

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

นพรัตน์ เจนมันคง^{1,*} ณัฐวุฒิ ธนศรีสถิตย์² และ พชร เครือวิทย์³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: j.muiccz@gmail.com

บทคัดย่อ

สำหรับอาคารที่ตั้งอยู่บนฐานรากตื้นภายใต้แรงกระทำของแผ่นดินไหว โดยทั่วไปโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากตื้นมักจะถูกออกแบบให้จุดรองรับของฐานรากเป็นแบบยึดแน่นหรือแบบยึดหมุน แต่ในความเป็นจริงแล้ว เมื่อมีแรงแผ่นดินไหวมากระทำจะส่งผลให้ฐานรากเกิดการเคลื่อนที่ในแนวราบและมีการหมุนที่จุดรองรับ ดังนั้นแบบจำลองฐานรากจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้างด้วย งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลการทำแบบจำลองฐานรากตื้นระหว่างการออกแบบจุดรองรับเป็นแบบยึดแน่น แบบยึดหมุน และแบบยึดหมุนภายใต้แรงแผ่นดินไหว เพื่อทราบแบบจำลองฐานรากตื้นที่เหมาะสมกับอาคารและนำมาใช้ออกแบบอาคารให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้ โดยในการศึกษานี้ได้ใช้หลักการวิเคราะห์ตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ.2561 เพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของอาคารและเปรียบเทียบระหว่างอาคารที่มีจุดรองรับเป็นแบบยึดแน่น, แบบยึดหมุนและแบบยึดหมุน

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 กฎกระทรวงกำหนดการรับน้ำหนักความต้านทาน ความคงทนของอาคารและพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ.2564 และมาตรฐานการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานการสั่นสะเทือนของ แผ่นดินไหว พ.ศ.2561

ดังนั้น การออกแบบอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้นั้นจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะกับโครงสร้างหลักของอาคาร เช่น เสา คานและฐานราก ซึ่งจะต้องทำการออกแบบให้มีความแข็งแรงมากกว่าอาคารทั่วไปเพื่อให้สามารถต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวได้ตามที่ข้อกำหนดระบุไว้ แต่ข้อกำหนดเหล่านี้ยังคงมีช่องโหว่อยู่อีกมาก เช่น เรื่องของการทำแบบจำลองฐานราก โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ การทำแบบจำลองฐานรากเป็นจุดรองรับแบบยึดแน่น ยึดหมุนและแบบยึดหมุน ซึ่งการทำแบบจำลองจุดรองรับเป็นแบบยึดแน่นนั้นจะทำให้อาคารเกิดการเคลื่อนตัวไปทางด้านข้างของแต่ละชั้นน้อยกว่าการออกแบบจุดรองรับเป็นแบบยึดหมุน ส่วนการทำแบบจำลองจุดรองรับเป็นแบบยึดหมุน (สปริง) นั้นจะทำให้อาคารเกิดการเคลื่อนตัวไปทางด้านข้างของแต่ละชั้นมากกว่าการทำแบบจำลองจุดรองรับเป็นแบบยึดแน่น [1 - 3] แต่ฐานรากที่มีความยึดหยุ่นนั้นไม่เป็นที่นิยมในการนำมาใช้งานจริงเพราะต้องใช้ความรู้ทางด้านปฐพีศาสตร์และคุณสมบัติของชั้นดินในบริเวณนั้นๆ มาใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบ จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจึงทำให้เกิดความไม่ชัดเจนถึงความเหมาะสมของการทำแบบจำลองฐานรากภายใต้แรงแผ่นดินไหว

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลของการทำแบบจำลองฐานรากดินโดยใช้จตุรกรรับเป็นแบบยึดแน่น แบบยึดหมุนและแบบยึดหยุ่น (สปริง) ที่จะต้องทำการวิเคราะห์ที่โครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว โดยการวิเคราะห์ในการศึกษานี้ได้ใช้หลักการวิเคราะห์ตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ.2561 เพื่อหาแบบจำลองจตุรกรรับที่เหมาะสมสำหรับฐานรากดินและนำไปใช้งานได้จริง ทำให้อาคารหรือสิ่งปลูกสร้างมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้นและช่วยลดการเกิดความเสียหายเมื่อเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว

2. วิธีการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและเปรียบเทียบแบบจำลองฐานรากดินของอาคารเดี่ยวภายใต้แรงแผ่นดินไหว โดยใช้มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ.2561 [4]

2.1 วิธีแรงสถิตเทียบเท่า

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

$$V = C_s W \quad (1)$$

โดยที่ค่า C_s คำนวณได้จากสมการที่ (2)

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

โดยที่ S_a คือ ค่าความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัม
 I คือ ค่าตัวประกอบความสำคัญของอาคาร
 R คือ ค่าตัวประกอบปรับผลตอบสนอง

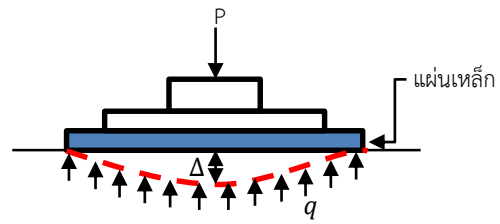
โดยที่ค่า S_a หาได้จากกราฟความเร่งตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับการออกแบบซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้งอาคารและประเภทชั้นดิน ตามที่กำหนดในมาตรฐาน มยผ.1302-61 [4]

2.2 การวิเคราะห์จตุรกรรับฐานรากดินแบบยึดหยุ่น

การออกแบบโครงสร้างต้องคำนึงถึงการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่เสี่ยงในการเกิดแผ่นดินไหว ความแข็งหรือความอ่อนของดินทำให้มีผลต่อการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง เพื่อให้การออกแบบฐานรากดินวางบนชั้นดินมีความถูกต้องมากขึ้น จึงต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับชั้นดินด้วย ดินใต้ฐานรากจะถูกสมมติให้มีพฤติกรรมเป็นสปริง โดยค่าความยืดหยุ่นของสปริงสามารถคำนวณได้จากโมดูลัสต้านทานแรงกดของชั้นดิน ซึ่งสามารถหาได้จาก

