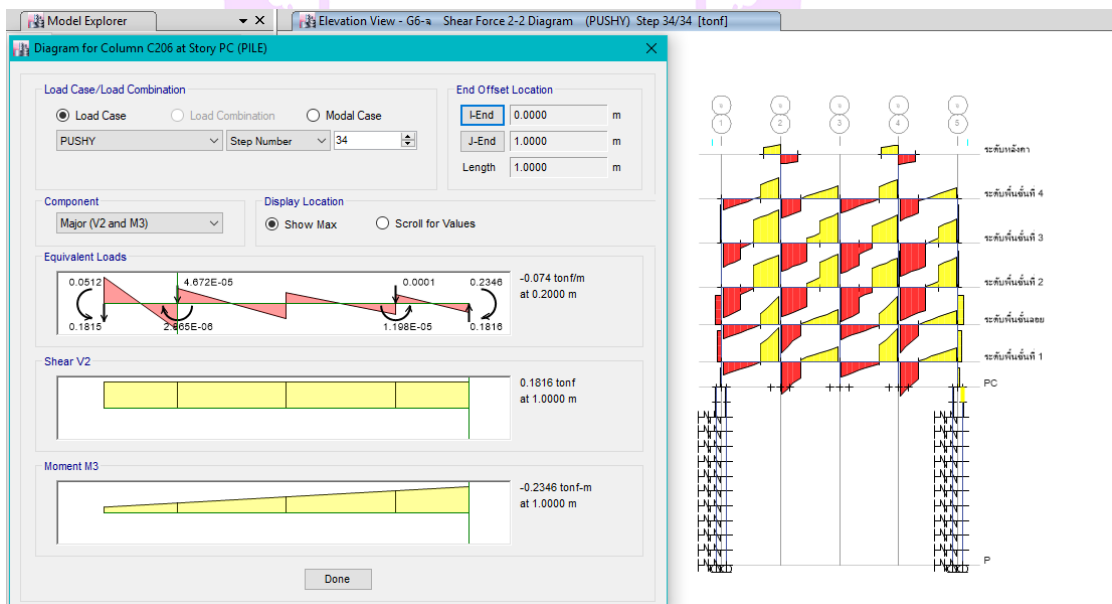
ภาพ 82 รูปแบบการวิบัติสุดท้ายของแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำเนื่องถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มยาว 12.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน x



ภาพ 83 รูปแบบการวิบัติสุดท้ายของแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำเนื่องถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มยาว 12.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน y



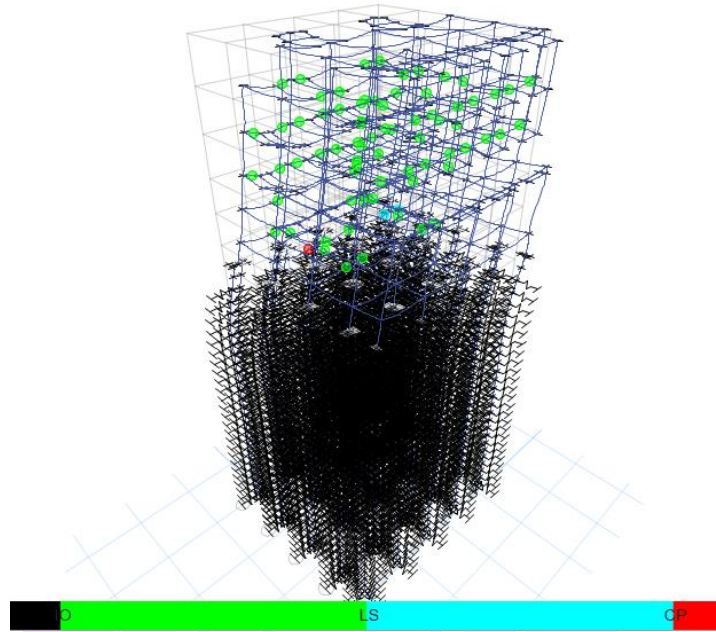
ภาพ 84 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่การวิบัติสุดท้ายของเสาเข็มจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่มีเสาเข็มยาว 12.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน x



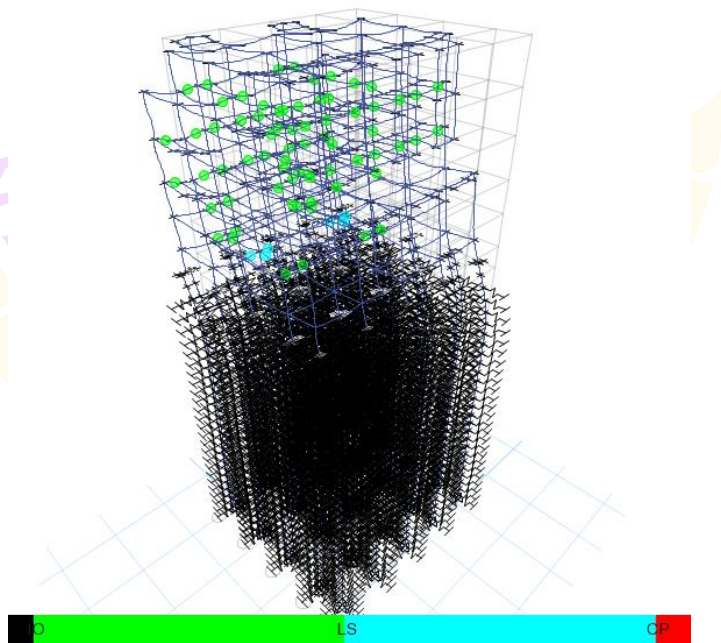
ภาพ 85 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่การวิบัติสุดท้ายของเสาเข็มจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่มีเสาเข็มยาว 12.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา กรณีผลัดตามแกน y

3.4 แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯจะมีค่าแรงผลักที่จุดสมรรถนะต่ำที่สุด กรณีผลัดตามแกน  $x$  เมื่อพิจารณาจุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นพบว่า คานรับพื้นชั้น 1 ที่เส้นกริด ง1-ง2 (ภาพ 86) มีความเสียหายระดับป้องกันการพังทลายโดยเป็นความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือน เช่นเดียวกับแบบจำลองอาคารที่ไม่มีเสาเข็ม และแบบจำลองที่มีเสาเข็มพื้นที่จังหวัดพะเยา ส่วนแรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่เสาเข็มนั้นเท่ากับ 0.375 ตัน และกรณีผลัดตามแกน  $y$  เป็นความเสียหายในคานที่ระดับเข้าใช้งานอาคารได้อย่างทันที (Immediately Operation, IO) โดยเป็นความเสียหายเนื่องจากแรงเฉือนทั้งหมดและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่เสาเข็มเท่ากับ 0.055 ตัน

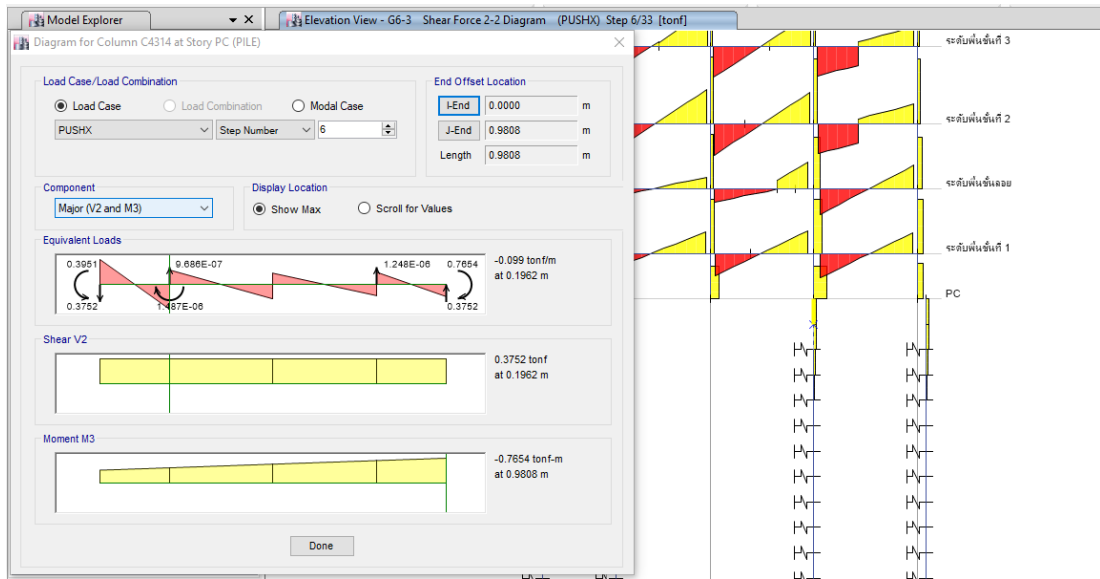
แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ เมื่อเพิ่มแรงผลักไปจนกระทั่งอาคารวิบัติลำดับสุดท้ายกรณีผลัดตามแกน  $X$  พบว่าความเสียหายจะเป็นการวิบัติด้วยแรงเฉือนในเสาตอม่อทั้งปลายล่าง และปลายบนเป็นส่วนใหญ่ (ภาพ 90) ซึ่งมีความเสียหายอยู่ในระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention, CP) และมีความเสียหายอยู่ในระดับสามารถเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediately Operation, IO) ในเสาของชั้นอื่นๆ ส่วนเสาเข็มนั้นพบความเสียหายที่บริเวณหัวเสาเข็มเป็นการวิบัติด้วยแรงเฉือนเพียงอย่างเดียวเท่ากับ 1.985 ตัน ความเสียหายอยู่ในระดับสามารถเข้าใช้อาคารได้ทันที (Immediately Operation, IO) ส่วนกรณีผลัดตามแกน  $y$  พบว่า ความเสียหายจะเป็นการวิบัติด้วยแรงเฉือนในเสาตอม่อทั้งปลายล่างและปลายบน (ภาพ 91) มีความเสียหายระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention, CP) เป็นส่วนใหญ่ของเสาทั้งหมด ในส่วนเสาเข็มนั้นพบความเสียหายที่บริเวณหัวเสาเข็มเป็นการวิบัติด้วยแรงเฉือนเพียงอย่างเดียวเท่ากับ 0.056 ตัน ความเสียหายอยู่ในระดับปลอดภัยต่อชีวิต (Life Safety, LS) และเสาเข็มสามารถต้านทานแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้



