



อิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับฐานรากชนิดเขตต่อผลตอบสนองของโครงสร้าง
ภายใต้แรงแผ่นดินไหว
Effects of Strap Footing-Structure Interactions on Structural Responses
under Earthquake Loadings

วิศรุต จันทร์สุวรรณ
Wisarut Chansuwan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Prince of Songkla University

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



อิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับฐานรากชนิดเขตต่อผลตอบสนองของโครงสร้าง
ภายใต้แรงแผ่นดินไหว
Effects of Strap Footing-Structure Interactions on Structural Responses
under Earthquake Loadings

วิศรุต จันทร์สุวรรณ
Wisarut Chansuwan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Prince of Songkla University

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ อิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับฐานรากชนิดเขตต่อผลตอบสนองของ
โครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว

ผู้เขียน นายวิศรุต จันทร์สุวรรณ

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ลิ้มกัตถัญญ)

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสรี)

.....กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ลิ้มกัตถัญญ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรเทพ แซ่ล่อง)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกิง วงศ์ศิริโชติ)
รักษาการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคล
ที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ลิ้มกัตถัญญ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....

(นายวิศรุต จันทร์สุวรรณ)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายวิศรุต จันทร์สุวรรณ)

นักศึกษา

| | |
|-----------------|--|
| ชื่อวิทยานิพนธ์ | อิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับฐานรากชนิดเขตต่อผลตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว |
| ผู้เขียน | นายวิศรุต จันทร์สุวรรณ |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง) |
| ปีการศึกษา | 2566 |

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากรณีของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3, 5 และ 7 ชั้นที่ตั้งอยู่บนฐานรากชนิดเขตบนชั้นดิน 3 ชนิด ได้แก่ ดินทราย ดินเหนียวอ่อน และดินเหนียวแข็ง โดยเป็นอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวของมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ.1302-62 เปรียบเทียบกับฐานรากแบบยึดแน่น และกรณีของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้นที่ตั้งอยู่บนฐานรากชนิดเขต โดยเป็นอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว เปรียบเทียบกับฐานรากแบบยึดแน่น เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานรากและประเมินความเสียหายของโครงสร้างตามมาตรฐาน Federal Emergency Management Agency, (FEMA356) โดยพิจารณาค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนโครงสร้างเมื่อรับแรงแผ่นดินไหว จากการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างอาคารรับแรงแผ่นดินไหวควรคำนึงผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก เพื่อให้การวิเคราะห์สอดคล้องกับความเป็นจริงมากที่สุด

คำหลัก : ฐานรากชนิดเขต, คานสายรัด, แรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหว, การประเมินโครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหว, การปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก

Thesis Title Effects of Strap Footing-Structure Interactions on Structural Responses Under Earthquake Loadings
Author Mr. Wisarut Chansuwan
Major Program Civil Engineering (Structure Engineering)
Academic Year 2023

Abstract

This research study investigates the case of reinforced concrete buildings with 3, 5, and 7 story that are located on a strap footing foundation on three types of soil: sand, soft clay and hard clay. The buildings are designed to withstand seismic forces according to the standards set by the Department of Highways and City Planning, Ministry of Transport and Communications, Thailand, in the year 1302-62, which include the design for earthquake-resistant structures. The study compares with fixed-base foundation and design with the case of a 3-story reinforced concrete building that is located on a strap footing foundation without being designed to resist seismic forces. The comparison with a fixed-base foundation. The aim is to analyze the influence of soil-foundation interaction and evaluate the damage to the structures according to the standards of the Federal Emergency Management Agency (FEMA356), considering the plastic rotations that occurs in the structural elements when subjected to seismic forces. The study concludes that the analysis and design of earthquake-resistant structures should take into account the interaction between the soil and the foundation in order to align the analysis with the most realistic conditions.

Keywords: Strap footing foundation, strap beam, seismic of earthquake, Performance-based seismic assessment, Soil-structure interaction

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ แนวทางและการตรวจสอบแก้ไขจาก ศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ลิ้มกัตถัญญ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสรี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสกร ชัยวิริยะวงศ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ทั้งในเชิงวิชาการและเทคนิคต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรเทพ แซ่ล่อง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ จากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ให้งานวิจัยชิ้นนี้ มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ที่ได้ให้การ สนับสนุนทั้งสถานที่และแหล่งข้อมูลในการทำวิทยานิพนธ์จนทำให้สามารถดำเนินงานวิจัยผ่านมาได้ ด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ คุณสุพิศ นนทะสร และคุณจิราพร ยวงใย เจ้าหน้าที่สำนักงาน ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่อำนวยความสะดวกในการจัดส่งเอกสารต่างๆ ตลอดระยะเวลาที่ ศึกษา

ขอขอบคุณ ผองเพื่อนและรุ่นพี่ ปริญญาโททุกท่านที่มีส่วนร่วมและให้ความ ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจที่ดีแก่ผู้วิจัยตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ สิ่งสำคัญสุดที่ทำให้มีข้าพเจ้าในวันนี้ พระคุณของบิดามารดา กำลังใจและความช่วยเหลือจากสมาชิกทุกคนในครอบครัว เป็นสิ่งสำคัญที่ผลักดันจนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา ซึ่ง ข้าพเจ้าจะระลึกถึงบุคคลเหล่านี้ในใจตลอดไป

วิศรุต จันทรสุวรรณ

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ..... | (6) |
| กิตติกรรมประกาศ..... | (8) |
| สารบัญ..... | (9) |
| สารบัญตาราง..... | (12) |
| สารบัญภาพ..... | (13) |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 2 |
| 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย..... | 2 |
| 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย..... | 2 |
| 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... | 3 |
| 1.6 ประโยชน์ของงานวิจัย..... | 3 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์โครงสร้าง..... | 4 |
| 2.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีสถิตยศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear Static Pushover Analysis Method)..... | 4 |
| 2.1.2 แบบจำลองพฤติกรรมการรับแรงกระทำของคอนกรีต (Non-Linear Constant Confinement Concrete Model)..... | 5 |
| 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองฐานรากและแบบจำลองพฤติกรรมของดิน..... | 8 |
| 2.2.1 แบบจำลองฐานรากของ Winkler ที่มีการยกตัว..... | 8 |
| 2.2.2 ค่าสติเฟนสของดิน | 8 |
| 2.2.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ | 10 |
| 2.2.4 แบบจำลองพฤติกรรมการรับแรงกระทำของดิน | 12 |
| 2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาโครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหว..... | 13 |
| 2.3.1 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโครงสร้าง..... | 13 |
| 2.3.2 ประเภทของชั้นดิน ณ ที่ตั้งโครงสร้าง..... | 14 |
| 2.3.2.1 ชั้นดินประเภท F..... | 15 |
| 2.3.3 การปรับแก้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม..... | 16 |
| 2.3.4 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ..... | 17 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 2.3.5 สเปกตรัมผลตอบสนองของโครงสร้าง..... | 17 |
| 2.3.6 แรงเฉือนที่กระทำที่ฐานของโครงสร้าง..... | 18 |
| 2.3.7 การคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้าง..... | 22 |
| 2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการประเมินโครงสร้าง..... | 24 |
| 2.4.1 Operational Level..... | 24 |
| 2.4.2 Immediate Occupancy Level (IO)..... | 25 |
| 2.4.3 Life Safety Level (LS)..... | 25 |
| 2.4.4 Collapse Prevention (CP)..... | 25 |
| 2.4.5 เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินระดับความเสียหายของโครงสร้าง..... | 26 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย..... | 30 |
| 3.1 ศึกษาทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และมาตรฐานต่าง ๆ | 30 |
| 3.2 ศึกษาการใช้โปรแกรม SeismoStruct..... | 30 |
| 3.3 สร้างแบบจำลองในโปรแกรม SeismoStruct..... | 31 |
| 3.3.1 แบบจำลองโครงสร้างอาคารสูง 3, 5 และ 7 ชั้น..... | 31 |
| 3.3.2 ศึกษาวิธีใช้โปรแกรม SeismoStruct..... | 38 |
| 3.4 วิเคราะห์ผ่านโปรแกรม SeismoStruct..... | 40 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัย..... | 41 |
| 4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูงโดยไม่คิดผลของ การปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก (ฐานรากแบบยึดแน่น) ด้วยวิธีการผลัดทางด้านข้าง..... | 41 |
| 4.1.1 กราฟความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโครงสร้าง..... | 41 |
| 4.1.2 ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้าง..... | 42 |
| 4.1.3 การประเมินระดับความเสียหายของโครงสร้าง..... | 42 |
| 4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูงโดยคิดผลของ การปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก (ฐานรากชนิดเขต) ด้วยวิธีการผลัดทางด้านข้าง..... | 46 |
| 4.2.1 ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้าง..... | 46 |
| 4.2.2 การประเมินระดับความเสียหายของโครงสร้าง..... | 47 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|---|-----|
| 4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูงโดยไม่คิดผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก (ฐานรากแบบยึดแน่น) ด้วยวิธีการหลักทางด้านข้าง..... | 62 |
| 4.3.1 ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้าง..... | 62 |
| 4.3.2 การประเมินระดับความเสียหายของโครงสร้าง..... | 63 |
| 4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูงโดยคิดผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก (ฐานรากชนิดเขต) ด้วยวิธีการหลักทางด้านข้าง..... | 64 |
| 4.4.1 ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้าง..... | 64 |
| 4.4.2 การประเมินระดับความเสียหายของโครงสร้าง..... | 65 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย..... | 69 |
| 5.1 สรุปผลที่ได้จากการวิจัย..... | 69 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 71 |
| บรรณานุกรม..... | 72 |
| ภาคผนวก..... | 74 |
| การเผยแพร่วิทยานิพนธ์..... | 91 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 101 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2.1 สมการสำหรับการหาค่าสติฟเนสของฐานรากชนิดเขต..... | 10 |
| ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของดินประเภทต่างๆ..... | 13 |
| ตารางที่ 2.3 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_s) และคาบ การสั่น 1 วินาที (S_1) ของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณาจังหวัดเชียงราย..... | 14 |
| ตารางที่ 2.4 การจำแนกประเภทของชั้นดิน..... | 10 |
| ตารางที่ 2.5 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดินบริเวณที่ตั้งโครงสร้าง F_a | 16 |
| ตารางที่ 2.6 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดินบริเวณที่ตั้งโครงสร้าง F_v | 17 |
| ตารางที่ 2.7 ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของแผ่นดินไหว (Z)..... | 19 |
| ตารางที่ 2.8 ตัวคูณเกี่ยวกับการใช้อาคาร (I)..... | 19 |
| ตารางที่ 2.9 ค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างอาคารที่รับแรงในแนวราบ (K)..... | 20 |
| ตารางที่ 2.10 สัมประสิทธิ์ของการประสานความถี่ธรรมชาติระหว่างอาคารและชั้นดิน (S)..... | 20 |
| ตารางที่ 2.11 ค่าสัมประสิทธิ์ C_0 | 23 |
| ตารางที่ 2.12 ค่าสัมประสิทธิ์ C_m | 24 |
| ตารางที่ 2.13 ระดับและช่วงของประสิทธิภาพอาคารเป้าหมาย..... | 26 |
| ตารางที่ 2.14 เกณฑ์การประเมินระดับความเสียหายสำหรับการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นของ คานคอนกรีตเสริมเหล็ก..... | 27 |
| ตารางที่ 2.15 เกณฑ์การประเมินระดับความเสียหายสำหรับการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นของ เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก..... | 28 |
| ตารางที่ 2.16 เกณฑ์การประเมินระดับความเสียหายสำหรับการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นของ จุดต่อคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก..... | 29 |
| ตารางที่ 3.1 กำลังของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้าง..... | 31 |
| ตารางที่ 3.2 ขนาดของฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินที่แตกต่างกัน..... | 35 |
| ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ของคอนกรีตที่ใช้ในแบบจำลองโครงสร้างอาคาร..... | 37 |
| ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ของเหล็กที่ใช้ในแบบจำลองโครงสร้างอาคาร..... | 38 |
| ตารางที่ 4.1 ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรง แผ่นดินไหวบนฐานรากแบบยึดแน่น..... | 42 |
| ตารางที่ 4.2 ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบน ฐานรากแบบยึดแน่น..... | 43 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

| | | |
|---------------|---|----|
| ตารางที่ 4.3 | ค่าคาบการสั้นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขต กรณี DEQ..... | 47 |
| ตารางที่ 4.4 | ค่าคาบการสั้นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตกรณี MCEQ | 47 |
| ตารางที่ 4.5 | ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขต กรณี DEQ..... | 51 |
| ตารางที่ 4.6 | ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขต กรณี MCEQ..... | 52 |
| ตารางที่ 4.7 | ค่าคาบการสั้นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากแบบยึดแน่น..... | 63 |
| ตารางที่ 4.8 | ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากแบบยึดแน่น..... | 64 |
| ตารางที่ 4.9 | ค่าคาบการสั้นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขต กรณี DEQ | 65 |
| ตารางที่ 4.10 | ค่าคาบการสั้นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขต กรณี MCEQ | 65 |
| ตารางที่ 4.11 | ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างกรณีฐานรากชนิดเขต กรณี DEQ..... | 66 |
| ตารางที่ 4.12 | ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างกรณีฐานรากชนิดเขต กรณี MCEQ..... | 67 |

สารบัญญภาพ

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 แรงกระทำทางด้านข้างที่กระทำต่อโครงสร้าง..... | 4 |
| รูปที่ 2.2 กราฟผลตอบสนองสเปกตรัมและกราฟเส้นโค้งแรงกระทำด้านข้างของโครงสร้าง..... | 5 |
| รูปที่ 2.3 แบบจำลองความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดสำหรับแรงกระทำทิศทางเดียวของ คอนกรีตส่วนที่ถูกบีบรัดและไม่ถูกบีบรัด..... | 6 |
| รูปที่ 2.4 แกนที่ถูกบีบรัดประสิทธิผลสำหรับหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบกลมและ สี่เหลี่ยมมุมฉาก..... | 7 |
| รูปที่ 2.5 แบบจำลองฐานรากอีลาสติก-พลาสติกแบบ Winkler..... | 8 |
| รูปที่ 2.6 ระยะต่างๆของฐานรากสำหรับใช้ในสมการสติฟเนสอีลาสติกของ Gazetas..... | 9 |
| รูปที่ 2.7 แบบจำลองอุดมคติของระบบโครงสร้างกับฐานราก..... | 11 |
| รูปที่ 2.8 แบบจำลองของ Winkler ที่มีการแปรผันความเข้มของค่าสติฟเนส..... | 11 |
| รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของแรงกับการเคลื่อนตัวของสปริงแต่ละแบบ..... | 12 |
| รูปที่ 2.10 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า ที่มีค่า $S_{D1} \leq S_{DS}$ | 18 |
| รูปที่ 2.11 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า ที่มีค่า $S_{DS} > S_{D1}$ | 18 |
| รูปที่ 3.1 ลักษณะภาพรวมโครงสร้างที่แสดงในโปรแกรม..... | 30 |
| รูปที่ 3.2 ลักษณะของแบบจำลองโครงสร้างอาคาร 3 ชั้น..... | 31 |
| รูปที่ 3.3 ลักษณะของแบบจำลองโครงสร้างอาคาร 5 และ 7 ชั้น..... | 32 |
| รูปที่ 3.4 รายละเอียดและตำแหน่งของคานและเสา..... | 32 |
| รูปที่ 3.5 รายละเอียดของคาน BG1..... | 32 |
| รูปที่ 3.6 รายละเอียดของคาน BG2..... | 33 |
| รูปที่ 3.7 รายละเอียดของคาน B1..... | 33 |
| รูปที่ 3.8 รายละเอียดของคาน B2..... | 33 |
| รูปที่ 3.9 รายละเอียดของคาน B3..... | 34 |
| รูปที่ 3.10 รายละเอียดของคาน B4..... | 34 |
| รูปที่ 3.11 รายละเอียดของเสา..... | 34 |
| รูปที่ 3.12 รายละเอียดของฐานรากชนิดเขต..... | 35 |
| รูปที่ 3.13 รายละเอียดเหล็กเสริมของฐานรากชนิดเขต..... | 35 |
| รูปที่ 3.14 ลักษณะของแบบจำลองโครงสร้างอาคาร | 36 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 3.15 การแบ่งชิ้นส่วนและจุดต่อของแบบจำลองในโปรแกรม..... | 36 |
| รูปที่ 3.16 การป้อนข้อมูลแบบจำลองคอนกรีตในโปรแกรม SeismoStruct..... | 38 |
| รูปที่ 3.17 การป้อนข้อมูลแบบจำลองเหล็กเสริมในโปรแกรม SeismoStruct..... | 39 |
| รูปที่ 3.18 การป้อนข้อมูลหน้าตัดชิ้นส่วนโครงสร้างในโปรแกรม SeismoStruct..... | 39 |
| รูปที่ 3.19 การกำหนดประเภทของแต่ละชิ้นส่วนในโปรแกรม SeismoStruct..... | 39 |
| รูปที่ 3.20 แสดงการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้โปรแกรม..... | 40 |
| รูปที่ 3.21 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้โปรแกรม..... | 40 |
| รูปที่ 4.1 กราฟความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโครงสร้าง..... | 41 |
| รูปที่ 4.2 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ฐานรากแบบยึดแน่น (DEQ)..... | 44 |
| รูปที่ 4.3 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ฐานรากแบบยึดแน่น (MCEQ)..... | 44 |
| รูปที่ 4.4 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 5 ชั้น ฐานรากแบบยึดแน่น (DEQ)..... | 44 |
| รูปที่ 4.5 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 5 ชั้น ฐานรากแบบยึดแน่น (MCEQ)..... | 45 |
| รูปที่ 4.6 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 7 ชั้น ฐานรากแบบยึดแน่น (DEQ)..... | 45 |
| รูปที่ 4.7 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 7 ชั้น ฐานรากแบบยึดแน่น (MCEQ)..... | 46 |
| รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง 3 ชั้น (DEQ).... | 48 |
| รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง 3 ชั้น (MCEQ).... | 48 |
| รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง 5 ชั้น (DEQ).... | 49 |
| รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง 5 ชั้น (MCEQ).... | 49 |
| รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง 7 ชั้น (DEQ).... | 50 |
| รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง 7 ชั้น (MCEQ).... | 50 |
| รูปที่ 4.14 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินทราย (DEQ)..... | 53 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันประเทศไทยทางภาคเหนือเริ่มได้รับผลกระทบจากภัยพิบัติทางธรรมชาติในเรื่องของแผ่นดินไหว ซึ่งภัยพิบัติดังกล่าวนี้เป็นส่วนหนึ่งของแรงที่กระทำต่อโครงสร้าง คือแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างอาคาร อีกทั้งประเทศไทยยังไม่ได้มีการบังคับใช้ตามประกาศกฎกระทรวง กำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคารและพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2564 แก้อาคาร บ้านเรือน หรือสิ่งก่อสร้างขนาดเล็ก โดยเมื่อวันที่ 24 ธันวาคม พ.ศ. 2564 ที่ผ่านมา จุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว ณ ประเทศลาว ได้เกิดแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวขนาด 5.7 แมกนิจูด มีผลกระทบต่อจังหวัดเชียงราย ประเทศไทย ทำให้อาคารสั่น ประตูและหน้าต่างที่เป็นกระจกสั่นรุนแรง (อ้างอิงจาก สถิติข้อมูลแผ่นดินไหว กองเฝ้าระวังแผ่นดินไหว) จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบโครงสร้างให้สามารถต้านทานแรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหวได้

ในการก่อสร้างอาคารหรือบ้านเรือน ส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญในการก่อสร้าง คือ โครงสร้างฐานราก ซึ่งโครงสร้างฐานรากเป็นโครงสร้างที่อยู่ชั้นดิน ซึ่งโดยปกติแล้วโครงสร้างฐานรากออกแบบเพื่อรับแรงกระทำตามแนวแกนเท่านั้น แต่ตามหลักความเป็นจริง โครงสร้างฐานรากต้องรับแรงกระทำตามแนวแกนและแรงกระทำทางด้านข้างด้วย เนื่องจากมีแรงดันดินด้านข้าง แรงดันน้ำใต้ดิน หรือแรงสั่นสะเทือนแผ่นดินไหวกระทำต่อโครงสร้างฐานราก ทำให้โครงสร้างฐานรากเกิดการทรุดตัวหรือพลิกคว่ำ ซึ่งมีผลกระทบต่อโครงสร้างอาคารทั้งหมด

โดยทำการศึกษารณีของโครงสร้างฐานรากแบบชิตเซต (Strap Footing) โดยมีคานสายรัด (Strap Beam) ยึดไว้กับฐานรากอื่นที่อยู่ใกล้เคียงกัน รวมกันเป็นส่วนหนึ่งของฐานราก โดยมุ่งเน้นที่จะหาผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับฐานรากแบบชิตเซต เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากแบบยึดแน่นและแบบฐานรากชิตเซตที่มีการโยกตัวภายใต้แรงแผ่นดินไหว โดยออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวของมาตรฐานกรมโยธิการและผังเมือง มยพ.1302-62 และประกาศกฎกระทรวง พ.ศ. 2564 โดยสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม SeismoStruct นำมาวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีสถิตศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear Static Analysis) เพื่อหาผลตอบสนองและประเมินความเสียหายของโครงสร้างตามมาตรฐาน FEMA356 (Federal Emergency Management Agency)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากชนิดเขตที่คิดผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างฐานรากกับดิน โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม SeismoStruct

2. เปรียบเทียบพฤติกรรมของโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากแบบยึดแน่นกับโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากชนิดเขตที่มีการโยกตัว

1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีสมมติฐาน คือ การโยกตัวของฐานรากชนิดเขตและการเพิ่มคานสายรัดจะช่วยลดแรงภายในที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างและสามารถสลายแรงแผ่นดินไหวได้ดีกว่า โดยเปรียบเทียบกับฐานรากแบบยึดแน่นภายใต้แรงแผ่นดินไหว

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ฐานรากที่ใช้คือฐานรากชนิดเขต (Strap Footing) แบ่งเป็น 2 กรณี คือ ฐานรากแบบยึดแน่นและฐานรากชนิดเขตที่มีการโยกตัว

2. โครงสร้างที่ใช้วิเคราะห์คือโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 3, 5 และ 7 ชั้น โดยแบ่งเป็นอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวและอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

3. ดินชั้นรองรับสำหรับแบบจำลองโครงสร้าง คือ ดินทราย ดินเหนียวอ่อน และดินเหนียวแข็ง และพฤติกรรมของดินพิจารณาเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous)

4. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม SeismoStruct แล้วทำการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีสถิตยศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear Static Analysis)

5. ใช้ข้อมูลแผ่นดินไหวของอำเภอเมืองเชียงราย จังหวัดเชียงราย สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารสูง 3, 5 และ 7 ชั้น

6. การวิเคราะห์ที่อยู่ภายใต้ขอบเขตของโปรแกรม SeismoStruct

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาเอกสารงานวิจัย ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของฐานรากชนิดเขตที่มีการโยกตัว และศึกษาการใช้โปรแกรม SeismoStruct
2. ออกแบบอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3, 5 และ 7 ชั้น
3. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากแบบยึดแน่น และโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากชนิดเขตที่มีการโยกตัว โดยใช้โปรแกรม SeismoStruct
4. เปรียบเทียบผลตอบสนองของโครงสร้างแต่ละประเภท
5. สรุปผลที่ได้จากการวิจัย

1.6 ประโยชน์ของงานวิจัย

1. ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากชนิดเขตที่คิดผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างฐานรากกับดิน สำหรับใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว ด้วยโปรแกรม SeismoStruct
2. เข้าใจพฤติกรรมของโครงสร้าง ระหว่างโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากแบบยึดแน่น และโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากชนิดเขตที่มีการโยกตัว
3. เข้าใจหลักการออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหวและหลักการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีสถิตยศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น
4. สามารถนำแบบจำลองไปแก้ไขเพิ่มเติมให้สอดคล้องในการนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว

บทที่ 2

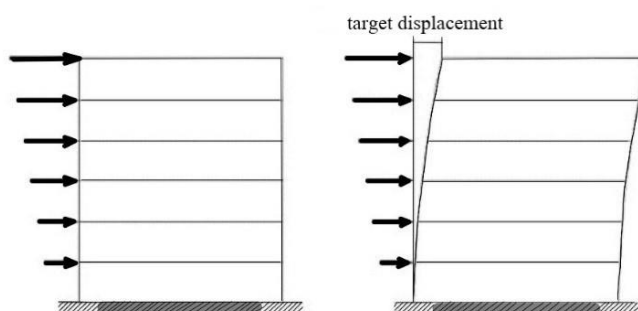
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์โครงสร้าง

การวิเคราะห์โครงสร้างที่มีแรงแผ่นดินไหวกระทำต่อโครงสร้าง สามารถวิเคราะห์ได้หลายวิธีไม่ว่าจะเป็นวิธีสถิตยศาสตร์แบบเชิงเส้น (Linear Static) วิธีพลศาสตร์แบบเชิงเส้น (Linear Dynamic) วิธีสถิตยศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear Static) และวิธีพลศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear Dynamic) ซึ่งวิธีที่สามารถให้ผลการวิเคราะห์ถูกต้องและแม่นยำที่สุด คือ วิธีพลศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น แต่มีความยุ่งยาก ซับซ้อน และใช้เวลาในการคำนวณที่มาก อาจจะไม่เหมาะสมสำหรับวิศวกรผู้ออกแบบที่จะนำไปปฏิบัติงานจริง โดยงานวิจัยนี้จะเลือกใช้วิธีสถิตยศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear Static Analysis) เพื่อวิเคราะห์โครงสร้าง เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายในการคำนวณ ไม่ซับซ้อน และให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับวิธีพลศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น

2.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีสถิตยศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear Static Pushover Analysis Method)

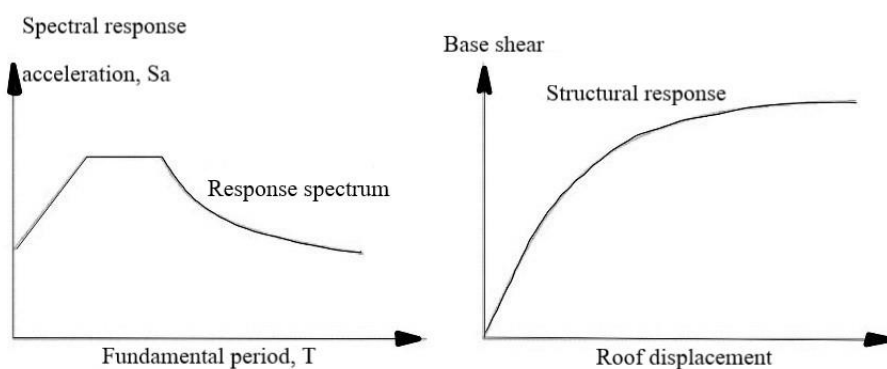
การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีสถิตยศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น หรือ วิธีวิเคราะห์โดยการผลักด้านข้าง (Pushover) คือ การวิเคราะห์โครงสร้างที่จะเกิดขึ้นเมื่อรับแรงพลศาสตร์ เช่น แรงแผ่นดินไหว โดยใส่แรงกระจายต่อโครงสร้าง แล้วค่อย ๆ เพิ่มแรงกระทำทางด้านข้าง จนเคลื่อนที่เท่ากับค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย (Target Displacement) แล้วนำมาพิจารณาวิเคราะห์แรงภายใน การเคลื่อนที่ และการเสียรูป ซึ่งคือค่าการตอบสนองสูงสุด (Peak Response) ที่ทำนายว่าจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดแรงแผ่นดินไหวจริง โดยนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหว เช่น มาตรฐานกรมโยธาธิการ



(อ้างอิงจาก : Chopra และคณะ, 2002)

รูปที่ 2.1 แรงกระทำทางด้านข้างที่กระทำต่อโครงสร้าง

ตัวแปรสำคัญที่กำหนดการตอบสนองของอาคาร คือ การเคลื่อนตัวเป้าหมายของยอดอาคาร (Target roof displacement) สามารถคำนวณได้จากกราฟผลตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Response spectrum) ซึ่งจากกราฟจะได้อัตราเร่งตอบสนองสูงสุด (Spectral response acceleration) ที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้าง และจากลักษณะของโครงสร้างสามารถหาค่าคาบการสั่นของโครงสร้าง (Structural fundamental period of vibration) ได้ ค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายขึ้นอยู่กับกำลังต้านทานแรงเฉือนที่จุดครากของอาคาร และสติเฟนสด้านของประสิทธิผล โดยใช้แรงกระทำด้านข้างที่มีรูปแบบการกระจายแรงคงที่กระทำต่ออาคาร แล้วค่อย ๆ เพิ่มแรงกระทำให้มากขึ้น แล้ววาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐาน (Base shear force) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงด้านข้างทั้งหมดที่กระทำ และการเคลื่อนตัวเป้าหมายของยอดอาคาร (Roof displacement) เส้นกราฟที่ได้มีชื่อเรียกว่า เส้นโค้งแรงกระทำด้านข้าง (Pushover curve) นำไปคำนวณตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ใน FEMA 356 (2000) และ FEMA 440 (2005) ตัวอย่างกราฟผลตอบสนองสเปกตรัมของโครงสร้างและกราฟเส้นโค้งแรงกระทำด้านข้างแสดงดังรูปที่ 2.2

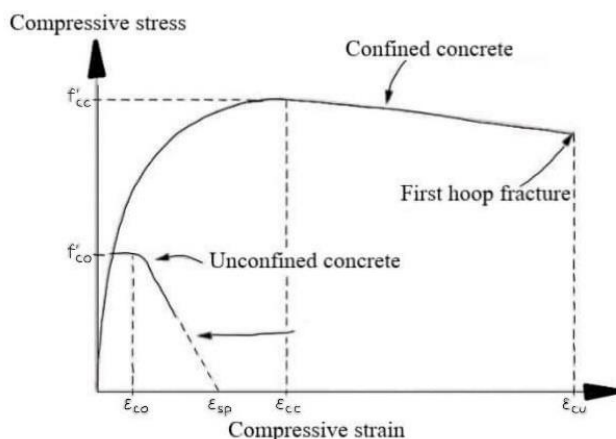


(อ้างอิงจาก : Chopra และคณะ, 2002)

รูปที่ 2.2 กราฟผลตอบสนองสเปกตรัมและกราฟเส้นโค้งแรงกระทำด้านข้างของโครงสร้าง

2.1.2 แบบจำลองพฤติกรรมการรับแรงกระทำของคอนกรีต (Non-Linear Constant Confinement Concrete Model)

แบบจำลองของ Mander และคณะ (1988) โดยพฤติกรรมการรับแรงกระทำของคอนกรีต ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของเหล็กเสริมทางด้านข้างและเหล็กเสริมตามยาว และรูปแบบของแรงกระทำเป็นรอบซ้ำไปซ้ำมา (Cyclic loading) โดยจะทำการเพิ่มแรงกระทำขึ้นเรื่อย ๆ โดยศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตโดยคิดผลของการบีบรัดทางด้านข้าง (Lateral confinement effect) ในรูปแบบของรูปทรงสี่เหลี่ยมและรูปทรงกลม โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นของคอนกรีตที่ถูกเสนอโดย Popovics (1973) แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองดังกล่าวเพื่อหาค่า Confinement factor ของวัสดุคอนกรีตแต่ละหน้าตัดที่ใช้ในโปรแกรม SeismoStruct



(อ้างอิงจาก: Mandar และคณะ, 1988)

รูปที่ 2.3 แบบจำลองความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดสำหรับแรงกระทำทิศทางเดียวของคอนกรีตส่วนที่ถูกบีบรัดและไม่ถูกบีบรัด

ผลของการบีบรัดทางด้านข้างของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับขนาด รูปร่างของหน้าตัด และปริมาณของเหล็กเสริม ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์ k_e ดังรูป โดยสำหรับหน้าตัดกลมเสริมเหล็กปลอกเดี่ยวสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ได้จาก

$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2d_s}\right)^2}{1 - \rho_{cc}} \quad (2-1)$$

สำหรับหน้าตัดกลมเสริมเหล็กปลอกเกลียวสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ได้จาก

$$k_e = \frac{1 - \frac{s'}{2d_s}}{1 - \rho_{cc}} \quad (2-2)$$

สำหรับหน้าตัดสี่เหลี่ยมสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ได้จาก

$$k_e = \frac{\left(1 - \sum \frac{(w'_i)^2}{6b_c d_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2b_c}\right) \left(1 - \frac{s'}{2d_c}\right)}{(1 - \rho_{cc})} \quad (2-3)$$

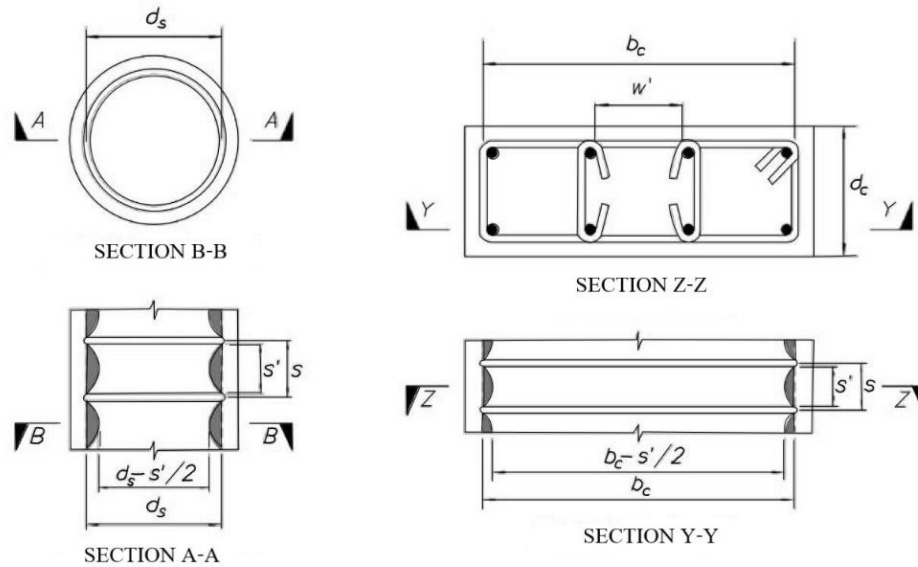
โดย ρ_{cc} คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมตามยาวกับพื้นที่หน้าตัดส่วนที่ถูกบีบรัดของคอนกรีต

b_c คือ ขนาดแกนคอนกรีตถึงเส้นกึ่งกลางของขอบกั้นในห้วงทิศทางในแนวแกน x

d_c คือ ขนาดแกนคอนกรีตถึงเส้นกึ่งกลางของขอบกั้นในห้วงทิศทางในแนวแกน y

s' คือ ระยะห่างระหว่างแท่งเกลียวหรือห้วง

w'_i คือ ช่องว่างตามขวางที่อยู่ระหว่างแนวยาวที่อยู่ติดกันกับห้วง



(อ้างอิงจาก: Mandar และคณะ, 1988)