2.2.1 วิธีของ Bowles

ได้พิจารณาถึงการเคลื่อนตัวของฐานรากในทิศทางต่างๆ ซึ่งเหมาะกับการวิเคราะห์ที่โครงสร้างอาคารทั้งหลัง เพื่อประเมินผลตอบสนองของอาคารภายใต้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้าง ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความแข็งของชั้นดินใต้ฐานรากคือ โมดูลัสต้านทานแรงกดของชั้นดิน ใช้ในการจำลองพฤติกรรมฐานรากที่วางอยู่บนชั้นรองรับที่เป็นฐานแบบยึดหยุ่น โดยโมดูลัสต้านทานแรงกดของชั้นดินสามารถหาได้จากกราฟทดสอบกด้วยแผ่นเหล็กในสนาม ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การทดสอบด้วยวิธีการกดด้วยแผ่นเหล็กในสนาม

จากรูปที่ 1 ทำให้หาค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของชั้นดินซึ่งนิยามด้วยสัญลักษณ์ k_s ได้ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$k_s = \frac{q}{\Delta} \quad (3)$$

โดยที่ q คือ หน่วยแรงแบกทานใต้ฐานราก (T/m^2)

Δ คือ ระยะการยุบตัวของฐานราก (m)

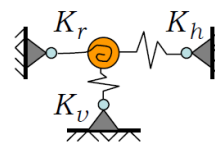
ในการทดสอบด้วยวิธีการกดด้วยแผ่นเหล็ก Bowles ได้แนะนำให้ใช้ค่า Δ เท่ากับ 25 มิลลิเมตร [5] ซึ่งเพียงพอที่จะทำให้เกิดหน่วยแรงแบกทานประลัย q_{ult} ทำให้ได้สมการดังแสดงในสมการที่ (4)

$$k_s = 40q_{ult} \quad (4)$$

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

2.2.2 มาตรฐานการประเมินและการเสริมความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างอาคารในเขตที่อาจได้รับแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ.1303-57)

สำหรับฐานรากดินที่มีลักษณะแข็งเกร็ง (Rigid) เมื่อเทียบกับคุณลักษณะของชั้นดินที่รองรับ สามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองสปริงอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองสปริง

ลักษณะการเคลื่อนตัวของฐานรากคาน สามารถแบ่งออกได้ 3 แบบ คือ การเคลื่อนตัวในแนวตั้ง, 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

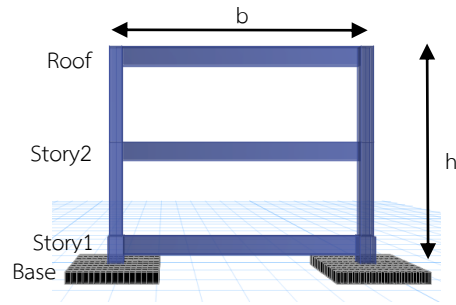
สมมติให้ที่ตั้งของอาคารตัวอย่างอยู่บริเวณแผ่นดินไหวรุนแรงที่ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ และระบบต้านแรงต้านข้างเป็นแบบโครงสร้างคานคอดคอนกรีตเสริมเหล็กแบบธรรมดา ตั้งอยู่บนชั้นดินประเภท D (ดินปกติ) โดยใช้ค่าแรงแบกทานที่ยอมให้เท่ากับ 100 kN/m²

กำหนดจุดรองรับฐานรากเป็น 5 ประเภท ได้แก่ จุดรองรับแบบยึดแน่น (Fix) จุดรองรับแบบยึดหมุน (Pin) จุดรองรับแบบยึดหยุ่น Spr6, Spr12 และ Spr24 โดยใช้ค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของชั้นดินในแนวตั้งซึ่งเปรียบเสมือนความอ่อนและความแข็งของชั้นดินเท่ากับ 6000, 12000 และ 24000 kN/m³ ตามลำดับ ซึ่งได้จากการคำนวณจากสมการที่ (4) และใช้ค่าที่ขอบเขตบนและขอบเขตล่างของค่าที่กำหนดไว้คือ 2 เท่าและครึ่งหนึ่งของค่าแรงแบกทานที่ยอมให้ [6] ส่วนค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของชั้นดินในแนวราบของฐานรากสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5)

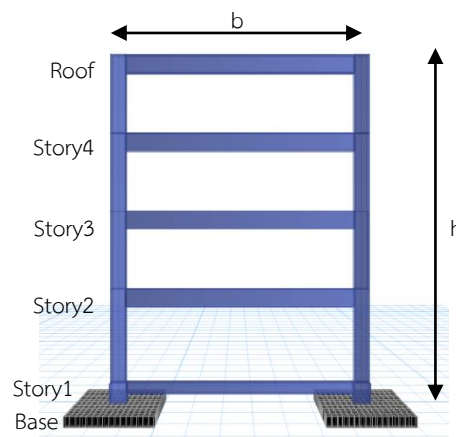
ฐานรากคานที่ใช้ในแบบจำลองมีคุณสมบัติทางวัสดุดังนี้

Modulus of Elasticity = 24,870 MPa
Poisson's Ratio = 0.2
Density = 24 kN/m³
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

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับตึกแถวพักอาศัย 2 ชั้น

ชั้น	ความสูง (m)	ความกว้าง (m)	เสา (m)	คาน (m)	ฐานราก (m)
Roof	9.5	4	0.20x0.20	0.20x0.40	1.50x1.50
Story2	6.5		0.20x0.20	0.20x0.40	
Story1	1		0.20x0.20	0.20x0.40	
ค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของชั้นดิน			Spr6	Spr12	Spr24
Kv (kN/m ³)			6,000	12,000	24,000
Kh (kN/m)			9,910	19,819	39,638

