



การปรับปรุงฐานข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์
ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย

โดย

นภสร สมะตะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2567

IMPROVEMENT OF THE DATABASE OF DYNAMIC PROPERTIES
OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS IN THAILAND

BY

NAPASORN SAMATA



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER DEGREE OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2024

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นางสาวนภสร สมะตะ

เรื่อง

การปรับปรุงฐานข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

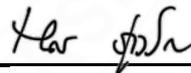
เมื่อ วันที่ 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2568

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



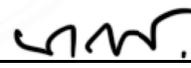
(ศาสตราจารย์ ดร. วิโรจน์ บุญเกียรติคุณ)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์



(ศาสตราจารย์ ดร. นนกร ภู่วโรดม)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รองศาสตราจารย์ ดร. นเรศ ลิ้มสัมพันธ์เจริญ)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ศาสตราจารย์ ดร. สุตทัศน์ สีลาทวิวัฒน์)

คณบดี



(ศาสตราจารย์ ดร. สัญญา มิตรเอม)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงฐานข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย
ชื่อผู้เขียน	นภสร สมะตะ
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศาสตราจารย์ ดร.นคร ภู่วโรดม
ปีการศึกษา	2567

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการปรับปรุงฐานข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการวิเคราะห์พฤติกรรมพลศาสตร์ของโครงสร้างภายใต้แรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว โดยวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติ อัตราส่วนความหน่วง และรูปแบบการสั่นด้วยเทคนิค Stochastic Subspace Identification (SSI) และ Recursive Subspace Identification (RSI) จากข้อมูลผลการตรวจวัดอาคารจำนวน 112 หลัง ช่วงความสูงอาคารมีตั้งแต่ 8.50 เมตร จนถึง 242.4 เมตร ในเขตกรุงเทพมหานคร ปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และเชียงราย ทั้งนี้ได้ให้ความสำคัญกับการเพิ่มจำนวนอาคารเดี่ยวในชุดข้อมูล เพื่อให้ครอบคลุมช่วงความสูง

ในกระบวนการวิเคราะห์ ได้นำข้อมูลความสูงของอาคารแต่ละหลังมาพิจารณาเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ค่าคาบธรรมชาติของอาคารมีความสัมพันธ์เชิงกำลังกับความสูง โดยเฉพาะโหมดที่ 1 ซึ่งมีค่าสหสัมพันธ์สูงสุด และสามารถเสนอสมการใหม่สำหรับการประมาณค่าคาบธรรมชาติในโหมดที่หนึ่ง สอง และสาม ผลด้านอัตราส่วนความหน่วง พบว่ามีแนวโน้มลดลงตามความสูงของอาคาร โดยค่าเฉลี่ยโดยรวมประมาณ 0.5-1.5% เป็นส่วนใหญ่สำหรับโหมดที่ 1 การวิเคราะห์รูปร่างการสั่นยังพบว่าอาคารแสดงโหมดสั่นในแนวแกน X Y และ R (ทิศทางการบิด) เพื่อแสดงรูปร่างการสั่นแต่ละทิศทางได้ทั้งสามโหมด

เมื่อเปรียบเทียบวิธี RSI กับ SSI พบว่าผลลัพธ์มีความสอดคล้องกันดี โดยเฉพาะในโหมดที่ 1 และ 2 ซึ่ง RSI สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของค่าคาบธรรมชาติได้อย่างต่อเนื่อง โดยสรุปงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงฐานข้อมูลค่าคาบธรรมชาติของอาคารในประเทศไทยให้มีความครอบคลุมมาก

ขึ้น ทั้งในแง่ของช่วงความสูง ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ อันเป็นฐานข้อมูลช่วยสนับสนุนการปรับปรุง
มาตรฐานการออกแบบอาคารให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: แผ่นดินไหว, คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์, อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก



Thesis Title	IMPROVEMENT OF THE DATABASE OF NATURAL PERIODS FOR REINFORCED CONCRETE BUILDINGS IN THAILAND
Author	Napasorn Samata
Degree	Master of Engineering
Major Field/Faculty/University	Civil Engineering Engineering Thammasat University
Thesis Advisor	Prof. Dr. Nakhorn Poovarodom
Academic Year	2024

ABSTRACT

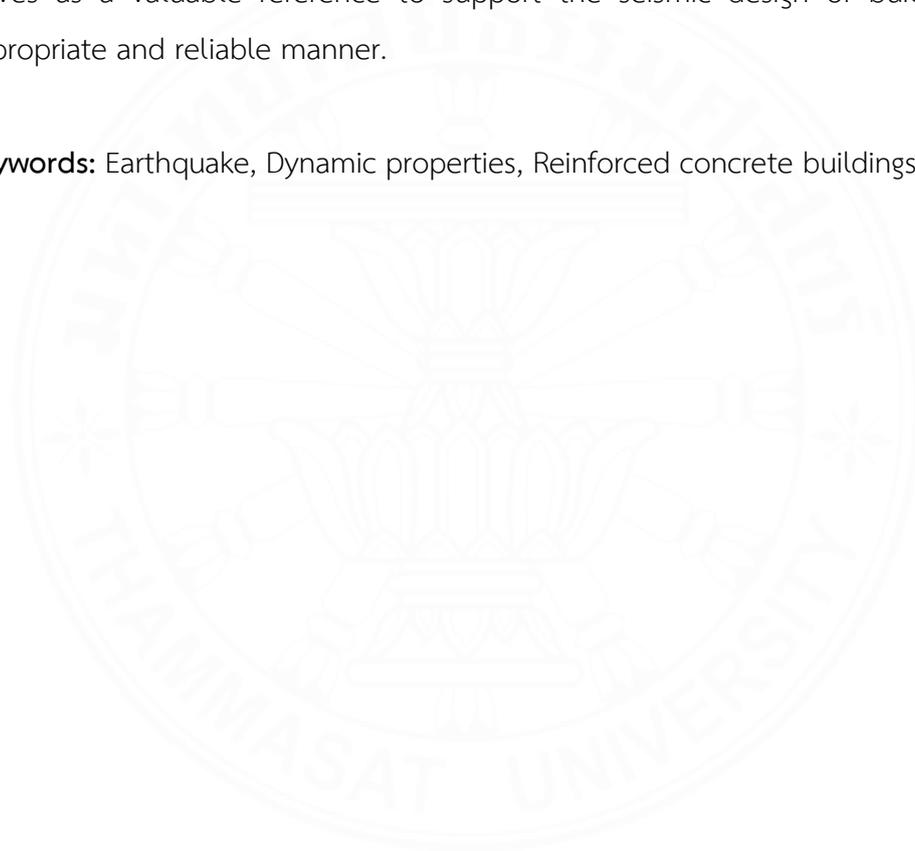
This Thesis focuses on improving the database of natural periods for reinforced concrete buildings in Thailand to serve as a reference for evaluating structural dynamic behavior under seismic excitation. The study analyzes natural periods, damping ratios, and mode shapes using Stochastic Subspace Identification (SSI) and Recursive Subspace Identification (RSI) techniques based on field measurement data from 112 buildings with heights ranging from 8.50 to 242.4 meters, located in Bangkok, surrounding provinces, Chiang Mai, and Chiang Rai. Special attention was given to increasing the number of low-rise buildings in the dataset to better represent the full range of building heights typically found in Thailand.

During the analytical process, the height of each individual building was considered to investigate its dynamic characteristics. The results of the analysis demonstrate that the natural periods of the buildings follow a power-law relationship with their heights, especially in the first mode, and new empirical equations were proposed for modes 1, 2, and 3 with high accuracy. The damping ratio was found to decrease with building height, with an overall average of approximately 0.5-1.5% in the first mode, clearly indicating that taller buildings tend to have lower damping. Mode shape analysis revealed dynamic behavior in the X, Y, and rotational (R) directions

across all three modes, along with evidence of torsional modes in several low- and high-rise buildings.

When comparing the RSI method with the SSI method, the results were found to be highly consistent, particularly in the first and second modes. RSI is capable of continuously tracking variations in the natural periods. In summary, this study has enhanced the database of natural periods of buildings in Thailand, providing broader coverage in terms of building height ranges and dynamic properties. This database serves as a valuable reference to support the seismic design of buildings in an appropriate and reliable manner.

Keywords: Earthquake, Dynamic properties, Reinforced concrete buildings



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้และการสนับสนุนจากหลายท่าน ซึ่งข้าพเจ้าตระหนักดีว่าเป็นส่วนสำคัญยิ่งต่อความสำเร็จในครั้งนี้ ขอขอบพระคุณต่อศาสตราจารย์ ดร.นคร ภู่วโรดม อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทาง และให้ข้อคิดเห็นตลอดระยะเวลาการทำวิจัย อาจารย์ได้ให้โอกาสข้าพเจ้าในการเรียนรู้และพัฒนาศักยภาพทั้งด้านวิชาการ และการคิดวิเคราะห์เชิงลึก ด้วยความใส่ใจ ทุ่มเท ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ บุญญภิญโญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ นเรศ ลิ้มสัมพันธ์เจริญ กรรมการวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.สุทัศน์ ลีลาทวีวัฒน์ กรรมการวิทยานิพนธ์ภายนอก เป็นอย่างสูงที่ให้เกียรติสละเวลาอันมีค่าในการเป็นกรรมการสอบ และให้คำแนะนำอย่างลึกซึ้งตลอดกระบวนการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ รุ่นพี่ระดับปริญญาเอก ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและข้อแนะนำด้านวิชาการ รวมถึงสนับสนุนและเป็นกำลังใจ ซึ่งมีส่วนสำคัญยิ่งต่อการดำเนินวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นอกจากนี้ ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคน และครอบครัว ที่ได้ให้กำลังใจและสนับสนุนข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมา

หากผลการศึกษานี้มีข้อบกพร่องประการใด ผู้ศึกษาขอน้อมรับไว้เพื่อปรับปรุง แก้ไขในการศึกษาครั้งต่อไป

นภสร สมะตะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญภาพ	(9)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและวิธีการวิจัย	10
3.1 การตรวจวัดการตอบสนองของอาคารภายใต้แรงกระทำจากสภาพแวดล้อม	10
3.1.1 การแปลงสัญญาณเพื่อวิเคราะห์ทิศทางการบิดของอาคาร	11
3.2 เทคนิคการระบุพารามิเตอร์เชิงพลศาสตร์จากสัญญาณการสั่น	13
3.2.1 Covariance-driven Stochastic Subspace Identification	15
3.2.2 Data-driven Stochastic Subspace Identification	19

