

การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กบนฐานรากยืดหยุ่น
Analysis of Dynamic Properties of Reinforced Concrete Buildings on Flexible Foundations

นคร ภู่วโรคม

อาทิตย์ บุญศรีสุวรรณ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

อำเภอ คลองหลวง จังหวัด ปทุมธานี 12121

โทร. 0-2564-3001 ถึง 9 โทรสาร 0-2564-3010

Email: pnakhorn@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอผลการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่พิจารณาผลความยืดหยุ่นของฐานราก หรือผลของชั้นดินอ่อนสำหรับแบบจำลองของอาคารในกรุงเทพมหานคร ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการสร้างแบบจำลองอาคารได้พิจารณาอ้างอิงข้อมูลของการออกแบบจริงจากภาคปฏิบัติ เพื่อศึกษาผลของคุณสมบัติทางกายภาพของอาคาร เช่น รูปร่าง ขนาด และผลของความยืดหยุ่นของฐานรากต่อคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ แบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อการศึกษานี้มีพฤติกรรมในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นและมีค่าหน่วยแรงในระดับต่ำ หรือพิจารณาหน้าตัดที่ไม่แตกร้าว ส่วนแบบจำลองของฐานรากใช้สมมติฐานตาม Winkler Model ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในแบบจำลองนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลการตรวจวัดจริงของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพมหานครจำนวน 50 อาคาร คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่ทำในการศึกษานี้ ได้แก่ ค่าคาบธรรมชาติ รูปร่างการสั่นไหวและการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ฐานรากจากรูปร่างการสั่นไหว โดยผลการศึกษาทำให้ทราบถึง ผลของขนาดและรูปร่างของอาคาร และผลของความยืดหยุ่นของฐานรากต่อคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความยืดหยุ่นของฐานรากต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติ และพบว่าผลของความยืดหยุ่นของฐานรากมีผลต่อคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์มากสำหรับอาคารเตี้ย และมีผลลดลงเมื่ออาคารมีความสูงมากขึ้น

Abstract

This paper presents the dynamic characteristics of reinforced concrete buildings with flexible foundation, or foundation founded on soft soil, for buildings in Bangkok by numerical analysis approach. The parameters in design practices were incorporated in the models in order to study the relationship among the physical properties of buildings, such as size and shape of floor plan and foundation flexibility, and the dynamic properties of buildings. The models in this study are assumed to be linearly elastic and stress in member is small so that members perform with non-cracked section, and the foundation is modeled according to Winkler's assumption. The calculated natural periods, the deflected shape and the relative movement at base of building observed from mode shape are compared to the results from the direct measurement of 50 buildings in Bangkok. The results present the effects of size and shape of buildings and foundation flexibility to their dynamic properties, and the sensitivity to change of estimation error in foundation model. It is noticed that the effects of foundation flexibility are more pronounced in shorter buildings where the relative stiffness of the building with respect to the soil is higher.

1. บทนำ

ในการหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างอาคาร เช่น คาบธรรมชาติ (Natural Period) รูปร่างการสั่นไหว (Mode Shape) โดยทั่วไปสามารถทำได้โดยวิธีหลัก 3 วิธี คือวิธีการคำนวณจากสูตรการประมาณ วิธีการตรวจวัดกับอาคารจริง และวิธีการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ สำหรับวิธีการคำนวณจากสูตรการประมาณ เป็นวิธีที่ง่ายและสามารถคำนวณได้รวดเร็ว อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีข้อจำกัดเนื่องจากสูตรการประมาณยังไม่ครอบคลุมถึงลักษณะทั้งหมดของโครงสร้างอาคาร นอกจากนี้ สูตรการประมาณในมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบอาคารในหลาย ๆ ประเทศมีพื้นฐานการพัฒนาตามเงื่อนไข และสภาพปฏิบัติสำหรับประเทศนั้น ซึ่งให้ค่าที่แตกต่างหากนำมาใช้กับอาคารในประเทศไทย ส่วนวิธีการตรวจวัดสามารถหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่แท้จริงของโครงสร้างได้ สำหรับวิธีการวิเคราะห์แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์โดยสร้างแบบจำลองตามหลักพลศาสตร์โครงสร้าง เหมาะสมกับการใช้ศึกษาผลของคุณสมบัติทางกายภาพของโครงสร้างในแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของอาคารได้

ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารในกรุงเทพมหานครจำนวน 50 อาคารโดยการตรวจวัดในงานวิจัยที่ผ่านมา [1] ทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างคาบธรรมชาติต่อความสูงและจำนวนชั้น และพบว่ารูปร่างการสั่นไหวมีลักษณะที่สำคัญคือพื้นฐานของอาคารมีการเคลื่อนตัวสัมพันธ์กับยอดอาคารอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในอาคารเค็ยอันเนื่องมาจากผลของดินอ่อนใต้อาคารในกรุงเทพมหานคร อย่างไรก็ตาม การศึกษาโดยการตรวจวัดไม่สามารถอธิบายผลกระทบของคุณสมบัติทางกายภาพของอาคาร เช่น ขนาด ความสูง ความยืดหยุ่นของฐานราก เป็นต้น ต่อแนวโน้มการแปรเปลี่ยนค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารเหล่านั้นได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของคุณสมบัติทางกายภาพของอาคารต่อค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ด้วยแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดและความสูงอาคารต่างๆ และพิจารณาผลความยืดหยุ่นของฐานราก หรือผลของชั้นดินอ่อน เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร คือ คาบธรรมชาติ รูปร่างการสั่นไหว และการเคลื่อนตัวสัมพันธ์พื้นฐานของอาคาร โดยเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลที่ได้จากการตรวจวัด ในการสร้างแบบจำลองได้พิจารณาข้อมูลจากแบบก่อสร้างสำหรับอาคารในกรุงเทพมหานคร โดยนำมากำหนดลักษณะทางกายภาพของอาคารสำหรับการศึกษา ได้แก่ ขนาดหน้าตัดขององค์อาคาร ความสูง จำนวนชั้น ระยะห่างระหว่างช่วงเสา จำนวนช่วงเสา และลักษณะของฐานราก เป็นต้น

2. วิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของอาคารอ้างตามหลักที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยในอดีต [2] โปรแกรมวิเคราะห์โครงสร้างที่ใช้สำหรับการศึกษาคือ SAP2000 การพิจารณาลักษณะทางกายภาพของอาคารได้อ้างอิงกับข้อมูลการออกแบบจริงในกรุงเทพมหานคร จำนวน 20 อาคารที่มีจำนวนชั้นระหว่าง 5 ถึง 88 ชั้นและมีความสูงระหว่าง 21.5 ถึง 320 เมตร โดยจำลองอาคารใน 2 ระบบคือ ระบบพื้นคานเสา (Beam-Column Structure) และระบบพื้นเสา (Slab-Column Structure) โดยพิจารณาส่วนประกอบของโครงสร้างต่าง ๆ ดังนี้ คือ เสา คาน และฐานรากใช้หน้าตัดโครงข้อแข็ง (Frame Section) ส่วนผนังกำแพง พื้น ใช้ Shell Section ในการจำลองในงานวิจัยนี้จะไม่พิจารณาผลของกำแพงรับแรงเฉือน (Shear Wall) อันเป็นลักษณะของแบบจำลอง Moment-resisting frame (MRF) ซึ่งเป็นนิยามของระบบโครงสร้างที่มีโครงข้อแข็งสามมิติรองรับน้ำหนักบรรทุกในแนวดิ่ง และสามารถต้านทานแรงทางด้านข้างได้โดยพฤติกรรมของแรงคดในองค์อาคารเป็นหลัก และไม่พิจารณาผลของบันได

2.1 ส่วนประกอบของโครงสร้าง

2.1.1 คุณสมบัติของคอนกรีต

การคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity, E) ของคอนกรีตโดยทั่วไปในการคำนวณออกแบบใช้ค่า Secant Modulus ที่ระดับหน่วยแรงประมาณครึ่งหนึ่งของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต แต่ระดับหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงในโครงสร้างนั้นมีค่าที่ต่ำกว่ามาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้พิจารณาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างของ Secant Modulus และ Initial Modulus [3] (เป็นค่าโมดูลัสที่ความชันซึ่งลากจากจุดเริ่มต้นของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและหน่วยการยืดหดตัว) เพื่อที่ได้ค่ากำลังของวัสดุใกล้เคียงตามสภาวะที่เกิดขึ้นจริง

ในงานวิจัยนี้กำหนดค่าคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตที่ใช้ในส่วนประกอบของโครงสร้างดังนี้ คือ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแห่งทรงกระบอก (f'_c) มีค่า 39.24 MPa โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (E) มีค่า 3.17×10^4 MPa และหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) มีค่า 23.5 kN/m³ โดยองค์ประกอบของโครงสร้างที่ใช้คุณสมบัติของคอนกรีตได้แก่คาน เสา พื้นและเสาเข็ม

2.1.2 เสา

เสามีหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีรายละเอียดดังตารางที่ 1 ความสูงของเสาระหว่างชั้นคือ 3.5 เมตร

2.1.3 คาน

สำหรับระบบพื้นคานเสา ใช้แบบจำลองเป็นคานหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 0.4 เมตร x 0.7 เมตร มีความยาวช่วงเท่ากับ 9 เมตร

ตารางที่ 1 ขนาดหน้าตัดของเสาที่ใช้สร้างแบบจำลองการศึกษา

จำนวนชั้นที่เสา	ขนาดหน้าตัด (เมตรxเมตร)		
	แบบกรับ	Beam-Column	Slab-Column
1-10		0.8x0.8	0.5x0.5
11-20		1.0x1.0	0.8x0.8
21-30		1.2x1.2	1.0x1.0
31-40		1.4x1.4	1.2x1.2
41-50		1.6x1.6	1.4x1.4
51-60		1.8x1.8	1.6x1.6

2.1.4 พื้น

โครงสร้างระบบพื้นคานเสามีความหนา 0.225 เมตร ส่วนในระบบพื้นเสามีความหนา 0.25 เมตร สำหรับการศึกษาหน้าหนักบรรทุกจร ATC-40 [4] ได้แนะนำหน้าหนักบรรทุกจรสำหรับการวิเคราะห์ด้านแผ่นดินไหว โดยมาจากการเก็บสถิติของหน้าหนักบรรทุกจรที่เป็นจริง ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าที่ใช้ในการออกแบบอยู่มาก ในงานวิจัยนี้พิจารณาหน้าหนักบรรทุกจร 100 กิโลกรัม/ตารางเมตร

2.1.5 ผนังกำแพง

ใช้วัสดุเป็นอิฐมวลเบา หนา 0.10 เมตร สูง 3.5 เมตร มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) เท่ากับ 2.94×10^3 MPa และหน่วยน้ำหนัก (Unit Weight) มีค่า 17.65 kN/m³ พิจารณาให้มีผนังกำแพงตลอดแนวคาน

