

การศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อการวิเคราะห์
คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

A Study of Numerical Models for An Analysis of
Dynamic Properties of Reinforced Concrete Buildings

โดย

นายณพดล กิริติพงษ์วุฒิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ. 2549

การศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อการวิเคราะห์
คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

A Study of Numerical Models for An Analysis of Dynamic Properties of
Reinforced Concrete Buildings

โดย

นายนพดล กิริติพงษ์วุฒิ
Mr.Noppadol Kiratipongvut

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ. 2549

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นายณพดล กิริติพงษ์วุฒิ

เรื่อง

การศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อการวิเคราะห์
คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

เมื่อ วันที่ 22 ธันวาคม พ.ศ.2549

ประธานกรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ _____
(รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ภู่วโรดม)

กรรมการวิทยานิพนธ์ _____
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ บุญญภิญโญ)

กรรมการวิทยานิพนธ์ _____
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤตยาฤทธิ์ ชมภูมิ่ง)

คณบดี _____
(รองศาสตราจารย์ ดร.อุรุยา วิสกุล)

บทคัดย่อ

คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญต่อการประเมินแรงและผลตอบสนองของโครงสร้างต่อแรงภายนอกแบบพลวัต เช่น แรงลม หรือ แรงแผ่นดินไหว การวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติเหล่านี้สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์แบบจำลองในระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์จากแบบรายละเอียดทางวิศวกรรม แต่อาจให้คำตอบที่มีข้อจำกัดในด้านของความถูกต้อง โดยมีสาเหตุหนึ่งมาจากการขาดความเข้าใจถึงแบบจำลองที่เหมาะสมของชิ้นส่วนที่จำลองในโครงสร้างสำหรับการวิเคราะห์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาหลักสำคัญบางประการสำหรับการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ เพื่อการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเป็นอาคารในกรุงเทพมหานคร จำนวน 4 อาคาร ซึ่งมีความสูงของอาคารคือ 28, 31, 53 และ 102 เมตร ในการดำเนินการเพื่อให้ได้คำตอบจากการวิเคราะห์แบบจำลองที่แม่นยำ การศึกษานี้พิจารณาการสร้างแบบจำลองตามพฤติกรรมเชิงกลของระบบโครงสร้างหลักของอาคารและระบบที่ไม่ใช่โครงสร้างหลัก ในการศึกษาการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์นั้นได้พิจารณาผลกระทบของการแบ่งย่อยในชิ้นส่วนโครงสร้าง รวมถึงศึกษาผลของแบบจำลองฐานรากแบบยึดหยุ่นต่อค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่ได้จากการวิเคราะห์จากแบบจำลองในการศึกษานี้ได้ถูกเปรียบเทียบกับค่าจากการตรวจวัดอาคารจริง โดยค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่ทำการเปรียบเทียบคือค่าคาบธรรมชาติและรูปร่างการสั่นไหวสำหรับรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐาน ในแนวสองแกนหลักของอาคาร และแนวบิดของโครงสร้าง ผลการศึกษาพบว่าการแบ่งย่อยในชิ้นส่วนพื้น มีผลกระทบต่อค่าคาบการสั่นไหวมากกว่าการพิจารณาแบ่งย่อยในชิ้นส่วนโครงสร้างอื่นๆ โดยมีผลสูงสุดต่อค่าคาบการสั่นไหวในรูปแบบการบิดตัวซึ่งมีค่าลดลง 3-5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับผลการพิจารณาแบบฐานรากแบบยึดหยุ่นนั้น พบว่าทำให้รูปร่างของการสั่นไหวมีความถูกต้องยิ่งขึ้นกว่าแบบจำลองที่มีฐานรากยึดแน่น และสำหรับอาคารตัวอย่างเหล่านี้ ผลกระทบจากระบบฐานรากแบบยึดหยุ่นมีมากต่ออาคารเตี้ย ซึ่งสรุปได้จากความแตกต่างของค่าคาบธรรมชาติจากแบบจำลองฐานราก 2 แบบ ที่มีความแตกต่างมากในอาคารเตี้ย ซึ่งผลการศึกษาส่วนนี้เป็นการอธิบายผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้าง (Soil-Structure Interaction, SSI) ซึ่งผลดังกล่าวจะมีผลกระทบมากสำหรับอาคารที่มีสตีเฟนเนสของโครงสร้างสูงเมื่อเทียบกับสตีเฟนเนสของฐานรากเช่น อาคารเตี้ย แต่ผลจะลดลงสำหรับอาคารสูงที่มีสตีเฟนเนสของโครงสร้างต่ำเมื่อเทียบกับสตีเฟนเนสของฐานราก

ABSTRACT

Dynamic properties of building play an important role in the determination of the equivalent lateral forces as well as responses from natural disturbances such as wind and seismic forces. It has been discussed in the past that the estimations of fundamental dynamic properties by finite element based method provide only fairly degree of accuracy. This is partly because of lack of adequate understanding of the model of structural element for the analysis.

This thesis presents some key aspects of the study of numerical models for an analysis of dynamic properties of reinforced concrete buildings by finite element method. Four buildings constructed in Bangkok, 28, 31, 53, and 102 meters high, were studied for the analysis of their dynamic properties. In order to obtain accurate dynamic properties, the mechanical behaviors and properties of the structural system as well as the non-structural system were taken into account. In the studies of finite element model, the effects of meshing of building's elements and the effects of foundation flexibilities were carefully investigated to define the appropriate model for the analysis.

The calculated results of dynamic properties, which include natural periods and mode shapes of the fundamental modes in two translation axes and torsion mode, were compared to the results from the actual measurement of dynamic properties of the buildings. The results showed that the natural periods in torsion mode were most affected by meshing of slab element; however the degree of change in the natural period was only about 3 to 5%. In the analysis models on flexible foundation, more accurate of mode shapes were achieved. Among four building models in this study, the effects of foundation flexibility were relatively more significant for low-rise building. It was indicated by the differences in natural periods of fixed-base model and flexible-base model. This finding shows the effects of Soil-Structure-Interaction which are more pronounced in low-rise building when the relative stiffness of the building with respect to the soil is high.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. นคร ภู่วโรดม ประธานกรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษาเสนอแนะแนวทาง และความช่วยเหลืออันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำวิทยานิพนธ์จนทำให้ผู้วิจัยสามารถทำการวิจัยนี้ได้อย่างถูกต้องและสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากนี้แล้วผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ บุญญภิญโญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤตยาฤทธิ์ ชมภูมิ่ง กรรมการวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำแนวทางการทำวิจัยครั้งนี้ และได้ช่วยกรุณาตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ บริษัทสินธานี โฮลดิ้ง จำกัด ที่ช่วยจัดหาแบบก่อสร้างรวมถึงอำนวยความสะดวกในการตรวจวัดอาคาร

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ในห้องปฏิบัติการโยธาทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกและจัดหาเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยเสมอมา รวมถึงขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ หากวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีผลดี และก่อให้เกิดประโยชน์ต่อส่วนรวมแล้ว ผู้วิจัยขอมอบความดีทั้งหมดนี้ให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่านดังที่ได้กล่าวมา

นายณพดล กิริติพงษ์วุฒิ

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พ.ศ. 2549

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(1)
กิตติกรรมประกาศ.....	(3)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญภาพ.....	(11)
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 องค์ประกอบของวิทยานิพนธ์	5
2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร.....	8
2.2 การคำนวณค่าคาบธรรมชาติจากสูตรประมาณ.....	8
2.3 การวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์บนแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์.....	9
2.3.1 แบบจำลองกำแพงอิฐก่อ (Masonry Infilled Wall Model).....	9
2.3.2 แบบจำลองฐานราก (Foundation Model).....	10
2.3.3 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก	11

สารบัญ(ต่อ)

บทที่		หน้า
3	วิธีวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	13
	3.1 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของระบบโครงสร้าง.....	14
	3.1.1 กำลังขององค์อาคารเริ่มต้น.....	14
	3.1.2 ขอบเขตความแข็ง (Rigid Zone)	17
	3.1.3 แบบจำลองโครงอาคาร (General Frame Model)	18
	3.1.4 แบบจำลองฐานรากแบบยืดหยุ่น (Flexible Foundation)	18
	3.2 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของระบบที่ไม่ใช่โครงสร้าง...	22
	3.2.1 แบบจำลองของกำแพงก่ออิฐ (Masonry Infilled Wall).....	22
	3.3 การประเมินความสอดคล้องของรูปแบบการสั่นไหว (Model Assurance Criterion,MAC)	23
	3.4 สมมติฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของ อาคารที่ทำการศึกษา	24
	3.4.1 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของวัสดุ (Material Properties).....	24
	3.4.2 น้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับโครงสร้าง (Lived Load)	25
	3.4.3 สมมติฐานต่างๆที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง (Modeling Assumptions)	25
	3.4.4 การสร้างส่วนประกอบต่างๆในโครงสร้าง (Modeling of Building Components)	26
4	การศึกษาการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์.....	27
	4.1 การศึกษาการแบ่งย่อย (Mesh) ใน Frame และ Wall Element.....	28
	4.2 การศึกษาการแบ่งย่อย (Mesh) ใน Frame และ Slab Element.....	32
	4.3 การศึกษาผลกระทบจากรูปแบบต่างๆของพื้น โดยการแบ่งย่อย (Mesh) ใน Slab Element ต่อค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์	37

สารบัญ(ต่อ)

บทที่		หน้า
5	การศึกษาแบบจำลองฐานราก และห้องใต้ดิน	41
	5.1 แบบจำลองฐานรากแบบยืดหยุ่น (Flexible Foundation)	41
	5.1.1 การคำนวณหาผลรวมของสถิติเฟสของเสาเข็ม.....	42
	5.2 แบบจำลองห้องใต้ดิน และฐานรากที่มีความหนาแน่น.....	45
6	ผลการศึกษา.....	47
	6.1 ลักษณะอาคาร	47
	6.1.1 อาคาร A (อาคารพักอาศัย 7 ชั้น)	47
	6.1.2 อาคาร B (อาคารสำนักงาน 12 ชั้น)	47
	6.1.3 อาคาร C (อาคารสำนักงาน และอาคารเรียน 21 ชั้น).....	47
	6.1.4 อาคาร D (อาคารเรียน และปฏิบัติการ 6 ชั้น)	48
	6.2 ผลการตรวจวัด	52
	6.3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของตัวอย่างอาคารจริง....	53
	6.3.1 ผลการวิเคราะห์การแบ่งย่อย ใน Frame และ Element	
	ในแบบจำลองของอาคารจริง	53
	6.3.2 การพิจารณาผลของแบบจำลองฐานรากแบบยืดหยุ่น	
	และห้องใต้ดิน.....	55
	6.4 ผลการวิเคราะห์รูปร่างของการสั่นไหว (Mode Shape Analysis)	58
	6.4.1 อาคาร C (อาคารสำนักงาน และอาคารเรียน 21 ชั้น)	58
	6.4.2 อาคาร A (อาคารพักอาศัย 7 ชั้น)	70
	6.4.3 อาคาร D (อาคารเรียน และปฏิบัติการ 6 ชั้น)	74
7	สรุปผลการศึกษา	79
	7.1 การศึกษาการแบ่งย่อย (Meshing) ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์...	79
	7.2 การศึกษาการสร้างแบบจำลองฐานรากแบบยืดหยุ่นและห้องใต้ดิน....	80

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
7	
7.3 การศึกษาอุปรางการณ์ไหว	81
7.4 ข้อเสนอแนะงานวิจัย	81
บรรณานุกรม	83

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ค่าความแข็งแรงเริ่มต้นขององค์อาคาร (Component Initial Stiffness)	16
3.2 น้ำหนักบรรทุกทุกจรตามลักษณะพื้นที่ใช้สอย.....	25
4.1 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน	
1 ช่วงความสูงเสา-1ช่วงคาน (2D-Bared Frame Model, 1x1)	30
4.2 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน	
- กำแพง 1 ช่วงความสูงเสา-1ช่วงคาน (2D-Frame with Infilled Wall Model, 1x1) ...	30
4.3 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน	
- กำแพง 1 ช่วงความสูงเสา-3ช่วงคาน (2D-Frame with Infilled Wall Model, 1x3) ...	30
4.4 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน	
- กำแพง 3 ช่วงความสูงเสา-3 ช่วงคาน (2D-Frame with Infilled Wall Model, 3x3) ..	31
4.5 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน	
- กำแพง 6 ช่วงความสูงเสา-3 ช่วงคาน (2D-Frame with Infilled Wall Model, 6x3) ..	31
4.6 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน	
- กำแพง 9 ช่วงความสูงเสา-3 ช่วงคาน (2D-Frame with Infilled Wall Model, 9x3) ..	31
4.7 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน	
1 ช่วงความสูงเสา-1ช่วงคาน (3D-Bared Frame Model, 1x1)	34
4.8 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน	
- พื้น 1 ช่วงความสูงเสา-1ช่วงคาน (3D-Frame with Infilled Slab Model, 1x1)	34
4.9 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน	
- พื้น 1 ช่วงความสูงเสา-3ช่วงคาน (3D-Frame with Infilled Slab Model, 1x3)	35
4.10 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน	
- พื้น 3 ช่วงความสูงเสา-3ช่วงคาน (3D-Frame with Infilled Slab Model, 3x3)	35
4.11 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน	
- พื้น 6 ช่วงความสูงเสา-3ช่วงคาน (3D-Frame with Infilled Slab Model, 6x3)	35

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน - พื้น 9 ช่วงความสูงเสา-3ช่วงคาน (3D-Frame with Infilled Slab Model, 9x3)	36
4.13 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน - พื้น,ไม่พิจารณาผนัง (3D-Frame with Infilled Slab Model).....	38
4.14 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน - พื้น-ผนัง (3D-Frame with Infilled Slab and Wall Model).....	39
5.1 ค่าการเคลื่อนที่ในแนวนอนของหัวเสาเข็มเนื่องจากแรงกระทำ 100 ตัน.....	43
5.2 ค่าสติเฟนสในแนวนอนและในแนวตั้งของเสาเข็มในแบบจำลองอาคาร.....	45
6.1 ค่าคาบการสั่นไหวของอาคารต่างๆที่ได้จากการตรวจวัดจริง.....	52
6.2 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวเนื่องจากการแบ่งย่อย (Mesh) ใน Frame และ Element (Slab,Wall) ของอาคาร A	54
6.3 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวเนื่องจากการแบ่งย่อย (Mesh) ใน Frame และ Element (Slab,Wall) ของอาคาร B	54
6.4 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการพิจารณาฐานรากแบบยึดหยุ่น ของอาคาร C.....	56
6.5 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการพิจารณาฐานรากในรูปแบบต่างๆ ของอาคาร A.....	56
6.6 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการพิจารณาฐานรากในรูปแบบต่างๆ ของอาคาร D.....	57
6.7 เปรียบเทียบค่าการสั่นไหวและอัตราส่วนการเคลื่อนที่ของชั้นต่างๆในรูปร่างการสั่นไหว ตามขวาง (Transverse) ของอาคาร C พิจารณาหัวเสาเข็มแบบอิสระ	60
6.8 เปรียบเทียบค่าการสั่นไหวและอัตราส่วนการเคลื่อนที่ของชั้นต่างๆในรูปร่างการสั่นไหว ตามขวาง (Transverse) ของอาคาร C พิจารณาหัวเสาเข็มแบบต้านทานการหมุน.....	61
6.9 เปรียบเทียบค่าการสั่นไหวและอัตราส่วนการเคลื่อนที่ของชั้นต่างๆในรูปร่างการสั่นไหว ตามยาว (Longitudinal) ของอาคาร C พิจารณาหัวเสาเข็มแบบอิสระ	62

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.10 เปรียบเทียบค่าการสั่นไหวและอัตราส่วนการเคลื่อนที่ของชั้นต่างๆในรูปร่างการสั่นไหวตามยาว (Longitudinal) ของอาคาร C พิจารณาห้วงเสาเข็มแบบด้านทานการหมุน.....	63
6.11 เปรียบเทียบค่าการสั่นไหวและอัตราส่วนการเคลื่อนที่ของชั้นต่างๆในรูปร่างการสั่นไหวแบบบิดตัว (Torsion) ของอาคาร C พิจารณาห้วงเสาเข็มแบบอิสระ.....	64
6.12 เปรียบเทียบค่าการสั่นไหวและอัตราส่วนการเคลื่อนที่ของชั้นต่างๆในรูปร่างการสั่นไหวแบบบิดตัว (Torsion) ของอาคาร C พิจารณาห้วงเสาเข็มแบบด้านทานการหมุน.....	65
6.13 ค่า MAC ที่ได้จากอาคาร C โดยพิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดแน่น และแบบยึดหยุ่น	66
6.14 เปรียบเทียบค่าการสั่นไหวและอัตราส่วนการเคลื่อนที่ของชั้นต่างๆในรูปร่างการสั่นไหวตามขวางของอาคาร A พิจารณาห้วงเสาเข็มแบบอิสระและด้านทานการหมุน	71
6.15 เปรียบเทียบค่าการสั่นไหวและอัตราส่วนการเคลื่อนที่ของชั้นต่างๆในรูปร่างการสั่นไหวตามยาวของอาคาร A พิจารณาห้วงเสาเข็มแบบอิสระและด้านทานการหมุน	71
6.16 เปรียบเทียบค่าการสั่นไหวและอัตราส่วนการเคลื่อนที่ของชั้นต่างๆในรูปร่างการสั่นไหวแบบบิดตัวของอาคาร A พิจารณาห้วงเสาเข็มแบบอิสระและด้านทานการหมุน.....	72
6.17 ค่า MAC ที่ได้จากอาคาร A พิจารณาฐานรากแบบยึดแน่นและแบบยึดหยุ่น.	72
6.18 เปรียบเทียบค่าการสั่นไหวและอัตราส่วนการเคลื่อนที่ของชั้นต่างๆในรูปร่างการสั่นไหวตามขวางของอาคาร D พิจารณาห้วงเสาเข็มแบบอิสระและแบบด้านทานการหมุน	75
6.19 เปรียบเทียบค่าการสั่นไหวและอัตราส่วนการเคลื่อนที่ของชั้นต่างๆในรูปร่างการสั่นไหวตามยาวของอาคาร D พิจารณาห้วงเสาเข็มแบบอิสระและแบบด้านทานการหมุน.....	75
6.20 เปรียบเทียบค่าการสั่นไหวและอัตราส่วนการเคลื่อนที่ของชั้นต่างๆในรูปร่างการสั่นไหวแบบบิดตัวของอาคาร D พิจารณาห้วงเสาเข็มแบบอิสระและแบบด้านทานการหมุน	76
6.21 ค่า MAC ที่ได้จากการวิเคราะห์จากอาคาร D พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดแน่นและแบบยึดหยุ่น.....	76

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
3.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress-Strain ของคอนกรีต	14
3.2 การคำนวณหาค่า Initial Modulus	15
3.3 บริเวณขอบเขตความแข็ง (Rigid Zone).....	17
3.4 แบบจำลองแรงปฏิกิริยาของชั้นดิน	19
3.5 การหาค่าสถิติเฟสรวมในแนวราบของเสาเข็มที่ตำแหน่งฐานราก	20
3.6 การพิจารณารูปแบบหัวเสาเข็ม	21
3.7 การรวมรูปแบบของสปริงในแนวดิ่งและแนวราบของเสาเข็มที่ตำแหน่ง ฐานราก	21
3.8 แบบจำลองของอาคารทั้งหมด	23
4.1 แบบจำลองโครงเสา-คาน-กำแพง (2 มิติ) แบบ 1x1,1x3	29
4.2 แบบจำลองโครงเสา-คาน-กำแพง (2 มิติ) แบบ 3x3,6x3,9x3	29
4.3 แบบจำลองโครงเสา-คาน-พื้น (3 มิติ) แบบ 1x1,1x3,3x3,6x3,9x3	33
4.4 แบบจำลองโครงเสา-คาน-พื้น (3 มิติ) เพื่อพิจารณาผลของการแบ่งย่อย.....	37
4.5 การแบ่งย่อยของชิ้นส่วนพื้นในรูปแบบต่างๆ	38
5.1 ค่าการเคลื่อนที่ ในแนวราบของเสาเข็มเมื่อถูกแรงกระทำ 100 ตัน.....	44
5.2 การ Normalised ค่าการเคลื่อนที่ในแนวราบของเสาเข็มเมื่อถูกแรง กระทำ 100 ตัน.....	44
6.1 รูปด้านข้างของอาคาร A (อาคารพักอาศัย 7 ชั้น).....	48
6.2 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์โดยโปรแกรม SAP2000 ของอาคาร A..	48
6.3 รูปด้านข้างของอาคาร B (อาคารสำนักงาน 12 ชั้น)	49
6.4 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์โดยโปรแกรม SAP2000 ของอาคาร B..	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.5	การสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์โดยโปรแกรม SAP2000 ของอาคาร C . 50
6.6	ผังแนวขอบฐานราก และแนวกำแพงชั้นใต้ดิน 50
6.7	รูปด้านของอาคาร D (อาคารเรียนและปฏิบัติการ 6 ชั้น)..... 51
6.8	การสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์โดยโปรแกรม SAP2000 ของอาคาร D . 51
6.9	รูปร่างการสั่นไหวในทิศทางตามขวาง (Transverse) ของอาคาร C โดยพิจารณา ห้เสาค้ำแบบอิสระ 67
6.10	รูปร่างการสั่นไหวในทิศทางตามขวาง (Transverse) ของอาคาร C โดยพิจารณา ห้เสาค้ำแบบด้านทานการหมุน..... 67
6.11	รูปร่างการสั่นไหวในทิศทางตามยาว (Longitudinal) ของอาคาร C โดยพิจารณา ห้เสาค้ำแบบอิสระ 68
6.12	รูปร่างการสั่นไหวในทิศทางตามยาว (Longitudinal) ของอาคาร C โดยพิจารณา ห้เสาค้ำแบบด้านทานการหมุน..... 68
6.13	รูปร่างการสั่นไหวแบบบิดตัว (Torsion) ของอาคาร C โดยพิจารณาห้เสาค้ำ แบบอิสระ 69
6.14	รูปร่างการสั่นไหวแบบบิดตัว (Torsion) ของอาคาร C โดยพิจารณาห้เสาค้ำ แบบด้านทานการหมุน 69
6.15	รูปร่างการสั่นไหวในทิศทางตามขวาง (Transverse) ของอาคาร A..... 73
6.16	รูปร่างการสั่นไหวในทิศทางตามยาว (Longitudinal) ของอาคาร A 73
6.17	รูปร่างการสั่นไหวในทิศทางแบบบิดตัว (Torsion) ของอาคาร A 74
6.18	รูปร่างการสั่นไหวในทิศทางตามขวาง (Transverse) ของอาคาร D 77
6.19	รูปร่างการสั่นไหวในทิศทางตามยาว (Longitudinal) ของอาคาร D 77
6.20	รูปร่างการสั่นไหวในทิศทางแบบบิดตัว (Torsion) ของอาคาร D 78

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในการออกแบบอาคารทั่วไป วิศวกรผู้ออกแบบส่วนใหญ่จะทำการออกแบบ และวิเคราะห์โครงสร้างของอาคารโดยพิจารณาผลของแรงสถิตยเป็นหลัก โดยที่ไม่ได้วิเคราะห์การตอบสนองของอาคารเนื่องจากแรงทางด้านพลศาสตร์อย่างเหมาะสม แต่ในปัจจุบันนี้การวิเคราะห์ผลของแรงทางด้านพลศาสตร์มีความสำคัญและจำเป็นต้องพิจารณามากขึ้น สำหรับการออกแบบอาคารทั้งนี้เนื่องจากความรู้และมาตรฐานการออกแบบที่ถูกปรับปรุงพัฒนาขึ้น เช่น มาตรฐานการออกแบบอาคารรับแรงลม และแรงแผ่นดินไหว ดังนั้นการพิจารณาการตอบสนองของอาคารเนื่องจากแรงทางด้านความพลศาสตร์จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ได้ผลการออกแบบอาคารที่เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาคารที่ถูกออกแบบให้รูปทรงของอาคารมีความชะลุดและน้ำหนักของอาคารโดยรวมไม่มากนัก รวมถึงอาคารที่ถูกออกแบบและก่อสร้างบนพื้นที่ที่อยู่บนชั้นดินอ่อน เช่น อาคารในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร ซึ่งอาคารในรูปแบบดังกล่าวนี้จะมีการตอบสนองเนื่องจากแรงทางด้านพลศาสตร์ เช่น เกิดการสั่นไหวมากยิ่งขึ้น ดังนั้นการศึกษาถึงคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ และการตอบสนองของอาคารต่อแรงทางด้านพลศาสตร์นั้น จึงมีความสำคัญมากในการออกแบบอาคารให้มีความปลอดภัยต่อการใช้งานของผู้ใช้อาคาร

ในการศึกษาการตอบสนองของอาคารเนื่องมาจากแรงกระทำทางด้านพลศาสตร์นั้น จะพิจารณาศึกษาถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ทางด้านพลศาสตร์ของอาคาร (Dynamic properties of building) เช่น ค่าความถี่ธรรมชาติ และ รูปแบบการสั่นไหวของอาคาร ซึ่งในการศึกษาคุณสมบัติทางด้านพลศาสตร์ของอาคารโดยทั่วไปนั้น จะมีอยู่ 3 แบบ คือ 1) โดยวิธีการตรวจวัดจากอาคารจริง และวิเคราะห์ผลของการตรวจวัดเพื่อหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์โดยใช้วิธี Force และ Ambient vibration 2) โดยการคำนวณจากสูตรโดยประมาณ (Empirical Formula Approach) ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์โดยเฉลี่ยระหว่างความถี่ธรรมชาติของการสั่นไหวพื้นฐาน ของอาคารกับคุณสมบัติทางกายภาพของอาคารที่สามารถประเมินได้ง่าย เช่น ขนาด ความกว้าง ความยาว ความสูง ประเภทของวัสดุ และรูปแบบของโครงสร้างของอาคาร เป็นต้น 3) โดยวิธีการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ (Numerical Analysis Approach) ซึ่งเป็นการศึกษาจากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยที่แบบจำลองในลักษณะนี้จะช่วยให้สามารถจำลองพฤติกรรมความยืดหยุ่นของอาคาร

ในรูปแบบเมตริกซ์ของความแข็งแรง (Stiffness Matrix) และจำลองลักษณะการกระจายตัวของมวลในอาคารในรูปแบบของเมตริกซ์ของมวล (Mass Matrix) ซึ่งเมื่อนำข้อมูลทั้ง 2 แบบ ไปวิเคราะห์ด้วยวิธี Eigen Analysis จะทำให้สามารถคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติ และรูปแบบการสั่นไหวของอาคารได้

ในการหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร (Dynamic properties of building) ต่าง ๆ นั้น วิธีการคำนวณจากสูตรโดยประมาณจะเป็นวิธีที่ถูกใช้กันอย่างกว้างขวางในทางปฏิบัติ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถคำนวณค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ได้จากสูตรอย่างง่าย แต่อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากการคำนวณโดยสูตรดังกล่าวนั้น ยังมีความแตกต่างจากค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงมาก ทั้งนี้เนื่องจากสูตรไม่ได้ครอบคลุมถึงปัจจัยหลายประการ ที่ส่งผลต่อค่าความถี่ธรรมชาติของอาคาร รวมถึงความแตกต่างกันในการออกแบบและก่อสร้างอาคารในแต่ละประเทศด้วย ดังนั้นในปัจจุบันนี้ วิธีการที่ใช้ในการหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่เหมาะสม และให้ค่าที่ถูกต้องที่สุดจึงเป็นวิธีที่ได้ค่าจากการตรวจวัดจากสภาพอาคารจริงนั่นเอง

ในการหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ในการตรวจวัดจากสภาพอาคารจริงนั้น จะให้ผลออกมาอย่างถูกต้องสามารถเชื่อถือได้จริง ทั้งนี้เนื่องจากการพิจารณาบนโครงสร้างที่รวมผลกระทบทุกอย่างตามสภาพที่แท้จริงแล้ว แต่อย่างไรก็ตามในการตรวจวัดจากสภาพอาคารจริงดังกล่าวนี้จะเสียค่าใช้จ่ายสูง และการตรวจวัดจะสามารถกระทำได้ก็ต่อเมื่ออาคารได้รับการก่อสร้างเสร็จแล้ว ดังนั้นวิธีการตรวจวัดจากสภาพอาคารจริงนั้นจึงเป็นเพียงแค่วิธีการตรวจสอบกลับว่าอาคารดังกล่าวมีความสามารถในการรับแรงทางด้านพลศาสตร์ได้ดีหรือไม่ จากการคำนวณหาค่า Base Shear และ Horizontal Shear ที่เกิดขึ้นกับองค์อาคารจากค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ที่ได้จากการตรวจวัดสภาพอาคารโดยวิธี Force และ Ambient Vibration เท่านั้น

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น ในการหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารให้ถูกต้องและสามารถนำไปใช้ในการออกแบบอาคารให้เหมาะสมก่อนการก่อสร้างจริงนั้น วิธีการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ (Numerical Analysis Approach) โดยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ จึงเป็นวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่คำนวณได้จากการสร้างแบบจำลองนี้มีความถูกต้องตามการตรวจวัดจริงมากที่สุด ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ดังกล่าว จึงต้องถูกสร้างขึ้นอย่างถูกต้องและเหมาะสม กล่าวคือจะต้องคำนึงถึงผลของชิ้นส่วนที่เป็นระบบโครงสร้าง (Structural System) เช่น กำลังเริ่มต้นของวัสดุ แบบจำลองโครงอาคาร แบบจำลองฐานราก รวมถึงจะต้องพิจารณาถึงระบบที่แตกต่างกันขององค์อาคารในแต่ละประเภท และ

จะต้องคำนึงถึงผลของส่วนที่ไม่ใช่ระบบโครงสร้าง (Non structural System) เช่น กำแพงก่ออิฐด้วย

ในงานวิจัยนี้จะเน้นถึงการศึกษาหาค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคาร โดยวิธีการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์จากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ซึ่งในการสร้างแบบจำลองดังกล่าว นั้นจะทำการพิจารณาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์นั้นใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจากสภาพอาคารจริงมากที่สุด

โดยในงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาต่อเนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมา (เฉลิมชัย เกียรติเรืองกมล, 2001) โดยได้ศึกษาแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 3 อาคาร โดยในแต่ละอาคารจะพิจารณาถึงตัวแปรต่าง ๆ เช่น ค่าคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของวัสดุ ระบบโครงสร้าง และส่วนประกอบที่ไม่ใช่โครงสร้าง เช่น กำแพงก่ออิฐ และบันได โดยพิจารณาแบบจำลองของฐานรากเป็นแบบยึดแน่น ซึ่งค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ที่ได้จากแบบจำลองดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์ดี และค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับการหาค่าโดยการตรวจวัดจากอาคารจริงพอสมควร แต่อย่างไรก็ตามจำนวนตัวอย่างอาคารในงานวิจัยดังกล่าวมีเพียง 3 อาคารเท่านั้น รวมถึงอาคารดังกล่าวเป็นอาคารที่มีความสูงไม่มากนักกล่าวคือมีความสูงประมาณ 10-25 เมตร ดังนั้นค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคารที่ได้ จึงสามารถวิเคราะห์ได้เพียงในลำดับขั้นพื้นฐาน (Fundamental Mode) เท่านั้น