	(7)
3.2.3 Recursive Subspace Identification (RSI)	20
3.3 การพัฒนาสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติอาคารสำหรับการออกแบบ ต้านทานแรงแผ่นดินไหว	22
3.4 สูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติของอาคาร	25
 บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	 25
4.1 ข้อมูลทั่วไปของอาคารที่ศึกษา	28
4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารจากข้อมูลตรวจวัด	33
4.2.1 ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency)	34
4.2.2 อัตราส่วนความหน่วงของอาคาร (Damping ratio)	44
4.2.3 รูปร่างการสั่นของอาคาร (Mode shape)	47
4.2.4 การเปรียบเทียบผลของค่าคาบธรรมชาติ	49
4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์กับคุณลักษณะ ทางกายภาพของอาคาร	52
4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติและ ความสูงของอาคารแต่ละ โหนด	52
4.3.2 การวิเคราะห์เชิงถดถอยในรูปแบบลอการิทึมของค่าคาบธรรมชาติ	55
4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติโหนดการบิดกับความสูงของ อาคาร	57
4.3.4 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับการศึกษาในอดีต	58
4.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหน่วงกับความสูงของอาคาร	59
4.3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวที่ฐานกับความสูงของอาคาร	62
 บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	 64
5.1 สรุปผลการวิจัย	64
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
 รายการอ้างอิง	 67

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 อธิบายตัวแปรในสมการการแปลงการเคลื่อนที่ของพื้นอาคาร	11
3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การประมาณค่าคาบ C_t และ x สำหรับประเภทโครงสร้างตาม ASCE	26
3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การประมาณค่าคาบ C_t ที่ใช้ใน Eurocode	27
4.1 ข้อมูลของกลุ่มอาคารเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัดเชียงราย	29
4.2 คาบธรรมชาติของอาคารในเขตกรุงเทพและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัด เชียงราย	39
4.3 อัตราส่วนความหวังทั้งสามโหมดของอาคารที่ศึกษาในทิศทาง x และ y	45

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
3.1 สัญญาณความเร่งการสั่นสะเทือนตามเวลา	12
3.2 การแปลงสัญญาณที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของพื้นอาคารที่ติดตั้งหัววัด	13
3.3 แผนภาพเสถียรภาพ (Stabilization Diagram)	15
3.4 ขั้นตอนการคำนวณของวิธี SSI เพื่อหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์	19
3.5 ตัวอย่างการแบ่งข้อมูลสัญญาณความเร่งตามขนาดหน้าต่างและค่าการซ้อนทับ (Overlap) สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี RSI	21
3.6 ขั้นตอนการคำนวณของวิธี RSI เพื่อหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์	21
3.7 ค่าคาบธรรมชาติของแต่ละโหมดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี RSI ตลอดช่วงเวลา 1,200 วินาที	22
3.8 แนวคิดแบบวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)	23
3.9 กราฟ Correlation หรือ ค่าสหสัมพันธ์ (ρ) Perfect positive correlation (ข) Zero correlation (ค) Perfect negative correlation	25
4.1 ตัวอย่างสัญญาณลดทอนแบบ Log-decrement	34
4.2 stabilization diagram ความถี่ธรรมชาติของอาคารตัวอย่างในทิศทาง X	35
4.3 stabilization diagram ความถี่ธรรมชาติของอาคารตัวอย่างในทิศทาง Y	35
4.4 stabilization diagram ความถี่ธรรมชาติของอาคารตัวอย่างในทิศทาง R	36
4.5 ผลลัพธ์ความถี่ธรรมชาติของอาคารตัวอย่างในทิศทาง X จากการวิเคราะห์ RSI	37
4.6 ผลลัพธ์ความถี่ธรรมชาติของอาคารตัวอย่างในทิศทาง Y จากการวิเคราะห์ RSI	37
4.7 ผลลัพธ์ความถี่ธรรมชาติของอาคารตัวอย่างในทิศทาง R จากการวิเคราะห์ RSI	37
4.8 ผลลัพธ์ความถี่ธรรมชาติของอาคารตัวอย่างในทิศทาง X Y R จากการวิเคราะห์ FFT	38
4.9 รูปร่างการสั่นของตัวอย่างอาคารที่ศึกษา โหมดที่ 1 ทั้งสามทิศทาง	48
4.10 รูปร่างการสั่นของตัวอย่างอาคารที่ศึกษา โหมดที่ 2 ทั้งสามทิศทาง	48
4.11 รูปร่างการสั่นของตัวอย่างอาคารที่ศึกษา โหมดที่ 3 ทั้งสามทิศทาง	48
4.12 การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 1 ของวิธี SSI และ FFT	49
4.13 การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 2 ของวิธี SSI และ FFT	50
4.14 การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 3 ของวิธี SSI และ FFT	50
4.15 การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 1 ของวิธี SSI และ RSI	51

4.16 การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 2 ของวิธี SSI และ RSI	51
4.17 การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 3 ของวิธี SSI และ RSI	52
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติและความสูงอาคารทั้งสามโหมด	53
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติกับความสูงของอาคารในแต่ละโหมด พร้อมแสดง ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนของผลการวิเคราะห์	54
4.20 ผลการวิเคราะห์เชิงถดถอยของค่าคาบธรรมชาติและความสูงของอาคาร สำหรับโหมดที่ 1	55
4.21 ผลการวิเคราะห์เชิงถดถอยของค่าคาบธรรมชาติและความสูงของอาคาร สำหรับโหมดที่ 2	56
4.22 ผลการวิเคราะห์เชิงถดถอยของค่าคาบธรรมชาติและความสูงของอาคาร สำหรับโหมดที่ 3	57
4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติในทิศทางบิดกับความสูงของ อาคาร	58
4.24 ผลการวิเคราะห์เชิงถดถอยการศึกษาในอดีตกับปัจจุบันของค่าคาบธรรมชาติ และความสูงของอาคาร	59
4.25 ช่วงค่าอัตราส่วนความหน่วงของอาคารสูง โหมดที่ 1	60
4.26 ช่วงค่าอัตราส่วนความหน่วงของอาคารสูง โหมดที่ 2	60
4.27 ช่วงค่าอัตราส่วนความหน่วงของอาคารสูง โหมดที่ 3	61
4.28 อัตราส่วนความหน่วงของอาคารสูงและอาคารเตี้ยที่ศึกษา	62
4.29 การเคลื่อนตัวที่ฐานสัมพันธ์กับค่าที่ยอดกับความสูงของอาคาร	63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและความสำคัญ

คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์เป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างที่ต้องรับแรงพลศาสตร์ เช่น แรงจากแผ่นดินไหวหรือแรงลม โดยทั่วไปคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์เช่น ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency), คาบธรรมชาติ (natural period), อัตราส่วนความหน่วง (damping ratio) มักถูกกำหนดหรือแนะนำไว้ในรูปสมการที่ง่ายต่อการนำไปใช้ในงานออกแบบ แม้ในกรณีที่วิศวกรไม่มีพื้นฐานหรือความชำนาญในด้านการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ก็สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้สะดวก อย่างไรก็ตามที่มาของการได้มาซึ่งสูตรหรือค่าโดยประมาณเหล่านี้มาจากผลการตรวจวัดอาคารจริงซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะถูกประมวลผลในเชิงสถิติเพื่อให้เป็นสมการอย่างง่ายที่วิศวกรปฏิบัติได้โดยง่าย กระบวนการพัฒนาสมการเหล่านี้มักตั้งอยู่บนสมมติฐานบางประการ เช่น การใช้ข้อมูลจากอาคารหลากหลายประเภททั้งด้านขนาด ลักษณะการใช้สอย ลักษณะการก่อสร้าง ลักษณะโครงสร้าง และปริมาณโครงสร้าง เป็นต้น โดยข้อมูลเหล่านี้ถูกทำให้อยู่ในรูปอย่างง่ายเพื่อให้เป็นค่าที่สามารถนำไปใช้ได้โดยทั่วไปเช่น คาบธรรมชาติขึ้นอยู่กับความสูงของอาคารเพียงอย่างเดียวและอัตราส่วนความหน่วงเป็นค่าคงที่ เป็นต้น

ในประเทศไทยมีการพัฒนาสมการคาบธรรมชาติของอาคารโดยการประมาณจากการตรวจวัดการสั่นแบบ Ambient vibration แล้วหาความสัมพันธ์ของข้อมูลเชิงสถิติด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงถดถอย (Regression analysis) และได้ค่าที่เสนอในมาตรฐานการออกแบบเพื่อต้านทานแรงลมและแผ่นดินไหว อย่างไรก็ตามสมการเหล่านี้ทั้งมาตรฐานของประเทศไทยและต่างประเทศยังคงพิจารณาในรูปแบบอย่างง่ายที่ขึ้นกับความสูงของอาคารเพียงอย่างเดียว และหากพิจารณาโดยละเอียดจะเห็นว่าอาจมีปัจจัยอื่นที่สำคัญอีกหลายประการ ซึ่งนำไปสู่ความจำเป็นในการพัฒนาสมการที่เหมาะสมยิ่งขึ้นโดยอาศัยข้อมูลและเทคโนโลยีที่ทันสมัยมากขึ้น ได้แก่

- 1) การเพิ่มปริมาณข้อมูลคาบธรรมชาติในลำดับโหมดที่สูงขึ้น คาบในทิศทางการบิดรวมถึงค่าอัตราส่วนความหน่วงและรูปร่างการสั่น
- 2) ใช้เทคนิค Stochastic Subspace Identification (SSI) ซึ่งเป็นวิธีการระบุคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพ สามารถวิเคราะห์คาบธรรมชาติ อัตราส่วนความหน่วง และรูปร่างการสั่น (mode shapes) ได้อย่างแม่นยำ อีกทั้งยังสามารถแยก

สัญญาณที่เกิดจากโครงสร้างออกจากสัญญาณรบกวน (noise) ได้อย่างเป็นระบบ ส่งผลให้สามารถระบุโหมดที่สูงขึ้นได้ชัดเจน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงวางแผนการทำงานไว้ 3 ส่วนหลักคือ