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับตึกแถวพักอาศัย 4 ชั้น

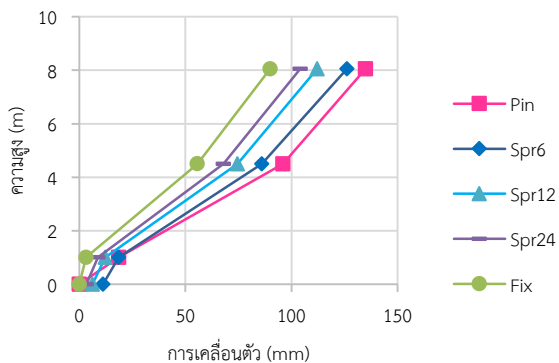
ชั้น	ความสูง (m)	ความกว้าง (m)	เสา (m)	คาน (m)	ฐานราก (m)
Roof	15.5	4	0.20x0.20	0.20x0.40	2.40x2.40
Story4	12.5		0.20x0.25	0.20x0.40	
Story3	9.5		0.20x0.30	0.20x0.40	
Story2	6.5		0.20x0.30	0.20x0.40	
Story1	1.5		0.20x0.35	0.20x0.40	
ค่าโมดูลัสต้านทานแรงกดของชั้นดิน			Spr6	Spr12	Spr24
Kv (kN/m ³)			6,000	12,000	24,000
Kh (kN/m)			25,369	50,737	101,474

4. ผลการศึกษา

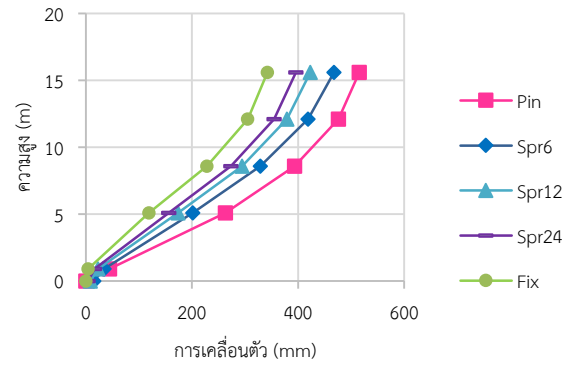
4.1 การเคลื่อนตัวในแนวราบของแบบจำลองโครงสร้าง

อาคารเรียน 2 ชั้น พบว่าที่จุดรองรับแบบ Spr12 มีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด 112.2 mm ที่จุดรองรับแบบยึดแน่น 89.9 mm และจุดรองรับแบบยึดหมุน 134.9 mm ดังแสดงในรูปที่ 5 ส่วนค่าการเคลื่อนตัวที่จุดรองรับแบบอื่นๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 5

อาคารเรียน 4 ชั้น พบว่าที่จุดรองรับแบบ Spr12 มีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด 422.9 mm ที่จุดรองรับแบบยึดแน่น 342.5 mm และจุดรองรับแบบยึดหมุน 515.2 mm ดังแสดงในรูปที่ 6 ส่วนค่าการเคลื่อนตัวที่จุดรองรับแบบอื่นๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 6



รูปที่ 5 การเคลื่อนตัวของอาคารเรียน 2 ชั้น



รูปที่ 6 การเคลื่อนตัวของอาคารเรียน 4 ชั้น

หมายเหตุ การเคลื่อนตัวในแนวราบได้คูณตัวประกอบขยายค่าการโก่งตัว (Cd)

ตารางที่ 5 การเคลื่อนตัวของแต่ละชั้นของอาคารเรียน 2 ชั้น

ชั้น	Fix (mm)	Spr24 (mm)	Spr12 (mm)	Spr6 (mm)	Pin (mm)
Roof	89.9	104.1	112.2	126.2	134.9
Story2	55.6	67.9	74.6	86.0	95.9
Story1	3.3	8.7	12.3	18.6	18.6
Base	0.0	3.4	6.1	11.2	0.0

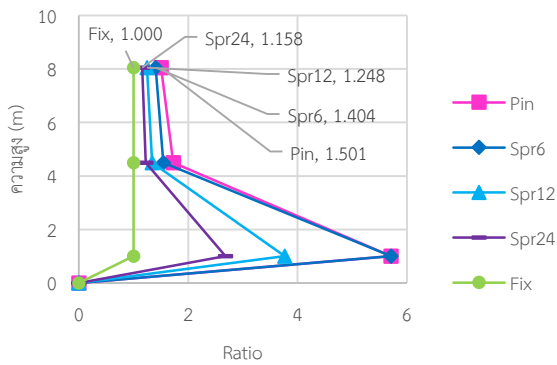
ตารางที่ 6 การเคลื่อนตัวของแต่ละชั้นของอาคารเรียน 4 ชั้น

ชั้น	Fix (mm)	Spr24 (mm)	Spr12 (mm)	Spr6 (mm)	Pin (mm)
Roof	342.5	396.1	422.9	467.5	515.2
Story4	305.3	355.1	379.3	419.1	476.3
Story3	228.0	273.2	294.6	329.1	393.3
Story2	118.9	156.5	173.9	201.7	263.4
Story1	4.3	16.4	23.0	34.3	44.8
Base	0.0	4.5	8.3	15.0	0.0