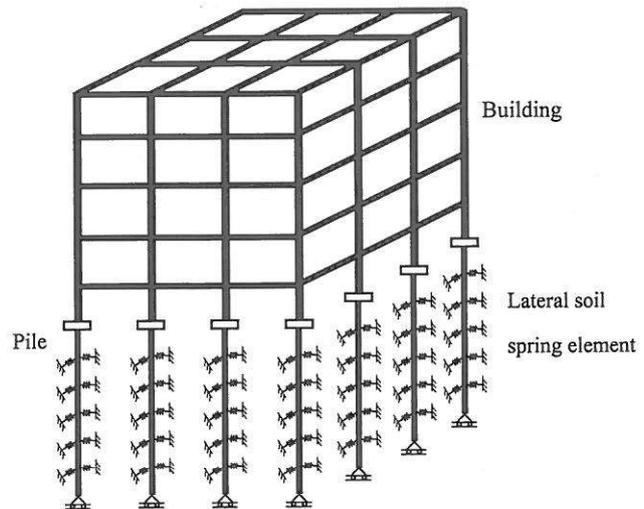
2.1.6 ฐานราก

แบบจำลองฐานรากในงานวิจัยนี้ พิจารณาทั้งแบบฐานรากยึดแน่น (Fixed Foundation) และฐานรากยึดหยุ่น (Flexible Foundation) โดยในการพิจารณาฐานรากยึดหยุ่น ใช้การจำแนกชั้นดินของกรุงเทพมหานครดังแสดงในตารางที่ 2 [5] และใช้แบบจำลองเป็นเสาเข็มที่มีความยาวต่าง ๆ ตามความสูงของอาคาร พิจารณาความสามารถในการต้านการเคลื่อนที่ทางด้านข้างของดินแต่ละชั้นเป็นสปริง (Lateral Soil Spring Element) และยึดติดกับเสาเข็มใน 2 ทิศทางที่ตั้งฉากกันในระนาบเสาเข็มยึดติดกับเสาของอาคาร โดยมีจุดรองรับที่ปลายล่างเป็นแบบล้อเลื่อน (Roller Support) ดังรูปที่ 1

การพิจารณาเสาคอนกรีตทางด้านข้างของสปริง, K_h , ใช้สมการที่เสนอโดย J.E. Bowles (1980) [6] โดยมีที่มาจากวิเคราะห์แบบ Subgrade Reaction

ตารางที่ 2 การจำแนกชั้นดินในกรุงเทพมหานคร [5]

ความลึก (เมตร)	ลักษณะดิน	คุณสมบัติดิน
0 – 14	Soft Clay	$S_u = 1.60 \text{ t/m}^2$
14 – 25	1 st Stiff Clay	$S_u = 15.0 \text{ t/m}^2$
25 – 36	1 st Sand	$V_s = 290 \text{ m/s}$
36 – 44	2 nd Stiff Clay	$S_u = 13.5 \text{ t/m}^2$
44 - 60	2 nd Sand	$V_s = 370 \text{ m/s}$



รูปที่ 1 แบบจำลองอาคารและฐานรากยึดหยุ่น

$$K_h = N_h Z \tag{1}$$

$$N_h = \frac{1.3}{D} \sqrt{\frac{E_s D^4}{E_p I_p} \frac{E_s}{1 - \nu_s^2}} \tag{2}$$

โดยที่ D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของเสาเข็ม $E_p I_p$ คือค่าเสถียรภาพของเสาเข็ม E_s คือค่า Young's modulus ของดิน ν_s คือค่า Poisson's ratio ของดิน โดยมีค่าประมาณ 0.5 สำหรับ cohesive soil และ Z คือความหนาของชั้นดินที่พิจารณา และงานวิจัยนี้ไม่คิดผลของกลุ่มเสาเข็ม ที่มีรายงาน ว่า ปัจจัยต่าง ๆ เช่น จำนวนเสาเข็ม คุณสมบัติของชั้นดิน การเรียงตัวของเสาเข็ม ทำให้เสถียรภาพของเสาเข็มลดลงได้ [7] อย่างไรก็ตาม ผลของความคิดผลในการประมาณค่าเสถียรภาพของเสาเข็มจะพิจารณาในส่วนท้ายของงานวิจัยนี้

ค่า Young's modulus (E_s) ของดินขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดินแต่ชั้น โดยที่ E_s ของดินเหนียว (Clay) มีค่าเท่ากับ $1200 S_u$ (Shibuya et al 1997) [8] โดย S_u คือ Undrained Shear Strength ส่วนค่า E_s ของดิน

ทราย (Sand) ขึ้นอยู่กับค่า Shear Wave Velocity (V_s) ของแต่ละชั้นดังสมการที่ 3

$$V_s = \sqrt{\frac{E_s}{2\rho_s(1+\nu_s)}} \quad (3)$$

โดยที่ ρ_s คือ ค่าความหนาแน่นของชั้นดิน

เสาเข็มในแบบจำลองมีหน้าตัดรูปวงกลม โดยที่มีขนาดจำนวนและความยาวเสาเข็มจำแนกตามความสูงของอาคารดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ลักษณะของเสาเข็มที่ใช้ในแบบจำลอง

ชั้น	สูง (ม.)	เสาเข็ม		
		เส้นผ่าศูนย์กลาง (เมตร)	จำนวนเสาเข็ม ต่อฐาน (คืบ)	ความยาว (เมตร)
5	17.5	0.6	8	26
10	35	0.8	8	30
20	70	1.0	8	36
40	140	1.0	7	46
60	210	1.0	7	48

