การศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองฐานรากตื้นของอาคารเตี้ยภายใต้แรงแผ่นดินไหว
Comparative study of modeling of shallow foundation on low-rise building subjected to earthquake loading

นพรัตน์ เจนมั่นคง[1,*] ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิตย์[2] และ พชร เครือวิทย์[3]

[1,2,3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จ.กรุงเทพมหานคร
**Corresponding author; E-mail address: j.muiicz@gmail.com*

บทคัดย่อ

สำหรับอาคารที่ตั้งอยู่บนฐานรากตื้นภายใต้แรงกระทำของแผ่นดินไหว โดยทั่วไปโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากตื้นมักจะถูกออกแบบให้จุดรองรับของฐานรากเป็นแบบยึดแน่นหรือแบบยึดหมุน แต่ในความเป็นจริงแล้ว เมื่อมีแรงแผ่นดินไหวมากระทำจะส่งผลให้ฐานรากเกิดการเคลื่อนที่ในแนวราบและมีการหมุนที่จุดรองรับ ดังนั้นแบบจำลองฐานรากจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้างด้วย งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลการทำแบบจำลองฐานรากตื้นระหว่างการออกแบบจุดรองรับเป็นแบบยึดแน่น แบบยึดหมุนและแบบยึดหยุ่นภายใต้แรงแผ่นดินไหว เพื่อทราบแบบจำลองฐานรากตื้นที่เหมาะสมกับอาคารและนำมาใช้ออกแบบอาคารให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้ โดยในการศึกษานี้ได้ใช้หลักการวิเคราะห์ตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ.2561 เพื่อวิเคราะห์หาการเคลื่อนตัวของอาคารและเปรียบเทียบระหว่างอาคารที่มีจุดรองรับเป็นแบบยึดแน่น, แบบยึดหมุนและแบบยึดหยุ่น

คำสำคัญ: แผ่นดินไหว, ผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้าง, ฐานรากตื้น

Abstract

When the low-rise building, which is located on shallow foundation, is subjected to an earthquake loading, the shallow foundation is usually considered as fixed supports or pinned supports. However, The earthquake loading will apply the horizontal movement and rotational movement to the foundation. Thus, the soil-structure interaction shall be taken into account for shallow foundation modeling as well. This research is purposed to study the modeling result of the shallow foundation by using three types of support condition. Those are fixed support, pin support, and spring support under an earthquake loading. Then, it will be compared to find the type of support that is suitable in order to design the building that is capable to resist the earthquake loading. The Seismic resistant building design standard (DPT 1301/1302-61) is employed to be used for analysis of the movement of buildings and to compare the modeling result between fixed support, pinned support and spring support.

Keywords: earthquake, soil-structure interaction, shallow foundation

1. คำนำ

แผ่นดินไหว คือ เหตุการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นได้โดยธรรมชาติ โดยเฉพาะกับพื้นที่ที่อยู่ใกล้เขตที่มีความเสี่ยงที่จะเกิดแผ่นดินไหวหรือบริเวณรอยเลื่อนต่างๆ และพื้นที่ที่มีชั้นดินอ่อน ซึ่งมักจะก่อให้เกิดความเสียหายทั้งต่อชีวิตและทรัพย์สิน รวมไปถึงอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างต่างๆ ปัจจุบันจึงเริ่มมีความตระหนักถึงผลกระทบและความสูญเสียที่อาจเกิดขึ้น จึงได้มีการหาแนวทางและมาตรการการป้องกันและบรรเทาภัยจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว ซึ่งในประเทศไทยมีข้อกำหนดในการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวมีอยู่ 2 ประเภท คือ กฎกระทรวงกำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคารและพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ.2564 และมาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนของ แผ่นดินไหว พ.ศ.2561

ดังนั้น การออกแบบอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้นั้นจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะกับโครงสร้างหลักของอาคาร เช่น เสา คานและฐานราก ซึ่งจะต้องทำการออกแบบให้มีความแข็งแรงมากกว่าอาคารทั่วไปเพื่อให้สามารถต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวได้ตามที่ข้อกำหนดระบุไว้ แต่ข้อกำหนดเหล่านี้ยังคงมีช่องโหว่อยู่อีกมาก เช่น เรื่องของการทำแบบจำลองฐานราก โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ การทำแบบจำลองฐานรากเป็นจุดรองรับแบบยึดแน่น ยึดหมุนและแบบยึดหยุ่น ซึ่งการทำแบบจำลองจุดรองรับเป็นแบบยึดแน่นนั้นจะทำให้อาคารเกิดการเคลื่อนตัวไปทางด้านข้างของแต่ละชั้นน้อยกว่าการออกแบบจุดรองรับเป็นแบบยึดหมุน ส่วนการทำแบบจำลองจุดรองรับเป็นแบบยึดหยุ่น (สปริง) นั้นจะทำให้อาคารเกิดการเคลื่อนตัวไปทางด้านข้างของแต่ละชั้นมากกว่าการทำแบบจำลองจุดรองรับเป็นแบบยึดแน่น [1 - 3] แต่ฐานรากที่มีความยืดหยุ่นนั้นไม่เป็นที่นิยมในการนำมาใช้งานจริง เพราะต้องใช้ความรู้ทางด้านปฐพีศาสตร์และคุณสมบัติของชั้นดินในบริเวณนั้นๆ มาใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบ จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจึงทำให้เกิดความไม่ชัดเจนถึงความเหมาะสมของการทำแบบจำลองฐานรากภายใต้แรงแผ่นดินไหว

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลของการทำแบบจำลองฐานรากตื้นโดยใช้จุดรองรับเป็นแบบยึดแน่น แบบยึดหมุนและแบบยึดหยุ่น (สปริง) ที่จะต้องทำการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว โดยการวิเคราะห์ในการศึกษานี้ได้ใช้หลักการวิเคราะห์ตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ.2561 เพื่อหาแบบจำลองจุดรองรับที่เหมาะสมสำหรับฐานรากตื้นและนำไปใช้งานได้จริง ทำให้อาคารหรือสิ่งปลูกสร้างมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้นและช่วยลดการเกิดความเสียหายเมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว

2. วิธีการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและเปรียบเทียบแบบจำลองฐานรากตื้นของอาคารเตี้ยภายใต้แรงแผ่นดินไหว โดยใช้มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ.2561 [4]

2.1 วิธีแรงสถิตเทียบเท่า

เป็นการคำนวณหาแรงเฉือนที่ฐานอาคาร แล้วกระจายแรงไปยังชั้นต่างๆ โดยขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การตอบสนองของแผ่นดินไหว (C_s) และน้ำหนักโครงสร้างประสิทธิผล (W) ดังสมการที่ (1)

$$V = C_s W \tag{1}$$

โดยที่ค่า C_s คำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$C_s = S_a\left(\frac{I}{R}\right) \geq 0.01g \tag{2}$$

โดยที่ S_a คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม
I คือ ค่าตัวประกอบความสำคัญของอาคาร
R คือ ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง

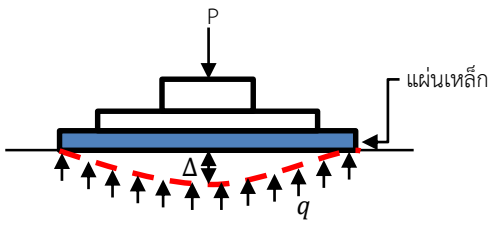
โดยที่ค่า S_a หาได้จากกราฟความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้งอาคารและประเภทชั้นดิน ตามที่กำหนดในมาตรฐาน มยผ.1302-61 [4]

2.2 การวิเคราะห์จุดรองรับฐานรากตื้นแบบยืดหยุ่น

การออกแบบโครงสร้างต้องคำนึงถึงการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่เสี่ยงในการเกิดแผ่นดินไหว ความแข็งหรือความอ่อนของดินทำให้มีผลต่อการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง เพื่อให้การออกแบบฐานรากตื้นวางบนชั้นดินมีความถูกต้องมากขึ้น จึงต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับชั้นดินด้วย ดินใต้ฐานรากจะถูกสมมติให้มีพฤติกรรมเป็นสปริง โดยค่าความยืดหยุ่นของสปริงสามารถคำนวณได้จากโมดูลัสต้านทานแรงกดของชั้นดิน ซึ่งสามารถหาได้จาก

2.2.1 วิธีของ Bowles

ได้พิจารณาถึงการเคลื่อนตัวของฐานรากในทิศทางต่างๆ ซึ่งเหมาะกับการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารทั้งหลัง เพื่อประเมินผลตอบสนองของอาคารภายใต้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้าง ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความแข็งของชั้นดินใต้ฐานรากคือ โมดูลัสต้านทานแรงกดของชั้นดิน ใช้ในการจำลองพฤติกรรมฐานรากที่วางอยู่บนชั้นรองรับที่เป็นฐานแบบยืดหยุ่น โดยโมดูลัสต้านทานแรงกดของชั้นดินสามารถหาได้จากการทดสอบกดด้วยแผ่นเหล็กในสนาม ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การทดสอบด้วยวิธีการกดด้วยแผ่นเหล็กในสนาม

จากรูปที่ 1 ทำให้หาค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของชั้นดินซึ่งนิยามด้วยสัญลักษณ์ k_s ได้ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$k_s = \frac{q}{\Delta} \tag{3}$$

โดยที่ q คือ หน่วยแรงแบกทานใต้ฐานราก (T/m^2)
Δ คือ ระยะการยุบตัวของฐานราก (m)

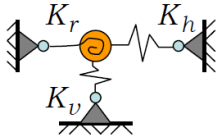
ในการทดสอบด้วยวิธีการกดด้วยแผ่นเหล็ก Bowles ได้แนะนำให้ใช้ค่า Δ เท่ากับ 25 มิลลิเมตร [5] ซึ่งเพียงพอที่จะทำให้เกิดหน่วยแรงแบกทานประลัย q_{ult} ทำให้ได้สมการดังแสดงในสมการที่ (4)

$$k_s = 40q_{ult} \tag{4}$$

โดยที่ q_{ult} คือ แรงดันดินประลัย มีค่าเท่ากับแรงแบกทานที่ยอมให้ (q_a) คูณกับอัตราส่วนความปลอดภัย (F.S.) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ F.S. = 3

2.2.2 มาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1303-57)

สำหรับฐานรากตื้นที่มีลักษณะแข็งเกร็ง (Rigid) เมื่อเทียบกับคุณลักษณะของชั้นดินที่รองรับ สามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองสปริงอิสระดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองสปริง

ลักษณะการเคลื่อนตัวของฐานรากตื้น สามารถแบ่งออกได้ 3 แบบ คือ การเคลื่อนตัวในแนวดิ่ง, การเคลื่อนตัวในแนวราบและการพลิกคว่ำ [6] สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) - (7)

$$K_h = \frac{GB}{2-\nu}\left[3.4\left(\frac{L}{B}\right)^{0.65} + 1.2\right] \quad (5)$$

$$K_v = \frac{GB}{1-\nu}\left[1.55\left(\frac{L}{B}\right)^{0.75} + 0.8\right] \quad (6)$$

$$K_r = \frac{GB^3}{1-\nu}\left[0.47\left(\frac{L}{B}\right)^{2.4} + 0.034\right] \quad (7)$$

โดยที่ G คือ โมดูลัสเฉือน (เมกะปาสกาล)
B คือ ความกว้างของฐานราก (มิลลิเมตร)
L คือ ความยาวของฐานราก (มิลลิเมตร)
ν คือ อัตราส่วนปัวซอง (มิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร)

3. อาคารตัวอย่างและพารามิเตอร์

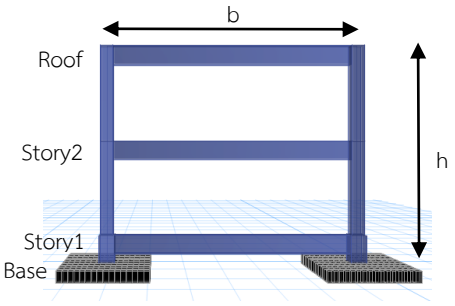
สมมติให้ที่ตั้งของอาคารตัวอย่างอยู่บริเวณแผ่นดินไหวรุนแรงที่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ และระบบต้านแรงด้านข้างเป็นแบบโครงต้านแรงดัดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบธรรมดา ตั้งอยู่บนชั้นดินประเภท D (ดินปกติ) โดยใช้ค่าแรงแบกทานที่ยอมให้เท่ากับ 100 kN/m^2

กำหนดจุดรองรับฐานรากเป็น 5 ประเภท ได้แก่ จุดรองรับแบบยึดแน่น (Fix) จุดรองรับแบบยึดหมุน (Pin) จุดรองรับแบบยึดหยุ่น Spr6, Spr12 และ Spr24 โดยใช้ค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของชั้นดินในแนวดิ่งซึ่งเปรียบเสมือนความอ่อนและความแข็งของชั้นดินเท่ากับ 6000, 12000 และ 24000 kN/m^3 ตามลำดับ ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการที่ (4) และใช้ค่าที่ขอบเขตบนและขอบเขตล่างของค่าที่กำหนดไว้คือ 2 เท่าและครึ่งหนึ่งของค่าแรงแบกทานที่ยอมให้ [6] ส่วนค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของชั้นดินในแนวราบของฐานรากสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5)

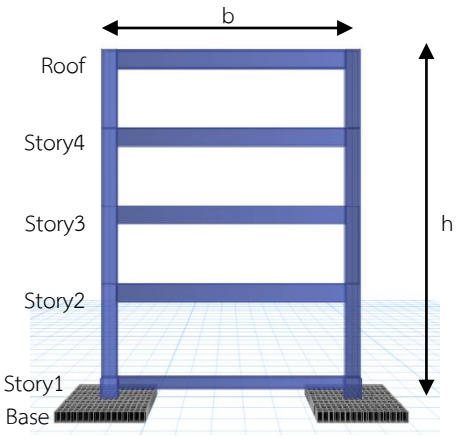
ฐานรากตื้นที่ใช้ในแบบจำลองมีคุณสมบัติทางวัสดุดังนี้