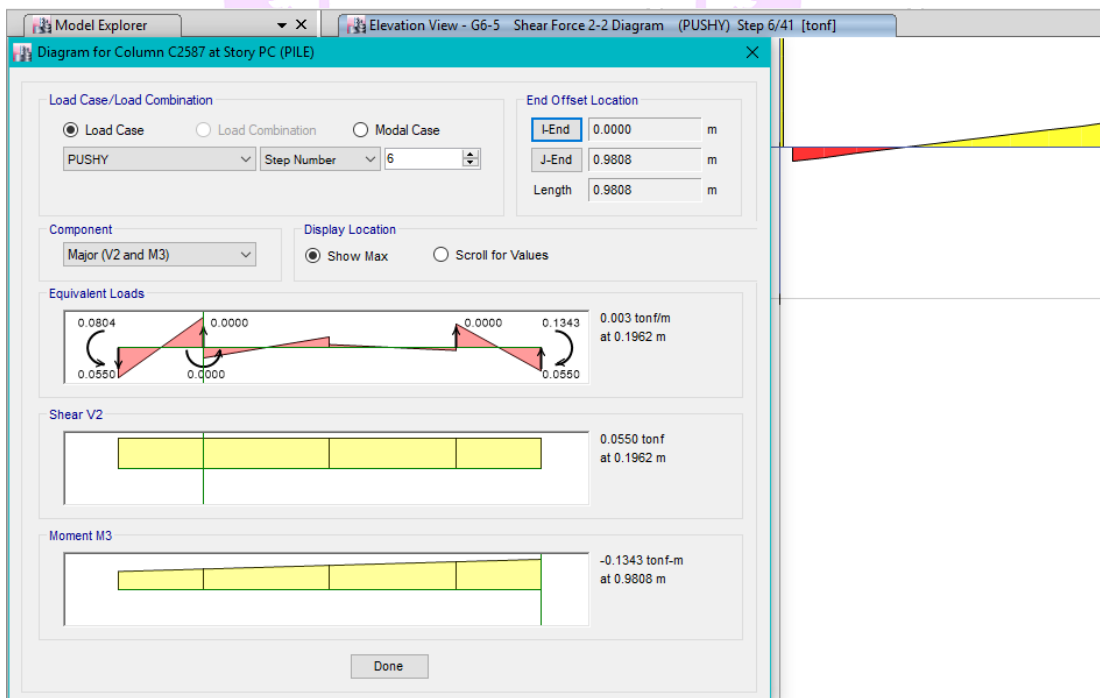
ภาพ 86 จุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำเนื่องถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มพื้นที่แห่งกรุงเทพฯ กรณีผลัดตามแกน x



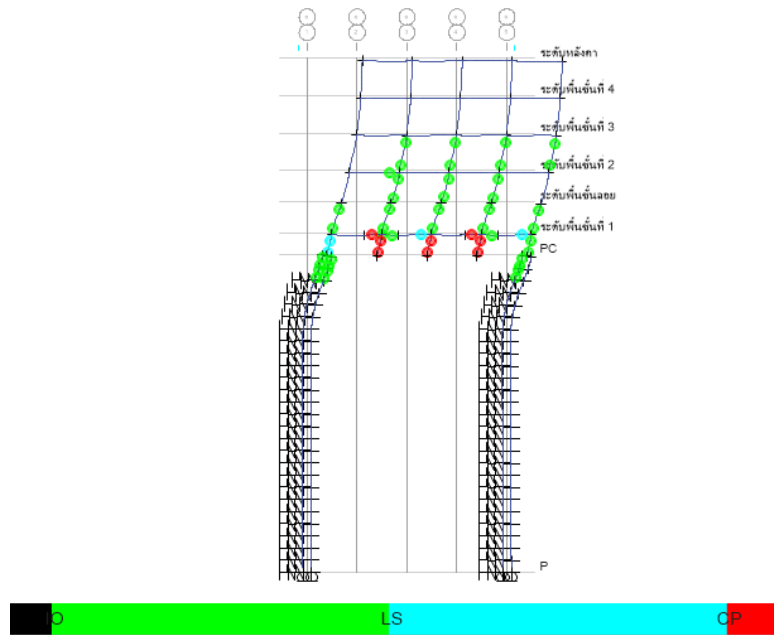
ภาพ 87 จุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำเนื่องถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มพื้นที่แห่งกรุงเทพฯ กรณีผลัดตามแกน y



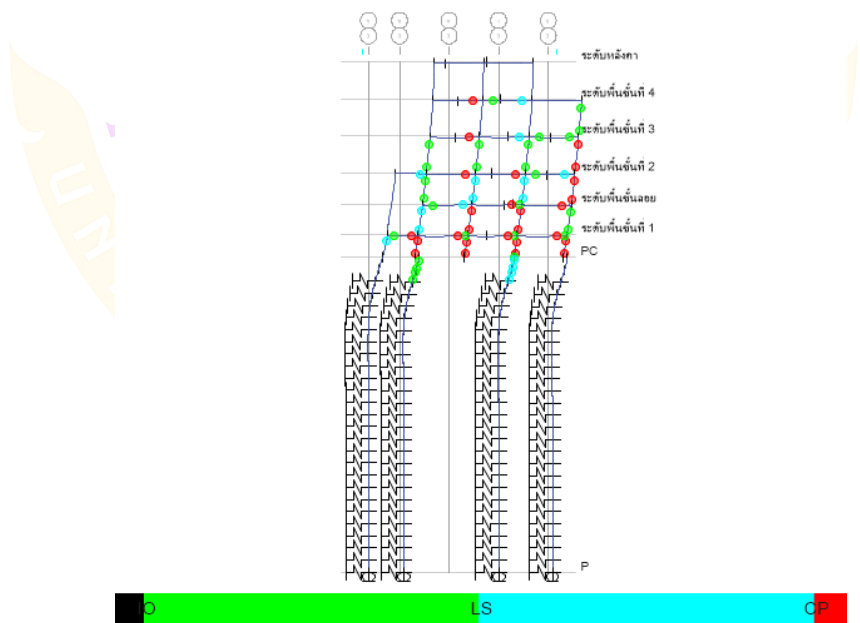
ภาพ 88 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่จุดสมรรถนะของเสาเข็มจากแบบจำลองโครงสร้างอาคาร  
พื้นที่แห่งกรุงเทพฯ กรณีผลัดตามแกน x