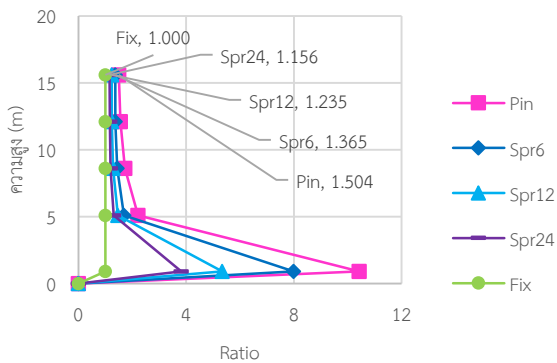
อัตราส่วนการเคลื่อนตัวของอาคารเรียน 2 ชั้น เมื่อเปรียบเทียบกับจุดรองรับแบบยึดแน่น พิจารณาที่ชั้นบนสุดของโครงสร้าง พบว่าจุดรองรับแบบ Spr12 มีอัตราส่วนการเคลื่อนตัว 1.248 ส่วนจุดรองรับแบบยึดหมุนมีอัตราส่วนการเคลื่อนตัว 1.501 ดังแสดงในรูปที่ 7

อัตราส่วนการเคลื่อนตัวของอาคารเรียน 4 ชั้น เมื่อเปรียบเทียบกับจุดรองรับแบบยึดแน่น พิจารณาที่ชั้นบนสุดของโครงสร้าง พบว่าจุดรองรับแบบ Spr12 มีอัตราส่วนการเคลื่อนตัวสูงสุด 1.235 ส่วนจุดรองรับแบบยึดหมุนมีอัตราส่วนการเคลื่อนตัว 1.504 ดังแสดงในรูปที่ 8

จากแบบจำลองโครงสร้างอาคารเรียนทั้งแบบ 2 ชั้นและ 4 ชั้น จะเห็นว่าจุดรองรับแบบ Spr12 จะมีค่าอยู่ระหว่างจุดรองรับแบบยึดแน่นและแบบยึดหมุน



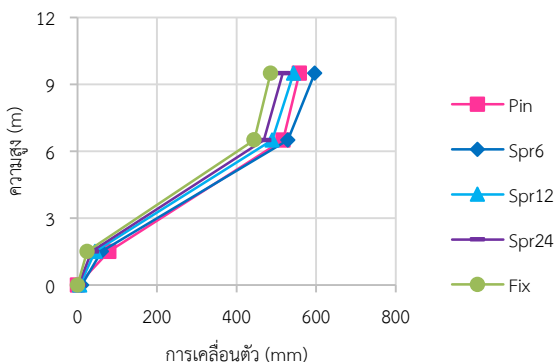
รูปที่ 7 อัตราส่วนการเคลื่อนตัวของอาคารเรียน 2 ชั้น



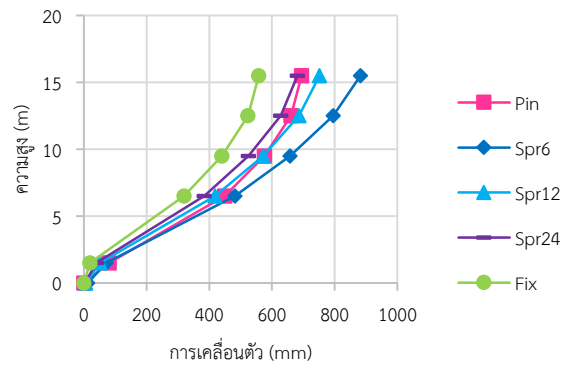
รูปที่ 8 อัตราส่วนการเคลื่อนตัวของอาคารเรียน 4 ชั้น

ด็กแถวพักอาศัย 2 ชั้น พบว่าที่จุดรองรับแบบ Spr12 มีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด 543.7 mm ที่จุดรองรับแบบยึดแน่น 485.1 mm และจุดรองรับแบบยึดหมุน 558.0 mm ดังแสดงในรูปที่ 9 ส่วนค่าการเคลื่อนตัวของจุดรองรับแบบอื่นๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 7

ด็กแถวพักอาศัย 4 ชั้น พบว่าที่จุดรองรับแบบ Spr12 มีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด 751.6 mm ที่จุดรองรับแบบยึดแน่น 557.4 mm และจุดรองรับแบบยึดหมุน 694.9 mm ดังแสดงในรูปที่ 10 ส่วนค่าการเคลื่อนตัวของจุดรองรับแบบอื่นๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 8



รูปที่ 9 การเคลื่อนตัวของด็กแถวพักอาศัย 2 ชั้น



รูปที่ 10 การเคลื่อนตัวของด็กแถวพักอาศัย 4 ชั้น

ตารางที่ 7 การเคลื่อนตัวของแต่ละชั้นของด็กแถวพักอาศัย 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

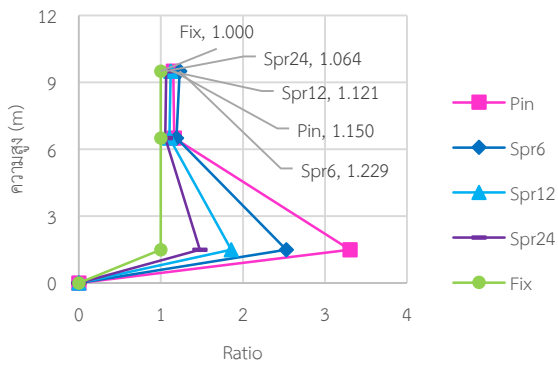
ตารางที่ 8 การเคลื่อนตัวของแต่ละชั้นของด็กแถวพักอาศัย 4 ชั้น

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

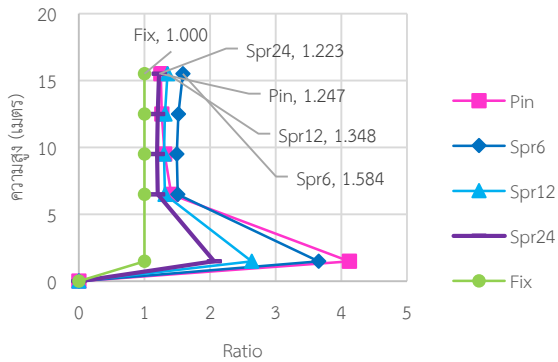
อัตราส่วนการเคลื่อนตัวของด็กแถวพักอาศัย 2 ชั้น เมื่อเปรียบเทียบกับจุดรองรับแบบยึดแน่น พิจารณาที่ชั้นบนสุดของโครงสร้าง พบว่าจุดรองรับแบบ Spr12 มีอัตราส่วนการเคลื่อนตัว 1.121 ส่วนจุดรองรับแบบยึดหมุนมีอัตราส่วนการเคลื่อนตัว 1.150 ดังแสดงในรูปที่ 11