- 1) การใช้ข้อมูลการสั่นสะเทือนของอาคารภายใต้แรงกระทำในสภาพแวดล้อม (Ambient Vibration Measurement) จากกลุ่มอาคารในกรุงเทพฯและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัดเชียงราย โดยข้อมูลที่ใช้ในการศึกษานี้ได้จากโครงการวิจัยเรื่อง “การปรับปรุงข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร และการพัฒนาระบบตรวจสอบสมรรถนะของโครงสร้างแบบระยะยาว”
- 2) การวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารโดยประยุกต์ใช้วิธี SSI เพื่อระบุค่าคาบธรรมชาติ ค่าอัตราส่วนความหน่วง รวมถึงรูปร่างการสั่น ของอาคารอย่างเป็นระบบ
- 3) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร กับความสูงของอาคาร เพื่อทำความเข้าใจแนวโน้มพฤติกรรมการณ์การสั่นของอาคารตามระดับความสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อศึกษาและปรับปรุงข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีประสิทธิภาพสูง โดยเพิ่มจำนวนข้อมูลจากการตรวจวัดอาคารจริงในหลายช่วงความสูงและหลายอาคาร ให้ครอบคลุมและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ทั้งในด้านคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารในหลายโหมดการสั่น เพื่อให้ได้ฐานข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์การสั่นและการออกแบบอาคารให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ศึกษาและวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Properties) ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยจะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาหาค่าคาบธรรมชาติ (Natural Periods), อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) และรูปร่างการสั่น (Mode Shapes) เนื่องจากมีบทบาทสำคัญในการออกแบบโครงสร้างเพื่อให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

- 1) ลักษณะโครงสร้างที่ศึกษา คือโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กประเภทต่างๆ เช่น อาคารสำนักงาน อาคารพักอาศัย อาคารสถานศึกษา อาคารโรงพยาบาล และอาคารโรงแรม
- 2) พื้นที่การศึกษา คืออาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่และเชียงราย จำนวนทั้งสิ้น 112 อาคาร
- 3) ใช้ข้อมูลการตรวจวัดจากโครงการวิจัยเรื่อง การปรับปรุงข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารและการพัฒนาระบบตรวจสอบสมรรถนะของโครงสร้างแบบระยะยาว ที่ตรวจวัดอาคารในพื้นที่จริงด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดการสั่นสะเทือนและบันทึกข้อมูลในรูปแบบ Time Domain ในทิศทาง X, Y และการสั่นแบบบิดตัว (Torsion), บันทึกข้อมูลที่มี Sampling Rate 200 Hz เป็นระยะเวลาประมาณ 20-30 นาที
- 4) ประยุกต์ใช้วิธี SSI ในการวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารจากข้อมูลที่ตรวจวัดได้

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

งานวิจัยนี้ช่วยเพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเฉพาะค่าคาบธรรมชาติ ค่าคาบในทิศทางบิด อัตราส่วนความหน่วง และรูปร่างการสั่น รวมถึงความสัมพันธ์ของคุณสมบัติเหล่านี้กับความสูงของอาคาร ข้อมูลที่ได้จะช่วยเพิ่มฐานข้อมูลที่มีอยู่ให้ครอบคลุมอาคารหลากหลายประเภท ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อวงการวิศวกรรมโครงสร้างในการใช้วิเคราะห์หรือพัฒนาสมการประมาณค่าพฤติกรรมการสั่นของอาคารได้อย่างเหมาะสม

นอกจากนี้ ผลลัพธ์จากงานวิจัยยังสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทย รวมทั้งเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ความเสี่ยงและตรวจสอบความปลอดภัยของอาคารที่มีอยู่เดิมได้

บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาเรื่อง “ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์และลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก” ในระเบียบการวิจัยจะกล่าวถึงวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

Rakesh K. Goel และ Anil K. Chopra (1997) ทำการศึกษาเรื่อง *"Period Formulas for Moment-Resisting Frame Buildings"* เป็นการพัฒนาสูตรเชิงเพื่อประมาณค่าคาบการสั่นไหวของอาคารโครงสร้างเหล็กและโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์แรงด้านข้างของอาคาร การปรับปรุงความแม่นยำของสูตรการคำนวณคาบการสั่นไหวพื้นฐานที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน เนื่องจากพบว่าสูตรที่ใช้อยู่ให้ค่าคาบการสั่นไหวที่สั้นกว่าค่าจริงที่วัดได้จากการสังเกตแผ่นดินไหวในแคลิฟอร์เนียหลายครั้ง มีวิธีการวิจัยดังนี้ 1.รวบรวมข้อมูลการสั่นไหวของอาคารจากแผ่นดินไหว 2.การวิเคราะห์เชิงถดถอย เพื่อพัฒนาสูตรสามารถประมาณค่าคาบการสั่นไหวได้อย่างแม่นยำโดยพิจารณาจากข้อมูลที่รวบรวมมา 3.วิเคราะห์ด้วยวิธี Rayleigh เพื่อดูปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าคาบธรรมชาติ ผลการศึกษาพบว่าสูตรการคำนวณที่พัฒนาขึ้นใหม่สามารถประมาณค่าคาบการสั่นไหวพื้นฐานของอาคารได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงมากกว่าสูตรที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน [1]

Rakesh K. Goel และ Anil K. Chopra (1998) ศึกษาวิจัย *"Period Formulas for Concrete Shear Wall Buildings"* โดย เป็นการศึกษาเพื่อพัฒนาสูตรในการประมาณค่าคาบการสั่นสะเทือนของอาคารที่มีผนังรับแรงเฉือนคอนกรีต สำหรับวิเคราะห์แรงด้านข้างตามมาตรฐานการก่อสร้าง (building codes) ของสหรัฐฯ งานวิจัยนี้ได้มีการประเมินสูตรที่ระบุในมาตรฐานปัจจุบัน โดยใช้ข้อมูลจากการวัด คาบการสั่นสะเทือนของอาคารที่ได้บันทึกจากแผ่นดินไหวในแคลิฟอร์เนีย เริ่มตั้งแต่แผ่นดินไหวซานเฟอร์นันโดในปี 1971 จนถึงแผ่นดินไหวนอร์ธริดจ์ในปี 1994 ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าสูตรในมาตรฐานปัจจุบันไม่เพียงพอต่อการประมาณค่าคาบการสั่นสะเทือนของอาคารที่ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาสูตรใหม่ที่ดีขึ้นโดยการปรับเทียบสูตรจากวิธี Dunkerley's Method กับข้อมูลการวัดโดยการวิเคราะห์เชิงถดถอย สูตรใหม่ที่พัฒนานี้ถูกออกแบบให้สามารถประมาณค่าคาบการสั่นสะเทือนพื้นฐานได้แม่นยำมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีการแนะนำปัจจัยที่จำกัดช่วงเวลาที่สามารถคำนวณได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Rayleigh's Method งานวิจัยนี้สรุปได้ว่าสูตรที่ได้รับ

การปรับปรุงใหม่นี้สามารถให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับข้อมูลจากการวัดการสั่นสะเทือนของอาคารผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตที่มีอยู่ได้ดีกว่าสูตรในมาตรฐานปัจจุบัน [2]

Lee et al. (2000) ได้ประเมินความน่าเชื่อถือของสูตรการคำนวณคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีผนังคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงเฉือนโดยใช้การตรวจวัดสถานที่จริงจากที่พักอาศัย 50 แห่งในเกาหลีใต้ และเปรียบเทียบผลที่ได้กับสูตรที่กำหนดในมาตรฐานการออกแบบอาคารต่าง ๆ เช่น มาตรฐานการออกแบบอาคารของเกาหลี (KBC) ปี 1988, UBC 1997, NBCC 1995 และ BSLJ 1994 ผลการวิจัยพบว่าสูตรการคำนวณที่ใช้อยู่ในมาตรฐานเหล่านี้มีข้อผิดพลาดเมื่อใช้กับอาคารที่มีผนังคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงเฉือน โดยค่าคาบการสั่นที่คำนวณได้มีความแตกต่างมากจากค่าที่วัดจริง ดังนั้นจึงมีการเสนอสูตรการคำนวณใหม่ที่ปรับปรุงขึ้นจากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ เพื่อให้สามารถประมาณคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารประเภทนี้ได้แม่นยำยิ่งขึ้น [3]

Kwon et al. (2010) ศึกษาการประเมินสูตรค่าคาบการก่อสร้างสำหรับการออกแบบด้านแผ่นดินไหว ประเมินโดยใช้ค่าคาบที่ตรวจวัดได้จากอาคาร 191 แห่ง และเหตุการณ์แผ่นดินไหวอีก 67 ครั้ง การเปรียบเทียบคุณภาพระหว่างคาบที่ได้จากการตรวจวัดและคาบที่คำนวณจากสูตรมาตรฐานการก่อสร้าง ASCE 7-05 พบว่าสูตรสำหรับโครงข้อแข็งเหล็กที่มีความเหนียวพิเศษ (steel moment-resisting frames) โดยทั่วไปสามารถคาดเดาค่าคาบที่ต่ำสุดได้ทุกความสูงของอาคาร อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างระหว่างคาบที่ได้จากสูตรในมาตรฐานและคาบที่ตรวจวัดจากอาคารที่มีความสูงระดับต่ำถึงปานกลางที่ค่อนข้างสูง นอกจากนี้ ค่าคาบของอาคารที่ออกแบบด้วยปัจจัยความสำคัญจะสั้นกว่าคาบของอาคารที่ไม่สำคัญประมาณ 40% สูตรสำหรับโครงคอนกรีตรับแรงดัดสามารถบอกค่าคาบที่ต่ำสุดของคาบที่ตรวจวัดได้ดี สูตรสำหรับโครงค้ำยัน (braced frames) สามารถคาดเดาค่าคาบที่ต่ำสุดของอาคารที่มีความสูงต่ำถึงปานกลางได้แม่นยำ สูตรสำหรับอาคารที่มีผนังเฉือน (shear wall buildings) ประเมินคาบสูงเกินไปสำหรับทุกความสูงของอาคาร สำหรับอาคารประเภทอื่น คาบที่ตรวจวัดได้สั้นกว่าคาบที่คำนวณจากสูตรในมาตรฐานอยู่มาก [4]

นคร ภู่วโรดม และคณะ, 2553 ได้ทำการวิจัยเรื่อง คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารและคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดินเพื่อการแบ่งเขตความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียดในจังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งศึกษาค่าคาบธรรมชาติของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลจากอาคารที่ตั้งอยู่ในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล รวมถึงอาคารในจังหวัดเชียงใหม่

และรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยก่อนหน้าเพื่อพัฒนาสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่สามารถนำไปใช้ออกแบบอาคารเพื่อด้านทานแผ่นดินไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการศึกษาได้สูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับอาคารด้านทานแรงแผ่นดินไหวในประเทศไทยได้แก่ $T = 0.02H$ ซึ่ง H คือความสูงของอาคารในหน่วยเมตร สูตรนี้ได้จากการวิเคราะห์เชิงถดถอยของข้อมูลค่าคาบธรรมชาติในการเสีรูปแต่ละทิศทาง (Transverse และ Longitudinal Direction) และนอกจากนี้ยังมีสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติสำหรับอาคารประเภทต่างๆเพื่อนำไปปรับใช้ร่วมกับมาตรฐานการออกแบบอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ [5]

Murat et al. (2011) ศึกษาการประเมินสูตรใหม่สำหรับการคำนวณคาบธรรมชาติของผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นการมุ่งเน้นการพัฒนาสูตรใหม่สำหรับคำนวณคาบธรรมชาติของผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็กแบบแผ่น สูตรใหม่นี้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรมกำหนดการเชิงพันธุกรรม (Genetic Programming) ซึ่งเป็นวิธีการเชิงคำนวณที่สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากข้อมูลตัวอย่าง เพื่อสร้างสูตรที่สามารถคาดเดาคาบธรรมชาติได้อย่างแม่นยำ ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) ของโมเดลผนังรับแรงเฉือน 148 แบบที่มีความสูงและความยาวที่หลากหลายถูกใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาสูตรนี้ด้วย ในการทดสอบและประเมินผลสูตรที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากสมการในมาตรฐานการก่อสร้างแผ่นดินไหวและผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าสูตรที่พัฒนาขึ้นใหม่ นี้มีความสอดคล้องและมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าสูตรในมาตรฐานการก่อสร้างแผ่นดินไหวปัจจุบัน การศึกษานี้จึงนำเสนอวิธีการที่ง่ายและปลอดภัยในการประมาณคาบธรรมชาติของโครงสร้างผนังรับแรงเฉือนคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งสามารถใช้แทนสูตรที่มีอยู่ในรหัสแผ่นดินไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพ [6]

Hatzigeorgiou et al. (2013) ศึกษาเรื่องการประเมินค่าคาบของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยพิจารณาอาคารที่สูงระดับเตี้ยถึงปานกลางงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาสูตรการประมาณคาบของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของอาคารที่มีการมีความแตกต่างกัน 20 แห่งในประเทศกรีซ โดยทำการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์และการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ (eigenvalue analysis) ของอาคารเหล่านี้ แบบจำลองเหล่านี้มีผนังกรอบอลูมิเนียมทั้งภายนอกและภายใน ซึ่งปกติจะไม่สนใจเนื่องจากไม่ใช่องค์ประกอบโครงสร้างซึ่งค่าคาบจะไม่ถูกต้องเนื่องจากการผนังกรอบมีผลต่อความแข็งด้านข้าง นอกจากนี้ความยืดหยุ่นของดินที่ก็ถูกนำมาพิจารณาเช่นกัน เพื่อให้ได้สูตรหาค่าคาบการสั่นสะเทือนของอาคารที่ง่าย และมีประสิทธิภาพ ได้ใช้

การวิเคราะห์การถดถอยที่ไม่เชิงเส้น (Non-Linear Regression Analysis) จากการวิเคราะห์สภาพพื้นดินและผนังมวลเบา (infill walls) มีผลต่อคาบธรรมชาติของอาคารอย่างมาก [7]

Mehmet Inel et al. (2019) ศึกษาวิจัยเรื่อง “*Determination of Period of RC Buildings by the Ambient Vibration Method*” ซึ่งเกี่ยวกับค่าคาบธรรมชาติของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตรวจวัดด้วยเซนเซอร์จากแรง ambient vibration เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการสั่นสะเทือนจริงของอาคารในสถานะที่ไม่มีแรงสั่นสะเทือนจากแหล่งภายนอก มีการเก็บข้อมูลอาคารจำนวน 40 หลัง มีความสูงและลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่าค่าคาบธรรมชาติของอาคารมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสูงของอาคาร กล่าวคือ อาคารที่มีความสูงมากจะมีค่าคาบธรรมชาติยาวขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าการมี ผนังคอนกรีตมวลเบาเสริมเหล็ก ภายในโครงสร้างช่วยลดค่าคาบธรรมชาติลงโดยเฉลี่ยประมาณ 15% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงบทบาทของผนังดังกล่าวในการเพิ่มความแข็งแรงและต้านทานการสั่นสะเทือนของอาคาร ส่วนการเพิ่ม ผนังรับแรงเฉือนในโครงสร้างยังส่งผลให้ค่าคาบธรรมชาติของอาคารลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยอยู่ในช่วงประมาณ 23–33% ขึ้นอยู่กับปริมาณและตำแหน่งของผนังรับแรงเฉือน เมื่อเปรียบเทียบผลการวัดจริงกับวิเคราะห์ด้วยโมเดลพบว่าโมเดลเหล่านี้มักประเมินค่าคาบธรรมชาติสูงกว่าค่าที่วัดได้จริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อโมเดลไม่ได้นำปัจจัยของผนังคอนกรีตมวลเบาเสริมเหล็กหรือผนังรับแรงเฉือนเข้ามาพิจารณา จึงชี้ให้เห็นว่าการออกแบบและการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารควรคำนึงถึงองค์ประกอบเหล่านี้เพื่อให้ได้ค่าที่แสดงพฤติกรรมจริงของอาคารมากขึ้น โดยรวมงานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้วิธีวัดแรงสั่นสะเทือนจาก ambient vibration เป็นวิธีที่รวดเร็วและไม่ทำลายโครงสร้างในการประเมินค่าคาบธรรมชาติของอาคาร นอกจากนี้ยังสนับสนุนให้มีการปรับปรุงโมเดลวิเคราะห์เชิงทฤษฎีให้ครอบคลุมองค์ประกอบของโครงสร้างที่มีผลต่อค่าคาบธรรมชาติ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการออกแบบและประเมินความปลอดภัยของอาคารในอนาคต [8]

Zengin และ Basak (2021) ทำการวิจัยการประเมินค่าคาบและสภาพพื้นดินอ่อนของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่มีผนังมวลเบา (infill walls) เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณผนังกึ่งที่ชั้นล่างต่อคาบการสั่นสะเทือนของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก และความไม่สม่ำเสมอของ สติฟเนสของชั้นอ่อนโดยสร้างแบบจำลองอาคารที่มีความสูงต่างกัน (3 6 9 และ 11 ชั้น) และลดปริมาณผนังกึ่งในทิศทาง x และ y ของชั้นล่างจนไม่มีผนังเลย จากนั้นทำการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรม SAP2000 เพื่อกำหนดคาบการสั่นสะเทือนและตรวจสอบปัญหาชั้นอ่อน รวมถึงเปรียบเทียบกับกรณีที่มีและไม่มีผนังกึ่งทั้งอาคาร นอกจากนี้ยังพิจารณาสูตรคำนวณคาบและพิจารณาผนังกึ่งสามารถให้

ผลลัพธ์ที่สมจริงหรือไม่ จากการศึกษาพบว่าผนังกรุมีผลเพิ่มความแข็งแรงด้านข้างของอาคาร ทำให้ stiffness ของโครงสร้างเพิ่มขึ้นและคาบการสั่นสะเทือนลดลง อย่างไรก็ตามผนังกรุจะรับแรงแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นครั้งแรกและแตกหักเมื่อจุดซับพลังงานแผ่นดินไหว ก่อนที่องค์ประกอบโครงสร้างหลัก เช่น เสาและกำแพงรับแรงเฉือนจะรับแรงแผ่นดินไหวต่อไป ผลการวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นว่าผนังกรุมีผลต่อพฤติกรรมของอาคารและควรพิจารณาในการออกแบบและวิเคราะห์อาคารเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำมากขึ้นในการประเมินประสิทธิภาพของอาคารในกรณีเกิดแผ่นดินไหว [9]

Taehyu Ha et al. (2020) ศึกษาและประเมินค่าอัตราส่วนความหน่วงและคาบธรรมชาติของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดอาคารจริงประเทศเกาหลี เพื่อสร้างฐานข้อมูลของตัวแปรการออกแบบรับแรงลม มีอาคารที่ศึกษาทั้งหมด 36 หลัง มีความสูงตั้งแต่ 44.8-305 เมตร นอกจากอาคารสูงแล้วยังมีการเพิ่มข้อมูลอาคารที่สูงน้อยกว่า 100 เมตร อีก 22 หลัง รวมอาคารที่ศึกษาทั้งสิ้น 58 หลัง ส่วนใหญ่เป็นอาคารที่พักอาศัย ใช้เซนเซอร์วัดการสั่นสะเทือนโดยรอบอาคารโดยใช้เครื่องมือวัดความเร่งติดตั้งที่ชั้นบนสุด หลังจากนั้นวิเคราะห์ด้วยวิธี Stochastic Subspace Identification (SSI) ซึ่งเป็นวิธีที่มักใช้สำหรับระบบเมื่อไม่ทราบค่าแรงอินพุต เมื่อวิเคราะห์ค่าแล้ว เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้สูตรเชิงประจักษ์ใน KBC 2009 และ ASCE 7-10 กับความถี่ธรรมชาติที่วัดได้ โดยเฉพาะสูตรเชิงประจักษ์ใน ASCE 7-10 ให้คาบธรรมชาติยาวกว่าสองเท่าของคาบธรรมชาติที่วัดได้ แต่คาบธรรมชาติที่ประมาณโดยใช้สูตรใน KBC 2009 ค่อนข้างใกล้เคียงกับคาบธรรมชาติที่วัดได้ แม้ว่าสูตรนี้จะเกี่ยวข้องกับการออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหวของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สรุปได้ว่าสูตรที่ให้ไว้ใน KBC 2009 และ ASCE 7-10 ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้ในระยะเวลาเริ่มต้นของการออกแบบลม จึงมีการเสนอสมการสำหรับการประมาณคาบธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วงสำหรับออกแบบรับแรงลมของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนี้ $T=0.0196H = H/51$ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการดังกล่าวคือ 0.9861 บ่งชี้ว่าข้อมูลคาบธรรมชาติที่วัดได้มีความสัมพันธ์กันมากกับความสูงของอาคาร ส่วนอัตราส่วนความหน่วงกล่าวได้ว่าค่าอัตราส่วนการหน่วงลดลงเมื่อความสูงของอาคารเพิ่มขึ้น [10]

