

อิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับฐานรากชนิดเขต

ต่อผลตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว

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

วิศรุต จันทร์สุวรรณ^{1,*} สุชาติ ลีมกัตถัญญ² 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

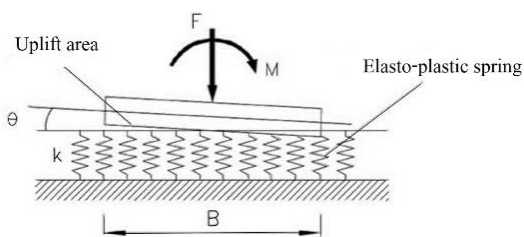
โดยทำการศึกษารณีของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้นบนฐานรากแบบชิดเซต (Strap Footing) และคานยึด (Strap beam) ที่มีการโยกตัว โดยมุ่งเน้นที่จะหาผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างกับฐานราก [3-7] เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้ระหว่างโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากแบบยึดแน่นและโครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากชิดเซตที่มีการโยกตัวภายใต้แรงแผ่นดินไหว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

โดยพิจารณาขนาดของฐานรากชิดเซตบนชั้นดิน 3 ชนิด ได้แก่ ดินทราย[8], ดินเหนียวอ่อน และดินเหนียวแข็ง โดยสร้างแบบจำลองโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้นบนฐานรากชิดเซตบนชั้นดินต่างๆ 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

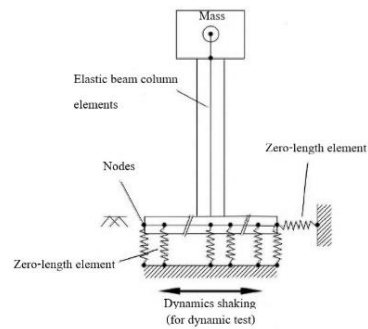


รูปที่ 1 แบบจำลองฐานรากอีลาสติก-พลาสติกแบบ Winkler

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

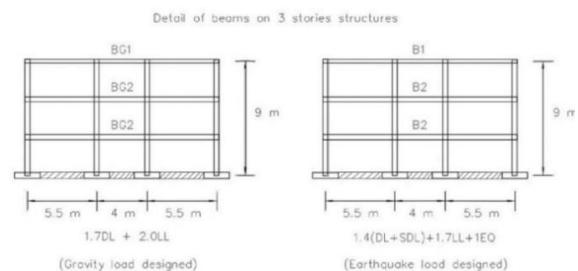
3.1 แบบจำลองโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้น

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

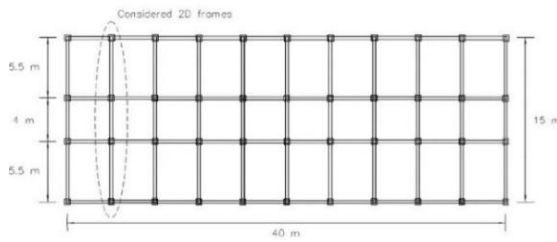
สำหรับรายละเอียดของกำลังวัสดุที่ใช้ในการออกแบบอาคารทั้ง 2 ประเภท แสดงดังตารางที่ 1 รายละเอียดของอาคารแสดงดังรูปที่ 3-4 รายละเอียดของฐานรากชิดเซต แสดงดังรูปที่ 5-6 และขนาดของฐานรากชิดเซตบนชั้นดินที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 กำลังของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้าง

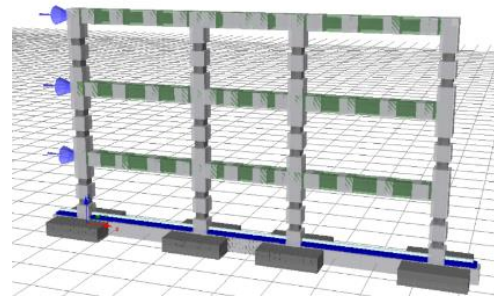
อาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว		อาคารออกแบบรับแรงแผ่นดินไหว	
วัสดุ	ค่ากำลังที่ใช้	วัสดุ	ค่ากำลังที่ใช้
คอนกรีต	19613 kPa	คอนกรีต	23536 kPa
เหล็กเสริม	294199 kPa	เหล็กเสริม	294199 kPa



