ผลของการใช้แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงเสาเข็มในการประเมินอาคารต้านแผ่นดินไหว
The Effect of Building Model Considering Pile Foundation in Seismic Evaluation

ณัฐนที ท้าวพันวงค์[1,*] สมบูรณ์ เชี่ยงฉิน[2] วรเทพ แซ่ล่อง[3] และ ปรีดา ไชยมหาวัน[4]

[1,2,3,4] สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จ.พะเยา
**Corresponding author; E-mail address: 61400359@up.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาเปรียบเทียบผลการประเมิน และผลตอบสนองของโครงสร้างอาคารต้านแผ่นดินไหว ระหว่างแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม และแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม โดยใช้สเปกตรัมผลตอบสนองแผ่นดินไหวในพื้นที่จังหวัดพะเยา ในการศึกษานี้ได้เลือกอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 ชั้น ซึ่งเป็นอาคารพานิชย์ตามแบบของกรมโยธาธิการและผังเมือง โดยโครงสร้างอาคารที่มีฐานรากเสาเข็มได้ใช้สปริงเพื่อแทนผลของดินที่อยู่ด้านข้างเสาเข็มในระดับความลึกต่างๆ จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่มีฐานรากเสาเข็มมีสัดส่วนและรูปแบบการสั่นไหวที่แตกต่างจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่มีเสาเข็ม และทำให้คาบธรรมชาติในโหมดพื้นฐานเพิ่มขึ้น แบบจำลองที่มีเสาเข็มมีค่าสติฟเนสการต้านแรงด้านข้างตามแนวแกน Y ลดลง มีค่าแรงต้านสูงสุดของอาคารเพิ่มขึ้น และถูกประเมินด้วยแรงแผ่นดินไหวที่ลดลงจึงทำให้ได้ค่าระดับความเสียหายที่ลดลงด้วย ผู้วิจัยได้ทดลองเปลี่ยนความยาวของเสาเข็มให้มีความยาวแตกต่างกัน พบว่าการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีฐานรากเสาเข็มจะช่วยลดแรงแผ่นดินไหวที่ใช้ประเมินหากความยาวของเสาเข็มมากขึ้น แต่โครงสร้างอาคารจะมีการเสียรูปอาคารมากขึ้น ดังนั้นการจำลองโครงสร้างอาคารจำเป็นต้องพิจารณาความยาวของโครงสร้างฐานรากเสาเข็มเพื่อให้การประเมินสมรรถนะของโครงสร้างอาคารได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: การประเมินอาคารต้านแผ่นดินไหว, การวิเคราะห์โดยวิธีการผลัก, สถิตศาสตร์ไม่เชิงเส้น

Abstract

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

Keywords: Seismic Evaluation, Push Over Analysis, Non-linear Static

1. บทนำ

ภัยพิบัติแผ่นดินไหวเป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของพื้นดิน อันเนื่องมาจากการปลดปล่อยพลังงานที่สะสมไว้ภายในโลกออกมาอย่างฉับพลันเพื่อปรับสมดุลของเปลือกโลกให้คงที่ ในปัจจุบันจะเห็นได้ว่าประเทศไทยในบางพื้นที่มีความเสี่ยงต่อเหตุการณ์แผ่นดินไหวโดยเฉพาะภาคเหนือ และภาคตะวันตก เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ.2557 เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาด 6.3 ริคเตอร์ ศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหวอยู่ที่ตำบลดงมะดะ อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย เหตุการณ์ครั้งนี้มีผู้เสียชีวิต 2 ราย ทรัพย์สิน สถานที่ราชการ โบราณสถาน ศาสนสถาน เส้นทางคมนาคม และอาคารต่างๆ เกิดความเสียหายเป็นอย่างมาก จากเหตุการณ์ดังกล่าวทำให้เกิดการณ์ตื่นตัวในการที่จะเตรียมพร้อมรับมือแผ่นดินไหว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเมืองสำคัญที่มีประชาชนอยู่หนาแน่น มีแหล่งท่องเที่ยว และเศรษฐกิจของประเทศ การเตรียมรับมือนั้นมีหลายวิธี

การประเมินอาคารต้านแผ่นดินไหวก็เป็นอีกวิธีเพื่อที่จะทำให้รู้ถึงความสามารถในการต้านทานแรงแผ่นดินไหวของอาคารที่มีอยู่เดิม ทราบจุดอ่อนแอของอาคาร เพื่อที่จะสามารถซ่อมแซม หรือเสริมกำลังให้กับอาคารได้ ซึ่งปกติจะทำแบบจำลองเฉพาะโครงสร้างบนดิน (super structure) และให้ฐานรากเป็นแบบยึดแน่น (Fixed-base) ที่เสาตอม่อ โดยสมมุติให้โครงสร้างที่อยู่ใต้ดิน (sub structure) ฐานราก และเสาเข็มเคลื่อนตัวไปพร้อมกับดิน และทำการประเมินโครงสร้างด้วยแรงแผ่นดินไหว ไม่ว่าจะเป็นแรงแบบสถิต หรือแรงแบบพลศาสตร์ จากสเปกตรัมผลตอบสนอง สำหรับโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม นิยมแยกประเมินต่างหากเฉพาะด้วยแบบจำลองเสาเข็ม หรือแบบจำลองฐานราก