รูปที่ 2.4 แกนที่ถูกบีบอัดประสิทธิภาพสำหรับหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบกลมและสี่เหลี่ยมมุมฉาก

สำหรับกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกบีบอัด Mandar และคณะ (1988) ได้เสนอความสัมพันธ์ของกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกบีบอัดและไม่ได้ถูกบีบอัด สมการดังต่อไปนี้

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.49f'_1}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_1}{f'_{co}} \right) \quad (2-4)$$

$$f'_1 = \frac{1}{2} k_e \rho_s f_{yh} \quad (2-5)$$

โดย f'_{cc} คือ กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ถูกบีบอัด

f'_{co} คือ กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ไม่ได้ถูกบีบอัด

f'_{yh} คือ กำลังประลัยของเหล็กเสริมตามขวางหรือเหล็กปลอก

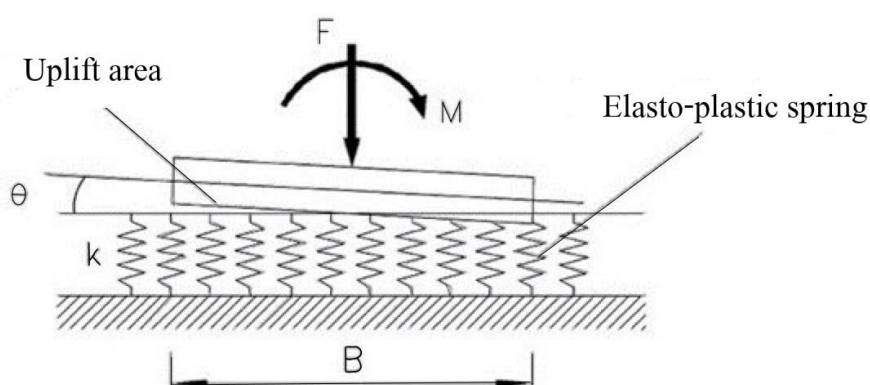
ρ_s คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณของเหล็กเสริมตามขวางกับปริมาณของคอนกรีตที่ถูกบีบอัด

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองฐานรากและแบบจำลองพฤติกรรมของดิน

ศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างโดยคิดผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้าง (Soil-Structure interaction) ภายใต้แรงแผ่นดินไหว โดยใช้หลักการของ Winkler (1867) หลักการของ Raychowdhury และ Hutchinson (2008) และใช้คำแนะนำของ Gazetas (1991) ในการคำนวณหาค่าสติเฟเนสอีลาสติกของดิน

2.2.1 แบบจำลองฐานรากของ Winkler ที่มีการยกตัว

Winkler (1867) มีสมมติฐานคือ ดินและฐานรากมีความสัมพันธ์ในรูปแบบสปริงที่มีระยะห่างเท่า ๆ กัน โดยสปริงแต่ละตัวมีความอิสระต่อกัน ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และมุมบิดนั้นเป็นแบบเชิงเส้น แต่ถ้าหากว่าแรงที่กระทำต่อโครงสร้างนั้นมีค่ามากพอ จนเกินกว่ากำลังต้านทานของฐานราก จะทำให้ฐานรากเกิดการยกตัวขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.5 และส่งผลให้พฤติกรรมของฐานรากเปลี่ยนจากเชิงเส้นเป็นแบบไม่เชิงเส้น หลักการดังกล่าวถูกเสนอโดย Chen และ Lai (2002)



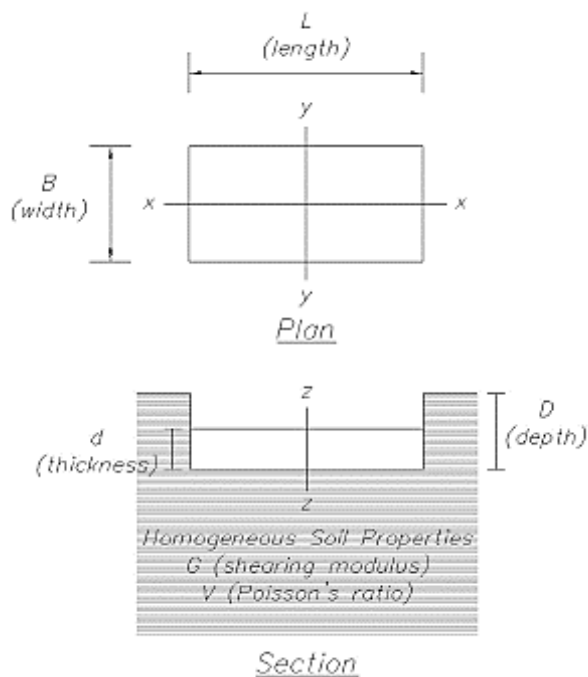
(อ้างอิงจาก: Chen และ Lai, 2002)

รูปที่ 2.5 แบบจำลองฐานรากอีลาสติก-พลาสติกแบบ Winkler

ถึงแม้ว่าในทางวิศวกรรม แบบจำลองพฤติกรรมของดินและฐานรากของ Winkler จะเป็นที่ยอมรับและใช้อย่างแพร่หลาย แต่แบบจำลองนี้มีข้อจำกัดคือ ความเค้นที่เกิดขึ้นในดินมีความสัมพันธ์กับค่าการทรุดตัวที่จุดนั้นเท่านั้น จึงจำเป็นต้องใช้การจำกัดระดับชั้นความเสถียรของฐานรากให้มีความต่อเนื่อง สำหรับค่าสติเฟเนสของดินที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะขึ้นอยู่กับประเภทของชั้นดินและระดับความลึกของชั้นดิน รวมไปถึงขนาดของฐานราก ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการของ Gazetas

2.2.2 ค่าสติฟเนสของดิน

ค่าสติฟเนสของดินสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถหาได้จากสมการที่ได้ถูกเสนอโดย Gazetas ซึ่งได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย สำหรับฐานรากที่ตั้งอยู่บนชั้นดินที่มีพฤติกรรมเป็นเนื้อเดียวกัน และมีขนาดความยาวในด้านต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ค่าสติฟเนสโดยรวมของฐานรากมีค่าดังสมการ (2-6)



(อ้างอิงจาก: Harden, 2005)

รูปที่ 2.6 ระยะต่าง ๆ ของฐานรากสำหรับใช้ในสมการสติฟเนสอีลาสติกของ Gazetas

$$K_i = K'_i e_i \quad (2-6)$$

โดย K'_i คือ ค่าสติฟเนสของฐานรากที่ตั้งอยู่บนพื้นผิว

e_i คือ ตัวประกอบความลึกของฐานราก

ตารางที่ 2.1 สมการสำหรับการหาค่าสติฟเนสของฐานรากชนิดเขต

| Stiffness parameter | Surface stiffness |
|--|---|
| Horizontal translation (toward short side) | $K'_x = \frac{GB}{2-\mu} \left[3.4 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.65} + 1.2 \right]$ |
| Horizontal translation (toward long side) | $K'_y = \frac{GB}{2-\mu} \left[3.4 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.65} + 0.4 \left(\frac{L}{B} \right) + 0.8 \right]$ |
| Vertical translation | $K'_z = \frac{GB}{1-\mu} \left[1.55 \left(\frac{L}{B} \right)^{0.75} + 0.8 \right]$ |
| | Stiffness embedment factors |
| Embedment factor, Horizontal translation (toward short side) | $e_x = \left[1 + 0.15 \left(\frac{2D}{L} \right)^{0.5} \right] \left\{ 1 + 0.52 \left[\frac{(D-\frac{d}{2})16(L+B)d}{LB^2} \right]^{0.4} \right\}$ |
| Embedment factor, Horizontal translation (toward long side) | $e_y = \left[1 + 0.15 \left(\frac{2D}{B} \right)^{0.5} \right] \left\{ 1 + 0.52 \left[\frac{(D-\frac{d}{2})16(L+B)d}{BL^2} \right]^{0.4} \right\}$ |
| Embedment factor, Vertical translation | $e_z = \left[1 + 0.095 \frac{D}{B} \left(1 + 1.3 \frac{B}{L} \right) \right] \left[1 + 0.2 \left(\frac{2L + 2B}{LB} d \right)^{0.67} \right]$ |

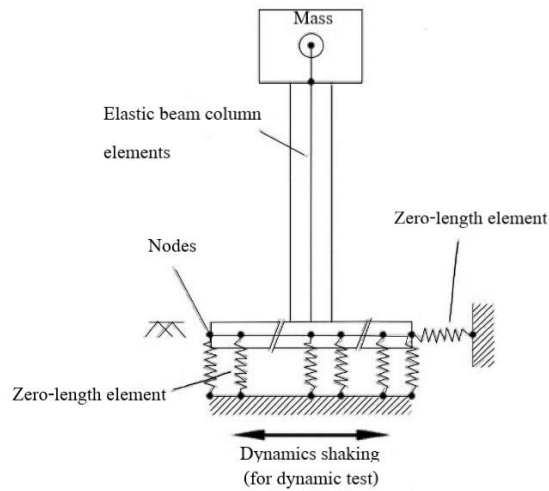
(อ้างอิงจาก: FEMA 356 Code)

จากตารางที่ 2.1 สมการหลักที่ใช้ในการหาค่าสติฟเนสของดินในงานวิจัยนี้ คือ สมการ Vertical translation และ Horizontal translation จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคูณกับสมการ Stiffness embedment factors ในทิศทางนั้น ๆ จะได้ค่าสติฟเนสของดิน

2.2.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

หลักการของ Raychowdhury และ Hutchinson (2008) สร้างแบบจำลอง โครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากชนิดเขต และคิดผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก โดยแบ่ง องค์ประกอบเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ ด้วยจุดต่อ เพื่อใช้ในการใส่สปริงตามสมมติฐานของ Winkler โดย สปริงในแนวดิ่ง ใช้สำหรับแทนพฤติกรรมของดินชั้นรองรับ และสปริงในแนวราบ ใช้สำหรับแทน พฤติกรรมการรับแรงทางด้านข้างของฐานราก กำหนดให้สปริงทั้งสองแบบนี้เป็นองค์ประกอบที่ไม่มี ความยาว (Zero-length element) และระยะห่างระหว่างสปริงในแนวดิ่งแต่ละตัวเท่ากับ

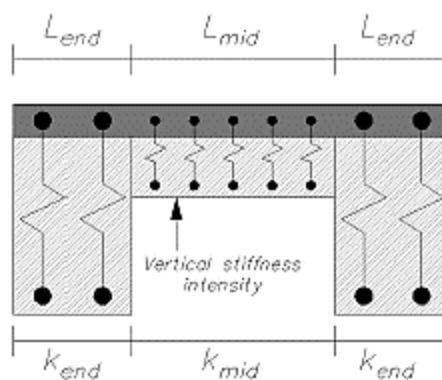
2 เปรอร์เซ็นต์ของความยาวทั้งหมดของฐานราก ซึ่งสามารถเขียนเป็นแบบจำลองอุดมคติได้ดังแสดงในรูปที่ 2.7



(อ้างอิงจาก : Raychowdhury และ Hutchinson, 2009)

รูปที่ 2.7 แบบจำลองอุดมคติของระบบโครงสร้างกับฐานราก

ค่าสติฟเนสของสปริงในแนวตั้งขึ้นอยู่กับขอบเขตของฐานราก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยค่าสติฟเนสที่ขอบเขตส่วนปลาย (End region) มีค่าเป็น 5 เท่าของค่าสติฟเนสที่ขอบเขตส่วนกลาง (Mid region) เนื่องจากการโยกตัวของฐานรากส่งผลให้ดินชั้นรองรับมีความแข็งมากขึ้น กำหนดให้ระยะของขอบเขตของส่วนปลาย วัดจากขอบของฐานรากเข้ามาเท่ากับ 16 เปรอร์เซ็นต์ของความยาวฐานราก และกำหนดให้มีความสมมาตรของระยะเท่ากันทั้งสองฝั่ง

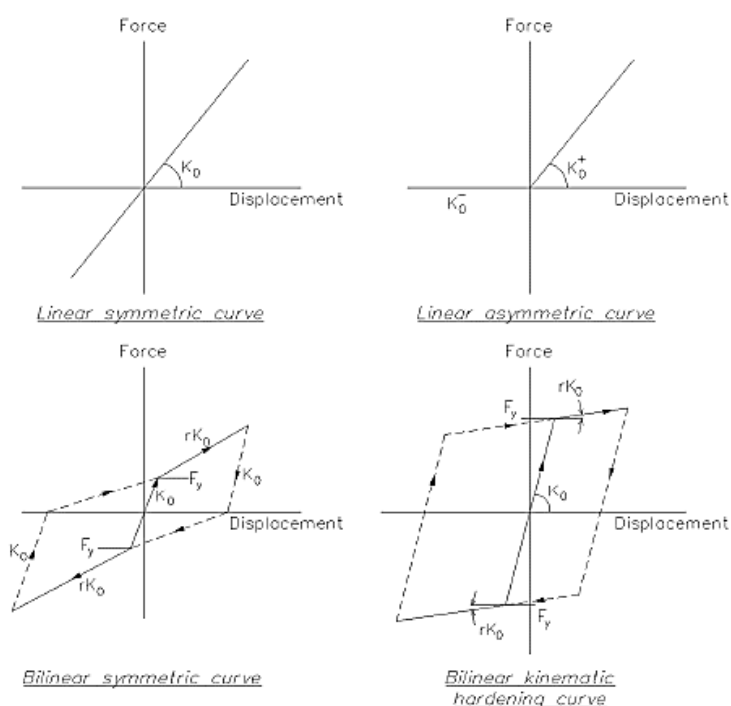


(อ้างอิงจาก : OpenSees, 2008)

รูปที่ 2.8 แบบจำลองของ Winkler ที่มีการแปรผันความเข้มของค่าสติฟเนส

2.2.4 แบบจำลองพฤติกรรมการรับแรงกระทำของดิน

แบบจำลองพฤติกรรมของดินในกรณีของฐานรากชนิดเขตที่มีการโยกตัว มีทั้งหมด 4 แบบ คือ เส้นโค้งสมมาตรแบบเชิงเส้น (Linear symmetric curve) เส้นโค้งไม่สมมาตรแบบเชิงเส้น (Linear asymmetric curve) เส้นโค้งสมมาตรแบบสองเชิงเส้น (Bilinear symmetric curve) และเส้นโค้งแข็งตัวจลนศาสตร์แบบสองเชิงเส้น (Bilinear kinematic hardening curve) โดยขึ้นส่วนของสปริงที่ใช้ในโปรแกรม SeismoStruct เรียกว่า Link element ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของแรงกับการเคลื่อนตัวของสปริงแต่ละแบบ

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารสูง 3, 5 และ 7 ชั้น จะใช้สปริงทั้งหมด 2 แบบ ได้แก่ เส้นโค้งไม่สมมาตรแบบเชิงเส้น และเส้นโค้งแข็งตัวจลนศาสตร์แบบสองเชิงเส้น

โดยเส้นโค้งเชิงเส้นไม่สมมาตรนั้นสามารถใช้สำหรับสปริงในแนวตั้ง เพื่อแทนพฤติกรรมของดินชั้นรองรับที่สามารถต้านทานแรงอัด แต่ไม่สามารถต้านทานแรงดึงได้

ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของดินที่ใช้ในกรณีของโครงสร้างอาคารสูง 3, 5 และ 7 ชั้น ใช้ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของดิน Bowles (1996) ที่ได้รวบรวมสำหรับการออกแบบทางวิศวกรรม โดยแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ดินทราย ดินเหนียวอ่อน และดินเหนียวแข็ง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของดินประเภทต่าง ๆ

| ชนิดของดิน | ความหนาแน่น ρ (Mg/m ³) | มุมเสียดทาน ϕ | แรงยึดเหนี่ยว C_u (kPa) | มอดูลัสยืดหยุ่น E_s (kPa) |
|---------------|--|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|
| ดินทราย | 1.85 | 31 | 0 | 10,000 |
| ดินเหนียวอ่อน | 1.75 | 20 | 20 | 5,000 |
| ดินเหนียวแข็ง | 2.07 | 20 | 62.5 | 75,000 |

(อ้างอิงจาก : Bowles, 1996)

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาโครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหว

บทความนี้ใช้หลักของกฎกระทรวง ฉบับ พ.ศ. 2564 และมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.1302-62) มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (อ้างอิงจาก กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2562) นำไปประเมินความเสียหายของโครงสร้างด้วยวิธีวิเคราะห์โดยการผลักด้านข้าง (Pushover analysis) ให้ไปในทิศทางเดียวจนถึงค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย ดังนั้นค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างจึงควรที่จะต้องมีความถูกต้องเหมาะสมกับโครงสร้างและแรงแผ่นดินไหวที่โครงสร้างต้องรับ การคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายที่เหมาะสมของโครงสร้างนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัย เช่น พฤติกรรมของการตอบสนองของโครงสร้าง น้ำหนักของโครงสร้าง ชั้นดินที่โครงสร้างตั้งอยู่ เป็นต้น และต้องมีการปรับแก้ค่าต่าง ๆ ให้เหมาะสมกับแรงแผ่นดินไหวที่โครงสร้างจะต้องรับ

2.3.1 ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโครงสร้าง

เมื่อเกิดแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว โครงสร้างจะแสดงผลการตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนที่แตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ อย่าง โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม ซึ่งค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา (Maximum considered earthquake) ที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_0) และที่คาบการสั่น 1 วินาที (S_1) ของพื้นที่ในจังหวัดต่าง ๆ ทั่วประเทศไทย ได้ถูกนำเสนอโดย กรมโยธาธิการและผังเมือง มยผ. 1302-62 โดยจะพิจารณาพื้นที่จังหวัดเชียงราย

ตารางที่ 2.3 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_s) และ คาบการสั่น 1 วินาที (S_1) ของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณาจังหวัดเชียงราย

| ความเร่งตอบสนอง | | | | | |
|-------------------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| อำเภอ | S_s | S_1 | อำเภอ | S_s | S_1 |
| กิ่งอำเภอดอยหลวง | 0.924 | 0.270 | เมืองเชียงราย | 0.798 | 0.232 |
| กิ่งอำเภอเวียงเชียงรุ้ง | 0.833 | 0.241 | แม่จัน | 0.940 | 0.278 |
| ขุนตาล | 0.650 | 0.169 | แม่ฟ้าหลวง | 0.929 | 0.275 |
| เชียงของ | 0.706 | 0.191 | แม่ลาว | 0.735 | 0.211 |
| เชียงแสน | 0.935 | 0.273 | แม่สรวย | 0.749 | 0.209 |
| เทิง | 0.619 | 0.157 | แม่สาย | 0.933 | 0.273 |
| ป่าแดด | 0.618 | 0.154 | เวียงแก่น | 0.683 | 0.175 |
| พญาเม็งราย | 0.672 | 0.180 | เวียงชัย | 0.753 | 0.215 |
| พาน | 0.656 | 0.173 | เวียงป่าเป้า | 0.759 | 0.194 |

(อ้างอิงจาก: มยผ. 1302 กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2562)

2.3.2 ประเภทของชั้นดิน ณ ที่ตั้งโครงสร้าง

สภาพของชั้นดิน สามารถแบ่งออกได้เป็น 6 ประเภท คือ A (หินแข็ง) B (หิน) C (ดินแข็ง) D (ดินปกติ) E (ดินอ่อน) หรือ F (ดินที่มีลักษณะพิเศษ) โดยแบ่งเกณฑ์การจัดแบ่งประเภทของชั้นดินไว้

ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลดินและไม่สามารถทำการสำรวจดินได้ ให้สมมติว่าเป็นชั้นดินแบบประเภท D เว้นแต่มีผู้เชี่ยวชาญหรือหน่วยงานรัฐที่เกี่ยวข้อง กำหนดว่าชั้นดิน ณ ตำแหน่งนั้นเป็นประเภท E หรือ F

นอกจากนี้ในกรณีที่ชั้นดินที่หนามากกว่า 3 เมตร อยู่ระหว่างฐานรากกับชั้นหิน จะต้องไม่กำหนดให้ชั้นดินเป็นประเภท A หรือ B

ตารางที่ 2.4 การจำแนกประเภทของชั้นดิน

| ประเภทชั้นดิน | \bar{v}_s | \bar{N} หรือ \bar{N}_{ch} | \bar{S}_u |
|---------------|---|-------------------------------|------------------------|
| A | $> 1500 \text{ m/s}$ | - | - |
| B | $750 - 1500 \text{ m/s}$ | - | - |
| C | $360 - 750 \text{ m/s}$ | > 50 | $> 100 \text{ kPa}$ |
| D | $180 - 360 \text{ m/s}$ | $15 - 50$ | $50 - 100 \text{ kPa}$ |
| E | $< 180 \text{ m/s}$ | < 15 | $< 50 \text{ kPa}$ |
| | มีชั้นดินที่มีความหนามากกว่า 3 เมตร ที่มีคุณสมบัติดังนี้ Plasticity Index (PI) > 20 Moisture Content (w) $> 40\%$ $\bar{S}_u < 25 \text{ kPa}$ | | |
| F | เกณฑ์ตามที่กำหนดไว้ในหัวข้อ | | |

(อ้างอิงจาก: มยผ. 1302 กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2562)

โดยที่ \bar{v}_s คือ ค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยในช่วงความลึก 30 เมตรแรก

\bar{N} คือ ค่าการทดสอบฝังจรมมาตรฐานเฉลี่ยในช่วงความลึก 30 เมตรแรก

\bar{N}_{ch} คือ ค่าการทดสอบฝังจรมมาตรฐานเฉลี่ยสำหรับชั้นทรายในช่วงความลึก 30 เมตรแรก

\bar{S}_u คือ ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ยสำหรับดินเหนียวในช่วงความลึก

30 เมตรแรก

หากเกณฑ์ของ \bar{N}_{ch} และ \bar{S}_u แตกต่างกัน ให้เลือกประเภทชั้นดินที่อ่อนกว่า

2.3.2.1 ชั้นดินประเภท F

ชั้นดินที่มีลักษณะต่อไปนี้ให้จัดเป็นชั้นดินประเภท F และต้องทำการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดินต่อการสั่นสะเทือนของแรงแผ่นดินไหว

1. ชั้นดินมีโอกาสเกิดการวิบัติภายใต้แรงแผ่นดินไหว เช่น ดินที่สามารถเกิดการเหลวตัว (Liquefaction) หรือ ดินเหนียวที่อ่อนมาก เป็นต้น
2. ชั้นดินเหนียวที่มีวัตุถุอินทรีย์อยู่มาก และมีความหนามากกว่า 3 เมตร
3. ชั้นดินที่มีความเป็นพลาสติกสูง (มีความหนามากกว่า 7.6 เมตร และมีค่า PI มากกว่า 75)

4. ชั้นดินเหนียวอ่อนถึงปานกลางที่หนามาก (มีความหนามากกว่า 37 เมตร และมีกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ S_u น้อยกว่า 50 kPa)

2.3.3 การปรับแก้ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา ณ บริเวณที่ตั้งของโครงสร้าง สามารถปรับแก้ค่าให้เหมาะสมกับประเภทของชั้นดินดังสมการต่อไปนี้

$$S_{MS} = F_a S_s \quad (2-7)$$

$$S_{M1} = F_v S_1 \quad (2-8)$$

โดยที่ S_{MS} คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 0.2 วินาที ที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งโครงสร้าง หน่วยเป็น ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก (g)

S_{M1} คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบการสั่น 1.0 วินาที ที่ถูกปรับแก้เนื่องจากผลของชั้นดิน ณ ที่ตั้งโครงสร้าง หน่วยเป็น ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก (g)

F_a คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งโครงสร้าง สำหรับคาบการสั่น 0.2 วินาที

F_v คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งโครงสร้าง สำหรับคาบการสั่น 1.0 วินาที

ตารางที่ 2.5 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดินบริเวณที่ตั้งโครงสร้าง F_a

| ประเภทของชั้นดิน | ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่คาบ 0.2 วินาที (g) | | | | |
|------------------|---|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| | $S_s \leq 0.25$ | $S_s = 0.50$ | $S_s = 0.75$ | $S_s = 1.00$ | $S_s \geq 1.25$ |
| 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 | | | | |

(อ้างอิงจาก: มยผ. 1302 กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2562)

ตารางที่ 2.6 ค่าสัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดินบริเวณที่ตั้งโครงสร้าง F_v

| ประเภทของ ชั้นดิน | ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่คาบ 1.0 วินาที (g) | | | | |
|----------------------|---|-------------|-------------|-------------|----------------|
| | $S_s \leq 0.1$ | $S_s = 0.2$ | $S_s = 0.3$ | $S_s = 0.4$ | $S_s \geq 0.5$ |
| 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 | | | | |

(อ้างอิงจาก: มยผ. 1302 กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2562)

2.3.4 ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ ที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_{DS}) และ ที่คาบการสั่น 1 วินาที (S_{D1}) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad (2-9)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (2-10)$$

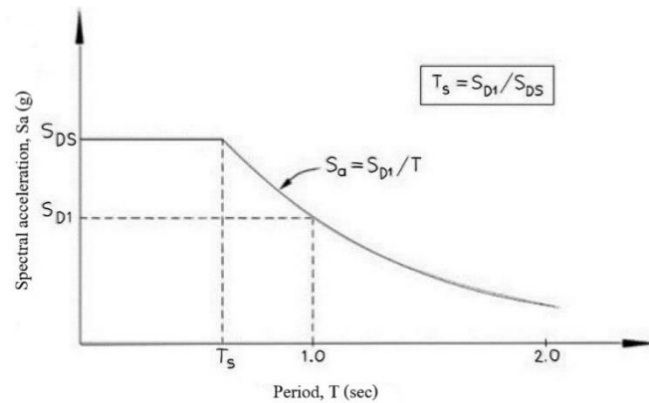
โดยที่ S_{DS} คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 0.2 วินาที มีหน่วย เป็น ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก (g)

S_{D1} คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่น 1.0 วินาที มีหน่วย เป็น ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก (g)

2.3.5 สเปกตรัมผลตอบสนองของโครงสร้าง

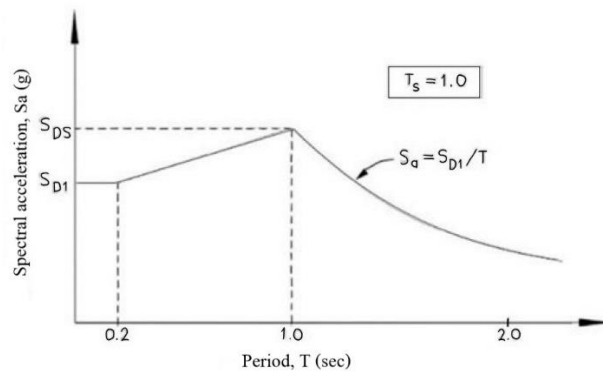
ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ S_a (หน่วยความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก, g) ขึ้นกับวิธีการออกแบบว่าใช้วิธีแรงสถิตเทียบเท่าหรือวิธีเชิงพลศาสตร์ และขึ้นกับตำแหน่ง ณ ที่ตั้งของโครงสร้าง

ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบ สำหรับวิธีแรงสถิตเทียบเท่า ให้ใช้ตามรูปที่ สำหรับพื้นที่ที่มีค่า $S_{D1} \leq S_{DS}$ และให้ใช้ตามรูป สำหรับพื้นที่ที่มีค่า $S_{DS} > S_{D1}$ โดยที่ S_{DS} และ S_{D1} คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบตามหัวข้อที่ 2.3.5



(อ้างอิงจาก : มยผ. 1302 กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2562)

รูปที่ 2.10 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าที่มีค่า $S_{D1} \leq S_{DS}$



(อ้างอิงจาก : มยผ. 1302 กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2562)

รูปที่ 2.11 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่าที่มีค่า $S_{DS} > S_{D1}$

2.3.6 แรงเฉือนที่กระทำที่ฐานของโครงสร้าง

สำหรับโครงสร้างอาคารที่มีรูปทรงสม่ำเสมอ สามารถคำนวณหาแรงแผ่นดินไหวได้โดยใช้วิธีแรงสถิตเทียบเท่า โดยกฎกระทรวงฉบับ พ.ศ. 2564 ได้กำหนดให้คำนวณค่าของแรงเฉือนทั้งหมดในแนวราบที่ระดับพื้นดินตามสมการ

$$V = ZIKCSW \quad (2-11)$$

โดยที่ V คือ แรงเฉือนทั้งหมดในแนวราบที่ระดับพื้นดิน

Z คือ สัมประสิทธิ์ของความเข้มของแผ่นดินไหว ตามที่กำหนดในตารางที่ 2.7

I คือ ตัวคูณเกี่ยวกับการใช้อาคาร ตามที่กำหนดในตารางที่ 2.8

K คือ สัมประสิทธิ์ของโครงสร้างอาคารที่รับแรงในแนวราบ ตามที่กำหนดในตารางที่ 2.9

C คือ สัมประสิทธิ์ หาค่าได้จากสมการ

$$C = \frac{1}{15\sqrt{T}} \quad (2-12)$$

ถ้ากำหนดค่าสัมประสิทธิ์ได้มากกว่า 0.12 ให้ใช้เท่ากับ 0.12 และถ้าผลคูณระหว่างค่า C กับค่า S มากกว่า 0.14 ให้ใช้เท่ากับ 0.14 เว้นแต่กรณีที่ดินอ่อนมาก ถ้าผลคูณดังกล่าวมากกว่า 0.26 ให้ใช้เท่ากับ 0.26

S คือ สัมประสิทธิ์ของการประสานความถี่ธรรมชาติระหว่างอาคารและชั้นดินที่ตั้งอาคาร ตามที่กำหนดในตารางที่ 2.10

W คือ น้ำหนักของตัวอาคารทั้งหมดรวมทั้งน้ำหนักของวัสดุอุปกรณ์ซึ่งยึดตรงกับที่โดยไม่รวมน้ำหนักบรรทุกทุกจรสำหรับอาคารทั่วไป หรือน้ำหนักของตัวอาคารทั้งหมดรวมกับร้อยละ 25 ของน้ำหนักบรรทุกทุกจรสำหรับโกดังหรือคลังสินค้า

ตารางที่ 2.7 ค่าสัมประสิทธิ์ความเข้มของแผ่นดินไหว (Z)

| บริเวณ | ค่าของ Z |
|---|-------------|
| บริเวณที่ 1 (กรุงเทพฯ นนทบุรี ปทุมธานี สมุทรปราการ สมุทรสาคร) | ≥ 0.19 |
| บริเวณที่ 2 (กาญจนบุรี เชียงราย เชียงใหม่ ตาก น่าน พะเยา แพร่ แม่ฮ่องสอน ลำปาง ลำพูน) | ≥ 0.38 |

(อ้างอิงจาก: กฎกระทรวงฉบับ พ.ศ. 2564)

ตารางที่ 2.8 ตัวคูณเกี่ยวกับการใช้อาคาร (I)

| ชนิดของอาคาร | ค่าของ I |
|---|------------|
| อาคารที่จำเป็นต่อความเป็นอยู่ของสาธารณชน | 1.50 |
| อาคารที่เป็นที่ชุมนุมคนครั้งหนึ่ง ๆ ได้มากกว่าสามร้อยคน | 1.25 |
| อาคารอื่น ๆ | 1.00 |

(อ้างอิงจาก: กฎกระทรวงฉบับ พ.ศ. 2564)

ตารางที่ 2.9 ค่าสัมประสิทธิ์ของโครงสร้างอาคารที่รับแรงในแนวราบ (K)

| ระบบและชนิดของโครงสร้างรับแรงในแนวราบ | ค่าของ K |
|--|------------|
| โครงสร้างซึ่งได้รับการออกแบบให้กำแพงรับแรงเฉือน (Shear Wall) หรือโครงแกงแนง (Brace Frame) ต้านแรงทั้งหมดในแนวราบ | 1.33 |
| โครงสร้างซึ่งได้รับการออกแบบให้โครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียว (Ductile Moment-Resisting Frame) ต้านแรงทั้งหมดในแนวราบ | 0.67 |
| โครงสร้างซึ่งได้รับการออกแบบให้โครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวร่วมกับกำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงแกงแนงต้านแรงในแนวราบ โดยมีข้อกำหนดในการคำนวณออกแบบดังนี้ โครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวต้องสามารถต้านแรงในแนวราบได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 25 ของแรงในแนวราบทั้งหมด กำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงแกงแนงเมื่อแยกเป็นอิสระจากโครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวต้องสามารถต้านแรงในแนวราบได้ทั้งหมด โครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียวร่วมกับกำแพงรับแรงเฉือนหรือโครงแกงแนงต้องสามารถต้านแรงในแนวราบได้ทั้งหมด ให้เป็นไปตามสัดส่วนความคงตัว (Rigidity) โดยคำนึงถึงการถ่ายเทของแรงระหว่างโครงสร้างทั้งสอง | 0.80 |
| หอลังน้ำ รองรับด้วยเสาไม่น้อยกว่า 4 ต้น และมีแกงแนงยึดและไม่ได้ตั้งอยู่บนอาคาร ถ้าผลคูณระหว่าง ค่า K และ C ให้ใช้ค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.12 และ ค่าสูงสุดเท่ากับ 0.25 | 2.5 |
| โครงต้านทานแรงดัดที่มีความเหนียวจำกัดและโครงอาคารระบบอื่น ๆ | 1.0 |

(อ้างอิงจาก: กฎกระทรวงฉบับ พ.ศ. 2564)

ตารางที่ 2.10 สัมประสิทธิ์ของการประสานความถี่ธรรมชาติระหว่างอาคารและชั้นดิน (S)

| ลักษณะของชั้นดิน | ค่าของ S |
|------------------|------------|
| หิน | 1.0 |
| ดินแข็ง | 1.2 |
| ดินอ่อน | 1.5 |
| ดินอ่อนมาก | 2.5 |

(อ้างอิงจาก: กฎกระทรวงฉบับ พ.ศ. 2564)

เมื่อคำนวณแรงเฉือนทั้งหมดที่กระทำที่ฐานของโครงสร้างแล้ว ให้กระจายแรงเฉือนทั้งหมดในแนวราบที่ระดับพื้นดินออกเป็นแรงในแนวราบที่กระทำต่อพื้นชั้นต่าง ๆ โดยแรงในแนวราบที่กระทำต่อพื้นชั้นบนสุดของอาคาร ให้คำนวณตามสมการ

$$F_t = 0.07TV \quad (2-13)$$

โดยค่าของ F_t ที่ได้จากสมการ นี้ไม่ให้ใช้เกิน $0.25V$ และถ้าหาก T มีค่าเท่ากับหรือต่ำกว่า 0.7 วินาที ให้ใช้ค่าของ F_t เท่ากับ 0

สำหรับแรงในแนวราบที่กระทำต่อพื้นชั้นต่าง ๆ ของอาคาร รวมทั้งชั้นบนสุดของอาคารให้คำนวณตามสมการ

$$F_x = \frac{(V-F_t)w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \quad (2-14)$$