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

จากแบบจำลองโครงสร้างด็กแถวพักอาศัย 2 ชั้น จะเห็นว่าจุดรองรับแบบ Spr12 จะมีค่าใกล้เคียงกับจุดรองรับแบบยึดหมุน ส่วนด็กแถวพักอาศัย 4 ชั้น จะเห็นว่าจุดรองรับแบบ Spr12 จะมีค่ามากกว่าจุดรองรับแบบยึดหมุน



รูปที่ 11 อัตราส่วนการเคลื่อนตัวของตึกแถวพักอาศัย 2 ชั้น

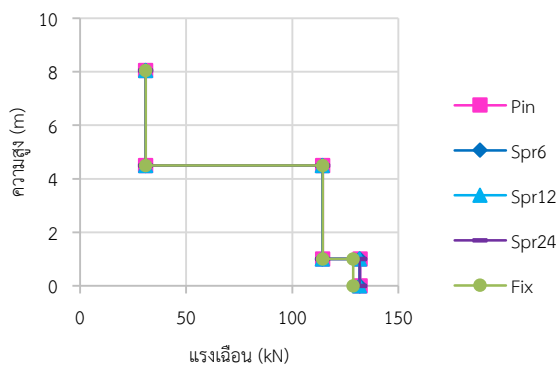


รูปที่ 12 อัตราส่วนการเคลื่อนตัวของตึกแถวพักอาศัย 4 ชั้น

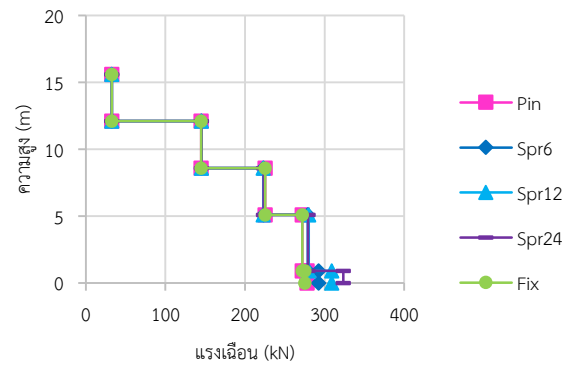
4.2 แรงเฉือนที่เสาของแบบจำลองโครงสร้าง

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

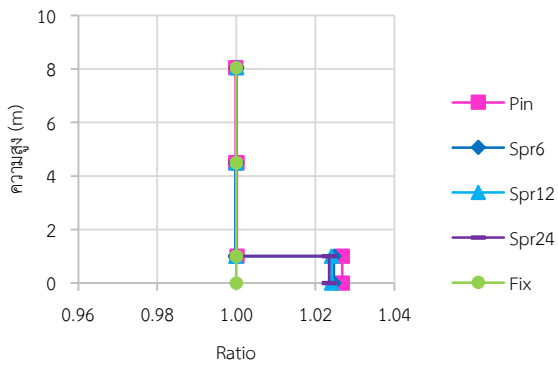
ชั้น	Fix (kN)	Spr24 (kN)	Spr12 (kN)	Spr6 (kN)	Pin (kN)
Roof	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9
Story2+	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9
Story2-	114.4	114.3	114.3	114.3	114.4
Story1+	114.4	114.3	114.3	114.3	114.4
Story1-	128.7	131.7	131.8	131.9	132.1
Base	128.7	131.7	131.8	131.9	132.1

ตารางที่ 10 แรงเฉือนที่เสาของอาคารเรียน 4 ชั้น

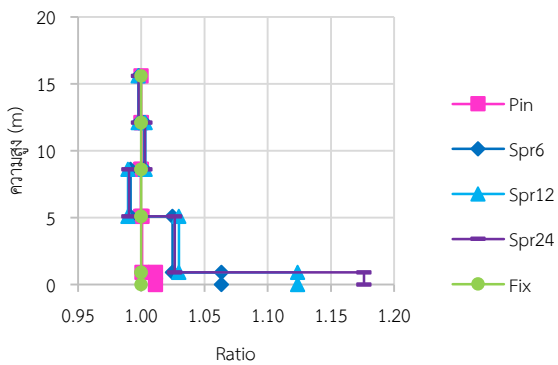
ชั้น	Fix (kN)	Spr24 (kN)	Spr12 (kN)	Spr6 (kN)	Pin (kN)
Roof	32.6	32.5	32.5	32.5	32.6
Story4+	32.6	32.5	32.5	32.5	32.6
Story4-	144.8	145.2	145.3	145.2	144.8
Story3+	144.8	145.2	145.3	145.2	144.8
Story3-	225.4	223.2	223.1	223.5	225.4
Story2+	225.4	223.2	223.1	223.5	225.4
Story2-	271.9	279.1	280.1	278.7	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



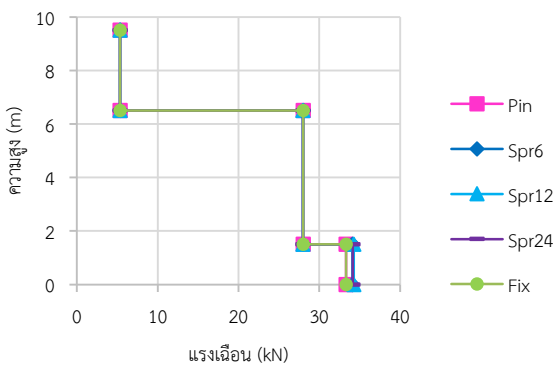
รูปที่ 15 อัตราส่วนแรงเฉือนที่เสาของอาคารเรียน 2 ชั้น