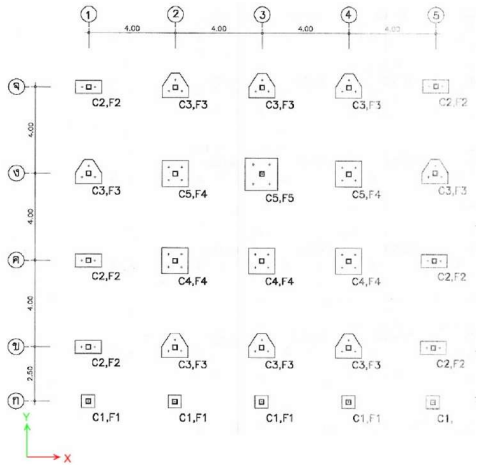
ซึ่งความจริงแล้วการแยกประเมินโครงสร้างเฉพาะโครงสร้างบนดินนั้นอาจไม่เป็นไปตามสมมุติฐานเสมอไป เนื่องจากฐานรากเสาเข็มอาจมีการเคลื่อนตัวที่ไม่พร้อมกันกับโครงสร้างดินเมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว จึงทำให้แนวทางการประเมินอาคารต้านทานแผ่นดินไหวที่ใช้เฉพาะแบบจำลองโครงสร้างบนดินอย่างเดียว หรือการแยกโครงสร้างประเมินนั้นอาจไม่เพียงพอ ที่จะจำลองพฤติกรรมโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหวได้ด้วยแบบจำลองทั้งโครงสร้างที่อยู่บนดินและใต้ดิน หรืออาจเรียกแบบจำลองนี้ว่า “ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้าง” (Soil-Structure Interaction (SSI)) Bielak [1] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้างโดยแสดงให้เห็นว่าผลจากการวิเคราะห์ด้วยปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้าง ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่มากกว่าแบบจำลองให้ฐานรากเป็นแบบยึดแน่น Ghannad และ Jahankhah [2] ได้แสดงผลตอบสนองของโครงสร้างที่ใช้แบบจำลองฐานยึดแน่นนั้นมีค่าที่น้อยกว่า เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างให้รวมผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้างอาคาร Moghaddasi et al. [3] ศึกษาสถิติของแบบจำลองที่รวมผลดินและโครงสร้างอาคารจากผลตอบสนองคลื่นแผ่นดินไหวกว่า 40 คลื่น และพบว่า ผลของปฏิสัมพันธ์ดินและโครงสร้างนั้นทำให้ผลตอบสนองในโครงสร้างมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณี และงานวิจัยของ Sae-Long et al. [4-5] ซึ่งใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ จำลองโครงคานเสาอาคาร และเชื่อมต่อกับโครงสร้างดินด้วยสปริง สามารถทำนายพฤติกรรมไม่เชิงเส้นระหว่างโครงสร้างที่อยู่บนดินและใต้ดินได้

การสร้างแบบจำลองทั้งโครงสร้างบนดินและโครงสร้างใต้ดินพร้อมกันนั้นยังไม่เป็นที่นิยมมากนัก เนื่องจากใช้เวลาในการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ผล ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทดลองทำการสร้าง และประเมินความสามารถต้านทานแผ่นดินไหวของอาคาร โดยใช้แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม เพื่อวิเคราะห์ความถูกต้อง และเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม ดังนั้นบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะเปรียบเทียบผลการประเมิน และผลตอบสนองของโครงสร้างอาคารต้านแผ่นดินไหว ระหว่างโครงสร้างดังกลาว โดยใช้อาคารพาณิชย์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว

2. วิธีการวิจัย

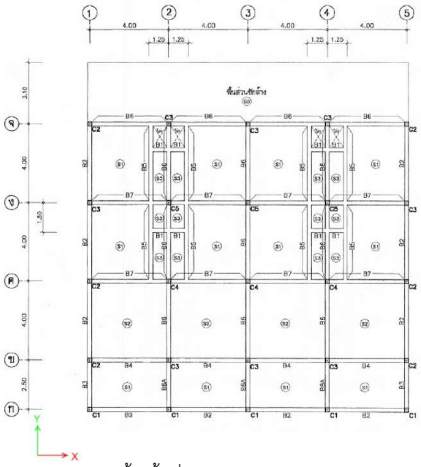
2.1 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลองอาคารที่ใช้ทำการศึกษาครั้งนี้เป็นแบบจากกรมโยธาธิการและผังเมือง โครงการแบบอาคารเพื่อประชาชนไทยอนุรักษ์ไทย แบบตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 ชั้น ใช้เป็นตัวแทนอาคารพาณิชย์ที่ก่อสร้างที่พื้นที่ภาคเหนือที่มีความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหว มีพื้นที่ใช้สอยประมาณ 946 ตร.ม. รับน้ำหนักบรรทุกจร 300 กก./ม^2 มีการออกแบบไว้ตั้งแต่ปี 2546 โครงสร้างฐานรากมีเสาเข็ม และแบบแปลนแสดงในรูปที่ 1 ถึง รูปที่ 4

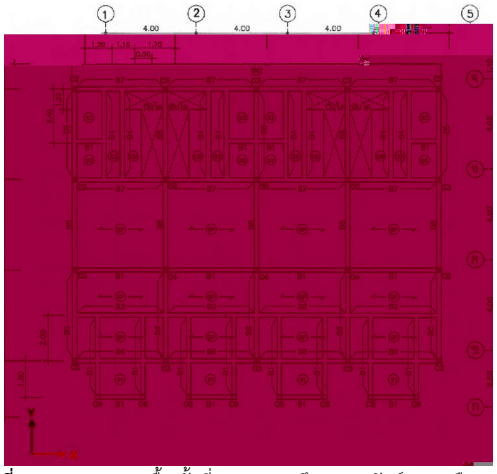


รูปที่ 1 แปลนโครงสร้างฐานรากเสาเข็มและตอม่อ อาคารตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น

การวิเคราะห์โครงสร้างใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ETABS) ทำการสร้างแบบจำลองเป็น 3 มิติ เพื่อให้ได้แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่เหมือนกันกับแบบก่อสร้างอาคารจริงมากที่สุด โดยทำการกำหนดขนาดหน้าตัดเสาหน้าตัดคาน และปริมาณเหล็กเสริมให้เหมือนกันกับแบบก่อสร้างอาคาร ระบบพื้นเป็นระบบพื้นสำเร็จเป็นส่วนใหญ่ และมีพื้นสองทางในบางตำแหน่ง เช่น ห้องน้ำ ระเบียง



รูปที่ 2 แปลนเสา คาน พื้น ชั้นที่ 1 อาคารตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น

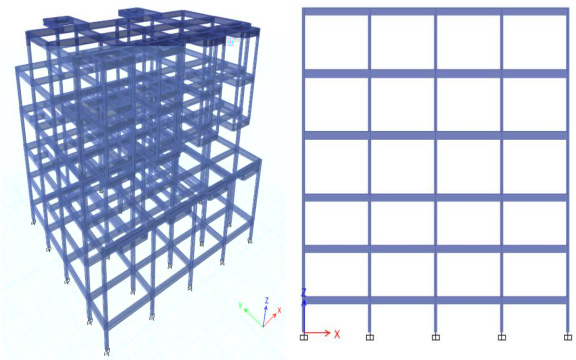


รูปที่ 3 แปลนเสา คาน พื้น ชั้นที่ 3-4 อาคารตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น