โดยที่ F_t คือ แรงในแนวราบที่กระทำต่อพื้นชั้นบนสุดของอาคาร

F_x คือ แรงในแนวราบที่กระทำต่อพื้นชั้นที่ x ของอาคาร

T คือ คาบการแกว่งตามธรรมชาติของอาคาร มีหน่วยเป็นวินาที

V คือ แรงเฉือนทั้งหมดในแนวราบที่ระดับพื้นดิน

w_x, w_i คือ น้ำหนักของพื้นอาคารชั้นที่ x และ i ตามลำดับ

h_x, h_i คือ ความสูงจากระดับพื้นดินถึงพื้นชั้นที่ x และ i ตามลำดับ

$i = 1$ สำหรับพื้นชั้นแรกที่อยู่สูงถัดจากพื้นชั้นล่างของอาคาร

$x = 1$ สำหรับพื้นชั้นแรกที่อยู่สูงถัดจากพื้นชั้นล่างของอาคาร

$\sum_{i=1}^n w_i h_i$ คือ ผลรวมของผลคูณระหว่างน้ำหนักกับความสูงจากพื้นชั้นที่ 1 ถึงชั้นที่ n

สำหรับคาบการสั่นตามธรรมชาติของโครงสร้าง หากไม่สามารถคำนวณหาได้ถูกต้องโดยวิธีอื่น ให้คำนวณตามสมการ (2-15) สำหรับอาคารทั่วไปทุกชนิด และสมการ (2-16) สำหรับอาคารที่มีโครงต้านแรงดัดที่มีความเหนียว

$$T = \frac{0.09h_n}{\sqrt{D}} \quad (2-15)$$

$$T = 0.10N \quad (2-16)$$

โดยที่ h_n คือ ความสูงของพื้นอาคารชั้นสูงสุดวัดจากระดับพื้นดิน

D คือ ความกว้างของโครงสร้างอาคารในทิศทางขนานกับแรงแผ่นดินไหว

N คือ จำนวนชั้นของอาคารทั้งหมดที่อยู่เหนือระดับพื้นดิน

2.3.7 การคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้าง

มาตรฐานของ FEMA 440 ได้ปรับปรุงการคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย (Target Displacement) จากมาตรฐาน FEMA 356 ดังสมการ

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (2-17)$$

โดยที่ S_a คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบที่คาบการสั่นของโครงสร้าง

T_e คือ คาบการสั่นพื้นฐานประสิทธิผลของอาคารในทิศทางที่พิจารณา

g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

C_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่เชื่อมโยงระหว่างการเคลื่อนที่เชิงสเปกตรัม (Spectral displacement) กับการเคลื่อนที่ของยอดอาคาร (จุดควบคุม) ดังแสดงตารางที่ 2.11

C_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่เชื่อมโยงระหว่างการเคลื่อนตัวสูงสุดของระบบพลาสติกกับการเคลื่อนตัวสูงสุดของระบบอีลาสติคเชิงเส้น โดยคำนวณตามสมการ (2-18) ให้ใช้ค่า C_1 ที่คำนวณจากคาบการสั่น 0.2 วินาที สำหรับคาบการสั่นที่น้อยกว่า 0.2 วินาที และใช้ค่า C_1 เท่ากับ 1 สำหรับคาบการสั่นพื้นฐานที่มากกว่า 1 วินาที

$$C_1 = 1 + \frac{R-1}{aT_e^2} \quad (2-18)$$

a คือ สัมประสิทธิ์สำหรับชั้นดิน ณ ที่ตั้งโครงสร้าง สำหรับชั้นดินประเภท A และ B มีค่าเท่ากับ 130 สำหรับชั้นดินประเภท C มีค่าเท่ากับ 90 และสำหรับชั้นดินประเภท D E และ F มีค่าเท่ากับ 60

R คือ อัตราส่วนของแรงที่ต้องต้านทานแบบอีลาสติคต่อกำลังต้านทานที่จุดครากของโครงสร้าง ซึ่งคำนวณจากสมการ

$$R = \frac{S_a}{\frac{V_y}{W}} C_m \quad (2-19)$$

V_y คือ กำลังรับแรงเฉือนรวมที่ฐานที่จุดครากประสิทธิผล

W คือ น้ำหนักของโครงสร้างประสิทธิผลของอาคาร

C_m คือ ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้มวลดังตารางที่ 2.12

C_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ผลจากการเสื่อมถอยของสติฟเนสเมื่อขึ้นส่วนเริ่มต้นกับแรงกลับทิศทาง การเสื่อมถอยของสติฟเนสแบบวิภูจักร และการเสื่อมถอยด้านกำลังต่อ การเคลื่อนตัวสูงสุดของอาคาร ให้ใช้ค่า C_2 เท่ากับ 1 สำหรับคาบการสั่นพื้นฐานที่มากกว่า 0.7 วินาที ส่วนเมื่อคาบการสั่นพื้นฐานน้อยกว่า 0.7 วินาที ให้คำนวณตามสมการ

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800} \left(\frac{R-1}{T_e} \right)^2 \quad (2-20)$$

C_3 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ผลเนื่องจาก $P - \Delta$ Effect โดยมีค่าเท่ากับ 1 สำหรับโครงสร้างที่มีค่าความแข็งหลังจากการครากทางบวก ส่วนกรณีโครงสร้างที่มีค่าความแข็งหลังจากการครากทางลบ ให้คำนวณจากสมการ

$$C_3 = 1 + \frac{|\alpha|(R-1)^2}{T_e} \quad (2-21)$$

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสติฟเนสด้านข้างประสิทธิผล

ตารางที่ 2.11 ค่าสัมประสิทธิ์ C_0

| จำนวนชั้น | อาคารรับแรงเฉือน | | อาคารอื่น ๆ |
|-----------|------------------------------|-------------------------|--------------------------|
| | รูปแบบแรงกระทำ สามเหลี่ยม | รูปแบบแรงกระทำ คงที่ | รูปแบบแรงกระทำ ต่าง ๆ |
| 1 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 2 | 1.2 | 1.15 | 1.2 |
| 3 | 1.2 | 1.2 | 1.3 |
| 5 | 1.3 | 1.2 | 1.4 |
| 10+ | 1.3 | 1.2 | 1.5 |

(อ้างอิงจาก: FEMA 356 Code)

ตารางที่ 2.12 ค่าสัมประสิทธิ์ C_m

| จำนวน ชั้น | โครง ข้อแข็ง คอนกรีต รับโมเมนต์ | ผนัง คอนกรีต รับแรง เฉือน | โครง ข้อแข็ง เหล็ก รับโมเมนต์ | โครงข้อแข็ง ที่มีค้ำยัน ตรงแนว ศูนย์ | โครงข้อแข็ง ที่มีค้ำยันไม่ ตรงแนว ศูนย์ | อื่น ๆ |
|---------------|--|------------------------------------|--|---|--|--------|
| 1-2 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| มากกว่า 3 | 0.9 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.0 |

(อ้างอิงจาก: FEMA 356 Code)

2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการประเมินโครงสร้าง

การประเมินโครงสร้างระดับความเสียหายของโครงสร้าง โดยทั่วไปจะพิจารณาขอบเขตของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างเมื่อรับแรงแผ่นดินไหวที่ยอมรับได้ขั้นต่ำ คือ โครงสร้างต้องไม่เกิดการพังทลายเมื่อรับรับแรงแผ่นดินไหวสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ ตามมาตรฐาน FEMA 356 ได้แบ่งระดับความเสียหายของโครงสร้างตามตารางที่ 2.12 แต่โดยทั่วไปนิยมใช้การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างมี 4 ระดับ คือ Operational, Immediate occupancy, Life safety และ Collapse prevention

2.4.1 Operational level

โครงสร้างจะได้รับความเสียหายน้อยมากหรือไม่มีความเสียหายเกิดขึ้น ทั้งในส่วนที่เป็นโครงสร้าง (Structural member) และส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (Nonstructural member) จากตารางที่ 2.13 พบว่า ความเสียหายที่เกิดขึ้นของส่วนที่เป็นโครงสร้างอยู่ในระดับ Immediate occupancy และส่วนที่ไม่เป็นโครงสร้างอยู่ในระดับ Operational โดยความเสียหายระดับนี้มีความอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สินน้อยมากภายใต้แรงแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงน้อยมาก ๆ โดยในเรื่องของการออกแบบโครงสร้างจะไม่นิยมออกแบบให้มีความเสียหายในระดับนี้

2.4.2 Immediate occupancy level (IO)

โครงสร้างจะได้รับความเสียหายเล็กน้อยหรือไม่มีความเสียหายเกิดขึ้นในส่วนที่เป็นโครงสร้าง ในส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างจะมีความเสียหายเล็กน้อย อาคารยังมีความปลอดภัยและสามารถใช้งานได้แต่อาจจะต้องซ่อมแซมส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างเล็กน้อยและสามารถกลับเข้าใช้งานในอาคารได้ก่อน ความเสี่ยงโดยรวมที่มาจากความเสียหายของโครงสร้างอยู่ในระดับที่ต่ำมาก

2.4.3 Life safety level (LS)

โครงสร้างจะได้รับความเสียหายระดับปานกลางถึงมาก โดยเกิดขึ้นในส่วนที่เป็นโครงสร้างและในส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง แต่ยังมีความปลอดภัยต่อชีวิต และจำเป็นต้องมีการซ่อมแซมก่อนเข้าใช้งานอาคาร และประสิทธิภาพของโครงสร้างจะไม่เหมือนเดิม ความเสี่ยงโดยรวมที่มาจากความเสียหายของโครงสร้างอยู่ในระดับที่ต่ำ การออกแบบโครงสร้างให้มีความเสียหายระดับนี้จะต้องใช้ค่าแรงแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (Design earthquake)

2.4.4 Collapse prevention (CP)

โครงสร้างจะได้รับความเสียหายมาก แต่โครงสร้างจะไม่เกิดการวิบัติ ความเสียหายระดับนี้มีอันตรายต่อชีวิตเนื่องจากการพังทลายของชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง โดยโครงสร้างที่มีความเสียหายในระดับนี้ไม่เหมาะกับการซ่อมแซม การออกแบบโครงสร้างให้มีความเสียหายระดับนี้จะต้องใช้ค่าแรงแผ่นดินไหวสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นกับโครงสร้าง (Maximum considered earthquake)

ตารางที่ 2.13 ระดับและช่วงของประสิทธิภาพอาคารเป้าหมาย

| Non structural Performance Levels | Structural Performance Levels and Ranges | | | | | |
|-----------------------------------|--|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|
| | S-1 Immediate Occupancy | S-2 Damage Control Range | S-3 Life Safety | S-4 Limited Safety Range | S-5 Collapse Prevention | S-6 Not Considered |
| N-A Operational | Operational 1-A Immediate Occupancy 1-B | 2-A | Not Recommended | Not Recommended | Not Recommended | Not Recommended |
| N-B Immediate Occupancy | | 2-B | 3-B | Not Recommended | Not Recommended | Not Recommended |
| N-C Life Safety | 1-C | 2-C | Life Safety 3-C | 4-C | 5-C | 6-C |
| N-D Hazards Reduced | Not Recommended | 2-D | 3-D | 4-D | 5-D | 6-D |
| Not Considered | Not Recommended | Not Recommended | Not Recommended | 4-E | Collapse Prevention 5-E | Not Recommended |

(อ้างอิงจาก: FEMA 356 Code)

2.4.5 เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินระดับความเสียหายของโครงสร้าง

การประเมินความเสียหายของโครงสร้างในการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (Non-linear procedures) ตามมาตรฐานของ FEMA 356 ได้มีการกำหนดเกณฑ์เพื่อใช้ในการพิจารณา ระดับความเสียหายของโครงสร้างเมื่อรับแรงแผ่นดินไหว โดยพิจารณาจากมุมบิดพลาสติก (Plastic rotation) ที่เกิดในแต่ละชิ้นส่วนของโครงสร้างตามระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว โดยถ้ามุมบิดที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนของโครงสร้างมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดในมาตรฐาน แสดงว่าโครงสร้างนั้นไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานในระดับความเสียหาย คือ โครงสร้างอาจมีความเสียหายมากกว่าที่กำหนดในระดับความเสียหายนั้น ๆ เกณฑ์มาตรฐานของ FEMA 356 แสดงดังตารางที่ 2.14 – 2.16 ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่ใช้พิจารณาในส่วนของชิ้นส่วนโครงสร้างที่สำคัญ คือ คาน เสา และจุดต่อระหว่างคานและเสา

ตารางที่ 2.14 เกณฑ์การประเมินระดับความเสียหายสำหรับการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

| เงื่อนไข | | | มูมบิตพลาสติก, เรเดียน (3) | | |
|---|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|--------|--------|
| | | | ระดับประสิทธิภาพ | | |
| | | | IO | LS | CP |
| ก. คานถูกควบคุมด้วยแรงดัด (1) | | | | | |
| $\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$ | เหล็กเสริมทางขวาง (2) | $\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$ | | | |
| ≤ 0.0 | C | ≤ 3 | 0.010 | 0.020 | 0.025 |
| ≤ 0.0 | C | ≥ 6 | 0.005 | 0.010 | 0.020 |
| ≥ 0.5 | C | ≤ 3 | 0.005 | 0.010 | 0.020 |
| ≥ 0.5 | C | ≥ 6 | 0.005 | 0.005 | 0.015 |
| ≤ 0.0 | NC | ≤ 3 | 0.005 | 0.010 | 0.020 |
| ≤ 0.0 | NC | ≥ 6 | 0.0015 | 0.005 | 0.010 |
| ≥ 0.5 | NC | ≤ 3 | 0.005 | 0.010 | 0.010 |
| ≥ 0.5 | NC | ≥ 6 | 0.0015 | 0.005 | 0.005 |
| ข. คานถูกควบคุมด้วยแรงเฉือน (1) | | | | | |
| ระยะห่างของเหล็กปลอก $\leq d/2$ | | | 0.0015 | 0.0020 | 0.0030 |
| ระยะห่างของเหล็กปลอก $> d/2$ | | | 0.0015 | 0.0020 | 0.0030 |
| ค. คานถูกควบคุมโดยการต่อเชื่อมตามช่วงไม่เพียงพอ (1) | | | | | |
| ระยะห่างของเหล็กปลอก $\leq d/2$ | | | 0.0015 | 0.0020 | 0.0030 |
| ระยะห่างของเหล็กปลอก $> d/2$ | | | 0.0015 | 0.0020 | 0.0030 |
| ง. คานถูกควบคุมโดยการฝังไม่เพียงพอในข้อต่อคาน-เสา (1) | | | | | |
| | | | 0.01 | 0.01 | 0.015 |

(อ้างอิงจาก: FEMA 356 Code)

- เมื่อมีเงื่อนไข ก, ข, ค และ ง มากกว่าหนึ่งข้อสำหรับส่วนประกอบที่กำหนด ให้ใช้ค่าตัวเลขที่เหมาะสมขั้นต่ำจากตาราง
- “C” and “NC” เป็นตัวย่อสำหรับการเสริมแรงตามขวางที่สอดคล้องและไม่สอดคล้องกัน ส่วนประกอบเป็นไปตามข้อกำหนด หากภายในบริเวณจุดหมุนพลาสติก มีระยะห่างของเหล็กปลอกที่ $\leq d/3$ และหากสำหรับส่วนประกอบที่มีความต้องการความเหนียวปานกลางและสูง ความแข็งแรงของท่อน V_s คือ อย่างน้อยสามในสี่ของแรงเฉือน มิฉะนั้น จะถือว่าไม่เป็นไปตามข้อกำหนด
- การแก้ไขเชิงเส้นระหว่างค่าที่แสดงในตารางจะได้รับอนุญาต

ตารางที่ 2.15 เกณฑ์การประเมินระดับความเสียหายสำหรับการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นของเสา
คอนกรีตเสริมเหล็ก

| เงื่อนไข | | | มุ่มบิตพลาสติก, เรเดียน (3) | | |
|---|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------|-------|
| | | | ระดับประสิทธิภาพ | | |
| | | | IO | LS | IO |
| ก. คานถูกควบคุมด้วยแรงดัด (1) | | | | | |
| $\frac{P}{A_g f'_c}$ | เหล็กเสริมทาง ขวาง (2) | $\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$ | | | |
| ≤ 0.1 | C | ≤ 3 | 0.005 | 0.015 | 0.020 |
| ≤ 0.1 | C | ≥ 6 | 0.005 | 0.012 | 0.016 |
| ≥ 0.4 | C | ≤ 3 | 0.003 | 0.012 | 0.015 |
| ≥ 0.4 | C | ≥ 6 | 0.003 | 0.010 | 0.012 |
| ≤ 0.1 | NC | ≤ 3 | 0.005 | 0.005 | 0.006 |
| ≤ 0.1 | NC | ≥ 6 | 0.005 | 0.004 | 0.005 |
| ≥ 0.4 | NC | ≤ 3 | 0.002 | 0.002 | 0.003 |
| ≥ 0.4 | NC | ≥ 6 | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| ข. คานถูกควบคุมด้วยแรงเฉือน (1,3) | | | | | |
| ทุกกรณี | | | - | - | - |
| ค. คานถูกควบคุมโดยการต่อเชื่อมตามช่วงไม่เพียงพอตตามแนวสูง (1,3) | | | | | |
| ระยะห่างของท่อน $\leq d/2$ | | | 0.005 | 0.005 | 0.010 |
| ระยะห่างของท่อน $> d/2$ | | | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| ง. เสาที่มีแรงกระทำตามแนวแกนเกิน $0.70P_o$ (1,3) | | | | | |
| ท่อนสอดประสานกันตลอดความยาว | | | 0.0 | 0.005 | 0.01 |
| กรณีอื่นๆ ทั้งหมด | | | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

(อ้างอิงจาก: FEMA 356 Code)

- เมื่อมีเงื่อนไข ก, ข, ค และ ง มากกว่าหนึ่งข้อสำหรับส่วนประกอบที่กำหนด ให้ใช้ค่าตัวเลขที่เหมาะสมขั้นต่ำจากตาราง
- "C" and "NC" เป็นตัวย่อสำหรับการเสริมแรงตามขวางที่สอดคล้องและไม่สอดคล้องกัน ส่วนประกอบเป็นไปตามข้อกำหนด หากภายในบริเวณจุดหมุนพลาสติก ถ้าท่อนมีระยะห่างที่ $\leq d/3$ และหากสำหรับส่วนประกอบที่มีความต้องการความเหนียวปานกลางและสูง ความแข็งแรงของท่อน V_s คือ อย่างน้อยสามในสี่ของแรงเฉือน มิฉะนั้น จะถือว่าไม่เป็นไปตามข้อกำหนด
- เพื่อให้มีคุณสมบัติ เสาจะต้องมีการเสริมแรงตามขวางซึ่งประกอบด้วยท่อน มิฉะนั้น การกระทำจะถือเป็นการควบคุมบังคับ

ตารางที่ 2.16 เกณฑ์การประเมินระดับความเสียหายสำหรับการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นของจุดต่อคาน-เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

| เงื่อนไข | | | มูมบิตพลาสติก, เรเดียน | | |
|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------------|-------|-----|
| | | | ระดับประสิทธิภาพ | | |
| | | | IO | LS | CP |
| ก. ข้อต่อภายใน (2,3) | | | | | |
| $\frac{P}{A_g f'_c}$ | เหล็กเสริมทางขวาง (2) | $\left(\frac{V}{V_n}\right)^3$ | | | |
| ≤ 0.1 | C | ≤ 1.2 | 0.015 | 0.03 | 0.2 |
| ≤ 0.1 | C | ≥ 1.5 | 0.015 | 0.03 | 0.2 |
| ≥ 0.4 | C | ≤ 1.2 | 0.015 | 0.025 | 0.2 |
| ≥ 0.4 | C | ≥ 1.5 | 0.015 | 0.02 | 0.2 |
| ≤ 0.1 | NC | ≤ 1.2 | 0.005 | 0.02 | 0.2 |
| ≤ 0.1 | NC | ≥ 1.5 | 0.005 | 0.015 | 0.2 |
| ≥ 0.4 | NC | ≤ 1.2 | 0.005 | 0.015 | 0.2 |
| ≥ 0.4 | NC | ≥ 1.5 | 0.005 | 0.015 | 0.2 |
| ข. ข้อต่ออื่น ๆ (2,3) | | | | | |
| $\frac{P}{A_g f'_c}$ | เหล็กเสริมทางขวาง (1) | $\frac{V}{V_n}$ | | | |
| ≤ 0.1 | C | ≤ 1.2 | 0.01 | 0.02 | 0.2 |
| ≤ 0.1 | C | ≥ 1.5 | 0.01 | 0.015 | 0.2 |
| ≥ 0.4 | C | ≤ 1.2 | 0.01 | 0.02 | 0.2 |
| ≥ 0.4 | C | ≥ 1.5 | 0.01 | 0.015 | 0.2 |
| ≤ 0.1 | NC | ≤ 1.2 | 0.005 | 0.01 | 0.2 |
| ≤ 0.1 | NC | ≥ 1.5 | 0.005 | 0.01 | 0.2 |
| ≥ 0.4 | NC | ≤ 1.2 | 0.0 | 0.0 | - |
| ≥ 0.4 | NC | ≥ 1.5 | 0.0 | 0.0 | - |

(อ้างอิงจาก: FEMA 356 Code)

1. "C" and "NC" เป็นตัวย่อสำหรับการเสริมแรงตามขวางที่สอดคล้องและไม่สอดคล้องกัน ส่วนประกอบจะเข้ากันได้ ถ้าห่างมีระยะห่างที่ $\leq h_c/3$ ภายในข้อต่อ มิฉะนั้น จะถือว่าส่วนประกอบไม่เป็นไปตามข้อกำหนด
2. P คือ แรงตามแนวแกนการออกแบบบนเสาเหนือรอยต่อ และ A_g คือพื้นที่หน้าตัดรวมของรอยต่อ
3. V คือแรงเฉือนการออกแบบ และ V_n คือ แรงเฉือนของข้อต่อ

บทที่ 3

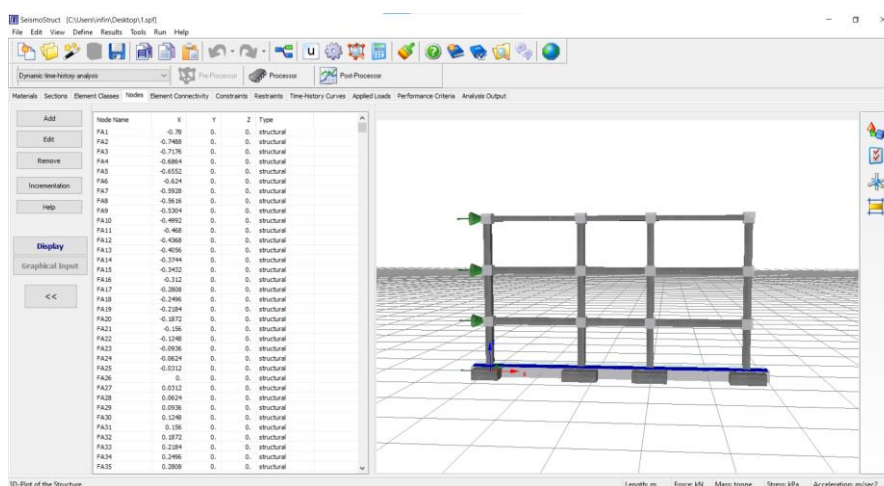
วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ศึกษาทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และมาตรฐานต่าง ๆ

ศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากชนิดเขตที่มีการโยกตัวภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว ศึกษาหลักการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของฐานรากชนิดเขตและพฤติกรรมของดิน วิเคราะห์แบบจำลองเพื่อนำไปออกแบบอาคารรับแรงแผ่นดินไหวให้ได้ตามมาตรฐานที่ใช้ในการประเมินโครงสร้าง

3.2 ศึกษาการใช้โปรแกรม SeismoStruct

ศึกษาวิธีการใช้งานและการป้อนข้อมูลลงในโปรแกรม SeismoStruct เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างฐานรากชนิดเขตที่มีการโยกตัว ศึกษาการวิเคราะห์โดยวิธีพลศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear Pushover Analysis) เพื่อนำไปเปรียบเทียบผลตอบสนองของโครงสร้าง รวมไปถึงการประเมินความเสียหายตามมาตรฐาน โดยโปรแกรมสามารถป้อนข้อมูลของโครงสร้างได้ทั้งในรูปแบบสองมิติและสามมิติ งานวิจัยนี้ใช้รูปแบบโครงสร้างแบบสามมิติ ลักษณะของแบบจำลองและส่วนต่อประสานผู้ใช้ (User interface) ของโปรแกรม



รูปที่ 3.1 ลักษณะภาพรวมโครงสร้างที่แสดงในโปรแกรม

3.3 สร้างแบบจำลองในโปรแกรม SeismoStruct

3.3.1 แบบจำลองโครงสร้างอาคารสูง 3, 5 และ 7 ชั้น

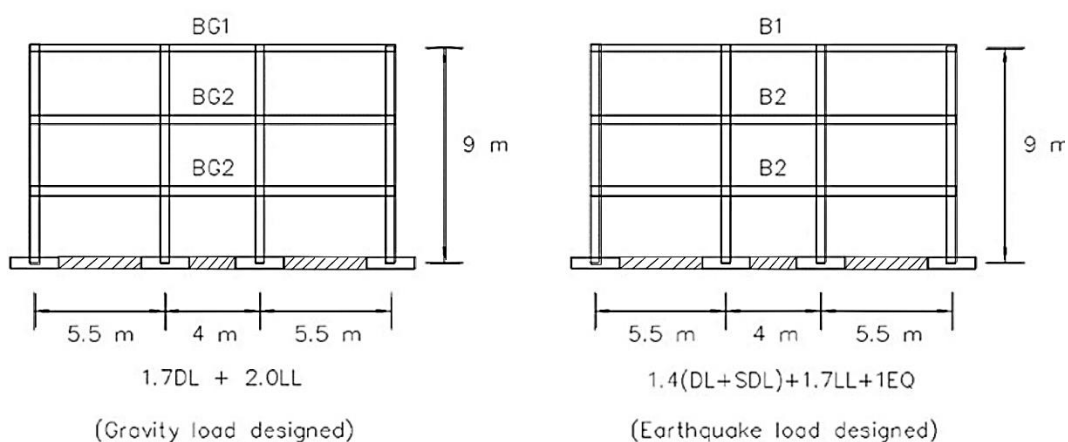
ศึกษาโครงสร้างอาคารที่ตั้งอยู่บนฐานรากชนิดเขต จึงได้ทำการออกแบบแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่เป็นลักษณะโครงข้อแข็ง ใน 2 มิติ แบบจำลองจะมีแค่ชั้นส่วนที่สำคัญ คือ คาน เสา และฐานราก โดยแบบจำลองโครงสร้างอาคาร 3, 5 และ 7 ชั้น แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ อาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวและอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวตามหลักการออกแบบของกฎกระทรวงและกรมโยธาธิการและผังเมือง ออกแบบโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากชนิดเขตที่มีการโยกตัว

สำหรับรายละเอียดของกำลังวัสดุที่ใช้ในการออกแบบอาคารทั้ง 2 ประเภท แสดงดังตารางที่ 3.1 รายละเอียดของอาคารแสดงดังรูปที่ 3.2 - 3.4 รายละเอียดของหน้าตัดและเหล็กเสริมต่าง ๆ ของคานที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.5 - 3.10 รายละเอียดของเสาที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.11 รายละเอียดของฐานรากชนิดเขตที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.12 - 3.13

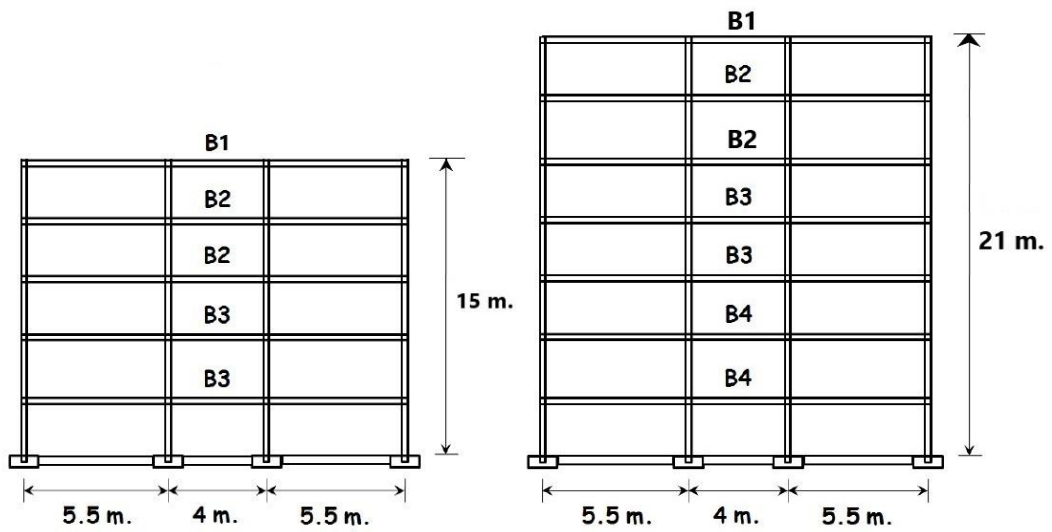
ตารางที่ 3.1 กำลังของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้าง

| อาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว | | อาคารออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว | |
|--------------------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|
| วัสดุ | ค่ากำลังที่ใช้ | วัสดุ | ค่ากำลังที่ใช้ |
| คอนกรีต | 200 ksc | คอนกรีต | 240 ksc |
| เหล็กเสริม | 3000 ksc | เหล็กเสริม | 3000 ksc |

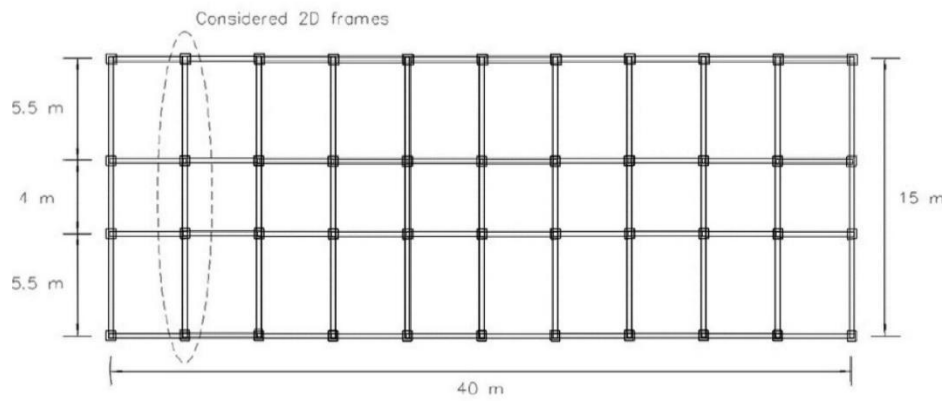
Detail of beams on 3 stories structures



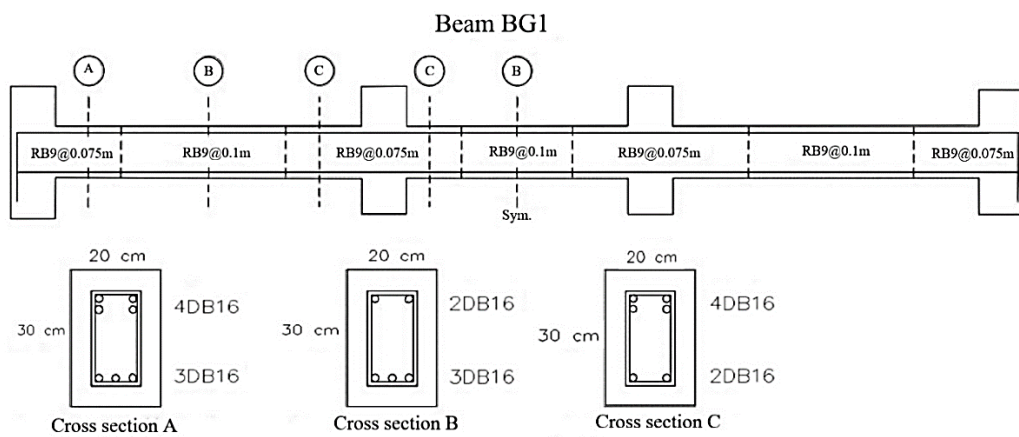
รูปที่ 3.2 ลักษณะของแบบจำลองโครงสร้างอาคาร 3 ชั้น



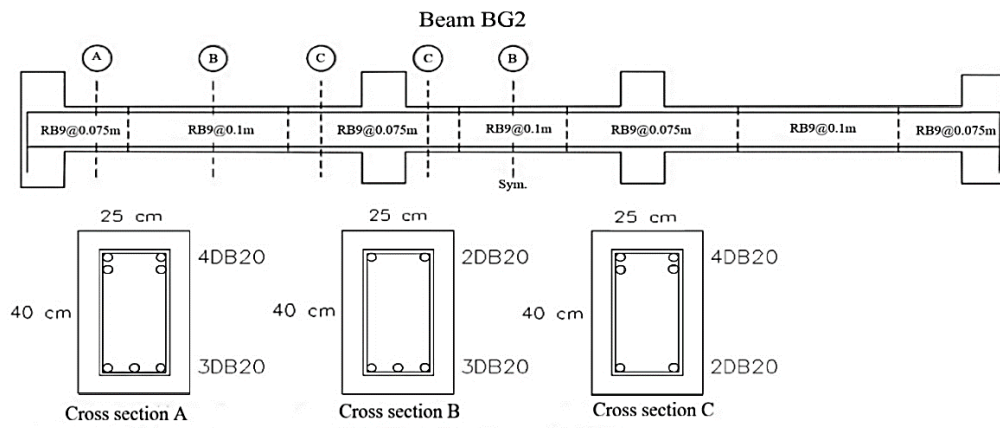
รูปที่ 3.3 ลักษณะของแบบจำลองโครงสร้างอาคาร 5 และ 7 ชั้น



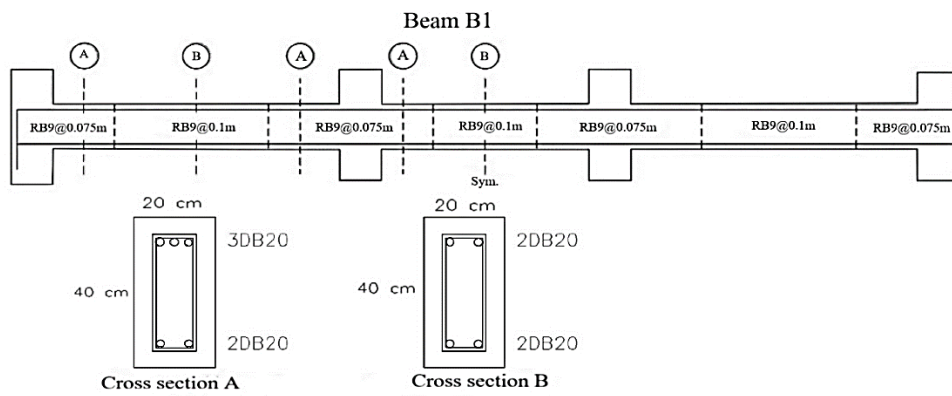
รูปที่ 3.4 รายละเอียดและตำแหน่งของคานและเสา