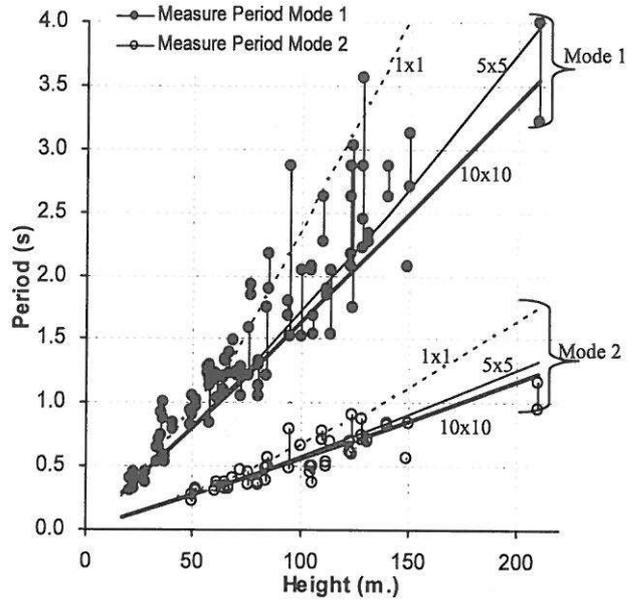
3. ผลการวิจัย

ในการศึกษาแบบจำลองโครงสร้างของอาคาร มีการพิจารณาความสูงของอาคารตามจำนวนชั้นดังนี้ 5, 10, 20, 40 และ 60 ชั้น และพิจารณาอาคารที่มีช่วงเสา 1 ช่วงเสา 5 ช่วงเสา และ 10 ช่วงเสาสำหรับอาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ต่อไปนี้จะแทนด้วยสัญลักษณ์ คือ 1x1 5x5 และ 10x10) และศึกษาผลของขนาดอาคารต่อค่าคาบธรรมชาติ โดยพิจารณาอาคารรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 1x5 และ 5x10

3.1 ค่าคาบธรรมชาติ (Natural Period)

จากผลการศึกษาพบว่าค่าคาบธรรมชาติของโครงสร้างระบบพื้นคานเสา และโครงสร้างระบบพื้นเสา มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เนื่องจากผลขององค์อาคารในระนาบ เช่น คาน หรือ พื้น มีผลต่อสติเฟเนสทางด้านข้างไม่มากนัก เมื่อเทียบกับผลจากเสา และผลการศึกษาที่น่าสนใจต่อไปนี้เป็นผลของระบบพื้นคานเสาท่านั้น รูปที่ 2 แสดงค่าคาบธรรมชาติในรูปแบบการสั้นไหวที่ 1 และ 2 สำหรับอาคารที่มีฐานยึดแน่น จุดข้อมูลเป็นค่าจากการตรวจวัดซึ่งมีเส้นเชื่อมในแนวตั้งแสดงถึงค่าคาบของอาคารเดียวกันในสองทิศทาง และผลการวิเคราะห์อาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแสดงด้วยเส้น พบว่า ค่าคาบธรรมชาติเพิ่มขึ้นตามความสูงของอาคาร และอาคารขนาดใหญ่มีคาบสั้นกว่าอาคารขนาดเล็ก เนื่องจากค่าคาบธรรมชาติขึ้นอยู่กับ รากที่สองของมวลต่อสติเฟเนสทางด้านข้างของโครงสร้าง เมื่ออาคารสูงขึ้นค่าสติเฟเนสของอาคารมีค่า

น้อยลง และในอาคารที่มีขนาดใหญ่จะมีค่าสติเฟเนสทางด้านข้างมากขึ้น จากจำนวนเสา และขนาดของรูปตัดอาคาร ในขณะที่มวลของอาคารที่เพิ่มขึ้นมีผลน้อยกว่าการเพิ่มขึ้นของค่าสติเฟเนส ทำให้ค่าคาบธรรมชาติมีค่าน้อยลง