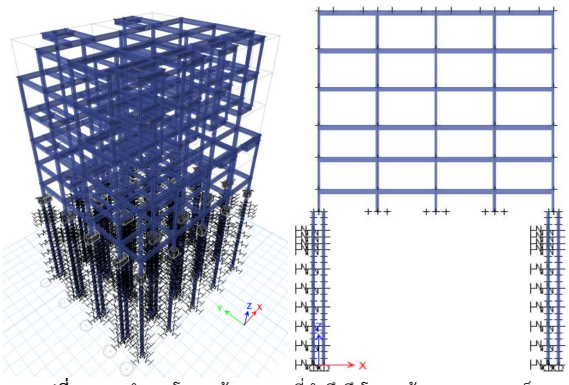


รูปที่ 4 รูปตัดอาคารตึกแถวอนุรักษ์ภาคเหนือ 4 ชั้น

แบบจำลองที่ทำการศึกษานี้ สร้างขึ้นให้มีความแตกต่างกัน 2 แบบ ได้แก่ แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม และแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม กำหนดให้ฐานรองรับเป็นแบบยึดแน่นที่ระดับตอม่อ ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ โดยแบบจำลองที่สร้างจะมีคานและเสา แต่จะไม่มีพื้นและผนังก่อ เนื่องจากต้องการตัดผลที่อาจเกิดจากพฤติกรรมเชิงเส้นที่ได้จากโครงสร้างพื้นและผนังออกไป และต้องการวิเคราะห์แบบสถิตไม่เชิงเส้นในโครงสร้างคานและเสา ส่วนน้ำหนักบรรทุกบนโครงสร้างพื้นได้ทำการถ่ายน้ำหนักบรรทุกลงสู่คานในรูปแบบของน้ำหนักแผ่กระจาย



รูปที่ 5 แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม



รูปที่ 6 แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม

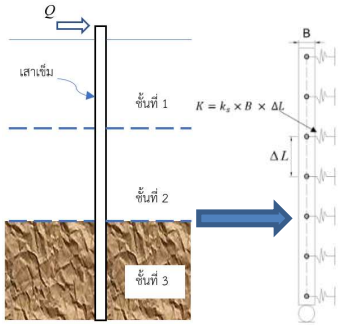
2.2 คุณสมบัติวัสดุ

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

2.3 แบบจำลองเสาเข็ม

การวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดิน และโครงสร้างในงานฐานรากเสาเข็มได้ใช้สปริงแทนดินด้านข้าง และกำหนดให้ปลายเสาเข็มเป็นแบบล้อเลื่อน ดังรูปที่ 7 การวิเคราะห์โครงสร้างเสาเข็มที่แทนด้วยสปริงสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับสภาพชั้นดินหลายๆ ชั้นได้ [6] โดยทั่วไปโครงสร้างฐานรากจะออกแบบให้มีความปลอดภัยในการใช้งาน 2.5 ถึง 3 เท่า จึงคาดว่าโครงสร้างเสาเข็มมีพฤติกรรมในช่วงยืดหยุ่นจากการรับแรงแผ่นดินไหว อีกทั้งต้องการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมไม่เชิงเส้นในโครงสร้างอาคารเฉพาะส่วนที่เป็นโครงสร้างเสาและคาน จึงสมมุติให้โครงสร้างเสาเข็มมีพฤติกรรมยืดหยุ่นตลอดการวิเคราะห์

พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์เสาเข็มในกรณีที่ต้องรับแรงในแนวราบคือค่า สติฟเนสของสปริงที่แทนดิน เรียกว่า ค่าโมดูลัสต้านทานแนวราบของดิน (Modulus of horizontal subgrade reaction) k_s มีหน่วยเป็น แรง/ปริมาตร เช่น ตัน/ม.^{3} โดยที่ค่า k_s ขึ้นอยู่กับลักษณะของดิน ว่าเป็นดินเหนียวหรือเป็นดินทราย ในกรณีของดินเหนียวค่า k_s จะสมมุติให้มีค่าคงที่ลอดชั้นดินโดย Davisson [7] เสนอสมการคำนวณค่า k_s ดังนี้



รูปที่ 7 การสร้างแบบจำลองเสาเข็มด้วยสปริง

$$k_s = 67\frac{S_u}{B} \quad (1)$$

โดย S_u หมายถึงกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ, B หมายถึงขนาดความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

ในกรณีที่เสาเข็มอยู่ในชั้นดินทราย ใช้วิธีการคำนวณค่า k_s จาก Terzaghi [8] ซึ่งใช้ค่า k_s ไม่คงที่ตามความลึกของชั้นดิน สามารถคำนวณดังนี้

$$k_s = \frac{n_h x}{B} \quad (2)$$

โดย x หมายถึงความลึก ณ จุดที่พิจารณา, B หมายถึงขนาดความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มและ n_h หมายถึงค่าคงที่สำหรับต้านทานแรงแนวราบ

เมื่อทราบค่า k_s แล้วสามารถคำนวณสติฟเนสของสปริง (K) ของดินดังนี้

$$K = k_s \times B \times \Delta L \quad (3)$$

โดย B หมายถึงขนาดความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มและ ΔL หมายถึงความยาวในพื้นที่รับผิดชอบ

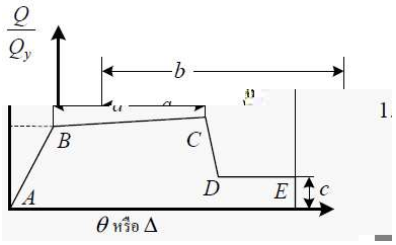
ผลจากการเจาะสำรวจดินในสนาม ณ โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยพะเยา แสดงในตารางที่ 1 พบว่าเป็นดินทราย มีค่า SPT สูงสุดที่ระดับ 12.0 ม. จึงทำให้แบบจำลองกรณีโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มได้ใช้การจำลองเสาเข็มมีความยาว 12 ม. ค่าโมดูลัสต้านทานแนวราบของดิน (k_s) สำหรับเสาเข็มขนาด 22x22 ซม. แสดงในตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 รายงานผลการเจาะสำรวจดินในสนาม

ความลึก (ม.)	ชนิดของดิน	SPT (ครั้ง/ฟุต)	S_u (ตัน/ม.^{2})	n_h (ตัน/ม.^{3})	k_s (เสาเข็ม 0.22x0.22ม.) (ตัน/ม.^{3})
1.5	Sand	95	-	2,496.34	17,020.47
2.0	Sand	68	-	1,937.46	17,613.28
2.5	Sand	47	-	1,431.52	16,267.25
3.0	Sand	62	-	1,833.52	25,002.49
4.5	Sand	86	-	2,394.37	48,975.71
6.0	Clay	91	60.29	-	18,361.05
7.5	Clay	150	99.38	-	30,265.73
9.0	Sand	117	-	2,774.80	113,514.37
10.5	Sand	115	-	2,725.77	130,093.70
12.0	Sand	127	-	2,774.80	151,352.73