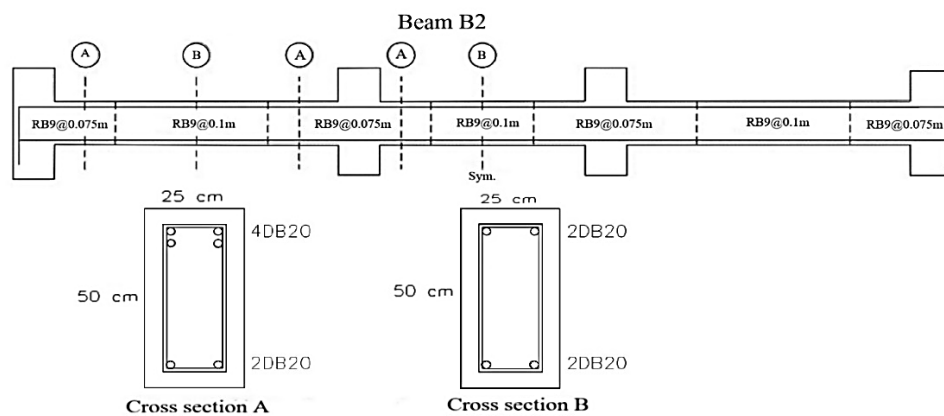
รูปที่ 3.5 รายละเอียดของคาน BG1



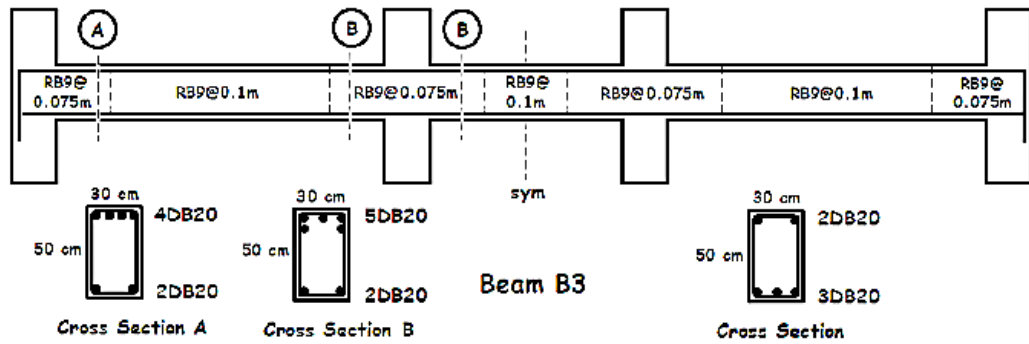
รูปที่ 3.6 รายละเอียดของคาน BG2



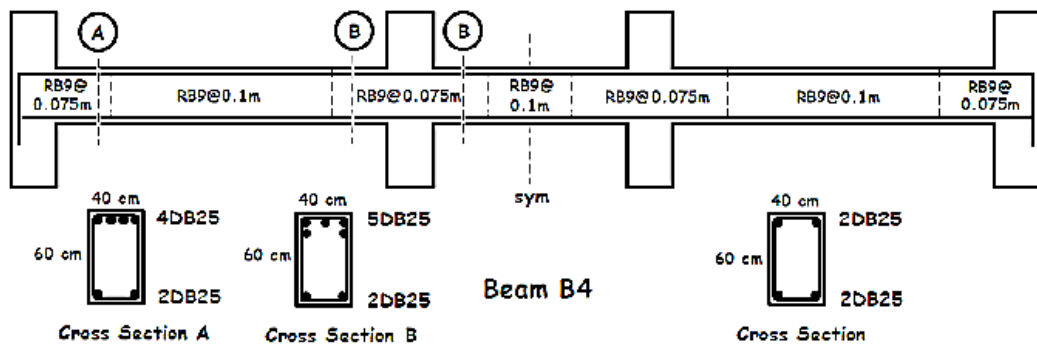
รูปที่ 3.7 รายละเอียดของคาน B1



รูปที่ 3.8 รายละเอียดของคาน B2



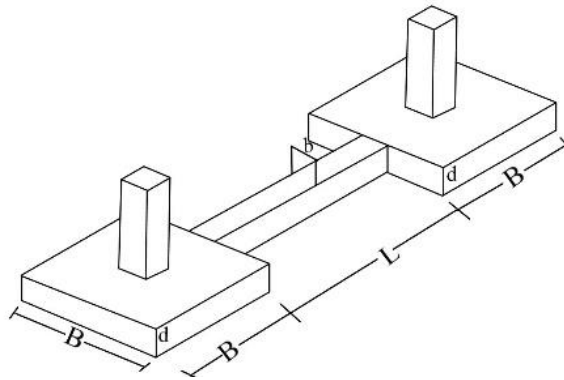
รูปที่ 3.9 รายละเอียดของคาน B3



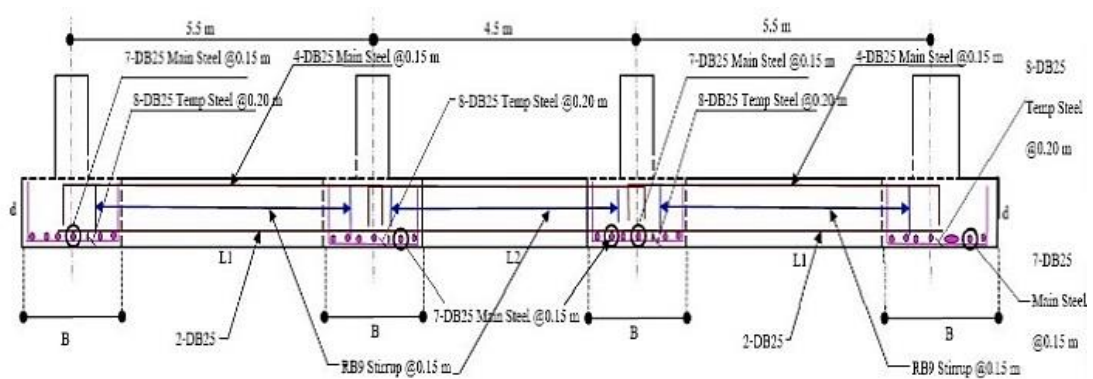
รูปที่ 3.10 รายละเอียดของคาน B4

| Table of Column Detail | | | |
|------------------------|---------|---------|---------|
| | 3 Floor | 5 Floor | 7 Floor |
| 7 ↑ 5 | | | |
| 5 ↑ 3 | | | |
| 3 ↑ 1 | | | |

รูปที่ 3.11 รายละเอียดของเสา



รูปที่ 3.12 รายละเอียดของฐานรากชนิดเขต

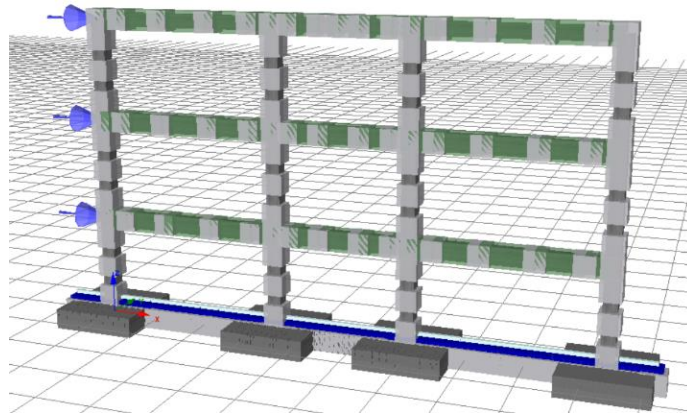


รูปที่ 3.13 รายละเอียดเหล็กเสริมของฐานรากชนิดเขต

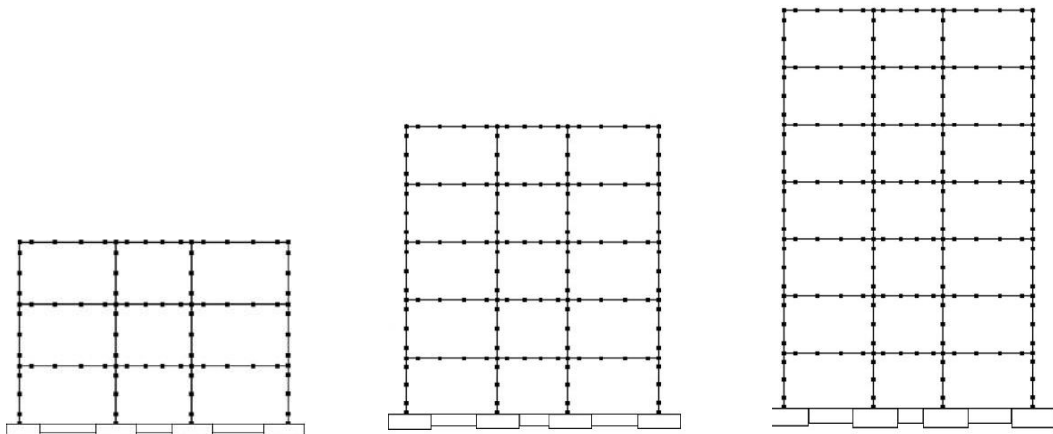
ตารางที่ 3.2 ขนาดของฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินที่แตกต่างกัน

| กรณี | ดิน | ขนาดของฐานราก | | ขนาดของคานสายรัด | | |
|--------------------|------------|---------------|-------|------------------|--------------------|--------------------|
| | | B (m) | d (m) | b (m) | L ₁ (m) | L ₂ (m) |
| ไม่ได้ออกแบบรับแรง | ทราย | 2.40 | 0.60 | 0.60 | 3.10 | 1.60 |
| | เหนียวอ่อน | 2.70 | 0.60 | 0.60 | 2.80 | 1.30 |
| แผ่นดินไหว | เหนียวแข็ง | 1.70 | 0.60 | 0.60 | 3.80 | 2.30 |
| | ทราย | 2.50 | 0.60 | 0.60 | 3.00 | 1.50 |
| ไม่ได้ออกแบบรับแรง | เหนียวอ่อน | 2.85 | 0.60 | 0.60 | 2.65 | 1.15 |
| | เหนียวแข็ง | 1.75 | 0.60 | 0.60 | 3.75 | 2.25 |

ลักษณะแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.14 ในบทงานวิจัยนี้ได้ทำการแบ่งชั้นส่วนของคานและเสาออกเป็นชั้นส่วนย่อย ๆ ตามระยะหยุดเหล็กและระยะห่างของเหล็กปลอก แสดงดังรูปที่ 3.15 เพื่อใช้ในการป้อนค่าของวัสดุที่ใช้และหน้าตัดของชั้นส่วนที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ใช้ในแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ



รูปที่ 3.14 ลักษณะของแบบจำลองโครงสร้างอาคาร



รูปที่ 3.15 การแบ่งชั้นส่วนและจุดต่อของแบบจำลองในโปรแกรม

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ของคอนกรีตที่ใช้ในแบบจำลองโครงสร้างอาคาร

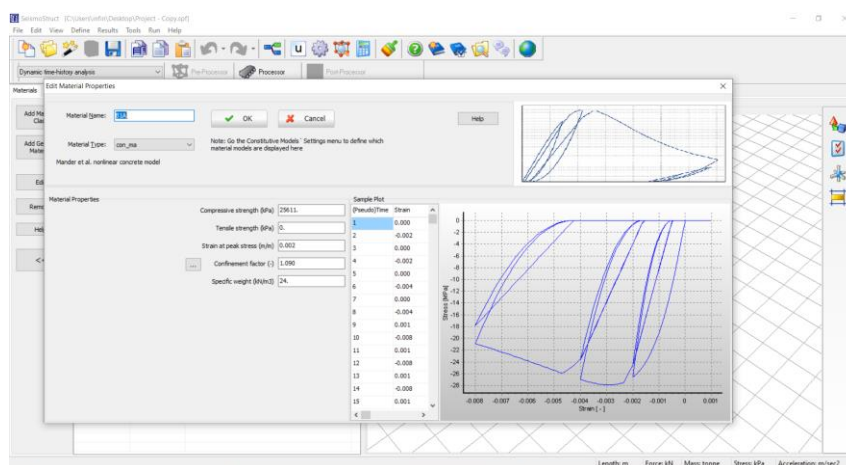
| Mander et al. nonlinear concrete model | | | | |
|--|----------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Concrete | Compressive strength (kPa) | Tensile strength (kPa) | Strain at peak stress (m/m) | Confinement factor (-) |
| Cover1 | 19620 | 0 | 0.002 | 1.000 |
| BG1A | 25363 | 0 | 0.002 | 1.293 |
| BG1B | 22624 | 0 | 0.002 | 1.153 |
| BG1C | 25049 | 0 | 0.002 | 1.277 |
| BG2A | 23989 | 0 | 0.002 | 1.223 |
| BG2B | 22212 | 0 | 0.002 | 1.132 |
| BG2C | 23717 | 0 | 0.002 | 1.209 |
| Cover2 | 23544 | 0 | 0.002 | 1.000 |
| B1A | 25661 | 0 | 0.002 | 1.090 |
| B1B | 24648 | 0 | 0.002 | 1.047 |
| B2A | 25533 | 0 | 0.002 | 1.085 |
| B2B | 24665 | 0 | 0.002 | 1.048 |
| B3A | 23112 | 0 | 0.002 | 1.136 |
| B3B | 23375 | 0 | 0.002 | 1.140 |
| B4A | 23754 | 0 | 0.002 | 1.162 |
| B4B | 24102 | 0 | 0.002 | 1.186 |
| Column1 | 23307 | 0 | 0.002 | 1.188 |
| Column2 | 29573 | 0 | 0.002 | 1.158 |
| Column3 | 30593 | 0 | 0.002 | 1.227 |
| Column4 | 25317 | 0 | 0.002 | 1.237 |
| Column5 | 31016 | 0 | 0.002 | 1.241 |
| Strapbeam1 | 19635 | 0 | 0.002 | 1.281 |
| Strapbeam2 | 18728 | 0 | 0.002 | 1.226 |
| Strapbeam3 | 18236 | 0 | 0.002 | 1.198 |

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ของเหล็กที่ใช้ในแบบจำลองโครงสร้างอาคาร

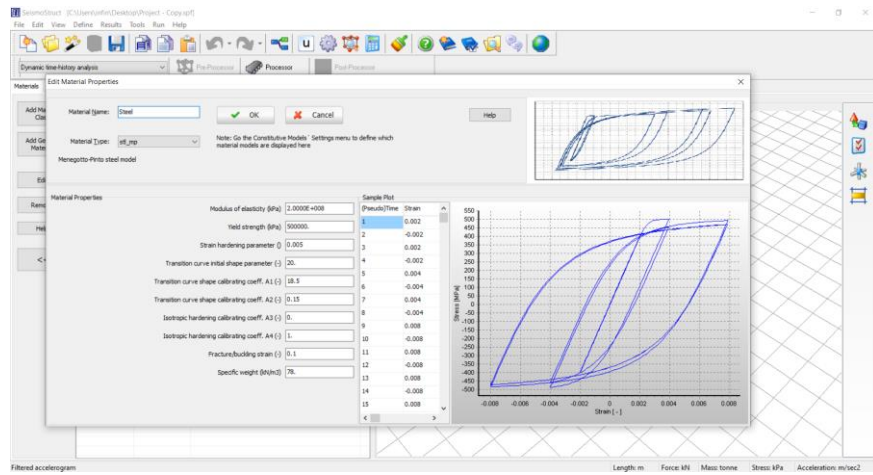
| Menegotto-Pinto Steel Model | | | |
|---|---------|---|--------|
| Modulus of elastic (kPa) | 2.00E+8 | Yield strength (kPa) | 300000 |
| Strain hardening parameter | 0.2 | Transition curve initial | 20 |
| Fracture/buckling strain | 0.06 | shape parameter | |
| Transition curve shape calibrating coeff.A1 | 18.5 | Transition curve shape calibrating coeff.A3 | 0.025 |
| Transition curve shape calibrating coeff.A2 | 0.15 | Transition curve shape calibrating coeff.A4 | 2 |

3.3.2 ศึกษาวิธีใช้โปรแกรม SeismoStruct

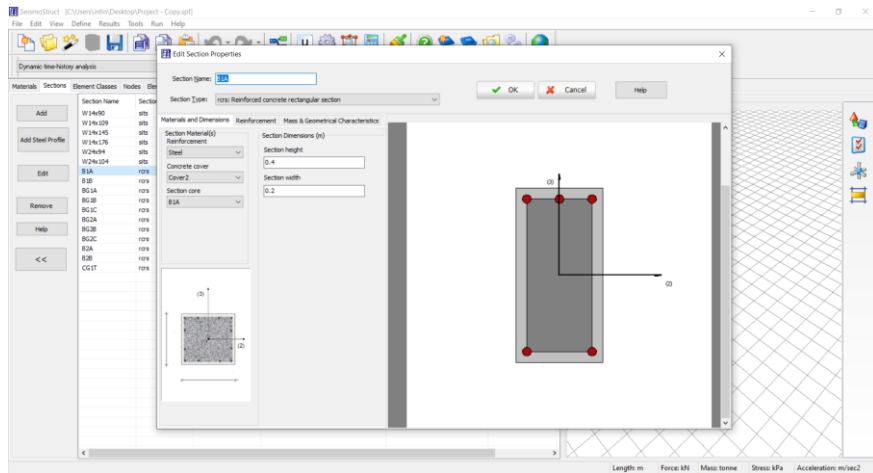
โปรแกรม SeismoStruct สามารถกำหนดและป้อนข้อมูลรายละเอียดของหน้าตัดของโครงสร้างได้ สามารถกำหนดจำนวนชั้นส่วนของหน้าตัดย่อย ๆ ตามหลักการของ Fiber-Section Model ได้ กำหนดแบบจำลองพฤติกรรมของวัสดุที่ใช้ คือ แบบจำลองพฤติกรรมของคอนกรีตและเหล็กเสริม ดังแสดงในรูปที่ 3.16 – 3.17 ลักษณะการป้อนข้อมูลรายละเอียดของหน้าตัดโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 3.18 และลักษณะการป้อนข้อมูลกำหนดประเภทของชั้นส่วนแต่ละชั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.19



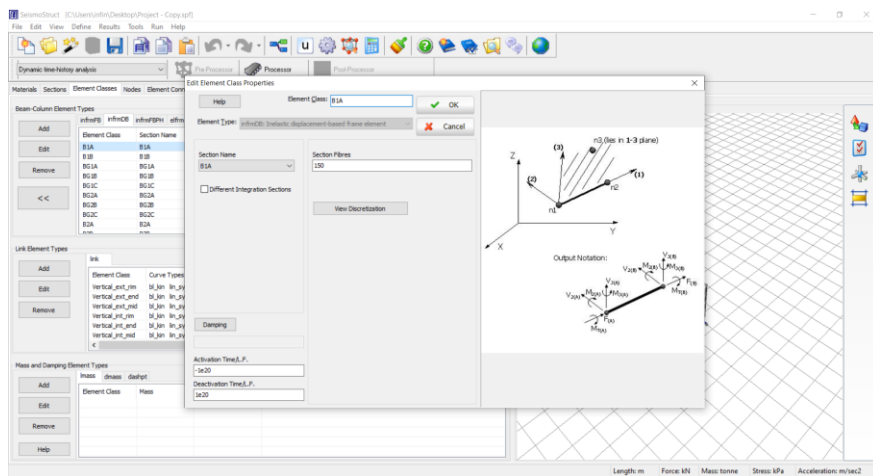
รูปที่ 3.16 การป้อนข้อมูลแบบจำลองคอนกรีตในโปรแกรม SeismoStruct



รูปที่ 3.17 การป้อนข้อมูลแบบจำลองเหล็กเสริมในโปรแกรม SeismoStruct



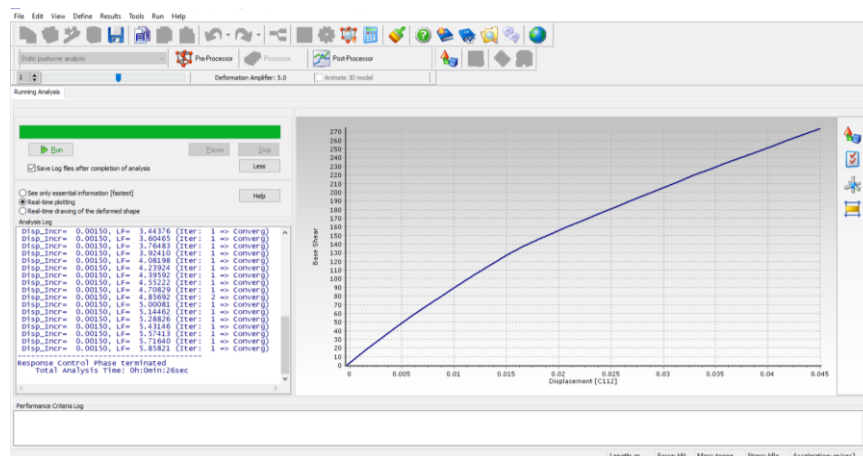
รูปที่ 3.18 การป้อนข้อมูลหน้าตัดชิ้นส่วนโครงสร้างในโปรแกรม SeismoStruct



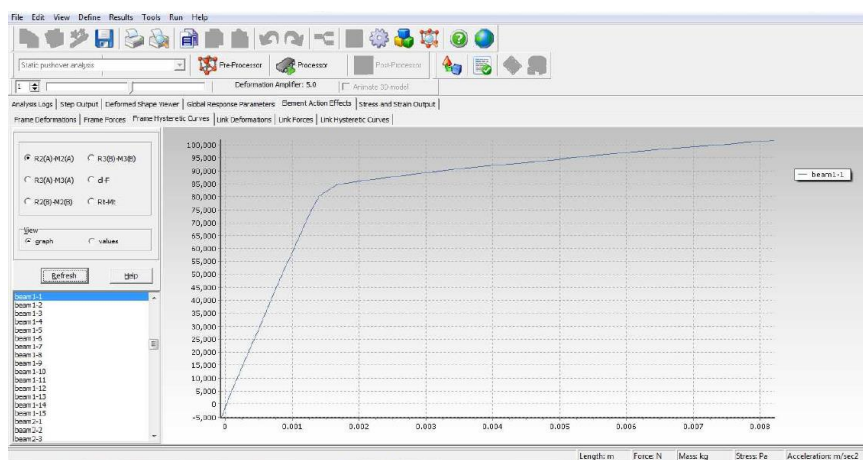
รูปที่ 3.19 การกำหนดประเภทของแต่ละชิ้นส่วนในโปรแกรม SeismoStruct

3.4 วิเคราะห์ผ่านโปรแกรม SeismoStruct

ทำการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างผ่านโปรแกรม SeismoStruct โดยวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีประวัติเชิงพลศาสตร์ โปรแกรมจะหยุดวิเคราะห์เมื่อถึงจุดสิ้นสุดของข้อมูลประวัติความเร่งของพื้นดินของแผ่นดินไหวที่ใช้หรือครบระยะเวลาที่กำหนด ส่วนการวิเคราะห์ด้วยวิธีการผลกทางด้านข้าง โปรแกรมจะหยุดวิเคราะห์เมื่อค่าการเคลื่อนตัวที่จุดบนสุดของโครงสร้างมีค่าเท่ากับค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างที่ต้องการ และกำหนดให้มีการแจ้งเตือนเมื่อค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนที่มีค่าเกินกว่าที่กำหนดไว้ โปรแกรมนี้สามารถกำหนดได้ว่าจะให้แสดงผลการวิเคราะห์ทั้งโครงสร้างหรือแสดงผลการวิเคราะห์เฉพาะบางชิ้นส่วน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมมีรายละเอียดที่ครบถ้วน ทั้งในส่วนของแรงกระทำและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วน ค่ามุมบิดของชิ้นส่วน ค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างในแนวแกนต่าง ๆ โดยลักษณะของการวิเคราะห์ที่ใช้โปรแกรมและตัวอย่างผลของการวิเคราะห์ที่ใช้โปรแกรมแสดงดังรูปที่ 3.20 – 3.21



รูปที่ 3.20 แสดงการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้โปรแกรม



รูปที่ 3.21 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้โปรแกรม

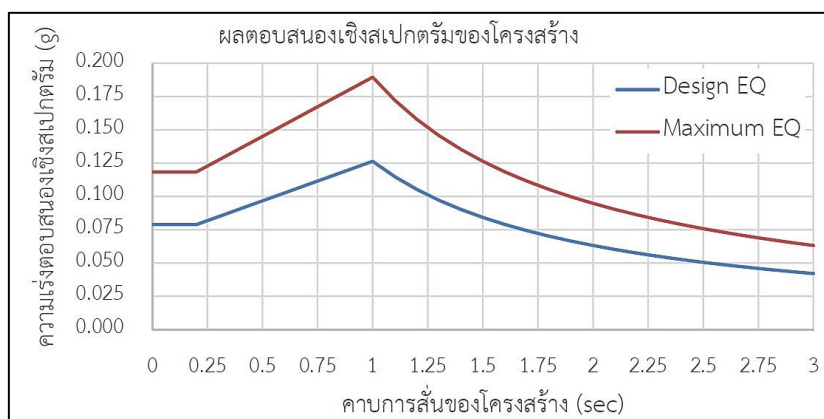
บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวโดยไม่คิดผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก (ฐานรากแบบยึดแน่น) ด้วยวิธีการผลักทางด้านข้าง

4.1.1 กราฟความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโครงสร้าง

ความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโครงสร้างที่ใช้ในการออกแบบอาคารและคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้าง เป็นค่าในพื้นที่ของอำเภอเมืองเชียงราย จังหวัดเชียงราย เสนอโดยกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.1302-62) โดยค่าความเร่งตอบสนองที่คาบการสั่น 0.2 วินาที (S_0) มีค่าเท่ากับ 0.798g และที่คาบการสั่น 1 วินาที (S_1) มีค่าเท่ากับ 0.232g ชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างคือชั้นดินประเภท D (ดินปกติ) จาก มยพ.1302-62 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของชั้นดิน F_a และ F_b เท่ากับ 1.6 และ 2.4 ตามลำดับ ดังนั้นสามารถคำนวณค่าความเร่งตอบสนองและสร้างกราฟความเร่งตอบสนองของโครงสร้างได้ดังแสดงรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโครงสร้าง

ผลตอบสนองที่ใช้สำหรับแบบจำลองโครงสร้างอาคารนี้มี 2 กรณี คือ ผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (Design Earthquake) และผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสูงสุดที่พิจารณา (Maximum Considered Earthquake)

4.1.2 ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้าง

ค่าคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้างและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่คิดผลของฐานราก คือ ฐานรากแบบยึดแน่น ทั้งในกรณีผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (DEQ) และกรณีผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสูงสุดที่พิจารณา (MCEQ) แสดงดังตารางที่ 4.1 โดยค่าคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้างเป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม SeismoStruct ส่วนการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างคำนวณตามมาตรฐานของ FEMA356

ตารางที่ 4.1 ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากแบบยึดแน่น

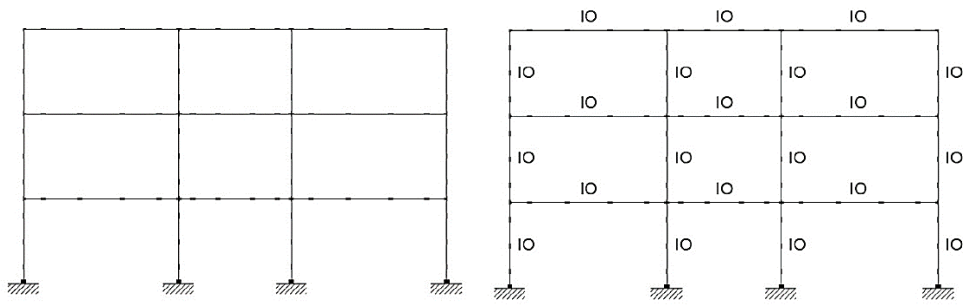
| จำนวนชั้นของ โครงสร้าง | กรณีของแผ่นดินไหว | ค่าคาบการสั่น (sec) | ค่าการเคลื่อนตัว เป้าหมาย (m) |
|---------------------------|-------------------|------------------------|----------------------------------|
| 3 ชั้น | DEQ | 0.287 | 0.033 |
| | MCEQ | 0.287 | 0.080 |
| 5 ชั้น | DEQ | 0.486 | 0.132 |
| | MCEQ | 0.486 | 0.190 |
| 7 ชั้น | DEQ | 0.658 | 0.213 |
| | MCEQ | 0.658 | 0.308 |

4.1.3 การประเมินและระดับความเสียหายของโครงสร้าง

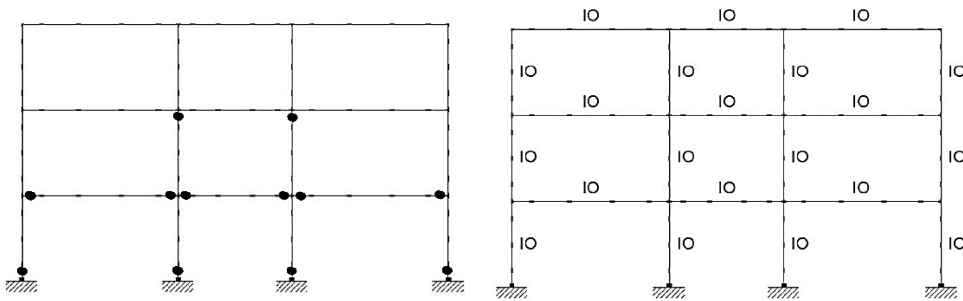
จากการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กผ่านโปรแกรม SeismoStruct โดยใช้วิธีผลึกทางด้านข้าง จะได้ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้าง แสดงดังตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาระดับความเสียหายของโครงสร้างตามมาตรฐานของ FEMA356 พบว่า กรณีผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (DEQ) กรณีโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้น และ 5 ชั้น สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานระดับ Immediate Occupancy (IO) แต่ในกรณีของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก 7 ชั้น มีบางชั้นส่วนของโครงสร้างไม่ผ่านเกณฑ์ Immediate Occupancy (IO) แต่ผ่านเกณฑ์ในระดับ Life Safety (LS) ส่วนกรณีผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสูงสุดที่พิจารณา (MCEQ) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3, 5 และ 7 ชั้น ผ่านเกณฑ์ในระดับ Life Safety (LS) ตามมาตรฐาน FEMA356 โดยจุดที่เกิดมุมบิดพลาสติกในโครงสร้างและระดับความเสียหายของโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.2 – 4.7

ตารางที่ 4.2 ค่ามูมบิตพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากแบบยึดแน่น

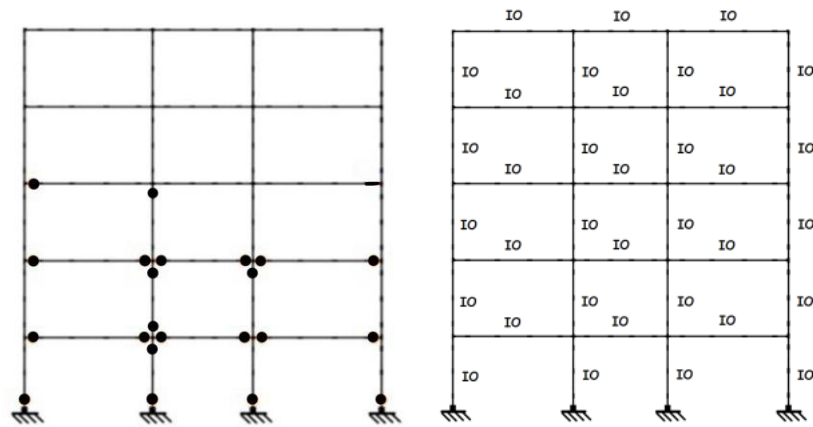
| ประเภท ของฐานราก | กรณีของ แผ่นดินไหว | ค่ามูมบิต พลาสติกที่ เกิดขึ้น (rad) ของคาน | ค่ามูมบิต พลาสติกที่ เกิดขึ้น (rad) ของเสา | ค่ามาตรฐานของ FEMA356 | |
|---------------------|-----------------------|---|---|--------------------------|------------------------|
| | | | | IO | LS |
| 3 ชั้น | DEQ | - | - | คาน 0.010 เสา 0.010 | คาน 0.020 เสา 0.015 |
| | MCEQ | 0.00046 ถึง 0.0012 | 0.00012 ถึง 0.0045 | คาน 0.015 เสา 0.012 | คาน 0.020 เสา 0.015 |
| 5 ชั้น | DEQ | 0.00062 ถึง 0.0128 | 0.00015 ถึง 0.0068 | คาน 0.010 เสา 0.010 | คาน 0.020 เสา 0.015 |
| | MCEQ | 0.00086 ถึง 0.0156 | 0.00023 ถึง 0.0082 | คาน 0.015 เสา 0.012 | คาน 0.020 เสา 0.015 |
| 7 ชั้น | DEQ | 0.00164 ถึง 0.0184 | 0.00056 ถึง 0.0128 | คาน 0.010 เสา 0.010 | คาน 0.020 เสา 0.015 |
| | MCEQ | 0.00182 ถึง 0.0195 | 0.00082 ถึง 0.0142 | คาน 0.015 เสา 0.012 | คาน 0.020 เสา 0.015 |



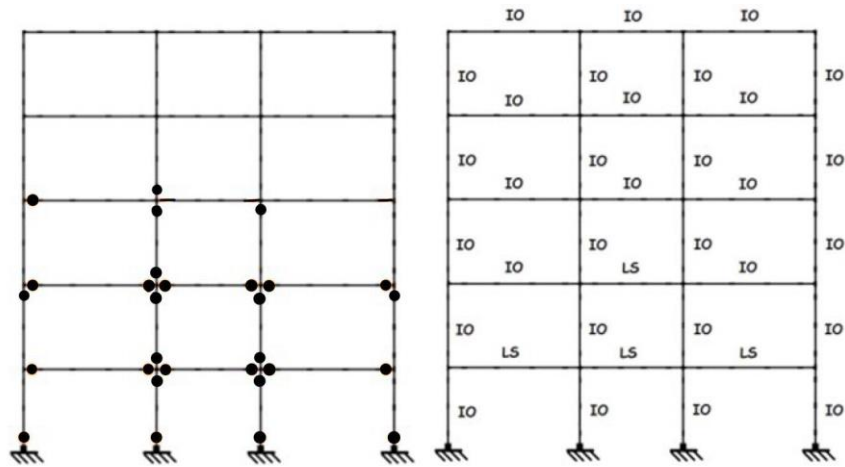
รูปที่ 4.2 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ฐานรากแบบยึดแน่น (DEQ)



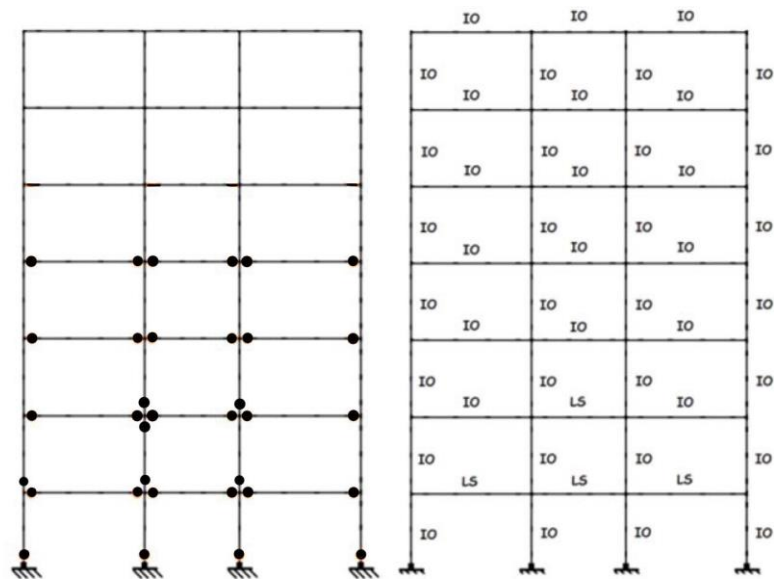
รูปที่ 4.3 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ฐานรากแบบยึดแน่น (MCEQ)