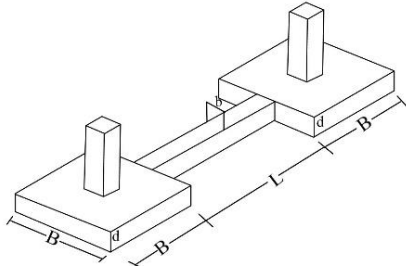
รูปที่ 3 ลักษณะของแบบจำลองโครงสร้างอาคาร 3 ชั้น



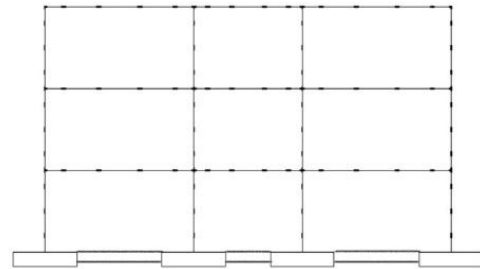
รูปที่ 4 รายละเอียดและตำแหน่งของคานและเสา



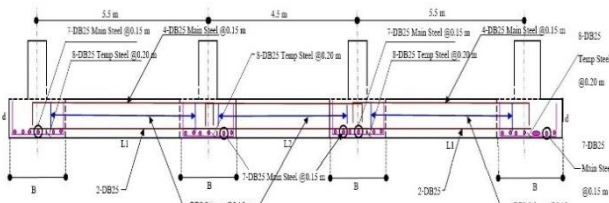
รูปที่ 7 ลักษณะของแบบจำลองโครงสร้างอาคาร 3 ชั้น



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	
Fracture/buckling strain	0.06	Transition curve shape calibrating coeff.A3	2
Transition curve shape calibrating coeff.A1	18.5	Transition curve shape calibrating coeff.A4	
Transition curve shape calibrating coeff.A2	0.15		

4. ผลการศึกษา

4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ด้วยวิธีการผลักทางด้านข้าง

4.1.1 ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้าง

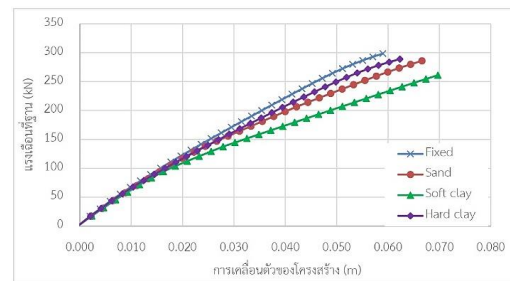
ค่าคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้าง (Fundamental Period of Structures) และค่าการเคลื่อนที่เป้าหมาย (Target Displacement) [18-19] ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ไม่คิดผลของฐานราก คือ ฐานรากแบบยึดแน่น และฐานรากที่คิดผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก คือ ฐานรากที่มีการโยกตัว 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

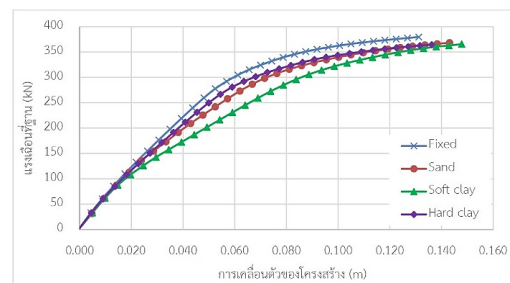
ประเภทของฐานราก	กรณีของแผ่นดินไหว	ค่าคาบการสั่น (sec)	ค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย (m)
ฐานรากแบบยึดแน่น	DEQ	0.315	0.0550
	MCEQ	0.315	0.1266
ฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินทราย	DEQ	0.343	0.0588
	MCEQ	0.343	0.1325
ฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวอ่อน	DEQ	0.364	0.0658
	MCEQ	0.364	0.1474
ฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวแข็ง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