Modulus of Elasticity = 24,870 MPa
Poisson's Ratio = 0.2
Density = 24 kN/m^3
fc' = 28 MPa

แบบจำลองอาคารตัวอย่างที่ใช้เป็นอาคารเรียน 2 ชั้น และ 4 ชั้น และตึกแถวพักอาศัย 2 ชั้น และ 4 ชั้น มีรูปร่างของแบบจำลองอาคารดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ส่วนพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงในตารางที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ ซึ่งได้จากแบบโครงสร้างอาคารที่ก่อสร้างจริงในประเทศไทย



รูปที่ 3 อาคารตัวอย่าง 2 ชั้น



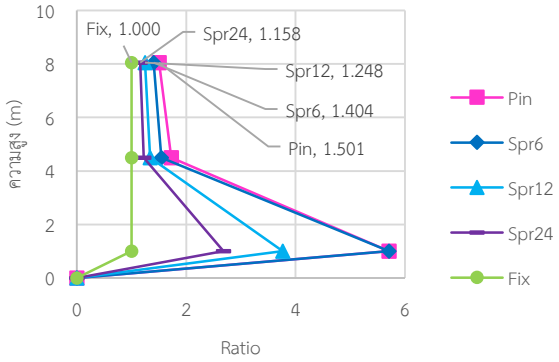
รูปที่ 4 อาคารตัวอย่าง 4 ชั้น

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับอาคารเรียน 2 ชั้น

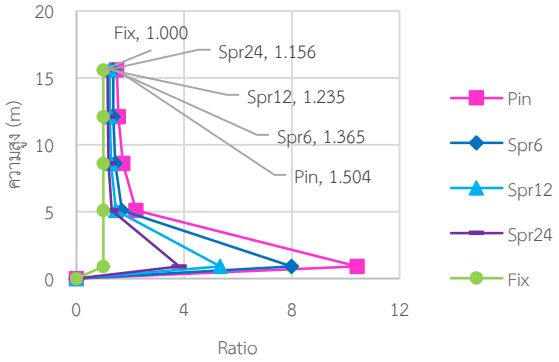
ชั้น	ความสูง (m)	ความกว้าง (m)	เสา (m)	คาน (m)	ฐานราก (m)
Roof	8.05	9	0.35x0.45	0.30x0.70	3.10x3.10
Story2	4.5		0.35x0.45	0.30x0.70	
Story1	1		0.45x0.55	0.30x0.70	
ค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของชั้นดิน			Spr6	Spr12	Spr24
Kv (kN/m^3)			6,000	12,000	24,000
Kh (kN/m)			42,325	84,650	169,300

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับอาคารเรียน 4 ชั้น

ชั้น	ความสูง (m)	ความกว้าง (m)	เสา (m)	คาน (m)	ฐานราก (m)
Roof	15.6	10.5	0.35x0.60	0.30x0.80	3.60x3.60
Story4	12.1		0.35x0.60	0.30x0.80	
Story3	8.6		0.35x0.60	0.30x0.80	
Story2	5.1		0.35x0.60	0.30x0.80	
Story1	0.9		0.45x0.70	0.25x0.50	
ค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของชั้นดิน			Spr6	Spr12	Spr24
Kv (kN/m^3)			6,000	12,000	24,000
Kh (kN/m)			57,079	114,158	228,317



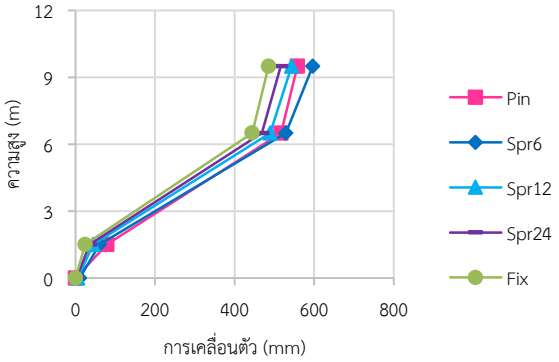
รูปที่ 7 อัตราส่วนการเคลื่อนตัวของอาคารเรียน 2 ชั้น



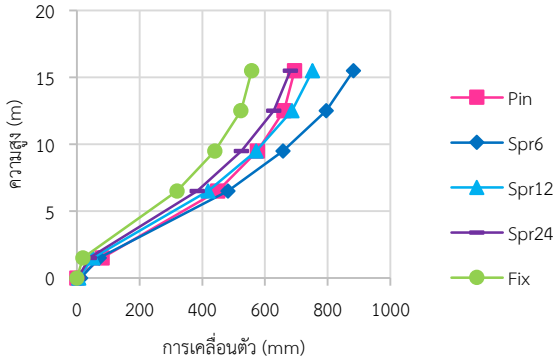
รูปที่ 8 อัตราส่วนการเคลื่อนตัวของอาคารเรียน 4 ชั้น

ตึกแถวพักอาศัย 2 ชั้น พบว่าที่จุดรองรับแบบ Spr12 มีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด 543.7 mm ที่จุดรองรับแบบยึดแน่น 485.1 mm และจุดรองรับแบบยึดหมุน 558.0 mm ดังแสดงในรูปที่ 9 ส่วนค่าการเคลื่อนตัวที่จุดรองรับแบบอื่นๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 7

ตึกแถวพักอาศัย 4 ชั้น พบว่าที่จุดรองรับแบบ Spr12 มีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด 751.6 mm ที่จุดรองรับแบบยึดแน่น 557.4 mm และจุดรองรับแบบยึดหมุน 694.9 mm ดังแสดงในรูปที่ 10 ส่วนค่าการเคลื่อนตัวที่จุดรองรับแบบอื่นๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 8



รูปที่ 9 การเคลื่อนตัวของตึกแถวพักอาศัย 2 ชั้น



รูปที่ 10 การเคลื่อนตัวของตึกแถวพักอาศัย 4 ชั้น

ตารางที่ 7 การเคลื่อนตัวของแต่ละชั้นของตึกแถวพักอาศัย 2 ชั้น

ชั้น	Fix (mm)	Spr24 (mm)	Spr12 (mm)	Spr6 (mm)	Pin (mm)
Roof	485.1	516.0	543.7	596.2	558.0
Story2	444.3	468.5	489.7	529.1	516.7
Story1	24.0	35.3	44.5	60.6	79.2
Base	0.0	2.9	5.7	11.0	0.0

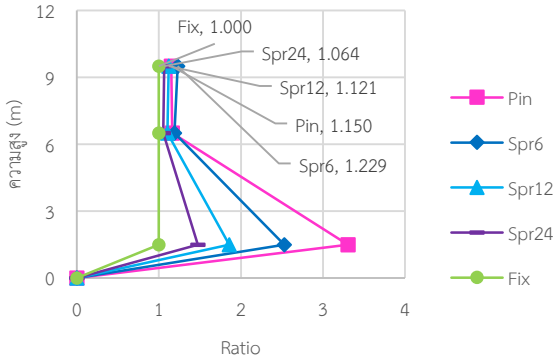
ตารางที่ 8 การเคลื่อนตัวของแต่ละชั้นของตึกแถวพักอาศัย 4 ชั้น