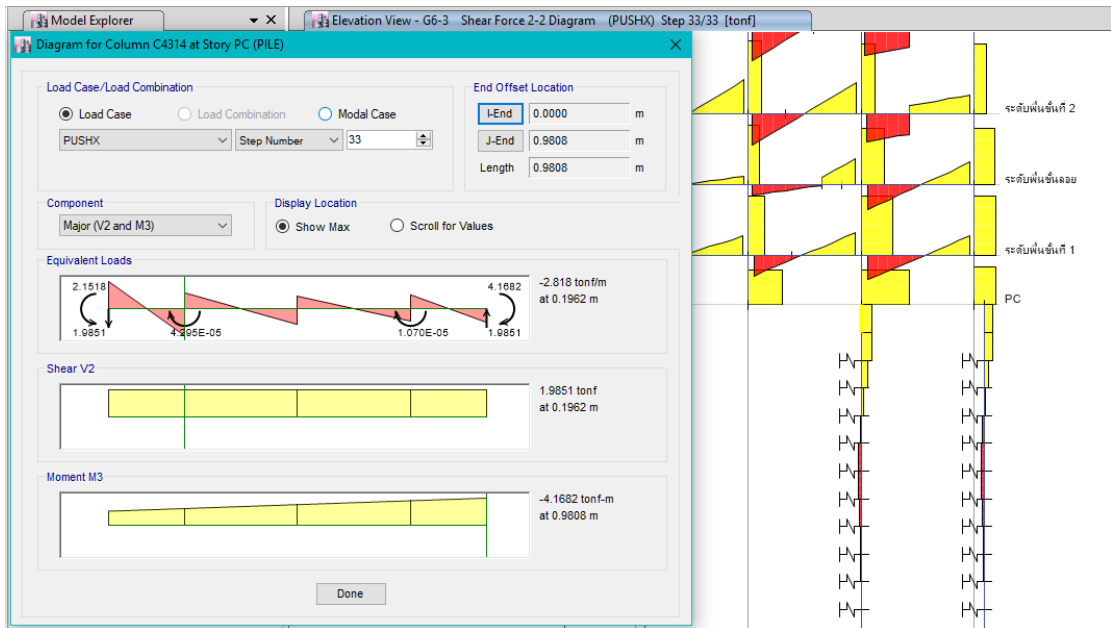
ภาพ 89 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่จุดสมรรถนะของเสาเข็มจากแบบจำลองโครงสร้างอาคาร  
พื้นที่แห่งกรุงเทพฯ กรณีผลัดตามแกน y



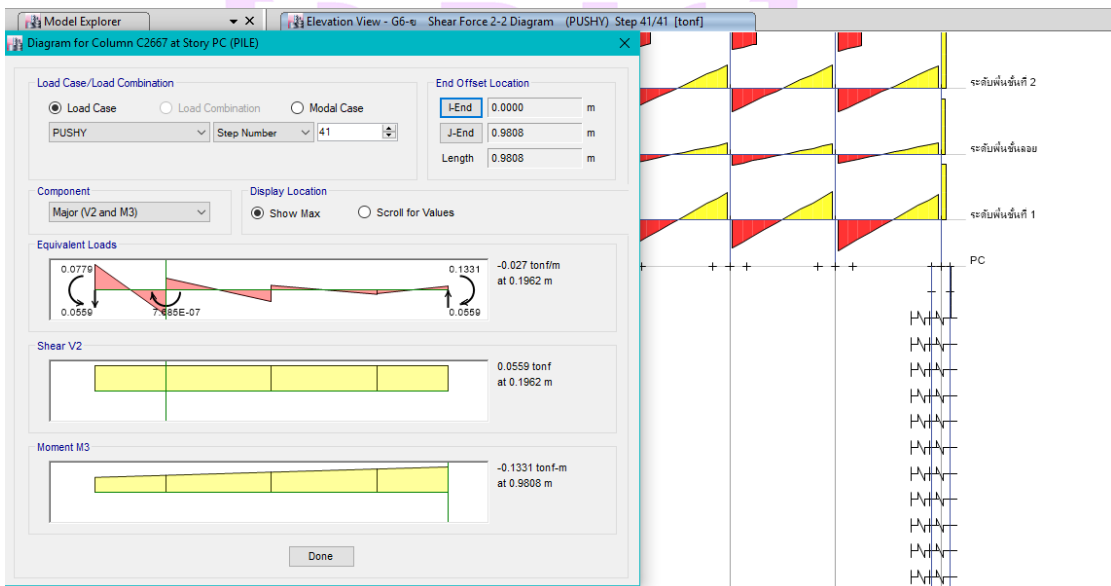
ภาพ 90 รูปแบบการวิบัติสุดท้ายของแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำเนื่องถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ กรณีผลักตามแกน x



ภาพ 91 รูปแบบการวิบัติสุดท้ายของแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำเนื่องถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ กรณีผลักตามแกน y



ภาพ 92 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่การวิบัติสุดท้ายของเสาเข็มจากแบบจำลองโครงสร้าง  
อาคาร พื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ กรณีผลัดตามแกน x



ภาพ 93 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่การวิบัติสุดท้ายของเสาเข็มจากแบบจำลองโครงสร้าง  
อาคาร พื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ กรณีผลัดตามแกน y

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม และแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม โดยแบบจำลองที่มีเสาเข็มอยู่ในพื้นที่จังหวัดพะเยา นั้นให้เป็นตัวแทนอาคารที่วางอยู่บนชั้นดินแข็ง โดยแบ่งออกเป็น 3 แบบจำลองที่มีความแตกต่างกันที่ความยาวของเสาเข็ม มีความยาวเสาเข็มที่ 6.00 ม., 9.00 ม. และ 12.00 ม. ส่วนแบบจำลองที่มีเสาเข็มอยู่ในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ เป็นตัวแทนอาคารที่ตั้งอยู่ในชั้นดินอ่อนทำให้ได้ผลการวิเคราะห์นั้นมีความแตกต่างกันในแต่ละแบบจำลอง โดยคาบธรรมชาติที่เกิดขึ้นนั้นมีการเพิ่มขึ้นจากแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม โดยแบบจำลองที่มีเสาเข็มในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯ มีคาบธรรมชาติสูงที่สุด เนื่องจากอาคารตั้งอยู่บนชั้นดินอ่อนและมีความยาวของเสาเข็มมากที่สุด ความแตกต่างของชั้นดิน และความยาวของเสาเข็มนั้นยังส่งผลต่อสตีเฟนการต้านแรงด้านข้างของอาคาร และค่าความเร่งที่จุดสมรรถนะลดลง หากแบบจำลองมีความยาวเสาเข็มที่มากขึ้น และอาคารตั้งอยู่บนชั้นดินที่อ่อนมากขึ้น ค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นกับเสาเข็มนั้นมียาลดลงที่จุดสมรรถนะหากแบบจำลองมีความยาวเสาเข็มที่มากขึ้น โดยกำลังต้านแรงเฉือนของเสาเข็มคือ 4.80 ตัน แสดงดังตาราง 26

ตาราง 26 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นกับเสาเข็ม

แบบจำลอง	แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่จุดสมรรถนะ (ตัน)		แรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่การวิบัติสุดท้าย (ตัน)	
	x direction	y direction	x direction	y direction
	ไม่มีเสาเข็ม	-	-	-
มีเสาเข็มยาว 6.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา	0.365	0.135	1.169	0.191
มีเสาเข็มยาว 9.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา	0.359	0.133	1.922	0.181
มีเสาเข็มยาว 12.00 ม. พื้นที่จังหวัดพะเยา	0.353	0.131	1.161	0.182
มีเสาเข็มพื้นที่แอ่ง กรุงเทพฯ	0.375	0.055	1.985	0.056

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลงานวิจัย

จากการศึกษาผลการประเมินอาคารต้านแผ่นดินไหวของแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ค้ำถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม และแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่ค้ำถึงเสาเข็ม โดยใช้สเปกตรัมผลตอบสนองแผ่นดินไหวในพื้นที่จังหวัดพะเยาเป็นตัวแทนอาคารวางอยู่ในชั้นดินแข็ง และใช้สเปกตรัมผลตอบสนองแผ่นดินไหวในพื้นที่แอ่งกรุงเทพฯเป็นตัวแทนอาคารวางอยู่ในชั้นดินอ่อน ซึ่งผลที่ได้เป็นกรณีศึกษาอาคารตัวอย่าง และสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับพื้นที่ดังกล่าวเท่านั้น อย่างไรก็ตามสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การศึกษาผลการประเมินอาคารต้านแผ่นดินไหวของแบบจำลองที่มีเสาเข็ม และแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม ทำให้เห็นว่าแบบจำลองที่พิจารณาโครงสร้างเสาเข็ม ทำให้อาคารมีคาบธรรมชาติใน 12 โหมดของทั้ง 5 แบบจำลองสูงขึ้น โดยโครงสร้างอาคารที่ค้ำถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มพื้นที่จังหวัดพะเยาจะมีคาบธรรมชาติที่สูงกว่ากรณีแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่ค้ำถึงเสาเข็ม และมีโหมดพื้นฐานเป็นสัดส่วนหลักประมาณร้อยละ 65-71 ส่วนแบบจำลองอาคารที่มีเสาเข็มในพื้นที่กรุงเทพฯ โหมดพื้นฐานของแบบจำลองมีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีส่วนร่วมร้อยละ 74-84