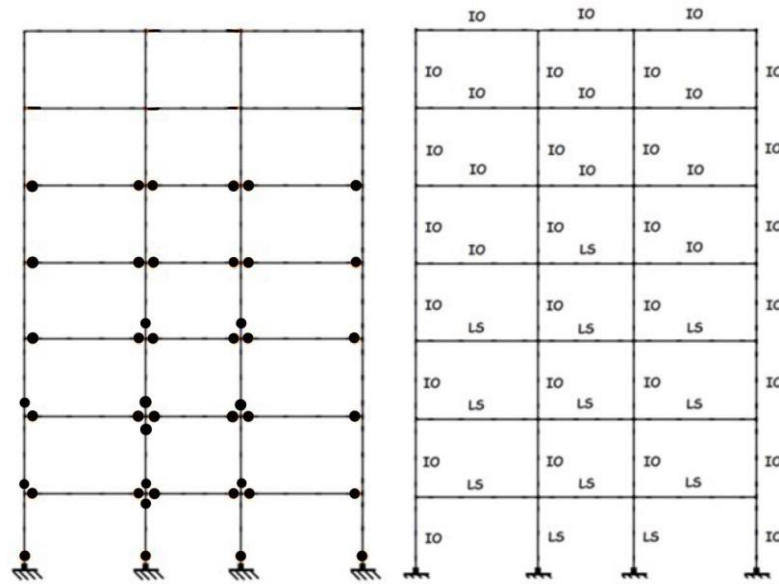
รูปที่ 4.4 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 5 ชั้น ฐานรากแบบยึดแน่น (DEQ)



รูปที่ 4.5 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 5 ชั้น ฐานรากแบบยึดแน่น (MCEQ)



รูปที่ 4.6 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 7 ชั้น ฐานรากแบบยึดแน่น (DEQ)



รูปที่ 4.7 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 7 ชั้น ฐานรากแบบยึดแน่น (MCEQ)

4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูงโดยคิดผลของการปฏิสัมพันธ์ ระหว่างดินกับฐานราก (ฐานรากชนิดเขต) ด้วยวิธีการผลกทางด้านข้าง

4.2.1 ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้าง

ค่าคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้างและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่คิดผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก คือ ฐานรากชนิดเขตซึ่งตั้งอยู่บนดิน 3 ประเภท คือ ดินทราย ดินเหนียวอ่อน และดินเหนียวแข็ง ทั้งในกรณีผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (DEQ) และกรณีผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสูงสุดที่พิจารณา (MCEQ) แสดงดังตารางที่ 4.3 - 4.4 โดยค่าคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้างเป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม SeismoStruct ส่วนการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างคำนวณตามมาตรฐานของ FEMA356

ตารางที่ 4.3 ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขต กรณี DEQ

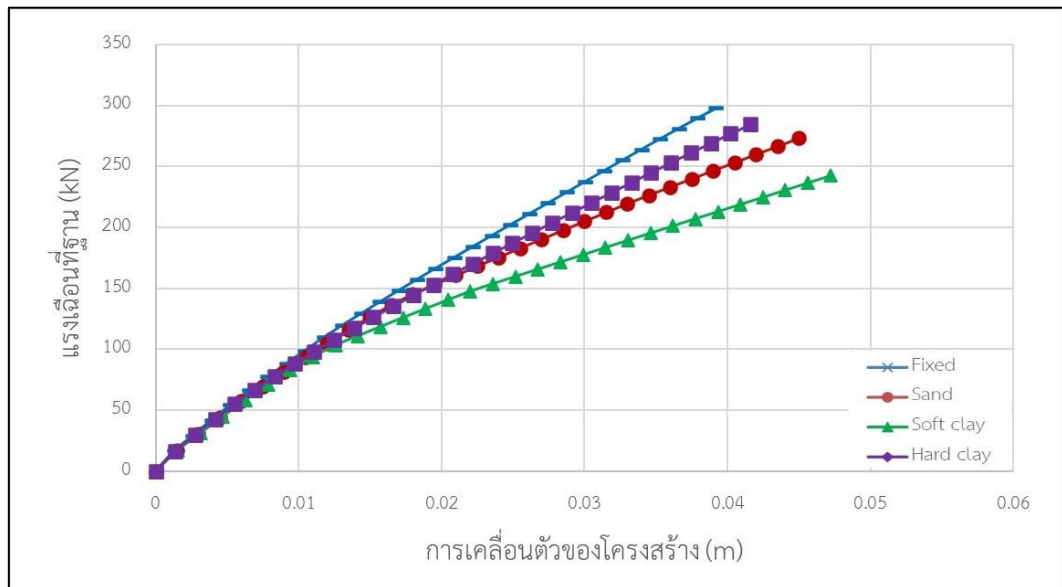
| จำนวนชั้น ของ โครงสร้าง | ค่าคาบการสั่น Fixed Base | ประเภทของฐานราก | ค่าคาบ การสั่น (sec) | ค่าการเคลื่อน ตัวเป้าหมาย (m) |
|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| 3 ชั้น | 0.287 | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย | 0.315 | 0.039 |
| | | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน | 0.325 | 0.041 |
| | | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง | 0.302 | 0.038 |
| 5 ชั้น | 0.486 | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย | 0.550 | 0.159 |
| | | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน | 0.644 | 0.179 |
| | | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง | 0.517 | 0.140 |
| 7 ชั้น | 0.658 | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย | 0.725 | 0.259 |
| | | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน | 0.826 | 0.349 |
| | | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง | 0.694 | 0.235 |

ตารางที่ 4.4 ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขต กรณี MCEQ

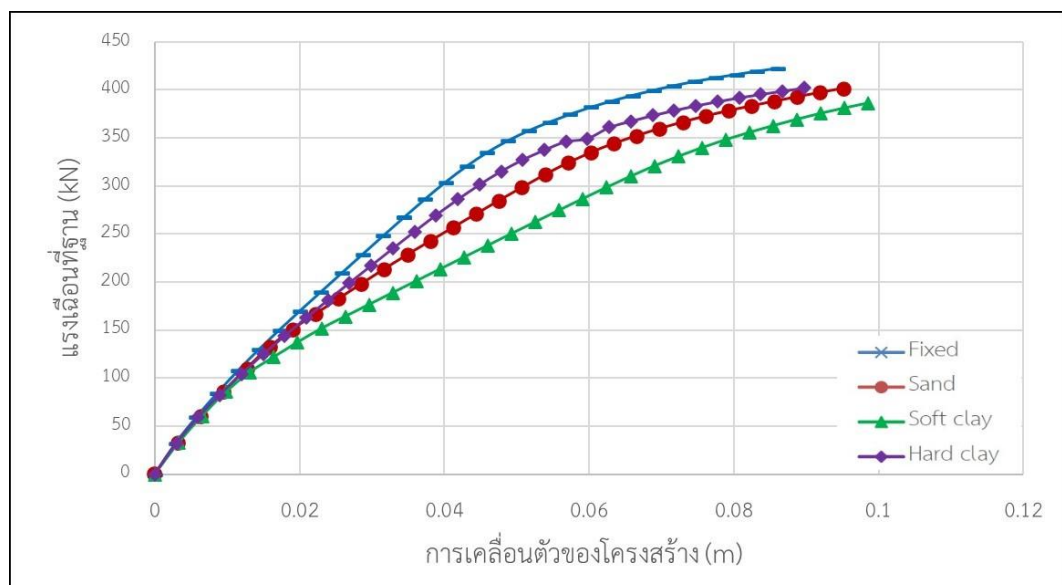
| จำนวนชั้น ของ โครงสร้าง | ค่าคาบการสั่น Fixed Base | ประเภทของฐานราก | ค่าคาบ การสั่น (sec) | ค่าการเคลื่อน ตัวเป้าหมาย (m) |
|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| 3 ชั้น | 0.287 | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย | 0.315 | 0.089 |
| | | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน | 0.325 | 0.092 |
| | | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง | 0.302 | 0.086 |
| 5 ชั้น | 0.486 | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย | 0.550 | 0.254 |
| | | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน | 0.644 | 0.309 |
| | | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง | 0.517 | 0.222 |
| 7 ชั้น | 0.658 | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย | 0.725 | 0.389 |
| | | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน | 0.826 | 0.525 |
| | | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง | 0.694 | 0.367 |

4.2.2 การประเมินและระดับความเสียหายของโครงสร้าง

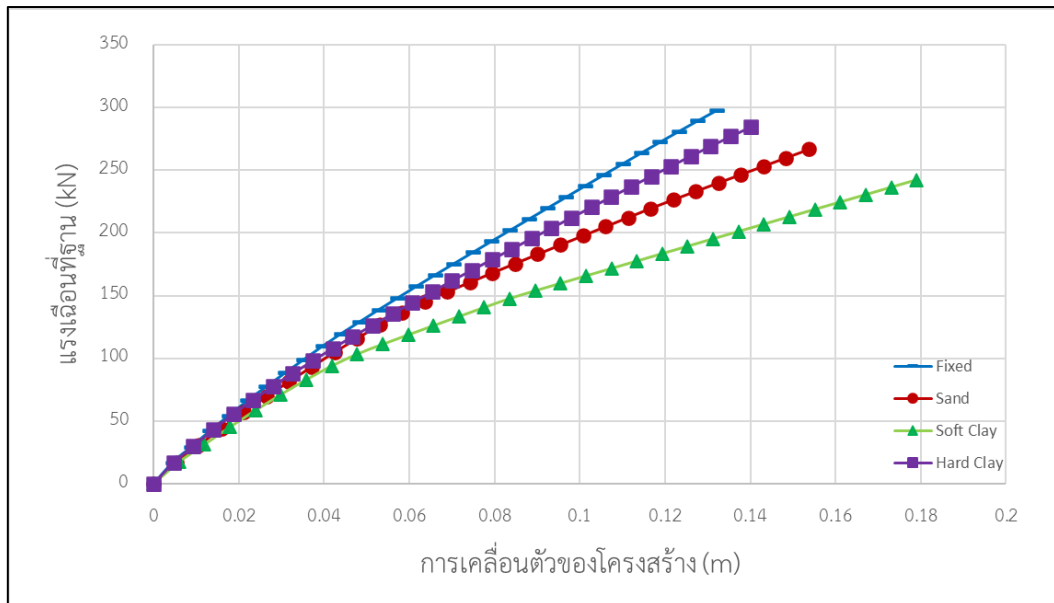
กราฟการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเฉือนที่ฐานรากของโครงสร้างและค่าการเคลื่อนตัวที่จุดสูงสุดของโครงสร้าง มีค่าต่ำกว่ากรณีของโครงสร้างที่ไม่คิดผลของฐานราก โดยกราฟการเปรียบเทียบความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 4.8 - 4.13



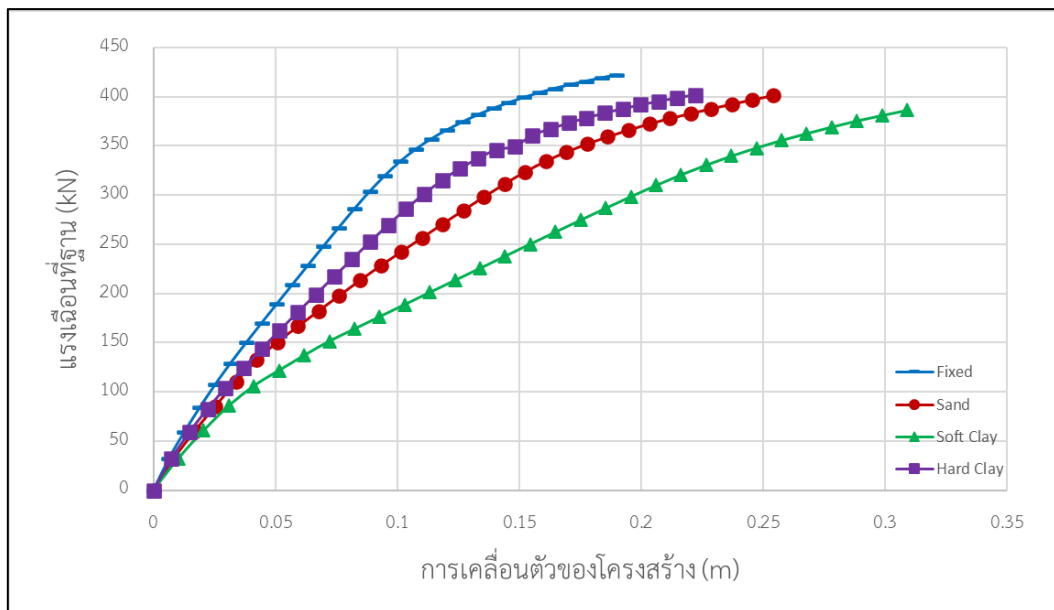
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง 3 ชั้น (DEQ)



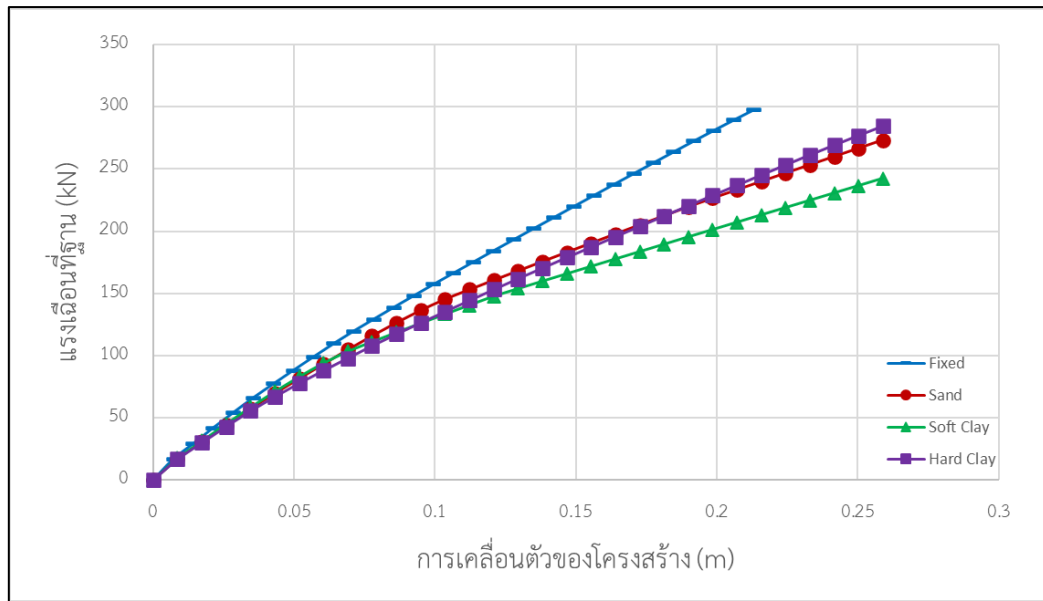
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง 3 ชั้น (MCEQ)



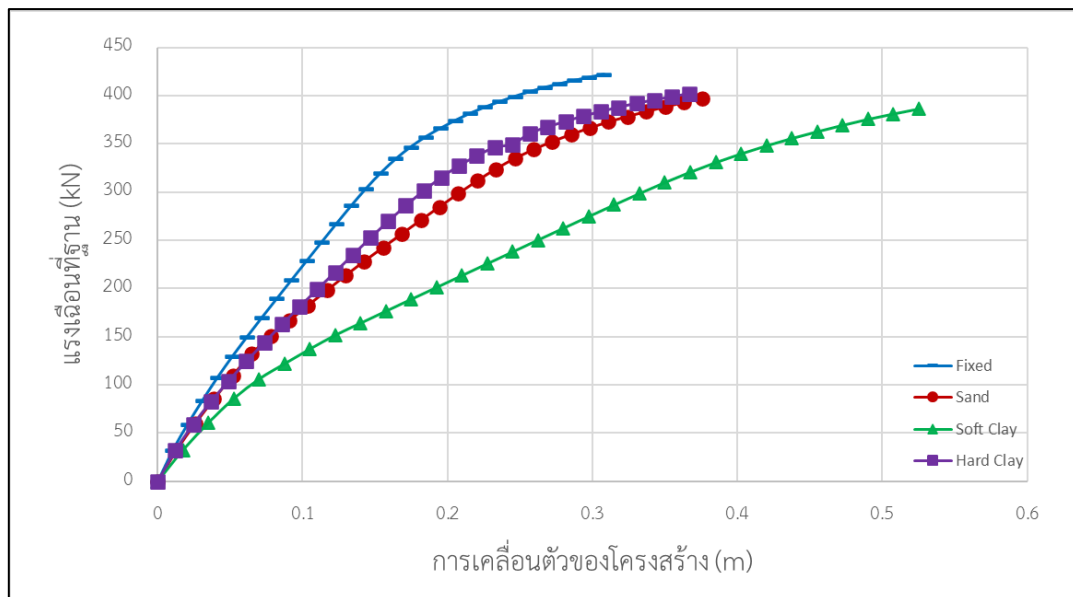
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง 5 ชั้น (DEQ)



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง 5 ชั้น (MCEQ)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง 7 ชั้น (DEQ)



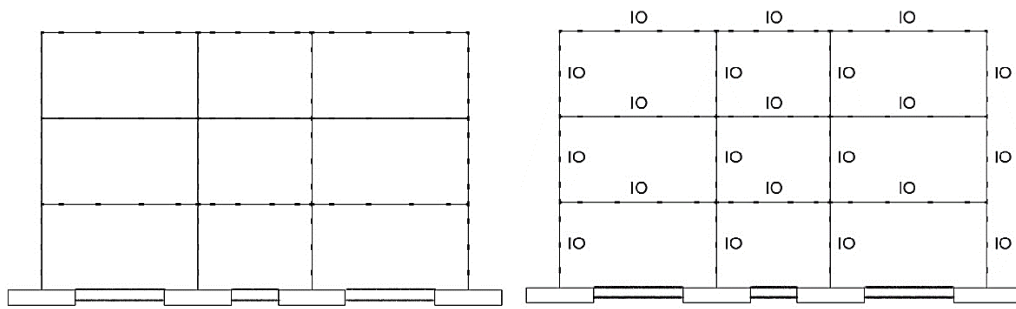
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง 7 ชั้น (MCEQ)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จะได้ค่ามูมบิตพลาสติกที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้าง แสดงดังตารางที่ 4.5 และ 4.6 พบว่า ค่ามูมบิตพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างและระดับความเสียหายของโครงสร้างตามมาตรฐานของ FEMA356 พบว่า กรณีผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (DEQ) โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้น สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานระดับ Immediate Occupancy Level (IO) เช่นเดียวกับกรณีผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสูงสุดที่พิจารณา (MCEQ) โดยรูปแสดงมูมบิตพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างและระดับความเสียหายของโครงสร้าง แสดงดังรูปที่ 4.14 – 4.19 ตารางที่ 4.5 ค่ามูมบิตพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตกรณี DEQ

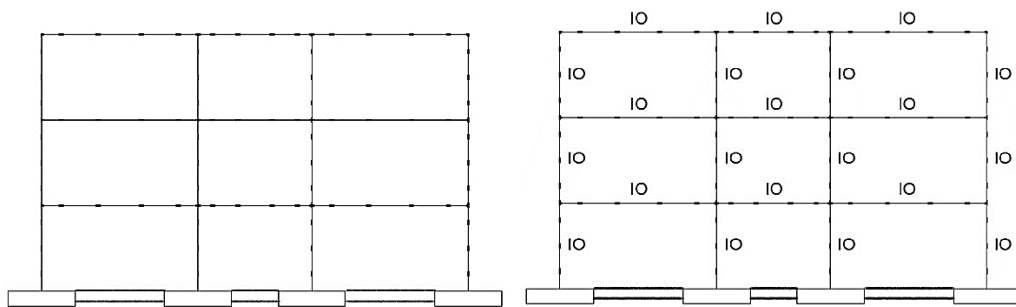
| จำนวนชั้นของ โครงสร้าง | ประเภท ของฐานราก | ค่ามูมบิตพลาสติก ที่เกิดขึ้น (rad) ของคาน | ค่ามูมบิต พลาสติกที่เกิดขึ้น (rad) ของเสา | ค่ามาตรฐาน ของ FEMA356 |
|---------------------------|--------------------------------------|---|---|------------------------------|
| 3 ชั้น | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินทราย | - | - | คาน 0.010 เสา 0.010 |
| | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินเหนียวอ่อน | - | - | |
| | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินเหนียวแข็ง | - | - | |
| 5 ชั้น | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินทราย | 0.00086 ถึง 0.0102 | 0.00043 ถึง 0.0028 | คาน 0.010 เสา 0.010 |
| | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินเหนียวอ่อน | 0.00082 ถึง 0.0108 | 0.00012 ถึง 0.0035 | |
| | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินเหนียวแข็ง | 0.00080 ถึง 0.0105 | 0.00008 ถึง 0.0028 | |
| 7 ชั้น | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินทราย | 0.00125 ถึง 0.0120 | 0.00056 ถึง 0.0103 | คาน 0.010 เสา 0.010 |
| | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินเหนียวอ่อน | 0.00096 ถึง 0.0123 | 0.00042 ถึง 0.0106 | |
| | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินเหนียวแข็ง | 0.00092 ถึง 0.0120 | 0.00008 ถึง 0.0102 | |

ตารางที่ 4.6 ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขต
กรณี MCEQ

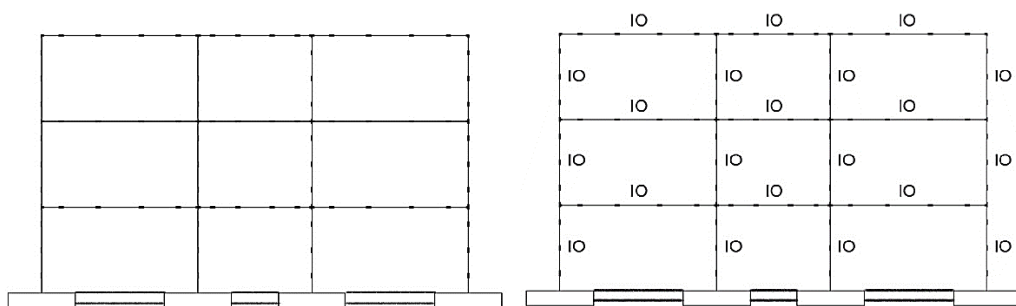
| จำนวนชั้นของ โครงสร้าง | ประเภท ของฐานราก | ค่ามุมบิดพลาสติก ที่เกิดขึ้น (rad) ของคาน | ค่ามุมบิด พลาสติกที่เกิดขึ้น (rad) ของเสา | ค่ามาตรฐาน ของ FEMA356 |
|---------------------------|--------------------------------------|---|---|------------------------------|
| 3 ชั้น | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินทราย | 0.00028 ถึง 0.0068 | 0.00012 ถึง 0.0042 | คาน 0.015 เสา 0.012 |
| | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินเหนียวอ่อน | 0.00042 ถึง 0.0094 | 0.00024 ถึง 0.0035 | |
| | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินเหนียวแข็ง | 0.00019 ถึง 0.0048 | 0.00008 ถึง 0.0028 | |
| 5 ชั้น | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินทราย | 0.00092 ถึง 0.0122 | 0.00043 ถึง 0.0122 | คาน 0.015 เสา 0.012 |
| | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินเหนียวอ่อน | 0.00093 ถึง 0.0152 | 0.00045 ถึง 0.0126 | |
| | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินเหนียวแข็ง | 0.00092 ถึง 0.0138 | 0.00042 ถึง 0.0120 | |
| 7 ชั้น | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินทราย | 0.00092 ถึง 0.0158 | 0.00056 ถึง 0.0132 | คาน 0.015 เสา 0.012 |
| | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินเหนียวอ่อน | 0.00093 ถึง 0.0162 | 0.00058 ถึง 0.0136 | |
| | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินเหนียวแข็ง | 0.00092 ถึง 0.0152 | 0.00052 ถึง 0.0130 | |



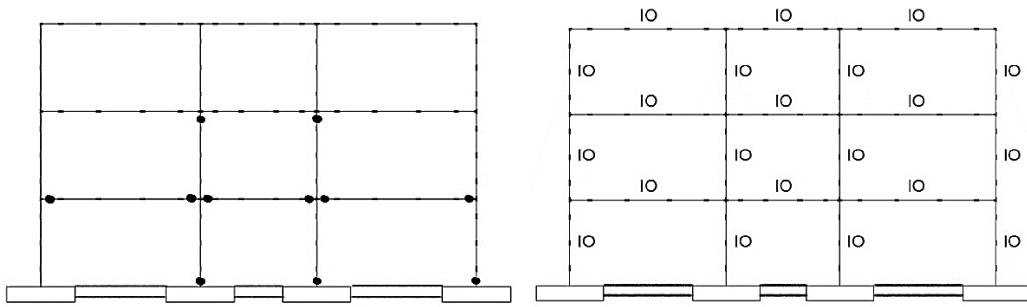
รูปที่ 4.14 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย (DEQ)



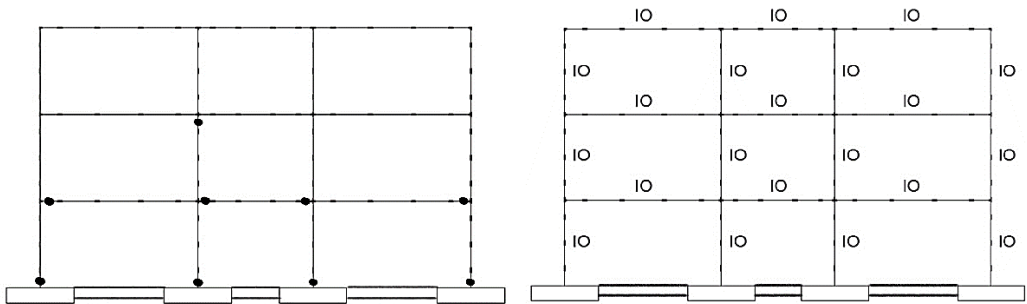
รูปที่ 4.15 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน (DEQ)



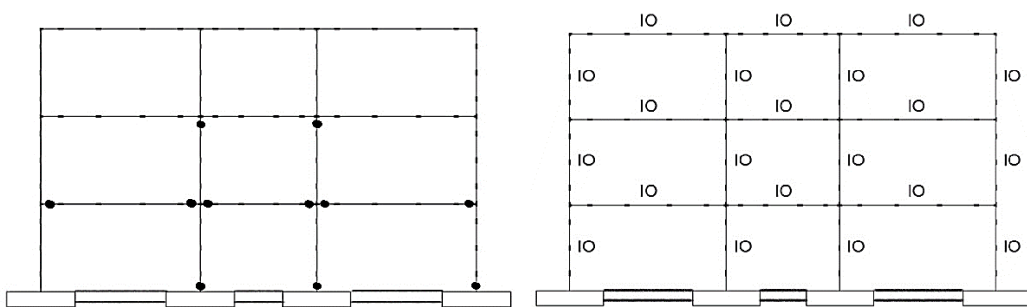
รูปที่ 4.16 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง (DEQ)



รูปที่ 4.17 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย (MCEQ)



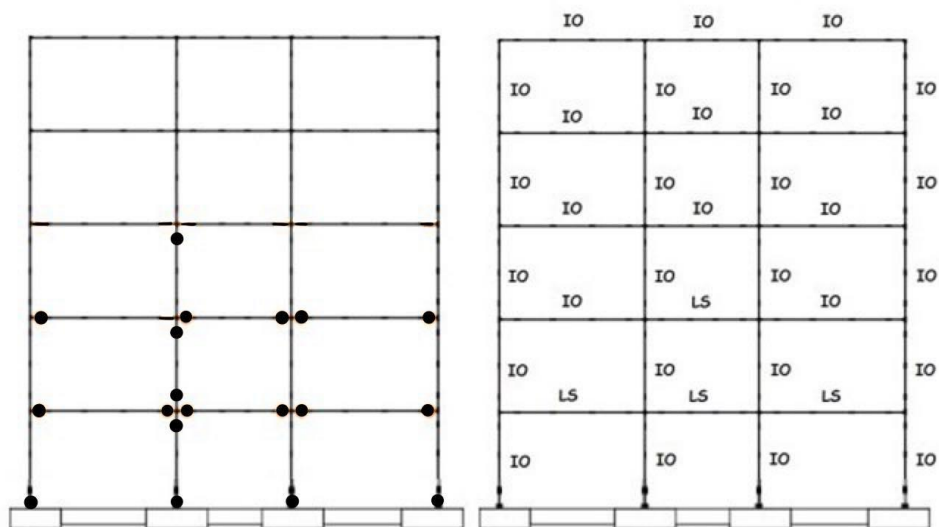
รูปที่ 4.18 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน (MCEQ)



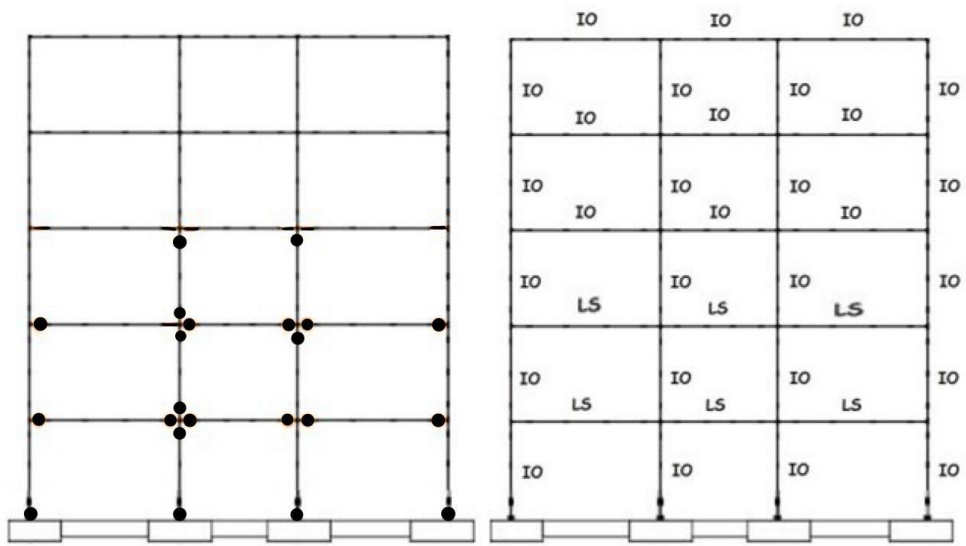
รูปที่ 4.19 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง (MCEQ)

จากรูปที่ 4.14 – 4.19 แสดงถึงความเสียหายของโครงสร้างอาคารสูง 3 ชั้น กรณีที่คิดผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.2 – 4.3 กรณีที่ไม่ได้คิดผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก พบว่า ผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานรากส่งผลต่อโครงสร้างเล็กน้อย แม้ว่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างและค่ามูมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจะมีค่าสูงขึ้น แต่ระดับความเสียหายของโครงสร้างยังอยู่ระดับเดิมและสามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ FEMA356 ทั้งในกรณีของ DEQ และ MCEQ

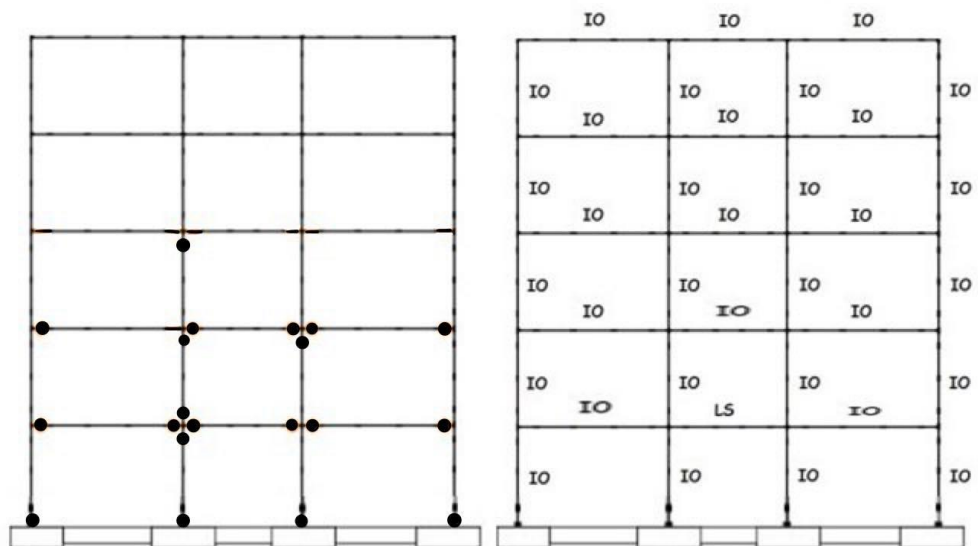
จากการวิเคราะห์ค่ามูมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 5 ชั้นและระดับความเสียหายของโครงสร้างตามมาตรฐานของ FEMA356 กรณีผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (DEQ) พบว่าสามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานระดับ Life Safety (LS) แต่ในส่วนกรณีผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสูงสุดที่พิจารณา (MCEQ) มีบางชิ้นส่วนไม่สามารถผ่านเกณฑ์ในระดับ Collapse Prevention (CP)



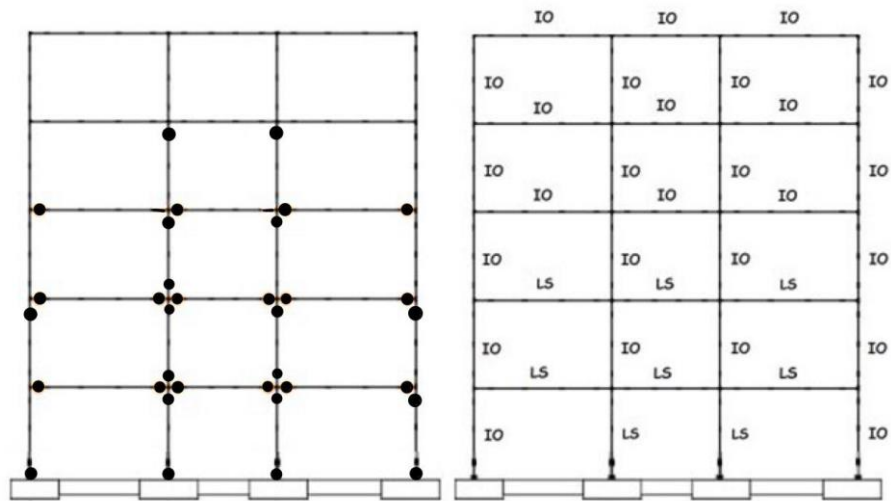
รูปที่ 4.20 มูมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 5 ชั้น ฐานรากชนิดเขตนอนชั้นดินทราย (DEQ)