เกรียงไกร ใจเย็น (2022) ศึกษาการระบุคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างจากผลการตอบสนองการสั่นไหวจากธรรมชาติพบว่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กมีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างที่สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพผลการวิจัยได้แสดงให้เห็นถึงวิธีการวิเคราะห์ที่หลากหลายเช่น วิธี ERA (Eigensystem Realization Algorithm), SSI-COV (Stochastic Subspace Identification using

Covariance) และ SSI-DATA (Stochastic Subspace Identification using Data) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ เช่น ความถี่ธรรมชาติ ค่าคาบธรรมชาติ อัตราส่วนความหน่วง และรูปร่างการสั่น การวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าวิธี SSI-COV และ SSI-DATA มีความแม่นยำมากกว่าวิธี ERA ในหลายโหมดการสั่น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของความหน่วงในโหมดการสั่นที่ 1 มีค่าความคลาดเคลื่อนที่สูงมาก ทำให้การวิเคราะห์มีประสิทธิภาพลดลงภายใต้แรงแบบสุ่มโดยไม่มี การกำหนดเงื่อนไขการเคลื่อนที่เริ่มต้น [11]



บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและวิธีการวิจัย

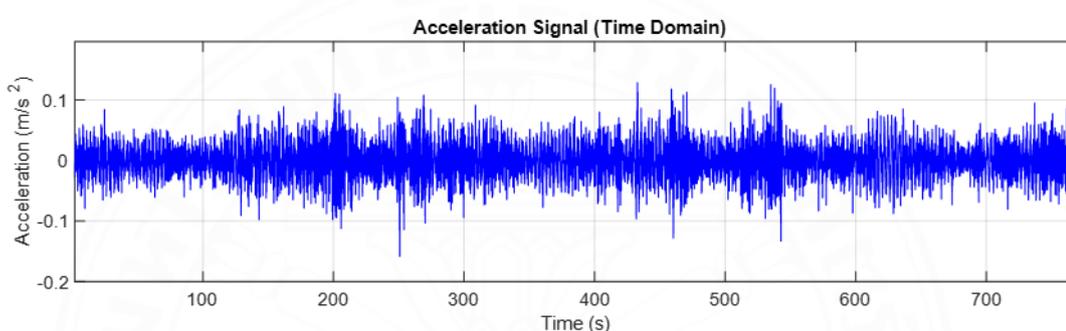
3.1 การตรวจวัดการตอบสนองของอาคารภายใต้แรงกระทำจากสภาพแวดล้อม

การตรวจวัดการสั่นไหวของอาคารเป็นหนึ่งในกระบวนการวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์การสั่นสะเทือนของโครงสร้าง เพื่อทำความเข้าใจผลกระทบของแรงกระทำที่ส่งผลต่อความมั่นคงและสมรรถนะของอาคารในระยะยาว ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ นำมาจากโครงการวิจัยเรื่อง *การปรับปรุงข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร และการพัฒนาระบบตรวจสอบสมรรถนะของโครงสร้างแบบระยะยาว* ซึ่งเป็นแหล่งข้อมูลที่ผ่านมากระบวนการตรวจวัดอาคารหลายพื้นที่ในประเทศไทย เช่น กรุงเทพมหานคร เชียงใหม่ เชียงราย เป็นต้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงใช้ข้อมูลที่มีอยู่แล้วในการนำมาวิเคราะห์ต่อไปเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด การตรวจวัดการสั่นไหวของอาคารภายใต้ Ambient Vibration เป็นหนึ่งในวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เป็นวิธีที่ไม่ต้องอาศัยแรงกระทำขนาดใหญ่ เช่น แรงแผ่นดินไหวหรือแรงลมรุนแรง แต่สามารถอาศัยแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติภายในและภายนอกอาคาร ได้แก่ แรงที่เกิดจากลม การเคลื่อนที่ของยานพาหนะ กิจกรรมในชีวิตประจำวันของผู้ใช้อาคาร เป็นต้น การตรวจวัดลักษณะนี้สามารถนำไปวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ ได้แก่ ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency), อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio), และรูปร่างการสั่นของอาคาร (Mode Shapes)

กระบวนการตรวจวัดการสั่นสะเทือนและลักษณะทางกายภาพของอาคารในโครงการวิจัยข้างต้นเริ่มต้นด้วย การวางแผนการตรวจวัดเพื่อให้ง่ายและสะดวกต่อการดำเนินงานในสถานที่ตรวจวัดจริง รวมถึงหลีกเลี่ยงการรบกวนผู้ใช้อาคาร โดยเฉพาะพื้นที่ที่มีการใช้งานสูง เช่น พื้นที่สำนักงานหรือที่พักอาศัย การติดตั้งหัววัดควรดำเนินการในตำแหน่งที่เหมาะสม เช่น บริเวณบันไดหนีไฟ ซึ่งเป็นจุดที่ไม่รบกวนผู้ใช้อาคาร และควรกำหนดตำแหน่งอ้างอิง (Reference Floor) ให้เป็นจุดที่ใช้หัววัดซึ่งคงที่ตลอดการตรวจวัดทุกช่วงเวลา ในขณะที่ตำแหน่งชั้นที่เปลี่ยนแปลง (Roving Floor) จะเป็นตำแหน่งที่สลับการติดตั้งหัววัดในแต่ละรอบของการตรวจวัด เพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลครอบคลุมทั้งอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับการบันทึกข้อมูลการสั่นสะเทือน เครื่องมือตรวจวัดบันทึกข้อมูลในรูปแบบ time domain ในทิศทาง X และ Y ใช้อัตราการเก็บข้อมูล 200 ข้อมูลต่อวินาที เป็นระยะเวลา 20-30 นาที กล่าวคือมีข้อมูลการสั่นสะเทือนของอาคารอยู่ในช่วง 240,000 - 360,000 ข้อมูล และยังมีข้อมูลการตรวจวัดลักษณะทางกายภาพของอาคาร เช่น ความกว้าง ความยาว ความสูง มวลของอาคาร โมเมนต์ความเฉื่อย เป็นต้น กระบวนการตรวจวัดดังกล่าว

เป็นมาตรฐานที่ใช้ในโครงการวิจัยเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดนี้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการสั่นสะเทือนของอาคารต่อไป

ผลการตรวจวัดการสั่นไหวของอาคารภายใต้แรงกระทำจากสภาพแวดล้อม สัญญาณที่ได้จะเป็นดังภาพที่ 3.1 แสดงตัวอย่างสัญญาณการสั่นสะเทือนของอาคารในโดเมนเวลา (Time Domain) สัญญาณในกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร่งหรือความเร็ว เมื่อเวลาผ่านไป โดยแกนอนแสดงเวลา (วินาที) และแกนตั้งแสดงค่าความเร่งในทิศทางที่วัด



ภาพที่ 3.1 สัญญาณความเร่งการสั่นสะเทือนตามเวลา

3.1.1 การแปลงสัญญาณเพื่อวิเคราะห์ทิศทางการบิดของอาคาร

การศึกษาพฤติกรรมการสั่นของอาคาร ซึ่งรวมถึงการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นและการบิดของอาคาร จำเป็นต้องอาศัยแนวคิดการแปลงการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็ง (rigid body transformation) เป็นการแปลงทางเรขาคณิตที่รักษารูปร่างและขนาดของวัตถุนั้นเอาไว้ โดยเฉพาะกรณีที่มีการติดตั้งหัววัดหลายตำแหน่งบนพื้นของอาคาร เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ พื้นของอาคารแต่ละชั้นสามารถสมมติให้มีพฤติกรรมเป็นแผ่นแข็ง (rigid diaphragm) ซึ่งหมายถึงแต่ละจุดบนพื้นจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการเคลื่อนที่เชิงเส้นร่วมกับการบิดรอบจุดศูนย์กลางของพื้น โดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปในระนาบ ด้วยเหตุนี้ข้อมูลที่ได้จากหัววัดที่ติดตั้ง ณ ตำแหน่งของพื้นอาคารจึงสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อแยกองค์ประกอบของการเคลื่อนที่ออกเป็นส่วนของการเคลื่อนที่เชิงเส้นและการบิดได้ ในงานวิจัยนี้ติดตั้งหัววัดที่มุมสองจุดของพื้นอาคาร ซึ่งหัววัดแต่ละหัวสามารถบันทึกการเคลื่อนที่ในทิศทาง X และ Y ต่อเนื่องตามเวลา จากนั้นแปลงสัญญาณที่ได้จากหัววัดทั้งสองที่อยู่ห่างกันในแนวทแยงเชิงพื้นที่ ให้กลายเป็นสัญญาณที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของพื้น ดังภาพที่ 3.4 โดยแยกออกเป็นองค์ประกอบของการเคลื่อนที่เชิงเส้นของศูนย์กลางและการบิดของ

พื้นอาคารรอบแกนตั้งฉากกับระนาบ ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของจุดบนพื้นอาคารกับการเคลื่อนที่ของจุดศูนย์กลางของพื้นสามารถเขียนในรูปของสมการเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & (x_c - x_1) \\ 1 & -(x_c - x_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_c \\ \theta_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

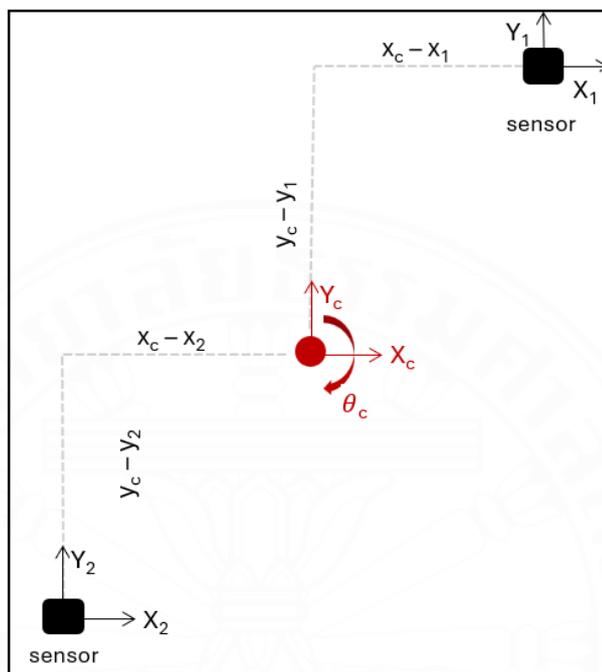
$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & (y_c - y_1) \\ 1 & -(y_c - y_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ \theta_c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