2.4 จุดหมุนพลาสติก

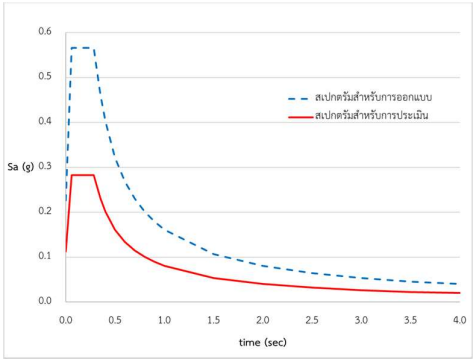
เนื่องจากการวิเคราะห์จะใช้วิธีผลักโครงสร้างแบบไม่เชิงเส้น (non-linear push over analysis) จึงได้กำหนดจุดหมุนพลาสติกในตำแหน่งต่างๆให้กับโครงสร้าง โดยกำหนดจุดหมุนพลาสติกเนื่องจากแรงดัดที่ปลายองค์อาคารทั้งสองด้าน และกำหนดจุดหมุนพลาสติกสำหรับแรงเฉือนที่ระยะร้อยละ 20 ของความยาวชิ้นส่วนจากปลายองค์อาคารทั้งสองด้าน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูป ใช้ตามกำหนดใน มยผ. 1303-57 [9] สำหรับการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 8 พฤติกรรมแบบเชิงเส้นจากจุด A (เมื่อไม่มีแรงกระทำ) ไปที่จุด B ซึ่งเป็นจุดคราก ประสิทธิผล ต่อจากนั้นมีพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นจากจุด B ไปที่จุด C โดยมีค่าสติฟเนสที่ลดลง เมื่อการเสียรูปมากกว่าจุด C แรงต้านทานมีค่าลดลงอย่างทันทีทันใดไปสู่จุด D ซึ่งอาจมีแรงต้านทานคงค้างบ้าง และจุด E ซึ่งเป็นจุดสุดท้ายที่สูญเสียแรงต้านทานโดยสิ้นเชิง



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเสียรูป

2.5 กราฟสเปกตรัมผลตอบสนอง

กราฟสเปกตรัมสำหรับอำเภอเมือง จังหวัดพะเยา ได้ถูกกำหนดขึ้นมาตาม มยผ.1301/1302-61 [10] โดยกราฟดังกล่าวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับเส้นกราฟกำลังต้านแรงด้านข้างของโครงสร้าง (capacity curve หรือ push-over) ที่ได้จากการผลักแบบ Push-over ซึ่งเขตอำเภอเมือง จังหวัดพะเยาเป็นที่ตั้งอาคาร ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมที่คาบสั่น 0.2 วินาที S_s = 0.781g และคาบการสั่น 1 วินาที S_1 = 0.146g ของแผ่นดินไหวรุนแรงสูงสุดที่พิจารณา จากผลการเจาะสำรวจดินในสนามในตารางที่ 1 และการศึกษาของ Chaimahawan et al. [11] และ Wongrat et al. [12] สามารถจำแนกดินเป็นประเภท C หรือดินแข็ง ตาม มยผ. 1301/1302-61 [10] ทำให้สามารถสร้างกราฟสเปกตรัมสำหรับออกแบบได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ความเร่งตอบสนองเชิงเปกตรัมด้วยวิธีเชิงพลศาสตร์สำหรับอำเภอเมือง จังหวัดพะเยา

อย่างไรก็ตาม แนวทางการประเมินอาคารตาม มยผ.1303-57 [9] นั้นได้แนะนำให้ใช้สเปกตรัมผลตอบสนองที่มีความรุนแรงเพียงครึ่งเดียวของ

สเปกตรัมที่ใช้ออกแบบอาคาร เนื่องจากอาคารมีการก่อสร้างไปแล้ว ย่อมมีกำลังที่น้อยกว่าอาคารใหม่ ยากต่อการปรับปรุงให้มีความแข็งแรงเทียบเท่าอาคารใหม่ได้ ดังรูปที่ 9

ในแบบจำลองทั้งสองแบบนี้ได้ปรับลดสติฟเนส ขององค์อาคารต่างๆ ตามข้อกำหนดของ มยผ.1303-57 [9] เพื่อคำนึงถึงการแตกร้าวและเสียหายของโครงสร้างเสาและคานจากการรับแรงแผ่นดินไหว โดยปรับลดสติฟเนสต้านการเฉือนในเสา และคานลงเหลือร้อยละ 40 และปรับลดสติฟเนสสำหรับต้านการดัดลงเหลือร้อยละ 30 และ 70 สำหรับคานและเสาตามลำดับ

3. ผลการวิจัย

3.1 คาบธรรมชาติ

คาบธรรมชาติใน 12 โหมดของทั้ง 2 แบบจำลอง แสดงในตารางที่ 2 จะเห็นว่า แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มจะมีคาบธรรมชาติที่สูงกว่ากรณีแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็มเล็กน้อย และมีโหมดพื้นฐานเป็นสัดส่วนหลักประมาณร้อยละ 65-69 เช่นเดียวกับแบบจำลองอาคารที่มีเสาเข็ม การสร้างกราฟเส้นโค้งกำลังจากการผลักในแต่ละแกน จะเลือกใช้โหมดที่มีสัดส่วนการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนมากที่สุด โดยแบบจำลองทั้งสองได้เลือกใช้โหมด 1 และโหมด 2 ในการสร้างกราฟเส้นโค้งกำลังในแกน x และแกน y ตามลำดับเช่นกัน

ตารางที่ 2 คาบธรรมชาติที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้าง

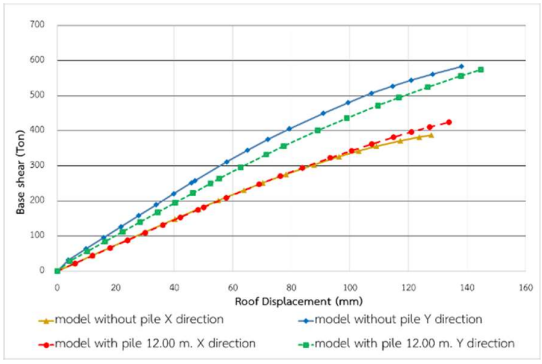
Mode	แบบจำลองไม่มีเสาเข็ม				แบบจำลองมีเสาเข็ม			
	คาบ (วินาที)	Modal participation			คาบ (วินาที)	Modal participation		
		x	y	x		x	y	R
1	1.726	0.696	0.000	0.012	1.828	0.653	0.000	0.019
2	1.455	0.000	0.653	0.000	1.596	0.000	0.674	0.000
3	1.399	0.012	0.000	0.678	1.561	0.020	0.000	0.697
4	0.635	0.094	0.000	0.000	0.671	0.110	0.000	0.000
5	0.581	0.000	0.133	0.000	0.649	0.000	0.148	0.000
6	0.560	0.000	0.000	0.117	0.628	0.000	0.000	0.124
7	0.396	0.025	0.000	0.004	0.418	0.050	0.000	0.004
8	0.352	0.000	0.038	0.000	0.389	0.000	0.059	0.000
9	0.343	0.000	0.000	0.025	0.376	0.007	0.000	0.045
10	0.306	0.005	0.000	0.003	0.325	0.062	0.000	0.000
11	0.285	0.000	0.016	0.000	0.304	0.018	0.000	0.014
12	0.262	0.000	0.000	0.005	0.303	0.000	0.023	0.000