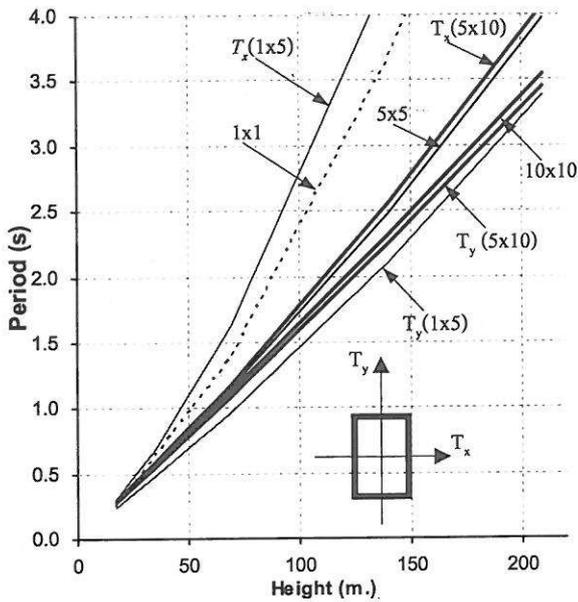


รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ค่าคาบธรรมชาติกับความสูง

คาบธรรมชาตินอกจากขึ้นอยู่กับความสูงของอาคารแล้วยังขึ้นอยู่กับขนาดของโครงสร้าง ในงานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะของอาคารแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1x1 5x5 และ 10x10 และรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 1x5 และ 5x10 พบว่าค่าคาบธรรมชาติมีแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับอาคารที่มีขนาดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส คือ ค่าคาบธรรมชาติในทิศทางขนานด้านสั้น (T_x) ของขนาด 1x5 มีค่าใกล้เคียงกับค่าคาบธรรมชาติของอาคารขนาด 1x1 แต่มีค่ามากกว่า เช่นเดียวกับค่าคาบธรรมชาติในทิศทางสั้นของอาคารขนาด 5x10 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าคาบธรรมชาติของอาคารขนาด 5x5 และค่าคาบธรรมชาติในทิศทางขนานด้านยาว (T_y) ของอาคารขนาด 1x5 มีค่าใกล้เคียงกับค่าคาบธรรมชาติของอาคารขนาด 5x5 แต่มีค่าน้อยกว่าเช่นเดียวกับค่าคาบในทิศทางยาวของอาคารขนาด 5x10 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าคาบธรรมชาติของอาคารขนาด 10x10 โดยความแตกต่างที่เกิดขึ้นมาจากผลของอัตราส่วนของมวลต่อสติเฟเนสทางด้านข้างของอาคารที่เปลี่ยนแปลงตามขนาดของอาคาร โดยค่าสติเฟเนสทางด้านข้างขึ้นอยู่กับจำนวนเสาและขนาดหน้าตัดของระนาบอาคาร โดยแสดงผลในรูปที่ 3

การเปรียบเทียบค่าคาบธรรมชาติของโครงสร้างระบบพื้นคานเสาที่มีฐานรากแบบยึดแน่นและแบบยึดหยุ่น พบว่าโครงสร้างที่มีฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่นจะมีค่าคาบธรรมชาติที่มากขึ้นดังตารางที่ 4 โดย

แสดงค่าของร้อยละความแตกต่าง ซึ่งหมายถึง โครงสร้างมีความแข็งแรงลดลง



รูปที่ 3 ค่าคาบธรรมชาติของอาคารรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและสี่เหลี่ยมผืนผ้า

จากตารางที่ 4 พบว่าแบบจำลองแบบฐานรากยึดหยุ่นทำให้ค่าคาบธรรมชาติสูงขึ้นทั้งใน ค่าคาบธรรมชาติในรูปแบบที่ 1 และ 2 (T_1, T_2) โดยพบว่าการเพิ่มขึ้นของค่าธรรมชาติมีมากในกรณีของอาคารเดี่ยว และเมื่ออาคารมีความสูงมากขึ้น ค่าคาบธรรมชาติของแบบจำลองแบบฐานรากยึดหยุ่นมีค่ามากกว่าแบบยึดแน่นเล็กน้อย

ตารางที่ 4 การเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติของแบบจำลองฐานรากแบบยึดหยุ่นเทียบกับค่าจากแบบยึดแน่น

ชั้น	สูง (ม.)	% ความแตกต่าง					
		1x1		5x5		10x10	
		T_1	T_2	T_1	T_2	T_1	T_2
5	17.5	26.74	26.04	26.20	26.28	26.68	26.20
10	35	14.30	11.05	12.37	12.55	12.34	12.56
20	70	10.65	5.84	7.53	6.85	6.92	6.76
40	140	15.58	6.44	9.18	5.40	6.70	5.30
60	210	12.57	6.55	7.96	4.50	5.81	4.38

ในการศึกษาผลกระทบของความยืดหยุ่นของฐานรากต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติ พิจารณาแบบจำลองแบบง่ายดังรูปที่ 4 อัตราส่วนของค่าคาบธรรมชาติของแบบจำลองแบบฐานรากยึดหยุ่น, \bar{T} , ต่อค่าจากแบบจำลองแบบฐานรากยึดแน่น, T , สามารถแสดงดังสมการที่ (4)

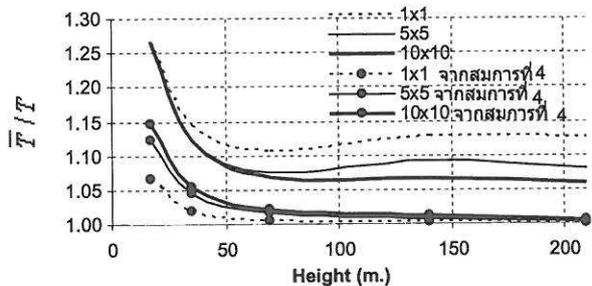


แบบจำลองแบบฐานยึดแน่น แบบจำลองแบบฐานยึดหยุ่น

รูปที่ 4 แบบจำลองแบบง่ายสำหรับการศึกษาผลของความยืดหยุ่นของฐานรากต่อค่าคาบธรรมชาติ

$$\frac{\bar{T}}{T} = \sqrt{K_s \left(\frac{K_s + K_b}{K_s K_b} \right)} \quad (4)$$

โดย K_s และ K_b คือสติเฟนสทางด้านข้างของอาคารและฐานรากตามลำดับ ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองแบบง่ายและแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์แสดงในรูปที่ 5 โดยพบว่า ผลของความยืดหยุ่นของฐานรากทำให้ค่าคาบธรรมชาติเพิ่มขึ้น โดยมีผลมากกับอาคารเดี่ยว และมีผลน้อยลงสำหรับอาคารสูง นอกจากนี้พบว่า การเพิ่มขึ้นของค่าคาบธรรมชาติที่ได้จากแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ที่สูงกว่าค่าจากแบบจำลองแบบง่าย ทั้งนี้เนื่องจากผลของมิติของอาคารและการเคลื่อนที่ในแนวแกนของชิ้นส่วนเสาและเสาเข็ม ที่ทำให้เกิดการหมุนพลิก (Rocking) และผลจากมวลของฐานราก ที่ไม่สามารถพิจารณาจากแบบจำลองแบบง่าย