2. จากการประเมินทำให้พบความแตกต่างของแบบจำลองทั้ง 5 แบบ โดยแบบจำลองที่มีเสาเข็มนั้นทำให้สตีเฟนการต้านแรงต้านข้างของอาคารมีแนวโน้มลดลง และค่าความเร่ง ณ จุดสมรรถนะของแบบจำลองมีค่าลดลงเช่นกัน ซึ่งเกิดจากพื้นที่แตกต่างกันทำให้สเปกตรัมผลตอบสนองแตกต่างกัน และความยาวของเสาเข็มก็ส่งผลกับแบบจำลองเช่นกัน จากแบบจำลองพบว่า หากมีความยาวเสาเข็มที่มากขึ้นจะทำให้ค่าความเร่ง ณ จุดสมรรถนะของแบบจำลองมีค่าลดลง และส่งผลถึงการเคลื่อนตัวในแต่ละชั้น พบว่าแบบจำลองที่มีเสาเข็มพื้นที่กรุงเทพฯ นั้นมีการเคลื่อนที่มากที่สุดจากแบบจำลองทั้ง 5 แบบ โดยผลการเปรียบเทียบแสดงดังตาราง 26

3. ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองอาคารทั้ง 5 แบบจำลอง เมื่อตรวจสอบความเสียหายในองค์อาคารหลัก ณ แรงพลักที่จุดสมรรถนะพบว่า ทั้ง 5 แบบจำลองมีความเสียหายระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse Prevention, CP) ที่คานรับพื้นชั้น 1 ตำแหน่งอื่น ๆ เป็นความเสียหายในคานที่ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (Life Safety, LS) ซึ่งถือว่าอาคารมีความ

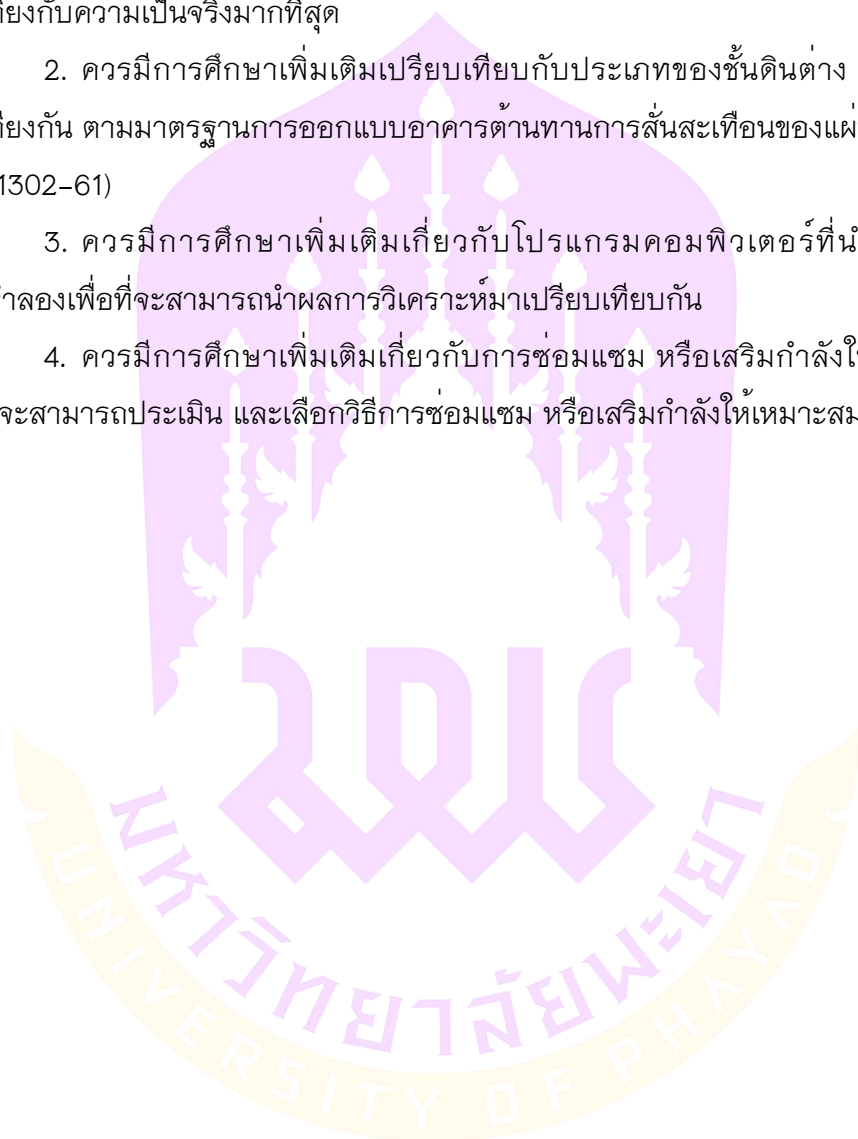
เสียหายเล็กน้อย จึงสรุปได้ว่าการประเมินอาคารโดยใช้แบบจำลองทั้ง 5 แบบจำลองอยู่ในระดับป้องกันการพังทลาย ซึ่งหากคำนึงถึงด้านความปลอดภัย และความประหยัดในการซ่อมแซมกำลังอาคารแล้ว การใช้แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม พบว่าสามารถใช้แรงแผ่นดินไหวในการประเมินที่ลดลง แบบจำลองสามารถแสดงพฤติกรรมของอาคารที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงของอาคารได้มากกว่า และสามารถประเมินการซ่อมเสริมกำลังอาคารได้อย่างประหยัด มีความปลอดภัยเมื่อได้เสริมกำลังเฉพาะตำแหน่งที่เสี่ยงต่อการวิบัติได้แม่นยำกว่า

ตาราง 27 เปรียบเทียบผลของแบบจำลอง

แบบจำลอง	ความเร่ง ณ จุด สมรรถนะ		ความต้านทาน ด้านข้าง (ตัน)		การเคลื่อนที่ของ ยอดอาคาร (มม.)	
	x	y	x	y	x	y
	direction	direction	direction	direction	direction	direction
ไม่มีเสาเข็ม	0.111g	0.139g	67	95	18.008	15.797
มีเสาเข็มยาว 6.00 ม. พื้นที่จังหวัด พะเยา	0.104g	0.117g	65	82	18.006	16.143
มีเสาเข็มยาว 9.00 ม. พื้นที่จังหวัด พะเยา	0.102g	0.115g	64	80	18.005	16.254
มีเสาเข็มยาว 12.00 ม. พื้นที่ จังหวัดพะเยา	0.101g	0.112g	63	78	18.005	16.356
มีเสาเข็มพื้นที่แอ่ง กรุงเทพฯ	0.098g	0.099g	81	89	36.003	35.007

### ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาภายในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถกำหนดควบคุมคุณภาพ และตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองได้ ดังนั้นจึงควรศึกษาเพิ่มเติมอาคารที่มีการก่อสร้างจริงมาแล้ว และตรวจสอบการเสื่อมสภาพของอาคารจึงจะทำให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด
2. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเปรียบเทียบกับประเภทของชั้นดินต่าง ๆ ที่อยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงกัน ตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยพ. 1301/1302-61)
3. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่นำมาวิเคราะห์แบบจำลองเพื่อที่จะสามารถนำผลการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกัน
4. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการซ่อมแซม หรือเสริมกำลังให้กับตัวอาคาร เพื่อที่จะสามารถประเมิน และเลือกวิธีการซ่อมแซม หรือเสริมกำลังให้เหมาะสมกับตัวอาคาร



## บรรณานุกรม

- Bielak, J. (1978). Dynamic response of non-linear building-foundation systems. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 6(1), 17–30.
- Davisson, M. (1970). Lateral load capacity of piles. **Highway Research Record**(333).
- Ghannad, M. และ Jahankhah, H. (2007). Site-dependent strength reduction factors for soil-structure systems. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 27(2), 99–110.
- Hutchinson, T. C., Raychowdhury, P. and Chang, B. (2006). Nonlinear structure and foundation response during seismic loading: dual lateral load resisting systems. In **Proceedings of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering** (pp. 1–10).
- Khazaei, J., Amiri, A. and Khalilpour, M. (2017). Seismic evaluation of soil-foundation-structure interaction: Direct and Cone model. **Earthquakes and Structures**, 12(2), 251–262.
- Moghaddasi, M., Cubrinovski, M., Chase, J. G., Pampanin, S. and Carr, A. (2011). Probabilistic evaluation of soil-foundation-structure interaction effects on seismic structural response. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 40(2), 135–154.
- Pailoplee, S., Channarong, P. and Chutakositkanon, V. (2013). Earthquake Activities in the Thailand-Laos-Myanmar Border Region: A Statistical Approach. **Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences**, 24(4).
- Sae-Long, W., Limkatanyu, S., Hansapinyo, C., Imjai, T. and Kwon, M. (2020). Forced-based shear-flexure-interaction frame element for nonlinear analysis of non-ductile reinforced concrete columns. **Journal of Applied and Computational Mechanics**.
- Sae-Long, W. Limkatanyu, S. Panedpojaman, P. Prachasaree, W. Damrongwiriyapap, N. Kwon, M., et al. (2021). Nonlinear winkler-based frame element with inclusion of shear-flexure interaction effect for analysis of non-ductile RC members on foundation. **Journal of Applied and Computational Mechanics**, 7(1), 148–164.
- Sukrungsri, S. and Pailoplee, S. (2015). Precursory seismicity changes prior to major

earthquakes along the Sumatra–Andaman subduction zone: a region–time–length algorithm approach. **Earth, Planets and Space**, 67(1), 1–10.