ชั้น	Fix (mm)	Spr24 (mm)	Spr12 (mm)	Spr6 (mm)	Pin (mm)
Roof	557.4	681.7	751.6	883.0	694.9
Story4	524.0	628.4	686.7	795.7	661.0
Story3	440.4	524.9	571.7	658.1	576.1
Story2	319.8	383.8	418.6	482.1	450.0
Story1	19.6	40.4	51.7	71.7	80.9
Base	0.0	3.3	6.4	11.9	0.0

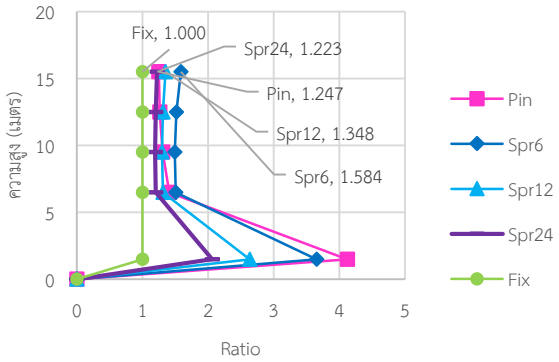
อัตราส่วนการเคลื่อนตัวของตึกแถวพักอาศัย 2 ชั้น เมื่อเปรียบเทียบกับจุดรองรับแบบยึดแน่น พิจารณาที่ชั้นบนสุดของโครงสร้าง พบว่าจุดรองรับแบบ Spr12 มีอัตราส่วนการเคลื่อนตัว 1.121 ส่วนจุดรองรับแบบยึดหมุนมีอัตราส่วนการเคลื่อนตัว 1.150 ดังแสดงในรูปที่ 11

อัตราส่วนการเคลื่อนตัวของตึกแถวพักอาศัย 4 ชั้น เมื่อเปรียบเทียบกับจุดรองรับแบบยึดแน่น พิจารณาที่ชั้นบนสุดของโครงสร้าง พบว่าจุดรองรับแบบ Spr12 มีอัตราส่วนการเคลื่อนตัว 1.348 ส่วนจุดรองรับแบบยึดหมุนมีอัตราส่วนการเคลื่อนตัว 1.247 ดังแสดงในรูปที่ 12

จากแบบจำลองโครงสร้างตึกแถวพักอาศัย 2 ชั้น จะเห็นว่าจุดรองรับแบบ Spr12 จะมีค่าใกล้เคียงกับจุดรองรับแบบยึดหมุน ส่วนตึกแถวพักอาศัย 4 ชั้น จะเห็นว่าจุดรองรับแบบ Spr12 จะมีค่ามากกว่าจุดรองรับแบบยึดหมุน



รูปที่ 11 อัตราส่วนการเคลื่อนตัวของตึกแถวพักอาศัย 2 ชั้น

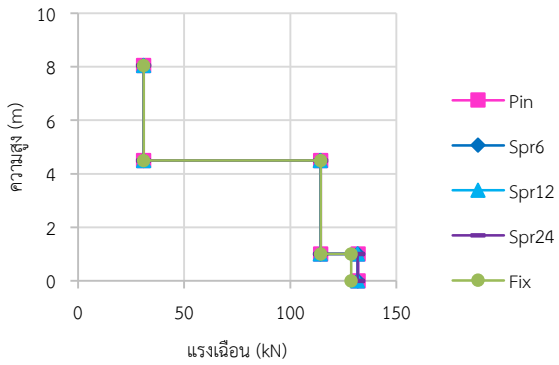


รูปที่ 12 อัตราส่วนการเคลื่อนตัวของตึกแถวพักอาศัย 4 ชั้น

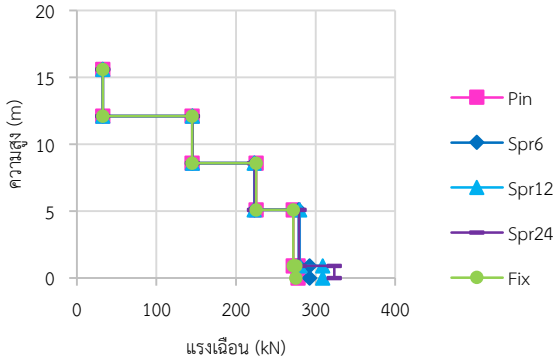
4.2 แรงเฉือนที่เสาของแบบจำลองโครงสร้าง

อาคารเรียน 2 ชั้น พบว่าที่จุดรองรับแบบ Spr12 มีค่าแรงเฉือนที่เสาสูงสุด 131.8 kN ที่จุดรองรับแบบยึดแน่น 128.7 kN และจุดรองรับแบบยึดหมุน 132.1 kN ดังแสดงในรูปที่ 13 ส่วนค่าแรงเฉือนที่เสาที่จุดรองรับแบบอื่นๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 9

อาคารเรียน 4 ชั้น พบว่าที่จุดรองรับแบบ Spr12 มีค่าแรงเฉือนที่เสาสูงสุด 309.2 kN ซึ่งมากกว่าจุดรองรับแบบยึดแน่นและแบบยึดหมุนที่ 275.1 kN และ 278.2 kN ดังแสดงในรูปที่ 14 ส่วนค่าแรงเฉือนที่เสาที่จุดรองรับแบบอื่นๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 10



รูปที่ 13 แรงเฉือนที่เสาของอาคารเรียน 2 ชั้น



รูปที่ 14 แรงเฉือนที่เสาของอาคารเรียน 4 ชั้น

ตารางที่ 9 แรงเฉือนที่เสาของอาคารเรียน 2 ชั้น

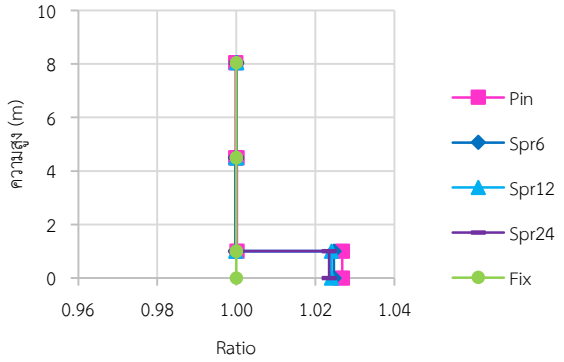
ชั้น	Fix (kN)	Spr24 (kN)	Spr12 (kN)	Spr6 (kN)	Pin (kN)
Roof	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9
Story2+	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9
Story2-	114.4	114.3	114.3	114.3	114.4
Story1+	114.4	114.3	114.3	114.3	114.4
Story1-	128.7	131.7	131.8	131.9	132.1
Base	128.7	131.7	131.8	131.9	132.1