ตารางที่ 3.1 อธิบายตัวแปรในสมการการแปลงการเคลื่อนที่ของพื้นอาคาร

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
X_1, X_2	การเคลื่อนที่เชิงเส้นในทิศทาง X ของหัววัดตำแหน่งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ	เมตร (m) หรือ มิลลิเมตร (mm)
Y_1, Y_2	การเคลื่อนที่เชิงเส้นในทิศทาง Y ของหัววัดตำแหน่งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ	เมตร (m) หรือ มิลลิเมตร (mm)
X_c, Y_c	การเคลื่อนที่เชิงเส้นของจุดศูนย์กลางพื้นอาคารในทิศทาง X และ Y ตามลำดับ	เมตร (m) หรือ มิลลิเมตร (mm)
θ_c	มุมการบิดของพื้นอาคารรอบแกนตั้งฉากกับระนาบ (แกน Z) ณ ศูนย์กลาง	เรเดียน (rad)
x_1, x_2	พิกัดตำแหน่งในทิศทาง X ของหัววัดตำแหน่งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ	เมตร (m)
y_1, y_2	พิกัดตำแหน่งในทิศทาง Y ของหัววัดตำแหน่งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ	เมตร (m)
x_c, y_c	พิกัดในทิศทาง X และ Y ของจุดศูนย์กลางของพื้นอาคาร	เมตร (m)

การใช้สมการเมทริกซ์ที่ 3.1 และ 3.2 มีความสำคัญในการประเมินพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของอาคารเนื่องจากสามารถใช้ระบุลักษณะการบิด (torsional response) ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการต้านทานแรงกระทำด้านข้าง เช่น แรงแผ่นดินไหว โดยเฉพาะในกรณีที่อาคารมีความไม่สมมาตรของมวลหรือความแข็งในแนวระนาบ อาจทำให้เกิดการบิดตัวร่วมกับการเคลื่อนที่เชิงเส้น ดังนั้นการแปลงสัญญาณจากหัววัด ณ ตำแหน่งที่ทราบพิกัดมาเป็นที่จุดศูนย์กลางของพื้นอาคาร รวมถึงการหา

ค่าการบิดที่สัมพันธ์กัน จึงเป็นขั้นตอนสำคัญที่ช่วยให้สามารถวิเคราะห์และประเมินพฤติกรรมการสั่นของโครงสร้างอาคารในเชิงพลศาสตร์ได้อย่างถูกต้อง



ภาพที่ 3.2 การแปลงสัญญาณที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของพื้นอาคารที่ติดตั้งหัววัด

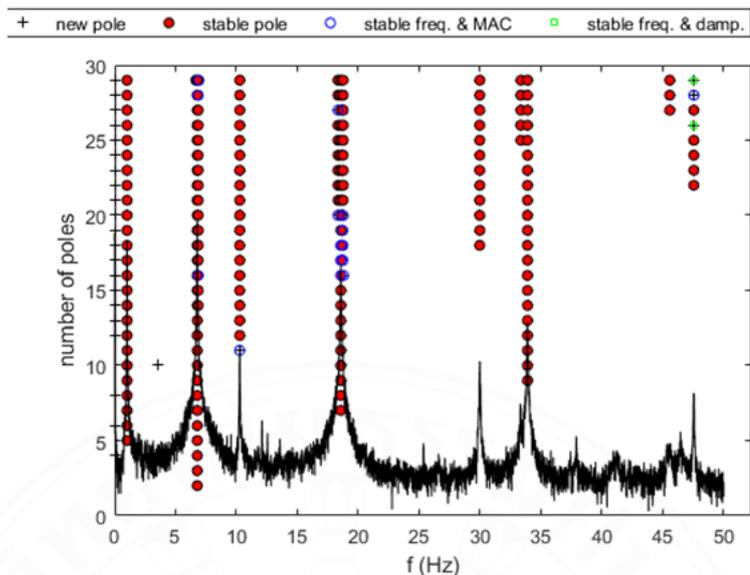
3.2 เทคนิคการระบุพารามิเตอร์เชิงพลศาสตร์จากสัญญาณการสั่น

การวิเคราะห์สัญญาณการสั่นของโครงสร้างเป็นกระบวนการสำคัญที่ใช้ในการระบุคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ ซึ่งเป็นข้อมูลสำหรับประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำ เช่น แผ่นดินไหวหรือลม ในการศึกษาเน้นเน้นการประยุกต์ใช้เทคนิคที่วิเคราะห์ข้อมูลในพิสัยเวลา (Time domain) มีข้อได้เปรียบเมื่อใช้ร่วมกับข้อมูลสัญญาณที่ตรวจวัดได้จริงจากการตอบสนองของอาคารต่อแรงกระตุ้นโดยรอบ โดยเลือกใช้วิธี Stochastic Subspace Identification (SSI) ซึ่งเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ระบบเชิงสถิติ ทั้งนี้ วิธีดังกล่าวแบ่งออกเป็นสองวิธีหลัก คือ Covariance-driven SSI และ Data-driven SSI ซึ่งแตกต่างกันทั้งในเชิงคณิตศาสตร์และลำดับขั้นตอนการวิเคราะห์ นอกจากนี้ เพื่อให้ครอบคลุมแนวทางที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพิ่มเติม ยังได้พิจารณาการใช้วิธี Recursive Subspace Identification (RSI) ซึ่งเป็นการพัฒนาต่อยอดจาก SSI ให้สามารถปรับปรุงค่าประมาณของคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ได้อย่างต่อเนื่องเมื่อมีข้อมูลใหม่เข้ามา วิธี SSI มีรากฐานมา

จากทฤษฎีการระบุระบบ (System Identification Theory) ที่ช่วยประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบจากแรงกระทำในสภาพแวดล้อม หรือกล่าวได้ว่าเป็นข้อมูลอินพุตซึ่งไม่ได้มีการควบคุม ภายใต้สมมติฐานโครงสร้างอาคารสามารถพิจารณาเป็นระบบเชิงเส้นที่มีการตอบสนองแบบสุ่ม วิธีนี้จึงใช้แนวคิดการวิเคราะห์เวกเตอร์สถานะ (State-Space Analysis) โดยอาศัยเพียงข้อมูลตรวจวัดจากเซ็นเซอร์ (output) เพื่อนำไปสร้างแบบจำลองเชิงสถานะ และวิเคราะห์เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติ อัตราส่วนความหน่วงและรูปร่างการสั่นที่เกี่ยวข้อง ขั้นตอนหลักในการวิเคราะห์ประกอบด้วย

1. การจัดเตรียมข้อมูล โดยสัญญาณการสั่นที่ตรวจวัดได้ในทิศทาง X และ Y จะถูกนำมาพิจารณาแยกกัน เพื่อให้สามารถวิเคราะห์พฤติกรรมการสั่นสะเทือนได้อย่างละเอียด
2. การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของระบบ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการ SSI เพื่อระบุค่าพารามิเตอร์ เช่น ความถี่ธรรมชาติ อัตราส่วนความหน่วงและรูปร่างการสั่นของโครงสร้าง
3. การสร้างแผนภาพการทำให้เสถียร (Stabilization Diagram) เพื่อแสดงผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ โดยตรวจสอบความเสถียรของค่าพารามิเตอร์เมื่อเพิ่มลำดับของระบบ

แผนภาพเสถียรภาพ ดังแสดงในภาพที่ 3.3 ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารด้วยวิธี SSI โดยในกราฟปรากฏสเปกตรัมฟูเรียร์ของสัญญาณการสั่นหรือเส้นสีดำ และตำแหน่งของโพลที่ถูกระบุจากแบบจำลอง SSI ในแต่ละลำดับของระบบ ซึ่งถูกพล็อตเป็นจุดสีต่างกับนระหว่างความถี่ จุดสีแดงในกราฟแสดงถึงจุดที่เสถียร (Stable Poles) หมายถึงตำแหน่งที่ค่าความถี่ของระบบคงที่เมื่อเพิ่มลำดับของระบบ จุดกลุ่มเหล่านี้ถูกใช้เป็นหลักในการพิจารณา ค่าความถี่ธรรมชาติในแต่ละโหมดของอาคารโดยพิจารณาจากการรวมกลุ่มในแนวตั้งของจุดที่เสถียร ซึ่งสะท้อนถึงพฤติกรรมของโหมดที่มีอยู่จริง นอกจากนี้ยังพิจารณาเส้นสเปกตรัมฟูเรียร์ร่วมด้วยเพื่อยืนยันตำแหน่งค่าความถี่ธรรมชาติแต่ละโหมดให้แม่นยำมากยิ่งขึ้น เนื่องจากจะมีลักษณะยอดแหลมบริเวณที่มีพลังงานสั่นสะเทือนสูง ซึ่งมักตรงกับตำแหน่งของความถี่ธรรมชาติ โดยเฉพาะโหมดพื้นฐานที่มักเป็นโหมดหลักในการตอบสนองของอาคารต่อแรงภายนอก ดังนั้น จุดสีแดงที่เรียงตัวอย่างเสถียรในแนวตั้ง และตรงกับยอดของสเปกตรัมฟูเรียร์ จึงถูกใช้เป็นค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารในแต่ละโหมด ซึ่งถือเป็นผลลัพธ์สำคัญจากการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างด้วยวิธี SSI



ภาพที่ 3.3 แผนภาพเสถียรภาพ (Stabilization Diagram)