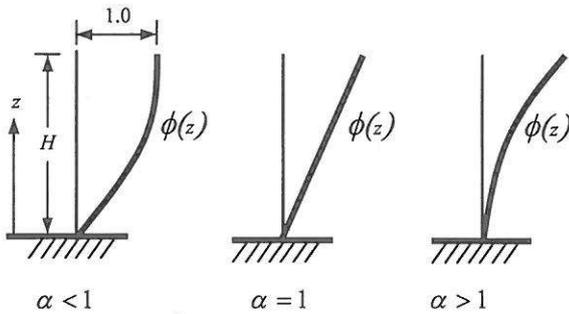
รูปที่ 5 ผลของความยืดหยุ่นของฐานรากต่อค่าคาบธรรมชาติ

3.2 รูปร่างการสั่นไหว

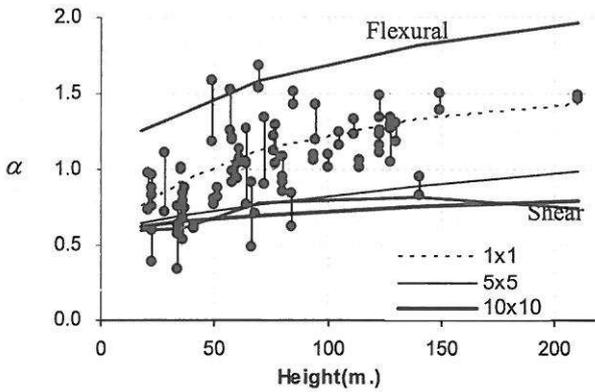
ในการพิจารณารูปร่างการสั่นไหวของอาคารในที่งานวิจัยนี้ พิจารณาค่าของเลขยกกำลัง α ในการอธิบายรูปร่างการสั่นไหวตามสมการที่ 5 โดยที่ $\phi(z)$ คือรูปร่างการสั่นไหว z คือระดับความสูง และ H คือความสูงของอาคารทั้งหมด โดยพฤติกรรมของโครงสร้างอาจจำแนกตามค่า α ดังแสดงในรูปที่ 6 และสำหรับแบบจำลองอาคารที่ใช้สมมุติฐานว่าคานไม่เกิดการคดตัว หรือมีพฤติกรรมการไหวตัวเป็นแบบเฉือน (Shear Type) α มีค่าน้อยกว่า 1.0 ส่วนแบบจำลองอาคารที่

ใช้สมมุติฐานว่าคานไม่มีการต้านทานการคดได้ หรือมีพฤติกรรมการไหวตัวเป็นแบบคด (Flexural Type) α มีค่ามากกว่า 1.0

$$\phi(z) = \left(\frac{z}{H}\right)^\alpha \quad (5)$$

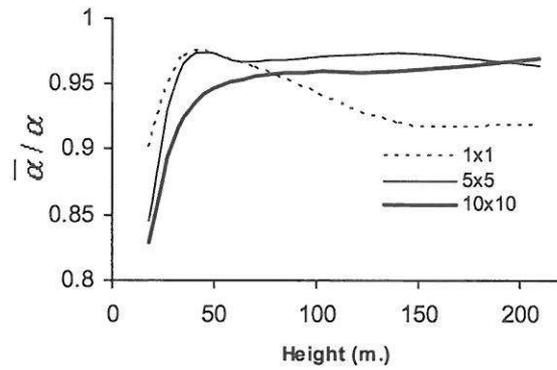


รูปที่ 6 พฤติกรรมการไหวตัวแบบต่าง ๆ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า α และความสูง

รูปที่ 7 แสดงค่า α จากการตรวจวัดและแบบจำลองรวมทั้งค่าสำหรับอาคารที่มีพฤติกรรมการไหวตัวแบบเลื่อนและแบบคด สำหรับรูปแบบการสั่นไหวที่ 1 โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความสูงของอาคาร และพบว่าจากแบบจำลองค่า α มีค่าน้อยกว่า 1.0 ซึ่งมีข้อแตกต่างจากค่าที่ตรวจวัดเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของอาคารจริงที่มีความซับซ้อนกว่าแบบจำลอง สำหรับผลกระทบของความยืดหยุ่นของฐานรากต่อค่า α แสดงในรูปที่ 8 โดยแกนตั้งเป็นอัตราส่วนของค่า α ของอาคารที่มีฐานรากยืดหยุ่นต่อค่าของอาคารที่มีฐานรากแข็ง ($\bar{\alpha}/\alpha$) โดยพบว่าความยืดหยุ่นของฐานรากมีผลมากต่อรูปแบบการสั่นไหวสำหรับอาคารเตี้ย และมีผลน้อยมากสำหรับอาคารสูง