ตารางที่ 10 แรงเฉือนที่เสาของอาคารเรียน 4 ชั้น

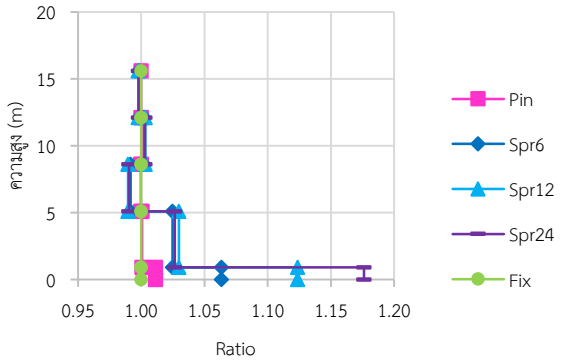
ชั้น	Fix (kN)	Spr24 (kN)	Spr12 (kN)	Spr6 (kN)	Pin (kN)
Roof	32.6	32.5	32.5	32.5	32.6
Story4+	32.6	32.5	32.5	32.5	32.6
Story4-	144.8	145.2	145.3	145.2	144.8
Story3+	144.8	145.2	145.3	145.2	144.8
Story3-	225.4	223.2	223.1	223.5	225.4
Story2+	225.4	223.2	223.1	223.5	225.4
Story2-	271.9	279.1	280.1	278.7	272.1
Story1+	271.9	279.1	280.1	278.7	272.1
Story1-	275.1	323.6	309.2	292.6	278.2
Base	275.1	323.6	309.2	292.6	278.2

อัตราส่วนแรงเฉือนในเสาของอาคารเรียน 2 ชั้น เมื่อเปรียบเทียบกับจุดรองรับแบบยึดแน่น พบว่าจุดรองรับแบบ Spr12 มีอัตราส่วนแรงเฉือนในเสาสูงสุด 1.024 ที่ช่วงเสา Base ถึง Story1 และที่ช่วงเสาเดียวกันสำหรับจุดรองรับแบบยึดหมุนมีอัตราส่วนแรงเฉือนในเสา 1.027 ดังแสดงในรูปที่ 15

อัตราส่วนแรงเฉือนในเสาของอาคารเรียน 4 ชั้น เมื่อเปรียบเทียบกับจุดรองรับแบบยึดแน่น พบว่าจุดรองรับแบบ Spr12 มีอัตราส่วนแรงเฉือนในเสาสูงสุด 1.124 ที่ช่วงเสา Base ถึง Story1 และที่ช่วงเสาเดียวกันสำหรับจุดรองรับแบบยึดหมุนมีอัตราส่วนแรงเฉือนในเสาสูงสุด 1.011 ดังแสดงในรูปที่ 16



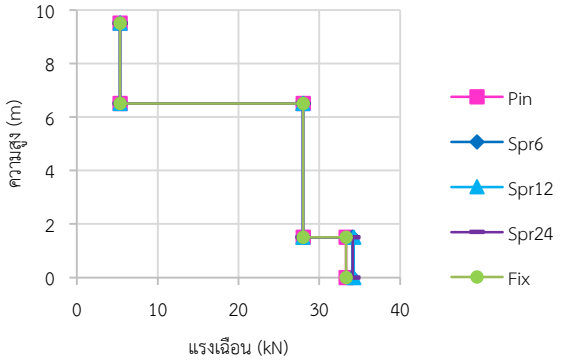
รูปที่ 15 อัตราส่วนแรงเฉือนที่เสาของอาคารเรียน 2 ชั้น



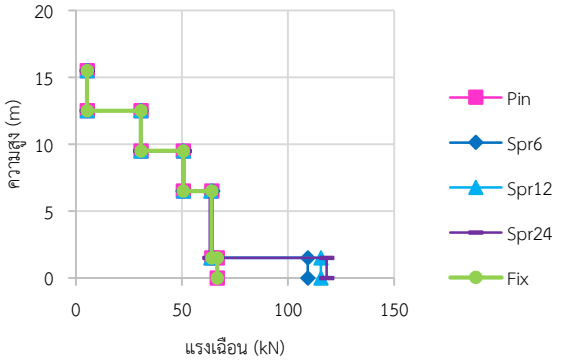
รูปที่ 16 อัตราส่วนแรงเฉือนที่เสาของอาคารเรียน 4 ชั้น

ตึกแถวพักอาศัย 2 ชั้น พบว่าที่จุดรองรับแบบ Spr12 มีค่าแรงเฉือนที่เสาสูงสุด 34.3 kN ที่จุดรองรับแบบยึดแน่นและแบบยึดหมุนมีค่าเท่ากันที่ 33.3 kN ดังแสดงในรูปที่ 17 ส่วนค่าแรงเฉือนที่เสาที่จุดรองรับแบบอื่นๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 11

ตึกแถวพักอาศัย 4 ชั้น พบว่าที่จุดรองรับแบบ Spr12 มีค่าแรงเฉือนที่เสาสูงสุด 115.4 kN ที่จุดรองรับแบบยึดแน่น 66.6 kN และจุดรองรับแบบยึดหมุน 66.7 kN ดังแสดงในรูปที่ 18 ส่วนค่าแรงเฉือนที่เสาที่จุดรองรับแบบอื่นๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 12



รูปที่ 17 แรงเฉือนที่เสาของตึกแถวพักอาศัย 2 ชั้น



รูปที่ 18 แรงเฉือนที่เสาของตึกแถวพักอาศัย 4 ชั้น

ตารางที่ 11 แรงเฉือนที่เสาของตึกแถวพักอาศัย 2 ชั้น

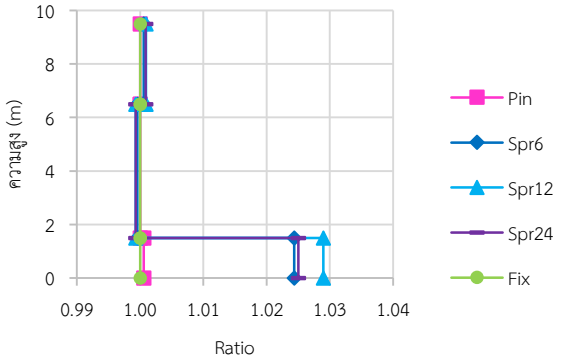
ชั้น	Fix (kN)	Spr24 (kN)	Spr12 (kN)	Spr6 (kN)	Pin (kN)
Roof	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
Story2+	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
Story2-	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0
Story1+	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0
Story1-	33.3	34.1	34.3	34.1	33.3
Base	33.3	34.1	34.3	34.1	33.3

ตารางที่ 12 แรงเฉือนที่เสาของตึกแถวพักอาศัย 4 ชั้น

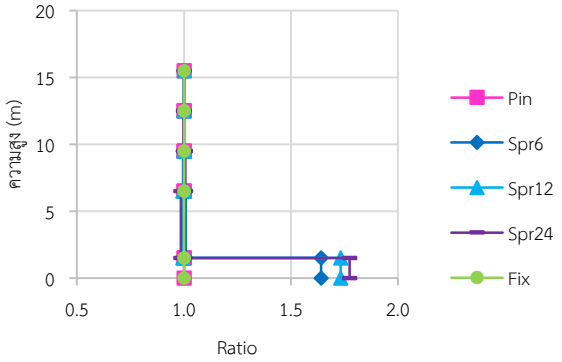
ชั้น	Fix (kN)	Spr24 (kN)	Spr12 (kN)	Spr6 (kN)	Pin (kN)
Roof	5.4	5.4	5.4	5.3	5.4
Story4+	5.4	5.4	5.4	5.3	5.4
Story4-	30.7	30.6	30.6	30.7	30.7
Story3+	30.7	30.6	30.6	30.7	30.7
Story3-	50.7	51.0	50.8	50.5	50.7
Story2+	50.7	51.0	50.8	50.5	50.7
Story2-	64.0	63.1	63.6	64.5	64.0
Story1+	64.0	63.1	63.6	64.5	64.0
Story1-	66.6	118.2	115.4	109.3	66.7
Base	66.6	118.2	115.4	109.3	66.7