Terzaghi, K. (1955). Evaluation of coefficients of subgrade reaction. **Geotechnique**, 5(4), 297–326.

Xu, R. and Fatahi, B. (2019). Novel application of geosynthetics to reduce residual drifts of mid-rise buildings after earthquakes. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 116, 331–344.

Yeganeh, N. and Fatahi, B. (2019). Effects of choice of soil constitutive model on seismic performance of moment–resisting frames experiencing foundation rocking subjected to near–field earthquakes. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 121, 442–459.

กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2552). มยผ.1302 มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: บริษัท ดิจิตอล ออฟเซท เอเชีย แปซิฟิก จำกัด. จาก [http://subsites.dpt.go.th/edocument/images/pdf/sd\\_work/1302.pdf](http://subsites.dpt.go.th/edocument/images/pdf/sd_work/1302.pdf)

กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2557). มยผ.1303–57 มาตรฐานการประเมิน และการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (พิมพ์ครั้งที่ 1). นนทบุรี: บริษัท สหมิตรพรินติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด.

กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2561). มยผ.1301/1302–61 มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: บริษัท เอส.พี.เอ็ม. การพิมพ์ จำกัด.

กรมอุตุนิยมวิทยา. (2564). การวิเคราะห์เหตุการณ์แผ่นดินไหวในประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียง เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม 2564 กองเฝ้าระวังแผ่นดินไหว.

ปรีดา ไชยมหาวัน, ภัทรมน วงศ์ราษฎร์ และธนกร ชมภูรัตน์. (2017). กราฟสปেকตรัมผลตอบสนองที่สร้างจากผลเจาะสำรวจดินในจังหวัดพะเยา. **Engineering Journal of Research and Development**, 28(3), 15–26.

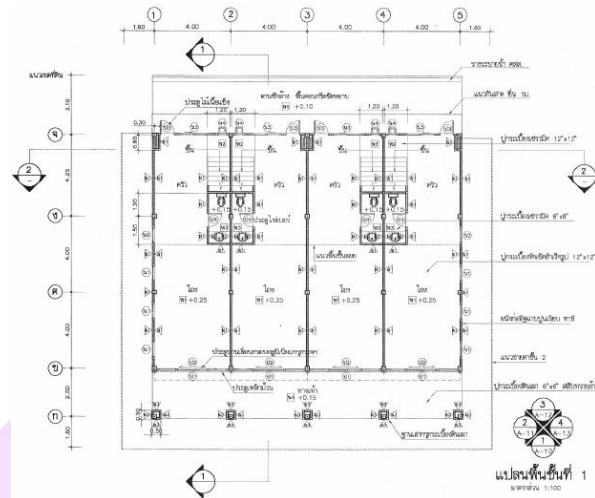
ปรีดา ไชยมหาวัน, สมบูรณ์ เชิงฉิน, ธนกร ชมภูรัตน์ และธนกฤต เทพอุโมงค์. การประเมินกำลังต้านแผ่นดินไหวของอาคารโดยคำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม. **The Journal of KMUTNB**.





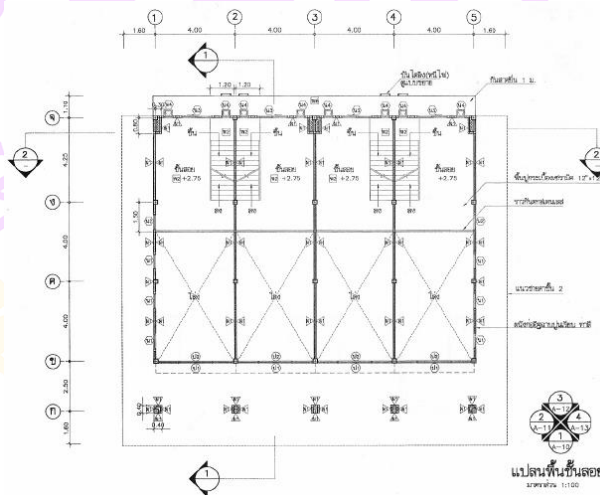
ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยพะเยา  
UNIVERSITY OF PHAYAO



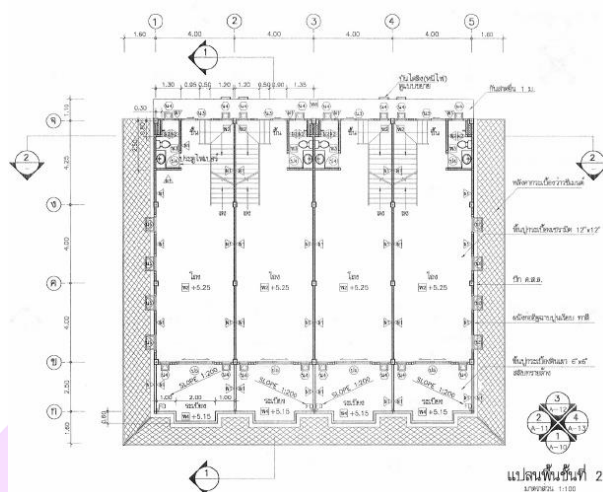
ภาพ 94 แปลนพื้นที่ 1

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)



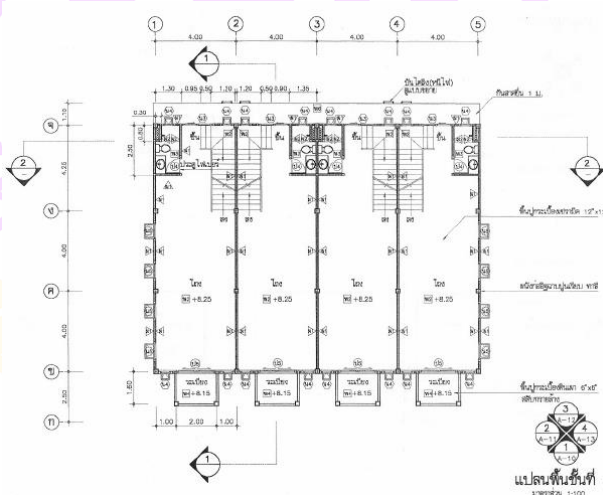
ภาพ 95 แปลนพื้นที่ลอย

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)



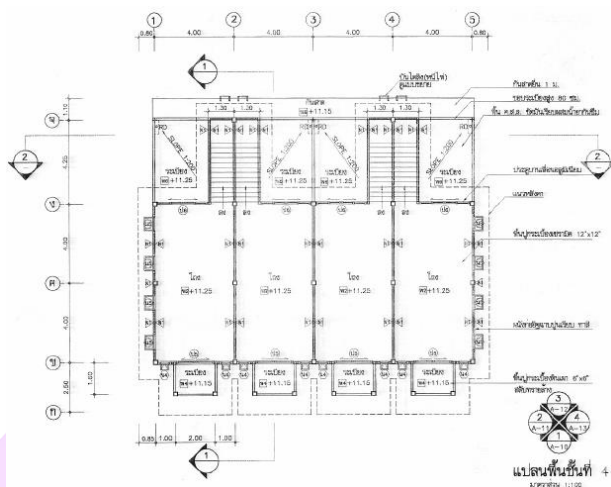
ภาพ 96 แปลนพื้นที่ 2

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)



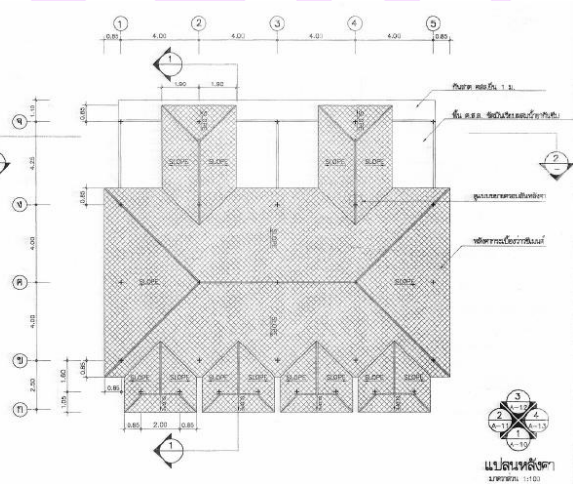
ภาพ 97 แปลนพื้นที่ 3

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)