กล่าวได้ว่าการใช้ข้อมูลตรวจวัดจริงร่วมกับเทคนิค SSI จะได้ผลลัพธ์ในรูปแบบของแผนภาพการทำให้เสถียร จากนั้นจึงดำเนินการวิเคราะห์ต่อเนื่องตามกระบวนการ SSI เพื่อคัดแยกโหมดของโครงสร้างออกจากสัญญาณรบกวน โดยพิจารณาจากจุดที่ค่าพารามิเตอร์มีเสถียรภาพตามการเพิ่มลำดับของโมเดล ซึ่งช่วยให้ได้ค่าประมาณความถี่ธรรมชาติที่แม่นยำยิ่งขึ้น สิ่งสำคัญของวิธี SSI คือ ใช้เพียงสัญญาณที่เกิดจากสภาพแวดล้อมก็สามารถระบุโหมดการสั่นของโครงสร้างได้ครอบคลุมแม้ในโหมดลำดับสูง ทั้งนี้ ความละเอียดของผลการวิเคราะห์ยังขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องมือวัด โดยหากใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดสูงจะสามารถตรวจจับการสั่นสะเทือนที่มีขนาดเล็กได้ชัดเจนยิ่งขึ้น สำหรับวิธี SSI สามารถแบ่งได้เป็นสองแนวทางหลัก ได้แก่ Covariance-driven SSI และ Data-driven SSI ซึ่งแตกต่างกันทั้งในเชิงการคำนวณและลำดับขั้นตอน

3.2.1 Covariance-driven Stochastic Subspace Identification (SSI-COV)

เป็นวิธีการวิเคราะห์ในโดเมนเวลา เพื่อระบุค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างจากข้อมูลการสั่นสะเทือนที่ไม่มีข้อมูลการกระตุ้น ซึ่งวิธีดังกล่าวเหมาะสำหรับวิเคราะห์โครงสร้างที่มีความซับซ้อน เนื่องจากสามารถระบุค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์จากข้อมูลการตรวจวัดที่มีสัญญาณรบกวนได้อย่างแม่นยำ วิธีนี้เน้นการใช้ข้อมูลจากผลลัพธ์เท่านั้น หลักการพื้นฐานของ SSI-COV คือการสร้างและวิเคราะห์โมเดล state-space ของระบบจากข้อมูลการสั่นสะเทือน วิธีการนี้จะใช้การคำนวณสหสัมพันธ์ (Covariance Matrices) ระหว่างข้อมูลการวัดในแต่ละช่วงเวลา เพื่อสร้างโมเดลของระบบ จากนั้นจึงใช้เทคนิคพีชคณิตเชิงเส้น เช่น Singular Value Decomposition (SVD)

เพื่อแยกสัญญาณและระบุพารามิเตอร์โมเดลที่สำคัญ เช่น ความถี่ธรรมชาติ อัตราส่วนความหน่วง และรูปร่างการสั่นสะเทือน

การวิเคราะห์ด้วย SSI-COV โดยขั้นตอนแรกเริ่มจากการวิเคราะห์เมทริกซ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดอาคาร ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.3 โดยที่ N คือ จำนวนข้อมูลที่ตรวจวัด T

$$R_i = \frac{1}{N-i} \sum_{k=0}^{N-i-1} y_{k+i} \cdot y_k^T \quad (3.3)$$

เมื่อคำนวณค่าเมทริกซ์สหสัมพันธ์ (R_i) แต่ละค่าที่ได้จากสมการแล้ว จึงนำมาจัดให้อยู่ในรูป Toeplitz Matrix ($T_{1|i}$) ได้ดังนี้

$$T_{1|i} = \begin{bmatrix} R_i & R_{i-1} & \cdots & R_1 \\ R_{i+1} & R_i & \cdots & R_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{2i-1} & R_{2i-2} & \cdots & R_i \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

การนำสมบัติการแยกตัวประกอบไปใช้กับ Toeplitz Matrix จะได้

$$T_{1|i} = O_i \Gamma_i \quad (3.5)$$

โดยที่ O_i คือ Observability matrix และ Γ_i คือ Stochastic controllability matrix สามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$O_i = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{i-1} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\Gamma_i = \begin{bmatrix} A^{i-1}G & \cdots & AG & G \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

เมื่อนำวิธี Singular Value Decomposition (SVD) มาใช้กับ Toeplitz Matrix จะแยกสมการให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ ดังนี้

$$T_{1i} = USV^T \quad (3.8)$$

โดย U และ V คือ Orthonormal matrices และ Diagonal matrix ตามลำดับ จากสมการที่ (3.5) และ (3.8) สามารถแสดงสมการได้ ดังนี้

$$T_{1i} = O_i \Gamma_i = USV^T \quad (3.9)$$

สามารถคำนวณหา Observability matrix และ Stochastic controllability matrix ได้จากสมการที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ ดังนี้

$$O_i = US^{1/2} \quad (3.10)$$

$$\Gamma_i = T^{-1}S^{1/2}V^T \quad (3.11)$$

โดย T คือเมทริกซ์ไม่เอกฐาน (Non-singular matrix) ถูกนำมาใช้ในแบบจำลอง state-space หรือเพื่อง่ายต่อการคำนวณสามารถกำหนดให้ T เป็นเมทริกซ์เอกลักษณ์ $T=I$

Observability matrix (O_i) สามารถคำนวณค่าเมทริกซ์ A จากสมการที่ 3.6 และ C จากแถวแรกของ Observability matrix เป็นการวิเคราะห์แบบ state-space model

$$A = [O_i^{-1}][O_i] \quad (3.12)$$

โดย $[O_i^{-1}]$ และ $[O_i]$ หมายถึงลบแถวสุดท้ายและแถวแรกของเมทริกซ์ O_i ออกตามลำดับ จากนั้นสามารถนำเมทริกซ์ A ไปหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ได้ด้วยวิธี Eigenvalue Decomposition (EVD) ดังนี้

$$A = \Psi M \Psi^{-1} \quad (3.13)$$

โดย Ψ คือ Eigenvectors ที่ประกอบด้วย $\{\Psi_m\}$ และ M คือ Eigenvalues เป็น diagonal matrix ที่ประกอบไปด้วย μ_m สำหรับ Eigenvectors คือการรวมกันของรูปร่างการสั่น $\{\phi_m\}$ กับ eigenvalues μ_m ดังนั้นสามารถหาค่าดังกล่าวได้จากสมการ ดังนี้

$$\{\phi_m\} = C \{\Psi_m\} \quad (3.14)$$

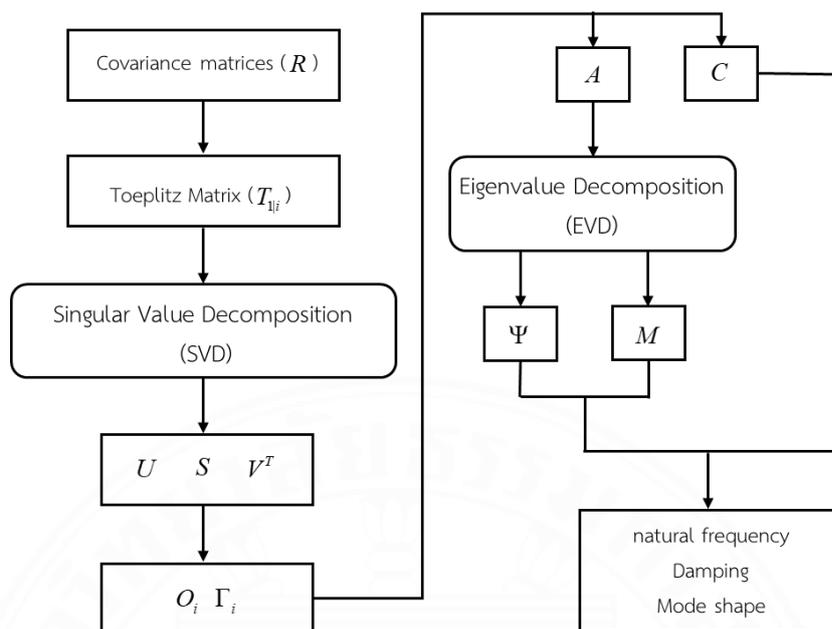
ในขณะหาค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วงของระบบในรูปแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง หาได้โดยนำค่า ที่ได้จาก eigenvalues ที่ทำการแปลงจากเวลาไม่ต่อเนื่องเป็นเวลาต่อเนื่อง ได้ดังนี้

$$\lambda_m = \frac{\ln(\mu_m)}{\Delta t} \quad (3.15)$$

จากนั้นสามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วง ได้จากสมการ 3.16 และ 3.17 ตามลำดับ

$$f_m = \frac{|\lambda_m|}{2\pi} \quad (3.16)$$

$$\xi_m = \frac{\text{Re}(\lambda_m)}{|\lambda_m|} \quad (3.17)$$



ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการคำนวณของวิธี SSI เพื่อหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์

3.2.2 Data-driven Stochastic Subspace Identification (SSI-Data)

SSI-Data เป็นวิธีสำหรับระบุระบบพลศาสตร์เชิงเส้นในโดเมนเวลา อาศัยข้อมูลการตรวจวัดของระบบที่ได้รับแรงกระทำแบบสุ่ม เช่น แรงกระทำจากสภาพแวดล้อม โดย SSI-Data เหมาะสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างหรือระบบแบบสุ่ม และสามารถใช้ในการหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ นอกจากนี้ข้อดีของ SSI-Data คือมีความแม่นยำทางคณิตศาสตร์และมีการประมวลผลที่รวดเร็วเนื่องจากสามารถแปลงปัญหาการระบุพารามิเตอร์เป็นปัญหา least squares ได้ อีกทั้งยังสามารถจัดการกับข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนได้ดี SSI-Data จึงเป็นวิธีที่นิยมใช้ในงานวิจัยและการประเมินสภาพโครงสร้าง ในการระบุค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์จากข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวน

หลักการและการคำนวณของวิธี SSI-DATA เหมือนกับวิธี SSI-COV ทุกประการ ต่างกันเพียงวิธีนี้นำข้อมูลดิบของการตรวจวัดมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยขั้นตอนแรกเริ่มจากรวบรวมผลลัพธ์การตรวจวัดการสั่นสะเทือนโดยจัดเก็บในรูปแบบเมทริกซ์ Y ข้อมูลนี้ถือว่าเป็นผลรวมของการตอบสนองของโครงสร้างและสัญญาณรบกวนเนื่องจากเป็นข้อมูลดิบ จากนั้นสร้าง Hankel Matrix (H) จากเมทริกซ์ Y ซึ่งเป็นการจัดเรียงข้อมูลให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงเวลาในระบบ ดังสมการนี้

$$H = \begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \cdots & y(i) \\ y(2) & y(3) & \cdots & y(i+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y(j) & y(j+1) & \cdots & y(i+j-1) \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