อัตราส่วนแรงเฉือนที่เสาของตึกแถวพักอาศัย 2 ชั้น เมื่อเปรียบเทียบกับจุดรองรับแบบยึดแน่น พบว่าจุดรองรับแบบ Spr12 มีอัตราส่วนแรงเฉือนที่เสาสูงสุด 1.029 ที่ช่วงเสา Base ถึง Story1 และที่ช่วงเสาเดียวกันสำหรับจุดรองรับแบบยึดหมุนมีค่าใกล้เคียงกับจุดรองรับแบบยึดแน่น ดังแสดงในรูปที่ 19

อัตราส่วนแรงเฉือนที่เสาของตึกแถวพักอาศัย 4 ชั้น เมื่อเปรียบเทียบกับจุดรองรับแบบยึดแน่น พบว่าจุดรองรับแบบ Spr12 มีอัตราส่วนแรงเฉือนที่เสาสูงสุด 1.733 ที่ช่วงเสา Base ถึง Story1 และที่ช่วงเสาเดียวกันสำหรับจุดรองรับแบบยึดหมุนมีค่าใกล้เคียงกับจุดรองรับแบบยึดแน่น ดังแสดงในรูปที่ 20



รูปที่ 19 อัตราส่วนแรงเฉือนที่เสาของตึกแถวพักอาศัย 2 ชั้น

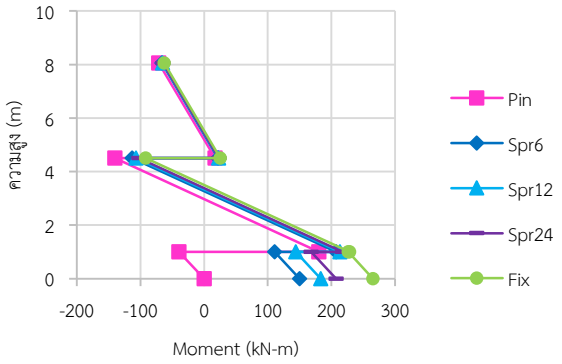


รูปที่ 20 อัตราส่วนแรงเฉือนที่เสาของตึกแถวพักอาศัย 4 ชั้น

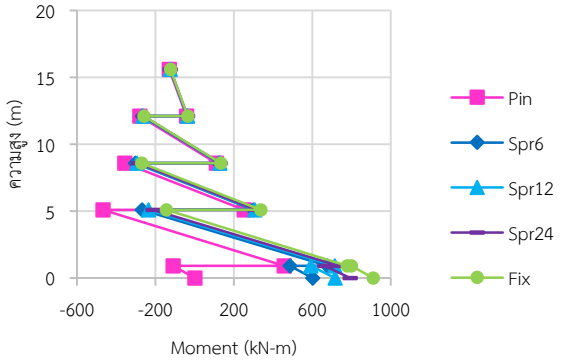
4.3 โมเมนต์ที่เสาของแบบจำลองโครงสร้าง

อาคารเรียน 2 ชั้น พบว่าที่จุดรองรับแบบ Spr12 มีค่าโมเมนต์ในเสาสูงสุด 213.2 kN-m ที่จุดรองรับแบบยึดแน่น 228.5 kN-m และจุดรองรับแบบยึดหมุน 180.3 kN-m ดังแสดงในรูปที่ 21 ส่วนค่าโมเมนต์ที่เสาที่จุดรองรับแบบอื่นๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 13

อาคารเรียน 4 ชั้น พบว่าที่จุดรองรับแบบ Spr12 มีค่าโมเมนต์ที่เสาสูงสุด 715.8 kN-m ที่จุดรองรับแบบยึดแน่น 910.5 kN-m และจุดรองรับแบบยึดหมุน 468.0 kN-m ดังแสดงในรูปที่ 22 ส่วนค่าโมเมนต์ที่เสาที่จุดรองรับแบบอื่นๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 14



รูปที่ 21 โมเมนต์ที่เสาของอาคารเรียน 2 ชั้น



รูปที่ 22 โมเมนต์ที่เสาของอาคารเรียน 4 ชั้น

ตารางที่ 13 โมเมนต์ที่เสาของอาคารเรียน 2 ชั้น

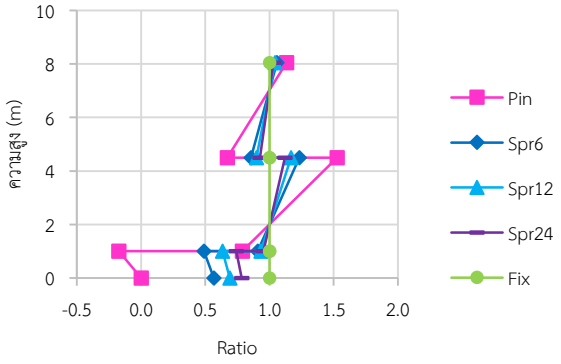
ชั้น	Fix (kN-m)	Spr24 (kN-m)	Spr12 (kN-m)	Spr6 (kN-m)	Pin (kN-m)
Roof	-62.8	-64.6	-65.4	-66.4	-71.1
Story2+	25.4	23.5	22.8	21.8	17.1
Story2-	-91.7	-102.6	-106.9	-112.9	-139.9
Story1+	228.5	217.6	213.2	207.2	180.3
Story1-	226.7	168.1	143.9	110.7	-39.6
Base	265.3	207.6	183.5	150.3	0.0

ตารางที่ 14 โมเมนต์ที่เสาของอาคารเรียน 4 ชั้น

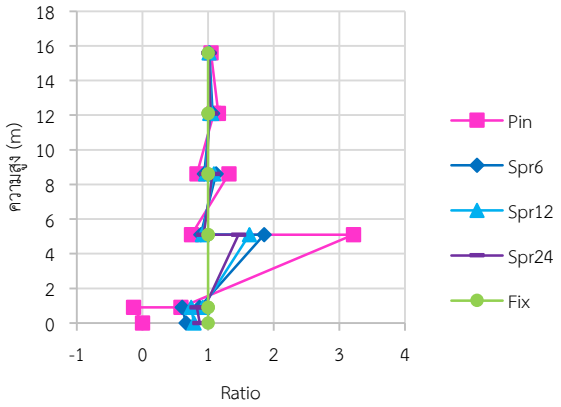
ชั้น	Fix (kN-m)	Spr24 (kN-m)	Spr12 (kN-m)	Spr6 (kN-m)	Pin (kN-m)
Roof	-123.8	-125.0	-125.5	-126.0	-129.5
Story4+	-35.8	-37.2	-37.7	-38.2	-41.5
Story4-	-258.4	-263.0	-264.7	-267.1	-281.2
Story3+	132.6	129.1	127.5	124.9	109.8
Story3-	-271.1	-288.9	-295.3	-304.1	-356.9
Story2+	337.5	313.9	306.9	299.4	251.5
Story2-	-145.6	-213.0	-237.1	-269.7	-468.0
Story1+	779.0	736.1	715.2	677.8	457.2
Story1-	800.4	664.0	592.2	485.3	-111.3
Base	910.5	793.4	715.8	602.3	0.0