สำหรับงานวิจัยจะเป็นการปรับปรุงแนวทางการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ เพื่อการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยจะทำการศึกษาตัวอย่างอาคาร 4 อาคาร ซึ่งมีความสูงปานกลางถึงสูงมากกล่าวคือ อาคาร A เป็นอาคารพักอาศัย 7 ชั้น มีความสูง 27 ม., อาคาร B เป็นอาคารสำนักงาน 12 ชั้น มีความสูง 53 ม., อาคาร C เป็นอาคารเรียน 21 ชั้น มีความสูง 102 ม. และอาคาร D เป็นอาคารเรียน 6 ชั้น มีความสูง 31 ม. ตามลำดับ รวมถึงพิจารณาส่วนประกอบอื่น ๆ ที่มีผลต่อค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติมในการสร้างแบบจำลอง เช่น การพิจารณาการแบ่งย่อย (mesh) ใน Frame และ Element การพิจารณาถึงผลของการสร้างแบบจำลองของระบบฐานรากชนิดต่าง ๆ และแบบจำลองห้องใต้ดินภายในโครงสร้างอาคารนั้น ๆ ที่มีต่อค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ การพิจารณาผลของส่วนที่ไม่ได้เป็นโครงสร้าง เช่น กำแพงอิฐก่อ และการพิจารณาการสร้างแบบจำลองของกำแพงอิฐก่อในกรณีที่มีช่องเปิด กระฉก และหน้าต่าง เป็นต้น และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการตรวจวัดจากอาคารจริง ทั้งนี้ เพื่อให้การหาค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์จากแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นมีความถูกต้องและสามารถเชื่อถือได้ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ซึ่งพิจารณาถึงสมมติฐาน และรูปแบบต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง เช่นการแบ่งย่อยในชิ้นส่วนของโครงสร้าง แบบจำลองฐานรากแบบยึดหยุ่น เป็นต้น และทำการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ คือ ค่าความถี่ธรรมชาติ และรูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้างอาคารในรูปแบบพื้นฐานที่หาได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ กับคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่ได้จากการตรวจวัดจากสภาพอาคารจริง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. อาคารที่เลือกใช้ในการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้ มี 4 อาคาร คือ อาคาร A เป็นอาคารพักอาศัย 7 ชั้น มีความสูง 27 ม., อาคาร B เป็นอาคารสำนักงาน 12 ชั้น มีความสูง 53 ม., อาคาร C เป็นอาคารเรียน 21 ชั้น มีความสูง 102 ม. และอาคาร D เป็นอาคารเรียน 6 ชั้น มีความสูง 31 ม.(เฉลิมชัย เกียรติเรืองกมล, 2001) ตามลำดับ โดยเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในระบบเสา คาน พื้น

2. ระบบและรูปแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในงานวิจัยคือ

2.1 ระบบโครงสร้างของอาคาร เช่น ผลจากขอบเขตความแข็งแรง (Rigid Zone) เป็นต้น

2.2 ผลกระทบของส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง เช่น กำแพงอิฐก่อ โดยพิจารณาแบบจำลองกำแพงอิฐก่อเป็นแบบ Shell Element

2.3 สำหรับกำแพงอิฐก่อที่มีพื้นที่ของกระจก, หน้าต่าง และประตู ไม่ถึง 50% ของพื้นที่กำแพงนั้น ๆ จะพิจารณากำแพงเป็น Shell Element เต็มพื้นที่ แต่หากมีพื้นที่ของกระจก หน้าต่าง และประตูมากกว่า 50% แล้วนั้นจะพิจารณาว่าไม่มีกำแพงดังกล่าวซึ่งจะไม่พิจารณาน้ำหนักของกำแพงนั้น ๆ ด้วย

2.4 พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดแน่น และ แบบยึดหยุ่น รวมถึงพิจารณาสร้างแบบจำลองห้องใต้ดินในการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ โดยใช้แบบจำลอง

ฐานรากแบบยืดหยุ่นของ Winkler ซึ่งจะพิจารณาเป็นระบบสปริงทดแทนในการวิเคราะห์

2.5 พิจารณาผลกระทบของการแบ่งย่อย Mesh ภายในองค์อาคารชนิดต่าง ๆ ในโครงสร้างอาคาร

2.6 ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม SAP2000 Nonlinear เวอร์ชัน 7.21 ในการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

3. การวิเคราะห์แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้เป็นแบบอิลาสติก วัสดุและส่วนประกอบของโครงสร้างเป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น
4. พื้นถูกสมมุติให้เป็นแบบยึดแน่นในระนาบกับคานและเสา
5. ทำการเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลอง กับผลจากการตรวจวัดอาคารจริงโดยวิธี Ambient Vibration
6. พิจารณารูปแบบการสั่นไหวในขั้นพื้นฐาน (Fundamental Mode) ในรูปแบบตามยาว, ตามขวาง และรูปแบบการบิดตัวของอาคารเท่านั้น

1.4 องค์ประกอบของวิทยานิพนธ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาวิธีการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคาร โดยทำการศึกษาถึงสมมติฐานของระบบและรูปแบบต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง เช่น ระบบที่เป็นโครงสร้างหลัก, ระบบฐานรากแบบต่าง ๆ และระบบที่ไม่ใช่โครงสร้าง เช่น กำแพงก่อกออิฐ เป็นต้น แล้วทำการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่ได้จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ กับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจากสภาพอาคารจริง ในการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ในงานวิจัยนี้ จะทำการเปรียบเทียบค่าคาบของการสั่นไหวในรูปแบบพื้นฐาน และ รูปร่างการสั่นไหว (Mode Shape) โดยพิจารณาจากค่าการเคลื่อนที่ในแนวราบในแต่ละแกน เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้มีข้อจำกัดในการเลือกตัวอย่างอาคารที่ทำการศึกษา และตรวจวัด ซึ่งไม่สามารถที่จะเป็นตัวแทนของอาคารโดยรวมได้ทั้งหมด ดังนั้นผลสรุปของงานวิจัยนี้จะเน้นไปในแนวทาง และวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคาร รวมถึงกระบวนการวิจัยเพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน และเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยต่อไปในภายภาคหน้า โดยที่ในงานวิจัยนี้มีรายละเอียดการนำเสนอต่อไปนี้

บทที่ 1 “บทนำ” เป็นบทที่กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขต การวิจัย และแนวทางของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 “งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง” เป็นบทที่กล่าวถึงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้มีผู้ศึกษาไว้แล้ว ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ คือ

- 1) การตรวจวัดอาคารจริง (Measurement Approach)
- 2) การคำนวณจากสูตรโดยประมาณ (Empirical Approach)
- 3) การวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์บนแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite element Model)

บทที่ 3 “วิธีวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง” เป็นบทที่กล่าวถึงกระบวนการวิจัย ทฤษฎี การประมวลผล หลักการ แนวทางและสมมติฐานที่ใช้ในงานวิจัย

บทที่ 4 “การสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์” เป็นบทที่ศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยเน้นการศึกษาไปที่ผลกระทบของการแบ่งย่อย (Meshing) ของชิ้นส่วน โครงสร้างต่าง ๆ ต่อค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของแบบจำลองนั้น ๆ ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ คือ

- 1) การแบ่งย่อย (Meshing) ใน Frame และ Wall Element
- 2) การแบ่งย่อย (Meshing) ใน Frame และ Slab Element
- 3) การแบ่งย่อย (Meshing) ใน Slab Element เพื่อเป็นตัวแทนของพื้นในรูปแบบต่าง ๆ

บทที่ 5 “การศึกษาแบบจำลองของฐานรากแบบยึดหยุน และ ห้องใต้ดิน” เป็นบทที่ศึกษาถึงวิธีการสร้างแบบจำลองฐานรากแบบยึดหยุน และการสร้างแบบจำลองของห้องใต้ดิน รวมถึงฐานรากที่มีความหนาแน่นมาก

บทที่ 6 “ผลการศึกษา” เป็นบทที่กล่าวถึงผลการวิจัยพร้อมทั้งสรุปผลจากกระบวนการศึกษาในบทที่ 4 และ 5 ซึ่งผลการวิจัยจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ

- 1) ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของตัวอย่างอาคารจริง โดยพิจารณาผลกระทบของการแบ่งย่อย Meshing ใน Frame, Slab Element และ Wall Element รวมถึงการพิจารณาผลกระทบของฐานรากแบบต่าง ๆ และ ห้องใต้ดิน ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวที่ได้จากแบบจำลอง กับค่าคาบการสั่นไหวที่ได้จากการตรวจวัดจริง
- 2) ผลการวิเคราะห์รูปร่างการสั่นไหว (Mode Shape Analysis)

บทที่ 7 “สรุปผลการศึกษา” เป็นบทที่กล่าวสรุปผลการวิจัยทั้งหมดพร้อมทั้งข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนาต่อไป

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

ในปี ค.ศ. 1980 J.G.Bouwkamp, J.P.Kollegger และ R.M.Stephen (Bouwkamp J.G., Kollegger J.P., and Stephen, R.M., 1980) ได้ร่วมกันศึกษาวิธีการตรวจวัดเพื่อหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ โดยใช้วิธี Force และ Ambient Vibration เพื่อวิเคราะห์อาคาร 20 ชั้น ซึ่งโครงสร้างเป็นแบบ Prefabricated Wall และ Slab Element โดยค่าทางพลศาสตร์ เช่น ค่าความถี่ธรรมชาติ ค่าอัตราส่วนความหน่วง และ รูปแบบการสั่นไหวของระบบทั้งในแนวดิ่ง และแนวราบของโครงสร้างนั้นถูกเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม TABS-77 โดยสมมุติฐานที่ใช้คือ ให้พื้นมีพฤติกรรมเป็นแบบยึดแน่น และพิจารณาผลกระทบของรูปแบบของฐานรากชนิดต่าง ๆ ด้วย

ในปี ค.ศ. 2001 T.Leelawanee (Leelawanee., T, 2001) ได้ศึกษาการตรวจวัดคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคารสูงในกรุงเทพมหานคร โดยวิเคราะห์ด้วยวิธี Ambient Vibration Method โดยทำการตรวจวัดอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งหมด 9 อาคารและมีความสูงระหว่าง 100 เมตร ถึง 150 เมตร ซึ่งในแต่ละอาคารนั้นค่าความถี่ธรรมชาติ อัตราส่วนความหน่วงและรูปร่างการสั่นสะเทือนของระบบประมาณ 3-5 รูปแบบแรกให้ค่าที่ถูกต้อง พร้อมทั้งศึกษาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่เก็บบันทึกได้ เพื่อหาแนวโน้มของค่าความถี่ธรรมชาติกับลักษณะรูปร่างอาคาร

2.2 การคำนวณค่าคาบธรรมชาติจากสูตรโดยประมาณ

ในปี ค.ศ.1997 A.K.Chopra, R.K.Goel (Chopra, A.K., and Goel, R.K., 1997) ได้ศึกษาและพัฒนาสูตรที่ใช้ในการประมาณหาคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารแบบ Shear Wall และแบบ Reinforced-concrete & Steel Moment-Resisting Frame Building โดยทำการตรวจวัดอาคารที่มีแรงแผ่นดินไหวมากระทำตั้งแต่ช่วงปี 1971-1994 เพื่อใช้แทนในการหาแรงกระทำทางด้านข้าง ซึ่งผลการศึกษาของ Chopra ทำให้สามารถทำนายพฤติกรรมและหาสมการใช้ในการ

ประมาณค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ต่าง ๆ ได้ โดยสมการที่ได้เหล่านี้มาจากการทดสอบตัวอย่างจำนวนมาก

2.3 การวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์บนแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์

ในปัจจุบันนี้ การประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างอาคารมีความแพร่หลายมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะโปรแกรมการวิเคราะห์โครงสร้างบางโปรแกรมสามารถพิจารณาผลของชิ้นส่วนที่ไม่ได้เป็นโครงสร้าง (Non structural member) ในอาคารได้อีกด้วย แต่ในการออกแบบอาคารจริงวิศวกรผู้ออกแบบส่วนใหญ่ก็ยังไม่พิจารณาผลของชิ้นส่วนที่ไม่ได้เป็นโครงสร้างในการสร้างแบบจำลองอาคาร ทั้งนี้เนื่องจากการพิจารณาดังกล่าวจะมีความสลับซับซ้อนมากยิ่งขึ้น รวมถึงยังมีความเข้าใจว่าการไม่พิจารณาผลของชิ้นส่วนที่ไม่ได้เป็นโครงสร้างนั้นจะทำให้โครงสร้างอาคารมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

2.3.1 แบบจำลองกำแพงอิฐก่อ (Masonry Infill Wall Model)

ในปี ค.ศ. 1974 Mainstone R.J. (R.J., Mainstone, 1974) และ ค.ศ. 1969 Smith S.B. และ Carter C. (S.B., Smith, and, C., Carter, 1969) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองของกำแพงอิฐก่อ โดยสร้างแบบจำลองเป็นแบบ Equivalent Strut และพิจารณาพฤติกรรมขององค์อาคารรวมเป็นแบบพฤติกรรมร่วม (Composite Action) ระหว่างองค์อาคารกับกำแพงอิฐก่อ ซึ่งในการศึกษาวิจัย พบว่าแบบจำลองแบบ Equivalent Strut นั้น จะถูกพิจารณาเป็นค้ำยันเดี่ยวในแนวเฉียง (Single Diagonal Strut) โดยไม่ได้พิจารณาช่องเปิดในกำแพงอิฐก่อ นั้น ๆ

ในปี ค.ศ. 1981 Meyyapa (Meyyapa, 1981) และในปี ค.ศ. 1988 Torkamani (Torkamani, 1988) ได้ทำการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารด้วยวิธี Ambient Vibration ในระหว่างการก่อสร้าง พบว่าการเพิ่มส่วนประกอบของอาคารที่ไม่ใช่ส่วนของโครงสร้าง เช่น ผนังกำแพงอิฐก่อ (Masonry Infill Wall) มีผลต่อการเพิ่มความถี่ธรรมชาติของอาคารอย่างชัดเจน และในการศึกษาดังกล่าวได้สรุปเพิ่มเติมว่า การสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของโครงสร้างอาคารโดยให้มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงมากที่สุด ควรจะพิจารณาผลของชิ้นส่วนที่ไม่ได้เป็นโครงสร้าง ในแบบจำลองด้วย

ในปี ค.ศ. 1985 V.Thiruvengadam (Thiruvengadam, V., 1985) ได้ศึกษาวิธีการสร้างแบบจำลองของกำแพงเพื่อใช้ในการประเมินค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารซึ่งได้สรุปแบบจำลองไว้ 3 แบบ คือ 1) Equivalent multiple strut model 2) Shear – Flexure Cantilever model 3) Equivalent Plane Frame model โดยคิดผลของการแยกกันระหว่างกำแพงและเสา และได้ทำการศึกษาวิจัยผลของช่องเปิดในกำแพงก่ออิฐในแบบจำลอง Multiple Strut Model เพิ่มเติมด้วย

ผลที่ได้จากแบบจำลองของกำแพงก่ออิฐแบบ Multiple Strut Model นั้น มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองจริง มากกว่าแบบจำลองแบบ Single Strut Model โดยการสร้างแบบจำลองแบบ Multiple Strut Model นั้น ได้พิจารณาแรงที่เกิดขึ้นระหว่างโครงสร้างอาคารกับกำแพงก่ออิฐก่อ ภายใต้การเสียรูปขององค์อาคาร โดยพิจารณาจากความยาวสัมผัสขององค์อาคารกับกำแพงก่ออิฐนั้น ถ้าในขณะที่ยังคงรับแรงและเกิดการเสียรูป ความยาวสัมผัสมีค่าเท่ากับความยาวประสิทธิภาพ ก็จะไม่เกิดการแตกร้าวในกำแพงก่ออิฐ หากความยาวสัมผัสมากกว่าความยาวประสิทธิภาพนั้นจะทำให้เกิดการแตกร้าวได้. แต่อย่างไรก็ตามการพิจารณาการสั่นไหวของอาคารในระดับเบาบางนั้นสามารถสมมุติให้กำแพงก่ออิฐในอาคารเป็นแบบที่ไม่เกิดการแตกร้าว (ความยาวสัมผัสเท่ากับความยาวประสิทธิภาพ)

ในปี ค.ศ. 1999 A.A.Chaker, A.Charifati (Chaker, A.A., Cherifati, A., 1999) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของกำแพงก่ออิฐต่อการสั่นไหว และได้ศึกษาถึงสถิติพหุของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยได้สร้างแบบจำลองและพิจารณาผลของการสร้างแบบจำลองกำแพงในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง และจากการศึกษาพบว่าการสร้างแบบจำลองแบบ Plane stress จะให้ค่าความถี่พื้นฐานใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงมากกว่าการสร้างแบบจำลองกำแพงแบบ Equivalent Strut และ Multiple Strut Model

2.3.2 แบบจำลองฐานราก (Foundation Model)

ในอดีตที่ผ่านมา วิธีการวิเคราะห์การตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงแผ่นดินไหว โดยส่วนใหญ่แล้วจะไม่พิจารณาผลการตอบสนองของโครงสร้างชั้นดิน แต่ในความเป็นจริงแล้ว การตอบสนองของดินภายใต้แรงทางพลศาสตร์จะต้องมีการคำนึงถึงด้วย จึงมีการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองของฐานรากแบบยึดหยุ่นขึ้น

ในปัจจุบันนี้ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างได้ถูกพัฒนาขึ้นมากและได้ถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งเป็นผลให้การสร้างสมมติฐานเกี่ยวกับระบบฐานรากมีการพัฒนาขึ้นมาก โดย Winkler ได้นำหลักการของคานภายใต้ระบบสปริง (Discreted Spring System) มาสร้างแบบจำลองของเสาเข็มภายใต้แรงกระทำด้านข้าง แบบจำลองฐานรากดังกล่าวได้พิจารณาบนพื้นฐานที่ว่า ในแต่ละชั้นของดินสามารถรับแรงกระทำได้อย่างอิสระ ถึงแม้ว่าแบบจำลองดังกล่าวจะไม่ได้พิจารณาผลของแรงเฉือน ที่เกิดขึ้นจากการถ่ายแรงในแต่ละชั้น ดินก็ตามแต่แบบจำลองนี้ก็ยิ่งให้ผลที่ถูกต้อง สำหรับการวิเคราะห์เสาเข็มภายใต้แรงกระทำด้านข้างแบบพลศาสตร์

ในปี ค.ศ. 2001 S.Kiattivisanhai (Kiattivisanhai, S., 2001) ได้ตรวจวัดเสาเข็มจริงในด้านความแข็งแรงในแนวตั้งและแนวราบ โดยทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการตรวจวัด กับแบบจำลองของ Winkler เขาได้สรุปว่า แบบจำลองของ Winkler สามารถให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับพฤติกรรมของเสาเข็มที่ได้จากการทดลองจริง และสามารถนำแบบจำลองดังกล่าวไปใช้ในการสร้างแบบจำลองของฐานรากในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางพลศาสตร์โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ได้ และในงานวิจัยนี้จะนำผลของการศึกษาแบบจำลองฐานรากมาใช้ด้วย

2.3.3 แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในปี ค.ศ.2000 David MURIA-VILA, Luis FUENTES OLIVAIES & Ricardo GONZALEZ ALCORTA (Luis, David MURIA-VILA. FUENTES OLIVAIES & Ricardo GONZALEZ ALCORTA, 2001) ได้ศึกษาอิทธิพลต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการตอบสนองของอาคารแล้วทำการเปรียบเทียบผลจากวิธีการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์กับวิธีการตรวจวัดอาคารโดยพิจารณาผลกระทบของกำแพงก่ออิฐ พฤติกรรมดิน และ Rigid Zone

ในปี ค.ศ. 2001 เฉลิมชัย เกียรติเรืองกมล (เฉลิมชัย เกียรติเรืองกมล, 2001) ได้ทำการศึกษาการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อศึกษาหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร และทำการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ กับค่าที่ได้จากการตรวจวัด การศึกษาพบว่าตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์นั้น ได้แก่ผนังกำแพง คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของวัสดุ และสมมติฐานต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์

ในงานวิจัยของเฉลิมชัย เกียรติเรืองภมลา ได้สรุปผลการวิจัยได้ว่าการพิจารณากำแพงอิฐก่อเป็นแบบ Plane Stress จะให้ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคารใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดอาคารจริงมากที่สุด รวมถึงได้แนะนำรูปแบบ และวิธีการสร้างแบบจำลองที่เหมาะสมในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อหาค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ที่ถูกต้อง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำผลการศึกษาในงานวิจัยของ เฉลิมชัย เกียรติเรืองภมลามาใช้

บทที่ 3

วิธีวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ถูกนำมาใช้ในขั้นตอนการออกแบบโครงสร้างเนื่องมาจากว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถแสดงผลของพฤติกรรมของอาคารได้ เช่น การเสียรูป หน่วยแรงและหน่วยการยึดตัวที่เกิดขึ้นในองค์อาคาร รวมถึง ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารได้อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ต่าง ๆ ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์นั้น ยังขึ้นอยู่กับการตั้งสมมุติฐานในการคำนวณของวิศวกรผู้ออกแบบในแต่ละท่าน ซึ่งในบางครั้งการกำหนดสมมุติฐานในการคำนวณออกแบบยังมีความไม่เหมาะสม เช่น การสมมุติว่าชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้างในองค์อาคารไม่มีผลต่อการตอบสนองของอาคารทางด้านพลศาสตร์ หรือการกำหนดรูปแบบของฐานรากในการวิเคราะห์ให้เป็นแบบยึดแน่น ย่อมให้ผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้องตามจริงเช่นกัน

ในการสร้างแบบไฟไนต์อีลิเมนต์ สามารถสร้างขึ้นได้จากค่าคุณสมบัติของหน้าตัดของชิ้นส่วนของอาคาร เสา คาน พื้น จากแบบก่อสร้างซึ่งจากแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นนี้จะสามารถคำนวณหาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารได้ สมมุติฐานที่ถูกต้องและเหมาะสมนั้น จะถูกนำมาศึกษาและใช้ในการสร้างแบบจำลองต่อไป โดยแบบจำลองขององค์อาคารที่จะนำมาใช้ จะพิจารณาเป็น 2 ระบบ คือ 1) การพิจารณาระบบโครงสร้าง (Structural System) และ 2) การพิจารณาระบบที่ไม่ใช่โครงสร้าง (Non structural System) โดยในระบบโครงสร้างนั้นจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 1) การพิจารณากำลังขององค์อาคารเริ่มต้น 2) การพิจารณาส่วนขอบเขตความแข็งแรง (Rigid Zone) 3) การสร้างแบบจำลองโครงอาคารทั่วไป (General Frame Model) และ 4) การสร้างแบบจำลองฐานรากแบบยืดหยุ่น (Flexible Foundation) และ ในระบบที่ไม่ใช่โครงสร้างนั้นจะพิจารณารูปแบบการสร้างแบบจำลองกำแพงก่ออิฐ (Masonry Infilled wall) โดยในงานวิจัยนี้จะการศึกษาถึงรายละเอียดของแบบจำลองในแต่ละแบบ ที่จะมีผลต่อความถูกต้องของค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคาร เมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดอาคารจริงโดยวิธี Force และ Ambient Vibration

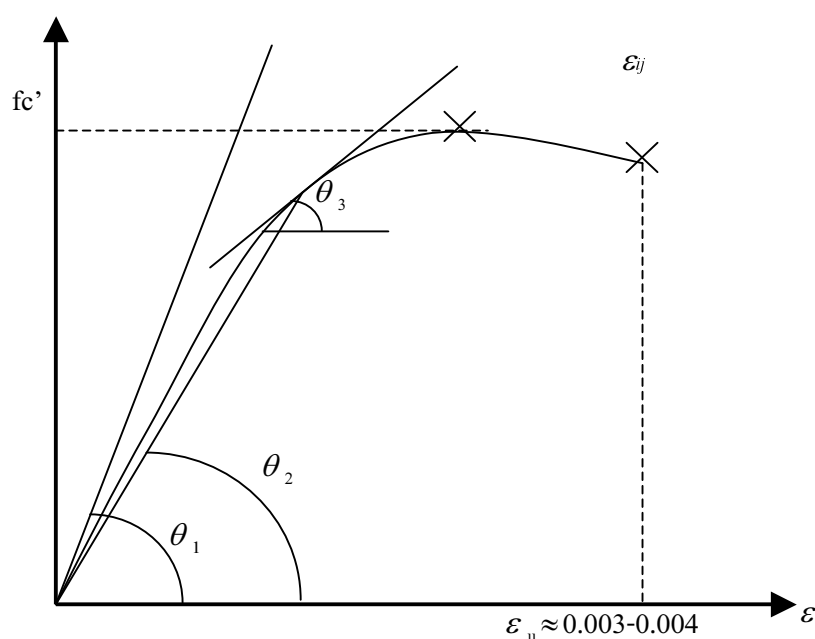
3.1 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของระบบโครงสร้าง

ระบบโครงสร้างโดยทั่วไปนั้น มีส่วนประกอบต่าง ๆ เช่น เสา คาน พื้น และฐานราก โดยในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ จะต้องมีการพิจารณาถึงคุณสมบัติและสมมุติฐานที่จำเป็นในองค์อาคารแต่ละประเภท พฤติกรรมที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อขององค์อาคาร รวมถึงกำลังขององค์อาคารที่จะนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง

3.1.1 กำลังขององค์อาคารเริ่มต้น

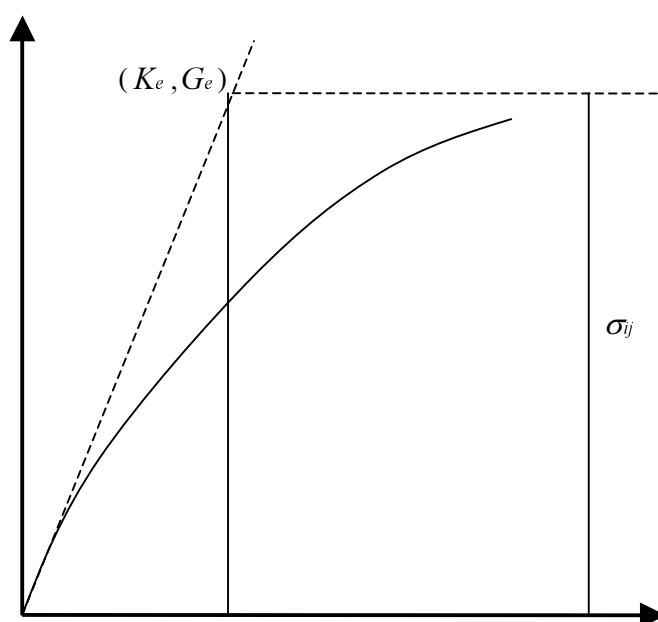
กำลังรับแรงอัดของคอนกรีต โดยทั่วไป จะได้จากการทดสอบแท่งคอนกรีตรูปทรงกระบอก แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ของ Stress – Strain โดยทั่วไปแล้วจะไม่เป็นเส้นตรง จึงต้องมีการประมาณค่าโมดูลัสของคอนกรีต (E_c) โดยคิดจากเส้นสัมผัสกราฟ ในวิธีการประมาณหาค่าโมดูลัสของคอนกรีตนั้นจะแบ่งออกเป็น 3 วิธี คือ

1. $\tan \theta_1$ = Initial Modulus คิดความชันของเส้นสัมผัสที่จุดเริ่มต้น
2. $\tan \theta_2$ = Secant Modulus คิดความชันของเส้นที่ลากจากจุดเริ่มต้นถึงจุดที่กำหนด
3. $\tan \theta_3$ = Tangent Modulus คิดความชันของเส้นสัมผัสที่จุดกำหนด



รูปที่ 3.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Stress – Strain ของคอนกรีต

เนื่องจากค่าโมดูลัสที่ใช้ในการออกแบบโดยทั่วไปเป็นค่าโมดูลัสที่เรียกว่า Secant Modulus ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงของคอนกรีตที่เกิดการแตกร้าวแล้ว แต่ในงานวิจัยนี้เป็นการพิจารณาในช่วงที่คอนกรีตยังไม่เกิดการแตกร้าว หรือ แตกร้าวน้อยมาก ดังนั้นการใช้ค่า Secant Modulus จึงอาจไม่เหมาะสม ดังนั้นเพื่อให้ได้กำลังของคอนกรีตใกล้เคียงกับสภาพจริงที่สุด จึงพิจารณาเลือกค่า Initial Modulus แทน โดยสามารถคำนวณหาค่า Initial Modulus จากกฎของ ฮุก (Hook's Law) ดังนี้



รูปที่ 3.2 การคำนวณหาค่า Initial Modulus

$$\varepsilon_{ij} = -\frac{\nu_e}{E_e} \sigma_{kk} \sigma_{ij} + \frac{(1+\nu_e)}{E_e} \sigma_{ij} \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

$$\text{หรือ} \quad \varepsilon_{ij} = -\frac{(3K_e - 2G_e)}{18K_e G_e} \sigma \sigma_{ij} + \frac{1}{2G_e} \sigma_{ij} \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

$$\text{โดยที่} \quad E_e = \text{Initial Modulus}$$

$$\nu_e = \text{Poisson's ratio}$$

$$\text{ซึ่ง} \quad K_e = 11000 + 3.2 f_c^2 \quad \text{สมการที่ 3.3}$$

$$G_e = 9224 + 136 f_c + 3296 \times 10^{-15} f_c^{8.27} \quad \text{สมการที่ 3.4}$$

$$\text{โดยที่} \quad K_e \text{ และ } G_e \text{ คือ ค่า Elastic Moduli}$$

โดยความสัมพันธ์ระหว่าง E , K และ G สามารถเขียนได้ตามสมการที่ 3.5

$$E = \frac{9KG}{3K + G} \quad \text{สมการที่ 3.5}$$

ในการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์อาคารในช่วงขีดจำกัดยืดหยุ่น ATC-40 ได้กำหนดให้ใช้ค่าความแข็งแรงเริ่มต้นขององค์อาคาร โดยได้พิจารณาถึงการลดทอนกำลังขององค์อาคารเนื่องจากการแตกร้าวเบื้องต้นตามสภาพของแรงกระทำ ดังแสดงตามตารางที่ 3.1 แต่ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางพลศาสตร์โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์นั้น จะไม่ได้พิจารณาการลดทอนค่าความแข็งแรงขององค์อาคาร ทั้งนี้เนื่องจากโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์จะกำหนดให้ใส่ขนาดหน้าตัดขององค์อาคารโดยที่โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าหน้าตัด และโมเมนต์ความเฉื่อยโดยอัตโนมัติไม่สามารถกำหนดค่าดังกล่าวได้เอง

ตารางที่ 3.1 ค่าความแข็งแรงเริ่มต้นขององค์อาคาร (Component Initial Stiffness, ATC-40)

Component	Flexural Rigidity	Shear Rigidity ²	Axial Rigidity
Beam,non-prestressed ¹	$0.5E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$
Beam,prestressed ¹	$E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$
Column in compression	$0.7E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$
Column in tension	$0.5E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$
Wall,uncracked	$0.8E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$
Wall,cracked	$0.5E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$
Flat Slab,non-prestressed	-	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$
Flat Slab,prestressed	-	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$