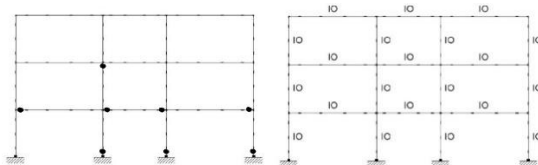
4.1.3 การประเมินระดับความเสียหายของโครงสร้าง

จากการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กผ่านโปรแกรม SeismoStruct โดยใช้วิธี Static Pushover Analysis จะได้ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้างแสดงดังตารางที่ 7

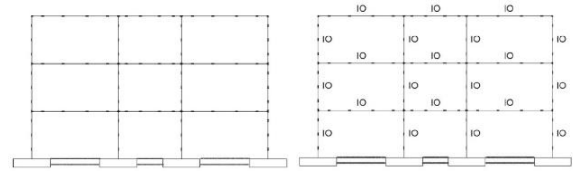
เมื่อพิจารณาจากระดับความเสียหายของโครงสร้างตามมาตรฐานของ FEMA356 พบว่า ในระดับแผ่นดินไหว Design Earthquake โครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากทั้ง 4 ประเภท สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานระดับ Immediate Occupancy (IO) ส่วนในระดับแผ่นดินไหว Maximum Considered Earthquake มีบางส่วนของโครงสร้างที่ไม่ผ่านเกณฑ์ Immediate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

ตารางที่ 7 ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น

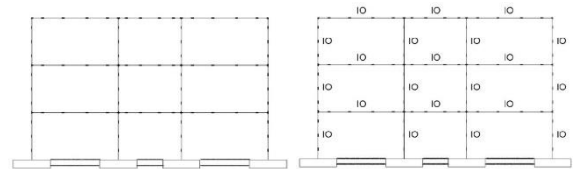
ประเภทของฐานราก	กรณีของแผ่นดินไหว	ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้น (rad)	ค่ามาตรฐานของ FEMA356	
			IO	LS
ฐานรากแบบยึดแน่น	DEQ	0.00021 - 0.0012	Beam 0.01 Column0.005	Beam 0.02 Column0.015
	MCEQ	0.00035 - 0.0176	Beam 0.01 Column0.005	Beam 0.02 Column0.015
ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย	DEQ	-	Beam 0.01 Column0.005	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



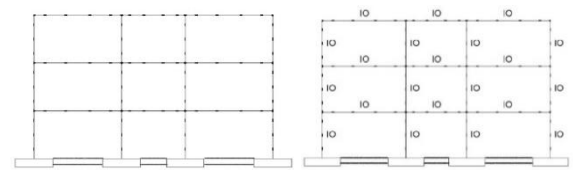
รูปที่ 11 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากแบบยึดแน่น (DEQ)



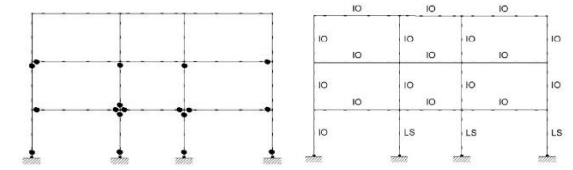
รูปที่ 12 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย (DEQ)



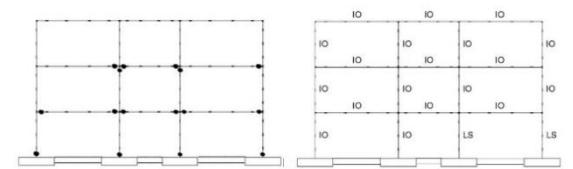
รูปที่ 13 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน (DEQ)