3.2 ผลการประเมินสมรรถนะของอาคาร

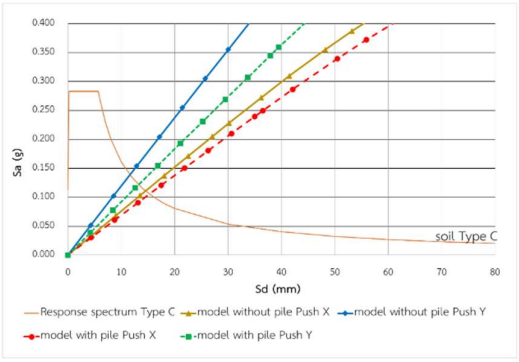
3.2.1 กรณีแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม

ผลการผลักโครงสร้างแบบสถิตไม่เชิงเส้น (nonlinear push-over) กรณีใช้แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม กำหนดฐานรองรับที่ตอม่อเป็นแบบยึดแน่นพบว่าอาคารสามารถต้านแรงกระทำสูงสุดตามแนวแกน x ได้ 388 ตัน ที่การเคลื่อนตัวของยอดอาคาร 128 มม. โดยกราฟมีการเปลี่ยนความชันที่การเคลื่อนที่ประมาณ 85 มม. ส่วนกำลังต้านตามแนวแกน y ได้ 583 ตัน ที่การเคลื่อนตัวของยอดอาคาร 138 มม. โดยกราฟมีการเปลี่ยนแปลงความชันการเคลื่อนที่ประมาณ 65 มม. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านกับการเคลื่อนที่ของยอดอาคารแสดงดังรูปที่ 10

เมื่อนำกราฟเส้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านด้านข้างกับการเคลื่อนที่ของยอดอาคาร มาเปรียบเทียบกับกราฟแรงแผ่นดินไหวสำหรับการประเมิน โดยทำการแปลงค่าแกนนอนให้อยู่ในรูปของการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเชิงสเปกตรัม (S_d) และแกนตั้งอยู่ในรูปของความเร่ง (S_a) พบว่าจุดสมรรถนะ (จุดตัดกันระหว่างเส้นแรงพลักกับเส้นกราฟสเปกตรัม) อยู่ที่การเคลื่อนตัวเชิงสแปกตรัม 14.53 มม. ด้วยความเร่ง 0.111g สำหรับทิศทางตามแกน x (รูปที่ 11) และการเคลื่อนตัวเชิงสเปกตรัม 11.61 มม. ด้วยความเร่ง 0.139g สำหรับทิศทางตามแกน y จะเห็นว่ากราฟกำลังต้านแรงด้านข้างยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงความชันที่จุดสมรรถนะ โครงสร้างส่วนใหญ่จึงอยู่ในช่วงยืดหยุ่น ณ จุดสมรรถนะ



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างกับการเคลื่อนที่ของยอดอาคาร



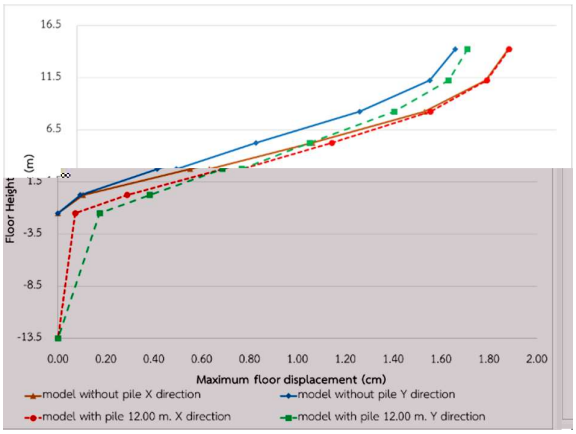
รูปที่ 11 สมรรถนะอาคาร

เมื่อตรวจสอบการเคลื่อนตัวในแต่ละชั้น ณ ตำแหน่งที่เป็นจุดสมรรถนะ พบว่าอาคารมีการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ชั้นบนสุด โดยเคลื่อนตามแนวแกน x เท่ากับ 24 มม. และเคลื่อนตัวตามแกน y เท่ากับ 16 มม. (รูปที่ 12) และเมื่อตรวจสอบการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์พบว่ามีค่าน้อยกว่า 1% ทั้ง

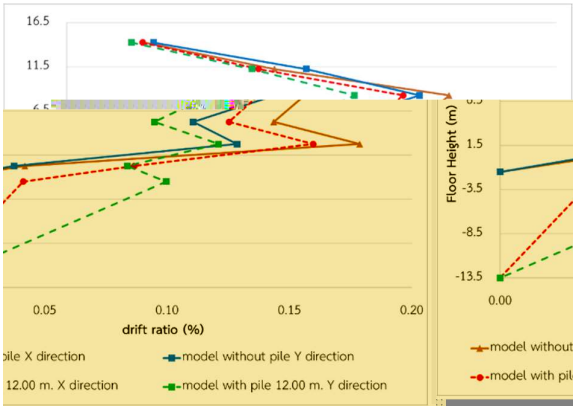
2 ทิศทาง (รูปที่ 13) ทำให้อาคารที่สร้างด้วยแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็มมีสมรรถนะเข้าใช้งานอาคารได้อย่างทันที (Immediately Operation, IO)

3.2.2 กรณีแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม

สำหรับกรณีแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มพบว่า ลักษณะเส้นกราฟความสัมพันธ์ของแรงผลักกับการเคลื่อนที่ของยอดอาคาร มีลักษณะเป็นเส้นตรงจนกระทั่งการเคลื่อนที่ของยอดอาคารประมาณ 85 มม. สำหรับการเคลื่อนที่ตามแนวแกน x (รูปที่ 10) ส่วนการเคลื่อนที่ตามแนวแกน y มีลักษณะเป็นเส้นตรงจนกระทั่งการเคลื่อนที่ของยอดอาคารประมาณ 70 มม. อย่างไรก็ตามกราฟมีความชันในทิศทางการผลักตามแกน y มากกว่าแกน x เช่นเดียวกับแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม และมีความชันน้อยกว่าแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม โดยมีค่าแรงผลักสูงสุดตามแกน x เท่ากับ 425 ตัน ที่การเคลื่อนที่ 134 มม. และค่าแรงผลักสูงสุดตามแกน y เท่ากับ 574 ตัน ที่การเคลื่อนที่ 145 มม.