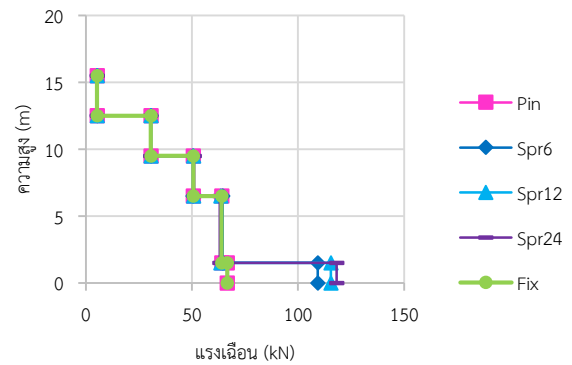
รูปที่ 16 อัตราส่วนแรงเฉือนที่เสาของอาคารเรียน 4 ชั้น

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

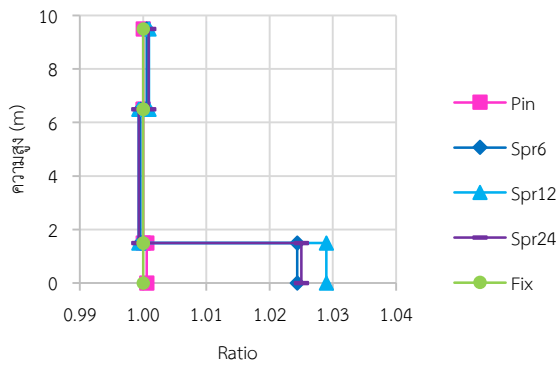
ชั้น	Fix (kN)	Spr24 (kN)	Spr12 (kN)	Spr6 (kN)	Pin (kN)
Roof	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
Story2+	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
Story2-	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0
Story1+	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0
Story1-	33.3	34.1	34.3	34.1	33.3
Base	33.3	34.1	34.3	34.1	33.3

ตารางที่ 12 แรงเฉือนที่เสาของตึกแถวพักอาศัย 4 ชั้น

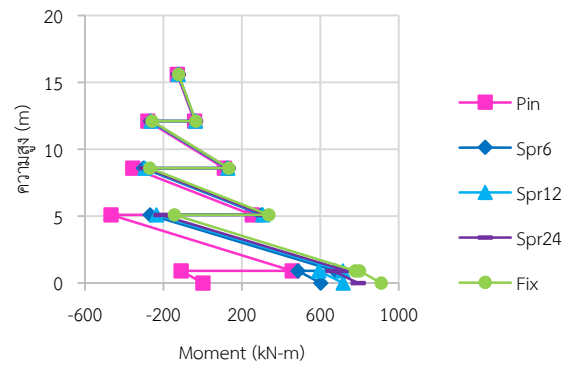
ชั้น	Fix (kN)	Spr24 (kN)	Spr12 (kN)	Spr6 (kN)	Pin (kN)
Roof	5.4	5.4	5.4	5.3	5.4
Story4+	5.4	5.4	5.4	5.3	5.4
Story4-	30.7	30.6	30.6	30.7	30.7
Story3+	30.7	30.6	30.6	30.7	30.7
Story3-	50.7	51.0	50.8	50.5	50.7
Story2+	50.7	51.0	50.8	50.5	50.7
Story2-	64.0	63.1	63.6	64.5	64.0
Story1+	64.0	63.1	63.6	64.5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

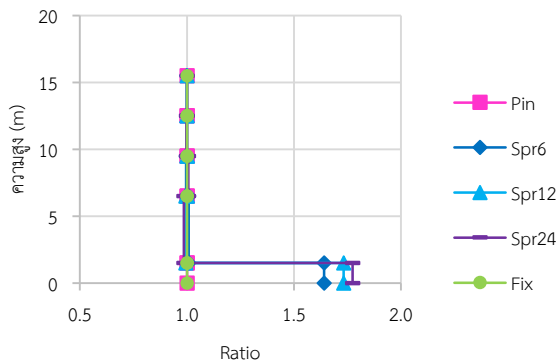
อัตราส่วนแรงเฉือนที่เสาของตึกแถวพักอาศัย 4 ชั้น เมื่อเปรียบเทียบกับจุดรองรับแบบยึดแน่น พบว่าจุดรองรับแบบ Spr12 มีอัตราส่วนแรงเฉือนที่เสาสูงสุด 1.733 ที่ช่วงเสา Base ถึง Story1 และที่ช่วงเสาเดียวกันสำหรับจุดรองรับแบบยึดหมุนมีค่าใกล้เคียงกับจุดรองรับแบบยึดแน่น ดังแสดงในรูปที่ 20



รูปที่ 19 อัตราส่วนแรงเฉือนที่เสาของตึกแถวพักอาศัย 2 ชั้น



รูปที่ 22 โมเมนต์ที่เสาของอาคารเรียน 4 ชั้น



รูปที่ 20 อัตราส่วนแรงเฉือนที่เสาของตึกแถวพักอาศัย 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

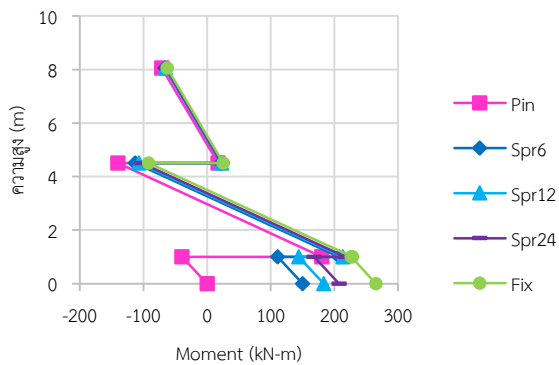
ตารางที่ 14 โมเมนต์ที่เสาของอาคารเรียน 4 ชั้น