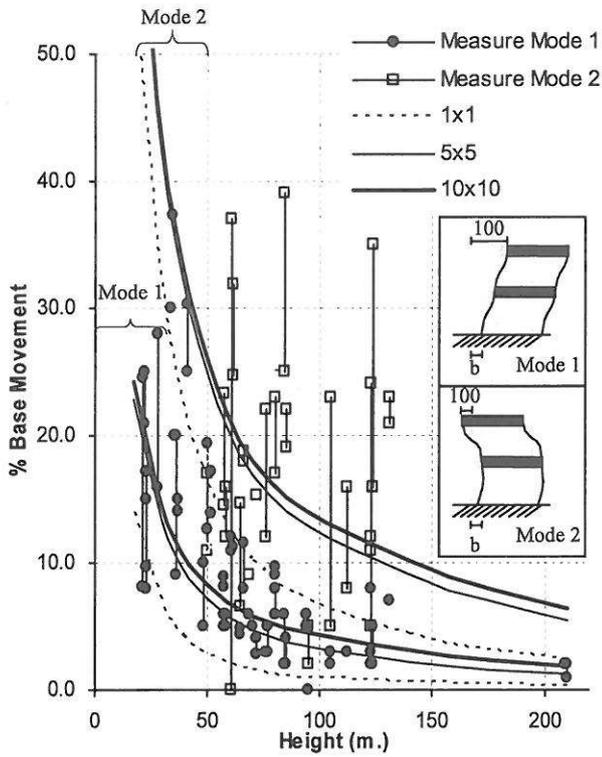
รูปที่ 8 ความแตกต่างของค่า α ต่อความสูง

3.3 การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ฐานราก

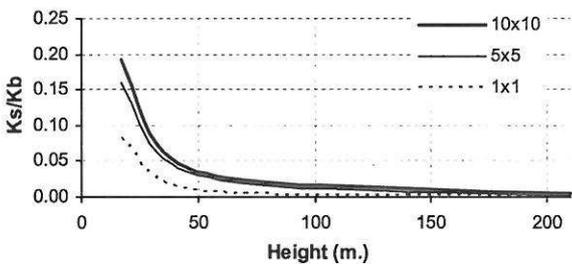
จากรูปร่างการสั่นไหวของอาคารที่มีฐานรากยืดหยุ่นจะแสดงการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ตำแหน่งฐานรากเทียบกับยอดอาคารสำหรับทุกรูปร่างการสั่นไหว ซึ่งเป็นผลของความยืดหยุ่นของฐานรากของโครงสร้าง การวิเคราะห์ในขั้นนี้จึงเปรียบเทียบค่าจากการตรวจวัดกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และใช้ช่วยในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้ศึกษาด้วย ในรูปที่ 9 แสดงค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ฐานรากเมื่อเปรียบเทียบกับยอดอาคารสัมพันธ์กับความสูงในรูปแบบการสั่นไหวที่ 1 และ 2 โดยพบว่า ค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ฐานรากของอาคารจะมีค่ามากสำหรับอาคารเตี้ยและมีแนวโน้มลดลงเมื่ออาคารมีความสูงมากขึ้น และการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ฐานของอาคารในรูปแบบการสั่นไหวที่สูงขึ้นมีค่ามากขึ้น และผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองแสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลการตรวจวัดสำหรับทั้ง 2 รูปแบบการสั่นไหว

จากผลการศึกษาผลกระทบของความยืดหยุ่นของฐานรากต่อค่า คาบธรรมชาติ ค่าของเลขยกกำลัง α ในการอธิบายรูปร่างการสั่นไหว และค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ฐานของอาคารจากรูปร่างการสั่นไหว พบว่า ผลของความยืดหยุ่นของฐานรากมีผลมากต่ออาคารเตี้ย และมีผลลดลงเมื่ออาคารมีความสูงมากขึ้น ซึ่งเป็นผลของกระทบของดินกับโครงสร้าง (Soil-Structure Interaction) ของอาคารที่ตั้งบนชั้นดินอ่อน โดยความรุนแรงของผลกระทบนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนค่าสติเฟนสของอาคารต่อฐานราก (K_s/K_b) รูปที่ 10 แสดงค่า K_s/K_b ที่ลดลงตามความสูง จึงกล่าวได้ว่าผลของกระทบของดินกับโครงสร้างจะมากตามอัตราส่วนค่าสติเฟนสของอาคารต่อฐานราก สำหรับอาคารขนาดเตี้ยมีค่าอัตราส่วนค่าสติเฟนส ที่มากกว่าอาคารสูงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์อย่างมากเมื่อเทียบกับผลต่ออาคารสูง และสอดคล้องกับคำอธิบายจากงานวิจัยของ Ellis (1980) [9] และด้วยคำอธิบายเช่นเดียวกัน ในรูปแบบการสั่นไหวที่ 2 พบว่าการเคลื่อนตัว

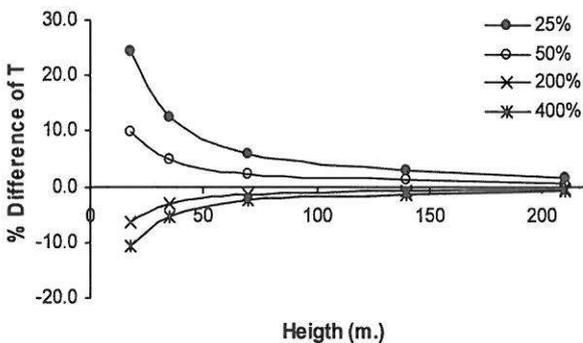
สัมพัทธ์พื้นฐานมีค่าสูงขึ้น เป็นผลมาจากค่าสถิติเนส ของอาคาร ในรูปแบบการสั่นไหวที่ 2 มีค่ามากกว่าค่าในรูปแบบการสั่นไหวที่ 1



รูปที่ 9 การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์พื้นฐานราก



รูปที่ 10 อัตราส่วนของ K_s/K_b กับความสูง



รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติจากผลของการเปลี่ยนแปลงค่าสถิติเนสของฐานราก