ภาพ 98 แปลนพื้นที่ 4

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)



ภาพ 99 แปลนหลังคา

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)



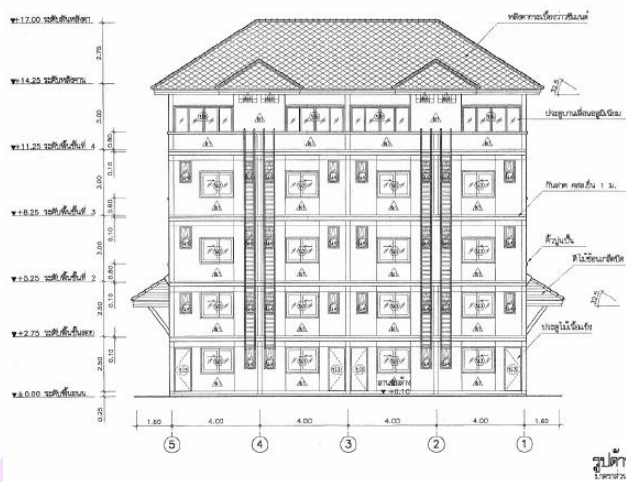
ภาพ 100 รูปด้าน 1

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)



ภาพ 101 รูปด้าน 2

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)



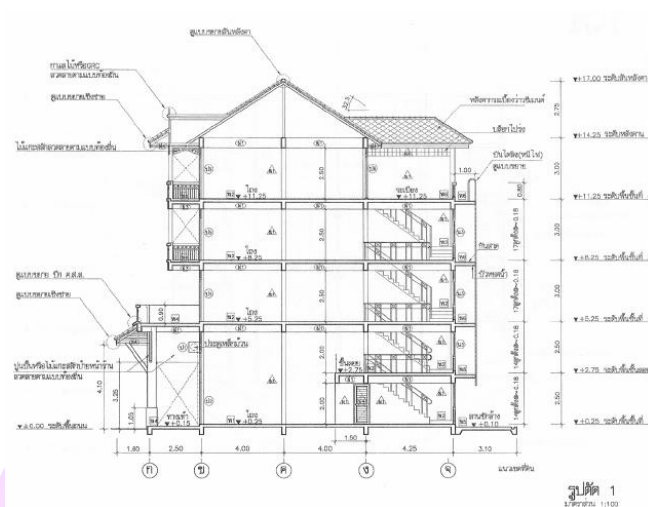
ภาพ 102 รูปด้าน 3

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)



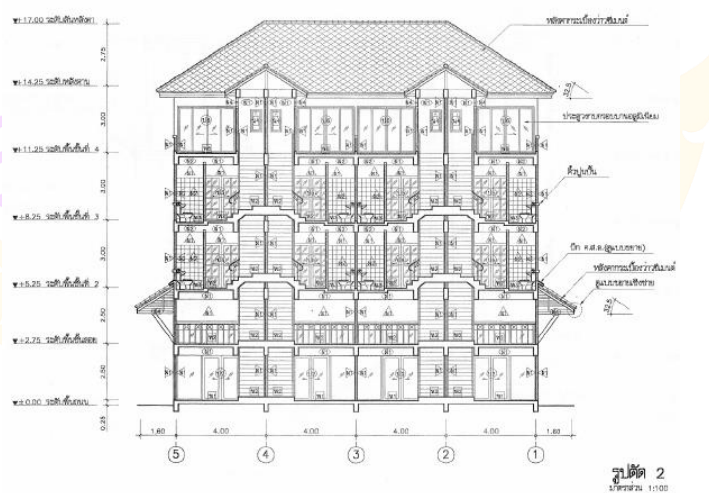
ภาพ 103 รูปด้าน 4

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)



ภาพ 104 รูปตัด 1

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)



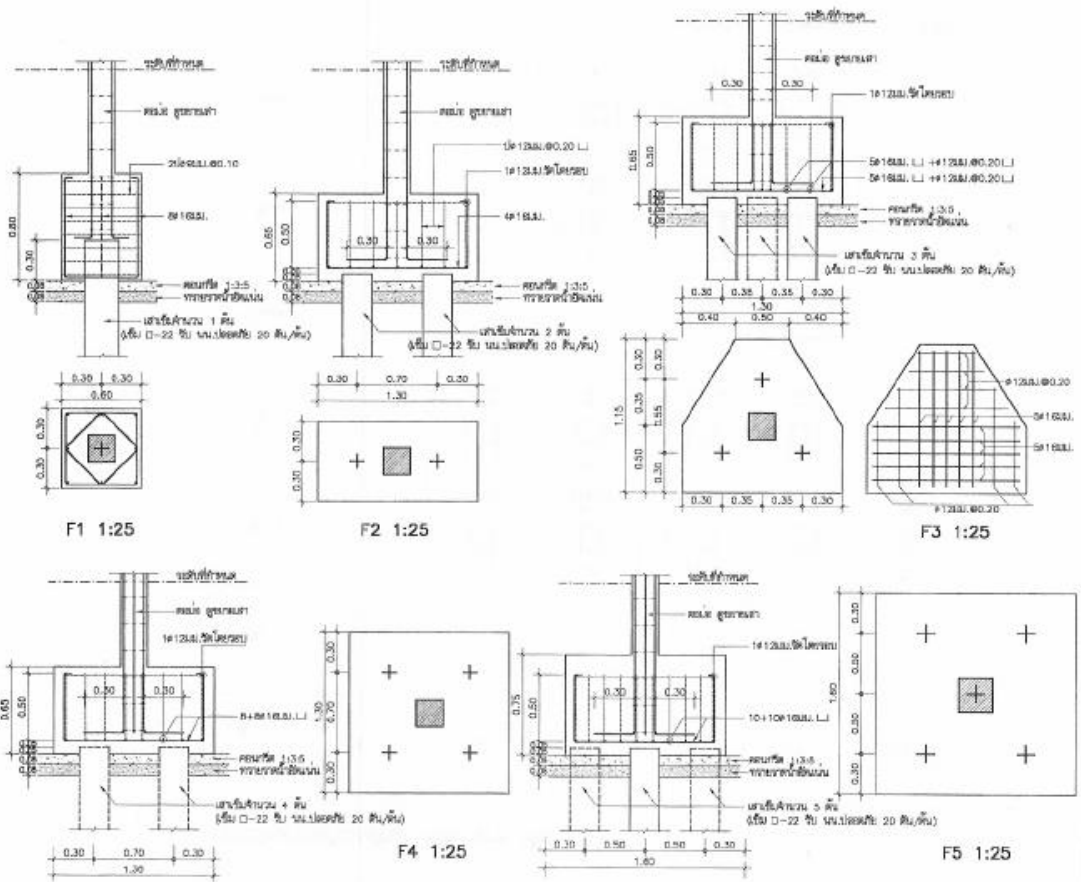
ภาพ 105 รูปตัด 2

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)

เสา ชั้น	C1	C2	C3	C4	C5	C6
ชั้น 4						
ชั้น 3						
ชั้น 2						
ชั้นลอย						
ชั้น 1						
MESEB						