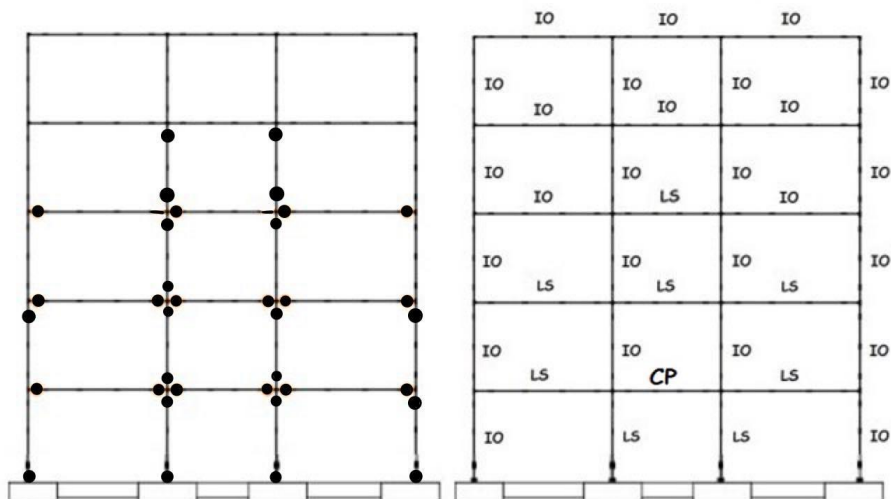
รูปที่ 4.21 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 5 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน (DEQ)



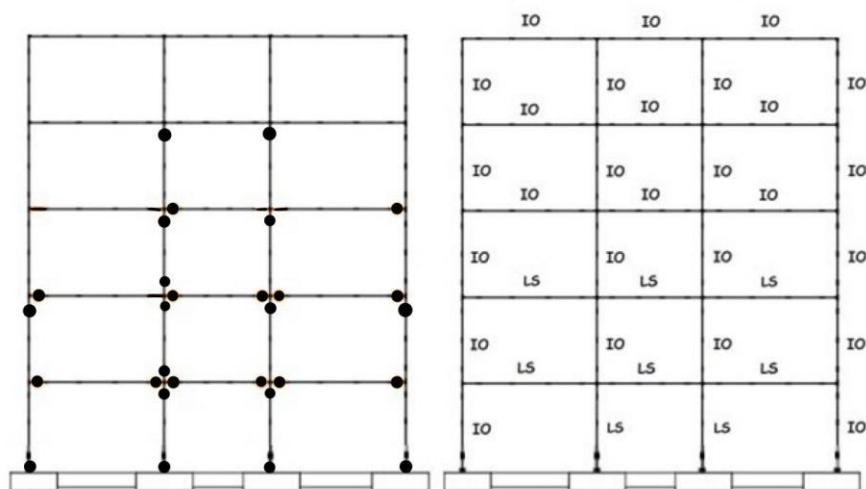
รูปที่ 4.22 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 5 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง (DEQ)



รูปที่ 4.23 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 5 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย (MCEQ)



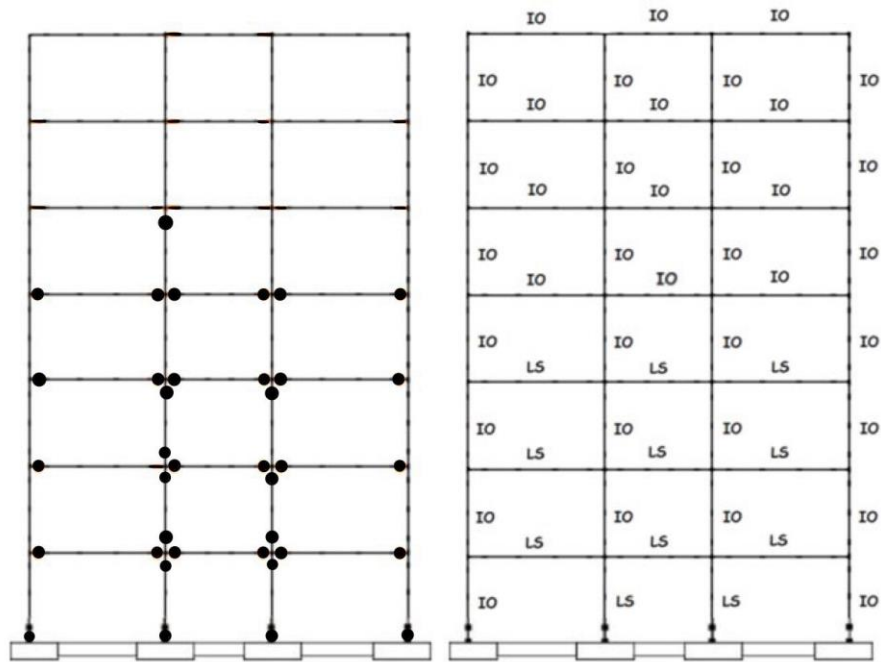
รูปที่ 4.24 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 5 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน (MCEQ)



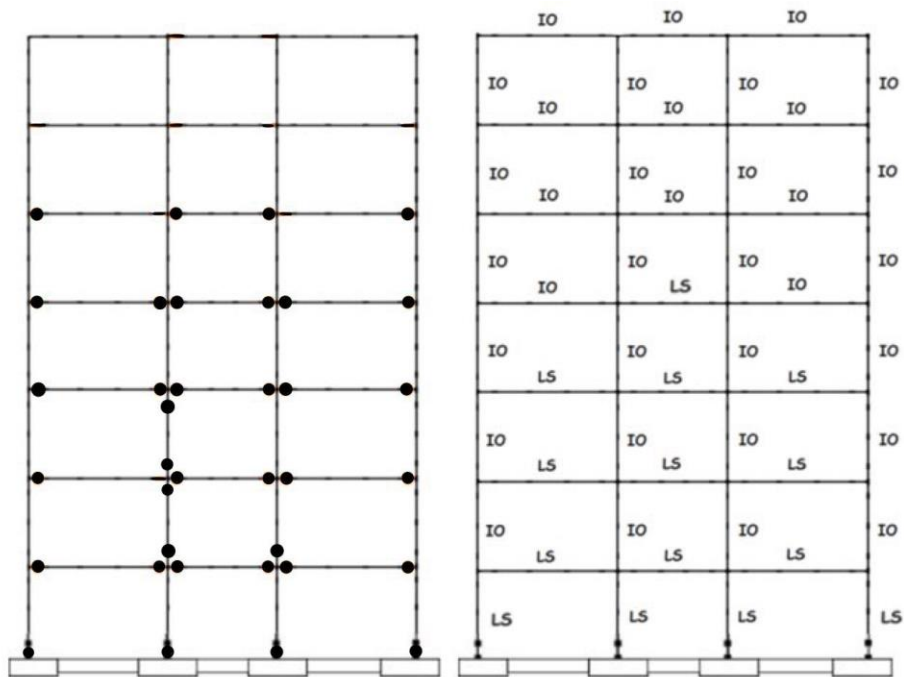
รูปที่ 4.25 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 5 ชั้น ฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวแข็ง (MCEQ)

จากรูปที่ 4.20 – 4.25 แสดงถึงความเสียหายของโครงสร้างอาคารสูง 5 ชั้น กรณีที่คิดผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.4 – 4.5 กรณีที่ไม่ได้คิดผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก พบว่า กรณีโครงสร้างสูง 5 ชั้น ผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานรากมีผลต่อมุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้างพอสมควร ซึ่งบางชิ้นส่วนของโครงสร้างมีระดับความเสียหายสูงขึ้น แต่โครงสร้างยังคงสามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ใน FEMA356

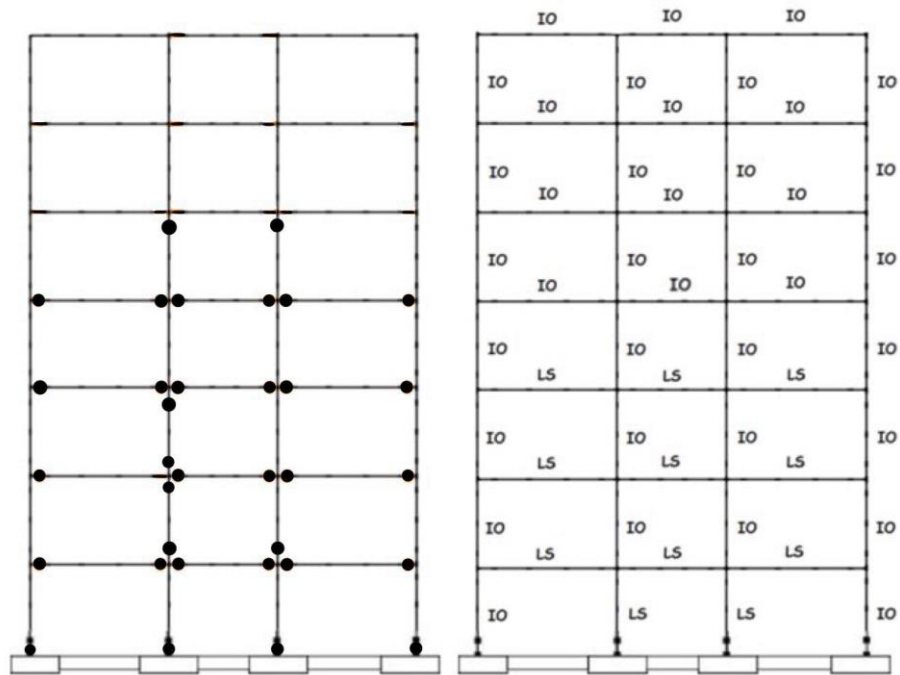
จากการวิเคราะห์ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 7 ชั้นและระดับความเสียหายของโครงสร้างตามมาตรฐานของ FEMA356 พบว่า กรณีผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (DEQ) สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานระดับ Life Safety (LS) แต่ในส่วนกรณีผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสูงสุดที่พิจารณา (MCEQ) สามารถผ่านเกณฑ์ในระดับ Collapse Prevention Level (CP)



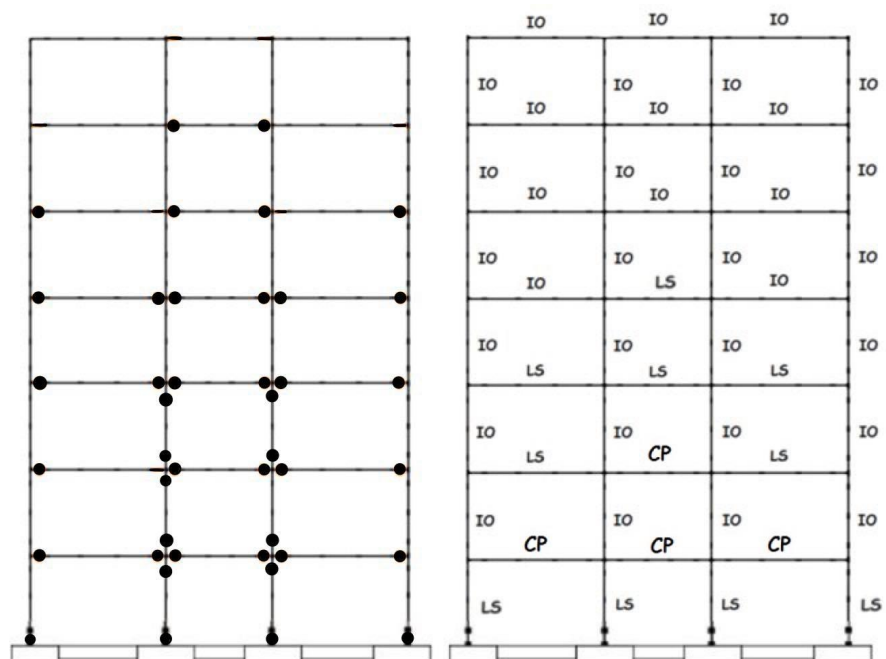
รูปที่ 4.26 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 7 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย (DEQ)



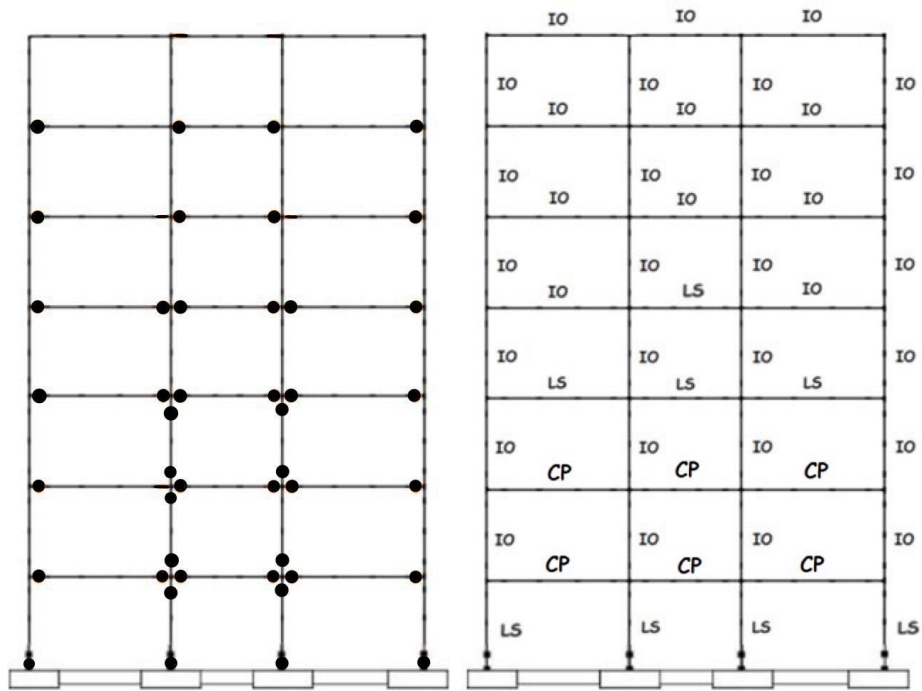
รูปที่ 4.27 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 7 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน (DEQ)



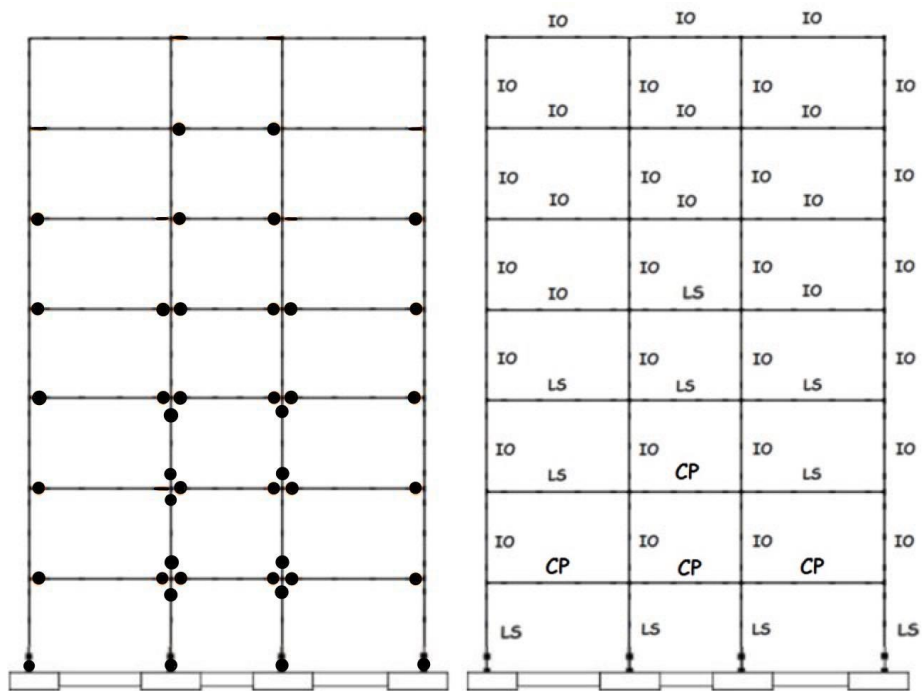
รูปที่ 4.28 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 7 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง (DEQ)



รูปที่ 4.29 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 7 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย (MCEQ)



รูปที่ 4.30 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 7 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน (MCEQ)



รูปที่ 4.31 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 7 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง (MCEQ)

จากรูปที่ 4.26 – 4.31 แสดงถึงความเสียหายของโครงสร้างอาคารสูง 7 ชั้น กรณีที่คิดผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.6 – 4.7 กรณีที่ไม่ได้คิดผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก พบว่า ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานรากมีผลกระทบต่อโครงสร้างอย่างมาก เนื่องจากทำให้ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นมีค่าสูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่คิดผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก ส่งผลให้ระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงสร้างบางชั้นส่วนยังสามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ FEMA356 แต่ไม่สามารถเข้าไปใช้งานโครงสร้างอาคารได้

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้าง พบว่า การวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงกระทำทางด้านข้าง ผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานรากมีความสำคัญต่อผลการวิเคราะห์โครงสร้างที่ได้ เนื่องจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก ทำให้ค่าความแกร่งของโครงสร้าง มีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้าง ในกรณีที่คิดผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานรากมีค่ามากกว่าโครงสร้างในกรณีฐานรากแบบยึดแน่น ทำให้ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างมีค่ามากขึ้น โดยเฉพาะโครงสร้างที่มีความสูงมาก ผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานรากยังมีความสำคัญในการวิเคราะห์หรือประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงสร้างเมื่อโครงสร้างดังกล่าวนั้นจำเป็นต้องรับแรงกระทำทางด้านข้าง

4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว โดยไม่คิดผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก (ฐานรากแบบยึดแน่น) ด้วยวิธีการผลัดทางด้านข้าง

4.3.1 ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้าง

ค่าคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้างและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้น ที่ไม่คิดผลของฐานราก คือ ฐานรากแบบยึดแน่น ทั้งในกรณีผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (DEQ) และกรณีผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสูงสุดที่พิจารณา (MCEQ) แสดงดังตารางที่ 4.7 โดยโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์จะใช้โครงสร้างที่มีความสูง 3 ชั้น ค่าคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้างเป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม SeismoStruct ส่วนการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างคำนวณตามมาตรฐานของ FEMA356

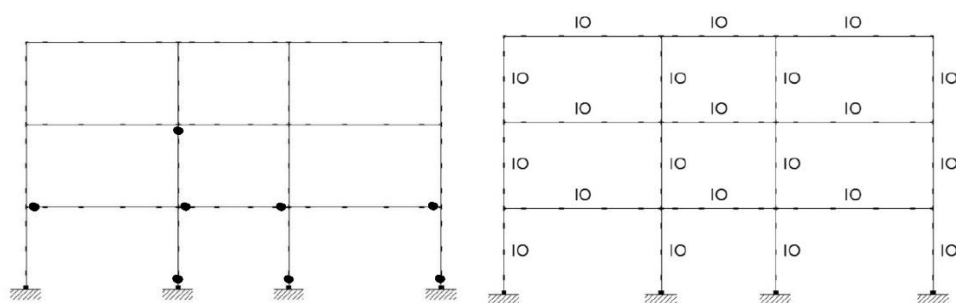
ตารางที่ 4.7 ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากแบบยึดแน่น

| จำนวนชั้นของ โครงสร้าง | กรณีของแผ่นดินไหว | ค่าคาบการสั่น (sec) | ค่าการเคลื่อนตัว เป้าหมาย (m) |
|---------------------------|-------------------|------------------------|----------------------------------|
| 3 ชั้น | DEQ | 0.315 | 0.055 |
| | MCEQ | 0.315 | 0.126 |

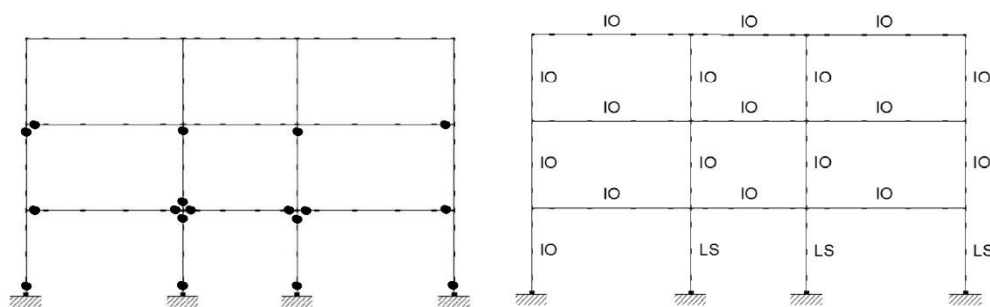
ค่าคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวมีค่าสูงกว่ากรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว เนื่องจากโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวมีการใส่รายละเอียดเหล็กเสริมน้อยกว่าในกรณีที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ทำให้ค่าความแกร่งของโครงสร้างมีค่าลดลง ค่าคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างเพิ่มขึ้น

4.3.2 การประเมินและระดับความเสียหายของโครงสร้าง

จากการวิเคราะห์พบว่า กรณีผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (DEQ) และกรณีผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสูงสุดที่พิจารณา (MCEQ) จะมีจุดที่เกิดมุมบิดพลาสติกขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.32 – 4.33 และค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นแสดงดังตารางที่ 4.8 ซึ่งสูงกว่ากรณีของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวมาก เมื่อพิจารณาระดับความเสียหายของโครงสร้างตามมาตรฐานของ FEMA356 พบว่า กรณีของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวจะผ่านในเกณฑ์ในระดับ Immediate Occupancy (IO) แต่ในกรณีของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวมีบางชั้นส่วนของโครงสร้างไม่ผ่านเกณฑ์ในระดับของ Immediate Occupancy (IO) แต่สามารถผ่านเกณฑ์ในระดับของ Life Safety (LS)



รูปที่ 4.32 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้างกรณีโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ฐานรากแบบยึดแน่น (DEQ)



รูปที่ 4.33 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ฐานรากแบบยึดแน่น (MCEQ)

ตารางที่ 4.8 ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากแบบยึดแน่น

| ประเภท ของฐานราก | กรณีของ แผ่นดินไหว | ค่ามุมบิด พลาสติกที่เกิดขึ้น (rad) ของคาน | ค่ามุมบิด พลาสติกที่เกิดขึ้น (rad) ของเสา | ค่ามาตรฐานของ FEMA356 | |
|---------------------|-----------------------|---|---|--------------------------|-------|
| | | | | IO | LS |
| 3 ชั้น | DEQ | 0.00021 | 0.00016 | คาน | คาน |
| | | ถึง | ถึง | 0.010 | 0.020 |
| | | 0.0098 | 0.0068 | เสา | เสา |
| | MCEQ | 0.010 | 0.015 | 0.010 | 0.015 |
| | | 0.00035 | 0.00028 | คาน | คาน |
| | | ถึง | ถึง | 0.015 | 0.020 |
| 0.0136 | 0.0135 | เสา | เสา | | |
| 0.012 | 0.015 | | | | |

4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูงโดยคิดผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก (ฐานรากชนิดเขต) ด้วยวิธีการผลกทางด้านข้าง

4.4.1 ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้าง

ค่าคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้างและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ที่คิดผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก คือ ฐานรากชนิดเขตซึ่งตั้งอยู่บนดิน 3 ประเภท คือ ดินทราย ดินเหนียวอ่อน และดินเหนียวแข็ง ทั้งในกรณีผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (DEQ) และ

กรณีผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสูงสุดที่พิจารณา (MCEQ) แสดงดังตารางที่ 4.9 - 4.10 โดยค่าคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้างเป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม SeismoStruct ส่วนการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างคำนวณตามมาตรฐานของ FEMA356

ตารางที่ 4.9 ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขต กรณี DEQ

| จำนวนชั้น ของ โครงสร้าง | ค่าคาบการสั่น Fixed Base | ประเภทของฐานราก | ค่าคาบ การสั่น (sec) | ค่าการเคลื่อน ตัวเป้าหมาย (m) |
|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| 3 ชั้น | 0.315 | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย | 0.343 | 0.058 |
| | | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน | 0.364 | 0.065 |
| | | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง | 0.330 | 0.055 |

ตารางที่ 4.10 ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขต กรณี MCEQ

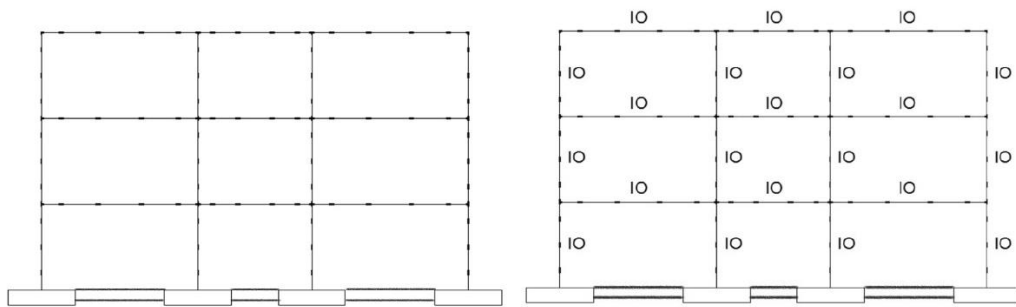
| จำนวนชั้น ของ โครงสร้าง | ค่าคาบการสั่น Fixed Base | ประเภทของฐานราก | ค่าคาบ การสั่น (sec) | ค่าการเคลื่อน ตัวเป้าหมาย (m) |
|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| 3 ชั้น | 0.315 | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย | 0.343 | 0.132 |
| | | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน | 0.364 | 0.147 |
| | | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง | 0.330 | 0.125 |

4.4.2 การประเมินและระดับความเสียหายของโครงสร้าง

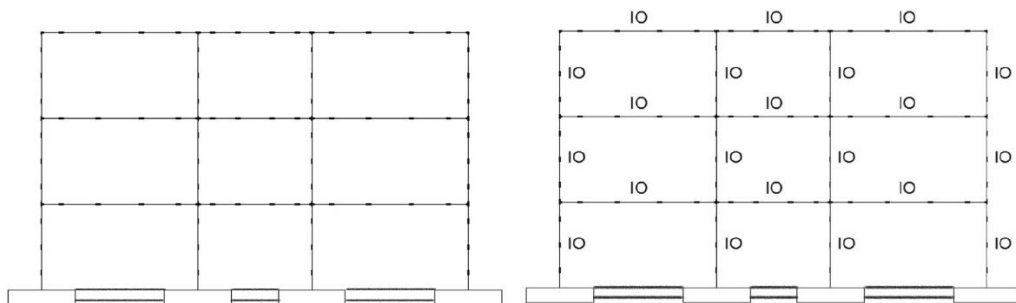
จากการวิเคราะห์พบว่า กรณีผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสำหรับการออกแบบ (DEQ) ของโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากชนิดเขตที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวพบว่า ทุกประเภทของชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์จะไม่มีมุมบิดพลาสติกเกิดขึ้นในโครงสร้าง แสดงดังรูปที่ 4.34 - 4.36 และเมื่อพิจารณาระดับความเสียหายของโครงสร้างตามมาตรฐานของ FEMA356 พบว่า ทุกประเภทของชั้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างสามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานในระดับของ Immediate Occupancy (IO)

ตารางที่ 4.11 ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากชนิดเขต กรณี DEQ

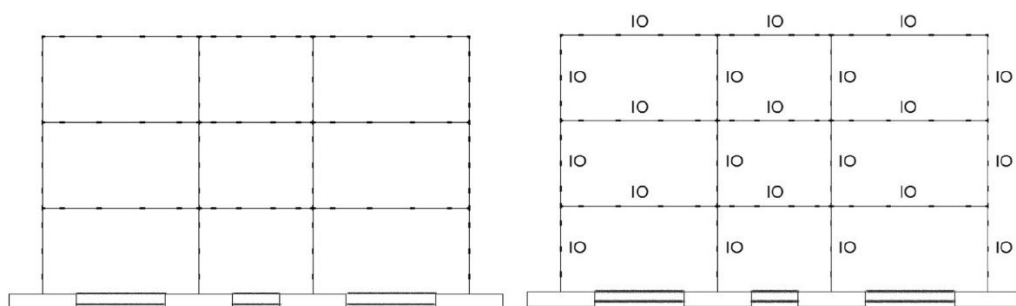
| จำนวนชั้นของ โครงสร้าง | ประเภทของฐานราก | ค่ามุมบิดพลาสติกที่ เกิดขึ้น (rad) ของคานและเสา | ค่ามาตรฐานของ FEMA356 |
|---|----------------------------------|---|--------------------------|
| 3 ชั้น (ไม่ได้ ออกแบบรับแรง แผ่นดินไหว) | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย | - | คาน 0.010 |
| | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน | - | เสา 0.010 |
| | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง | - | |
| 3 ชั้น(ออกแบบ รับแรง แผ่นดินไหว) | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย | - | คาน 0.010 |
| | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน | - | เสา 0.010 |
| | ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง | - | |



รูปที่ 4.34 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย (DEQ)



รูปที่ 4.35 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน (DEQ)

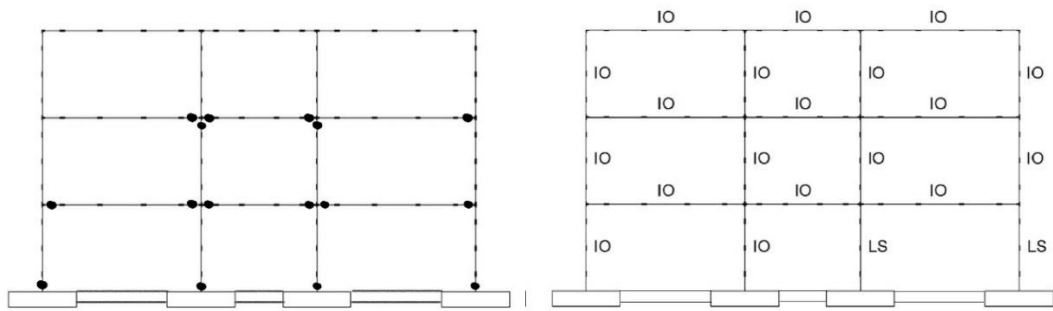


รูปที่ 4.36 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง (DEQ)

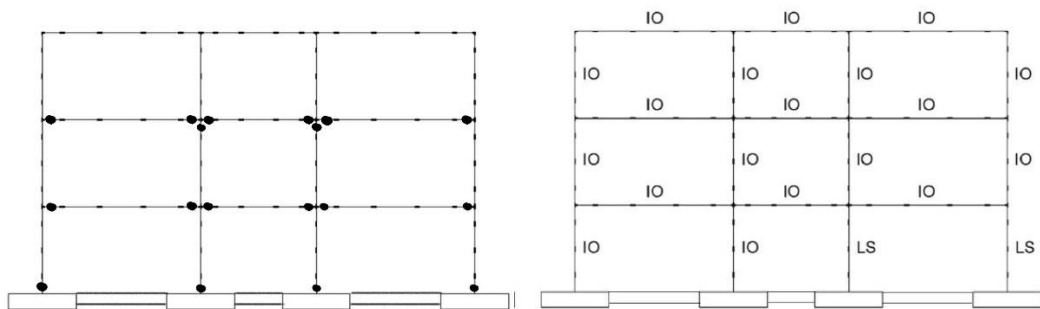
จากการวิเคราะห์พบว่า กรณีผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงแผ่นดินไหวสูงสุดที่พิจารณา (MCEQ) ของโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากชนิดเขตที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว พบว่า ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นมีค่าสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว โดยมีจำนวนชั้นของโครงสร้าง 3 ชั้นเท่ากัน จุดที่เกิดมุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้าง อยู่ในเกณฑ์ Life Safety Level (LS) แสดงดังรูปที่ 4.37 – 4.39 โดยค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในกรณี MCEQ แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากชนิดเขต กรณี MCEQ

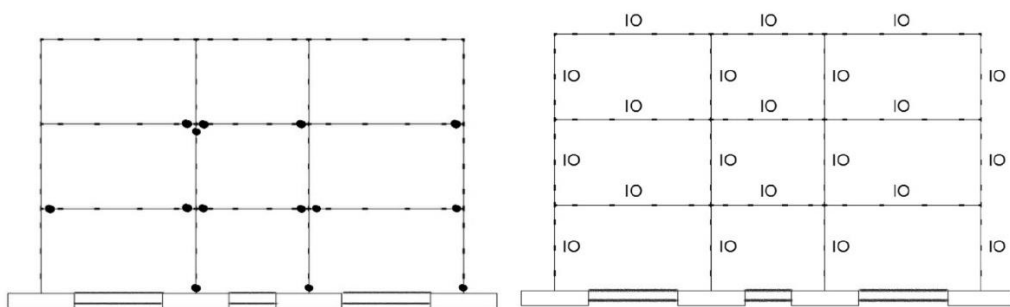
| จำนวนชั้นของ โครงสร้าง | ประเภทของ ฐานราก | ค่ามุมบิดพลาสติก ที่เกิดขึ้น (rad) ของคาน | ค่ามุมบิดพลาสติก ที่เกิดขึ้น (rad) ของเสา | ค่ามาตรฐาน ของ FEMA356 |
|---|--------------------------------------|---|---|------------------------------|
| 3 ชั้น (ไม่ได้ ออกแบบรับ แรง แผ่นดินไหว) | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินทราย | 0.00029 ถึง 0.0145 | 0.00018 ถึง 0.0122 | คาน 0.015 เสา 0.012 |
| | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินเหนียวอ่อน | 0.00038 ถึง 0.0150 | 0.00032 ถึง 0.0128 | |
| | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินเหนียวแข็ง | 0.00023 ถึง 0.0142 | 0.00014 ถึง 0.0116 | |
| 3 ชั้น(ออกแบบ รับแรง แผ่นดินไหว) | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินทราย | 0.00028 ถึง 0.0068 | 0.00012 ถึง 0.0042 | คาน 0.015 เสา 0.012 |
| | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินเหนียวอ่อน | 0.00042 ถึง 0.0094 | 0.00024 ถึง 0.0035 | |
| | ฐานรากชนิดเขต บนชั้นดินเหนียวแข็ง | 0.00019 ถึง 0.0048 | 0.00008 ถึง 0.0028 | |



รูปที่ 4.37 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย (MCEQ)



รูปที่ 4.38 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน (MCEQ)



รูปที่ 4.39 มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นและระดับความเสียหายของโครงสร้าง
กรณีโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง (MCEQ)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลที่ได้จากการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3, 5 และ 7 ชั้น ที่ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง และกรณีของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้น ที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว โดยโครงสร้างอาคารดังกล่าวต้องรับแรงกระทำแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรง 2 ระดับ ตามมาตรฐานของ FEMA356 คือ แรงแผ่นดินไหวระดับการออกแบบ (Design Earthquake) และแรงแผ่นดินไหวระดับสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นกับโครงสร้างได้ (Maximum Considered Earthquake) และเปรียบเทียบผลของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนของโครงสร้าง 2 กรณี คือ กรณีที่ไม่คิดผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้าง คือ ฐานรากแบบยึดแน่น และกรณีที่คิดผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้าง คือ ฐานรากชนิดเขต โดยแบ่งเป็นประเภทดินชั้นรองรับเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ดินทราย ดินเหนียวอ่อน และดินเหนียวแข็ง โดยพื้นที่ที่ใช้พิจารณาเป็นตำแหน่งที่ตั้งอาคาร คือ อ.เมืองเชียงราย จ. เชียงราย