การจำลองชั้นดินในการวิจัยนี้ใช้ข้อมูลการจำแนกชั้นดินในกรุงเทพมหานครเพียงรูปแบบเดียว ซึ่งในความเป็นจริงแล้วค่าที่ใช้อาจมีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่แท้จริงได้ รวมทั้งความไม่สมบูรณ์ของทฤษฎีที่ใช้กับแบบจำลองฐานรากทำให้ค่าสถิติเนสทางด้านข้างของเสาเข็มมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นการศึกษานี้จึงพิจารณาผลของการประมาณค่าสถิติเนสทางด้านข้างของเสาเข็มที่คลาดเคลื่อนไป โดยศึกษาแบบจำลองที่ชั้นดินมีค่าสถิติเนสทางด้านข้างของเสาเข็ม เท่ากับ 400% 200% 50% และ 25% ของค่าที่ใช้ศึกษาเดิมเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าคาบธรรมชาติที่เปลี่ยนแปลงไป โดยแสดงค่าร้อยละความแตกต่างของค่าคาบธรรมชาติเทียบกับค่าคาบธรรมชาติของชั้นดินเดิม ดังรูปที่ 11 โดยใช้แบบจำลองอาคารขนาด 5x5 ซึ่งพบว่าการประมาณค่าสถิติเนสผิดไป 1/4 ถึง 4 เท่า ทำให้ค่าคาบธรรมชาติเปลี่ยนแปลงประมาณ 10-25% สำหรับอาคารเตี้ย และจะมีผลน้อยสำหรับอาคารสูง

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ด้วยการวิเคราะห์แบบจำลองของอาคารที่พิจารณาผลของความยืดหยุ่นที่ฐานรากในงานวิจัยนี้ มีข้อสรุปดังนี้

1. แบบจำลองในการศึกษานี้ให้ผลการวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติที่ได้ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัด โดยค่าคาบธรรมชาติจากแบบจำลองของระบบพื้นคานเสา และระบบพื้นเสา มีค่าใกล้เคียงกัน และพบว่าสำหรับอาคารที่มีความสูงเท่ากันคาบธรรมชาติมีค่าลดลงเมื่ออาคารมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากขนาดของอาคารมีผลต่อสถิติเนสทางด้านข้างที่เกิดจากจำนวนเสาและขนาดของระนาบอาคาร

2. แบบจำลองฐานรากยืดหยุ่นทำให้ค่าคาบธรรมชาติสูงขึ้น และมีค่าใกล้เคียงกับค่าจากการตรวจวัดยิ่งขึ้น โดยพบว่าการเพิ่มขึ้นของค่าคาบธรรมชาติมีมากในกรณีของอาคารเตี้ย และเมื่ออาคารมีความสูงมากขึ้น ค่าคาบธรรมชาติของแบบจำลองแบบฐานรากยืดหยุ่นมีค่ามากกว่าแบบยึดแน่นเล็กน้อย

3. ผลกระทบของความยืดหยุ่นของฐานรากต่อ คาบธรรมชาติ รูปร่างการสั่นไหว และค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ที่ฐานของอาคาร ในด้านของผลของกระทบของดินกับโครงสร้าง (Soil-Structure Interaction) มีผลมากตามอัตราส่วนค่าสถิติเนสของอาคารต่อฐานราก

4. การประมาณค่าสถิติเนสทางด้านข้างของเสาเข็มผิดไปประมาณ 1/4 ถึง 4 เท่า ทำให้ค่าคาบธรรมชาติเปลี่ยนแปลงประมาณ 10-25% สำหรับอาคารเตี้ย และจะมีผลน้อยสำหรับอาคารสูง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ บริษัท อรุณชัยเสรี คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด และ คุณพิสิฐ กาญจนรุจิวิฒิ ที่สนับสนุนข้อมูลด้านการออกแบบก่อสร้างของอาคารในกรุงเทพมหานคร และ อาจารย์ ธเนศ วีระศิริ ที่ให้คำแนะนำด้านการออกแบบฐานราก

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Poovarodom, N., Warnitchai, P., Petcharoen, C., Yinghan, P., Jantasod, M., 2004, "Dynamic Characteristics of Non-Seismically Designed Reinforced Concrete Buildings with Soft Soil Condition in Bangkok". Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver BC, Canada. Paper no. 1264. Oxford: Pergamon.
- [2] เฉลิมชัย เกียรติเรืองกมล และ นคร ภู่วโรคม 2545 "การศึกษาแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก" เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 8 หน้าที่ STR-294 ถึง STR-299
- [3] Kotsovos M.D. & Pavlovic M.N., 1995, Structural Concrete Finite-Element Analysis for Limit-State Design. Redwood Book, Trowbridge, Wiltshire.
- [4] Applied Technology Council, 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- [5] Oonchittikul S. 1989, Performance of Bored Pile in Bangkok Subsoil. M.Eng. thesis, Thesis No.GT-89-10, Asian Institute of Technology.
- [6] Bowles, J. E., 1980, Foundation Analysis and Design, New York, McGraw-Hill.
- [7] Poulos, H. G., 1997, A Review of Dynamic Analysis of Pile Foundations, research report No. R757, Department of Civil Engineering, The University of Sydney.
- [8] Shibuya, S. and Tamayaka S.B., 1997, "In-situ and Laboratory Investigations into Engineering Properties of Bangkok Clay ", Proc. of Int..Symp. Characterization of Soft Marine Clay -Bothkenner, Drammen, Quebec and Ariake Clay, Balkema.
- [9] Ellis B. R., 1980, An Assessment of the Accuracy of Predicting the Fundamental Natural Frequencies of Building and the Implications Concerning the Dynamic Analysis of Structures. Proc. Instn Civ. Engrs. Vol. 69, No. 2, pp. 763-776.