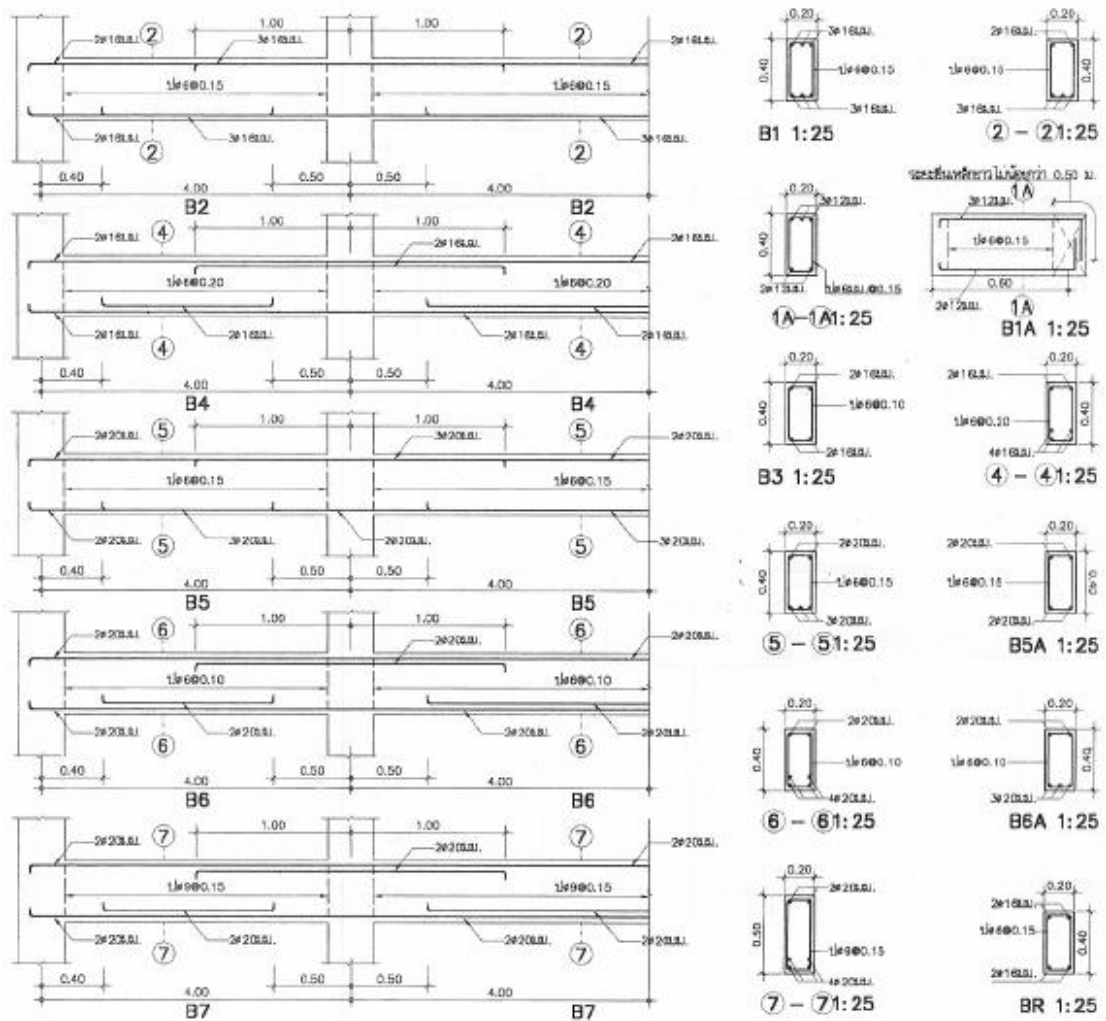
ภาพ 106 รายละเอียดการเสริมเหล็กเสา

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)



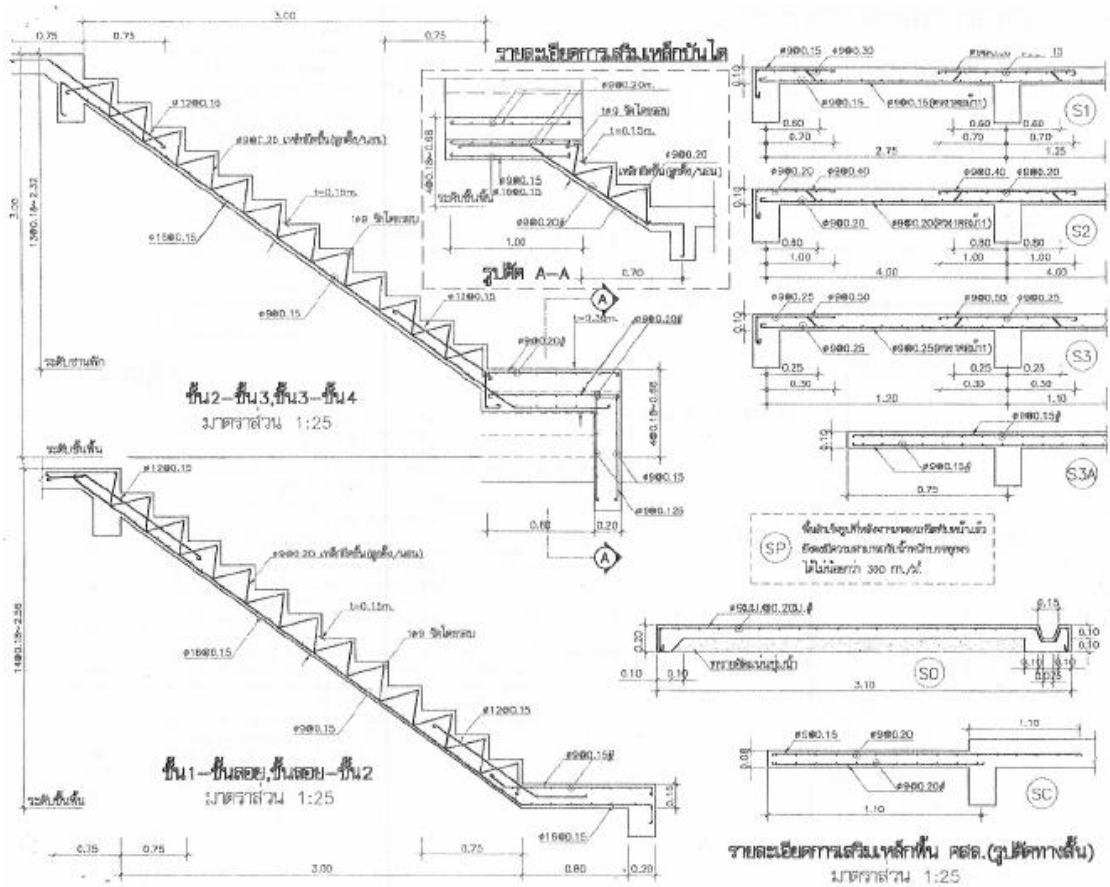
ภาพ 107 รายละเอียดการเสริมเหล็กฐานราก

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)



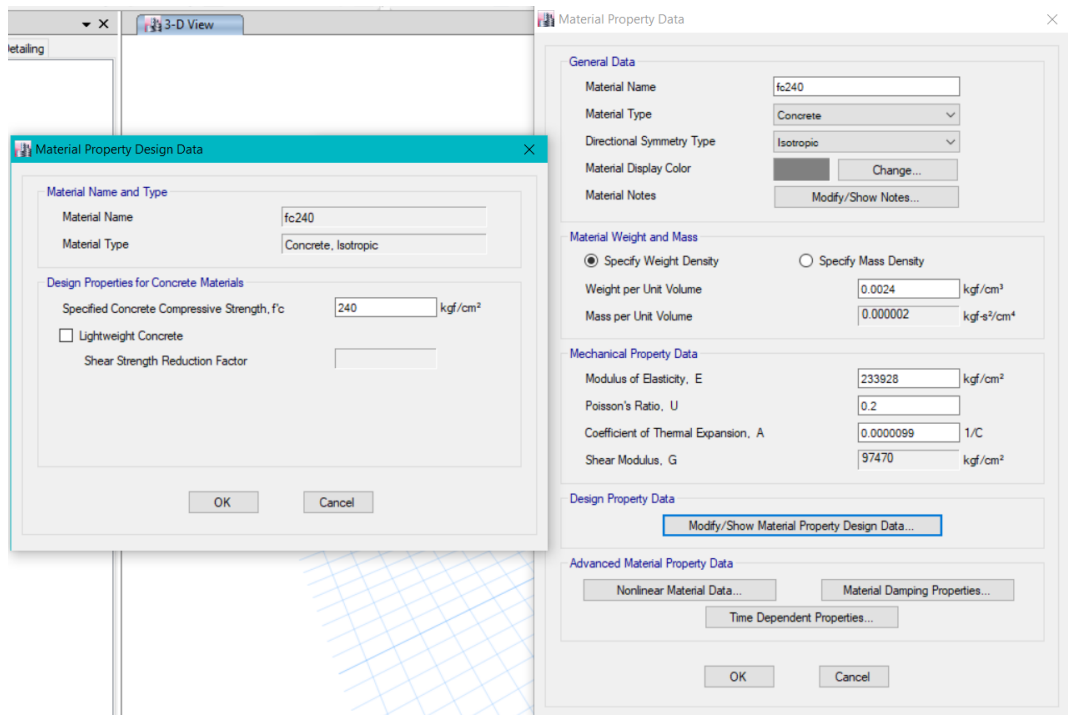
ภาพ 108 รายละเอียดการเสริมเหล็กคาน

ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)