รูปที่ 12 การเคลื่อนที่สูงสุดของแต่ละชั้น



รูปที่ 13 การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น

แบบจำลองที่มีเสาเข็มให้กำลังต้านแรงด้านข้างตามแนวแกน x ไม่แตกต่างจากแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม แต่ยอดอาคารมีการเคลื่อนที่มากกว่าจาก 128 มม. เป็น 134 มม. คิดเป็นร้อยละ 6 และกำลังแรงต้านด้านข้างตามแนวแกน y พบว่าแบบจำลองที่มีเสาเข็มให้การเคลื่อนที่ของยอดอาคารได้มากกว่าแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็มจาก 138 มม. เป็น 145 มม. คิดเป็นร้อยละ 5 ซึ่งความแตกต่างนี้อาจเกิดจาก แบบจำลองที่มีเสาเข็มมีการเสียรูปของโครงสร้างร่วมกันระหว่างเสาเข็มกับการเสียรูปจากโครงสร้างอาคาร

เมื่อตรวจสอบจุดสมรรถนะจากผลของแผ่นดินไหวที่ประเมิน (รูปที่ 10) พบว่ามีการเคลื่อนที่เชิงสเปกตรัม 15.31 มม. ด้วยความเร่ง 0.105g สำหรับทิศทางตามแกน x และการเคลื่อนตัวเชิงสเปกตรัม 13.23 มม. ด้วยความเร่ง 0.122g สำหรับทิศทางตามแกน y ซึ่งจะเห็นว่า แบบจำลองที่มีเสาเข็มจะถูกประเมินด้วยแรงแผ่นดินไหวที่ต่ำกว่าแบบจำลองไม่มีเสาเข็มอยู่พอสมควร หากเปรียบเทียบกันระหว่างทิศทางตามแกน x ของแบบจำลองที่มีเสาเข็ม กับแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม และทิศทางตามแกน y ของแบบจำลองที่มีเสาเข็ม กับแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม แสดงในตารางที่ 3 จากเส้นกราฟกำลังต้านแรงด้านข้างแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็มตัดกับเส้นกราฟสเปกตรัมในช่วงที่กราฟมีความชันสูง ในขณะที่แบบจำลองอาคารที่มีเสาเข็มตัดกับตำแหน่งกราฟสเปกตรัมในช่วงที่กราฟเริ่มมีความชันต่ำลง แต่กราฟกำลังต้าน ณ จุดสมรรถนะยังคงเป็นเส้นตรงแสดงให้เห็นว่าอาคารยังสามารถต้านแรงกระทำจากแผ่นดินไหวได้อย่างปลอดภัยทั้งสองแบบจำลอง

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบความเร่ง ณ จุดสมรรถนะของแบบจำลอง

แบบจำลอง	x direction	y direction
ไม่มีเสาเข็ม	0.111g	0.139g
มีเสาเข็ม	0.105g	0.122g

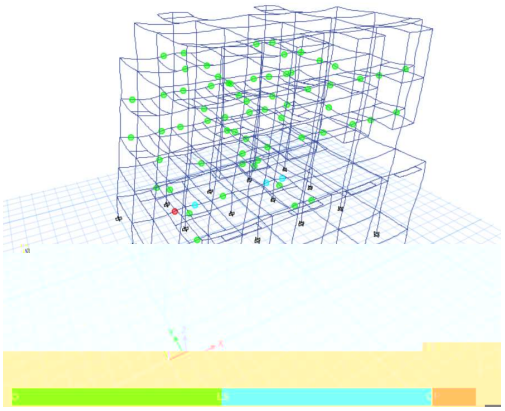
เมื่อตรวจสอบการเคลื่อนตัวในแต่ละชั้น ณ ตำแหน่งที่เป็นจุดสมรรถนะ พบว่าอาคารมีการเคลื่อนตัวสูงสุดที่ชั้นบนสุด เท่ากับ 18 มม. และ 16 มม. (รูปที่ 12) สำหรับการผลักในทิศทาง x และ y ตามลำดับ โดยแบบจำลองที่มีเสาเข็มให้ค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดของแต่ละชั้น สูงกว่าแบบจำลองไม่มีเสาเข็มทั้งสองทิศทาง โดยผลของการเรียงตัวของเสาเข็มและสปริงที่ใช้แทนดินทำให้รูปแบบการเคลื่อนที่ด้านข้างเปลี่ยนไป

เมื่อตรวจสอบเฉพาะเกณฑ์การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ พบว่ามีค่าน้อยกว่าร้อยละ 1 ทั้ง 2ทิศทาง (รูปที่ 13) ซึ่งทำให้อาคารที่สร้างด้วยแบบจำลองที่มีเสาเข็มมีระดับสมรรถนะสามารถเข้าใช้งานอาคารได้อย่างทันที (Immediately Operation, IO) เช่นเดียวกับแบบจำลองอาคารที่ไม่มีเสาเข็ม อย่างไรก็ตามจะต้องพิจารณาเกณฑ์ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคารประกอบด้วย รายละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.2.3 ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับอาคาร

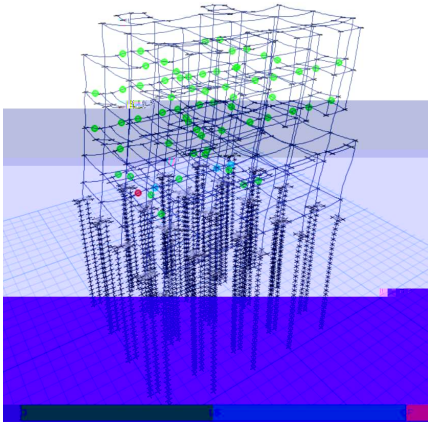
แม้ว่าเกณฑ์ของการเคลื่อนตัวของอาคารจะแสดงว่าอาคารอยู่ในระดับสามารถเข้าใช้งานอาคารได้อย่างทันทีหลังเหตุการณ์แผ่นดินไหวรุนแรงตาม มยผ.1303-57 [9] แต่เมื่อตรวจสอบความเสียหายในองค์อาคารหลัก ณ แรงผลักที่จุดสมรรถนะพบว่า กรณีอาคารที่ไม่มีเสาเข็ม มีความเสียหายระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse prevention) ที่คานรับพื้นชั้น 1 ที่เส้นกริด ง1-ง2 (รูปที่ 14) มีความเสียหายในระดับป้องกันการพังทลาย (Collapse Prevention, CP) ส่วนตำแหน่งอื่นๆ เป็นความเสียหายในคาน