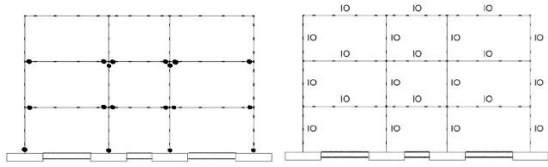
รูปที่ 14 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง (DEQ)



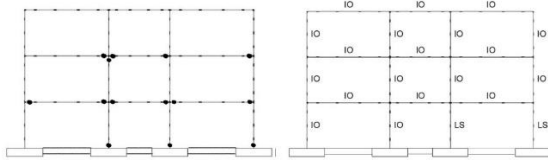
รูปที่ 15 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากแบบยึดแน่น (MCEQ)



รูปที่ 16 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย (MCEQ)



รูปที่ 17 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน (MCEQ)



รูปที่ 18 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง (MCEQ)

4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างอาคารที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ด้วยวิธีการผลึกทางด้านข้าง

4.2.1 ค่าคาบการสั่นพื้นฐานและค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายของโครงสร้าง

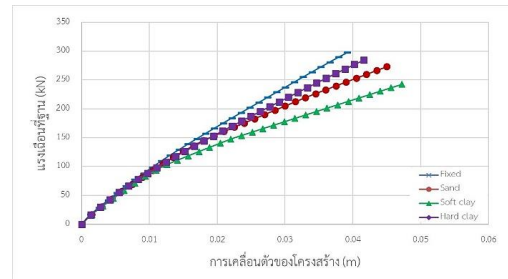
ค่าคาบการสั่นพื้นฐานของโครงสร้าง (Fundamental Period of Structures) และค่าการเคลื่อนที่เป้าหมาย (Target Displacement) ของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น ไม่คิดผลของฐานราก คือ ฐานรากแบบยึดแน่น และฐานรากที่คิดผลของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับฐานราก คือ ฐานรากที่มีการโยกตัว 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

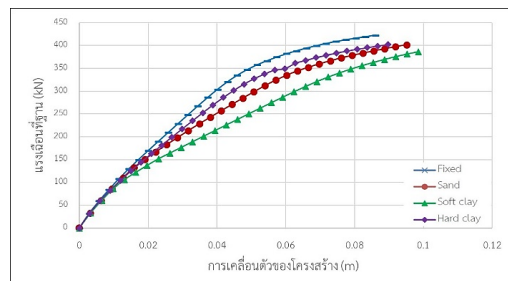
ประเภทของฐานราก	กรณีของแผ่นดินไหว	ค่าคาบการสั่น (sec)	ค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมาย (m)
ฐานรากแบบยึดแน่น	DEQ	0.287	0.0332
	MCEQ	0.287	0.0801
ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย	DEQ	0.315	0.0390
	MCEQ	0.315	0.0891
ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน	DEQ	0.325	0.0412
	MCEQ	0.325	0.0926
ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง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

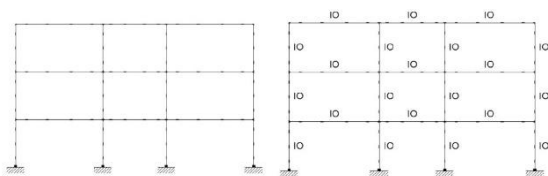
4.1.3 การประเมินระดับความเสียหายของโครงสร้าง

จากการวิเคราะห์โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กผ่านโปรแกรม SeismoStruct โดยใช้วิธี Static Pushover Analysis จะได้ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้างแสดงดังตารางที่ 10

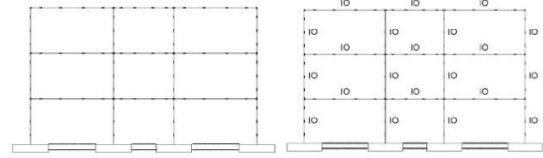
เมื่อพิจารณาระดับความเสียหายของโครงสร้างตามมาตรฐานของ FEMA356 พบว่า โครงสร้างที่ตั้งอยู่บนฐานรากทั้ง 4 ประเภทสามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานระดับ Immediate Occupancy (IO) ทั้งในกรณีของแรงแผ่นดินไหวระดับ Design Earthquake และระดับ Maximum Considered Earthquake สำหรับจุดที่เกิดมุมบิดพลาสติกในโครงสร้าง และระดับความเสียหายของโครงสร้างแสดงดังรูปที่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