จากการวิเคราะห์โครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว พบว่า ผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานรากมีผลต่อระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นบนโครงสร้าง โดยในกรณีที่เกิดผลปฏิสัมพันธ์ของฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย พบว่า ค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายเพิ่มขึ้นประมาณ 20% ในกรณีที่เกิดผลปฏิสัมพันธ์ของฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน พบว่า ค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างเพิ่มขึ้นมากกว่า 30% และในกรณีที่เกิดผลปฏิสัมพันธ์ของฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง พบว่า ค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างเพิ่มขึ้นประมาณ 20% จากค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างที่เพิ่มขึ้น เมื่อคิดผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้าง พบว่า เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีผลกทางด้านข้าง ระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นบนโครงสร้าง โดยประเมินตามมาตรฐานของ FEMA356 ในอาคารสูง 3, 5 และ 7 ชั้น บางชิ้นส่วนของโครงสร้างระดับความเสียหายจะเพิ่มขึ้นจาก Immediate Occupancy Level (IO) เป็น Life Safety Level (LS) และบางชิ้นส่วนเปลี่ยนจาก Life Safety Level (LS) เป็น Collapse Prevention Level (CP) โดยเฉพาะในกรณีของแรงแผ่นดินไหวระดับสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นกับโครงสร้างได้ (MCEQ) สามารถสรุปได้ว่า กรณีของโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนและกรณีของโครงสร้างที่มีความสูงมากๆ ผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานรากมีความสำคัญอย่างมากต่อความเสียหายของโครงสร้าง เมื่อโครงสร้างต้องรับแรงแผ่นดินไหว

เมื่อประเมินระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวตามมาตรฐานของ FEMA356 ในกรณีโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากแบบยึดแน่น ระดับความเสียหายของ

ชั้นส่วนของโครงสร้างจะอยู่ในช่วง Immediate Occupancy Level (IO) และ Life Safety Level (LS) และเมื่อพิจารณาผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานรากเพิ่มเข้าไป ระดับความเสียหายของชั้นส่วนของโครงสร้างจะเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในอาคารสูง 7 ชั้น บางชั้นส่วนจะมีระดับความเสียหาย Collapse Prevention Level (CP) ดังนั้น การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหว ความสูงตั้งแต่ 3 ชั้น เป็นต้นไป ควรคำนึงถึงผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานรากในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างด้วย เพื่อความถูกต้องและแม่นยำ

จากการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้น ที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว พบว่า ค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างในกรณีที่เกิดผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานรากบนชั้นดินประเภทต่าง ๆ อัตราการเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันกับในกรณีของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้น ที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว แต่ในกรณีของของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวจะมีค่าความแข็งแกร่งและมีค่าความเหนียวน้อยกว่ากรณีของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ทำให้ค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวมีค่าสูงกว่าค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว แม้ในกรณีที่โครงสร้างมีฐานรากแบบยึดแน่น ส่งผลให้มุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวมีค่าสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ทำให้ระดับความเสียหายของโครงสร้างมีระดับความเสียหายสูงขึ้น ซึ่งในกรณีของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ระดับความเสียหายที่เกิดขึ้นบนชั้นส่วนของโครงสร้างจะอยู่ในช่วง Immediate Occupancy Level (IO) และ Life Safety Level (LS) เช่นเดียวกันกับกรณีของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ในกรณีของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานรากมีความสำคัญอย่างมากในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างในกรณีรับแรงแผ่นดินไหว

จากงานวิจัยที่ได้ศึกษาพบว่า การคิดผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก หรือการมองว่าฐานรากชนิดเขตที่มีการโยกตัวภายใต้แรงแผ่นดินไหว นั้น สามารถลดความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงสร้างซึ่งตรงตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ ดังนั้นจึงมีความสำคัญในการวิเคราะห์ ออกแบบ และประเมินโครงสร้างในกรณีที่ต้องรับแรงแผ่นดินไหว ดังนั้น เพื่อให้โครงสร้างมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้ สอยเพิ่มขึ้น การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง โดยคิดผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานรากจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นและควรพิจารณาคำนึงถึงด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

โครงสร้างอาคารที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เป็นโครงสร้างแบบสมมาตร มีความสูงที่ไม่มาก และวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพียง 2 มิติ ดังนั้นควรศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของโครงสร้างจากลักษณะที่แตกต่างจากงานวิจัยนี้ เช่น อาคารที่มีความสูงมากขึ้น อาคารที่ไม่สมมาตร อาคารที่รูปทรงแตกต่างจากทั่วไป ฐานรากรูปแบบต่าง ๆ และควรศึกษาจากแบบจำลองที่เป็น 3 มิติ และจะต้องคิดในส่วนของแรงกระทำเบื้องต้น เพื่อการวิเคราะห์ที่เสมือนจริงมากที่สุด รวมไปถึงข้อมูลของแผ่นดินไหวที่ใช้ควรมีความหลากหลายมากกว่านี้

บรรณานุกรม

- กฎกระทรวงกำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคาร และพื้นดินที่รองรับอาคาร ในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2564 ออกตามความในพระราชบัญญัติ ควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522
- กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. 2561. *มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการ สั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ 1302*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: ดิจิตอล ออฟเซต เอเชีย แปซิฟิก.
- A. M. Basha , M. I. Salama. 2017. “*Finite Element Analysis of Tie Beams under the Effect of Differential Settlement of Isolated Footings.*” Civil Engineering Journal Vol. 3, No. 9, September, 2017
- Anil K. Chopra, Rakesh K. Goel. 2002. *A Modal Pushover Analysis Procedure for Estimating Seismic Demands for Building*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31, p561-582.
- Bowles, J. E. 1996. *Foundation Analysis and Design, 5th edition*. New York: McGraw-Hill.
- Dr. S. A. Halkude, Mr. M. G. Kalyanshetti, Mr. S. H. Kalyani, “Soil Structure Interaction Effect on Seismic Response of R.C. Frames with Isolated Footing” International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) Vol. 3 Issue 1, January – 2014 IJERT ISSN: 2278-0181
- Federal Emergency Management Agency. 2000. *FEMA 356 Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building*. Washington, D.C.
- Federal Emergency Management Agency. 2005. *FEMA 440 Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. Washington, D.C.
- H. Matinmanesh and M. Saleh Asheghabadi, “*Seismic Analysis on Soil-Structure Interaction of Buildings over Sandy Soil*” The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. Procedia Engineering 14 (2011) 1737–1743

- Liu, W., Hutchinson, T. C., Kutter, B. L., Hakhamaneshi, M., Aschheim, A. M. and Kunnath, S. K. 2013. *Demonstration of Compatible yielding between soil-foundation and superstructure component*. Journal of Structural Engineering 139: 1408-1420.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R. 1988. *Theoretical stress-strain model for confined concrete*. Journal of Structural Engineering 114(8): 1804-1826.
- M. G. Kalyanshetti, S. A. Halkude, Y.C. Mhamane “*Seismic response of R.C. Building frames with strap footing considering soil structure interaction.*” International Journal of Research in Engineering and Technology
- Popovics, S. 1973. *A numerical approach to the complete stress-strain curves for concrete*. Cement and Concr. Res. 3(5): 583-599
- Raychowdhury, P. and Hutchinson, T. C. 2009. “*Performance evaluation of a nonlinear Winkler-based shallow foundation model using centrifuge test results.*” Engineering and Structural Dynamics 38: 679-698.
- SeismoStruct 2018. “*Technical Information Sheet Nonlinear analysis and assessment of structures.*”
- Sun-Pil Kim, Yahya C. Kurama. 2008. *An Alternative Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Displacement Demand*. Engineering Structures, 30, p 3793 - 3807.
- Vivek Garg, M.S. Hora, “*A review on interaction behaviour of structure-foundation-soil system.*” International Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 2, Issue 6, November- December 2012, pp.639-644
- Vivek Garg, M.S. Hora, “*Seismic analysis of frame-strap footing-nonlinear soil system to study column forces.*” Structural Engineering and Mechanics, Vol. 46, No. 5 (2013) 645-672
- Winkler, E. 1867. *Die Lehre Von Elasticitaet Und Festigkeit*. 1st Edn. H. Dominicus, Prague.

ภาคผนวก

การคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างสูง 3 ชั้น ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว
กรณีฐานรากแบบยึดแน่น

| Fixed | Design EQ | | MAX. EQ | |
|--|-----------|---|---------|---|
| คำนวณแรงเฉือนที่ฐานของอาคาร | | | | |
| คาบการสั่นของอาคาร (T) | 0.315 | s | 0.315 | s |
| ค่าความเร่งตอบสนองสำหรับออกแบบของอาคาร (S_d) | 0.087 | g | 0.131 | g |
| ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) | 3 | - | 3 | - |
| ตัวประกอบความสำคัญ (I) | 1 | - | 1 | - |
| สปส.ผลตอบสนองแผ่นดินไหว (C_s) | 0.028 | g | 0.042 | g |
| น้ำหนักของโครงสร้างประสิทธิผล (w) | 1183762 | N | 1183762 | N |
| แรงเฉือนที่ฐานของอาคาร (V) | 29812 | N | 38028 | N |
| คำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย | | | | |
| C_0 | 1.30 | | 1.30 | |
| C_1 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_2 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_m | 0.90 | | 0.90 | |
| R | 4.21 | | 6.59 | |
| α | 0.062 | | 0.062 | |
| V_y | 207000 | | 207000 | |
| C_3 | 1.00 | | 1.00 | |
| Target Displacement | 0.055 | m | 0.126 | m |

การคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างสูง 3 ชั้น ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว
กรณีฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินทราย

| Sand | Design EQ | | MAX. EQ | |
|--|-----------|---|---------|---|
| คำนวณแรงเฉือนที่ฐานของอาคาร | | | | |
| คาบการสั่นของอาคาร (T) | 0.343 | s | 0.343 | s |
| ค่าความเร่งตอบสนองสำหรับออกแบบของอาคาร (S_d) | 0.090 | g | 0.135 | g |
| ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) | 3 | - | 3 | - |
| ตัวประกอบความสำคัญ (I) | 1 | - | 1 | - |
| สปส.ผลตอบสนองแผ่นดินไหว (C_s) | 0.029 | g | 0.044 | g |
| น้ำหนักของโครงสร้างประสิทธิผล (w) | 1183762 | N | 1183762 | N |
| แรงเฉือนที่ฐานของอาคาร (V) | 28379 | N | 36532 | N |
| คำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย | | | | |
| C_0 | 1.30 | | 1.30 | |
| C_1 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_2 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_m | 0.90 | | 0.90 | |
| R | 4.30 | | 6.73 | |
| α | 0.062 | | 0.062 | |
| V_y | 207000 | | 207000 | |
| C_3 | 1.00 | | 1.00 | |
| Target Displacement | 0.058 | m | 0.132 | m |

การคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างสูง 3 ชั้น ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว
กรณีฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวอ่อน

| Soft Clay | Design EQ | | MAX. EQ | |
|--|-----------|---|---------|---|
| คำนวณแรงเฉือนที่ฐานของอาคาร | | | | |
| คาบการสั่นของอาคาร (T) | 0.364 | s | 0.364 | s |
| ค่าความเร่งตอบสนองสำหรับออกแบบของอาคาร (S_d) | 0.095 | g | 0.142 | g |
| ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) | 3 | - | 3 | - |
| ตัวประกอบความสำคัญ (I) | 1 | - | 1 | - |
| สปส.ผลตอบสนองแผ่นดินไหว (C_s) | 0.028 | g | 0.043 | g |
| น้ำหนักของโครงสร้างประสิทธิผล (w) | 1183762 | N | 1183762 | N |
| แรงเฉือนที่ฐานของอาคาร (V) | 25912 | N | 35428 | N |
| คำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย | | | | |
| C_0 | 1.30 | | 1.30 | |
| C_1 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_2 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_m | 0.90 | | 0.90 | |
| R | 4.35 | | 6.78 | |
| α | 0.062 | | 0.062 | |
| V_y | 207000 | | 207000 | |
| C_3 | 1.00 | | 1.00 | |
| Target Displacement | 0.065 | m | 0.147 | m |

การคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างสูง 3 ชั้น ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว
กรณีฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวแข็ง

| Hard Clay | Design EQ | | MAX. EQ | |
|--|-----------|---|---------|---|
| คำนวณแรงเฉือนที่ฐานของอาคาร | | | | |
| คาบการสั่นของอาคาร (T) | 0.330 | s | 0.330 | s |
| ค่าความเร่งตอบสนองสำหรับออกแบบของอาคาร (S_d) | 0.089 | g | 0.133 | g |
| ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) | 3 | - | 3 | - |
| ตัวประกอบความสำคัญ (I) | 1 | - | 1 | - |
| สปส.ผลตอบสนองแผ่นดินไหว (C_s) | 0.028 | g | 0.042 | g |
| น้ำหนักของโครงสร้างประสิทธิผล (w) | 1183762 | N | 1183762 | N |
| แรงเฉือนที่ฐานของอาคาร (V) | 28579 | N | 36256 | N |
| คำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย | | | | |
| C_0 | 1.30 | | 1.30 | |
| C_1 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_2 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_m | 0.90 | | 0.90 | |
| R | 4.26 | | 6.69 | |
| α | 0.062 | | 0.062 | |
| V_y | 207000 | | 207000 | |
| C_3 | 1.00 | | 1.00 | |
| Target Displacement | 0.055 | m | 0.125 | m |

การคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างสูง 3 ชั้น ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว
กรณีฐานรากแบบยึดแน่น

| Fixed | Design EQ | | MAX. EQ | |
|--|-----------|---|---------|---|
| คำนวณแรงเฉือนที่ฐานของอาคาร | | | | |
| คาบการสั่นของอาคาร (T) | 0.287 | s | 0.287 | s |
| ค่าความเร่งตอบสนองสำหรับออกแบบของอาคาร (S_d) | 0.084 | g | 0.125 | g |
| ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) | 5 | - | 5 | - |
| ตัวประกอบความสำคัญ (I) | 1 | - | 1 | - |
| สปส.ผลตอบสนองแผ่นดินไหว (C_s) | 0.028 | g | 0.042 | g |
| น้ำหนักของโครงสร้างประสิทธิผล (w) | 1337562 | N | 1337562 | N |
| แรงเฉือนที่ฐานของอาคาร (V) | 29712 | N | 42228 | N |
| คำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย | | | | |
| C_0 | 1.30 | | 1.30 | |
| C_1 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_2 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_m | 0.90 | | 0.90 | |
| R | 4.26 | | 6.24 | |
| α | 0.062 | | 0.062 | |
| V_y | 256000 | | 256000 | |
| C_3 | 1.00 | | 1.00 | |
| Target Displacement | 0.033 | m | 0.080 | m |

การคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างสูง 3 ชั้น ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว
กรณีฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินทราย

| Sand | Design EQ | | MAX. EQ | |
|--|-----------|---|---------|---|
| คำนวณแรงเฉือนที่ฐานของอาคาร | | | | |
| คาบการสั่นของอาคาร (T) | 0.315 | s | 0.315 | s |
| ค่าความเร่งตอบสนองสำหรับออกแบบของอาคาร (S_d) | 0.087 | g | 0.131 | g |
| ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) | 5 | - | 5 | - |
| ตัวประกอบความสำคัญ (I) | 1 | - | 1 | - |
| สปส.ผลตอบสนองแผ่นดินไหว (C_s) | 0.028 | g | 0.042 | g |
| น้ำหนักของโครงสร้างประสิทธิผล (w) | 1337562 | N | 1337562 | N |
| แรงเฉือนที่ฐานของอาคาร (V) | 27312 | N | 40128 | N |
| คำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย | | | | |
| C_0 | 1.30 | | 1.30 | |
| C_1 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_2 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_m | 0.90 | | 0.90 | |
| R | 4.28 | | 6.70 | |
| α | 0.062 | | 0.062 | |
| V_y | 256000 | | 256000 | |
| C_3 | 1.00 | | 1.00 | |
| Target Displacement | 0.039 | m | 0.089 | m |

การคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างสูง 3 ชั้น ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว
กรณีฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวอ่อน

| Soft Clay | Design EQ | | MAX. EQ | |
|--|-----------|---|---------|---|
| คำนวณแรงเฉือนที่ฐานของอาคาร | | | | |
| คาบการสั่นของอาคาร (T) | 0.325 | s | 0.325 | s |
| ค่าความเร่งตอบสนองสำหรับออกแบบของอาคาร (S_d) | 0.092 | g | 0.139 | g |
| ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) | 5 | - | 5 | - |
| ตัวประกอบความสำคัญ (I) | 1 | - | 1 | - |
| สปส.ผลตอบสนองแผ่นดินไหว (C_s) | 0.028 | g | 0.042 | g |
| น้ำหนักของโครงสร้างประสิทธิผล (w) | 1337562 | N | 1337562 | N |
| แรงเฉือนที่ฐานของอาคาร (V) | 24260 | N | 38692 | N |
| คำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย | | | | |
| C_0 | 1.30 | | 1.30 | |
| C_1 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_2 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_m | 0.90 | | 0.90 | |
| R | 4.31 | | 6.74 | |
| α | 0.062 | | 0.062 | |
| V_y | 256000 | | 256000 | |
| C_3 | 1.00 | | 1.00 | |
| Target Displacement | 0.041 | m | 0.092 | m |

การคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างสูง 3 ชั้น ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว
กรณีฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวแข็ง

| Hard Clay | Design EQ | | MAX. EQ | |
|--|-----------|---|---------|---|
| คำนวณแรงเฉือนที่ฐานของอาคาร | | | | |
| คาบการสั่นของอาคาร (T) | 0.302 | s | 0.302 | s |
| ค่าความเร่งตอบสนองสำหรับออกแบบของอาคาร (S_d) | 0.085 | g | 0.128 | g |
| ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) | 5 | - | 5 | - |
| ตัวประกอบความสำคัญ (I) | 1 | - | 1 | - |
| สปส.ผลตอบสนองแผ่นดินไหว (C_s) | 0.028 | g | 0.042 | g |
| น้ำหนักของโครงสร้างประสิทธิผล (w) | 1383762 | N | 1383762 | N |
| แรงเฉือนที่ฐานของอาคาร (V) | 28412 | N | 40238 | N |
| คำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย | | | | |
| C_0 | 1.30 | | 1.30 | |
| C_1 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_2 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_m | 0.90 | | 0.90 | |
| R | 4.24 | | 6.67 | |
| α | 0.062 | | 0.062 | |
| V_y | 256000 | | 256000 | |
| C_3 | 1.0 | | 1.0 | |
| Target Displacement | 0.038 | m | 0.086 | m |

การคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างสูง 5 ชั้น ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว
กรณีฐานรากแบบยึดแน่น

| Fixed | Design EQ | | MAX. EQ | |
|--|-----------|---|---------|---|
| คำนวณแรงเฉือนที่ฐานของอาคาร | | | | |
| คาบการสั่นของอาคาร (T) | 0.486 | s | 0.486 | s |
| ค่าความเร่งตอบสนองสำหรับออกแบบของอาคาร (S_d) | 0.100 | g | 0.150 | g |
| ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) | 5 | - | 5 | - |
| ตัวประกอบความสำคัญ (I) | 1.25 | - | 1.25 | - |
| สปส.ผลตอบสนองแผ่นดินไหว (C_s) | 0.016 | g | 0.023 | g |
| น้ำหนักของโครงสร้างประสิทธิผล (w) | 1537562 | N | 1537562 | N |
| แรงเฉือนที่ฐานของอาคาร (V) | 29712 | N | 42228 | N |
| คำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย | | | | |
| C_0 | 1.42 | | 1.42 | |
| C_1 | 1.24 | | 1.24 | |
| C_2 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_m | 0.90 | | 0.90 | |
| R | 6.15 | | 9.24 | |
| α | 0.056 | | 0.056 | |
| V_y | 256000 | | 256000 | |
| C_3 | 1.00 | | 1.00 | |
| Target Displacement | 0.132 | m | 0.190 | m |

การคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างสูง 5 ชั้น ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว
กรณีฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินทราย

| Sand | Design EQ | | MAX. EQ | |
|--|-----------|---|---------|---|
| คำนวณแรงเฉือนที่ฐานของอาคาร | | | | |
| คาบการสั่นของอาคาร (T) | 0.550 | s | 0.550 | s |
| ค่าความเร่งตอบสนองสำหรับออกแบบของอาคาร (S_d) | 0.104 | g | 0.156 | g |
| ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) | 5 | - | 5 | - |
| ตัวประกอบความสำคัญ (I) | 1.25 | - | 1.25 | - |
| สปส.ผลตอบสนองแผ่นดินไหว (C_s) | 0.016 | g | 0.024 | g |
| น้ำหนักของโครงสร้างประสิทธิผล (w) | 1537562 | N | 1537562 | N |
| แรงเฉือนที่ฐานของอาคาร (V) | 27312 | N | 40128 | N |
| คำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย | | | | |
| C_0 | 1.42 | | 1.42 | |
| C_1 | 1.24 | | 1.24 | |
| C_2 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_m | 0.90 | | 0.90 | |
| R | 6.39 | | 9.61 | |
| α | 0.062 | | 0.062 | |
| V_y | 256000 | | 256000 | |
| C_3 | 1.00 | | 1.00 | |
| Target Displacement | 0.159 | m | 0.254 | m |

การคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างสูง 5 ชั้น ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว
กรณีฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวอ่อน

| Soft Clay | Design EQ | | MAX. EQ | |
|--|-----------|---|---------|---|
| คำนวณแรงเฉือนที่ฐานของอาคาร | | | | |
| คาบการสั่นของอาคาร (T) | 0.644 | s | 0.644 | s |
| ค่าความเร่งตอบสนองสำหรับออกแบบของอาคาร (S_d) | 0.109 | g | 0.165 | g |
| ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) | 5 | - | 5 | - |
| ตัวประกอบความสำคัญ (I) | 1.25 | - | 1.25 | - |
| สปส.ผลตอบสนองแผ่นดินไหว (C_s) | 0.028 | g | 0.042 | g |
| น้ำหนักของโครงสร้างประสิทธิผล (w) | 1537562 | N | 1537562 | N |
| แรงเฉือนที่ฐานของอาคาร (V) | 24260 | N | 38692 | N |
| คำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย | | | | |
| C_0 | 1.42 | | 1.42 | |
| C_1 | 1.24 | | 1.24 | |
| C_2 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_m | 0.90 | | 0.9 | |
| R | 6.74 | | 10.14 | |
| α | 0.062 | | 0.062 | |
| V_y | 256000 | | 256000 | |
| C_3 | 1.00 | | 1.00 | |
| Target Displacement | 0.179 | m | 0.309 | m |

การคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างสูง 5 ชั้น ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว
กรณีฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวแข็ง

| Hard Clay | Design EQ | | MAX. EQ | |
|--|-----------|---|---------|---|
| คำนวณแรงเฉือนที่ฐานของอาคาร | | | | |
| คาบการสั่นของอาคาร (T) | 0.517 | s | 0.517 | s |
| ค่าความเร่งตอบสนองสำหรับออกแบบของอาคาร (S_d) | 0.102 | g | 0.153 | g |
| ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) | 5 | - | 5 | - |
| ตัวประกอบความสำคัญ (I) | 1.25 | - | 1.25 | - |
| สปส.ผลตอบสนองแผ่นดินไหว (C_s) | 0.028 | g | 0.042 | g |
| น้ำหนักของโครงสร้างประสิทธิผล (w) | 1483762 | N | 1483762 | N |
| แรงเฉือนที่ฐานของอาคาร (V) | 28412 | N | 40238 | N |
| คำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย | | | | |
| C_0 | 1.42 | | 1.42 | |
| C_1 | 1.24 | | 1.24 | |
| C_2 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_m | 0.90 | | 0.90 | |
| R | 6.27 | | 9.42 | |
| α | 0.062 | | 0.062 | |
| V_y | 256000 | | 256000 | |
| C_3 | 1.00 | | 1.00 | |
| Target Displacement | 0.140 | m | 0.222 | m |

การคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างสูง 7 ชั้น ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว
กรณีฐานรากแบบยึดแน่น

| Fixed | Design EQ | | MAX. EQ | |
|--|-----------|---|---------|---|
| คำนวณแรงเฉือนที่ฐานของอาคาร | | | | |
| คาบการสั่นของอาคาร (T) | 0.658 | s | 0.658 | s |
| ค่าความเร่งตอบสนองสำหรับออกแบบของอาคาร (S_d) | 0.112 | g | 0.169 | g |
| ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) | 5 | - | 5 | - |
| ตัวประกอบความสำคัญ (I) | 1.25 | - | 1.25 | - |
| สปส.ผลตอบสนองแผ่นดินไหว (C_s) | 0.028 | g | 0.042 | g |
| น้ำหนักของโครงสร้างประสิทธิผล (w) | 1837562 | N | 1837562 | N |
| แรงเฉือนที่ฐานของอาคาร (V) | 29712 | N | 47228 | N |
| คำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย | | | | |
| C_0 | 1.48 | | 1.48 | |
| C_1 | 1.13 | | 1.13 | |
| C_2 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_m | 0.90 | | 0.90 | |
| R | 7.26 | | 11.24 | |
| α | 0.062 | | 0.062 | |
| V_y | 236000 | | 236000 | |
| C_3 | 1.00 | | 1.00 | |
| Target Displacement | 0.213 | m | 0.308 | m |

การคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างสูง 7 ชั้น ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว
กรณีฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินทราย

| Sand | Design EQ | | MAX. EQ | |
|--|-----------|---|---------|---|
| คำนวณแรงเฉือนที่ฐานของอาคาร | | | | |
| คาบการสั่นของอาคาร (T) | 0.725 | s | 0.725 | s |
| ค่าความเร่งตอบสนองสำหรับออกแบบของอาคาร (S_d) | 0.116 | g | 0.175 | g |
| ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) | 5 | - | 5 | - |
| ตัวประกอบความสำคัญ (I) | 1.25 | - | 1.25 | - |
| สปส.ผลตอบสนองแผ่นดินไหว (C_s) | 0.028 | g | 0.042 | g |
| น้ำหนักของโครงสร้างประสิทธิผล (w) | 1737562 | N | 1737562 | N |
| แรงเฉือนที่ฐานของอาคาร (V) | 29312 | N | 47128 | N |
| คำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย | | | | |
| C_0 | 1.48 | | 1.48 | |
| C_1 | 1.13 | | 1.13 | |
| C_2 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_m | 0.90 | | 0.90 | |
| R | 7.71 | | 11.61 | |
| α | 0.062 | | 0.062 | |
| V_y | 256000 | | 256000 | |
| C_3 | 1.00 | | 1.00 | |
| Target Displacement | 0.259 | m | 0.389 | m |

การคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างสูง 7 ชั้น ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว
กรณีฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวอ่อน

| Soft Clay | Design EQ | | MAX. EQ | |
|--|-----------|---|---------|---|
| คำนวณแรงเฉือนที่ฐานของอาคาร | | | | |
| คาบการสั่นของอาคาร (T) | 0.826 | s | 0.826 | s |
| ค่าความเร่งตอบสนองสำหรับออกแบบของอาคาร (S_d) | 0.122 | g | 0.184 | g |
| ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) | 5 | - | 5 | - |
| ตัวประกอบความสำคัญ (I) | 1.25 | - | 1.25 | - |
| สปส.ผลตอบสนองแผ่นดินไหว (C_s) | 0.028 | g | 0.042 | g |
| น้ำหนักของโครงสร้างประสิทธิผล (w) | 1737562 | N | 1737562 | N |
| แรงเฉือนที่ฐานของอาคาร (V) | 31260 | N | 50692 | N |
| คำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย | | | | |
| C_0 | 1.48 | | 1.48 | |
| C_1 | 1.13 | | 1.13 | |
| C_2 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_m | 0.90 | | 0.90 | |
| R | 8.12 | | 12.23 | |
| α | 0.062 | | 0.062 | |
| V_y | 256000 | | 256000 | |
| C_3 | 1.0 | | 1.0 | |
| Target Displacement | 0.349 | m | 0.525 | m |

การคำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างสูง 7 ชั้น ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว
กรณีฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง

| Hard Clay | Design EQ | | MAX. EQ | |
|--|-----------|---|---------|---|
| คำนวณแรงเฉือนที่ฐานของอาคาร | | | | |
| คาบการสั่นของอาคาร (T) | 0.694 | s | 0.694 | s |
| ค่าความเร่งตอบสนองสำหรับออกแบบของอาคาร (S_d) | 0.114 | g | 0.172 | g |
| ตัวประกอบปรับผลตอบสนอง (R) | 5 | - | 5 | - |
| ตัวประกอบความสำคัญ (I) | 1.25 | - | 1.25 | - |
| สปส.ผลตอบสนองแผ่นดินไหว (C_s) | 0.028 | g | 0.042 | g |
| น้ำหนักของโครงสร้างประสิทธิผล (w) | 1783762 | N | 1783762 | N |
| แรงเฉือนที่ฐานของอาคาร (V) | 28412 | N | 46238 | N |
| คำนวณค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย | | | | |
| C_0 | 1.48 | | 1.48 | |
| C_1 | 1.13 | | 1.13 | |
| C_2 | 1.00 | | 1.00 | |
| C_m | 0.90 | | 0.90 | |
| R | 7.59 | | 11.43 | |
| α | 0.062 | | 0.062 | |
| V_y | 256000 | | 256000 | |
| C_3 | 1.00 | | 1.00 | |
| Target Displacement | 0.235 | m | 0.367 | m |

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์

อิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับฐานรากชนิดเขต ต่อผลตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว Effects of Strap Footing-Structure Interactions on Structural Responses Under Earthquake Loadings

วิศรุต จันทร์สุวรรณ^{1,*} สุชาติ ลีมกตัญญู² และ วรเทพ แซ่ล่อง³

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา

³ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา

*Corresponding author; E-mail address: 6410120050@email.psu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากรณีของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้นที่ตั้งอยู่บนฐานรากชนิดเขตที่มีการโยกตัว 2 กรณี ได้แก่ อาคารที่ไม่ได้ออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหวและอาคารที่ออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหว ตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวของมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง มยพ.1302-52 อีกทั้งศึกษาอิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างฐานรากกับดิน โดยพิจารณาขนาดของฐานรากชนิดเขตที่ตั้งอยู่บนชั้นดิน 3 ชนิด ได้แก่ ดินทรายดินเหนียวอ่อน และดินเหนียวแข็ง โดยเปรียบเทียบกับฐานรากแบบยึดแน่น และประเมินความเสียหายของโครงสร้างตามมาตรฐาน Federal Emergency Management Agency, (FEMA356) โดยพิจารณาค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนโครงสร้างเมื่อรับแรงแผ่นดินไหว จากการศึกษาพบว่า โครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากชนิดเขตที่มีการโยกตัวบนชั้นดินเหนียวอ่อน สามารถลดแรงเฉือนที่ฐานและความเสียหายของโครงสร้างที่เกิดขึ้นจากแรงแผ่นดินไหวได้ดีกว่าฐานรากแบบยึดแน่น

คำสำคัญ: ฐานรากชนิดเขต, คานสายรัด, แรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว, การประเมินโครงสร้างรับแรงแผ่นดินไหว, การปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก

Abstract

This article focused on a three-storey reinforced concrete building structure located on strap footing foundations and studied two cases: the non-seismic design building and the earthquake-resistant design building. The study took into consideration the building design standards for earthquake resistance of the Department of Public Works and Town & Country Planning standards 1302-52, as well as the interaction between the foundation structure and the soil. The study compared the size of the strap footing foundations located

near the three types of soil layers (sand, soft clay and hard clay) to compared with fixed foundations and assessed structural damage according to Federal Emergency Management Agency standards, (FEMA 356) by considering the plastic rotation angle that occurs in structural parts during earthquakes. The results showed that the structure on strap footing foundations on soft clay layers were able to reduce base shear and structural damage caused by earthquakes more effectively than those with fixed foundations.