อัตราส่วนโมเมนต์ที่เสาของอาคารเรียน 2 ชั้น เมื่อเปรียบเทียบกับจุดรองรับแบบยึดแน่น พบว่าจุดรองรับแบบ Spr12 มีอัตราส่วนโมเมนต์ที่เสาสูงสุด 1.166 ที่ช่วงเสา Story1 ถึง Story2 ในช่วงเสาเดียวกันจุดรองรับแบบยึดหมุนมีอัตราส่วนโมเมนต์ในเสา 1.527 ดังแสดงในรูปที่ 23

อัตราส่วนโมเมนต์ในเสาของอาคารเรียน 4 ชั้น เมื่อเปรียบเทียบกับจุดรองรับแบบยึดแน่น พบว่าจุดรองรับแบบ Spr12 มีอัตราส่วนโมเมนต์ในเสาสูงสุด 1.628 ที่ช่วงเสา Story1 ถึง Story2 ในช่วงเสาเดียวกันจุดรองรับแบบยึดหมุนมีอัตราส่วนโมเมนต์ในเสาสูงสุด 3.214 ดังแสดงในรูปที่ 24



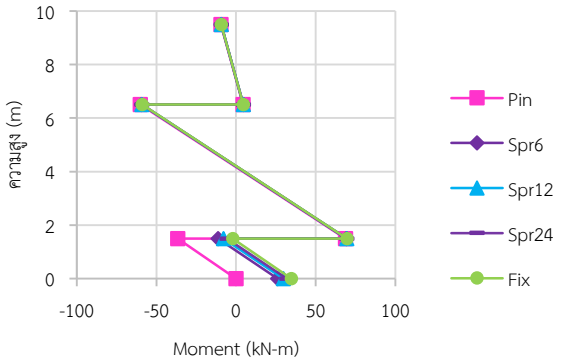
รูปที่ 23 อัตราส่วนโมเมนต์ที่เสาของอาคารเรียน 2 ชั้น



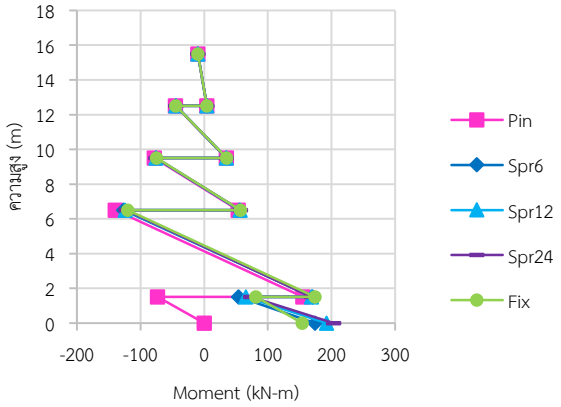
รูปที่ 24 อัตราส่วนโมเมนต์ที่เสาของอาคารเรียน 4 ชั้น

ตึกแถวพักอาศัย 2 ชั้น พบว่าที่จุดรองรับแบบ Spr12 มีค่าโมเมนต์ที่เสาสูงสุด 69.4 kN-m ที่จุดรองรับแบบยึดแน่น 69.7 kN-m และจุดรองรับแบบยึดหมุน 68.6 kN-m ดังแสดงในรูปที่ 25 ส่วนค่าโมเมนต์ที่เสาที่จุดรองรับแบบอื่นๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 15

ตึกแถวพักอาศัย 4 ชั้น พบว่าที่จุดรองรับแบบ Spr12 มีค่าโมเมนต์ที่เสาสูงสุด 192.4 kN-m ที่จุดรองรับแบบยึดแน่น 154.3 kN-m ดังแสดงในรูปที่ 26 ส่วนค่าโมเมนต์ในเสาที่จุดรองรับแบบอื่นๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 16



รูปที่ 25 โมเมนต์ที่เสาของตึกแถวพักอาศัย 2 ชั้น



รูปที่ 26 โมเมนต์ที่เสาของตึกแถวพักอาศัย 4 ชั้น

ตารางที่ 15 โมเมนต์ในเสาของตึกแถวพักอาศัย 2 ชั้น

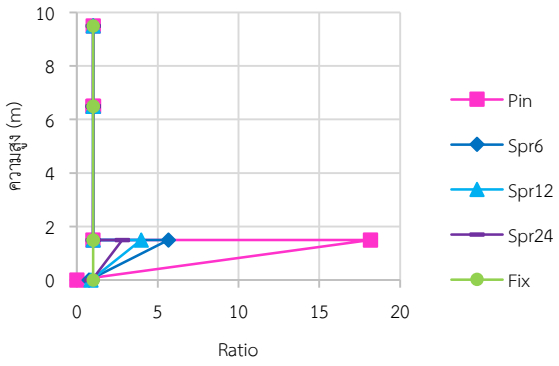
ชั้น	Fix (kN-m)	Spr24 (kN-m)	Spr12 (kN-m)	Spr6 (kN-m)	Pin (kN-m)
Roof	-9.4	-9.4	-9.4	-9.4	-9.5
Story2+	4.5	4.5	4.5	4.5	4.4
Story2-	-59.1	-59.2	-59.3	-59.4	-60.2
Story1+	69.7	69.5	69.4	69.4	68.6
Story1-	-2.0	-5.7	-8.0	-11.4	-36.7
Base	34.6	31.9	29.7	26.1	0.0

ตารางที่ 16 โมเมนต์ในเสาของตึกแถวพักอาศัย 4 ชั้น

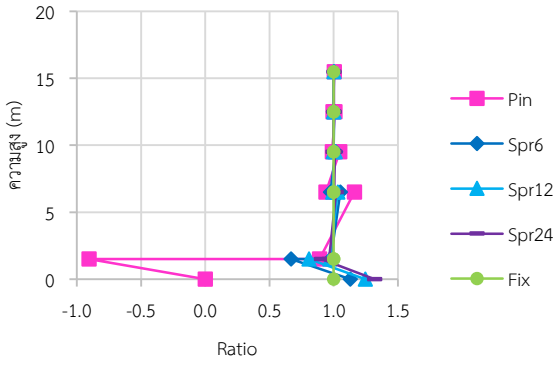
ชั้น	Fix (kN-m)	Spr24 (kN-m)	Spr12 (kN-m)	Spr6 (kN-m)	Pin (kN-m)
Roof	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8
Story4+	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
Story4-	-44.5	-44.6	-44.6	-44.6	-44.9
Story3+	35.2	35.0	35.1	35.2	34.8
Story3-	-74.9	-75.5	-75.7	-75.9	-78.4
Story2+	56.8	57.1	56.4	55.3	53.4
Story2-	-120.2	-122.4	-124.0	-126.5	-139.5
Story1+	174.2	168.1	168.7	170.1	154.9
Story1-	81.0	73.3	65.4	54.1	-73.3
Base	154.3	203.3	192.4	174.3	0.0