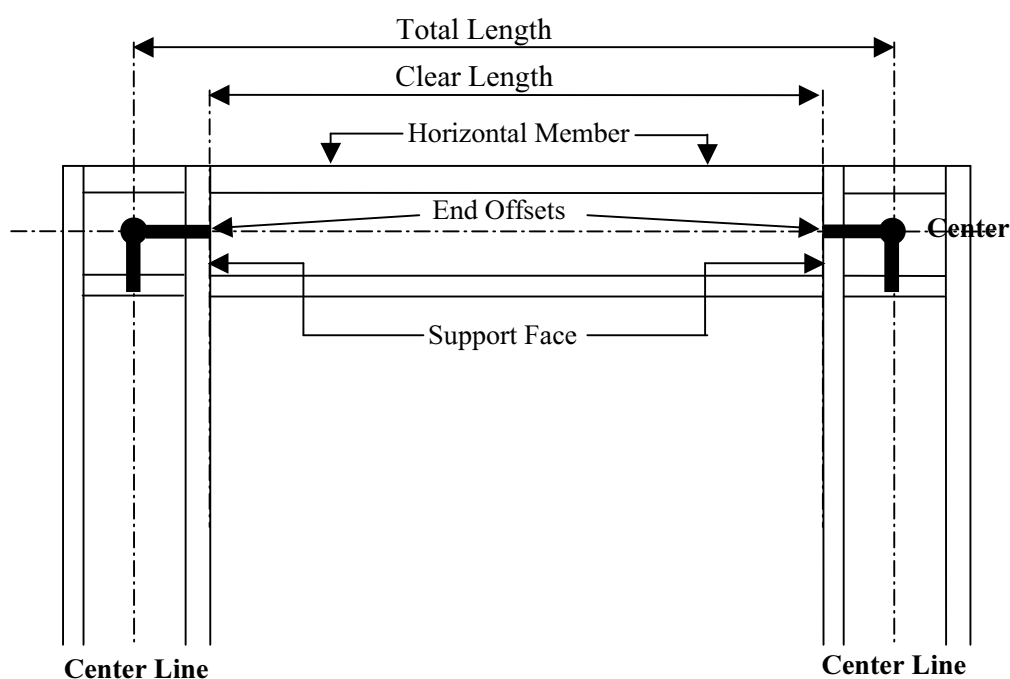
1 I_g for T-Beam may be taken twice the I_g of the web alone , or may be used on the effective section

2 For shear stiffness , the quantity $0.4 E_c$ has been used to represent the shear modulus , G

โดยที่	E_c	คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
	E_s	คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม
	I_g	คือ โมเมนต์ความเฉื่อย
	A_g	คือ พื้นที่หน้าตัดทั้งหมด
	A_s	คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม
	A_w	คือ พื้นที่หน้าตัดของเอว

3.1.2 ขอบเขตความแข็ง (Rigid Zone)

ในการสร้างแบบจำลองของส่วนประกอบของโครงสร้าง จะพิจารณาเป็นเส้นตรงต่อเชื่อมกันตามรอยต่อของเสา และ คาน แต่ในสภาพความเป็นจริงแล้วส่วนประกอบของโครงสร้างจะมีการเหลื่อมทับกันของขนาดหน้าตัด ซึ่งบริเวณขอบเขตความแข็งนี้จะถูกสมมุติให้ไม่เกิดการเสียรูปเนื่องจากแรงดัดและแรงเฉือน และบริเวณขอบเขตความแข็งจะไม่ส่งผลกระทบต่อการเสียรูปเนื่องจากแรงตามแนวแกน และแรงบิดด้วย ตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 บริเวณขอบเขตความแข็ง

ในโปรแกรม SAP2000 นั้น ได้กำหนดค่าเริ่มต้นของความแข็งไว้ที่ศูนย์ โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับหนึ่งซึ่งเป็นค่าที่มีความแข็งสูงสุด สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่าเริ่มต้นของความแข็งในโปรแกรมมีค่าเป็นหนึ่ง ตามงานวิจัยของเฉลิมชัย เกียรติเรืองกมล

3.1.3 แบบจำลองโครงอาคาร (General Frame Model)

รูปแบบพื้นฐานของแบบจำลอง Finite Element คือ การสร้างแบบจำลองโครงอาคาร ซึ่งโดยทั่วไปจะถูกสร้างขึ้นก่อนการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้าง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเพิ่มเติมสมมติฐานของคุณสมบัติของวัสดุขององค์อาคารต่าง ๆ เช่น โชนการยึดแน่นของคาน กับกำแพงรับแรงเฉือน คุณสมบัติของโครงสร้างพื้น รวมถึงพิจารณาการแบ่งย่อยในชิ้นส่วนของโครงสร้างในแบบจำลอง ภายใต้การรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน

3.1.4 แบบจำลองฐานรากแบบยืดหยุ่น (Flexible Foundation)

ผลกระทบของรูปแบบของฐานรากต่อค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนติคัลเม้นต์นั้น ได้นำมาพิจารณาในการศึกษาเพิ่มเติมในงานวิจัยนี้ด้วย ทั้งนี้เนื่องจากอาคารที่นำมาสร้างแบบจำลองนั้น เป็นอาคารที่ถูกก่อสร้างขึ้นในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครซึ่งดินชั้นบนสุดนั้นมีสภาพเป็นชั้นดินอ่อน ดังนั้นเพื่อให้แบบจำลองไฟไนติคัลเม้นต์ของอาคารมีความถูกต้องยิ่งขึ้น จึงต้องทำการสร้างแบบจำลองฐานรากแบบยืดหยุ่นในแบบจำลองไฟไนติคัลเม้นต์ของอาคารนั้น โดยใช้แบบจำลองฐานรากของ Winkler ในงานวิจัยนี้

ค่าสตีฟเนสในแนวตั้งของเสาเข็มเดี่ยวอิสระ (K_p) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 ในเทอมของค่า young 's modulus ของคอนกรีตสำหรับเสาเข็ม (E_p) ความยาวของเสาเข็ม (L_p) พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็ม (A_p) และสัมประสิทธิ์ β

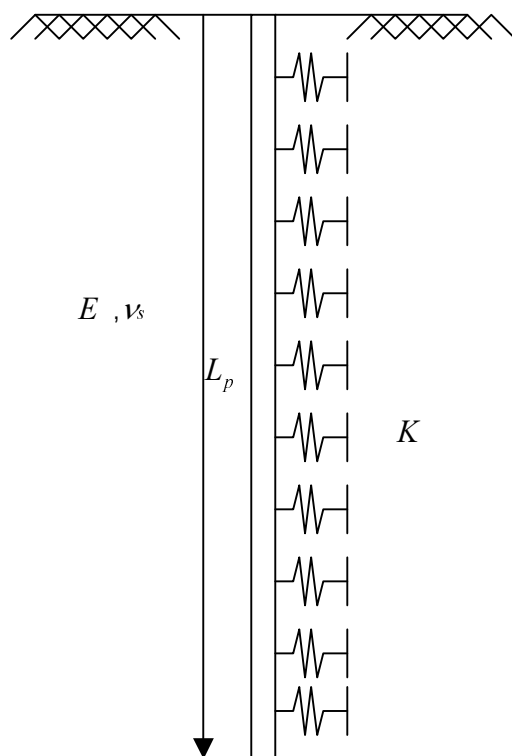
$$K_p = \frac{\beta E_p A_p}{L_p} \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

ซึ่งค่าต่าง ๆ ในทางขวามือของสมการที่ 3.1 สามารถหาได้จากข้อมูลการทดสอบเสาเข็มจากวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม SAP 2000 นั้น องค์อาคารในแนวตั้งจะถูกจำลองเป็นแบบชิ้นส่วนสปริงอิสระรับแรงอัดในแนวตั้ง ซึ่งมีค่าสตีฟเนสเท่ากับ K_p สำหรับการหาค่าสตีฟเนสรวมในแนวราบของเสาเข็ม จะสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองชุดของชิ้นส่วนสปริงอิสระในแนวราบตลอดความยาวของเสาเข็ม ซึ่งเรียกว่า แบบจำลอง

แรงปฏิกิริยาของชั้นดินดังแสดงในรูปที่ 3.4 ค่าสติฟเนสของสปริงอิสระในแนวราบ (K_h) สามารถคำนวณได้จากสูตรโดยประมาณตามสมการที่ 3.2 โดยที่ในสภาพดินเหนียว (Cohesive Soil) ค่าสติฟเนสของสปริงอิสระในแนวราบจะมีค่าคงที่ตลอดความยาวเสาเข็ม และในสภาพดินทราย (Cohesionless Soil) ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 3.2 จะเห็นว่า ได้รวมผลของคุณสมบัติของดิน E และ ν_s ด้วยแล้ว

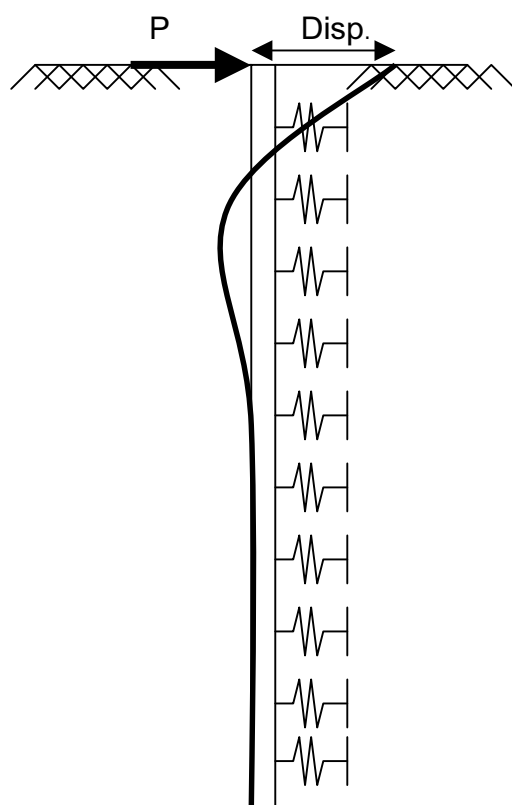
$$K_h = \frac{1.3}{D} \sqrt[12]{\frac{E_s D^4}{E_p I_p}} \frac{E_s}{1 - \nu_s^2} \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

โดยที่ D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของเสาเข็ม
 $E_p I_p$ คือ ค่าสติฟเนสของเสาเข็ม
 E คือ ค่า young 's modulus ของดิน
 ν_s คือ ค่า Poisson 's ratio ของดิน

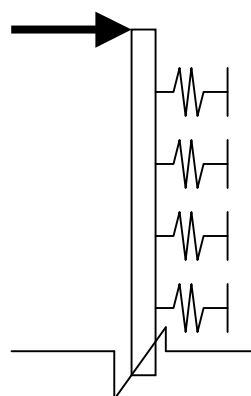


รูปที่ 3.4 แบบจำลองแรงปฏิกิริยาของชั้นดิน

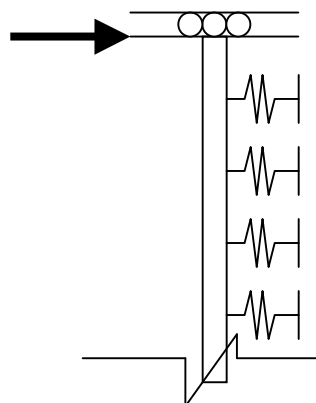
จากแบบจำลองแรงปฏิกิริยาของชั้นดิน สามารถคำนวณหาค่าสติฟเนสรวมของสปริงในแนวราบของเสาเข็มต้นนั้น ๆ ที่ตำแหน่งหัวเสาเข็มหรือฐานรากได้ โดยทำการเพิ่มแรงกระทำที่ตำแหน่งหัวเสาเข็มต้นนั้น แล้วนำค่าการเสียรูปในแนวราบของหัวเสาเข็มนั้นมาคำนวณหาค่าสติฟเนสรวมในแนวราบของเสาเข็มต้นดังกล่าว ดังรูปที่ 3.5 โดยค่าสติฟเนสรวมในแนวราบที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม $K = \frac{P}{Displacement}$ ดังรูปที่ 3.5 ทั้งนี้ในการสร้างแบบจำลองฐานรากแบบยึดหยุ่นนั้นจะพิจารณาหัวเสาเข็มเป็น 2 กรณี คือ หัวเสาเข็มแบบอิสระ และหัวเสาเข็มต้านทานการหมุน ดังรูปที่ 3.6 ซึ่งเมื่อพิจารณารวมกับค่าสติฟเนสรวมของสปริงในแนวตั้งของเสาเข็มที่ตำแหน่งฐานราก ก็จะสามารถสร้างแบบจำลองฐานรากแบบยึดหยุ่นที่ตำแหน่งฐานรากได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.5 การหาค่าสติฟเนสรวมในแนวราบของเสาเข็มที่ตำแหน่งฐานราก

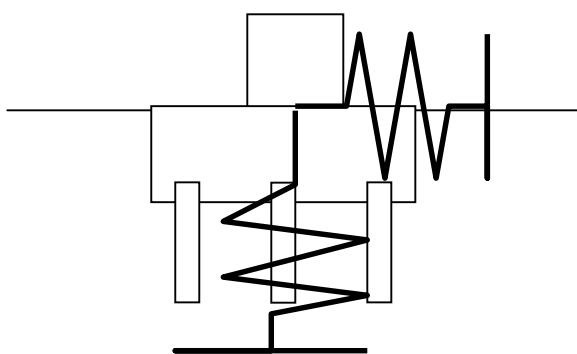


(ก.)



(ข.)

รูปที่ 3.6 การพิจารณารูปแบบหัวเสาเข็ม (ก.)แบบอิสระ (ข.)แบบต้านทานการหมุน



รูปที่ 3.7 การรวมรูปแบบของสปริงในแนวตั้ง และแนวราบของเสาเข็มที่ตำแหน่งฐานราก

3.2 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของระบบที่ไม่ใช่โครงสร้าง

ในการสร้างแบบจำลองของโครงอาคารเพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมจริงของอาคาร จะต้องพิจารณาถึงส่วนประกอบที่ไม่ใช่โครงสร้างด้วย เช่น กำแพงก่ออิฐ บันได เป็นต้น ซึ่งในส่วนประกอบที่ไม่ใช่โครงสร้างดังกล่าวนี้ จะมีผลต่อคุณสมบัติทางพลศาสตร์ในการสร้างแบบจำลองด้วย

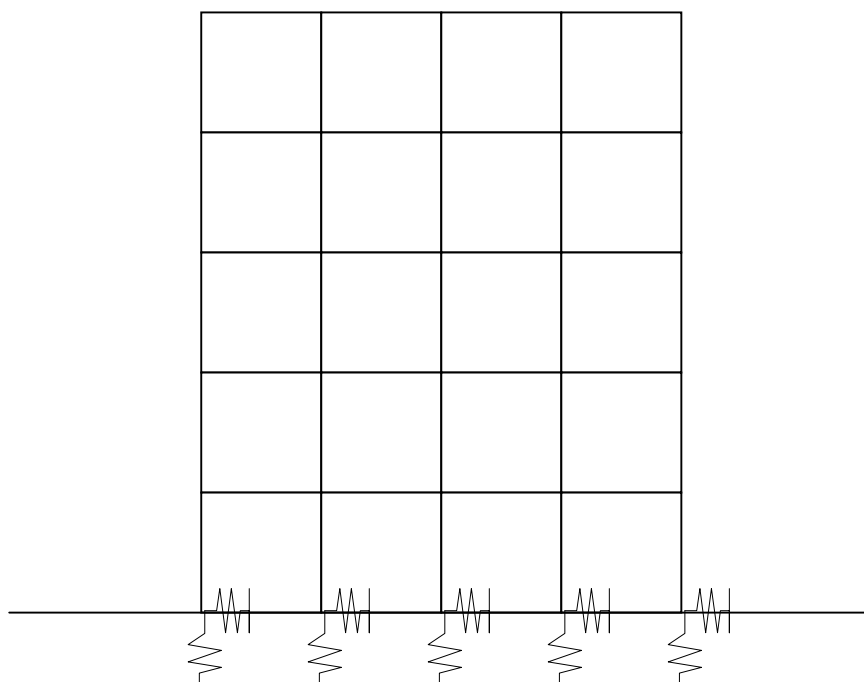
3.2.1 แบบจำลองของกำแพงอิฐก่อ (Masonry Infilled Wall)

การพิจารณาผลของกำแพงอิฐก่อต่อคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร ได้ถูกทำการศึกษาทั้งในการวิเคราะห์โดยแบบจำลอง และในการทดลองจริงด้วย แม้ว่าจะมีการศึกษาถึงผลกระทบของชิ้นส่วนที่ไม่ได้เป็นโครงสร้าง (Non structural member) ต่อพฤติกรรมของอาคารในแบบจำลองมาแล้วนั้น การศึกษาวิจัยที่ผ่านมาก็ไม่ได้แสดงถึงผลกระทบที่ชัดเจนนัก โดยที่นักวิจัยบางคนสามารถวัดค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารในระหว่างการก่อสร้าง และเขาพบว่าหลังจากที่ได้ทำการก่ออิฐแล้วค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารจะเพิ่มขึ้นประมาณ 10 – 15 %

ในปี ค.ศ. 1999 Chaker (Chaker,1999) ได้ทำการศึกษาค่าความถี่ธรรมชาติของโครงอาคารที่ปราศจากการก่ออิฐซึ่งจะมีค่าน้อยลงประมาณ 2 เท่า ของค่าความถี่ธรรมชาติของโครงอาคารเดียวกันที่มีการก่ออิฐแล้ว ผลการวิจัยของเขามีความแตกต่างจากผลการวิจัยของ Thiruvengadam (Thiruvengadam,1985) ในปี ค.ศ. 1985 ซึ่งสร้างแบบจำลองของกำแพงก่ออิฐเป็นแบบ Multiple Strut Model

แต่ในการศึกษาวิจัยนี้ ได้พิจารณาศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์นั้นจะพิจารณารูปแบบกำแพงก่ออิฐเป็นแบบ Plane Stress ในโปรแกรม SAP 2000 ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องกว่าตามงานวิจัยของ เฉลิมชัย เกียรติเรืองกมล

จากการสร้างแบบจำลองของส่วนองค์อาคาร เช่น เสา คาน พื้น รวมถึงการสร้างแบบจำลองของฐานรากแบบยึดหยุน และการพิจารณาสร้างแบบจำลองกำแพงก่ออิฐแบบ Plane Stress ก็จะสามารถสร้างแบบจำลองของโครงสร้างอาคารทั้งหมด เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แบบจำลองของอาคารทั้งหมด

3.3 การประเมินความสอดคล้องของรูปแบบการสั่นไหว (Modal Assurance Criterion, MAC)

ในการพิจารณาความถูกต้องของรูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้าง สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบระหว่างรูปแบบการสั่นไหวของโครงสร้างจริงหรือตามทฤษฎีกับรูปแบบการสั่นไหวที่ได้จากการทดสอบ ดังสมการที่ 3.9 ค่าที่ได้อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยที่ถ้าค่า MAC เข้าใกล้ 0 แสดงว่ามีความผิดพลาดมาก และถ้าค่า MAC เข้าใกล้ 1 แสดงว่ามีความถูกต้อง

$$MAC \equiv \frac{[\{\psi_X\}^T \{\psi_A\}]^2}{(\{\psi_X\}^T \{\psi_X\})(\{\psi_A\}^T \{\psi_A\})} \quad \text{สมการที่ 3.9}$$

โดยที่ $\{\psi_X\}$ คือ รูปแบบการสั่นไหวที่ได้จากการตรวจวัดจริง
 $\{\psi_A\}$ คือ รูปแบบการสั่นไหวที่ได้จากทฤษฎี หรือจากการวิเคราะห์

3.4 สมมติฐานที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของอาคารที่ทำการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของอาคารจริงต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรม SAP2000 Nonlinear เวอร์ชัน 7.21 เพื่อศึกษาหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ และรูปแบบการสั่นไหวของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 4 อาคาร ซึ่งมีความสูงของอาคารคือ 27.6, 30.65, 53 และ 102 เมตร และมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอิลาสติก โดยตัวแปรที่สำคัญสำหรับการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์นั้น ได้แก่ คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของวัสดุ น้ำหนักบรรทุกทุกจรต่าง ๆ ที่กระทำกับโครงสร้าง ความแข็งแรงบริเวณรอยต่อคานกับเสาและผนังกำแพงในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งตัวแปรต่าง ๆ นี้จะส่งผลต่อความแข็งแรงและค่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ในงานวิจัยนี้ จึงต้องคำนึงถึงตัวแปรต่าง ๆ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นให้ถูกต้องและเหมาะสมที่สุด

3.4.1 คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของวัสดุ (Material properties)

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ค่าคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของวัสดุที่ได้รับการปรับแก้ โดยงานวิจัยของเฉลิมชัย เกียรติเรืองกมลลา ดังนี้

1) คอนกรีตที่ใช้ในส่วนประกอบของโครงสร้าง

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแท่งทรงกระบอกที่ 28 วัน	=	23.5	MPa
โมดูลัสยืดหยุ่น	=	2.94×10^4	MPa
น้ำหนัก (Unit Weight)	=	23.5	KN/m
มวล (Mass)	=	2400	kg/m ²

2) กำแพงอิฐก่อ

กำลังรับแรงอัด	=	4	MPa
โมดูลัสยืดหยุ่น	=	3000	MPa
น้ำหนัก (Unit Weight)	=	1.77	kN/m

3.4.2 น้ำหนักบรรทุกที่กระทำกับโครงสร้าง (Lived load)

จาก ATC-40 ได้แนะนำน้ำหนักบรรทุกไว้ตามลักษณะการใช้สอยต่าง ๆ โดยน้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) สามารถหาได้จากน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง ส่วนน้ำหนักบรรทุกนั้น ATC-40 ได้แนะนำไว้ในตารางที่ 3.2 ซึ่งมีค่าต่างจากน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการออกแบบ (UBC 1997 และ วสท 1997) อยู่มาก เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกที่ได้จาก ATC-40 เป็นน้ำหนักบรรทุกที่มาจากสถิติของน้ำหนักบรรทุกที่เกิดขึ้นขณะเกิดแรงแผ่นดินไหว ดังนั้นน้ำหนักบรรทุกที่ได้จาก ATC-40 จึงมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการออกแบบ

ตารางที่ 3.2 น้ำหนักบรรทุกตามลักษณะพื้นที่ใช้สอย

พื้นที่ใช้สอย	น้ำหนักบรรทุก ใช้งาน ATC-40	น้ำหนักบรรทุก ออกแบบ UBC1997	น้ำหนักบรรทุก ออกแบบ EIT1997
	(kg/m ²)	(kg/m ²)	(kg/m ²)
พื้นที่ในสำนักงานทั่วไป	70	245	250
ห้องโถง	50	245	300
ห้องประชุม	60	245	400
พื้นที่เก็บเอกสาร	220	490	500
พื้นที่เก็บสินค้า	150	490	500
ห้องสมุด	175	295	400
อื่น ๆ	90	195	200

3.4.3 สมมุติฐานต่าง ๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง (Modeling Assumptions)

ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของอาคารต่างๆ โดยใช้โปรแกรม SAP2000 นั้น สมมุติฐานต่าง ๆ ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์มีดังนี้

- 1) พื้นถูกสมมติให้ยึดแน่นในระนาบ นั่นคือ พื้นถูกสมมติให้แข็งแกร่งในระนาบแต่อ่อนตัวได้เมื่อรับแรงดัด
- 2) เหล็กเสริมในคอนกรีตทั้งคานและเสาไม่นำมาพิจารณา เนื่องจากโครงสร้างอาคารอยู่ในช่วงอิลาสติก ดังนั้นเหล็กเสริมในคอนกรีตจึงไม่แสดงพฤติกรรมในการรับแรง
- 3) ในการสร้างแบบจำลองของผนังกำแพง พิจารณาเพียงเฉพาะ ผนังกำแพงที่เต็มแผ่นเท่านั้น และส่วนประกอบที่ไม่ใช่โครงสร้างอื่น ๆ ไม่ถูกนำมาพิจารณา

3.4.4 การสร้างส่วนประกอบต่าง ๆ ในโครงสร้าง (Modeling of Building Components)

ในงานวิจัยนี้ ส่วนประกอบของโครงสร้างที่ถูกสร้างขึ้นในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์นั้นสามารถแยกออกได้เป็น 5 ชนิด คือ คาน เสา พื้น กำแพงและฐานราก ซึ่งส่วนประกอบต่าง ๆ ที่กล่าวนี้ได้ถูกสร้างตามวิธีการ และหลักการ โดยมีรายละเอียดของแต่ละส่วนประกอบ ดังนี้

1) คาน (Beams)

ส่วนประกอบของคานถูกสร้างเป็นเส้นตรง โดยมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอิลาสติกตลอดความยาว

2) เสา (Columns)

การสร้างส่วนประกอบของเสาคัลล์กับคาน คือ เสาถูกสร้างเป็นเส้นตรงและมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้น

3) พื้น (Slab)

ในการสร้างส่วนประกอบพื้นนั้นถูกสมมติให้เป็นแบบยึดแน่นในระนาบกับคานและเสา และมีพฤติกรรมรับแรงทั้งแรงตามแนวแทนและแรงดัด

4) กำแพง (Masonry infilled walls)

ในการสร้างแบบจำลองกำแพงนั้นถูกสมมติให้เป็น Shell โดยที่ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเป็นแบบ Plane Stress

บทที่ 4

การศึกษาการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์

ในการศึกษาการวิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์นั้น เป็นวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างโดยพิจารณาจากแบบจำลองของอีลิเมนต์เล็ก ๆ (Element model) โดยที่ในแต่ละอีลิเมนต์เล็ก ๆ ที่นำมาพิจารณานั้น จะต้องอยู่บนเงื่อนไขของความเสถียรภาพ (Stable) ของแรงภายนอก และแรงภายใน รวมถึงความต่อเนื่องของการเสียรูป (Compatibility) ตามเงื่อนไขขอบเขตกำหนด (Boundary Condition) ของอีลิเมนต์เล็กๆ นั้นด้วย และเมื่อทำการพิจารณาทุกๆ อีลิเมนต์เล็ก ๆ แล้วนั้น จะสามารถสร้างแบบจำลองโครงสร้างโดยรวม (Structural Model) ได้ในที่สุด

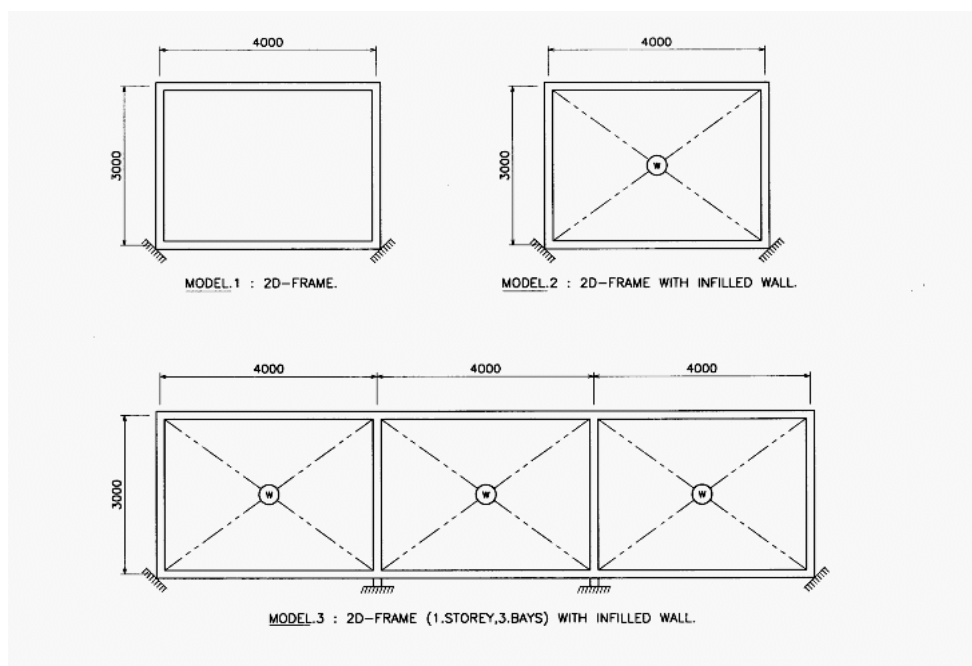
จากหลักการวิเคราะห์โครงสร้างโดยแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ที่กล่าวมาแล้วนั้น จะเห็นว่าค่าความถูกต้องของคำตอบของการวิเคราะห์ จะขึ้นอยู่กับจำนวนการแบ่งย่อย (Mesh) ใน Frame และ Element ที่พิจารณานั้น ๆ กล่าวคือ จำนวนการแบ่งย่อยของ Frame และ Element ที่เหมาะสมนั้นจะให้คำตอบของการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง การพิจารณาการแบ่งย่อยภายใน Element นั้น จะแบ่งการพิจารณาเป็น 2 ส่วน คือ ผนัง และ พื้น ดังนั้นจึงทำการสร้างตัวอย่างแบบจำลองเพื่อเป็นตัวแทนของการศึกษาผลกระทบของ Element ในแต่ละแบบ กล่าวคือการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการแบ่งย่อยของผนัง จะทำการสร้างแบบจำลอง 2 มิติ ซึ่งประกอบด้วยโครงเสา, คาน, และผนัง (ไม่พิจารณาพื้น) และ การศึกษาผลกระทบเนื่องจากการแบ่งย่อยของพื้น จะทำการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ซึ่งประกอบไปด้วย โครงเสา, คาน, และพื้น (ไม่พิจารณาผนัง) และในการพิจารณาผลกระทบของการแบ่งย่อย Mesh ใน Element แต่ละแบบนี้ จะสร้างแบบจำลองเพื่อทำการเปรียบเทียบผลเพิ่มเติมโดยแบ่งเป็น (Row x Column) 1x1, 1x3, 3x3, 6x3 และ 9x3 ตามลำดับ ดังที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2

โดยทั่วไป รูปแบบของพื้นในโครงสร้างอาคารใด ๆ นั้นจะแบ่งออกเป็น พื้นทิศทางเดียว และพื้นสองทิศทาง ซึ่งในบทนี้จะทำการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาผลกระทบของรูปแบบของพื้นแบบต่าง ๆ ที่มีต่อค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคาร ดังที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.3

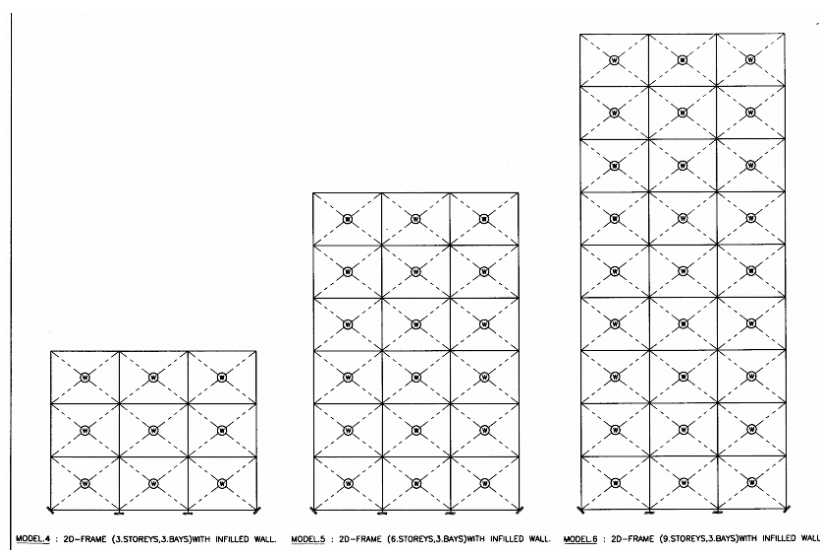
4.1 การศึกษาการแบ่งย่อย (Mesh) ใน Frame และ Wall Element