ตารางที่ 10 ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้นในโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูง 3 ชั้น

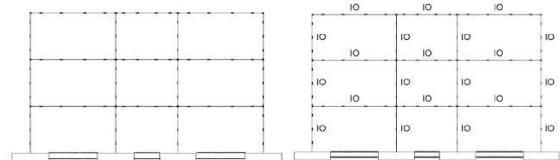
ประเภทของฐานราก	กรณีของแผ่นดินไหว	ค่ามุมบิดพลาสติกที่เกิดขึ้น (rad)	ค่ามาตรฐานของ FEMA356	
			IO	LS
ฐานรากแบบยึดแน่น	DEQ	-	Beam 0.01 Column0.005	Beam 0.02 Column0.015
	MCEQ	0.0009 - 0.0152	Beam 0.01 Column0.005	Beam 0.02 Column0.015
ฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย	DEQ	-	Beam 0.01 Column0.005	Beam 0.02 Column0.015
	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



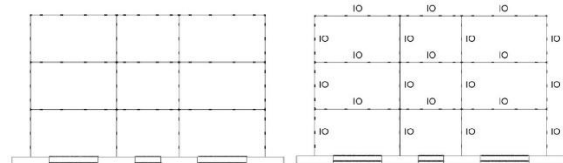
รูปที่ 21 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูงบนฐานรากแบบยึดแน่น (DEQ)



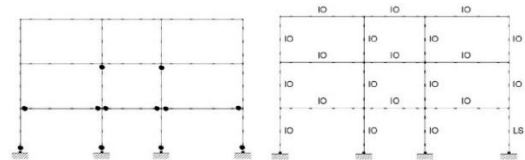
รูปที่ 22 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย (DEQ)



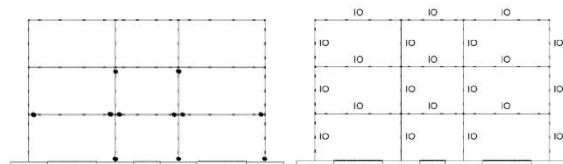
รูปที่ 23 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวอ่อน (DEQ)



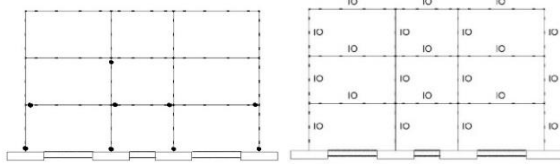
รูปที่ 24 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินเหนียวแข็ง (DEQ)



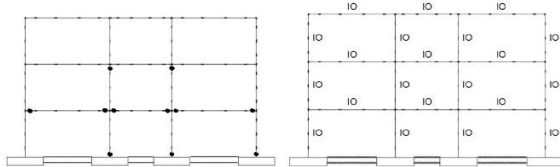
รูปที่ 25 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากแบบยึดแน่น (MCEQ)



รูปที่ 26 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวสูงบนฐานรากชนิดเขตบนชั้นดินทราย (MCEQ)



รูปที่ 27 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวอ่อน (MCEQ)



รูปที่ 28 มุมบิดพลาสติกและระดับความเสียหายของโครงสร้างที่ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวบนฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวแข็ง (MCEQ)

5. บทสรุป

จากการวิเคราะห์โครงสร้างที่ไม่ได้ออกแบบรับแรงแผ่นดินไหวพบว่า ระดับ Design Earthquake กรณีของฐานรากชนิดเขตนบนชั้นดินเหนียวอ่อน มีค่าการเคลื่อนตัวเป้าหมายที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีฐานรากแบบยึดแน่นประมาณ 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*. สำนักพิมพ์ดีจิตอล 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.