ที่ระดับปลอดภัยต่อชีวิต (Life Safety, LS) ซึ่งถือว่าอาคารมีความเสียหายเล็กน้อย สามารถซ่อมแซมได้ จึงสรุปได้ว่าการประเมินอาคารโดยใช้แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม อยู่ในระดับป้องกันการพังทลาย



รูปที่ 14 จุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม กรณีผลักตามแกน x

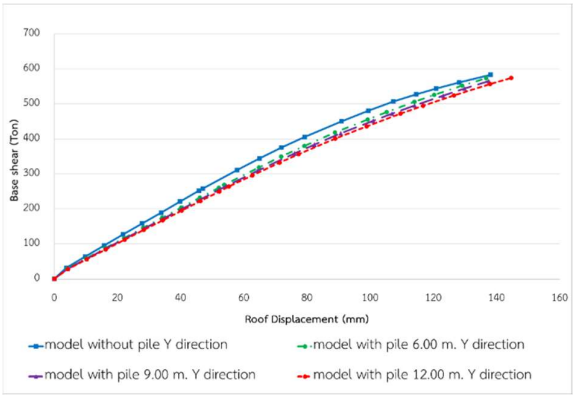
แรงผลักที่จุดสมรรถนะของแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มจะมีค่าต่ำลง เมื่อพิจารณาจุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นพบว่า คานรับพื้นชั้น 1 ที่เส้นกริด ง1-ง2 (รูปที่ 15) มีความเสียหายระดับป้องกันการพังทลาย เช่นเดียวกับแบบจำลองอาคารที่ไม่มีเสาเข็ม จึงสามารถสรุปได้ว่าการประเมินอาคารโดยใช้แบบจำลองที่มีเสาเข็มอยู่ในระดับป้องกันการพังทลาย



รูปที่ 15 จุดหมุนพลาสติกที่เกิดขึ้นจากแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม กรณีผลักตามแกน x

3.3 การศึกษาผลของความยาวของเสาเข็มต่อการตอบสนองของอาคาร

ในหัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม ให้อยู่ภายใต้สภาวะของดินชนิดเดียวกัน คือ ดินเป็นประเภท C หรือดินแข็ง โดยปรับเปลี่ยนความยาวของเสาเข็มเพื่อจำลองว่าหากอาคารดังกล่าว ตั้งอยู่ในสภาวะดินชนิดเดียวกัน ตามที่ระบุใน มยผ.1301/1302-61 [10] แต่ความยาวของเสาเข็มต่างกัน จะทำให้มีพฤติกรรมที่แตกต่างกันอย่างไร โดยทำการศึกษาการเคลื่อนตัวระหว่างชั้นที่ความยาวเสาเข็มแตกต่างกัน และทำการผลักโครงสร้างโดยศึกษาแรงในแนวแกน y เพียงทิศทางเดียว



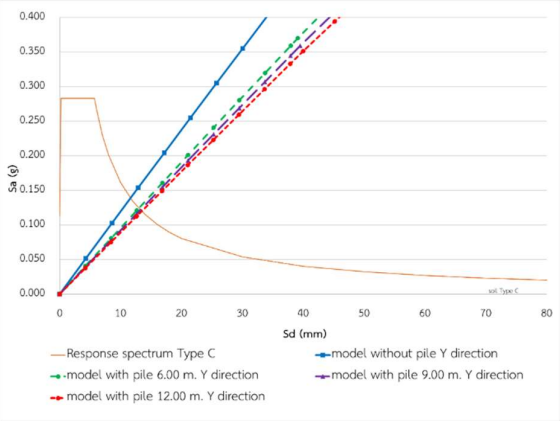
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านด้านข้างกับการเคลื่อนที่ของยอดอาคาร กรณีเคลื่อนที่ทางแกน y ที่ความยาวเสาเข็มต่างๆ

ในรูปที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงผลักและการเคลื่อนที่ของยอดอาคาร จะเห็นได้ว่า แรงผลักสูงสุดมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 565-583 ตัน โดยแบบจำลองที่มีเสาเข็มยาว 6.00 ม. มีความชันของความสัมพันธ์ที่สูงที่สุด โดยมีการเคลื่อนที่ยอดอาคาร 137 มม. ในขณะที่แบบจำลองที่มีความยาวเสาเข็ม 12.00 ม. มีความชันของความสัมพันธ์ที่ต่ำที่สุดหาก โดยมีการเคลื่อนที่ยอดอาคาร 144 มม. อย่างไรก็ตามเส้นความชันของกราฟในชั้นดินดังกล่าว และความยาวเสาเข็มที่แตกต่างกัน ยังมีค่าน้อยกว่ากรณีของแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็ม ทำให้สามารถกล่าวได้ว่า แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม จะทำให้สติฟเนสของโครงสร้างมีค่าลดลง และความลึกของเสาเข็มมีผลอย่างมีนัยสำคัญในการเพิ่ม และลดสติฟเนสของโครงสร้าง แต่ไม่มีผลต่อแรงต้านสูงสุดของอาคาร เมื่อพิจารณาแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม

รูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงผลักและการเคลื่อนที่ของยอดอาคาร มาเปรียบเทียบกับกราฟแรงแผ่นดินไหวสำหรับการประเมิน ให้แกนนอนอยู่ในรูปของการเคลื่อนตัวของโครงสร้างเชิงสเปกตรัม (S_d) และแกนตั้งอยู่ในรูปของความเร่ง (S_a) จะเห็นได้ว่า แบบจำลองที่มีเสาเข็มยาว 12.00 ม. จะถูกประเมินด้วยแรงแผ่นดินไหวที่ต่ำที่สุด โดยที่มีแบบจำลองที่มีเสาเข็มยาว 9.00 ม. และยาว 6.00 ม. จะถูกประเมินด้วยแรงแผ่นดินไหวเพิ่มขึ้นตามลำดับ ส่วนแบบจำลองที่ไม่มีเสาเข็มจะถูกประเมินด้วยสูงแผ่นดินไหวที่มีค่ามากที่สุดซึ่งเปรียบเทียบกันทั้งหมด ทำให้สามารถกล่าวได้ว่า ความยาวของเสาเข็มที่แตกต่างกันนั้นจะทำให้มีผลต่อการเพิ่มและลดของแรงแผ่นดินไหวที่ถูกประเมิน แต่อย่างไรก็ตาม กราฟกำลังต้าน ณ จุดสมรรถนะยังคงเป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าอาคารยังสามารถต้านแรงกระทำจากแผ่นดินไหวได้อย่างปลอดภัยในทุกแบบจำลอง