ในการศึกษาผลกระทบของการแบ่งย่อย (Mesh) ใน Frame และ Wall Element ต่อค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้างโดยรวมนั้นนั้น จะทำการสร้างตัวอย่างแบบจำลอง 2 มิติ ซึ่งประกอบด้วยโครงเสา , คาน , และผนัง (ไม่พิจารณาพื้น) โดยที่ในการพิจารณาผลกระทบของการแบ่งย่อย Mesh ใน Wall Element นั้น จะสร้างแบบจำลองเพื่อทำการเปรียบเทียบผลการศึกษาเพิ่มเติมโดยแบ่งเป็น (Row x Column) 1x1 , 1x3 , 3x3 , 6x3 และ 9x3 ตามลำดับ โดยมีความกว้างช่วงคานเท่ากับ 4 เมตร และ ความสูงของเสาเท่ากับ 3 เมตร และมีขนาดของโครงสร้างเสา-คาน เป็น 0.8x0.8 เมตร ผนังมีความหนาเท่ากับ 0.1 เมตร ซึ่งเป็นขนาดปกติในโครงสร้างทั่วไป ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ในตัวอย่างแบบจำลอง จะประกอบด้วย

- 1) แบบจำลองโครงเสา-คาน แบบ 1ช่วงความสูงเสา-1ช่วงคาน (2D-Bared Frame Model, 1 x 1)
- 2) แบบจำลองโครงเสา-คาน-กำแพง แบบ 1ช่วงความสูงเสา-1ช่วงคาน (2D-Frame with Infilled wall Model, 1 x 1)
- 3) แบบจำลองโครงเสา-คาน-กำแพง แบบ 1ช่วงความสูงเสา-3ช่วงคาน (2D-Frame with Infilled wall Model, 1 x 3)
- 4) แบบจำลองโครงเสา-คาน-กำแพง แบบ 3ช่วงความสูงเสา-3ช่วงคาน (2D-Frame with Infilled wall Model, 3 x 3)
- 5) แบบจำลองโครงเสา-คาน-กำแพง แบบ 6ช่วงความสูงเสา-3ช่วงคาน (2D-Frame with Infilled wall Model, 6 x 3)
- 6) แบบจำลองโครงเสา-คาน-กำแพง แบบ 9ช่วงความสูงเสา-3ช่วงคาน (2D-Frame with Infilled wall Model, 9 x 3)



รูปที่ 4.1 แบบจำลองโครงเสา-คาน-กำแพง (2มิติ) แบบ 1x1 , 1x3



รูปที่ 4.2 แบบจำลองโครงเสา-คาน-กำแพง (2มิติ) แบบ 3x3 , 6x3 , 9x3

ซึ่งในแต่ละแบบจำลองนั้นจะพิจารณาการแบ่งย่อย (Mesh) ใน Frame และ Wall Element ออกเป็นความละเอียด 1x1, 2x2 , 4x4 , 8x8 และ 16x16 และทำการคำนวณหาค่าคาบของการสั่นไหวที่เกิดขึ้นของแบบจำลองในแต่ละชนิด โดยทำการเปรียบเทียบความแตก

ต่างกับค่าที่ได้จากแบบจำลองที่ไม่ได้ทำการแบ่งย่อยใน Frame และ Wall Element ซึ่งจะแสดงได้ตามตารางที่ 4.1-4.6

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน , 1 ช่วงความสูงเสา – 1 ช่วงคาน (2D-Bared Frame Model , 1x1)

Mode	Meshing				
	1x1	2x2	4x4	8x8	16x16
Mode 1	0.0596	0.0553	0.0547	0.0545	0.0545
Difference	-	-7.21%	-8.22%	-8.56%	-8.56%

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน-กำแพง , 1 ช่วงความสูงเสา - 1 ช่วงคาน (2D-Frame with Infilled wall Model , 1x1)

Mode	Meshing				
	1x1	2x2	4x4	8x8	16x16
Mode 1	0.0266	0.0243	0.0239	0.0239	0.0239
Difference	-	-8.64%	-10.15%	-10.15%	-10.15%

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน-กำแพง , 1 ช่วงความสูงเสา - 3 ช่วงคาน (2D-Frame with Infilled wall Model , 1x3)

Mode	Meshing				
	1x1	2x2	4x4	8x8	16x16
Mode 1	0.0104	0.0103	0.0102	0.0102	0.0102
Difference	-	-0.96%	-1.92%	-1.92%	-1.92%

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน-กำแพง , 3ช่วงความสูงเสา - 3ช่วงคาน (2D-Frame with Infilled wall Model , 3x3)

Mode	Meshing				
	1x1	2x2	4x4	8x8	16x16
Mode 1	0.0128	0.0130	0.0130	0.0130	0.0130
Difference	-	+1.54%	+1.54%	+1.54%	+1.54%

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน-กำแพง , 6ช่วงความสูงเสา - 3ช่วงคาน (2D-Frame with Infilled wall Model , 6x3)

Mode	Meshing				
	1x1	2x2	4x4	8x8	16x16
Mode 1	0.0243	0.0242	0.0241	0.0241	0.0241
Difference	-	-0.41%	-0.82%	-0.82%	-0.82%

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน-กำแพง , 9ช่วงความสูงเสา - 3ช่วงคาน (2D-Frame with Infilled wall Model , 9x3)

Mode	Meshing				
	1x1	2x2	4x4	8x8	16x16
Mode 1	0.0383	0.0384	0.0384	0.0384	0.0385
Difference	-	+0.26%	+0.26%	+0.26%	+0.52%

ในแบบจำลองที่ 1-6 นั้น จะเป็นการพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแบ่งย่อย (Mesh) ใน Frame และ Wall Element ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากตารางที่ 4.1-4.6 พบว่า

1. ในการพิจารณาการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน แบบ 1 ช่วงความสูงเสา - 1 ช่วงคาน (2D-Bared Frame Model , 1 x 1) ตามค่าในตารางที่ 4.1 นั้น การแบ่งย่อย (Mesh) ใน Frame จะมีผลทำให้ค่าคาบของการสั่นไหวลดลง 8.56 %
2. ในการพิจารณาการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน-กำแพง แบบ 1 ช่วงความสูงเสา - 1 ช่วงคาน (2D-Frame with Infilled wall Model , 1 x 1) ตามค่าในตารางที่ 4.2 นั้น

การแบ่งย่อย(mesh)ใน Frame และ Wall Element จะมีผลทำให้ค่าคาบของการสั่นไหวลดลง 10.15 %

3. ในการพิจารณาการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน-กำแพง แบบหลายช่วง ความสูงเสา-ช่วงคาน (2D-Frame with Infilled wall Model , multi rows and columns) ตามตัวอย่างแบบจำลองที่ 3-6 ซึ่งเป็นแบบจำลองแบบซึ่งให้ค่าตามตารางที่ 4.3-4.6 นั้น จะเห็นว่า การแบ่งย่อย (Mesh) ใน Wall Element นั้นจะมีผลต่อค่าคาบของการสั่นไหวน้อยมาก (มีค่าไม่ถึง 2%) และค่าเปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงจะมีค่าลดลงเมื่อแบบจำลองมีความสูง หรือจำนวนชั้นมากขึ้น

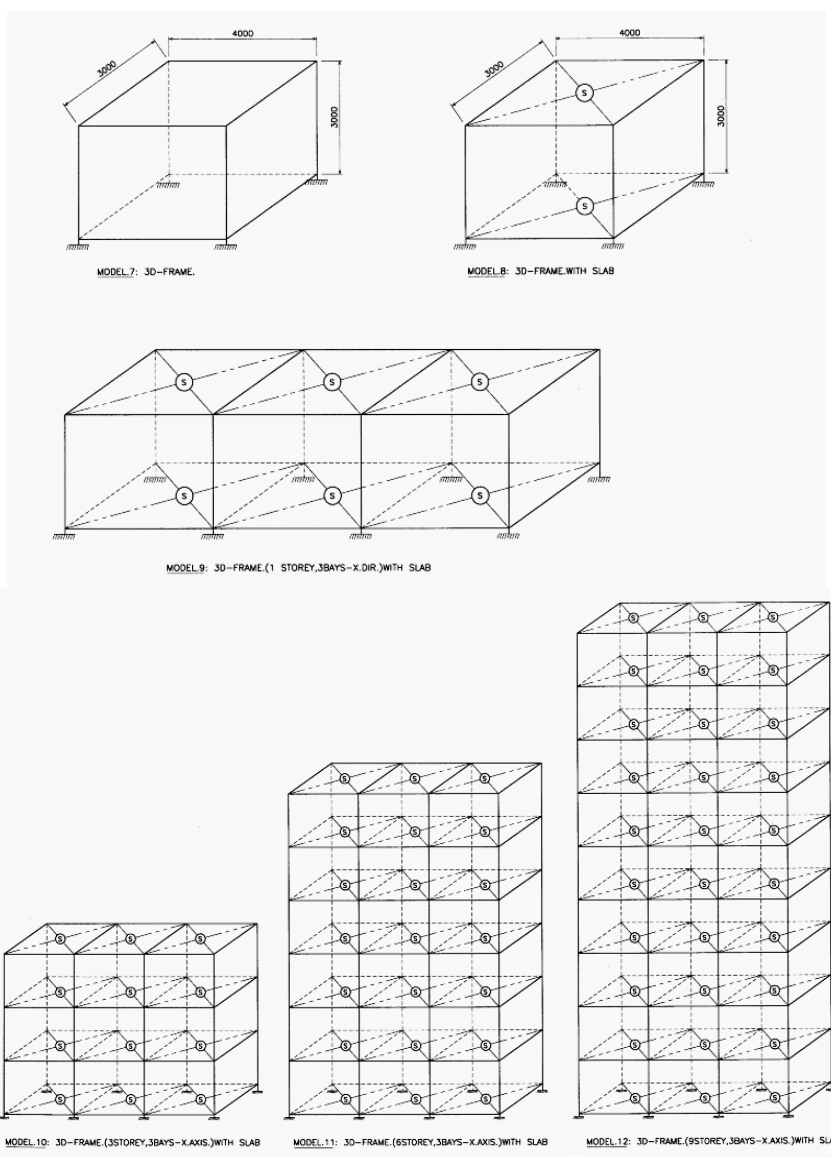
ดังนั้น ในการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของแบบจำลองอาคารจริงซึ่งเป็นแบบจำลองแบบหลายช่วงคาน-เสา นั้น อาจจะไม่ต้องพิจารณาการแบ่งย่อย (mesh) ใน Wall Element อีกก็ได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากผลที่ได้จะมีความแตกต่างกันน้อยมากเมื่อเทียบกับการแบ่งย่อยใน Frame และ Wall Element ซึ่งจะต้องใช้เวลา และ หน่วยความจำในเครื่องคอมพิวเตอร์มากขึ้นในการสร้างแบบจำลอง หรือการวิเคราะห์ผล

4.2 การศึกษาการแบ่งย่อย (Mesh) ใน Frame และ Slab Element

ในการศึกษาผลกระทบของการแบ่งย่อย (Mesh) ใน Frame และ Slab Element ต่อค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของโครงสร้างโดยรวมนั้นนั้น จะทำการสร้างตัวอย่างแบบจำลอง 3 มิติ ซึ่งประกอบด้วยโครงเสา ,คาน , และพื้น (ไม่พิจารณาผนัง) โดยที่ในการพิจารณาผลกระทบของการแบ่งย่อย Mesh ใน Slab Element นั้น จะสร้างแบบจำลองเพื่อทำการเปรียบเทียบผลการศึกษาเพิ่มเติมโดยแบ่งเป็น (Row x Column) 1x1 , 1x3 , 3x3 , 6x3 และ 9x3 ตามลำดับ โดยมี ความกว้างช่วงคานเท่ากับ 4 เมตร และ ความสูงของเสาเท่ากับ 3 เมตร และมีขนาดของโครงสร้างเสา-คาน เป็น 0.8x0.8 เมตร พื้นมีความหนาเท่ากับ 0.15 เมตร ซึ่งเป็นขนาดปกติในโครงสร้างทั่วไป ดังรูปที่ 4.3 ในตัวอย่างแบบจำลอง จะประกอบด้วย

- 1) แบบจำลองโครงเสา-คาน แบบ 1ช่วงความสูงเสา-1ช่วงคาน (3D-Bared Frame Model , 1x1)
- 2) แบบจำลองโครงเสา-คาน-พื้น แบบ 1ช่วงความสูงเสา-1ช่วงคาน (3D-Frame with Infilled Slab Model , 1x1)

- 3) แบบจำลองโครงเสา-คาน-พื้น แบบ 1 ช่วงความสูงเสา-3 ช่วงคาน (3D-Frame with Infilled Slab Model , 1x3)
- 4) แบบจำลองโครงเสา-คาน-พื้น แบบ 3 ช่วงความสูงเสา-3 ช่วงคาน (3D-Frame with Infilled Slab Model , 3x3)
- 5) แบบจำลองโครงเสา-คาน-พื้น แบบ 6 ช่วงความสูงเสา-3 ช่วงคาน (3D-Frame with Infilled Slab Model , 6x3)
- 6) แบบจำลองโครงเสา-คาน-พื้น แบบ 9 ช่วงความสูงเสา-3 ช่วงคาน (3D-Frame with Infilled Slab Model , 9x3)



รูปที่ 4.3 แบบจำลองโครงเสา-คาน-พื้น (3 มิติ) แบบ 1x1 , 1x3 , 3x3 , 6x3 , 9x3

ซึ่งในแต่ละแบบจำลองนั้นจะพิจารณาการแบ่งย่อย (Mesh) ใน Frame และ Slab Element ออกเป็นความละเอียด 1x1, 2x2, 4x4, 8x8 และ 16x16 และทำการคำนวณหาค่าคาบของการสั่นไหวที่เกิดขึ้นของแบบจำลองในแต่ละชนิด โดยทำการเปรียบเทียบความแตกต่างกับค่าที่ได้จากแบบจำลองที่ไม่ได้ทำการแบ่งย่อยใน Frame และ Slab Element ซึ่งจะแสดงได้ตามตารางที่ 4.7-4.12

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คานแบบ 1ช่วงความสูงเสา-1ช่วงคาน (3D-Bared Frame Model, 1x1)

Mode	Mesh									
	1x1	%	2x2	%	4x4	%	8x8	%	16x16	%
Y	0.0712	-	0.0678	-4.78	0.0673	-5.47	0.0672	-5.62	0.0672	-5.62
X	0.0688	-	0.0661	-3.92	0.0657	-4.50	0.0657	-4.50	0.0656	-4.65
Torsion	0.0641	-	0.0546	-14.8	0.0525	-18.1	0.0520	-18.9	0.0518	-19.2

ตารางที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน-พื้น แบบ 1ช่วงความสูงเสา-1ช่วงคาน (3D-Frame with Infilled Slab Model, 1x1)

Mode	Mesh									
	1x1	%	2x2	%	4x4	%	8x8	%	16x16	%
Y	0.0403	-	0.0404	+0.25	0.0405	+0.50	0.0405	+0.50	0.0405	+0.50
X	0.0395	-	0.0397	+0.51	0.0398	+0.76	0.0398	+0.76	0.0398	+0.76
Torsion	0.0361	-	0.0319	+11.6	0.0308	+14.7	0.0305	+15.5	0.0305	+15.5

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน-พื้น แบบ 1 ช่วงความสูงเสา-3 ช่วงคาน (3D-Frame with Infilled Slab Model , 1x3)

Mode	Mesh									
	1x1	%	2x2	%	4x4	%	8x8	%	16x16	%
Y	0.044	-	0.0444	+0.68	0.0444	+0.68	0.0444	+0.68	0.0444	+0.68
X	0.0430	-	0.0431	+0.23	0.0431	+0.23	0.0431	+0.23	0.0431	+0.23
Torsion	0.0395	-	0.0381	-3.54	0.0378	-4.31	0.0377	-4.55	0.0377	-4.55

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน-พื้น แบบ 3 ช่วงความสูงเสา-3 ช่วงคาน (3D-Frame with Infilled Slab Model , 3x3)

Mode	Mesh									
	1x1	%	2x2	%	4x4	%	8x8	%	16x16	%
Y	0.1379	-	0.1380	+0.07	0.1379	0	0.1379	0	0.1379	0
X	0.1240	-	0.1240	0	0.1240	0	0.1240	0	0.1240	0
Torsion	0.1176	-	0.1132	-3.74	0.1121	-4.67	0.1118	-4.93	0.1117	-5.02

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน-พื้น แบบ 6 ช่วงความสูงเสา-3 ช่วงคาน (3D-Frame with Infilled Slab Model , 6x3)

Mode	Mesh									
	1x1	%	2x2	%	4x4	%	8x8	%	16x16	%
Y	0.3339	-	0.3338	-0.03	0.3337	-0.06	0.3336	-0.09	0.3333	-0.17
X	0.2597	-	0.2597	0	0.2596	-0.04	0.2596	-0.04	0.2596	-0.04
Torsion	0.2547	-	0.2457	-3.53	0.2433	-4.47	0.2427	-4.71	0.2424	-4.83

ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน-พื้น แบบ 9ช่วงความสูงเสา-3ช่วงคาน (3D-Frame with Infilled Slab Model , 9x3)

Mode	Mesh									
	1x1	%	2x2	%	4x4	%	8x8	%	16x16	%
Y	0.6091	-	0.6089	-0.03	0.6088	-0.05	0.6086	-0.08	0.6085	-0.10
X	0.4088	-	0.4088	0	0.4088	0	0.4087	-0.02	0.4087	-0.02
Torsion	0.4031	-	0.3890	-4.76	0.3854	-4.39	0.3844	-4.63	0.3841	-4.71

ในแบบจำลองที่ 7-12 นั้น จะเป็นการพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแบ่งย่อย (Mesh) ใน Frame และ Slab Element ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากตารางที่ 4.7-4.12 พบว่า

1. ในการพิจารณาแบบจำลองโครงเสา-คาน แบบ 1ช่วงความสูงเสา-1ช่วงคาน (3D-Bared Frame Model , 1x1) ในตารางที่ 4.7 นั้น การแบ่งย่อย (Mesh) ใน Frame จะมีผลทำให้ค่าคาบของการสั่นไหวใน Mode พื้นฐาน X และ Y ลดลง 5.62 % และ 4.65 % ตามลำดับ แต่สำหรับ Mode torsion นั้นจะมีค่าคาบของการสั่นไหวลดลงถึง 19.2 %

2. ในการพิจารณาแบบจำลองโครงเสา-คาน-พื้น แบบ 1ช่วงความสูงเสา-1ช่วงคาน (3D-Frame with Infilled Slab Model , 1x1) ตามค่าในตารางที่ 4.8 นั้น การแบ่งย่อย (Mesh) ใน Frame และ Slab Element จะมีผลทำให้ค่าคาบของการสั่นไหวใน Mode X และ Y เปลี่ยนแปลงน้อยมากแต่ค่าคาบของการสั่นไหวใน Mode Torsion จะมีค่าลดลงถึง 15.5 %

3. ในการพิจารณาแบบจำลองโครงเสา-คาน-กำแพง แบบหลายช่วงความสูงเสา-ช่วงคาน (3D-Frame with Infilled Slab Model , multi rows and columns) ตามค่าในตารางที่ 4.9-4.12 นั้น จะเห็นว่าการแบ่งย่อย (Mesh) ใน Slab Element จะมีผลต่อค่าคาบของการสั่นไหวใน Mode X และ Y น้อยมาก (มีค่าไม่ถึง 2%) แต่จะมีผลใน Mode ของ Torsion ซึ่งทำให้ค่าคาบของการสั่นไหวจะลดลง 4 - 5 %

จากข้อมูลค่าคาบการสั่นไหว่ดังกล่าวข้างต้นนั้น จะเห็นว่าการแบ่งย่อย (Mesh) ของแบบจำลองที่เป็นแบบหลายช่วงความสูงเสา-ช่วงคาน ในส่วนของ Frame และ Slab Element นั้น จะทำให้ค่าคาบการสั่นไหวของแบบจำลองการศึกษาใน Mode Torsion มีค่าลดลงมากกว่าใน Mode พื้นฐาน X และ Y

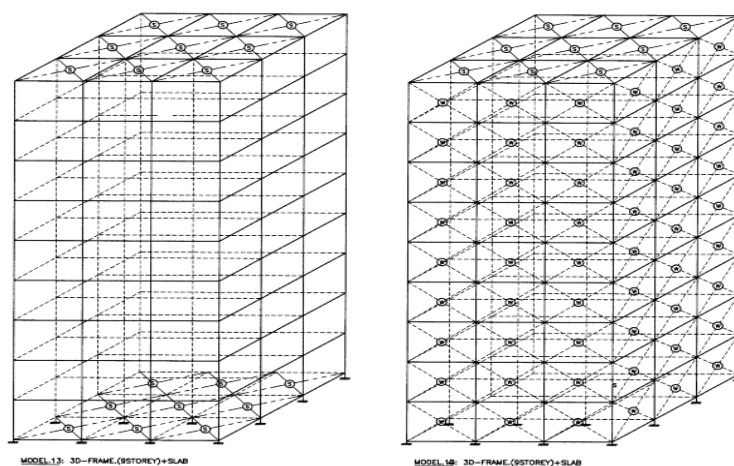
ดังนั้น ในการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาคูณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของแบบจำลองอาคารจริงซึ่งเป็นแบบจำลองแบบหลายช่วงคาน-เสา นั้น จึงควรพิจารณาการแบ่งย่อย (mesh) ใน

Frame และ Slab Element ด้วยเสมอ ทั้งนี้เพื่อให้ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของแบบจำลองมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งใน Mode การสั่นไหวแบบ Torsion

4.3 การศึกษาผลกระทบจากรูปแบบต่าง ๆ ของพื้น โดยการแบ่งย่อย (Mesh) ใน Slab Element ต่อค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์

เนื่องจากการแบ่งย่อย (mesh) ใน Slab Element ตามแบบจำลองการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นว่ามีผลต่อค่าของคาบการสั่นไหวใน Mode torsion ค่อนข้างมาก ดังนั้นเพื่อที่จะพิจารณาศึกษาถึงผลกระทบจากการแบ่งย่อย (mesh) พื้นในรูปแบบต่าง ๆ ให้ละเอียดยิ่งขึ้น ก็ทำการสร้างแบบจำลองเพื่อเป็นตัวอย่างของการศึกษาขึ้นอีก 2 แบบจำลอง โดยพิจารณาในแบบจำลองทั้งที่มี Wall Element และ ไม่มี Wall Element โดยที่จะไม่ทำการแบ่งย่อย Mesh ใน Wall Element ตามผลที่ได้ในการศึกษาหัวข้อ 4.1 ดังนี้

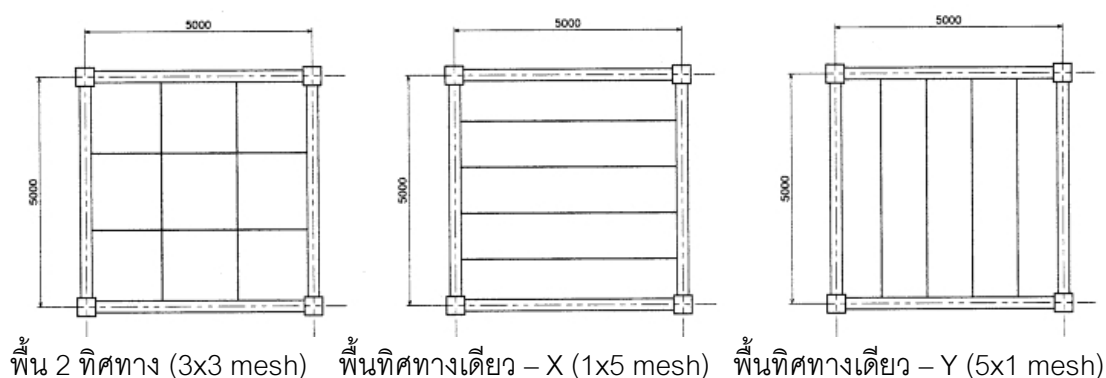
1. แบบจำลองโครงเสา-คาน-พื้น, ไม่พิจารณาผนัง (3D Frame with Infilled Slab Model)
2. แบบจำลองโครงเสา-คาน-พื้น-ผนัง (3D Frame with Infilled Slab and Wall Model)



รูปที่ 4.4 แบบจำลองโครงเสา-คาน-พื้น (3 มิติ) เพื่อพิจารณาผลของการแบ่งย่อย

โดยที่ในการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ เนื่องมาจากการแบ่งย่อย Slab Element ในรูปแบบต่าง ๆ ในแบบจำลองที่มี Wall Element และในแบบจำลองที่ไม่มี Wall Element นั้น จะทำการแบ่งย่อย (mesh) ของ Slab Element ดังนี้

1. พื้น 2 ทิศทาง จะทำการแบ่งย่อย Slab Element เป็น 3x3 (ดังรูป)
2. พื้นทิศทางเดียว (ตามแกน X) จะทำการแบ่งย่อย Slab Element ออกเป็น 1x5 (ดังรูป)
3. พื้นทิศทางเดียว (ตามแกน Y) จะทำการแบ่งย่อย Slab Element เป็น 5x1 (ดังรูป)



รูปที่ 4.5 การแบ่งย่อยของชิ้นส่วนพื้นในรูปแบบต่างๆ

คำนวณหาค่าคาบของการสั่นไหวที่เกิดขึ้นของแบบจำลองในแต่ละชนิด และทำการเปรียบเทียบความแตกต่างกับค่าที่ได้จากแบบจำลองที่ไม่ได้ทำการแบ่งย่อย (Mesh) ใน Slab Element ซึ่งจะแสดงได้ตามตารางที่ 4.13 และ 4.14 ดังนี้

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน-พื้น, ไม่พิจารณาผนัง (3D Frame with Infilled Slab Model)

Mode	Mesh							
	1x1	%	3x3	%	5x1	%	1x5	%
Y	0.4796	-	0.4797	+0.02	0.4798	+0.04	0.4791	-0.10
X	0.4648	-	0.4649	+0.02	0.4643	+0.10	0.4650	+0.04
Torsion	0.4180	-	0.4064	-2.77	0.416	-1.53	0.4117	-1.53

ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการแบ่งย่อยของแบบจำลองโครงเสา-คาน-พื้น-ผนัง (3D Frame with Infilled Slab and Wall Model)

Mode	Mesh							
	1x1	%	3x3	%	5x1	%	1x5	%
Y	0.3637	-	0.3637	0	0.3638	+0.03	0.3635	+0.06
X	0.3465	-	0.3465	0	0.3463	-0.06	0.3466	+0.03
Torsion	0.3088	-	0.3016	-2.33	0.3049	-1.26	0.3050	-1.24

ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าคาบของการสั่นไหวที่เกิดขึ้น จากรูปแบบการแบ่งย่อยใน Slab Element นั้น จะพบว่า

1. การพิจารณาแบบจำลองทั้งที่มี Wall Element และที่ไม่มี Wall Element ตามตารางที่ 4.13 และตารางที่ 4.14 นั้น การแบ่งย่อย mesh ใน Slab Element ในรูปแบบต่าง ๆ นั้น จะมีผลกระทบต่อค่าคาบของการสั่นไหวใน Mode พื้นฐาน X และ Y น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ Mode ของ Torsion

2. เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า % ของการเปลี่ยนแปลง ของค่าคาบของการสั่นไหวใน Mode ของ Torsion แล้วนั้นจะเห็นว่า ในแบบจำลองที่มี Wall Element นั้น ค่า % ของการเปลี่ยนแปลงของค่าคาบของการสั่นไหวจะน้อยกว่าในแบบจำลองที่ไม่มี Wall Element

จากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น จะเห็นว่า ในการศึกษาถึงคุณสมบัติทางพลศาสตร์โดยการสร้างแบบจำลอง ไฟไนต์อีลิเมนต์นั้น ควรจะต้องทำการพิจารณาถึงความละเอียดเพียงพอในการสร้างแบบจำลอง ทั้งนี้เนื่องมาจากหลักการทางไฟไนต์อีลิเมนต์นั่นเอง แต่จากผลการศึกษาที่ได้ทำให้สามารถสรุปเป็นแนวทางในการสร้างแบบจำลองของอาคารจริงได้คือ 1. ในการสร้างแบบจำลององค์อาคารที่เป็น Wall Element นั้น ไม่จำเป็นที่จะต้องทำการแบ่งย่อย (mesh) อีก ทั้งนี้เนื่องจากค่าคาบการสั่นไหวที่คำนวณได้จากโปรแกรมนั้นมีความแตกต่างกันน้อยมาก 2. ในการสร้างแบบจำลององค์อาคารที่เป็น Slab Element นั้น ควรจะต้องทำการแบ่งย่อย (mesh) โดยพิจารณาตามรูปแบบของ Slab นั้น ๆ กล่าวคือเป็นพื้นแบบทิศทางเดียวหรือสองทิศทาง ทั้งนี้เนื่องจากการแบ่งย่อยดังกล่าวมีผลต่อค่าคาบของการสั่นไหวใน mode Torsion

แต่อย่างไรก็ตาม ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแบ่งย่อย (mesh) ใน Frame , Slab Element และ Wall Element ต่อค่าของคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของแบบจำลองจะมากขึ้น หรือน้อยลงนั้น

จะขึ้นอยู่กับปัจจัยอีกหลายประการ ทั้งนี้รวมถึงรูปร่าง และรูปแบบของแบบจำลองในแต่ละแบบด้วย ดังนั้นการศึกษาการแบ่งย่อย (Mesh) ใน Frame , Slab Element และ Wall Element ข้างต้นนั้น จึงเป็นเพียงแนวทางที่จะใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของอาคารที่นำมาศึกษา เพื่อให้ได้ผลของค่าคาบการสั่นไหวและค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารนั้น ๆ มีความถูกต้องยิ่งขึ้น

บทที่ 5

การศึกษาแบบจำลองฐานราก และห้องใต้ดิน

ในการสร้างแบบจำลอง เพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคารนั้น นอกเหนือจากการพิจารณาการแบ่งย่อย (Mesh Frame and Element) ที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 นั้น ก็ยังมีอีกหลายปัจจัย ที่ทำให้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนอยู่ ในบทนี้จะกล่าวถึงปัจจัยอีกชนิดหนึ่งที่มีผลต่อความถูกต้องของการสร้างแบบจำลองของอาคาร นั่นคือการพิจารณารูปแบบของฐานรากแบบต่าง ๆ ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของอาคาร โดยพิจารณาแบบจำลองฐานรากเป็นแบบยืดหยุ่น (Flexible Foundation) รวมถึงการพิจารณาผลกระทบของห้องใต้ดิน ที่มีต่อค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ในการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของอาคาร โดยที่แบบจำลองฐานรากแบบยืดหยุ่นดังกล่าวจะอ้างอิงถึงสภาพดินทั่วไปของกรุงเทพมหานคร (Shibuya et.al.,1997)

5.1 การสร้างแบบจำลองฐานรากแบบยืดหยุ่น

อาคารใด ๆ เมื่อได้รับแรงทางด้านพลศาสตร์ เช่น แรงแผ่นดินไหว จะเกิดการเสียรูป (Deformation) หรือเกิดการเคลื่อนที่ขององค์อาคารทั้งในแนวราบ และในแนวตั้งตามความสูงของอาคารนั้น ๆ และที่ตำแหน่งฐานราก หรือกลุ่มของเสาเข็มก็จะเกิดการเคลื่อนที่ในแนวราบ และในแนวตั้งเช่นกัน ซึ่งการเคลื่อนที่ของฐานราก หรือกลุ่มของเสาเข็มจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับกำลังต้านทานของดินที่มีต่อเสาเข็มที่อยู่ใต้ตำแหน่งของฐานรากนั้น ๆ โดยทั่วไปการสร้างแบบจำลองของอาคารเพื่อการวิเคราะห์โครงสร้างใด ๆ จะพิจารณาระบบฐานรากของอาคารเป็นแบบยึดแน่น ซึ่งค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองนี้ ยังมีความคลาดเคลื่อนกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงอยู่มาก ดังนั้นการที่จะสร้างแบบจำลองเพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของอาคารให้มีความถูกต้องยิ่งขึ้นนั้น จึงจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ ให้ครอบคลุมทั้งหมด ในงานวิจัยนี้จะทำการพิจารณาเพิ่มเติมระบบฐานรากแบบยืดหยุ่นในการสร้างแบบจำลองของอาคาร โดยรวมด้วย โดยใช้แบบจำลองของ Winkler ซึ่งจะแทนค่าสตีฟเนสในแนวราบและแนวตั้งของเสาเข็มด้วย สปริงอิสระที่ยึดติดกับเสาเข็มทั้งในแนวราบและในแนวตั้งตามชั้นดินต่างๆ ตามรายละเอียดหัวข้อ 3.1.4 แบบจำลองฐานรากแบบยืดหยุ่น (Flexible Foundation)

5.1.1 การคำนวณหาผลรวมของสติฟเนสของเสาเข็ม

ในหัวข้อนี้ จะนำเสนอแนวทาง วิธีการ และตัวอย่างการคำนวณหาค่าผลรวมของสติฟเนสของเสาเข็ม (พิจารณาที่หัวเสาเข็ม) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังนี้

เสาเข็ม ϕ 1.20 m. (ความยาวของเสาเข็ม 48 m.)