อัตราส่วนโมเมนต์ที่เสาของตึกแถวพักอาศัย 2 ชั้น เมื่อเปรียบเทียบกับจุดรองรับแบบยึดแน่น พบว่าจุดรองรับแบบ Spr12 มีอัตราส่วนโมเมนต์ที่เสาสูงสุด 3.973 ที่ช่วงเสา Base ถึง Story1 ในช่วงเสาเดียวกันจุดรองรับแบบยึดหมุนมีอัตราส่วนโมเมนต์ในเสา 18.166 ดังแสดงในรูปที่ 27

อัตราส่วนโมเมนต์ในเสาของตึกแถวพักอาศัย 4 ชั้น เมื่อเปรียบเทียบกับจุดรองรับแบบยึดแน่น พบว่าจุดรองรับแบบ Spr12 มีอัตราส่วนโมเมนต์ที่เสาสูงสุด 0.807 ที่ช่วงเสา Base ถึง Story1 ในช่วงเสาเดียวกันจุดรองรับแบบยึดหมุนมีอัตราส่วนโมเมนต์ในเสา 0.905 ดังแสดงในรูปที่ 28



รูปที่ 27 อัตราส่วนโมเมนต์ที่เสาของตึกแถวพักอาศัย 2 ชั้น



รูปที่ 28 อัตราส่วนโมเมนต์ที่เสาของตึกแถวพักอาศัย 4 ชั้น

5. บทสรุป

การศึกษานี้ได้ทำการศึกษาแบบจำลองฐานรากตื้นของอาคารเตี้ยภายใต้แรงแผ่นดินไหว โดยใช้อาคารตัวอย่างเป็นอาคารเรียนและตึกแถวพักอาศัย ซึ่งเป็นตัวแทนของอาคารที่มีคานช่วงยาวและช่วงสั้นตามลำดับ และพิจารณาที่อาคารมีจำนวน 2 และ 4 ชั้น พบว่าผลตอบสนองและแรงภายในของโครงสร้างที่ได้จำลองจุดรองรับแบบยืดหยุ่น (Spr12) จะไม่ได้อยู่ระหว่างจุดรองรับแบบยึดแน่นและแบบยึดหมุน ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าการใช้จุดรองรับแบบยืดหยุ่นจะมีการเคลื่อนตัวในแนวราบและในแนวดิ่งของฐานราก ซึ่งต่างจากจุดรองรับแบบยึดหมุนที่ไม่มีการเคลื่อนตัวในแนวราบและในแนวดิ่ง ทำให้ผลตอบสนองที่ได้มีค่าสูงกว่าในบางรูปแบบอาคาร ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

สำหรับการเคลื่อนตัวในแนวราบที่ชั้นบนสุดพบว่า จุดรองรับแบบ Spr12 มีอัตราส่วนการเคลื่อนตัว 1.25 เท่า สำหรับอาคารเรียนทั้ง 2 ความสูง แต่สำหรับตึกแถวที่เป็นคานช่วงสั้น พบว่าตึกแถว 2 ชั้น มีอัตราส่วนการเคลื่อนตัวลดลงเหลือ 1.12 เท่า สำหรับจุดรองรับแบบ Spr12 และมีค่าใกล้เคียงกับจุดรองรับแบบยึดหมุน แต่เมื่อเป็นตึกแถว 4 ชั้น พบว่า มีอัตราส่วนการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นเป็น 1.35 เท่า สำหรับจุดรองรับแบบ Spr12 และมีค่าการเคลื่อนตัวมากกว่าจุดรองรับแบบยึดหมุน

สำหรับแรงเฉือนที่เสาได้พิจารณาที่เสาตอม่อพบว่า จุดรองรับแบบ Spr12 และแบบยึดหมุนมีค่าใกล้เคียงกับจุดรองรับแบบยึดแน่น ยกเว้นอาคารสูง 4 ชั้นที่จุดรองรับแบบ Spr12 มีอัตราส่วนแรงเฉือนมีค่า 1.12 และ 1.73 เท่า สำหรับอาคารที่มีคานช่วงยาวและช่วงสั้นตามลำดับ และได้ค่าอัตราส่วนแรงเฉือนมากกว่าแบบจุดยึดหมุนซึ่งมีค่าประมาณ 1.00 เท่า ส่วนเสาชั้นที่เหนือกว่าพื้นชั้น 1 พบว่าแบบจุดรองรับทั้ง 3 แบบ ให้ค่าแรงเฉือนภายในที่ไม่แตกต่างกัน

สำหรับโมเมนต์ที่เสาได้พิจารณาที่เสาตอม่อพบว่า จุดรองรับแบบ Spr12 มีอัตราส่วนโมเมนต์ 1.17 และ 1.63 เท่า สำหรับอาคารเรียน 2 ชั้น และ 4 ชั้นตามลำดับ แต่สำหรับตึกแถวที่เป็นคานช่วงสั้น พบว่ามีอัตราส่วนโมเมนต์ 3.97 และ 0.81 เท่า สำหรับตึกแถว 2 ชั้นและ 4 ชั้นตามลำดับ แต่ทุกกรณีจะมีค่าน้อยกว่าจุดรองรับแบบยึดหมุน ถึงแม้ว่าอัตราส่วนโมเมนต์จะมีค่ามาก แต่เมื่อดูค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นพบว่าจะมีค่าน้อยกว่าค่าโมเมนต์ที่เสาชั้น 1 (ซึ่งมีช่วงความยาวเสาที่ยาวกว่า)

ดังนั้น หากอาคารตั้งอยู่บนชั้นดินประเภท D และมีคานช่วงสั้นและมีความสูง ควรจะต้องพิจารณาจุดรองรับแบบยืดหยุ่น เนื่องจากผลของการเคลื่อนตัวจะให้ค่าที่สูงกว่า และให้ค่าแรงเฉือนที่สูงกว่าที่เสาชั้นตอม่อ เมื่อเทียบกับจุดรองรับแบบยึดแน่นและแบบยึดหมุน

เอกสารอ้างอิง

[1] พงศกร คงนคร. (2559). *ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างฐานรากตื้นกับโครงสร้างต่อผลตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

[2] สิริกร นาคพันธ์. (2551*). การวิเคราะห์หากำลังต้านทานแผ่นดินไหวสำหรับอาคารสูงในกรุงเทพมหานครที่คำนึงถึงผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้าง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

[3] สมัชญ์ จันทรสาขา. (2555). *ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้างที่มีต่อสเปกตร้าการตอบสนอง เพื่อใช้ในการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวในเขตกรุงเทพมหานคร*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

[4] กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2561). *มาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ.1301/1302-61*. กระทรวงมหาดไทย, ประเทศไทย.

[5] Bowles, J.E. (1996). *Foundation Analysis and Design*. The McGraw-Hill Companies, Inc., pp.124-125.

[6] กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2557). *มาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ.1303-57*. กระทรวงมหาดไทย, ประเทศไทย.