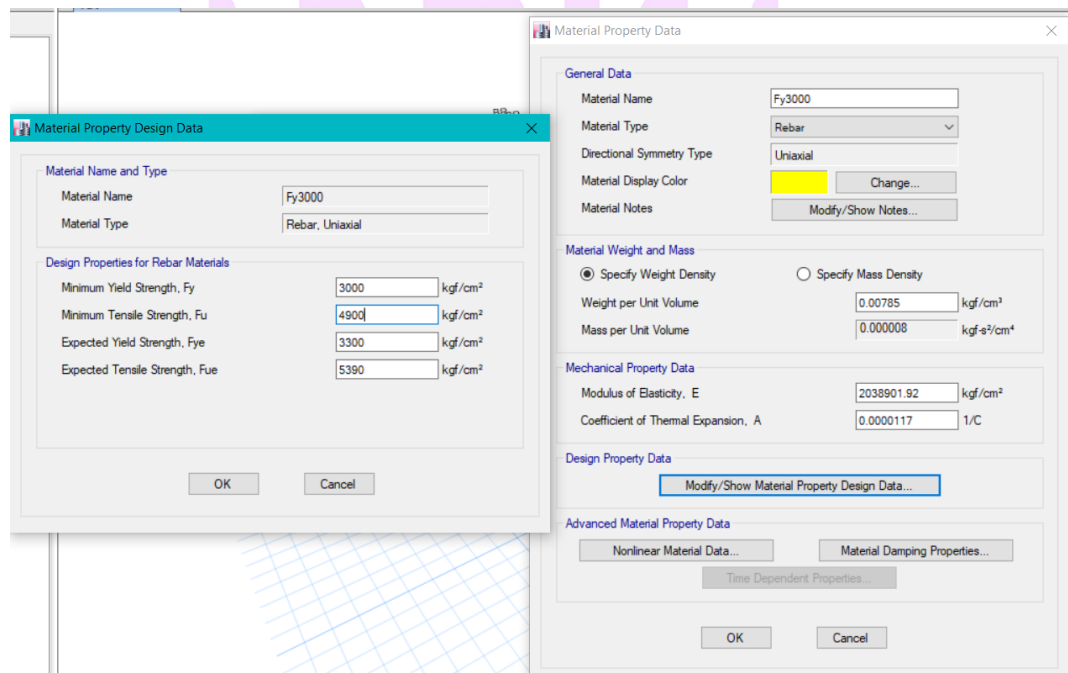


ภาพ 109 รายละเอียดการเสริมเหล็กพื้น บันได

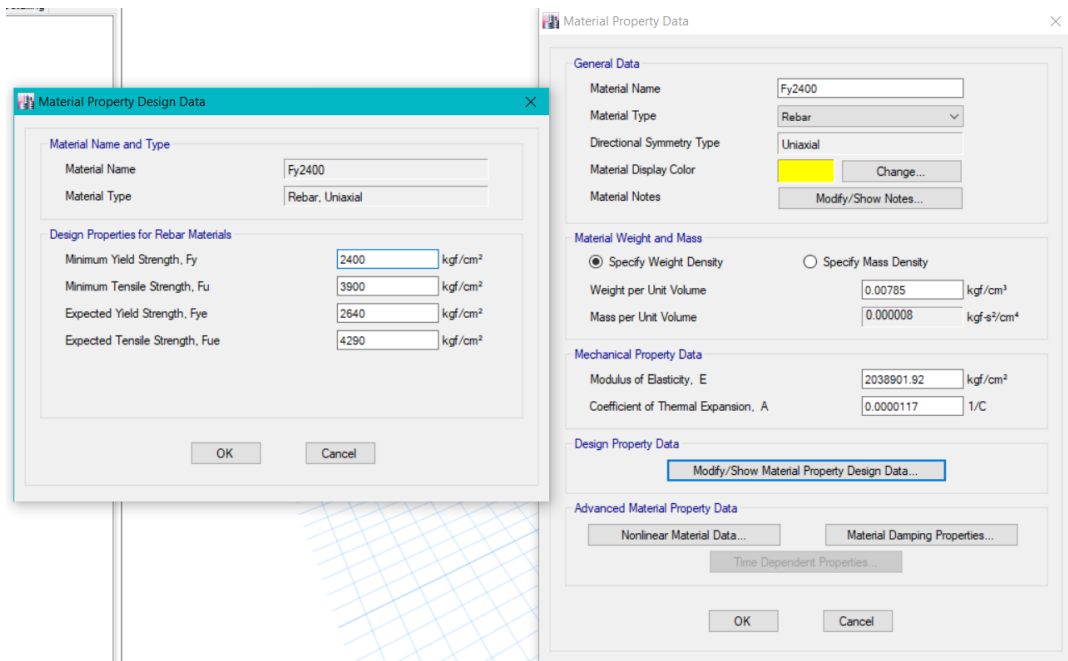
ที่มา: โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทยตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น (2546)



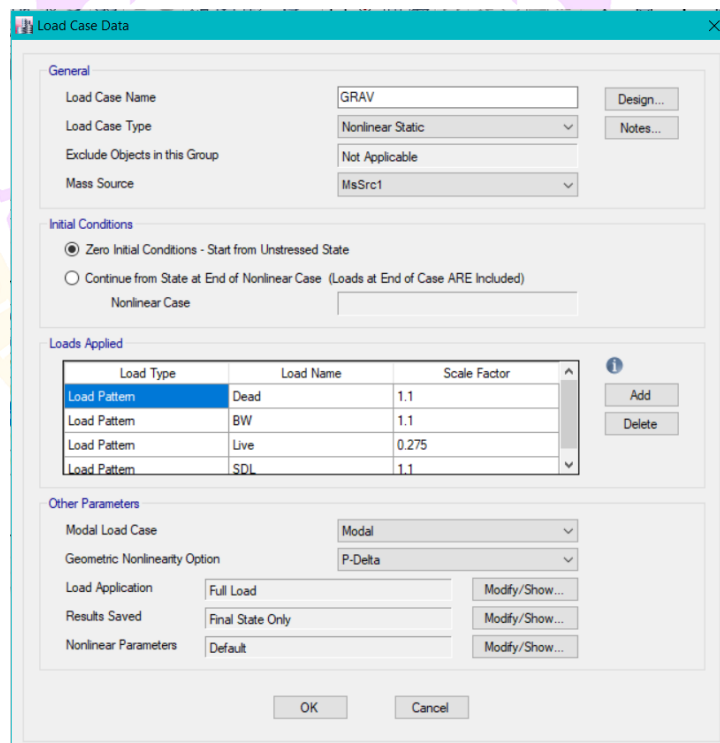
ภาพ 110 กำหนดคุณสมบัติวัสดุของคอนกรีต



ภาพ 111 กำหนดคุณสมบัติวัสดุของเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SD30



ภาพ 112 กำหนดคุณสมบัติวัสดุของเหล็กเสริมชั้นคุณภาพ SR24



ภาพ 113 กำหนดชุดการรวมแรงในแหวดิ่ง GRAV

The screenshot shows the 'Load Case Data' dialog box for a case named 'PUSHX'. The 'General' section includes 'Load Case Name' (PUSHX), 'Load Case Type' (Nonlinear Static), 'Exclude Objects in this Group' (Not Applicable), and 'Mass Source' (MsSrc1). The 'Initial Conditions' section has 'Continue from State at End of Nonlinear Case' selected, with 'Nonlinear Case' set to 'GRAV'. The 'Loads Applied' table is as follows:

Load Type	Load Name	Scale Factor
Acceleration	UX	-1
Load Pattern	SDL	1.1

The 'Other Parameters' section includes 'Modal Load Case' (Modal), 'Geometric Nonlinearity Option' (P-Delta), 'Load Application' (Displacement Control), 'Results Saved' (Multiple States), and 'Nonlinear Parameters' (Default).

ภาพ 114 กำหนดชุดการรวมแรงผลัก PUSHX

The screenshot shows the 'Load Case Data' dialog box for a case named 'PUSHY'. The 'General' section includes 'Load Case Name' (PUSHY), 'Load Case Type' (Nonlinear Static), 'Exclude Objects in this Group' (Not Applicable), and 'Mass Source' (MsSrc1). The 'Initial Conditions' section has 'Continue from State at End of Nonlinear Case' selected, with 'Nonlinear Case' set to 'GRAV'. The 'Loads Applied' table is as follows:

Load Type	Load Name	Scale Factor
Acceleration	UY	-1
Load Pattern	SDL	1.1

The 'Other Parameters' section includes 'Modal Load Case' (Modal), 'Geometric Nonlinearity Option' (P-Delta), 'Load Application' (Displacement Control), 'Results Saved' (Multiple States), and 'Nonlinear Parameters' (Default).

ภาพ 115 กำหนดชุดการรวมแรงผลัก PUSHY

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	ณัฐณี ท้าวพินวงศ์
วัน เดือน ปี เกิด	23 กุมภาพันธ์ 2539
สถานที่เกิด	พิจิตร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ.2561 วศ.บ. (โยธา), มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา
ที่อยู่ปัจจุบัน	8 ม.1 ต.บ้านเวียง อ.ร้องกวาง จ.แพร่ 54140
ผลงานตีพิมพ์	งานวิจัยเรื่อง ผลของการใช้แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงเสาค้ำในการประเมินอาคารต้านแผ่นดินไหว ในงานประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 27 (24 - 26 สิงหาคม 2565)
รางวัลที่ได้รับ	-