- Bangkok Soil Properties (Shibuya et al. ,1997)

$E_s = 1200 * S_u$, $S_u = 1600 \text{ kg/m}^2$, $\nu_s = 0.5$ (Cohesive Soil)

- Vertical Stiffness of Pile (Winkler)

$$K_p = \frac{\beta E_p A_p}{L_p} = 1.198 \times 10^8 \text{ kg/m} , \beta = 2.00 \text{ (ATC-40)}$$

- Horizontal Stiffness of Pile (Bowles and Vesic ,1961)

$$K_h = \frac{1.3}{D} \sqrt[3]{\frac{E_s D^4}{E_p I_p}} \frac{E_s}{1 - \nu_s^2} = (1.2 * 2024715) * \text{Strip}$$

For Strip = 1.00 m. : $K_h = 2.429\text{E}+06$

For Strip = 1.00 m. : $K_h = 4.859\text{E}+06$

การหาค่าสติฟเนสรวมในแนวราบที่ตำแหน่งฐานราก (Seubpong ,AIT,2000)

คำนวณหาค่าสติฟเนสรวมในแนวราบของเสาเข็ม โดยวิธีเพิ่มแรงกระทำในแนวราบที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม และคำนวณค่าสติฟเนสรวมในแนวราบจากค่าการเคลื่อนที่ในแนวราบตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้แล้ว โดยแบ่งพิจารณารูปแบบหัวเสาเข็มเป็น 2 กรณีคือ พิจารณาหัวเสาเข็มแบบอิสระ และพิจารณาหัวเสาเข็มแบบต้านทานการหมุน ดังรูปที่ 5.2 ทำการคำนวณหาค่าการเคลื่อนที่ในแนวราบที่เกิดจากแรงกระทำ โดยที่ค่าแรงกระทำที่ใช้สำหรับเสาเข็มนี้ คือ 100 ตัน ซึ่งจะได้ค่าตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าการเคลื่อนที่ในแนวราบของเสาเข็มเนื่องจากแรงกระทำ 100 ตัน

Level	Lateral Displacement ⁽¹⁾		Lateral Displacement ⁽²⁾	
	Displacement(m.)	Normalised	Displacement(m.)	Normalised
0	0.0166	1.0000	0.0060	1.0000
-2	0.0086	0.5156	0.0046	0.7682
-4	0.0029	0.1761	0.0024	0.3974
-6	0.0002	0.0128	0.0008	0.1263
-8	-0.0005	-0.0306	0.0000	0.0027
-10	-0.0004	-0.0238	-0.0001	-0.0248
-12	-0.0002	-0.0092	-0.0001	-0.0164
-14	0.0000	-0.0012	0.0000	-0.0054
-16	0.0000	0.0009	0.0000	-0.0002
-18	0.0000	0.0007	0.0000	0.0008
-20	0.0000	0.0002	0.0000	0.0004
-22	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
-24	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

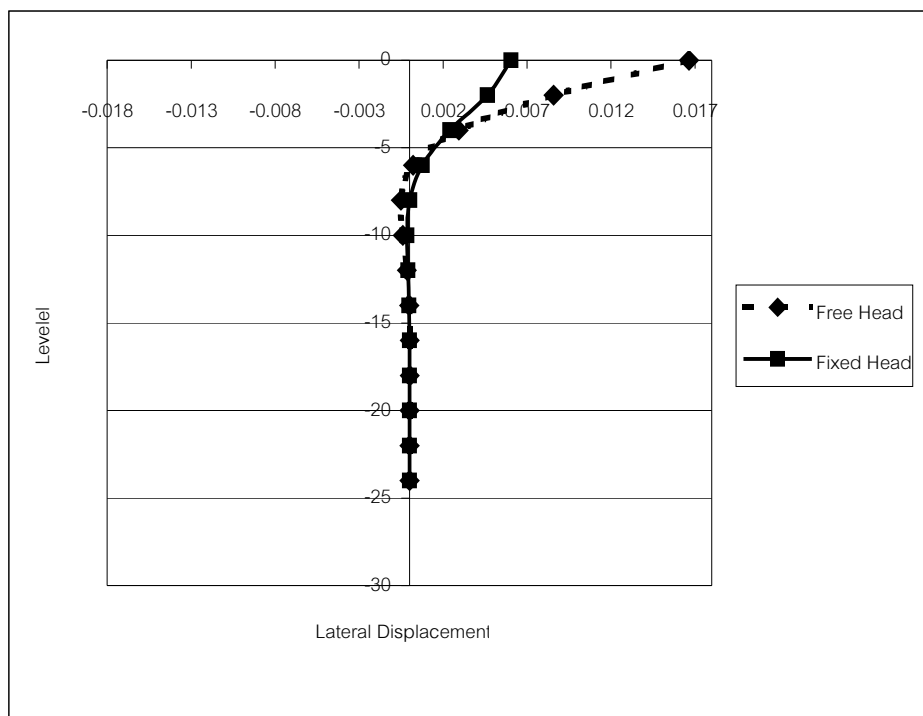
Lateral Displacement⁽¹⁾ ค่าการเคลื่อนที่ในแนวราบของเสาเข็มที่ระดับต่าง ๆ (พิจารณาหัวเสาเข็มแบบอิสระ)

Lateral Displacement⁽²⁾ ค่าการเคลื่อนที่ในแนวราบของเสาเข็มที่ระดับต่าง ๆ (พิจารณาหัวเสาเข็มแบบต้านทานการหมุน)

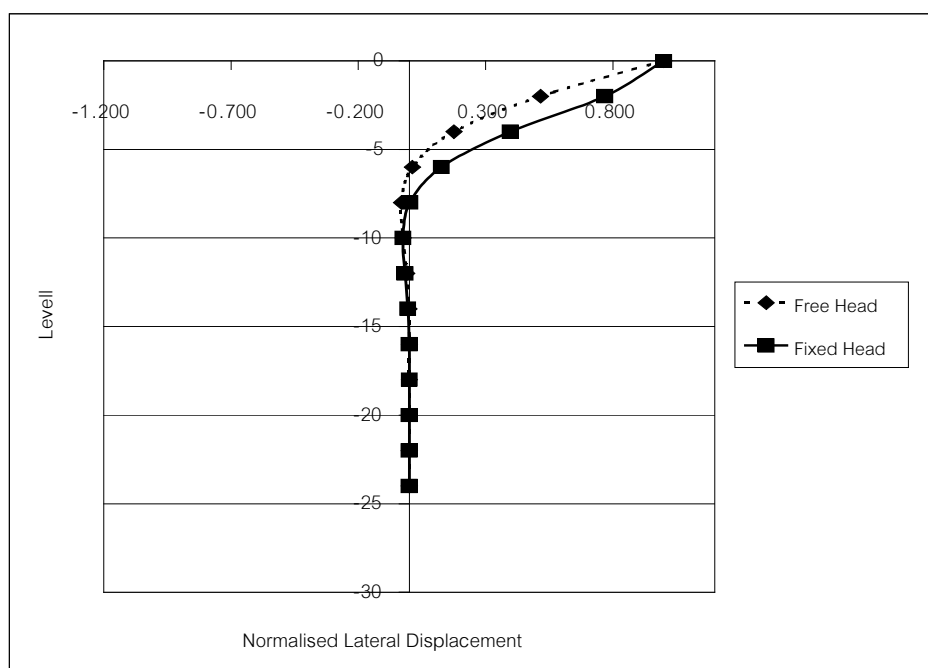
จากค่า Lateral Displacement ที่ได้จากตารางที่ 5.1 สามารถคำนวณหาค่าสติฟเนสรวมในแนวราบของเสาเข็มที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม (ฐานราก) ได้ดังนี้

กรณีหัวเสาเข็มเป็นแบบอิสระ $K_h = 100,000 / 0.01664 = 6,009,615 \text{ kg/m}$

กรณีหัวเสาเข็มเป็นแบบต้านทานการหมุน $K_h = 100,000 / 0.00604 = 16,556,291 \text{ kg/m}$



รูปที่ 5.1 ค่าการเคลื่อนที่ ในแนวราบของเสาเข็มเมื่อถูกแรงกระทำ 100 ตัน



รูปที่ 5.2 การ Normalised ค่าการเคลื่อนที่ในแนวราบของเสาเข็มเมื่อถูกแรงกระทำ 100 T

จากแนวทาง วิธีการ และตัวอย่างการคำนวณค่าสติฟเนสรวมของเสาเข็มดังกล่าวข้างต้น ทำให้สามารถคำนวณหาค่าของสติฟเนสในแนวราบของเสาเข็ม (K_h) และค่าสติฟเนสในแนวดิ่งของเสาเข็ม (K_v) ในแบบจำลองอาคารที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ทั้งหมดได้ตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าสติฟเนสในแนวราบ และในแนวดิ่งของเสาเข็มในแบบจำลองอาคาร

อาคาร	ชนิดของเสาเข็ม	ความยาวเสาเข็ม	Kh (kg/m)		Kv (kg/m)
			Kh ⁽¹⁾	Kh ⁽²⁾	
1. อาคาร A	Pile I 0.3*0.3 m.	21 m.	2.836E+06	8.375E+06	2.182E+07
2. อาคาร B	Spun Pile Dia 0.5 m.	22 m.	1.087E+06	3.960E+06	4.544E+07
3. อาคาร C	Bored Pile Dia 1.0 m.	48 m.	4.301E+06	1.215E+07	8.324E+07
	Bored Pile Dia 1.2 m.	48 m.	6.010E+06	1.656E+07	1.198E+08
4. อาคาร D	Spun Pile Dia 0.3 m.	21 m.	1.951E+05	8.317E+05	1.713E+07

Kh⁽¹⁾ ค่าสติฟเนสในแนวราบของเสาเข็ม ในกรณี queพิจารณาหัวเสาเข็มเป็นแบบอิสระ

Kh⁽²⁾ ค่าสติฟเนสในแนวราบของเสาเข็ม ในกรณี queพิจารณาหัวเสาเข็มเป็นแบบต้านทานการหมุน

5.2 แบบจำลองห้องใต้ดิน และฐานรากที่มีความหนาแน่นมาก

ในการพิจารณาการเคลื่อนที่ในแนวราบ และในแนวดิ่งของอาคารที่ระดับฐานรากที่พิจารณานั้น นอกเหนือจากผลของสติฟเนสในแนวราบ และในแนวดิ่งของเสาเข็มแล้ว ในอาคารที่มีการสร้างห้องใต้ดิน หรือมีความหนาแน่นของฐานรากค่อนข้างมาก ห้องใต้ดินหรือฐานรากดังกล่าวจะมีผลต่อการรับแรงทางด้านข้างของดินหรือการเคลื่อนที่ในแนวราบของเสาเข็มที่ตำแหน่งฐานรากที่พิจารณาด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากแรงต้านทานที่เกิดจากพื้นที่ด้านข้างของห้องใต้ดิน หรือ พื้นที่ด้านข้างของฐานรากที่มีความหนาแน่นค่อนข้างมาก โดยที่จะไปเพิ่มกำลังรับแรงทางด้านข้างของดินนั่นเอง

ในงานวิจัยนี้จะทำการพิจารณาสร้างแบบจำลองของแรงต้านทานด้านข้างเนื่องจากผลของห้องใต้ดิน และ ฐานรากที่มีความหนาแน่นค่อนข้างมาก โดยใช้แบบจำลองของ Winkler โดยจะแทนค่าสติฟเนสในแนวราบด้วยสปริงอิสระซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$K_h = \frac{1.3}{B} \sqrt[12]{\frac{E_s B^4}{E_p I_p} \frac{E_s}{1 - \nu_s}^2} \quad \text{สมการที่ 5.3}$$

โดยที่	B	คือ ความกว้างของฐานราก หรือห้องใต้ดินที่พิจารณา
	$E_p I_p$	คือ ค่าสติฟเนสของฐานราก หรือ ห้องใต้ดินที่พิจารณา
	E_s	คือ ค่า young ' s modulus ของดิน
	ν_s	คือ ค่า Poisson ' s ratio ของดิน

และจะใช้ค่าคุณสมบัติดินทั่วไปของกรุงเทพมหานคร ดังนี้

- Bangkok Soil Properties (Shibuya et al. ,1997)

$$E_s = 1200 * Su \quad , \quad Su = 1600 \text{ kg/m}^2 \quad , \quad \nu_s = 0.5 \text{ (Cohesive Soil)}$$

การพิจารณาค่าสติฟเนสในแนวราบของห้องใต้ดินนั้น จะทำการเพิ่มค่าสติฟเนสในแนวราบในตำแหน่งฐานรากที่ได้ถูกพิจารณาสรางแบบจำลองฐานรากแบบยึดหยุ่นก่อนหน้านี้แล้ว โดยจะทำการเฉลี่ยค่าสติฟเนสรวมในแนวราบของห้องใต้ดินไปที่ตำแหน่ง Support ของอาคารเท่า ๆ กันทั้งในแนวแกน X (เฉลี่ยค่าสติฟเนสรวมในแนวแกน X) และแนวแกน Y(เฉลี่ยค่าสติฟเนสรวมในแนวแกน Y)

บทที่ 6

ผลการศึกษา

6.1 ลักษณะอาคาร

6.1.1 อาคาร A (อาคารพักอาศัย 7 ชั้น)

อาคารนี้เป็นโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก 7 ชั้น มีขนาดความสูง 27.6 ม. กว้าง 15.5 ม. และยาว 38.4 ม. ระบบโครงสร้างอาคารโดยรวมเป็นระบบ เสา คาน และพื้น โดยพื้นของอาคารจะมีทั้งพื้น คสล.เทในที่ และ พื้นสำเร็จรูปทิศทางเดียว สำหรับระบบฐานรากอาคารเป็นฐานรากแบบเสาเข็มตอกขนาด 10.30x0.30x21.00 ม. โดยมีผนังอิฐก่อสม่าเสมอทั้งภายนอกและภายในดังแสดงในรูปที่ 6.1 และ 6.2

6.1.2 อาคาร B (อาคารสำนักงาน 12 ชั้น)

อาคารนี้เป็นโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งแบ่งอาคารออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นอาคารหลักเป็นอาคารสูง 12 ชั้น ซึ่งมีความสูง 53 ม. กว้าง 18.6 ม. และยาว 18.6 ม. ระบบโครงสร้างอาคารหลักเป็นระบบ เสา คาน และพื้น คสล.เทในที่ และมีส่วนที่เป็นกำแพงรับแรงเฉือน (Shear Wall) บริเวณกลางอาคาร และส่วนที่ 2 เป็นส่วนของอาคารที่จอดรถสูง 6 ชั้น อยู่ด้านข้างอาคารหลักซึ่งมีความสูง 26.9 ม. กว้าง 31.6 ม. และ ยาว 36.3 ม. ระบบโครงสร้างอาคารที่จอดรถเป็นระบบ เสา คาน และพื้น คสล.เทในที่ สำหรับระบบฐานรากของอาคารเป็นฐานรากแบบเสาเข็มตอกกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 ม. ยาว 22 ม. โดยที่ผนังภายนอกส่วนใหญ่ของอาคารหลักจะเป็นกระจก และในอาคารที่จอดรถผนังภายนอกจะเป็นผนังกันตกสูง 1.5 ม. ดังแสดงในรูป 6.3 และ 6.4

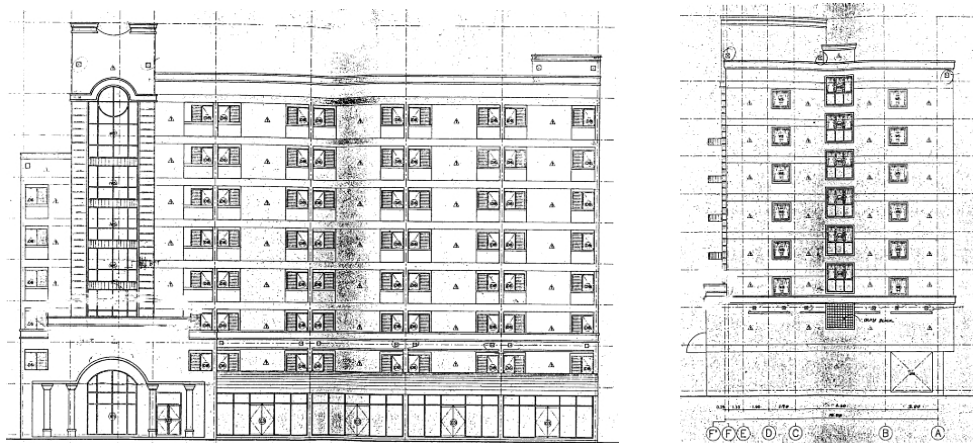
6.1.3 อาคาร C (อาคารสำนักงาน และอาคารเรียน 21 ชั้น)

อาคารนี้เป็นโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก สูง 21 ชั้น ความสูง 102 ม. กว้าง 37 ม. และยาว 51 ม. ระบบโครงสร้างเป็น แบบ เสา คาน พื้น คสล. เทในที่ มีส่วนที่เป็นกำแพงรับแรงเฉือน (Shear Wall) บริเวณกลางอาคารในส่วนที่เป็นโถงลิฟท์ และบันไดหนีไฟ และมีห้องใต้ดินมีความลึกประมาณ 4.50 เมตร สำหรับระบบฐานรากของอาคารเป็นฐานรากแบบเสาเข็มเจาะกลม

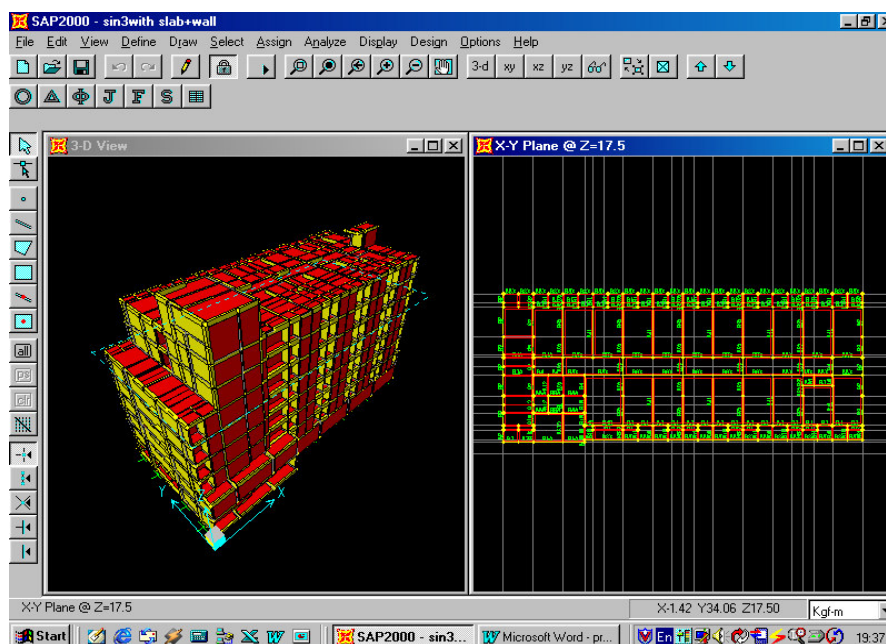
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 ม. และ 1.2 ม. โดยมีผนังอิฐก่อสม่้เสมอทั้งภายนอกและภายใน ดังแสดงในรูป 6.5 และ 6.6

6.1.4 อาคาร D (อาคารเรียน และปฏิบัติการ 6 ชั้น)

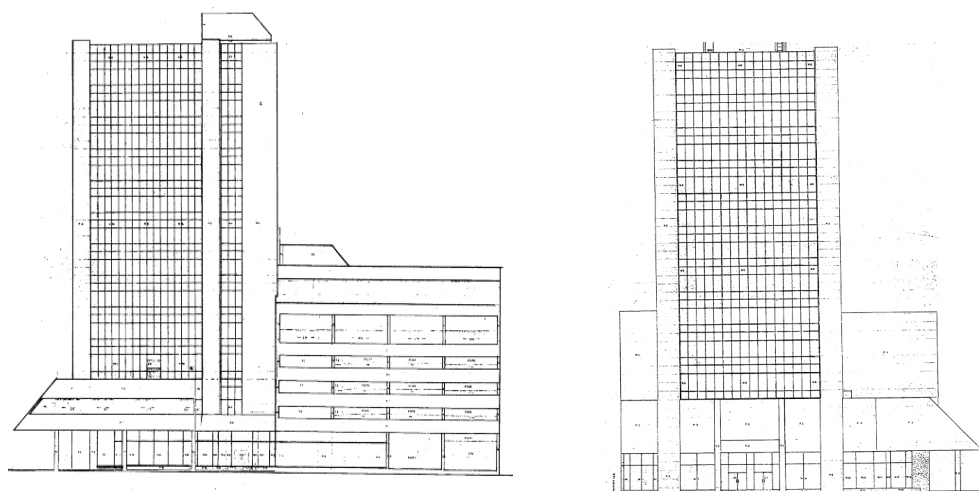
อาคารนี้เป็นโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ตั้งอยู่ในบริเวณมหาวิทยาลัย ธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต มีขนาดความสูง 30.65 ม. กว้าง 15.60 ม. และยาว 39.0 ม. มีกำแพงรับแรงเฉือนบริเวณกลางอาคาร สำหรับระบบฐานรากของอาคารเป็นฐานรากแบบเสาเข็มตอกกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 ม. ยาว 21 ม. โดยมีผนังอิฐก่อสม่้เสมอทั้งภายนอกและภายใน ดังแสดงในรูปที่ 6.7 และ 6.8



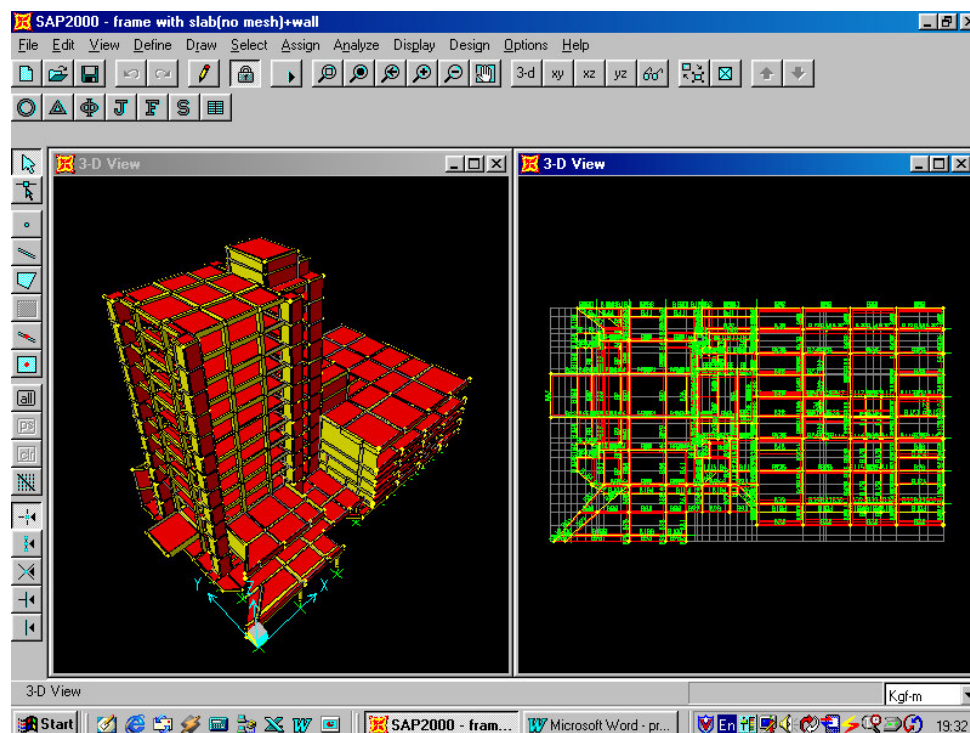
รูปที่ 6.1 รูปด้านข้างของอาคาร A (อาคารพักอาศัย 7 ชั้น)



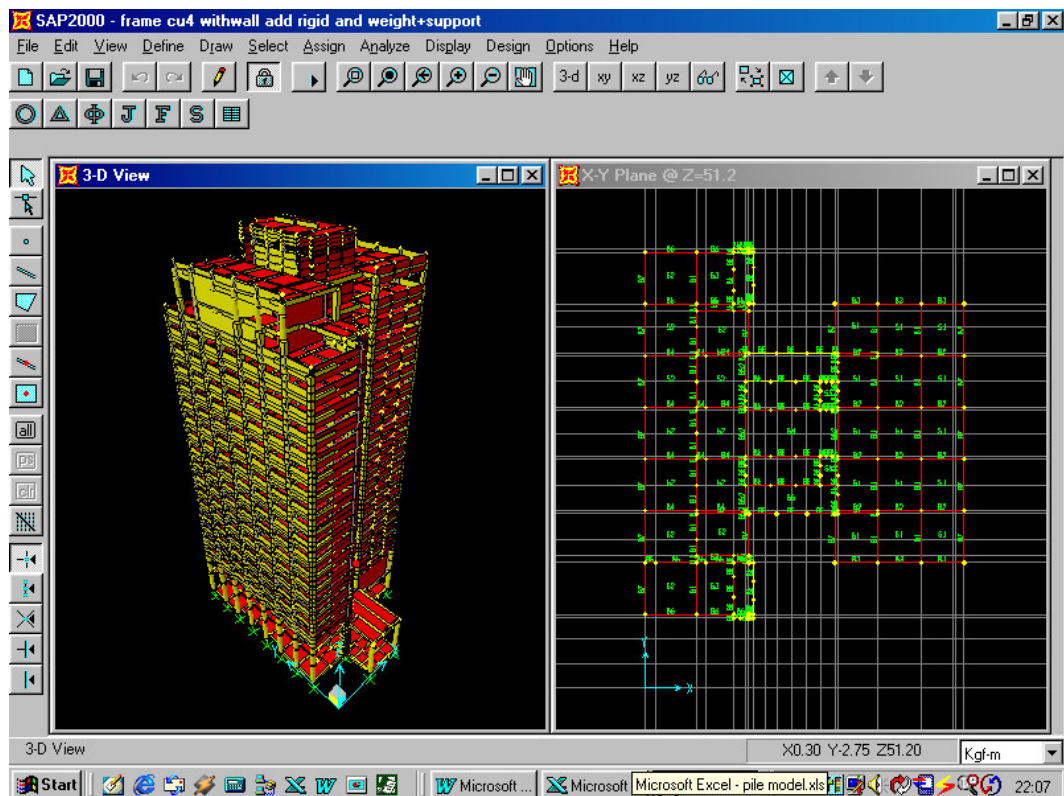
รูปที่ 6.2 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์โดยโปรแกรม SAP2000 ของอาคาร A



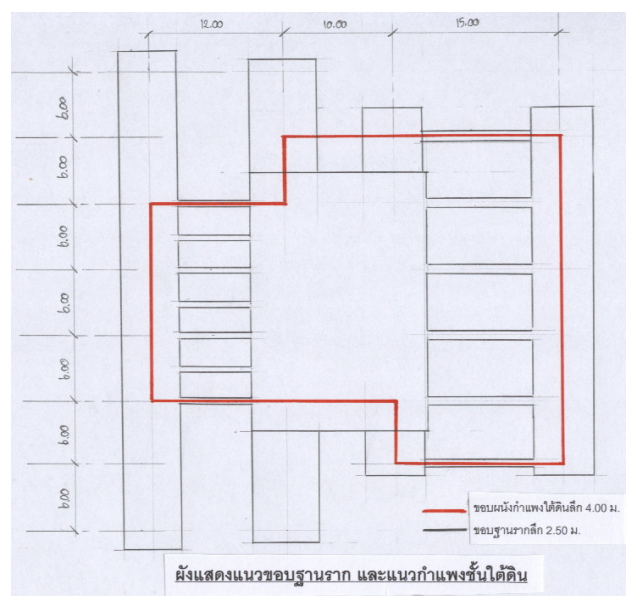
รูปที่ 6.3 รูปด้านข้างของอาคาร B (อาคารสำนักงาน 12 ชั้น)



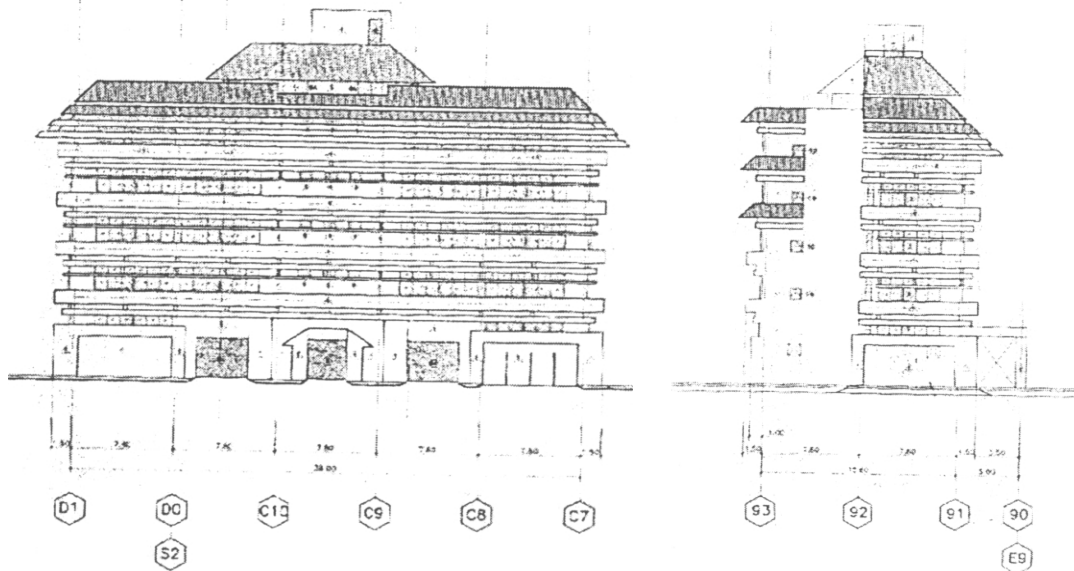
รูปที่ 6.4 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์โดยโปรแกรม SAP2000 ของอาคาร B