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

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

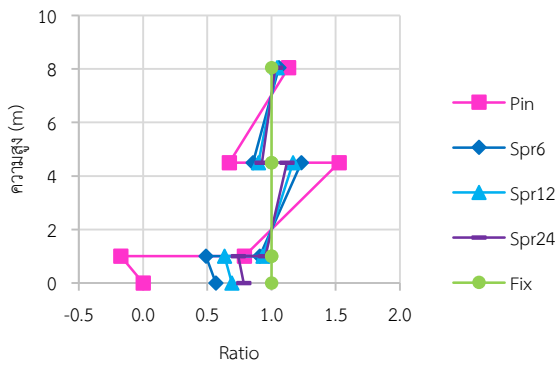
อาคารเรียน 4 ชั้น พบว่าที่จุดรองรับแบบ Spr12 มีค่าโมเมนต์ที่เสาสูงสุด 715.8 kN-m ที่จุดรองรับแบบยึดแน่น 910.5 kN-m และจุดรองรับแบบยึดหมุน 468.0 kN-m ดังแสดงในรูปที่ 22 ส่วนค่าโมเมนต์ที่เสาที่จุดรองรับแบบอื่นๆ สามารถดูได้จากตารางที่ 14



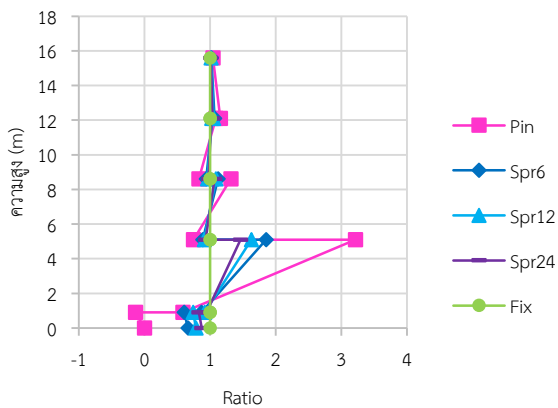
รูปที่ 21 โมเมนต์ที่เสาของอาคารเรียน 2 ชั้น

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



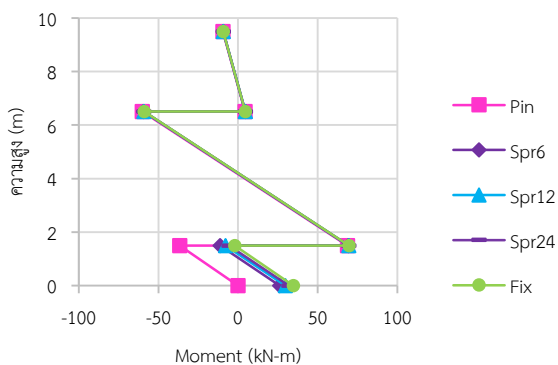
รูปที่ 23 อัตราส่วนโมเมนต์ที่เสาของอาคารเรียน 2 ชั้น



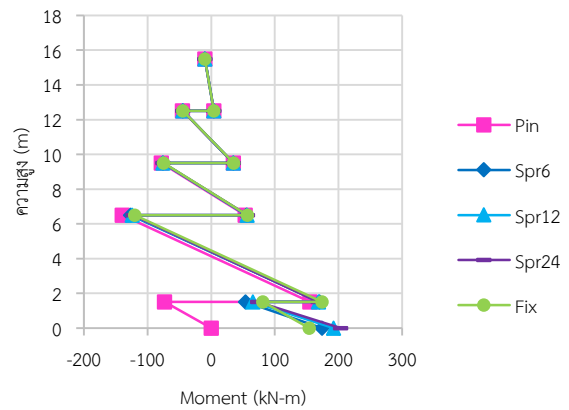
รูปที่ 24 อัตราส่วนโมเมนต์ที่เสาของอาคารเรียน 4 ชั้น

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

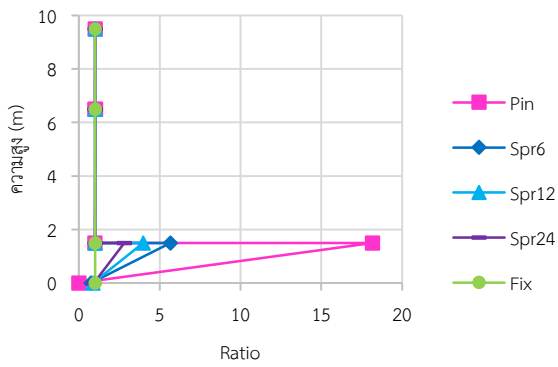
ชั้น	Fix (kN-m)	Spr24 (kN-m)	Spr12 (kN-m)	Spr6 (kN-m)	Pin (kN-m)
Roof	-9.4	-9.4	-9.4	-9.4	-9.5
Story2+	4.5	4.5	4.5	4.5	4.4
Story2-	-59.1	-59.2	-59.3	-59.4	-60.2
Story1+	69.7	69.5	69.4	69.4	68.6
Story1-	-2.0	-5.7	-8.0	-11.4	-36.7
Base	34.6	31.9	29.7	26.1	0.0

ตารางที่ 16 โมเมนต์ในเสาของตึกแถวพักอาศัย 4 ชั้น

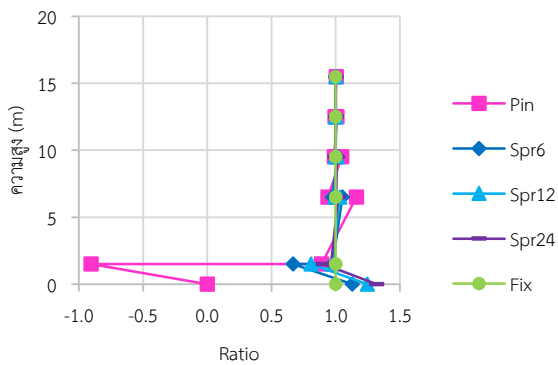
ชั้น	Fix (kN-m)	Spr24 (kN-m)	Spr12 (kN-m)	Spr6 (kN-m)	Pin (kN-m)
Roof	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8
Story4+	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
Story4-	-44.5	-44.6	-44.6	-44.6	-44.9
Story3+	35.2	35.0	35.1	35.2	34.8
Story3-	-74.9	-75.5	-75.7	-75.9	-78.4
Story2+	56.8	57.1	56.4	55.3	53.4
Story2-	-120.2	-122.4	-124.0	-126.5	-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