หากคำนึงถึงด้านความปลอดภัย และความประหยัดในการซ่อมแซมกำลังอาคารแล้ว การใช้แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม พบว่าสามารถใช้แรงแผ่นดินไหวในการประเมินที่ลดลง แบบจำลองสามารถแสดงพฤติกรรมของอาคารที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริง

ของอาคารได้มากกว่า และสามารถประเมินการซ่อมเสริมกำลังอาคารได้อย่างประหยัด และมีความปลอดภัยเมื่อได้เสริมกำลังเฉพาะตำแหน่งที่เสี่ยงต่อการวิบัติได้แม่นยำกว่า



รูปที่ 17 สมรรถนะอาคารที่ความยาวเสาเข็มต่างๆ

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลการประเมินอาคารต้านแผ่นดินไหวของแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็ม และแบบจำลองโครงสร้างอาคารที่ไม่คำนึงถึงเสาเข็ม โดยใช้สเปกตรัมผลตอบสนองแผ่นดินไหวในพื้นที่จังหวัดพะเยา โดยได้เลือกอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 4 ชั้น ซึ่งเป็นอาคารพานิชย์ตามแบบของกรมโยธาธิการและผังเมือง ซึ่งผลที่ได้เป็นกรณีศึกษาอาคารตัวอย่าง และสเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับพื้นที่ดังกล่าวเท่านั้น อย่างไรก็ตามสามารถสรุปได้ดังนี้

แบบจำลองที่พิจารณาโครงสร้างเสาเข็ม ทำให้อาคารมีคาบธรรมชาติที่สูงขึ้น และทำให้มีรูปแบบและสัดส่วนการเคลื่อนตัวของอาคารแตกต่างจากแบบจำลองที่ไม่พิจารณาเสาเข็ม

แบบจำลองที่พิจารณาโครงสร้างเสาเข็มทำให้สติฟเนสการต้านแรงด้านข้างของอาคารมีแนวโน้มลดลง โดยกำลังต้านแรงกระทำสูงสุดของอาคารที่ได้จากแบบจำลองทั้งสองมีค่าไม่แตกต่างกัน

ความยาวของเสาเข็มที่แตกต่างกันนั้นจะทำให้มีผลต่อการเพิ่มและลดของแรงแผ่นดินไหวที่ถูกประเมิน หากความยาวเสาเข็มมากจะทำให้ถูกประเมินด้วยแรงแผ่นดินไหวที่ต่ำลง หากความยาวเสาเข็มน้อยจะทำให้ถูกประเมินด้วยแรงแผ่นดินไหวที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ทำการประเมินนั้น กราฟกำลังต้าน ณ จุดสมรรถนะยังคงเป็นเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าอาคารยังสามารถต้านแรงกระทำจากแผ่นดินไหวได้อย่างปลอดภัยในทุกแบบจำลอง

การใช้แบบจำลองโครงสร้างอาคารที่คำนึงถึงโครงสร้างฐานรากเสาเข็มในการประเมิน จะพบพฤติกรรมของอาคารที่แตกต่างจากแบบจำลองที่มีโครงสร้างด้านบนร่วมกับฐานรองรับแบบยึดแน่นบนตอม่อเท่านั้น ซึ่งจะทำให้การซ่อมแซมและเสริมกำลังอาคารได้อย่างตรงจุดและประหยัดมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณสำหรับทุนสนับสนุนการวิจัยจากโครงการจัดตั้งหน่วยความเป็นเลิศ (UoE) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565 ของมหาวิทยาลัยพะเยา

เอกสารอ้างอิง

[1] Bielak, J. (1978). Dynamic response of non-linear building-foundation. *Earthquake Engineering Structure Dynamic*, vol. 6, pp.17-30.

[2] Ghannad, M.A. and Jahankhah, H. (2007). Site dependent strength reduction factors for soil structure systems. *Soil Dynamic Earthquake Engineerring*, vol. 27, pp. 99-110.

[3] Moghaddasi, M., Cubrinovski, M., Chase, J.G., Pampanin, S. and Carr, A. (2011). Probabilistic eavaluation of soil-foundation-structure interaction effects in seismis structural response. *Earthquake Engineering Structure Dynamic,* vol. 40, pp. 135-154.

[4] Sae-Long, W., Limkatanyu, S., Hansapinyo, C., Imja, T. and Kwon, M. (2020). Forced-based shear-flexure-interaction frame element for nonlinear analysis of non-ductile reinforced concrete column. *Journal of Applied and Computation Mechanics*, vol 6(SI), pp. 1151-1167.

[5] Sae-Long, W., Limkatanyu, S., Panedpojaman, P., Prachasaree, W., Damrongwiriyanupap, N., Kwon, M. and Hansapinyo, C. (2021). Nonlinear winkler-based frame element with inclusion of shear-flexure interaction effect for analysis of non-ductile rc member on foundation. *Journal of Applied and Computation Mechanics*, vol 7, no. 1, pp. 148-164.

[6] Pimanmas, A., Chaimahawan, P. and Joyklad, P. (2012). *Advanced Reinforced Concrete Foundation Structure Design*, Civil Engineering Consultant and Training Co. ltd, Bangkok.

[7] Davissin, A. (1970). Latetal load capacity of pile. *In 49 th Annual Meeting of the Highway Research Board*, Washington District of Columbia, United States, pp. 101-112.

[8] Terzaghi, K. (1955). Evaluation of coefficients of subgrade reaction. *Geotechnique*, vol. 5, pp. 297-326.

[9] National Standard DPT-1303-57. (2014). *Seismic Evaluation and Strengthening of Buildings and Structures*.

[10] National Standard DPT-1301/1302-61. (2018). *Seismic Resistant of Buildings and Structures and Structures*.

[11] Chaimahawan, P., Wongrat, P. and Choompoorat, T. (2017). Seismic response spectrum curve created from site exploration in Phayao province. *Engineering Journal of Research and Development*, vol 28, no. 3, pp. 15-26.

[12] Wongrat, P., Buakla, A., Choompoorat, T. and Chaimahawan, P. (2020). Earthquake effect to liquefaction potential in Phayao province. *Research and Development*, vol 31, no. 4, pp. 87-99.