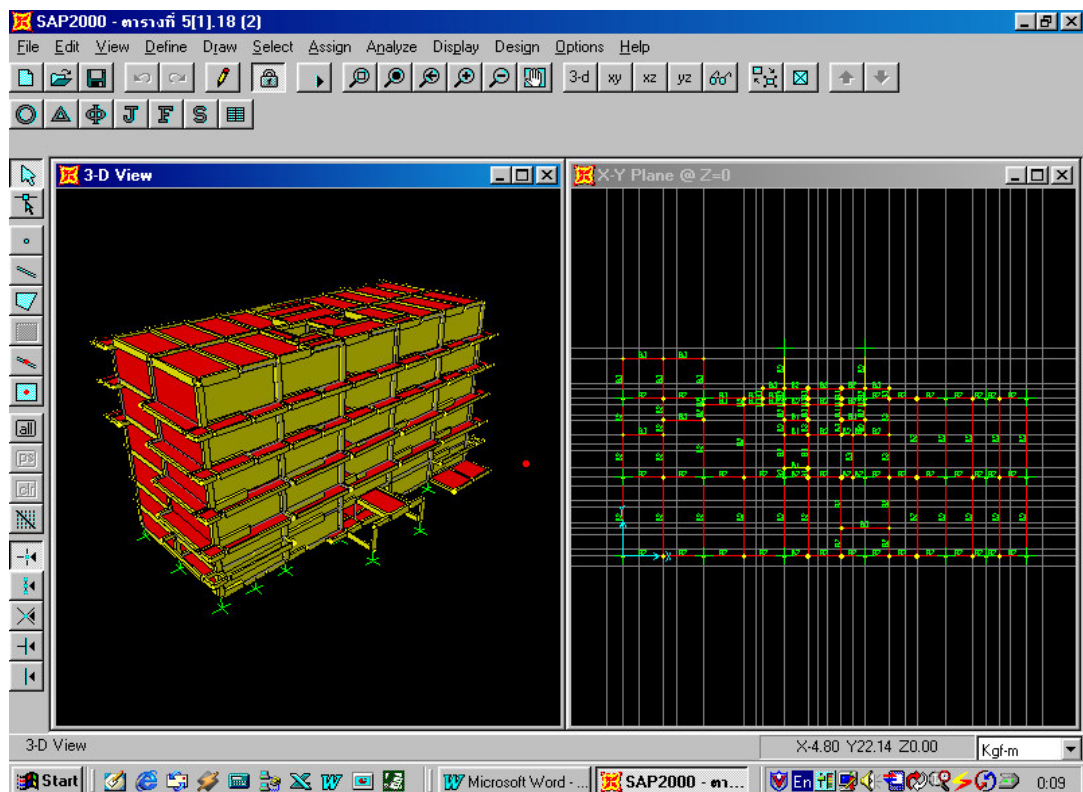
รูปที่ 6.5 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์โดยโปรแกรม SAP2000 ของอาคาร C



รูปที่ 6.6 ผังแนวขอบฐานราก และแนวกำแพงชั้นใต้ดิน



รูปที่ 6.7 รูปด้านของอาคาร D (อาคารเรียน และปฏิบัติการ 6 ชั้น)



รูปที่ 6.8 การสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์โดยโปรแกรม SAP2000 ของอาคาร D

6.2 ผลการตรวจวัด

ในการตรวจวัดอาคารจริง อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย หัววัดการสั่นสะเทือน (Vibration Sensor) ที่มีความไวสูงจำนวน 3 ชุด ซึ่งสามารถวัดการสั่นสะเทือนในแนวราบที่มีระดับต่ำมาก ๆ ได้ และสามารถนำไปติดตั้ง ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของอาคารเพื่อให้การวัดการสั่นสะเทือนพร้อมกันทุก ๆ ตำแหน่งได้ สัญญาณวัดจากหัววัด จะถูกแปลงและเก็บบันทึกในรูปของสัญญาณดิจิทัลโดยเครื่องบันทึกแบบพกพา ซึ่งสามารถปรับอัตราความถี่ในการแปลงสัญญาณ (Sampling Rate) และระยะเวลาของการเก็บบันทึก (Duration of Record) ได้ตามความเหมาะสม หลังจากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติ และรูปแบบของการสั่นไหว (Vibration Mode Shape) โดยใช้หลักการ Fourier Spectral Ratio ที่เสนอโดย Trifunac ซึ่งได้ค่าคาบการสั่นไหวดังแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่าคาบการสั่นไหวของอาคารต่าง ๆ ที่ได้จากการตรวจวัดจริง

อาคาร	ค่าคาบจากการตรวจวัดจริง(Sec.)		
	Transverse	Longitudinal	Torsion
อาคาร A (อาคารพักอาศัย 7 ชั้น)	0.446	0.377	0.348
อาคาร B (อาคารสำนักงาน 12 ชั้น)	0.934	0.826	-
อาคาร C (อาคารสำนักงาน และอาคารเรียน 21 ชั้น)	1.780	1.690	1.310
อาคาร D (อาคารเรียน และปฏิบัติการ 6 ชั้น) ⁽¹⁾	0.455	0.395	0.360

อาคารเรียน และปฏิบัติการ(6ชั้น)⁽¹⁾ (เฉลิมชัย เกียรติเรืองภมลา , 2001)

6.3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของตัวอย่างอาคารจริง

6.3.1 ผลการวิเคราะห์การแบ่งย่อยใน Frame และ Element ในแบบจำลองของอาคารจริง

ในการศึกษาวิเคราะห์การแบ่งย่อย (Mesh) ใน Frame และ Element ในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของอาคารจริงนั้น การศึกษาจะทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ตามแบบก่อสร้างของอาคารนั้น ๆ ตามสมมุติฐานและค่าคุณสมบัติของวัสดุต่าง ๆ ตามที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 และทำการวิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์โดยพิจารณาจากค่าคาบของการสั่นไหว โดยจะพิจารณาตามรูปร่างการสั่นไหว (Mode Shape) ของอาคาร 3 แบบหลัก คือ รูปร่างการสั่นไหวตามขวางของอาคาร (Transverse), รูปร่างการสั่นไหวตามยาว ของอาคาร (Longitudinal) และ รูปร่างการสั่นไหวแบบบิดตัวของอาคาร (Torsion) และจะทำการเปรียบเทียบค่าคาบของการสั่นไหวที่ได้จากการตรวจวัดอาคารจริงกับค่าคาบการสั่นไหวที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ที่มีการการแบ่งย่อย (Mesh) ใน Frame และ Element โดยที่การแบ่งย่อย (Mesh) ในชิ้นส่วนพื้น นั้นจะพิจารณาตามรูปแบบของพื้นในอาคารนั้น ๆ ซึ่งได้ผลการศึกษาตามตารางที่ 6.2 และ 6.3

ในการศึกษาวิเคราะห์การแบ่งย่อย (Mesh) ใน Frame และ Element ในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์นั้น จะทำการศึกษาจากตัวอย่างอาคาร 2 อาคาร คือ อาคาร A (อาคารพักอาศัย 7 ชั้น) และอาคาร B (อาคารสำนักงาน 12 ชั้น) ทั้งนี้เพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นจากการแบ่งย่อย (Meshing) ในอาคารที่มีรูปร่างปกติ กับอาคารที่มีรูปร่างไม่ปกติ กล่าวคือ อาคาร A เป็นอาคารที่มีความสมมาตรกันในแต่ละทิศทาง แต่ อาคาร B เป็นอาคารที่มีรูปร่างอาคารไม่มีความสมมาตรกันในแต่ละทิศทาง สำหรับตัวอย่างอาคารอื่น ๆ จะไม่นำมาพิจารณาการแบ่งย่อย (Mesh) ใน Frame และ Element ทั้งนี้เนื่องจากการศึกษาในแบบจำลองของอาคารที่มีขนาดใหญ่ จะต้องใช้ขีดความสามารถในด้านความเร็ว และหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ที่สูงมาก

ตารางที่ 6.2 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวเนื่องจากการแบ่งย่อย (mesh) ใน Frame และ Element (Slab ,Wall) ของอาคาร A (อาคารพักอาศัย 7 ชั้น)

Mode	Meshing				
	W/O mesh	Slab Element	Difference	Wall Element	Difference
Transverse	0.491	0.482	-1.89%	0.493	+0.51%
Longitudinal	0.469	0.465	-0.91%	0.473	+0.85%
Torsion	0.368	0.365	-0.60%	0.370	+0.63%

ตารางที่ 6.3 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวเนื่องจากการแบ่งย่อย (mesh) ใน Frame และ Element (Slab ,Wall) ของอาคาร B (อาคารสำนักงาน 12 ชั้น)

Mode	Meshing				
	W/O mesh	Slab Element	Difference	Wall Element	Difference
Transverse	1.3932	1.3252	-4.88%	1.3945	+0.09%
Longitudinal	1.2054	1.1736	-2.64%	1.2069	+1.24%
Torsion	0.7029	0.6545	-6.88%	0.7067	+0.54%

อาคาร A (อาคารพักอาศัย 7 ชั้น) เป็นอาคารที่มีรูปร่างปกติ กล่าวคือ มีความสมมาตรในแต่ละทิศทาง และมีกำแพงอิฐก่อภายนอกสม่ำเสมอ ดังนั้นจากค่าที่ได้ตามตารางที่ 6.2 พบว่า การแบ่งย่อย (meshing) ในชั้นส่วนพื้น และชั้นส่วนกำแพง มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคาบการสั่นไหวเล็กน้อย คือ ลดลงเพียง 1.89 % ในรูปร่างการสั่นไหวตามขวางซึ่งมีค่าน้อยมาก และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการศึกษากการแบ่งย่อย (meshing) ที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 จะเห็นว่ามีผลที่สอดคล้องกัน

อาคาร B (อาคารสำนักงาน 12 ชั้น) เป็นอาคารที่มีรูปร่างไม่ปกติ กล่าวคือ ไม่มีความสมมาตรในแต่ละทิศทาง และมีกำแพงอิฐก่อภายนอกค่อนข้างน้อย ดังนั้นจากค่าที่ได้ตามตารางที่ 6.3 พบว่า การแบ่งย่อย (meshing) ในชั้นส่วนพื้น มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคาบการสั่นไหวในทิศทางตามขวาง ทิศทางตามยาว และรูปร่างแบบบิดตัว คือ ลดลง 4.88% , 2.64% , และ 6.88% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าค่อนข้างมากโดยเฉพาะในรูปร่างการสั่นไหวแบบบิดตัว แต่การแบ่งย่อย (meshing) ในชั้นส่วนกำแพงนั้นจะมีผลทำให้ค่าคาบการสั่นไหวเปลี่ยนแปลงไป เพียงเล็กน้อยเท่านั้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการศึกษากการแบ่งย่อย (meshing) ที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 จะเห็นว่ามีผลที่สอดคล้องกัน

6.3.2 การพิจารณาผลของแบบจำลองฐานรากแบบยืดหยุ่น และห้องใต้ดิน

ในการศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบเนื่องจากระบบฐานรากของอาคาร รวมถึงการพิจารณาผลกระทบของห้องใต้ดิน ต่อค่าคาบการสั่นไหวของอาคารนั้น โดยจะทำการสร้างแบบจำลองของฐานรากเป็นแบบยืดหยุ่น (Flexible Foundation) รวมถึงพิจารณาผลของห้องใต้ดินในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของตัวอย่างอาคารที่ศึกษา ตามวิธีการที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 5 และนำมาวิเคราะห์หาค่าคาบการสั่นไหวจากแบบจำลองดังกล่าว และนำค่าคาบการสั่นไหวที่ได้ไปเปรียบเทียบกับ ค่าที่วิเคราะห์ได้จากแบบจำลองที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดแน่น รวมถึงเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวที่ตรวจวัดได้จากอาคารจริง โดยที่จะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าคาบของการสั่นไหว โดยจะพิจารณาตามรูปร่างการสั่นไหว (Mode Shape) ของอาคาร 3 แบบหลัก คือ รูปร่างการสั่นไหวตามขวางของอาคาร (Transverse) , รูปร่างการสั่นไหวตามยาวของอาคาร (Longitudinal) และ รูปร่างการสั่นไหวแบบบิดตัวของอาคาร (Torsion) ในการพิจารณาแบบจำลองฐานรากแบบยืดหยุ่นนั้น จะทำการพิจารณาเงื่อนไขของหัวเสาเข็มทั้ง 2 กรณี คือ กรณีหัวเสาเข็มอิสระ (Free Head Pile Model) และ กรณีหัวเสาเข็มแบบต้านทานการหมุน (Fixed Head Pile Model) ดังแสดงค่าในตารางที่ 6.4 - 6.6

ในการศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบเนื่องจากระบบฐานรากของอาคารในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์นั้น จะทำการศึกษาจากตัวอย่างอาคาร 3 อาคาร คือ อาคาร A (อาคารพักอาศัย 7 ชั้น), อาคาร C (อาคารสำนักงาน และอาคารเรียน 21 ชั้น), และ อาคาร D (อาคารเรียน และปฏิบัติการ 6 ชั้น) เนื่องจากเป็นอาคารที่มีรูปร่างปกติ กล่าวคือ มีความสมมาตรในแต่ละทิศทาง แต่สำหรับอาคาร B ซึ่งเป็นอาคารที่มีรูปร่างอาคารไม่มีความสมมาตรกันในแต่ละทิศทางนั้น จะไม่นำมาพิจารณาศึกษา

ตารางที่ 6.4 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการพิจารณาฐานรากแบบยึดหยุ่นของอาคาร C (อาคารสำนักงาน และอาคารเรียน 21 ชั้น)

Mode	Measurement	Fixed Support	Flexible Support-Free Head		Flexible Support-Fixed Head	
			Not Include Basement ⁽¹⁾	Include Basement ⁽²⁾	Not Include Basement ⁽¹⁾	Include Basement ⁽²⁾
Transverse	1.78	1.680(-5.6%)	1.929(+8.4%)	1.928(+8.3%) ⁽³⁾	1.892(+6.3%)	1.891(+8.4%)
Longitudinal	1.69	1.363(-19.3%)	1.609(-4.8%)	1.608(-4.9%)	1.558(-7.8%)	1.558(-7.8%)
Torsion	1.31	1.021(-22.7%)	1.275(-2.7%)	1.273(-2.9%)	1.204(-8.1%)	1.203(-8.2%)

Not Include Basement⁽¹⁾ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น ไม่พิจารณาผลของห้องใต้ดิน

Include Basement⁽²⁾ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น รวมถึงผลของห้องใต้ดิน

(³) เป็นค่า % ความแตกต่างของค่าคาบการสั่นไหวที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง

ตารางที่ 6.5 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการพิจารณาฐานรากในรูปแบบต่าง ๆ ของอาคาร A (อาคารพักอาศัย 7 ชั้น)

Mode	Measurement	Fixed Support	Flexible Support	
			Free Head ⁽¹⁾	Fixed Head ⁽²⁾
Transverse	0.377	0.361(-4.4%)	0.434(+15.3%) ⁽³⁾	0.403(+6.9%)
Longitudinal	0.446	0.405(-9.1%)	0.507(+13.8%)	0.483(+8.3%)
Torsion	0.348	0.319(-8.1%)	0.391(+12.3%)	0.359(+3.2%)

Free Head ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น พิจารณาหัวเสาเข็มเป็นแบบอิสระ

Fixed Head ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น พิจารณาหัวเสาเข็มเป็นแบบต้านทานการสั่นไหว

(³) เป็นค่า % ความแตกต่างของค่าคาบการสั่นไหวที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง

ตารางที่ 6.6 การเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวจากการพิจารณาฐานรากในรูปแบบต่าง ๆ ของอาคาร D (อาคารเรียน และปฏิบัติการ 6 ชั้น) (เฉลิมชัย เกียรติเรืองกมล,2001)

Mode	Measurement	Fixed Support	Flexible Support	
			Free Head ⁽¹⁾	Fixed Head ⁽²⁾
Transverse	0.395	0.376(-4.7%)	0.528(+33.6%) ⁽³⁾	0.428(+8.4%)
Longitudinal	0.454	0.465(+2.4%)	0.602(+32.5%)	0.520(+14.5%)
Torsion	0.359	0.356(-0.8%)	0.512(+42.5%)	0.408(+13.6%)

Free Head⁽¹⁾ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น พิจารณาหัวเสาเข็มเป็นแบบอิสระ

Fixed Head⁽²⁾ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น พิจารณาหัวเสาเข็มเป็นแบบต้านทานการสั่นไหว

()⁽³⁾ เป็นค่า % ความแตกต่างของค่าคาบการสั่นไหวที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง

ผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของตัวอย่างอาคารทั้ง 3 อาคาร คือ อาคาร A (อาคารพักอาศัย 7 ชั้น), อาคาร C (อาคารสำนักงาน และอาคารเรียน 21 ชั้น), และอาคาร D (อาคารเรียน และปฏิบัติการ 6 ชั้น) (เฉลิมชัย เกียรติเรืองกมล,2001) โดยทำการพิจารณาเปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหว ที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของอาคาร โดยจะพิจารณาผลกระทบเนื่องจากการสร้างแบบจำลองฐานรากแบบต่าง ๆ จะเห็นว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดแน่นนั้น ค่าคาบการสั่นไหวของอาคารทั้ง 3 แบบหลัก คือ รูปร่างการสั่นไหวตามขวางของอาคาร (Transverse) , รูปร่างการสั่นไหวตามยาวของอาคาร (Longitudinal) และ รูปร่างการสั่นไหวแบบบิดตัวของอาคาร (Torsion) จะต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดจากอาคารจริง และในการพิจารณาระบบฐานรากแบบยึดหยุ่นจะพิจารณาหัวเสาเข็มทั้ง 2 กรณี คือ กรณีหัวเสาเข็มอิสระ(Free Head Pile Model) และ กรณีหัวเสาเข็มแบบต้านทานการหมุน (Fixed Head Pile Model) ซึ่งมีผลทำให้ค่าคาบการสั่นไหวที่ได้จากแบบจำลอง มีค่าสูงขึ้นกว่าค่าที่ได้จากการพิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดแน่น

ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ของอาคาร C (อาคารสำนักงาน และอาคารเรียน 21 ชั้น) ซึ่งได้พิจารณาสร้างแบบจำลองห้องใต้ดินเพิ่มเติม นั้น จะทำให้ค่าคาบการสั่นไหวที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ลดลงจากการที่ไม่พิจารณาห้องใต้ดินเพียงเล็กน้อยเท่านั้น กล่าวคือไม่ถึง 0.2%

ในการพิจารณาศึกษาการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยพิจารณาระบบฐานรากแบบยึดหยุ่นในตัวอย่างอาคารจริงทั้ง 3 อาคารนี้ จะพบว่าการสร้างแบบจำลองฐานรากแบบยึดหยุ่นในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของอาคาร ที่มีความสูงมากกว่าจะให้ค่าคาบการสั่นไหวของ

อาคารมีค่าใกล้เคียงกับค่าคาบการสั่นไหวที่ได้จากการตรวจวัดมากขึ้นกว่าการพิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดแน่น และในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของตัวอย่างอาคารที่มีความสูงน้อยกว่าหรือเป็นรูปแบบอาคารเตี้ย การพิจารณาสร้างแบบจำลองฐานรากแบบยึดแน่นนั้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าคาบการสั่นไหวมาก ซึ่งอาจทำให้ค่าคาบการสั่นไหวที่ได้มีความแตกต่างกับการตรวจวัดจริงมากกว่าการพิจารณาฐานรากเป็นแบบยึดแน่น ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของอาคารจริงโดยพิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดแน่นนั้น ได้ใช้ค่าคุณสมบัติวัสดุที่ได้มีการปรับแก้ ซึ่งทำให้ค่าคาบการสั่นไหวของแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงแล้ว ดังนั้นเมื่อพิจารณาระบบฐานรากแบบยึดแน่นเพิ่มเติมในอาคารที่มีความสูงไม่มากนัก จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าคาบการสั่นไหวอย่างมาก

นอกจากนั้น ผลการศึกษานี้ยังเป็นการอธิบายถึง ผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างดินกับโครงสร้าง (Soil-Structure Interaction, SSI) ซึ่งผลของ SSI จะมีผลกระทบสูงสำหรับอาคารที่มีสติฟเนสของโครงสร้างสูงเมื่อเทียบกับสติฟเนสของฐานราก เช่น อาคารเตี้ย แต่ผลของ SSI จะลดลงสำหรับอาคารสูงที่มีสติฟเนสของโครงสร้างต่ำเมื่อเทียบกับสติฟเนสของฐานราก

6.4 ผลการวิเคราะห์รูปร่างของการสั่นไหว

จากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ในแต่ละอาคาร สามารถวิเคราะห์รูปร่างการสั่นไหวได้ดังต่อไปนี้

6.4.1 อาคาร C (อาคารสำนักงาน และอาคารเรียน 21 ชั้น)

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ของอาคาร C (อาคารสำนักงาน และอาคารเรียน 21 ชั้น) จากค่าคุณสมบัติของวัสดุ และสมมติฐานต่าง ๆ ในการสร้างแบบจำลอง ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 รวมถึงการพิจารณารูปแบบของฐานรากแบบต่าง ๆ สามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าการสั่นไหวได้ตามตารางที่ 6.7 – 6.12 และสามารถเขียนรูปแสดงการสั่นไหวของอาคารได้ดังรูปที่ 6.9-6.14

จากการวิเคราะห์รูปแบบการสั่นไหวของอาคาร C (อาคารสำนักงาน และอาคารเรียน 21 ชั้น) โดยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ตามค่าที่ได้ในตารางที่ 6.7 – 6.12 นั้น สามารถตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการสั่นไหวของอาคาร ได้ด้วยวิธี MAC ตามสมการที่ 3.9 ซึ่งจากการคำนวณจะได้ค่า MAC ตามตารางที่ 6.13 พบว่าค่า MAC ในแนวต่าง ๆ ที่ได้ แสดงว่ารูป

แบบการสันไหวของอาคารจากการสร้าง แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์นั้นมีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ดีเมื่อเทียบกับรูปแบบการสันไหวที่ได้จากการตรวจวัดจริง แต่อย่างไรก็ตามการพิจารณา ระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่นโดยพิจารณาหั่วเสาเข็มทั้ง 2 กรณี ก็ไม่ได้ทำให้ค่า MAC มีความถูกต้องขึ้นอย่างชัดเจนแต่อย่างไร

เมื่อทำการพิจารณาจากค่าการเคลื่อนที่ในแนวราบที่ตำแหน่งฐานรากแทนนั้นจะพบว่า การพิจารณาระบบฐานรากแบบยึดหยุ่นนั้น จะให้ค่าการเคลื่อนที่ที่ตำแหน่งฐานรากใกล้เคียงกับค่าการตรวจวัด โดยที่ในการเคลื่อนที่ในรูปร่างการสันไหวตามขวาง หรือ ตามยาวของอาคารนั้น ระบบฐานรากแบบยึดหยุ่นที่พิจารณาหั่วเสาเข็มเป็นแบบอิสระ จะให้ค่าการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดกว่าหั่วเสาเข็มแบบยึดรั้ง แต่เมื่อพิจารณารูปร่างการสันไหวในแบบบิดตัวของอาคารนั้นการพิจารณาหั่วเสาเข็มเป็นแบบต้านทานการหมุนจะให้ค่าการเคลื่อนที่ ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดว่าการพิจารณาหั่วเสาเข็มเป็นแบบอิสระ และในการพิจารณาแบบจำลองห้องใต้ดินเพิ่มเติมนั้นจะทำให้ค่า MAC เปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ตารางที่ 6.7 ค่าการสั่นไหว และอัตราส่วนของการเคลื่อนที่ของชั้นต่าง ๆ ในรูปร่างการสั่นไหวตามขวาง ของอาคาร C (อาคารสำนักงาน และอาคารเรียน 21 ชั้น) โดยพิจารณาห้วงเส้าเพิ่มเป็นแบบอิสระ

Transverse	Measurement	Fixed Support		Flexible Support ⁽¹⁾		Flexible Support ⁽²⁾	
Level	Normalise	Disp.(x10 ⁻⁴)	Normalise	Disp.(x10 ⁻⁴)	Normalise	Disp.(x10 ⁻⁴)	Normalise
0	0.05	0.000	0.000	0.302	0.045	0.294	0.044
1	0.12	-0.295	0.007	0.376	0.056	0.368	0.055
2	0.15	-0.556	0.043	0.757	0.112	0.750	0.111
3	0.2	-0.862	0.080	1.042	0.154	1.035	0.153
4	0.25	-1.203	0.125	1.357	0.201	1.351	0.200
5	0.3	-1.553	0.174	1.697	0.251	1.691	0.250
6	0.34	-1.937	0.224	2.033	0.301	2.028	0.300
7	0.4	-2.335	0.280	2.392	0.354	2.387	0.354
8	0.46	-2.767	0.337	2.757	0.409	2.753	0.408
9	0.51	-3.203	0.400	3.146	0.466	3.143	0.465
10	0.57	-3.663	0.463	3.536	0.524	3.533	0.523
11	0.59	-4.119	0.529	3.940	0.584	3.938	0.583
12	0.67	-4.591	0.595	4.339	0.643	4.338	0.642
13	0.71	-5.055	0.663	4.748	0.704	4.748	0.703
14	0.77	-5.529	0.730	5.150	0.763	5.150	0.763
15	0.81	-5.989	0.799	5.557	0.823	5.558	0.823
16	0.82	-6.457	0.865	5.953	0.882	5.954	0.882
17	0.92	-6.920	0.933	6.353	0.941	6.355	0.941
18	1	-7.374	1.000	6.749	1.000	6.752	1.000

Flexible Support ¹⁾ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น

Flexible Support ²⁾ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น รวมถึงผลของห้องใต้ดิน

ตารางที่ 6.8 ค่าการสั่นไหว และอัตราส่วนของการเคลื่อนที่ของชั้นต่าง ๆ ในรูปร่างการสั่นไหวตามขวางของอาคาร C (อาคารสำนักงาน และอาคารเรียน 21 ชั้น) โดยพิจารณาหั่วเสาเข็มเป็นแบบด้านทานการหมุน

Transverse	Measurement	Fixed Support		Flexible Support ⁽¹⁾		Flexible Support ⁽²⁾	
Level	Normalise	Disp.(x10 ⁻⁴)	Normalise	Disp.(x10 ⁻⁴)	Normalise	Disp.(x10 ⁻⁴)	Normalise
0	0.05	0.000	0.000	0.101	0.015	0.100	0.015
1	0.12	-0.295	0.007	0.175	0.026	0.174	0.026
2	0.15	-0.556	0.043	0.564	0.083	0.563	0.083
3	0.2	-0.862	0.080	0.857	0.126	0.856	0.126
4	0.25	-1.203	0.125	1.184	0.174	1.183	0.174
5	0.3	-1.553	0.174	1.537	0.226	1.536	0.226
6	0.34	-1.937	0.224	1.887	0.277	1.887	0.277
7	0.4	-2.335	0.280	2.260	0.332	2.260	0.332
8	0.46	-2.767	0.337	2.642	0.388	2.642	0.388
9	0.51	-3.203	0.400	3.047	0.447	3.047	0.447
10	0.57	-3.663	0.463	3.453	0.507	3.453	0.507
11	0.59	-4.119	0.529	3.874	0.569	3.874	0.569
12	0.67	-4.591	0.595	4.291	0.630	4.291	0.630
13	0.71	-5.055	0.663	4.718	0.693	4.718	0.693
14	0.77	-5.529	0.730	5.138	0.755	5.138	0.755
15	0.81	-5.989	0.799	5.563	0.817	5.563	0.817
16	0.82	-6.457	0.865	5.977	0.878	5.977	0.878
17	0.92	-6.920	0.933	6.395	0.939	6.395	0.939
18	1	-7.374	1.000	6.809	1.000	6.809	1.000

Flexible Support ¹⁾ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น

Flexible Support ²⁾ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น รวมถึงผลของห้องใต้ดิน

ตารางที่ 6.9 ค่าการสั่นไหว และอัตราส่วนของการเคลื่อนที่ของชั้นต่าง ๆ ในรูปร่างการสั่นไหวตามยาวของอาคาร C (อาคารสำนักงาน และอาคารเรียน 21 ชั้น) โดยพิจารณาหั่วเสาเข็มเป็นแบบอิสระ

Longitudinal	Measurement.	Fixed Support		Flexible Support ⁽¹⁾		Flexible Support ⁽²⁾	
Level	Normalise	Disp.(x10 ⁻⁴)	Normalise	Disp.(x10 ⁻⁴)	Normalise	Disp.(x10 ⁻⁴)	Normalise
0	0.082	0.000	0.000	0.557	0.093	0.548	0.092
1	0.130	-0.665	0.039	0.803	0.134	0.794	0.133
2	0.170	-1.118	0.112	1.307	0.219	1.299	0.217
3	0.210	-1.509	0.188	1.719	0.287	1.712	0.286
4	0.260	-1.880	0.254	2.090	0.349	2.083	0.348
5	0.310	-2.206	0.316	2.439	0.408	2.433	0.407
6	0.360	-2.530	0.371	2.761	0.462	2.756	0.461
7	0.410	-2.854	0.426	3.064	0.512	3.060	0.512
8	0.410	-3.176	0.480	3.355	0.561	3.351	0.560
9	0.500	-3.497	0.535	3.638	0.608	3.634	0.607
10	0.560	-3.816	0.589	3.914	0.655	3.911	0.654
11	0.610	-4.133	0.642	4.186	0.700	4.184	0.699
12	0.630	-4.445	0.696	4.453	0.745	4.452	0.744
13	0.710	-4.755	0.748	4.716	0.789	4.716	0.788
14	0.740	-5.059	0.800	4.976	0.832	4.976	0.832
15	0.800	-5.358	0.852	5.232	0.875	5.232	0.875
16	0.820	-5.652	0.902	5.484	0.917	5.485	0.917
17	0.890	-5.941	0.951	5.733	0.959	5.735	0.959
18	1.000	-6.233	1.000	5.980	1.000	5.982	1.000

Flexible Support ¹⁾ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น

Flexible Support ²⁾ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น รวมถึงผลของห้องใต้ดิน

ตารางที่ 6.10 ค่าการสั่นไหว และอัตราส่วนของการเคลื่อนที่ของชั้นต่าง ๆ ในรูปร่างการสั่นไหวตามยาว ของอาคาร C (อาคารสำนักงาน และอาคารเรียน 21 ชั้น) โดยพิจารณาห้วงเสาเข็มเป็นแบบต้านทานการหมุน

Longitudinal	Measurement.	Fixed Support		Flexible Support ⁽¹⁾		Flexible Support ⁽²⁾	
Level	Normalise	Disp.(x10 ⁻⁴)	Normalise	Disp.(x10 ⁻⁴)	Normalise	Disp.(x10 ⁻⁴)	Normalise
0	0.082	0.000	0.000	0.251	0.042	0.250	0.041
1	0.130	-0.665	0.039	0.511	0.085	0.510	0.084
2	0.170	-1.118	0.112	1.045	0.173	1.044	0.173
3	0.210	-1.509	0.188	1.482	0.245	1.481	0.245
4	0.260	-1.880	0.254	1.876	0.310	1.875	0.310
5	0.310	-2.206	0.316	2.248	0.372	2.247	0.372
6	0.360	-2.530	0.371	2.590	0.429	2.590	0.429
7	0.410	-2.854	0.426	2.914	0.482	2.914	0.482
8	0.410	-3.176	0.480	3.225	0.534	3.225	0.534
9	0.500	-3.497	0.535	3.527	0.584	3.527	0.584
10	0.560	-3.816	0.589	3.824	0.633	3.824	0.633
11	0.610	-4.133	0.642	4.115	0.681	4.115	0.681
12	0.630	-4.445	0.696	4.402	0.728	4.402	0.728
13	0.710	-4.755	0.748	4.685	0.775	4.685	0.775
14	0.740	-5.059	0.800	4.964	0.821	4.964	0.821
15	0.800	-5.358	0.852	5.239	0.867	5.239	0.867
16	0.820	-5.652	0.902	5.511	0.912	5.511	0.912
17	0.890	-5.941	0.951	5.779	0.956	5.779	0.956
18	1.000	-6.233	1.000	6.044	1.000	6.044	1.000