Keywords: Strap footing foundations, Strap beam, Seismic of earthquake, Performance-based seismic assessment, Soil-structure interaction

1. บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยทางภาคเหนือได้รับผลกระทบจากแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างอาคาร อีกทั้งประเทศไทยยังไม่ได้มีการบังคับใช้ตามประกาศกฎกระทรวง กำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคารและพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2564 แก้อาคารบ้านเรือนหรือสิ่งก่อสร้างขนาดเล็ก [1-2] โดยเมื่อวันที่ 24 ธันวาคม พ.ศ. 2564 ที่ผ่านมา จุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว ณ ประเทศลาว ได้เกิดแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวขนาด 5.7 แมกนิจูด มีผลกระทบต่อจังหวัดเชียงรายประเทศไทย ทำให้อาคารสั่น ประตูและหน้าต่างที่เป็นกระจกสั่นรุนแรง (อ้างอิงจาก สถิติข้อมูลแผ่นดินไหว กองเฝ้าระวังแผ่นดินไหว)

การก่อสร้างอาคารหรือบ้านเรือน ส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญในการก่อสร้าง คือ โครงสร้างฐานราก ซึ่งเป็นโครงสร้างที่อยู่ในชั้นดิน โดยปกติแล้วโครงสร้างฐานรากจะออกแบบให้เป็นฐานรากแบบยึดแน่น แต่หลักความเป็นจริง โครงสร้างฐานรากต้องรับแรงกระทำตามแนวแกนและแรงกระทำทางด้านข้างด้วย เนื่องจากมีแรงดันดินด้านข้าง แรงดันน้ำใต้ดินหรือแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวกระทำต่อโครงสร้างฐานราก อาจทำให้

โครงสร้างฐานรากเกิดการทรุดตัวหรือพลิกคว่ำ ซึ่งมีผลกระทบต่อโครงสร้างอาคารทั้งหมด

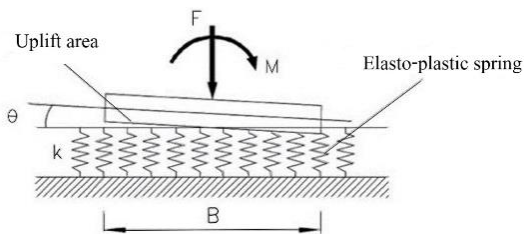
โดยทำการศึกษารณีของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้นบนฐานรากแบบชิดเขต (Strap Footing) และคานยึด (Strap beam) ที่มีการโยกตัว โดยมุ่งเน้นที่จะหาผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับฐานราก [3-7] เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากแบบยึดแน่นและโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากชิดเขตที่มีการโยกตัวภายใต้แรงแผ่นดินไหว แบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ออกแบบโครงสร้างอาคารตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวของมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยพ.1302-52) และประกาศกฎกระทรวง พ.ศ.2564 และกรณีที่ไม่ได้ออกแบบโครงสร้างต้านทานแรงแผ่นดินไหว

โดยพิจารณาขนาดของฐานรากชิดเขตบนชั้นดิน 3 ชนิด ได้แก่ ดินทราย[8], ดินเหนียวอ่อน และดินเหนียวแข็ง โดยสร้างแบบจำลองโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้นบนฐานรากชิดเขตบนชั้นดินต่างๆ โดยใช้โปรแกรม SeismoStruct [9] เพื่อนำมาวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีสถิตศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear Static Analysis) หรือ วิถีวิเคราะห์โดยการผลักด้านข้าง (Pushover) เพื่อหาผลตอบสนองและประเมินความเสียหายของโครงสร้างตามมาตรฐาน Federal Emergency Management Agency [10-11]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองฐานราก

2.1 แบบจำลองฐานรากของ Winkler ที่มีการยกตัว

Winkler [12-13] มีสมมติฐานคือ ดินและฐานรากมีความสัมพันธ์ในรูปแบบสปริงที่มีระยะห่างเท่าๆกัน โดยสปริงแต่ละตัวมีความอิสระต่อกัน ซึ่งเมื่อมีแรงกระทำต่อฐานราก จะทำให้ฐานรากเกิดการทรุดตัวที่จุดที่มีแรงกระทำเท่านั้น

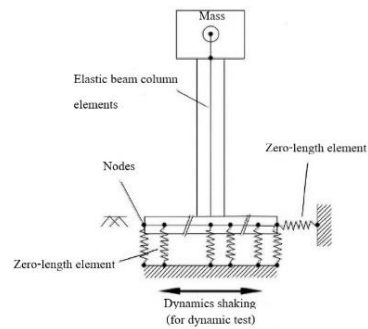


รูปที่ 1 แบบจำลองฐานรากอีลาสติก-พลาสติกแบบ Winkler

2.2 หลักการของ Raychowdhury และ Hutchinson

Raychowdhury และ Hutchinson [14-15] ได้ทำการสร้างแบบจำลองโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานราก และคิดผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก โดยแบ่งองค์ประกอบเป็นชั้นส่วนย่อยๆด้วยจุดต่อเพื่อใช้ในการใส่สปริงตามสมมติฐานของ Winkler โดยสปริงในแนวตั้ง ใช้

สำหรับแทนพฤติกรรมของดินชั้นรองรับและสปริงในแนวราบ ใช้สำหรับแทนพฤติกรรมการรับแรงทางด้านข้างของฐานราก



รูปที่ 2 แบบจำลองอุดมคติของระบบโครงสร้างกับฐานราก

3. สร้างแบบจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรม SeismoStruct

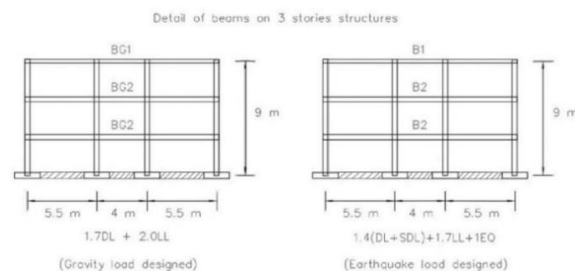
3.1 แบบจำลองโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้น

ศึกษาโครงสร้างอาคารที่ตั้งอยู่บนฐานรากชิดเขต จึงได้ทำการออกแบบแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่เป็นลักษณะโครงสร้างข้อแข็ง ใน 2 มิติ แบบจำลองจะมีแค่ชิ้นส่วนที่สำคัญ คือ คาน เสา และฐานราก โดยแบบจำลองโครงสร้างอาคาร 3 ชั้น แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ อาคารที่ไม่ได้ออกแบบให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหว และอาคารที่ออกแบบให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหว และออกแบบขนาดของฐานรากชิดเขตบนชั้นดินชนิดต่างๆ

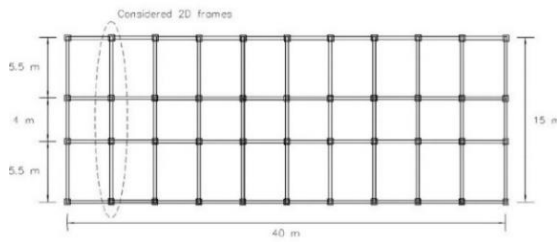
สำหรับรายละเอียดของกำลังวัสดุที่ใช้ในการออกแบบอาคารทั้ง 2 ประเภท แสดงดังตารางที่ 1 รายละเอียดของอาคารแสดงดังรูปที่ 3-4 รายละเอียดของฐานรากชิดเขต แสดงดังรูปที่ 5-6 และขนาดของฐานรากชิดเขตบนชั้นดินที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 กำลังของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้าง

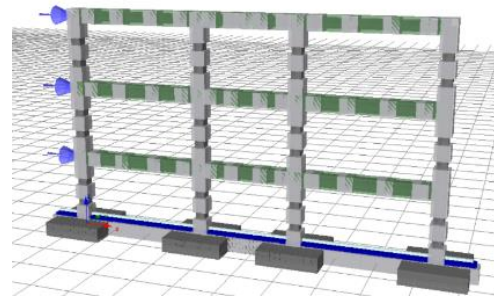
| อาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว | | อาคารออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว | |
|--------------------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|
| วัสดุ | ค่ากำลังที่ใช้ | วัสดุ | ค่ากำลังที่ใช้ |
| คอนกรีต | 19613 kPa | คอนกรีต | 23536 kPa |
| เหล็กเสริม | 294199 kPa | เหล็กเสริม | 294199 kPa |



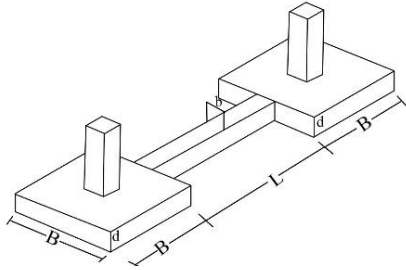
รูปที่ 3 ลักษณะของแบบจำลองโครงสร้างอาคาร 3 ชั้น



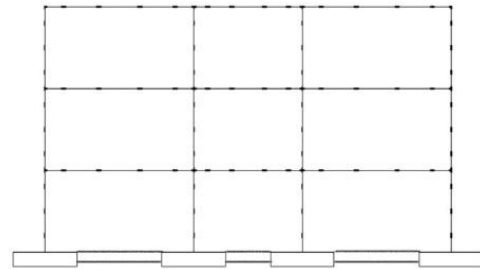
รูปที่ 4 รายละเอียดและตำแหน่งของคานและเสา



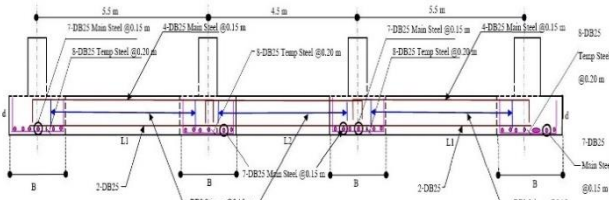
รูปที่ 7 ลักษณะของแบบจำลองโครงสร้างอาคาร 3 ชั้น



รูปที่ 5 รายละเอียดของฐานรากชนิดเขต



รูปที่ 8 การแบ่งชิ้นส่วนและจุดต่อของแบบจำลองโปรแกรม



รูปที่ 6 รายละเอียดเหล็กเสริมของฐานรากชนิดเขต

ตารางที่ 2 ขนาดของฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินที่แตกต่างกัน

| Design | Soil | Footing Size | | Strap Beam Size | | |
|----------------|-----------|--------------|-------|-----------------|--------------------|--------------------|
| | | B (m) | d (m) | b (m) | L ₁ (m) | L ₂ (m) |
| Gravity Design | Sand | 2.40 | 0.60 | 0.60 | 3.10 | 1.60 |
| | Soft Clay | 2.70 | 0.60 | 0.60 | 2.80 | 1.30 |
| | Hard Clay | 1.70 | 0.60 | 0.60 | 3.80 | 2.30 |
| EQ. Design | Sand | 2.50 | 0.60 | 0.60 | 3.00 | 1.50 |
| | Soft Clay | 2.85 | 0.60 | 0.60 | 2.65 | 1.15 |
| | Hard Clay | 1.75 | 0.60 | 0.60 | 3.75 | 2.25 |

ลักษณะแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ได้แสดงดังรูปที่ 7 ในบทความนี้ได้ทำการแบ่งชิ้นส่วนของคานและเสาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยตามระยะหยุดเหล็กและระยะห่างของเหล็กปลอก ดังแสดงดังรูปที่ 8 เพื่อใช้ในการป้อนค่าของวัสดุที่ใช้และหน้าตัดของชิ้นส่วนที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริม [16-17] ที่ใช้ในแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ของคอนกรีตที่ใช้ในแบบจำลองโครงสร้างอาคาร

| Mander et al. nonlinear concrete model | | | | |
|--|----------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Concrete | Compressive strength (kPa) | Tensile strength (kPa) | Strain at peak stress (m/m) | Confinement factor (-) |
| Cover1 | 19620 | 0 | 0.002 | 1.000 |
| BG1A | 25363 | 0 | 0.002 | 1.293 |
| BG1B | 22624 | 0 | 0.002 | 1.153 |
| BG1C | 25049 | 0 | 0.002 | 1.277 |
| BG2A | 23989 | 0 | 0.002 | 1.223 |
| BG2B | 22212 | 0 | 0.002 | 1.132 |
| BG2C | 23717 | 0 | 0.002 | 1.209 |
| CG1T | 23307 | 0 | 0.002 | 1.188 |
| CG1H | 24886 | 0 | 0.002 | 1.268 |
| CG1HBG1 | 25098 | 0 | 0.002 | 1.279 |
| CG1HBG2 | 25198 | 0 | 0.002 | 1.284 |
| Cover2 | 23544 | 0 | 0.002 | 1.000 |
| B1A | 25661 | 0 | 0.002 | 1.090 |
| B1B | 24648 | 0 | 0.002 | 1.047 |
| B2A | 25533 | 0 | 0.002 | 1.085 |
| B2B | 24665 | 0 | 0.002 | 1.048 |
| C1T | 27273 | 0 | 0.002 | 1.158 |
| C1H | 28893 | 0 | 0.002 | 1.227 |
| SB1 | 29117 | 0 | 0.002 | 1.237 |
| SB2 | 29216 | 0 | 0.002 | 1.241 |

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ของเหล็กที่ใช้ในแบบจำลองโครงสร้างอาคาร

| Menegotto-Pinto Steel Model | | | |
|---|---------|---|--------|
| Modulus of elastic (kPa) | 2.00E+8 | Yield strength (kPa) | 300000 |
| Strain hardening parameter | 0.2 | Transition curve initial shape parameter | 20 |
| | | Transition curve shape calibrating coeff.A1 | 18.5 |
| Fracture/buckling strain | 0.06 | Transition curve shape calibrating coeff.A3 | 0.025 |
| Transition curve shape calibrating coeff.A2 | 0.15 | Transition curve shape calibrating coeff.A4 | 2 |

4. ผลการศึกษา

4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ด้วยวิธีการผลักทางด้านข้าง

4.1.1 ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้าง

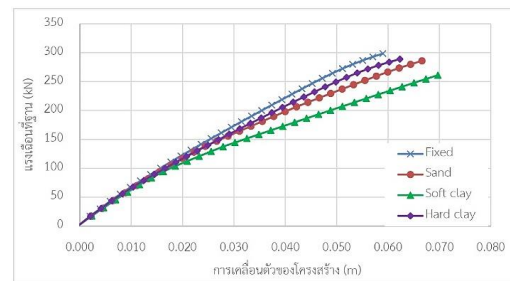
ค่าคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้าง (Fundamental Period of Structures) และค่าการเคลื่อนที่เป้าหมาย (Target Displacement) [18-19] ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ไม่คิดผลของฐานราก คือ ฐานรากแบบยึดแน่น และฐานรากที่คิดผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก คือ ฐานรากที่มีการโยกตัว ซึ่งตั้งอยู่บนดิน 3 ประเภท คือ ดินทราย ดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวแข็ง ทั้งในกรณีของ Design Earthquake (DEQ) และกรณีของ Maximum Considered Earthquake (MCEQ) ดังแสดงตารางที่ 5 โดยค่าคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้างเป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม SeismoStruct ส่วนการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างคำนวณตามมาตรฐานของ FEMA356

ตารางที่ 5 ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายของโครงสร้าง

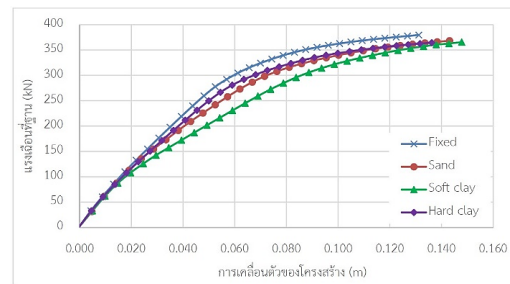
| ประเภทของฐานราก | กรณีของแผ่นดินไหว | ค่าคาบการสั่น (sec) | ค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย (m) |
|-----------------------------------|-------------------|---------------------|------------------------------|
| ฐานรากแบบยึดแน่น | DEQ | 0.315 | 0.0550 |
| | MCEQ | 0.315 | 0.1266 |
| ฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินทราย | DEQ | 0.343 | 0.0588 |
| | MCEQ | 0.343 | 0.1325 |
| ฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวอ่อน | DEQ | 0.364 | 0.0658 |
| | MCEQ | 0.364 | 0.1474 |
| ฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวแข็ง | DEQ | 0.330 | 0.0551 |
| | MCEQ | 0.330 | 0.1256 |

4.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานและค่าการเคลื่อนตัวที่จุดสูงสุดของโครงสร้าง

กราฟการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเฉือนที่ฐานรากของโครงสร้างและค่าการเคลื่อนตัวที่จุดสูงสุดของโครงสร้างดังแสดงรูปที่ 9-10 โดยจะพบว่าแรงเฉือนที่ฐานกรณีฐานรากแบบยึดแน่น มีค่ามากกว่ากรณีของฐานรากชนิดเขตนที่มีการโยกตัว



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง (DEQ)



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง (MCEQ)

ตารางที่ 6 แสดงค่ามากที่สุดของแรงเฉือนที่ฐานในแต่ละกรณี โดยแรงเฉือนของกรณีฐานรากชนิดเขตนที่มีการโยกตัวมีค่าที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีของฐานรากแบบยึดแน่น จึงเห็นได้ว่า การโยกตัวของฐานรากชนิดเขตนสามารถลดแรงเฉือนที่ฐานลงได้เล็กน้อยในความแรงระดับ Maximum Considered Earthquake

ตารางที่ 6 ค่าสูงสุดของแรงเฉือนที่ฐานในแต่ละกรณี

| กรณี | แรงเฉือนที่ฐาน (kN) | | | |
|-----------------------------------|---------------------|----------|-----------|----------|
| | DEQ | | MCEQ | |
| | ค่าสูงสุด | ลดลง (%) | ค่าสูงสุด | ลดลง (%) |
| ฐานรากแบบยึดแน่น | 298 | - | 380 | - |
| ฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินทราย | 283 | 5.0 | 365 | 3.9 |
| ฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวอ่อน | 259 | 13.1 | 354 | 6.8 |
| ฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวแข็ง | 285 | 4.4 | 362 | 4.7 |

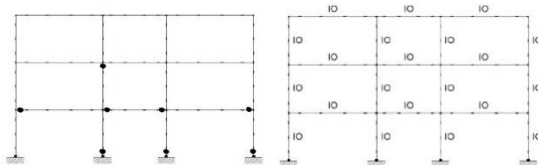
4.1.3 การประเมินระดับความเสียหายของโครงสร้าง

จากการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กผ่านโปรแกรม SeismoStruct โดยใช้วิธี Static Pushover Analysis จะได้ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้างแสดงดังตารางที่ 7

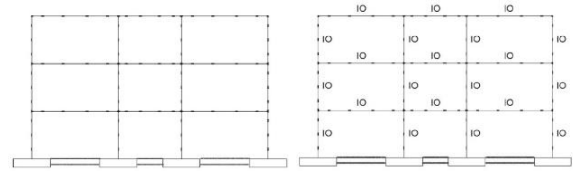
เมื่อพิจารณาจากระดับความเสียหายของโครงสร้างตามมาตรฐานของ FEMA356 พบว่า ในระดับแผ่นดินไหว Design Earthquake โครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากทั้ง 4 ประเภท สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานระดับ Immediate Occupancy (IO) ส่วนในระดับแผ่นดินไหว Maximum Considered Earthquake มีบางส่วนของโครงสร้างที่ไม่ผ่านเกณฑ์ Immediate Occupancy (IO) แต่ผ่านเกณฑ์ในระดับ Life Safety (LS) สำหรับจุดที่เกิดมุมบิดพลาสติกในโครงสร้างและระดับความเสียหายของโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 11-18

ตารางที่ 7 ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น

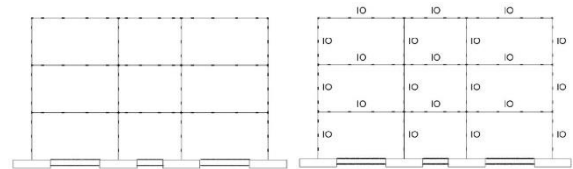
| ประเภทของฐานราก | กรณีของแผ่นดินไหว | ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้น (rad) | ค่ามาตรฐานของ FEMA356 | |
|----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | | IO | LS |
| ฐานรากแบบยึดแน่น | DEQ | 0.00021 - 0.0012 | Beam 0.01 Column0.005 | Beam 0.02 Column0.015 |
| | MCEQ | 0.00035 - 0.0176 | Beam 0.01 Column0.005 | Beam 0.02 Column0.015 |
| ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย | DEQ | - | Beam 0.01 Column0.005 | Beam 0.02 Column0.015 |
| | MCEQ | 0.00029 - 0.0165 | Beam 0.01 Column0.005 | Beam 0.02 Column0.015 |
| ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน | DEQ | - | Beam 0.01 Column0.005 | Beam 0.02 Column0.015 |
| | MCEQ | 0.0008 - 0.0142 | Beam 0.01 Column0.005 | Beam 0.02 Column0.015 |
| ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง | DEQ | - | Beam 0.01 Column0.005 | Beam 0.02 Column0.015 |
| | MCEQ | 0.00072 - 0.0155 | Beam 0.01 Column0.005 | Beam 0.02 Column0.015 |



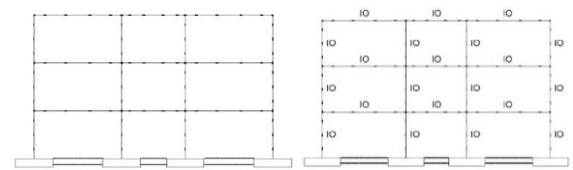
รูปที่ 11 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากแบบยึดแน่น (DEQ)



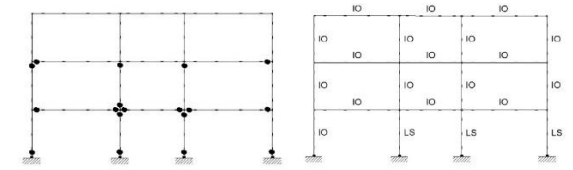
รูปที่ 12 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย (DEQ)



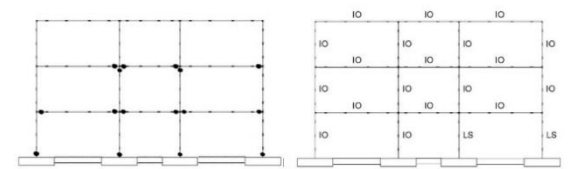
รูปที่ 13 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน (DEQ)



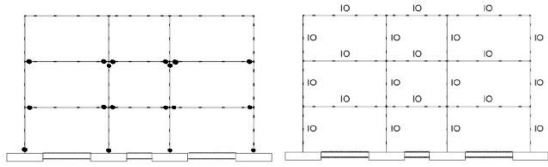
รูปที่ 14 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง (DEQ)



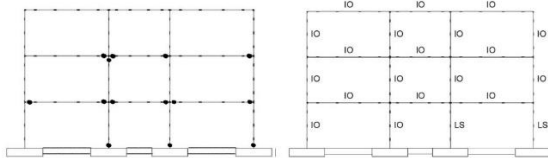
รูปที่ 15 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากแบบยึดแน่น (MCEQ)



รูปที่ 16 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย (MCEQ)



รูปที่ 17 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน (MCEQ)



รูปที่ 18 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง (MCEQ)

4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ด้วยวิธีการผลึกทางด้านข้าง

4.2.1 ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้าง

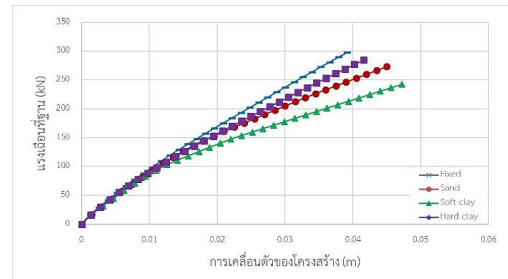
ค่าคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้าง (Fundamental Period of Structures) และค่าการเคลื่อนที่เป้าหมาย (Target Displacement) ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ไม่คิดผลของฐานราก คือ ฐานรากแบบยึดแน่น และฐานรากที่คิดผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก คือ ฐานรากที่มีการโยกตัว ซึ่งตั้งอยู่บนดิน 3 ประเภท คือ ดินทราย ดินเหนียวอ่อน ดินเหนียวแข็ง ทั้งในกรณีของ Design Earthquake (DEQ) และกรณีของ Maximum Considered Earthquake (MCEQ) แสดงดังตารางที่ 8 โดยค่าคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้างเป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม SeismoStruct ส่วนการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้างคำนวณตามมาตรฐานของ FEMA356

ตารางที่ 8 ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนที่เป้าหมายของโครงสร้าง

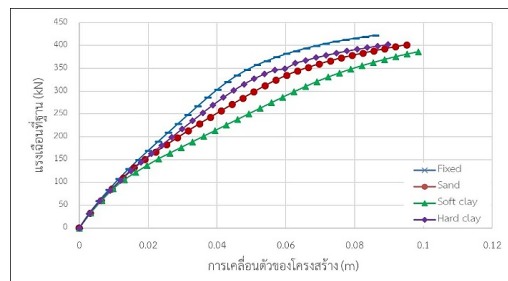
| ประเภทของฐานราก | กรณีของแผ่นดินไหว | ค่าคาบการสั่น (sec) | ค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย (m) |
|----------------------------------|-------------------|---------------------|------------------------------|
| ฐานรากแบบยึดแน่น | DEQ | 0.287 | 0.0332 |
| | MCEQ | 0.287 | 0.0801 |
| ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย | DEQ | 0.315 | 0.0390 |
| | MCEQ | 0.315 | 0.0891 |
| ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน | DEQ | 0.325 | 0.0412 |
| | MCEQ | 0.325 | 0.0926 |
| ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง | DEQ | 0.302 | 0.0386 |
| | MCEQ | 0.302 | 0.0867 |

4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานและค่าเคลื่อนตัวที่จุดสูงสุดของโครงสร้าง

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้างและค่าการเคลื่อนตัวที่จุดสูงสุดของโครงสร้างดังแสดงรูปที่ 19- 20 โดยจะพบว่าแรงเฉือนที่ฐานกรณีฐานรากแบบยึดแน่นมีค่ามากกว่ากรณีของฐานรากชนิดเขตที่มีการโยกตัว ในกรณีของฐานรากชนิดเขตที่ตั้งอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อนเกิดแรงเฉือนที่ฐานน้อยที่สุด แม้ว่าจะมีค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้างมากที่สุด



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง (DEQ)



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนที่ฐานกับค่าการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง (MCEQ)

ตารางที่ 9 แสดงค่ามากที่สุดของแรงเฉือนที่ฐานในแต่ละกรณีและค่าแรงเฉือนที่ลดลง จะเห็นได้ว่าการโยกตัวของฐานรากชนิดเขตสามารถลดแรงเฉือนที่ฐานลงได้เล็กน้อยในความแรงระดับ Maximum Considered Earthquake

ตารางที่ 9 ค่าสูงสุดของแรงเฉือนที่ฐานในแต่ละกรณี

| กรณี | แรงเฉือนที่ฐาน (kN) | | | |
|----------------------------------|---------------------|----------|-----------|----------|
| | DEQ | | MCEQ | |
| | ค่าสูงสุด | ลดลง (%) | ค่าสูงสุด | ลดลง (%) |
| ฐานรากแบบยึดแน่น | 297 | - | 422 | - |
| ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย | 273 | 8.1 | 401 | 5.0 |
| ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน | 242 | 18.5 | 386 | 8.5 |
| ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง | 284 | 4.4 | 402 | 4.7 |

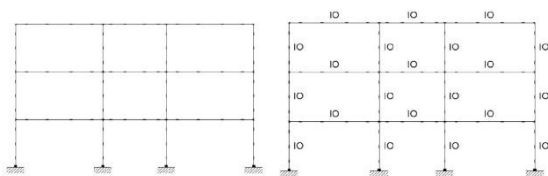
4.1.3 การประเมินระดับความเสียหายของโครงสร้าง

จากการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กผ่านโปรแกรม SeismoStruct โดยใช้วิธี Static Pushover Analysis จะได้ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้างแสดงดังตารางที่ 10

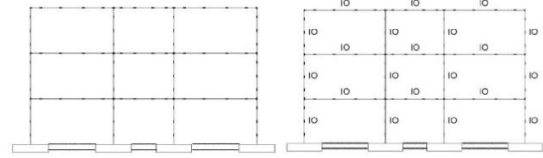
เมื่อพิจารณาระดับความเสียหายของโครงสร้างตามมาตรฐานของ FEMA356 พบว่า โครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากทั้ง 4 ประเภทสามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานระดับ Immediate Occupancy (IO) ทั้งในกรณีของแรงแผ่นดินไหวระดับ Design Earthquake และระดับ Maximum Considered Earthquake สำหรับจุดที่เกิดมุมบิดพลาสติกในโครงสร้าง และระดับความเสียหายของโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 21-28

ตารางที่ 10 ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น

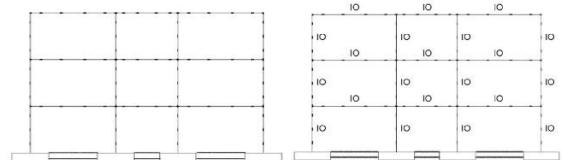
| ประเภทของฐานราก | กรณีของแผ่นดินไหว | ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้น (rad) | ค่ามาตรฐานของ FEMA356 | |
|----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | | IO | LS |
| ฐานรากแบบยึดแน่น | DEQ | - | Beam 0.01 Column0.005 | Beam 0.02 Column0.015 |
| | MCEQ | 0.0009 - 0.0152 | Beam 0.01 Column0.005 | Beam 0.02 Column0.015 |
| ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย | DEQ | - | Beam 0.01 Column0.005 | Beam 0.02 Column0.015 |
| | MCEQ | 0.00012 - 0.0040 | Beam 0.01 Column0.005 | Beam 0.02 Column0.015 |
| ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน | DEQ | - | Beam 0.01 Column0.005 | Beam 0.02 Column0.015 |
| | MCEQ | 0.00058 - 0.0029 | Beam 0.01 Column0.005 | Beam 0.02 Column0.015 |
| ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง | DEQ | - | Beam 0.01 Column0.005 | Beam 0.02 Column0.015 |
| | MCEQ | 0.0012 - 0.0032 | Beam 0.01 Column0.005 | Beam 0.02 Column0.015 |



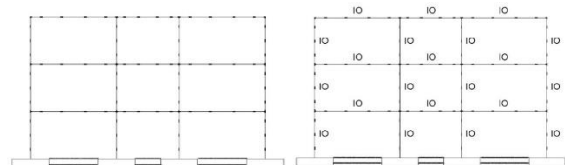
รูปที่ 21 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูงบนฐานรากแบบยึดแน่น (DEQ)



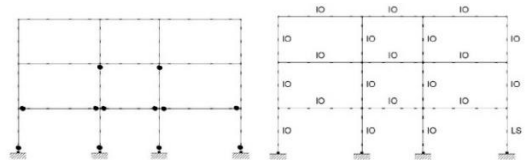
รูปที่ 22 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย (DEQ)



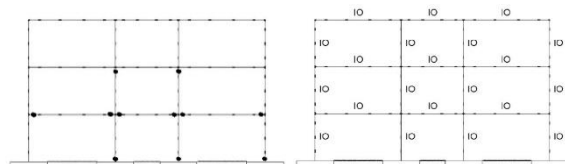
รูปที่ 23 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน (DEQ)



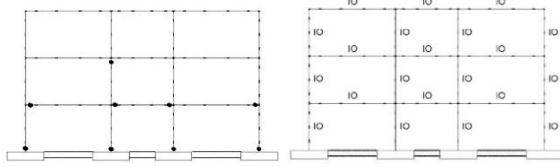
รูปที่ 24 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง (DEQ)



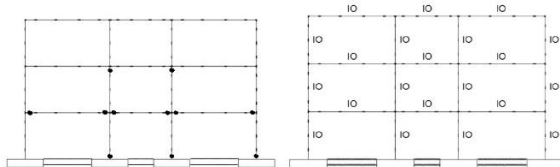
รูปที่ 25 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากแบบยึดแน่น (MCEQ)



รูปที่ 26 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูงบนฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย (MCEQ)



รูปที่ 27 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวอ่อน (MCEQ)



รูปที่ 28 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวแข็ง (MCEQ)

5. บทสรุป

จากการวิเคราะห์โครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวพบว่าระดับ Design Earthquake กรณีของฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวอ่อนมีค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีฐานรากแบบยึดแน่นประมาณ 24% และสามารถลดแรงเฉือนที่ฐานลงได้ประมาณ 13.1% ส่วนกรณี Maximum Considered Earthquake พบว่า ฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวอ่อนมีค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายที่เพิ่มขึ้นประมาณ 15% และสามารถลดแรงเฉือนที่ฐานลงได้ 6.8%

สำหรับการประเมินความเสียหายของอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว พบว่า การโยกตัวของฐานรากสามารถลดค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างได้ ในกรณีของ Design Earthquake โดยทุกชั้นส่วนมีความเสียหายในระดับ Immediate Occupancy และส่วนกรณีของ Maximum Considered Earthquake นั้น ฐานรากบนชั้นดินเหนียวอ่อนสามารถลดความเสียหายได้มากที่สุด ส่งผลให้ทุกชั้นส่วนที่มีความเสียหายระดับ Life Safety เปลี่ยนมาเป็นระดับ Immediate Occupancy

ในส่วนของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว ที่ระดับ Design Earthquake กรณีของฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวอ่อน มีค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายที่เพิ่มขึ้นประมาณ 19.6% และสามารถลดแรงเฉือนที่ฐานลงได้ประมาณ 18.5% ส่วนกรณี Maximum Considered Earthquake ฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวอ่อนมีค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายที่เพิ่มขึ้นประมาณ 16.4% และสามารถลดแรงเฉือนที่ฐานลงได้ 8.5%

สำหรับการประเมินความเสียหายของอาคารออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว พบว่า การโยกตัวของฐานรากสามารถลดค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างได้เช่นเดียวกับกรณีอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว และเมื่อพิจารณาระดับความเสียหายของโครงสร้างพบว่า

กรณีของ Design Earthquake ไม่มีมุมบิดพลาสติกเกิดขึ้นในโครงสร้างเลย ส่วนกรณีของ Maximum Considered Earthquake ระดับความเสียหายของโครงสร้างในแต่ละกรณีมีความใกล้เคียงกัน

สรุปได้ว่า อาคารที่ออกแบบให้รับแรงแผ่นดินไหวและการเพิ่มคานสายรัดเข้าไปจะสามารถลดแรงเฉือนที่ฐานได้ดีกว่าและความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างน้อยลงเนื่องจากโครงสร้างนั้นมีความเสถียรภาพและความเหนียวเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา ที่ส่งเสริมการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กฎกระทรวงกำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคาร และพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2564 ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522
- [2] กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย (2552). *มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยพ 1302*. สำนักพิมพ์ดีจิดอล ออฟเซต เอเชีย แปซิฟิก, หน้า 13-37.
- [3] Halkude, S.A., Kalyanshetti M.G., and Kalyani, S.H. (2014). Soil structure interaction effect on seismic response of R.C. frames with isolated footing. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(1), pp.2767-2775.
- [4] Garg, V. and Hora, M.S. (2012). A review on interaction behaviour of structure–foundation–soil system. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(6), pp.639-644.
- [5] Garg, V. and Hora, M.S. (2013). Seismic analysis of frame-strap footing-nonlinear soil system to study column forces. *Structural Engineering and Mechanics*, 46(5), pp.645-672.
- [6] Kalyanshetti, M.G., Halkude S.A. and Mhamane Y.C. (2015). Seismic response of R.C. building frames with strap footing considering soil structure interaction. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 4(13), pp.7-14.
- [7] Basha, A.M. and Salama, M.I. (2017). Finite Element Analysis of tie beams under the effect of differential

- settlement of isolated footings. *Civil Engineering Journal*, 3(9), pp.650-660.
- [8] Matinmanesh, H. and Asheghabadi, M.S. (2011). Seismic analysis on soil-structure interaction of buildings over sandy soil. *Procedia Engineering*, 14, pp.1737-1743.
- [9] Seismosoft. (2018). *Technical Information Sheet Nonlinear Analysis and Assessment of Structures*. Seismosoft Ltd, pp.19-49.
- [10] Federal Emergency Management Agency. (2000). *FEMA 356 Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building*. Washington, D.C., pp.6(20-28).
- [11] Federal Emergency Management Agency. (2005). *FEMA 440 Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. Washington, D.C., pp.3(5-15).
- [12] Winkler, E. (1867). *Die Lehre Von Elasticitaet Und Festigkeit. 1st Edn.* H. Dominicus, Prague, pp.3-17.
- [13] Bowles, J.E. (1996). *Foundation Analysis and Design*. The McGraw-Hill Companies, Inc., pp.472-477.
- [14] Raychowdhury, P. and Hutchinson, T.C. (2009). Performance evaluation of a nonlinear Winkler-based shallow foundation model using centrifuge test results. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38, pp.679-698.
- [15] Hutchinson, L.W., Kutter, T.C., Hakhamaneshi, B.L., Aschheim, A.M. and Kunnath, S.K. (2013). Demonstration of compatible yielding between soil-foundation and superstructure component. *Journal of Structural Engineering*, 139, pp.1408-1420.
- [16] Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), pp.1804-1826.
- [17] Popovics, S. (1973). A numerical approach to the complete stress-strain curves for concrete. *Cement and Concrete Research*. 3(5), pp.583-599.
- [18] Chopra, A.K. and Goel, R.K. (2002). A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for building. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, p561-582.
- [19] Kim, S.P. and Kurama, Y.C. (2008). An alternative pushover analysis procedure to estimate seismic displacement Demand. *Engineering Structures*, 30(12), pp.3793 - 3807.

ประวัติผู้เขียน

| | | |
|---------------------------------------|------------------------|---------------------|
| ชื่อ สกุล | นายวิศรุต จันทร์สุวรรณ | |
| รหัสประจำตัวนักศึกษา | 6410120050 | |
| วุฒิการศึกษา | | |
| วุฒิ | ชื่อสถาบัน | ปีที่สำเร็จการศึกษา |
| วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) | มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ | 2562 |

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

วิศรุต จันทร์สุวรรณ, สุชาติ ลิมกัตัญญ และ วรเทพ แซ่ล่อง, (2566). อิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับฐานรากชนิดเขตต่อผลตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28*, ภูเก็ต, 24-26 พฤษภาคม 2566, หน้า STR41-1-STR41-9