การศึกษานี้ได้ทำการศึกษารูปแบบจำลองฐานรากติดกันของอาคารเดี่ยวภายใต้แรงแผ่นดินไหว โดยใช้อาคารตัวอย่างเป็นอาคารเรียนและตึกแถวพักอาศัย ซึ่งเป็นตัวแทนของอาคารที่มีคานช่วงยาวและช่วงสั้นตามลำดับ และพิจารณาที่อาคารมีจำนวน 2 และ 4 ชั้น พบว่าผลตอบสนองและแรงภายในของโครงสร้างที่ได้จำลองจตุรรองรับแบบยึดหยุ่น (Spr12) จะไม่ได้อยู่ระหว่างจตุรรองรับแบบยึดแน่นและแบบยึดหมุน ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าการใช้จตุรรองรับแบบยึดหยุ่นจะมีการเคลื่อนตัวในแนวราบและในแนวตั้งของฐานราก ซึ่งต่างจากจตุรรองรับแบบยึดหมุนที่ไม่มีการเคลื่อนตัวในแนวราบและในแนวตั้ง ทำให้ผลตอบสนองที่ได้มีค่าสูงกว่าในบางรูปแบบอาคาร ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

สำหรับการเคลื่อนตัวในแนวราบที่ชั้นบนสุดพบว่า จตุรรองรับแบบ Spr12 มีอัตราส่วนการเคลื่อนตัว 1.25 เท่า สำหรับอาคารเรียนทั้ง 2 ความสูง แต่สำหรับตึกแถวที่เป็นคานช่วงสั้น พบว่าตึกแถว 2 ชั้น มีอัตราส่วนการเคลื่อนตัวลดลงเหลือ 1.12 เท่า สำหรับจตุรรองรับแบบ Spr12 และมีค่าใกล้เคียงกับจตุรรองรับแบบยึดหมุน แต่เมื่อเป็นตึกแถว 4 ชั้น พบว่า มีอัตราส่วนการเคลื่อนตัวเพิ่มขึ้นเป็น 1.35 เท่า สำหรับจตุรรองรับแบบ Spr12 และมีค่าการเคลื่อนตัวมากกว่าจตุรรองรับแบบยึดหมุน

สำหรับแรงเฉือนที่เสาได้พิจารณาที่เสาต่อม่อพบว่า จตุรรองรับแบบ Spr12 และแบบยึดหมุนมีค่าใกล้เคียงกับจตุรรองรับแบบยึดแน่น ยกเว้นอาคารสูง 4 ชั้นที่จตุรรองรับแบบ Spr12 มีอัตราส่วนแรงเฉือนมีค่า 1.12 และ 1.73 เท่า สำหรับอาคารที่มีคานช่วงยาวและช่วงสั้นตามลำดับ และได้ค่าอัตราส่วนแรงเฉือนมากกว่าแบบจตุรยึดหมุนซึ่งมีค่าประมาณ 1.00 เท่า ส่วนเสาชั้นที่เหนือกว่าชั้น 1 พบว่าแบบจตุรรองรับทั้ง 3 แบบ ให้ค่าแรงเฉือนภายในที่ไม่แตกต่างกัน

สำหรับโมเมนต์ที่เสาได้พิจารณาที่เสาต่อม่อพบว่า จตุรรองรับแบบ Spr12 มีอัตราส่วนโมเมนต์ 1.17 และ 1.63 เท่า สำหรับอาคารเรียน 2 ชั้น และ 4 ชั้นตามลำดับ แต่สำหรับตึกแถวที่เป็นคานช่วงสั้น พบว่าอัตราส่วนโมเมนต์ 3.97 และ 0.81 เท่า สำหรับตึกแถว 2 ชั้นและ 4 ชั้นตามลำดับ แต่ทุกกรณีจะมีค่าน้อยกว่าจตุรรองรับแบบยึดหมุน ถึงแม้ว่าอัตราส่วนโมเมนต์จะมีค่ามาก แต่เมื่อดูค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นพบว่าจะมีค่าน้อยกว่าค่าโมเมนต์ที่เสาชั้น 1 (ซึ่งมีช่วงความยาวเสายาวกว่า)

ดังนั้น หากอาคารตั้งอยู่บนชั้นดินประเภท D และมีคานช่วงสั้นและมีความสูง ควรจะต้องพิจารณาจตุรรองรับแบบยึดหยุ่น เนื่องจากผลของการเคลื่อนตัวจะทำให้ค่าที่สูงกว่า และให้ค่าแรงเฉือนที่สูงกว่าที่เสาชั้นต่อม่อ เมื่อเทียบกับจตุรรองรับแบบยึดแน่นและแบบยึดหมุน

เอกสารอ้างอิง

- [1] พงศกร คงนคร. (2559). ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างฐานรากติดกันกับโครงสร้างต่อผลตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [2] สิริกร นาคพันธ์. (2551). การวิเคราะห์ท่าทางด้านทานแผ่นดินไหวสำหรับอาคารสูงในกรุงเทพมหานครที่คำนึงถึงผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้าง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [3] สมัชญ์ จันทรสชา. (2555). ผลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินและโครงสร้างที่มีต่อสเปกตรัมการตอบสนอง เพื่อใช้ในการออกแบบอาคารด้านทานแผ่นดินไหวในเขตกรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [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.