Flexible Support ¹⁾ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น

Flexible Support ²⁾ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น รวมถึงผลของห้องใต้ดิน

ตารางที่ 6.11 ค่าการสั่นไหว และอัตราส่วนของการเคลื่อนที่ของชั้นต่าง ๆ ในรูปร่างการสั่นไหวแบบบิดตัวของอาคาร C (อาคารสำนักงาน และอาคารเรียน 21 ชั้น) โดยพิจารณาห้วงเสาเข็มเป็นแบบอิสระ

Torsion	Measurement.	Fixed Support		Flexible Support ⁽¹⁾		Flexible Support ⁽²⁾	
Level	Normalise	Disp.(x10 ⁻⁴)	Normalise	Disp.(x10 ⁻⁴)	Normalise	Disp.(x10 ⁻⁴)	Normalise
0	0.04	0.000	0.000	0.806	0.150	0.792	0.147
1	0.16	-1.396	0.060	1.125	0.209	1.113	0.207
2	0.23	-2.219	0.255	2.248	0.418	2.239	0.416
3	0.33	-2.823	0.406	2.866	0.533	2.860	0.532
4	0.36	-3.206	0.516	3.330	0.619	3.325	0.618
5	0.44	-3.473	0.586	3.626	0.674	3.622	0.673
6	0.47	-3.704	0.635	3.830	0.712	3.827	0.712
7	0.64	-3.901	0.678	4.006	0.745	4.003	0.744
8	0.46	-4.096	0.714	4.157	0.773	4.155	0.773
9	0.56	-4.272	0.749	4.304	0.800	4.303	0.800
10	0.74	-4.449	0.782	4.440	0.826	4.439	0.825
11	0.65	-4.612	0.814	4.575	0.851	4.574	0.851
12	0.82	-4.775	0.844	4.702	0.874	4.701	0.874
13	0.88	-4.925	0.874	4.828	0.898	4.828	0.898
14	0.88	-5.073	0.901	4.946	0.920	4.946	0.920
15	0.99	-5.207	0.928	5.062	0.941	5.063	0.941
16	0.84	-5.338	0.953	5.171	0.962	5.171	0.962
17	0.93	-5.462	0.977	5.276	0.981	5.277	0.981
18	1.00	-5.576	1.000	5.377	1.000	5.378	1.000

Flexible Support ¹⁾ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น

Flexible Support ²⁾ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น รวมถึงผลของห้องใต้ดิน

ตารางที่ 6.12 ค่าการสั่นไหว และอัตราส่วนของการเคลื่อนที่ของชั้นต่าง ๆ ในรูปร่างการสั่น
 ไหวแบบบิดตัวของอาคาร C (อาคารสำนักงาน และอาคารเรียน 21 ชั้น) โดยพิจารณาห้วงเสาเข็ม
 เป็นแบบต้านทานการหมุน

Torsion	Measurement.	Fixed Support		Flexible Support ⁽¹⁾		Flexible Support ⁽²⁾	
Level	Normalise	Disp.(x10 ⁻⁴)	Normalise	Disp.(x10 ⁻⁴)	Normalise	Disp.(x10 ⁻⁴)	Normalise
0	0.04	0.000	0.000	0.364	0.067	0.362	0.067
1	0.16	-1.396	0.060	0.718	0.132	0.716	0.132
2	0.23	-2.219	0.255	1.964	0.362	1.962	0.361
3	0.33	-2.823	0.406	2.649	0.488	2.648	0.488
4	0.36	-3.206	0.516	3.166	0.583	3.165	0.583
5	0.44	-3.473	0.586	3.496	0.644	3.495	0.644
6	0.47	-3.704	0.635	3.722	0.685	3.722	0.685
7	0.64	-3.901	0.678	3.917	0.721	3.917	0.721
8	0.46	-4.096	0.714	4.085	0.752	4.085	0.752
9	0.56	-4.272	0.749	4.248	0.782	4.248	0.782
10	0.74	-4.449	0.782	4.398	0.810	4.398	0.810
11	0.65	-4.612	0.814	4.547	0.837	4.547	0.837
12	0.82	-4.775	0.844	4.687	0.863	4.687	0.863
13	0.88	-4.925	0.874	4.826	0.889	4.826	0.889
14	0.88	-5.073	0.901	4.957	0.913	4.957	0.913
15	0.99	-5.207	0.928	5.085	0.936	5.085	0.936
16	0.84	-5.338	0.953	5.204	0.958	5.204	0.958
17	0.93	-5.462	0.977	5.320	0.980	5.320	0.980
18	1.00	-5.576	1.000	5.431	1.000	5.431	1.000

Flexible Support ¹⁾ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น

Flexible Support ²⁾ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น รวมถึงผลของห้องใต้ดิน

ตารางที่ 6.13 ค่า MAC ที่ได้จากอาคาร C (อาคารสำนักงาน และอาคารเรียน 21 ชั้น) โดย
พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดแน่น และแบบยึดหยุ่น

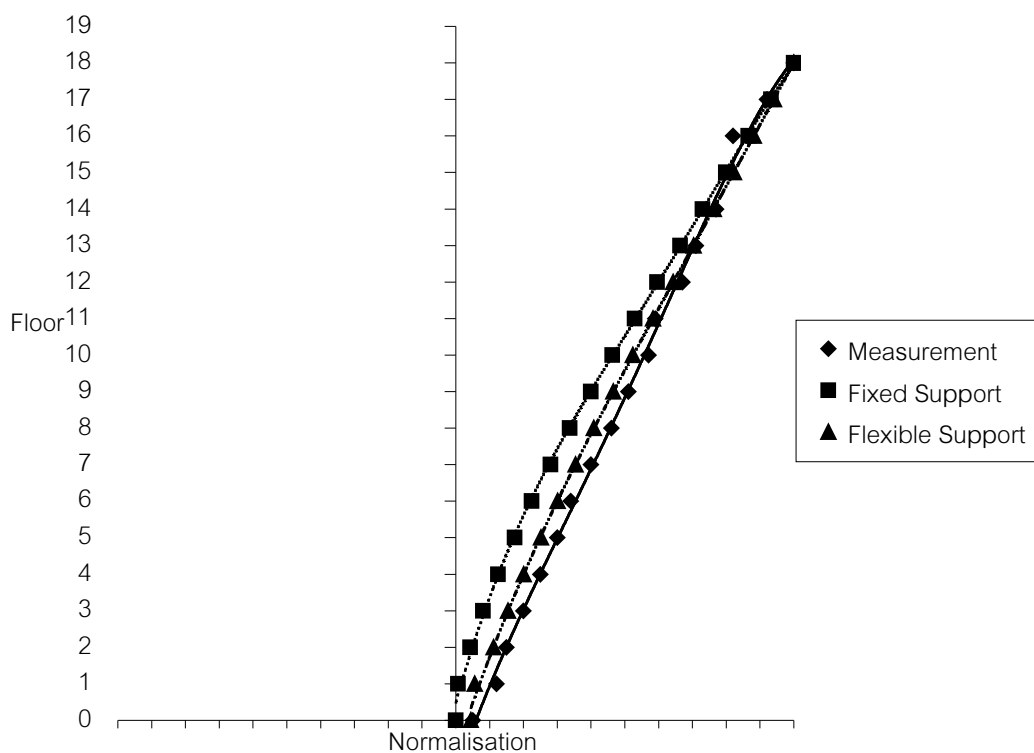
Mode	ค่า MAC				
	Fixed Support	Flexible Support-Free Head ⁽¹⁾		Flexible Support-Fixed Head ⁽²⁾	
		NIC Basement ⁽³⁾	Incl.Basement ⁽⁴⁾	NIC Basement ⁽³⁾	Incl.Basement ⁽⁴⁾
Transverse	0.9790	0.9957	0.9956	0.9914	0.9914
Longitudinal	0.9954	0.9939	0.9941	0.9960	0.9960
Torsion	0.9819	0.9691	0.9693	0.9754	0.9754

¹⁾ พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น (Flexible Support) โดยพิจารณาหัวเสาเข็มเป็นแบบอิสระ

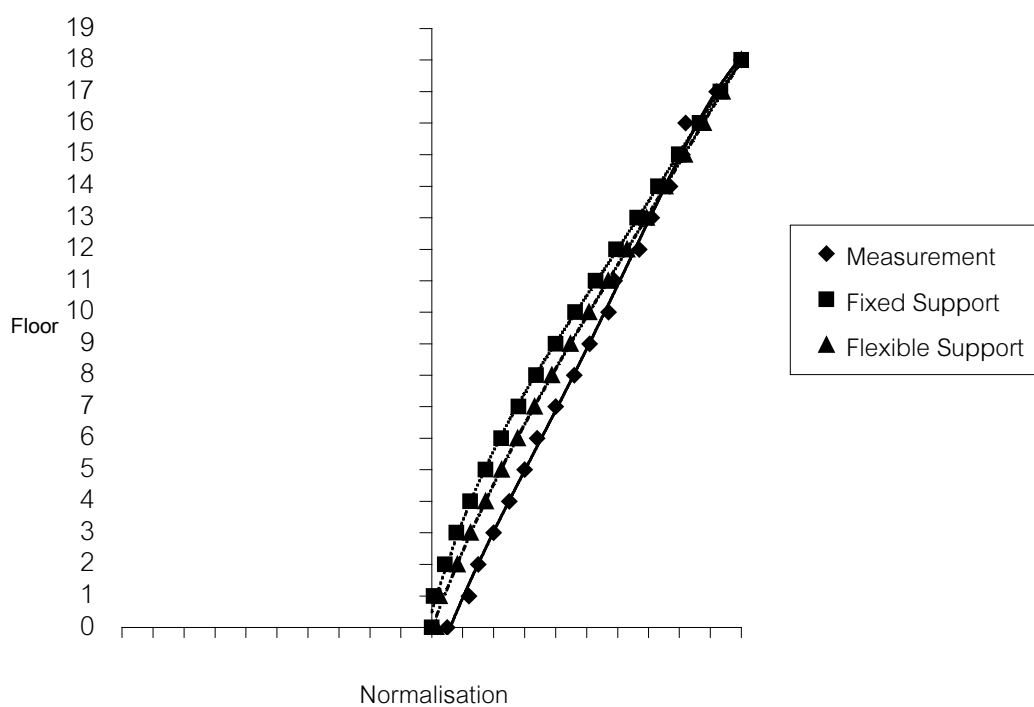
²⁾ พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น (Flexible Support) โดยพิจารณาหัวเสาเข็มเป็นแบบต้านทานการหมุน

³⁾ พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่นโดยไม่พิจารณาผลของห้องใต้ดิน

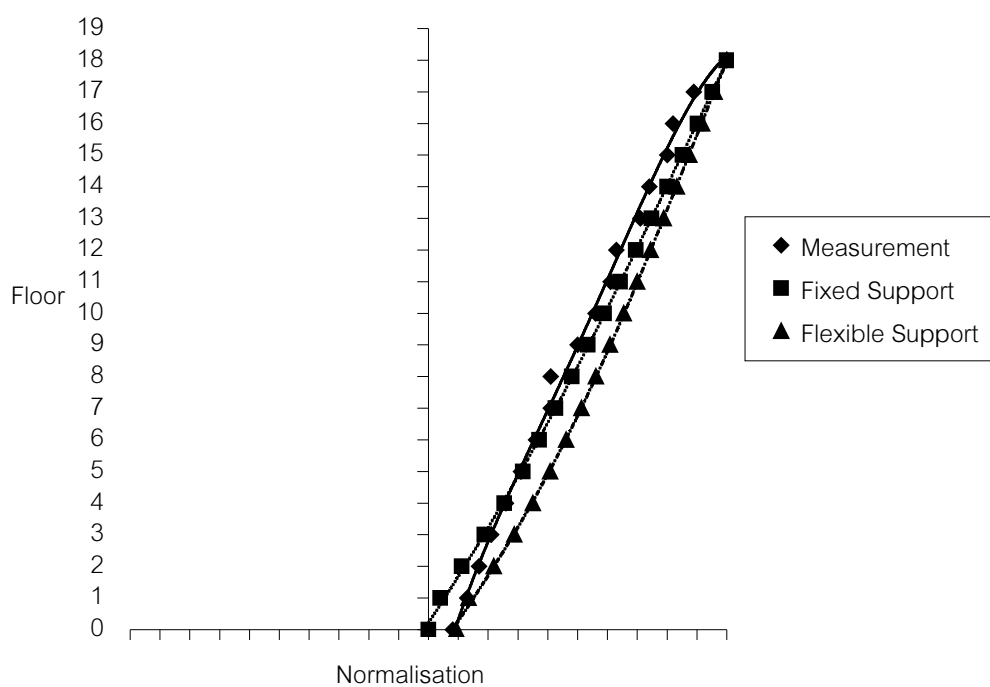
⁴⁾ พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่นโดยพิจารณาผลของห้องใต้ดิน



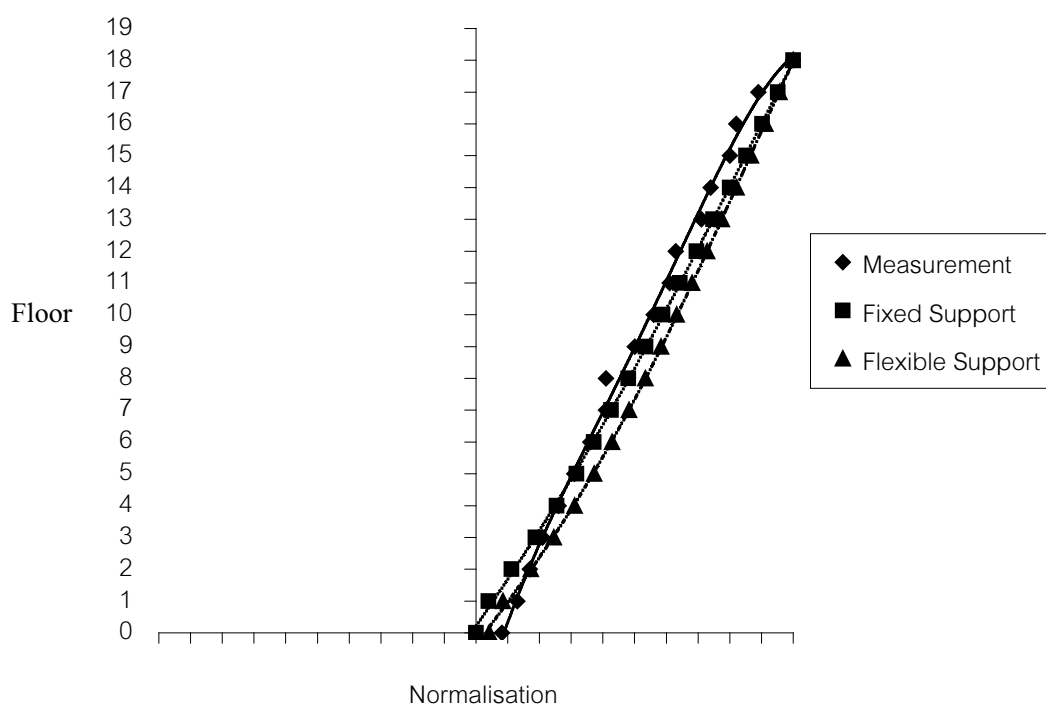
รูปที่ 6.9 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทางตามขวางของอาคาร C หัวเสาเข็มแบบอิสระ



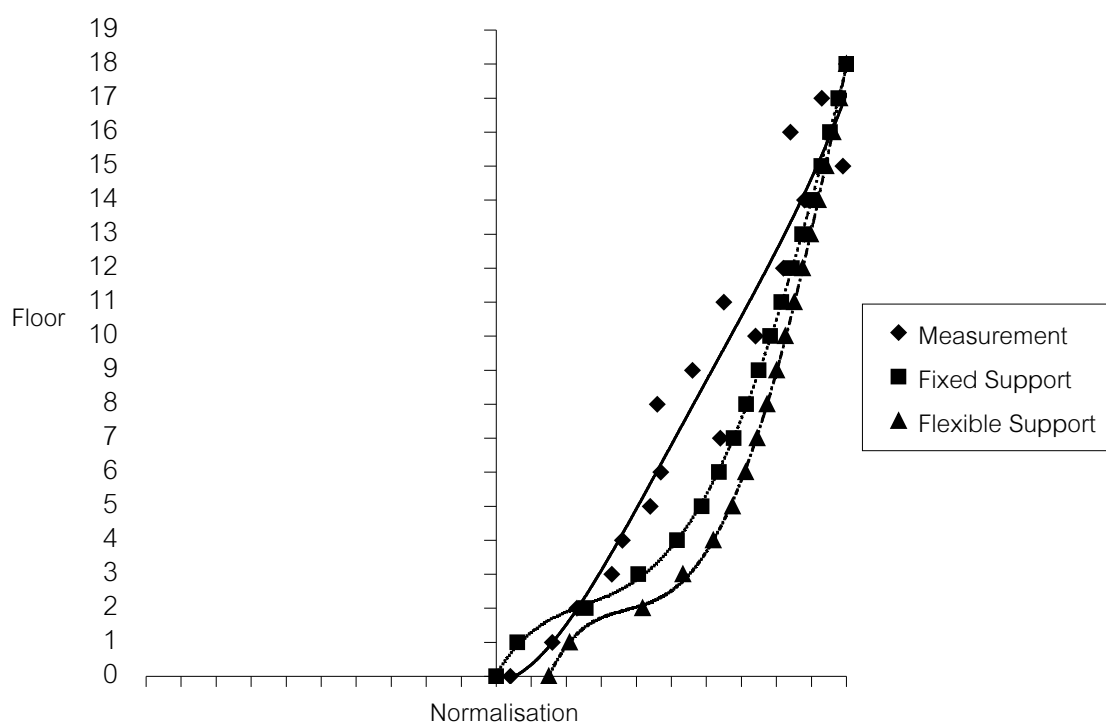
รูปที่ 6.10 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทางตามขวางของอาคาร C หัวเสาเข็มแบบต้านทานการหมุน



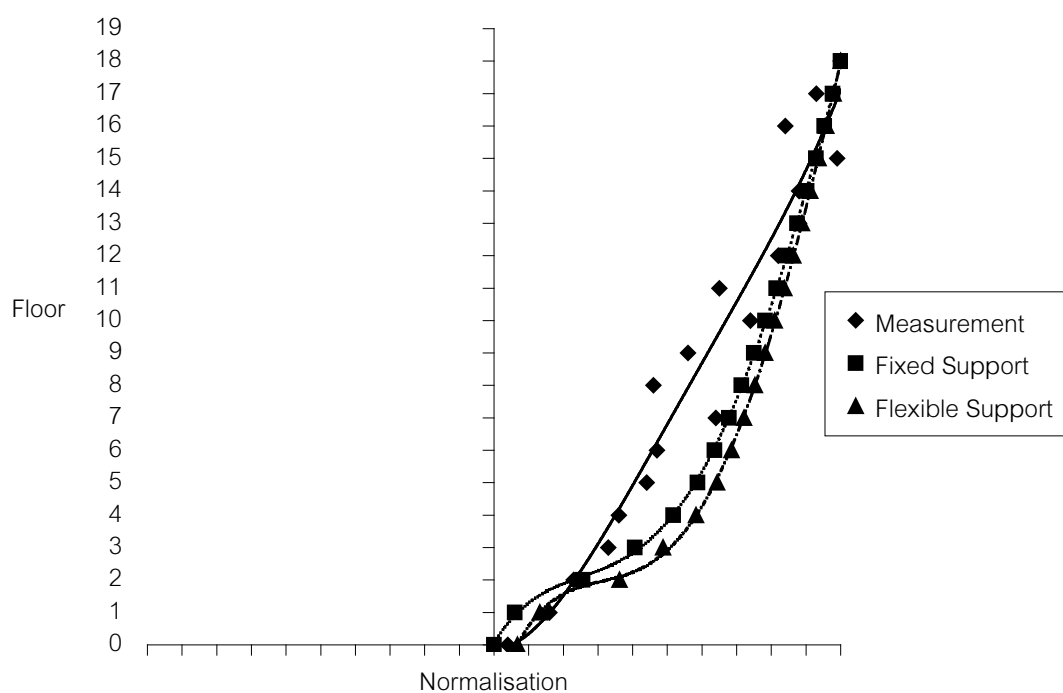
รูปที่ 6.11 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทางตามยาวของอาคาร C หัวเสาเข็มแบบอิสระ



รูปที่ 6.12 รูปร่างการสั่นไหวในทิศทางตามยาวของอาคาร C หัวเสาเข็มแบบต้านทานการหมุน



รูปที่ 6.13 รูปร่างการสั่นไหวแบบบิดตัวของอาคาร C หัวเสาเข็มแบบอิสระ



รูปที่ 6.14 รูปร่างการสั่นไหวแบบบิดตัวของอาคาร C หัวเสาเข็มแบบต้านทานการหมุน

6.4.2 อาคาร A (อาคารพักอาศัย 7 ชั้น)

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ของอาคาร A (อาคารพักอาศัย 7 ชั้น) จากค่าคุณสมบัติของวัสดุ และสมมติฐานต่าง ๆ ในการสร้างแบบจำลอง ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 รวมถึงการพิจารณารูปแบบของฐานรากแบบต่าง ๆ สามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าการสั่นไหวได้ตามตารางที่ 6.14 – 6.16 และสามารถเขียนรูปแสดงการสั่นไหวของอาคารได้ดังรูปที่ 6.15-6.17

จากการวิเคราะห์รูปแบบการสั่นไหวของอาคาร A (อาคารพักอาศัย 7 ชั้น) โดยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ตามค่าที่ได้ในตารางที่ 6.14 – 6.16 นั้น สามารถตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการสั่นไหวของอาคาร ได้ด้วยวิธี MAC ตามสมการที่ 3.9 ซึ่งจากการคำนวณจะได้ค่า MAC ตามตารางที่ 6.17 พบว่าค่า MAC ในแนวต่าง ๆ ที่ได้ แสดงว่ารูปแบบการสั่นไหวของอาคารจากการสร้าง แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์นั้นมีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ดีเมื่อเทียบกับรูปแบบการสั่นไหวที่ได้จากการตรวจวัดจริง ในการพิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุนโดยพิจารณาหั่วเสาเข็มทั้ง 2 กรณี สำหรับอาคารสินสิริแมนชั่น 3 นั้น ทำให้ค่า MAC มีความถูกต้องขึ้น โดยที่ในการพิจารณารูปร่างการสั่นไหวตามขวาง และ ตามยาวของอาคารนั้นการพิจารณาหั่วเสาเข็มเป็นแบบอิสระนั้นจะให้ค่า MAC มีความถูกต้องกว่าการพิจารณาหั่วเสาเข็มเป็นแบบต้านทานการหมุน แต่เมื่อพิจารณารูปร่างการสั่นไหวแบบบิดตัว พบว่ารูปแบบหั่วเสาเข็มแบบต้านทานการหมุนจะให้ค่า MAC มีความถูกต้องกว่ารูปแบบหั่วเสาเข็มแบบอิสระ

ตารางที่ 6.14 ค่าการสั่นไหว และอัตราส่วนของการเคลื่อนที่ของชั้นต่าง ๆ ในรูปร่างการสั่นไหวตามขวางของอาคาร A (อาคารพักอาศัย 7 ชั้น)

Transverse	Measurement	Fixed Support		Flexible-Free Head ⁽¹⁾		Flexible-Fixed Head ⁽²⁾	
		Disp($\times 10^{-4}$)	Normalise	Disp($\times 10^{-4}$)	Normalise	Disp($\times 10^{-4}$)	Normalise
0	0.280	0.000	0.000	2.143	0.198	0.875	0.081
1	0.390	3.772	0.302	4.826	0.447	3.931	0.364
2	0.400	5.988	0.479	6.399	0.593	5.724	0.530
3	0.530	7.752	0.620	7.567	0.701	7.052	0.653
4	0.590	9.191	0.735	8.519	0.789	8.137	0.753
5	0.750	10.400	0.832	9.313	0.862	9.047	0.838
6	0.800	11.300	0.904	9.965	0.923	9.797	0.907
7	0.870	12.000	0.960	10.400	0.963	10.300	0.954
8	1.000	12.500	1.000	10.800	1.000	10.800	1.000

Flexible Support ¹ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น พิจารณาหัวเสาเข็มเป็นแบบอิสระ

Flexible Support ¹ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น พิจารณาหัวเสาเข็มเป็นแบบต้านทานการหมุน

ตารางที่ 6.15 ค่าการสั่นไหว และอัตราส่วนของการเคลื่อนที่ของชั้นต่าง ๆ ในรูปร่างการสั่นไหวตามยาวของอาคาร A (อาคารพักอาศัย 7 ชั้น)

Longitudinal	Measurement	Fixed Support		Flexible-Free Head ⁽¹⁾		Flexible-Fixed Head ⁽²⁾	
		Disp($\times 10^{-4}$)	Normalise	Disp($\times 10^{-4}$)	Normalise	Disp($\times 10^{-4}$)	Normalise
0	0.160	0.000	0.000	-1.616	0.097	0.598	0.034
1	0.410	3.184	0.180	-4.837	0.290	4.180	0.239
2	0.430	5.515	0.312	-6.759	0.405	6.329	0.362
3	0.530	7.741	0.437	-8.572	0.513	8.363	0.478
4	0.710	9.958	0.563	-10.400	0.623	10.400	0.594
5	0.770	12.100	0.684	-12.100	0.725	12.300	0.703
6	0.830	14.000	0.791	-13.700	0.820	14.100	0.806
7	0.890	16.000	0.904	-15.200	0.910	15.900	0.909
8	1.000	17.700	1.000	-16.700	1.000	17.500	1.000

Flexible Support ¹ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น พิจารณาหัวเสาเข็มเป็นแบบอิสระ

Flexible Support ¹ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น พิจารณาหัวเสาเข็มเป็นแบบต้านทานการหมุน

ตารางที่ 6.16 ค่าการสั่นไหว และอัตราส่วนของการเคลื่อนที่ของชั้นต่าง ๆ ในรูปร่างการสั่นไหวแบบบิดตัวของอาคาร A (อาคารพักอาศัย 7 ชั้น)

Torsion	Measurement	Fixed Support		Flexible-Free Head ⁽¹⁾		Flexible-Fixed Head ⁽²⁾	
LEV	Normalise	Disp($\times 10^{-4}$)	Normalise	Disp($\times 10^{-4}$)	Normalise	Disp($\times 10^{-4}$)	Normalise
0	0.070	0.000	0.000	-2.528	0.199	-1.042	0.076
1	0.320	-2.717	0.214	-4.962	0.391	-4.002	0.292
2	0.400	-4.378	0.345	-6.326	0.498	-5.687	0.415
3	0.540	-6.335	0.499	-7.867	0.619	-7.586	0.554
4	0.680	-8.060	0.635	-9.206	0.725	-9.246	0.675
5	0.760	-9.515	0.749	-10.300	0.811	-10.700	0.781
6	0.810	-10.700	0.843	-11.200	0.882	-11.800	0.861
7	0.870	-11.800	0.929	-12.100	0.953	-12.900	0.942
8	1.000	-12.700	1.000	-12.700	1.000	-13.700	1.000

Flexible Support ¹⁾ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น พิจารณาห้วเสาเข็มเป็นแบบอิสระ

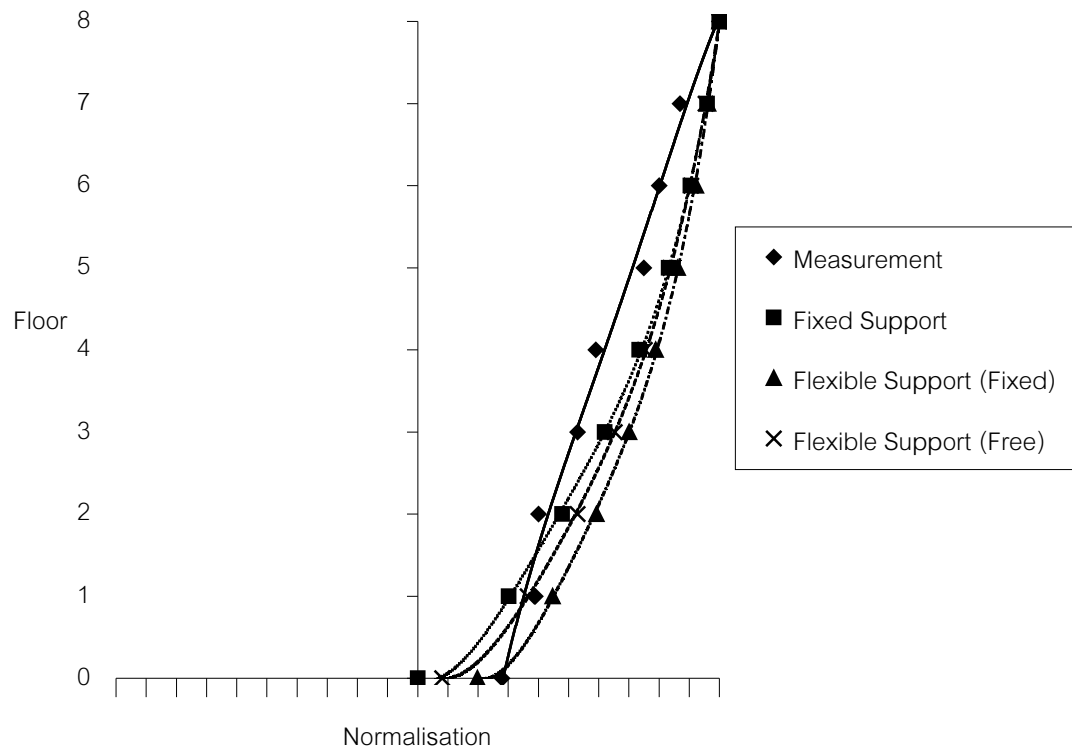
Flexible Support ¹⁾ ค่าคาบการสั่นไหวที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น พิจารณาห้วเสาเข็มเป็นแบบต้านทานการหมุน

ตารางที่ 6.17 ค่า MAC ที่ได้จากอาคาร A (อาคารพักอาศัย 7 ชั้น) โดยพิจารณาฐานรากเป็นแบบยึดแน่น และยึดหยุ่น

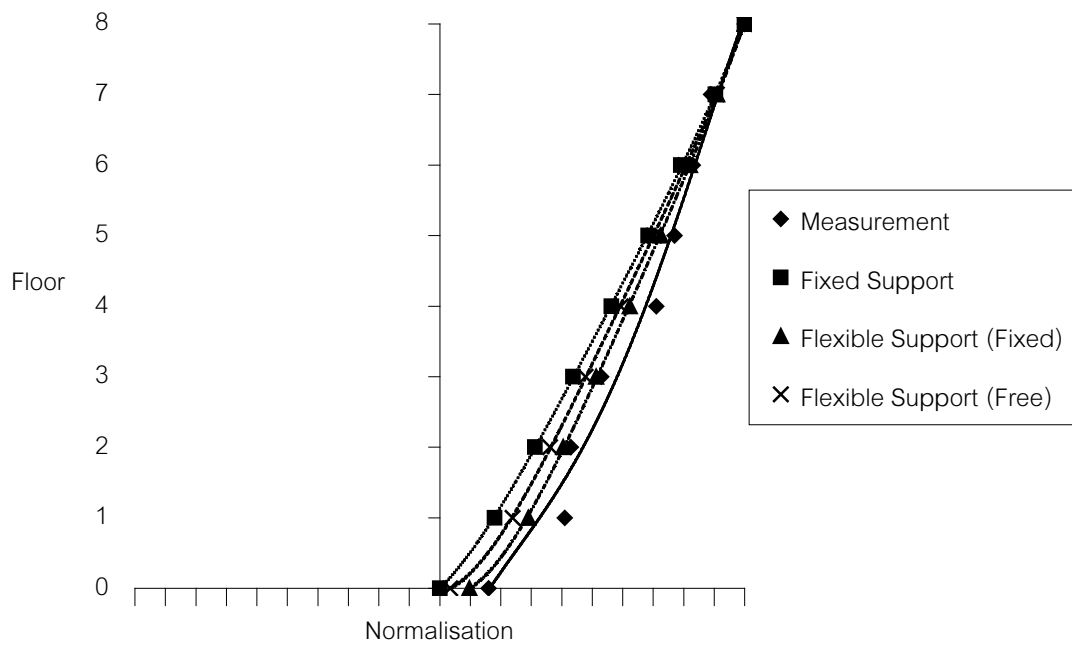
Mode	ค่า MAC		
	Fixed Support	Flexible-Free Head ⁽¹⁾	Flexible-Fixed Head ⁽²⁾
Transverse	0.9726	0.9853	0.9814
Longitudinal	0.9741	0.9942	0.9861
Torsion	0.9932	0.9937	0.9987

¹⁾ พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น (Flexible Support) โดยพิจารณาห้วเสาเข็มเป็นแบบอิสระ

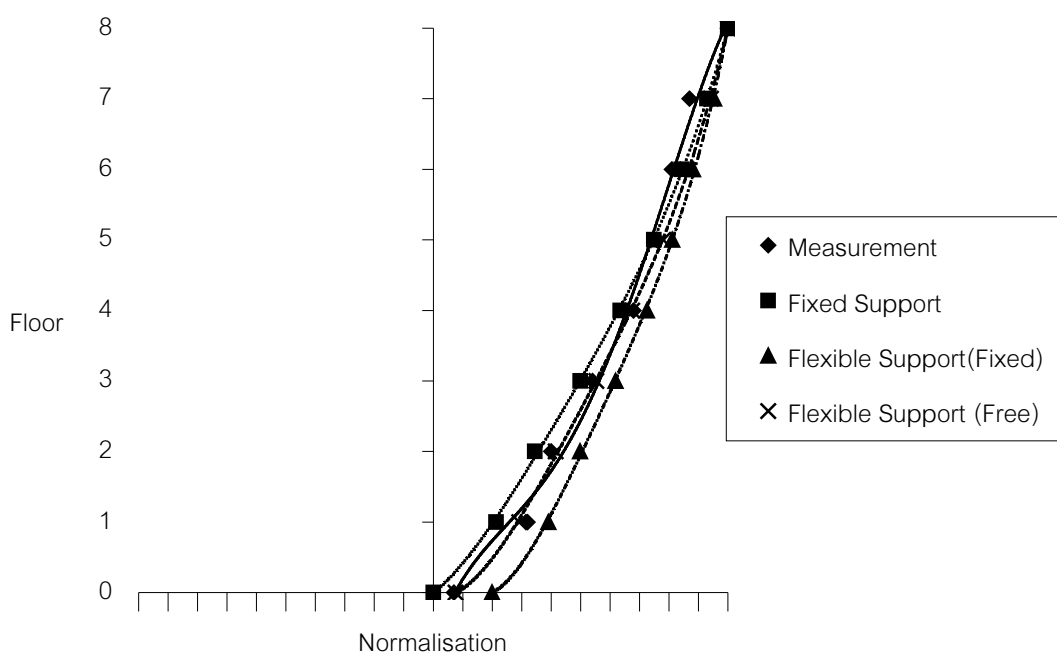
²⁾ พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น (Flexible Support) โดยพิจารณาห้วเสาเข็มเป็นแบบต้านทานการหมุน



รูปที่ 6.15 รูปร่างการสั่นไหวตามขวางของอาคาร A



รูปที่ 6.16 รูปร่างการสั่นไหวตามยาวของอาคาร A



รูปที่ 6.17 รูปร่างการสั่นไหวแบบบิดตัวของอาคาร A

6.4.3 อาคาร D (อาคารเรียน และปฏิบัติการ 6 ชั้น) (เฉลิมชัย เกียรติเรืองภมรา .2001)

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ของอาคาร D (อาคารเรียน และปฏิบัติการ 6 ชั้น) จากค่าคุณสมบัติของวัสดุ และสมมติฐานต่าง ๆ ในการสร้างแบบจำลอง ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 รวมถึงการพิจารณารูปแบบของฐานรากแบบต่าง ๆ สามารถนำมาวิเคราะห์หาค่าการสั่นไหวได้ตามตารางที่ 6.18 – 6.20 และสามารถเขียนรูปแสดงการสั่นไหวของอาคารได้ดังรูปที่ 6.18-6.20

จากการวิเคราะห์รูปแบบการสั่นไหวของอาคาร D (อาคารเรียน และปฏิบัติการ 6 ชั้น) โดยการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ตามค่าที่ได้ในตารางที่ 6.18 – 6.20 นั้น สามารถตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการสั่นไหวของอาคาร ได้ด้วยวิธี MAC ตามสมการที่ 3.9 ซึ่งจากการคำนวณจะได้ค่า MAC ตามตารางที่ 6.21 พบว่าค่า MAC ในแนวต่าง ๆ ที่ได้ แสดงว่ารูปแบบการสั่นไหวของอาคารจากการสร้าง แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์นั้นมีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ดีเมื่อเทียบกับรูปแบบการสั่นไหวที่ได้จากการตรวจวัดจริง ในการพิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่นโดยพิจารณาห้วงเสาเข็มทั้ง 2 กรณี นั้น จะทำให้ค่า MAC มีความถูกต้องขึ้น โดยที่การ

พิจารณาหัวเสาเข็มเป็นแบบต้านทานการหมุนนั้นจะให้ค่า MAC มีความถูกต้องกว่าการพิจารณาหัวเสาเข็มเป็นแบบอิสระ

ตารางที่ 6.18 ค่าการสั่นไหว และอัตราส่วนของการเคลื่อนที่ของชั้นต่าง ๆ ในรูปร่างการสั่นไหวตามขวางของอาคาร D (อาคารเรียน และปฏิบัติการ 6 ชั้น)

Transverse	Measurement	Fixed Support	Flexible-Free Head ⁽¹⁾		Flexible-Fixed Head ⁽²⁾	
LEV	Normalise	Normalise	Disp($\times 10^{-4}$)	Normalise	Disp($\times 10^{-4}$)	Normalise
0	0.000	0.000	3.052	0.132	1.033	0.052
1	0.200	0.316	7.505	0.325	5.664	0.283
2	0.400	0.519	11.151	0.483	9.193	0.460
3	0.600	0.716	15.667	0.678	13.200	0.660
4	0.800	0.863	19.805	0.857	17.000	0.850
5	1.000	1.000	23.100	1.000	20.000	1.000

Flexible Support⁽¹⁾ เป็นค่าที่ได้จากการพิจารณาระบบฐานรากแบบยึดหยุ่น พิจารณาหัวเสาเข็มเป็นแบบอิสระ

Flexible Support⁽²⁾ เป็นค่าที่ได้จากการพิจารณาระบบฐานรากแบบยึดหยุ่น พิจารณาหัวเสาเข็มเป็นแบบต้านทานการหมุน

ตารางที่ 6.19 ค่าการสั่นไหว และอัตราส่วนของการเคลื่อนที่ของชั้นต่าง ๆ ในรูปร่างการสั่นไหวตามยาวของอาคาร D (อาคารเรียน และปฏิบัติการ 6 ชั้น)

Longitudinal	Measurement	Fixed Support	Flexible-Free Head ⁽¹⁾		Flexible-Fixed Head ⁽²⁾	
LEV	Normalise	Normalise	Disp($\times 10^{-4}$)	Normalise	Disp($\times 10^{-4}$)	Normalise
0	0.172	0.000	4.387	0.221	2.642	0.141
1	0.377	0.364	7.325	0.369	6.153	0.327
2	0.552	0.583	10.739	0.541	9.737	0.518
3	0.700	0.779	14.510	0.731	13.400	0.713
4	0.821	0.910	17.567	0.885	16.500	0.878
5	1.000	1.000	19.850	1.000	18.800	1.000

Flexible Support⁽¹⁾ เป็นค่าที่ได้จากการพิจารณาระบบฐานรากแบบยึดหยุ่น พิจารณาหัวเสาเข็มเป็นแบบอิสระ

Flexible Support⁽²⁾ เป็นค่าที่ได้จากการพิจารณาระบบฐานรากแบบยึดหยุ่น พิจารณาหัวเสาเข็มเป็นแบบต้านทานการหมุน

ตารางที่ 6.20 ค่าการสั่นไหว และอัตราส่วนของการเคลื่อนที่ของชั้นต่าง ๆ ในรูปร่างการสั่นไหวแบบบิดตัวของอาคาร D (อาคารเรียน และปฏิบัติการ 6 ชั้น)

Torsion	Measurement	Fixed Support	Flexible-Free Head ⁽¹⁾		Flexible-Fixed Head ⁽²⁾	
LEV	Normalise	Normalise	Disp(x10 ⁻⁴)	Normalise	Disp(x10 ⁻⁴)	Normalise
0	0.094	0.000	0.676	0.275	0.403	0.194
1	0.289	0.404	1.008	0.410	0.763	0.368
2	0.492	0.656	1.358	0.552	1.096	0.529
3	0.691	0.823	1.778	0.723	1.460	0.705
4	0.887	0.931	2.192	0.892	1.832	0.885
5	1.000	1.000	2.458	1.000	2.071	1.000

Flexible Support⁽¹⁾ เป็นค่าที่ได้จากการพิจารณาระบบฐานรากแบบยึดหยุ่น พิจารณาหั่วเสาเข็มเป็นแบบอิสระ

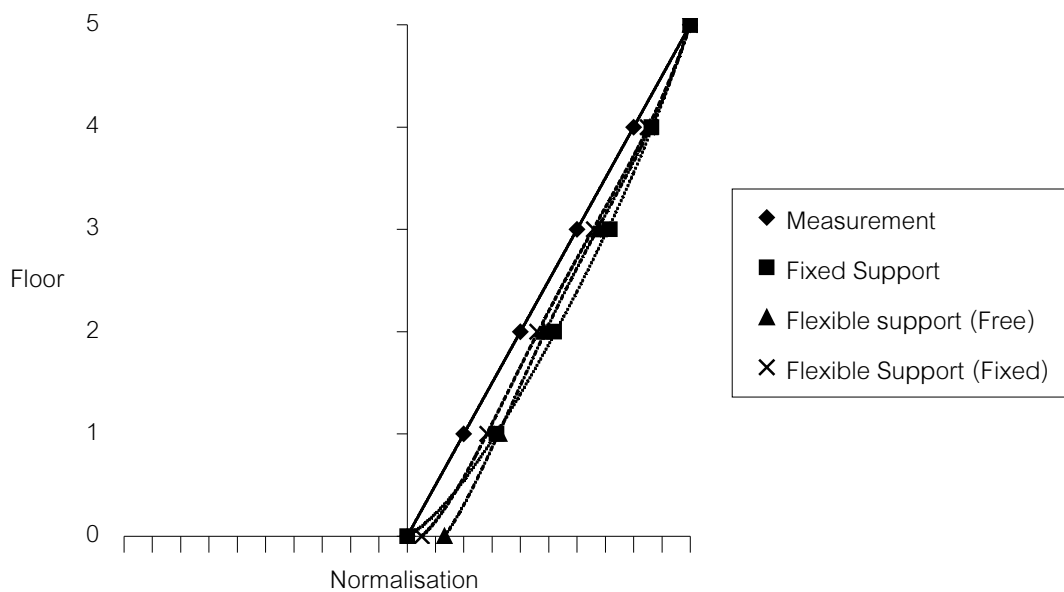
Flexible Support⁽²⁾ เป็นค่าที่ได้จากการพิจารณาระบบฐานรากแบบยึดหยุ่น พิจารณาหั่วเสาเข็มเป็นแบบต้านทานการหมุน

ตารางที่ 6.21 ค่า MAC ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการศึกษาของอาคาร D (อาคารเรียน และปฏิบัติการ 6 ชั้น) โดยพิจารณาฐานรากเป็นแบบยึดแน่น และยึดหยุ่น

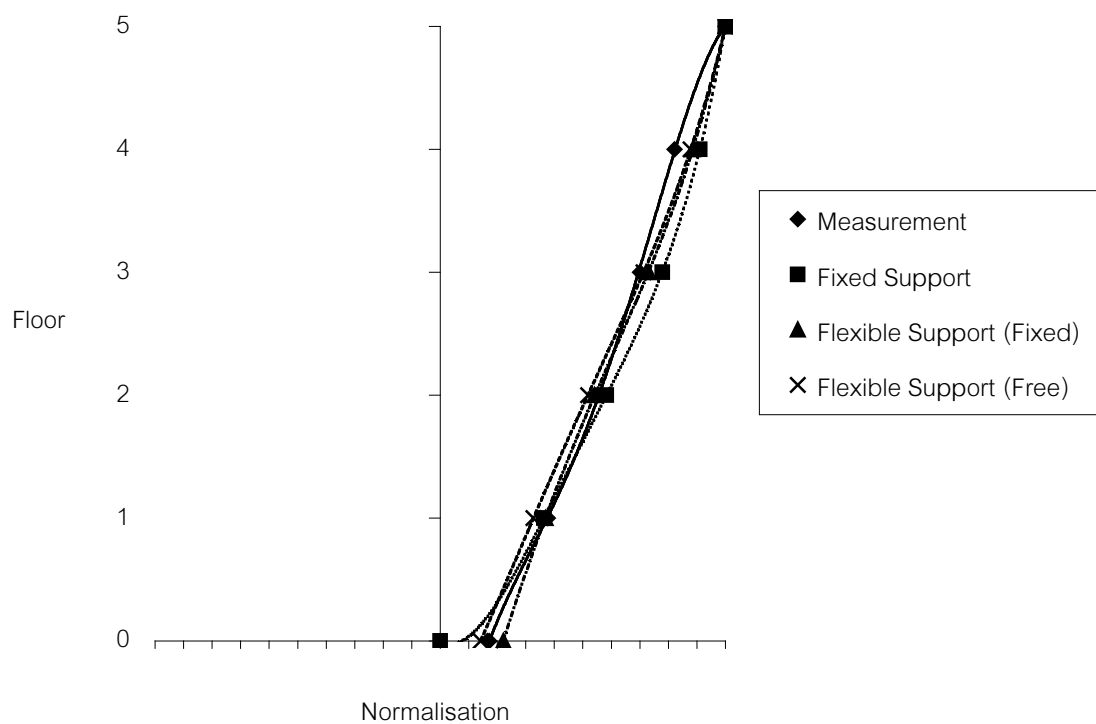
Mode	ค่า MAC		
	Fixed Support	Flexible-Free Head ⁽¹⁾	Flexible-Fixed Head ⁽²⁾
Transverse	0.9892	0.9848	0.9947
Longitudinal	0.9862	0.9980	0.9971
Torsion	0.9851	0.9832	0.9940

Flexible Support⁽¹⁾ พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น (Flexible Support) โดยพิจารณาหั่วเสาเข็มเป็นแบบอิสระ

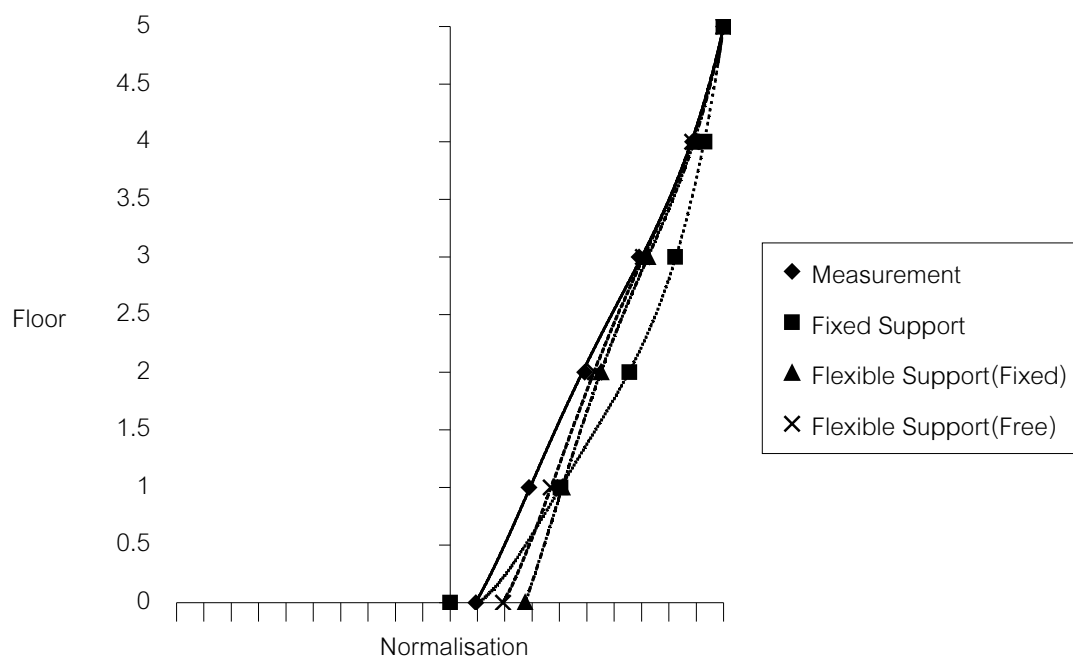
Flexible Support⁽²⁾ พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น (Flexible Support) โดยพิจารณาหั่วเสาเข็มเป็นแบบต้านทานการหมุน



รูปที่ 6.18 รูปร่างการสั่นไหวตามขวางของอาคาร D



รูปที่ 6.19 รูปร่างการสั่นไหวตามยาวของอาคาร D



รูปที่ 6.20 รูปร่างการสั่นไหวแบบปิดตัวของอาคาร D

บทที่ 7

สรุปผลการศึกษา

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาดังตัวอย่างอาคาร 4 อาคารในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร คือ อาคาร A เป็นอาคารพักอาศัย 7 ชั้น มีความสูง 27 ม., อาคาร B เป็นอาคารสำนักงาน 12 ชั้น มีความสูง 53 ม., อาคาร C เป็นอาคารเรียน 21 ชั้น มีความสูง 102 ม. และอาคาร D เป็นอาคารเรียน 6 ชั้น มีความสูง 31 ม. ตามลำดับ โดยอาคารดังกล่าวเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก มีโครงสร้างเป็นระบบ เสา-คาน-พื้น ซึ่งได้ทำการพิจารณาส่วนประกอบอื่น ๆ ที่มีผลต่อค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติมในการสร้างแบบจำลอง เช่น การพิจารณาการแบ่งย่อย (mesh) ใน Frame และ Element การพิจารณาถึงผลของการสร้างแบบจำลองของระบบฐานรากชนิดต่าง ๆ และแบบจำลองห้องใต้ดินภายในโครงสร้างอาคารนั้น ๆ ที่มีต่อค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ การพิจารณาผลของส่วนที่ไม่ได้เป็นโครงสร้าง เช่น กำแพงอิฐก่อ และการพิจารณาการสร้างแบบจำลองของกำแพงอิฐก่อในกรณีที่มีช่องเปิด กระฉก และหน้าต่าง เป็นต้น และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการตรวจวัดจากอาคารจริงโดยวิธี Ambient Vibration ซึ่งสรุปผลการศึกษาดังนี้

7.1 การศึกษาการแบ่งย่อย (Meshing) ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์

1. จากผลการศึกษาอาคาร A ซึ่งเป็นอาคารสูง 7 ชั้น อาคารดังกล่าวเป็นอาคารที่มีรูปทรงสม่ำเสมอ กล่าวคือ รูปทรงอาคารมีลักษณะสมมาตรกัน และมีรูปแบบของกำแพงอิฐก่อที่สม่ำเสมอ พบว่า การแบ่งย่อย (meshing) ใน ชั้นส่วนพื้น และ ชั้นส่วนกำแพง มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของคาบการสั่นไหวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น กล่าวคือ การแบ่งย่อยในชั้นส่วนพื้นตามลักษณะของโครงสร้างพื้นมีผลให้ค่าคาบการสั่นไหวลดลงไม่ถึง 2% ในขณะที่การแบ่งย่อยในชั้นส่วนกำแพงจะทำให้ค่าคาบการสั่นไหวเพิ่มขึ้นไม่ถึง 1% ดังนั้นในการศึกษาการสร้างแบบจำลองของอาคารอื่น ๆ ที่มีรูปแบบอาคารคล้ายกัน จึงอาจไม่จำเป็นต้องพิจารณา การแบ่งย่อย (meshing) ในชั้นส่วนพื้น และ ชั้นส่วนกำแพง อีก

2. จากผลการศึกษาอาคาร B ซึ่งเป็นอาคารสูง 12 ชั้น อาคารดังกล่าวเป็นอาคารที่มีรูปทรงไม่สม่ำเสมอ กล่าวคือ รูปทรงอาคารมีลักษณะไม่สมมาตรกัน และมีรูปแบบของกำแพงอิฐ

ก่อนไม่มากโดยอาจจะมีช่องเปิด หรือผนังกระจกอลูมิเนียม หรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีค่าความแข็งแรงน้อยกว่ากำแพงอิฐก่อมากนั้น พบว่า การแบ่งย่อย (meshing) ใน ชั้นส่วนพื้นมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าการสั่นไหวมาก คือ ลดลงประมาณ 5% โดยเฉพาะในรูปแบบการสั่นไหวแบบบิดตัว ค่าค่าการสั่นไหวลดลงถึงประมาณ 7% แต่การแบ่งย่อย (meshing) ในชั้นส่วนกำแพงนั้นจะมีผลทำให้ค่าค่าการสั่นไหวเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น คือ เพิ่มขึ้นไม่ถึง 2% ดังนั้นในการศึกษาการสร้างแบบจำลองของอาคารอื่น ๆ ที่มีรูปแบบอาคารคล้ายกัน ควรจะพิจารณาการแบ่งย่อย (meshing) ใน ชั้นส่วนพื้นด้วยเสมอ แต่ไม่จำเป็นต้องพิจารณาการแบ่งย่อย (meshing) ใน ชั้นส่วนกำแพงอีก

7.2 การศึกษาการสร้างแบบจำลองฐานรากแบบยึดหยุน และ ห้องใต้ดิน

1. จากผลการศึกษาอาคาร A,C และอาคาร D นั้น เมื่อพิจารณาสร้างแบบจำลองฐานรากแบบยึดหยุน และห้องใต้ดิน ในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ พบว่าจะทำให้ค่าค่าการสั่นไหวของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ มีค่าสูงขึ้นกว่าแบบจำลองที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดแน่น และ ในการพิจารณาเปรียบเทียบรูปแบบของหั่วเสาเข็มในแบบจำลองฐานรากแบบยึดหยุนนั้น พบว่า รูปแบบของหั่วเสาเข็มแบบอิสระจะให้ค่าค่าการสั่นไหวสูงกว่าค่าที่ได้จากรูปแบบหั่วเสาเข็มแบบยึดรั้ง

2. จากผลการศึกษาอาคาร A,C และอาคาร D นั้น เมื่อพิจารณาสร้างแบบจำลองฐานรากแบบยึดหยุนในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ จะพบว่าความสูงของอาคารที่นำมาพิจารณาสร้างแบบจำลองนั้นจะมีผลกับค่าค่าการสั่นไหวของอาคาร กล่าวคือ การสร้างแบบจำลองฐานรากแบบยึดหยุนในอาคารที่มีความสูงมากกว่าจะให้ค่าค่าการสั่นไหวของอาคารมีค่าใกล้เคียงกับค่าค่าการสั่นไหวที่ได้จากการตรวจวัดมากขึ้นกว่าการแบบจำลองที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดแน่น แต่เมื่อพิจารณาแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของตัวอย่างอาคารที่มีความสูงไม่มาก การสร้างแบบจำลองฐานรากแบบยึดหยุนนั้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าค่าการสั่นไหวมาก ซึ่งอาจทำให้ค่าค่าการสั่นไหวที่ได้มีความคลาดเคลื่อนกับการตรวจวัดจริงมากกว่า การพิจารณาฐานรากเป็นแบบยึดแน่นในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากว่า ในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของอาคารจริงโดยพิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดแน่นนั้น ได้ใช้ค่าคุณสมบัติของวัสดุที่ได้มีการปรับแก้แล้ว ซึ่งทำให้ค่าค่าการสั่นไหวของแบบจำลองมีความใกล้เคียง

กับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงแล้ว ดังนั้นเมื่อพิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่นเพิ่มเติม จึงทำให้ค่าคาบการสั่นไหวอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงมากเกินไปโดยเฉพาะอาคารที่มีความสูงไม่มาก

7.3 การศึกษารูปร่างการสั่นไหว

1.ในการวิเคราะห์รูปร่างการสั่นไหว (Mode Shape Analysis) ในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของตัวอย่างอาคาร A,C และอาคาร D นั้น พบว่าค่า MAC ที่ได้ในแบบจำลองนั้นมีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ดีทั้งในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของอาคารที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดแน่น หรือ แบบยึดหยุ่นก็ตาม โดยที่ในการพิจารณาแบบจำลองฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่นนั้นให้ค่า MAC มีค่าใกล้เคียงกับการพิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดแน่นซึ่งไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจน ทั้งนี้เนื่องมาจากว่า ในการพิจารณาสร้างแบบจำลองฐานรากแบบยึดหยุ่น นั้นใช้ค่าข้อมูลชั้นดินทั่วไปของกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลชั้นดินที่ตำแหน่งอาคารนั้น ๆ

2. จากผลการศึกษาอาคาร A,C และอาคาร D นั้น เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ในแนวราบที่ตำแหน่งฐานรากในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ที่พิจารณาระบบฐานรากเป็นแบบยึดหยุ่น โดยเปรียบเทียบกับเคลื่อนที่ในแนวราบที่ตำแหน่งฐานรากจากการตรวจวัดจริง จะพบว่าในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของอาคารที่มีความสูงมากกว่านั้น จะให้ค่าการเคลื่อนที่ในแนวราบใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดมากกว่า แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของอาคารที่มีความสูงน้อยกว่า

7.4 ข้อเสนอแนะงานวิจัย

1.ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากตัวอย่างอาคารที่เลือกมาทำการศึกษานั้นมีรูปแบบโครงสร้างของอาคารเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีส่วนประกอบของอาคารเป็น เสา , คาน และ พื้น และมีความสูงปานกลาง ซึ่งค่าคาบการสั่นไหวรวมถึงรูปร่างการสั่นไหวของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์อยู่ในเกณฑ์ที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดก็ตาม แต่ทั้งนี้ในการศึกษาวิจัยต่อไปในภาคหน้าควรเลือกรูปแบบอาคารเป็นระบบอื่น ๆ เช่น อาคารที่ใช้ระบบพื้นคอนกรีตอัดแรงในภายหลัง (Post Tension System) หรือระบบอื่น ๆ ที่นิยมใช้ในอาคารสูงเพื่อทำการเปรียบเทียบผลต่อไป

2. เนื่องจากในการศึกษาวิจัยนี้ได้พิจารณาการสั่นไหวในทิศทางตามยาวของอาคาร, ตามขวางของอาคาร และแบบการบิดตัว ในรูปแบบพื้นฐาน (Fundamental Mode) เท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้การศึกษาวิจัยต่อไปในภายภาคหน้ามีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมถึงเพื่อให้แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของอาคารมีความถูกต้อง และเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้นนั้น ควรจะต้องพิจารณาศึกษารูปแบบการสั่นไหวในลำดับที่สูงขึ้นของแต่ละด้าน และทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงต่อไป

3. เนื่องจากการพิจารณาค่าคุณสมบัติของดิน ในการสร้างแบบจำลองฐานรากแบบยืดหยุ่นเป็นการใช้ค่าที่ได้จากค่าข้อมูลชั้นดินอ้างอิงทั่วไปของกรุงเทพมหานคร ไม่ใช่ค่าข้อมูลชั้นดินจริงที่ตำแหน่งอาคารนั้นๆ ดังนั้นการพิจารณาแบบจำลองฐานรากแบบยืดหยุ่น จึงอาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ในการศึกษาวิจัยต่อไปในอนาคตนั้นควรจะมีการเก็บข้อมูลดินที่ตำแหน่งอาคารดังกล่าวเพื่อนำมาเป็นข้อมูลในการพิจารณาสร้างแบบจำลองฐานรากแบบยืดหยุ่นที่ถูกต้องต่อไป

4. ในการสร้างแบบจำลองของผนังก่ออิฐที่เป็น Shell Element แบบ Plane Stress นั้น การตั้งสมมติฐานของช่องเปิดภายในผนังก่ออิฐ เช่น ช่องประตู หน้าต่าง หรือผนังที่มีความแข็งแรงไม่มากนัก อาจจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหารูปแบบหรือวิธีการสร้างแบบจำลองของผนังก่ออิฐที่มีช่องเปิดที่เหมาะสมในการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของอาคารจริงขึ้น

ACI. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary(ACI 318R-95)* , ACI Committee 318, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan. 1995

Arworn, S. "Modelling Mat Foundation on Piles as Flexible Plate on Springs." *M.Eng.thesis* ,Rangsit University, 1998

ATC. "Evaluating the Seismic Resistance of Existing Building." *ATC-14 Report* , 1987

ATC. "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings." *ATC-40 Report* , 1987

Bouwkamp J.G., Kollegger J.P., and Stephen, R.M. "Dynamic Properties of A Twelve-Story Prefabricated Panel Building." *Earthquake Engineering* , Report No. UBC/EERC-80/29, 1980

Chaker, A.A., and Cherifati A." Influence of Masonry Infill Panels on The Vibration and Stiffness Characteristics of R/C Frame Buildings." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* , Vol.28, 1999:1061-1065

Clough, R.W., and Penzien J. *Dynamics of Structures*, Second Edition, Singapore: McGraw-Hill, Inc, 1993

CSI , SAP2000. "Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures." *Analysis Reference*. Computer and Structures, Inc.,Berkeley, California, 2000

Kiattivishanchai, S."Evaluation of Seismic Performance of An Existing Medium-Rise Reinforced Concrete Frame Building in Bangkok." *Master Thesis* , Asian Institute of Technology, Bangkok, No. ST-01-11, 2001

Meyyappa, M., Palsson, H., and Craig, J.I." Modal Parameter Estimation for A High-rise Building Using Ambient Response Data Taken During Construction." *Proc. Of the Second Specialty Conference on Dynamic response of Structures : Experimental Observation, Prediction and Control*, ASCE, 1981

Paulay, T., and Priestley, M.J.N." Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings." *John Wiley & Sons Inc*, New York, 1992

Petcharoen, C."Identification of Dynamic Properties of Low and Medium-Rise Buildings in Bangkok By Ambient Vibration Method." *Master Thesis* , Asian Institute of Technology, Bangkok, No. ST-02-14, 2001

Thiruvengadam T."On the Natural Frequencies of Infilled Frames." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.13, 1985:401 – 419.

Trifunac, M.D."Ambient Vibration Test of A Thirty-nine Story Steel Frame Building" *Earthquake Engineering*, Report No. EERL 70 – 02, 1970

เฉลิมชัย เกียรติเรืองภมลา."การศึกษาแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลวัตของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก" *วิทยานิพนธ์*, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2001