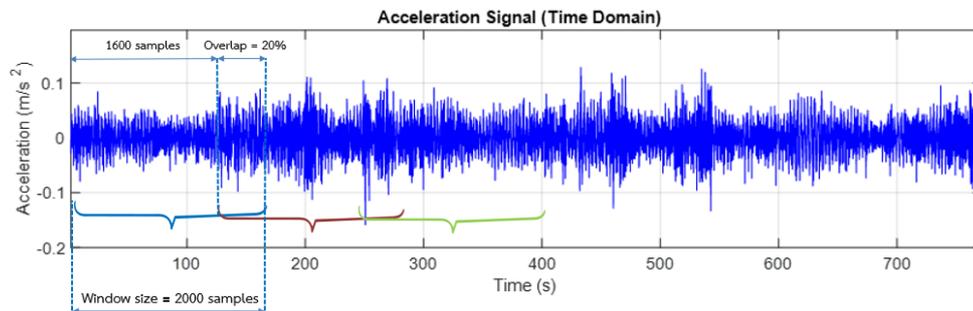
จากนั้นลดมิติด้วย Singular Value Decomposition (SVD) เพื่อแยกสัญญาณจริงของข้อมูลออกจากสัญญาณรบกวน

$$H = U \Sigma V^T \quad (3.19)$$

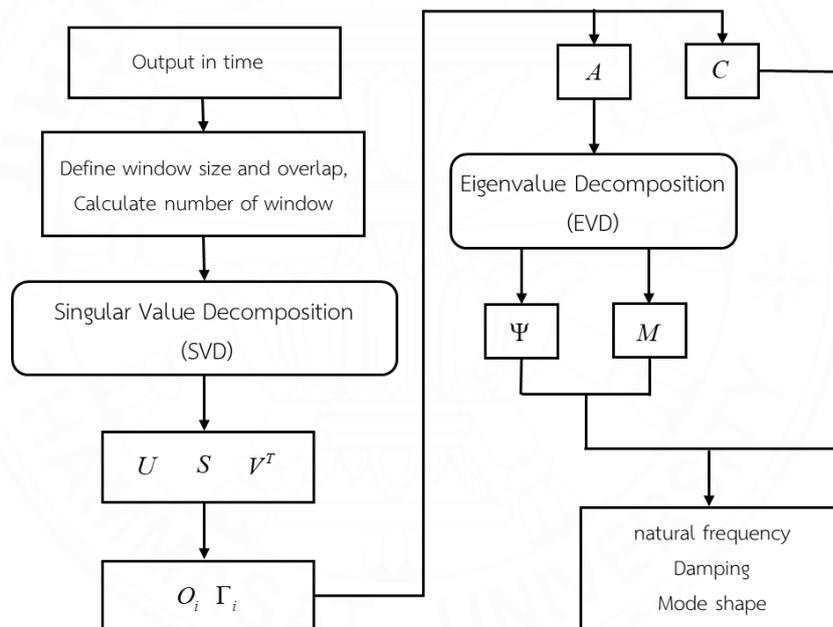
โดย U คือ Eigenvectors ของ H , Σ คือ Singular values และ V คือ Eigenvectors ของ H^T

3.2.3 Recursive Subspace Identification (RSI)

การ Recursive Subspace Identification (RSI) เป็นวิธีการที่ต่อยอดจากวิธี SSI ในลักษณะ data-driven ดังแสดงในภาพที่ 3.6 โดยแตกต่างจาก Covariance-driven SSI ตรงที่ไม่สร้าง Toeplitz matrix เพื่อคำนวณความสัมพันธ์ของข้อมูล แต่จะใช้การจัดเรียงข้อมูลตรวจวัดในรูปแบบ Hankel matrix ซึ่งเหมาะสมสำหรับการดึงลักษณะเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างโดยตรงจากสัญญาณเอาต์พุตในโดเมนเวลา วิธีนี้มีจุดเด่นที่สามารถแบ่งข้อมูลสัญญาณออกเป็นช่วงย่อย (window) ตามขนาดหน้าต่างและค่า overlap ที่กำหนด ดังภาพที่ 3.5 แสดงตัวอย่างโดยใช้ขนาดหน้าต่าง 2,000 samples (ประมาณ 10 วินาที ที่อัตราการสุ่มตัวอย่าง 200 Hz) และ overlap 20% ส่งผลให้ช่วงเลื่อน (step size) เท่ากับ 1,600 samples ทำให้เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลทั้งหมดราว 240,000 samples จะได้ประมาณ 150 windows กระบวนการวิเคราะห์ RSI จะเริ่มจากการใช้สัญญาณความเร่งหรือความเร็วที่ตรวจวัดได้ จากนั้นนิยามขนาดหน้าต่างและจำนวนหน้าต่างทั้งหมด เมื่อได้ข้อมูลแบ่งเป็นช่วงแล้ว จะสร้าง Hankel matrix สำหรับแต่ละ window แล้วนำไปทำ SVD เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงโครงสร้าง ก่อนคำนวณเมทริกซ์สถานะ $[A]$ และ $[C]$ ซึ่งอธิบายพฤติกรรมพลศาสตร์ของระบบ แล้วทำ Eigenvalue Decomposition (EVD) ของ $[A]$ เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่น วิธี RSI จึงสามารถวิเคราะห์และปรับปรุงค่าประมาณของคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ได้อย่างต่อเนื่องเมื่อมีข้อมูลใหม่เข้ามา อีกทั้งยังสามารถแยกสัญญาณรบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพหากมีการเลือกค่าพารามิเตอร์ของหน้าต่างและการเลื่อนที่มีความเหมาะสม ทำให้เหมาะสมอย่างยิ่งต่อการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่หรือกรณีที่ต้องการติดตามการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างในเชิงเวลา



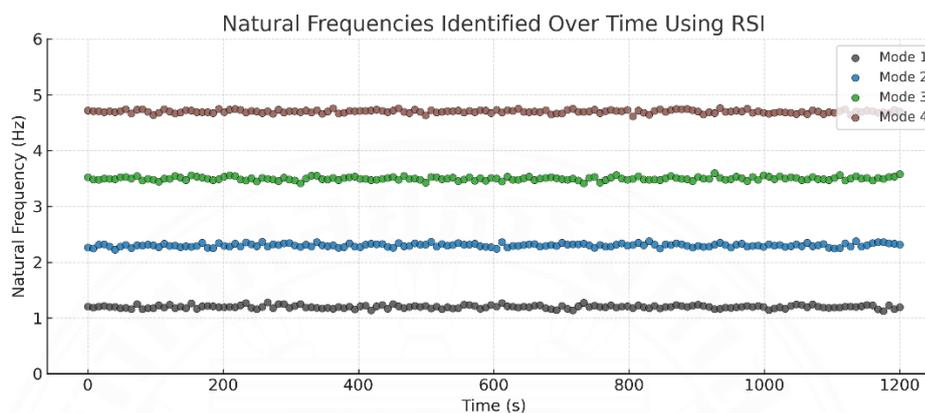
ภาพที่ 3.5 ตัวอย่างการแบ่งข้อมูลสัญญาณความเร่งตามขนาดหน้าต่างและค่าการซ้อนทับ (Overlap) สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธี RSI



ภาพที่ 3.6 ขั้นตอนการคำนวณของวิธี RSI เพื่อหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์

ตัวอย่างผลลัพธ์จากการประมวลผลด้วยวิธี RSI แสดงดังภาพที่ 3.7 ซึ่งแสดงการกระจายของค่าคาบธรรมชาติทั้งหมดที่ได้จากข้อมูลแต่ละ window ตลอดช่วงเวลากาวัด ในกรณีนี้ ระบบทำการประเมินค่าคาบธรรมชาติจากแต่ละหน้าต่างของข้อมูล (ซึ่งแบ่งตามวิธีในภาพที่ 3.4) และทำการติดตามค่าที่ได้ในพิสัยเวลา ซึ่งจะพบว่าค่าคาบธรรมชาติมีความคงที่ในช่วงเวลาส่วนใหญ่ แสดงถึงเสถียรภาพของคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างในช่วงเวลาที่วัด นอกจากนี้ ยังสามารถสังเกตได้ว่าแต่ละโหมดของการสั่นมีการแยกกลุ่มกันอย่างชัดเจน โดยไม่มีการทับซ้อนระหว่างโหมด อีกทั้งการ

กระจายตัวของค่าคาบธรรมชาติในแต่ละโหมดมีความแคบ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ที่ดี และประสิทธิภาพของการเลือกขนาดหน้าต่างและค่า overlap ที่เหมาะสม



ภาพที่ 3.7 ค่าคาบธรรมชาติของแต่ละโหมดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี RSI ตลอดช่วงเวลา 1,200 วินาที

3.3 การพัฒนาสูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติอาคารสำหรับการออกแบบต้านทานแรงแผ่นดินไหว

จากสมการการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่เหมาะสมตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยพ. 1302 มีการนำเสนอสูตรคาบธรรมชาติที่ใช้ออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหวซึ่งมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับความสูงของอาคารเป็นหลัก นอกจากความสูงของอาคารแล้วยังมีลักษณะทางกายภาพอื่นของอาคารอีก เช่น ความกว้างหรือความลึก ที่ยังไม่ได้มีการนำเสนอว่ามีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับคาบธรรมชาติของอาคาร

สูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติกับความสูงของอาคารในรูปทั่วไป แสดงได้ดังนี้

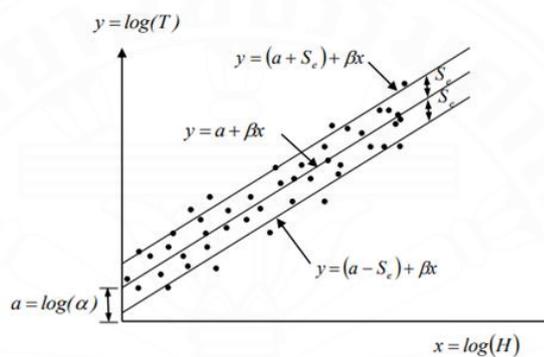
$$T = \alpha H^\beta \quad (3.20)$$

โดย α และ β คือ ค่าคงที่ที่คำนวณมาจากการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) เปลี่ยนให้เป็นรูปแบบสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$y = a + \beta x \quad (3.21)$$

โดยที่ $y = \log(T)$, $a = \log(\alpha)$ และ $x = \log(H)$

จากสมการที่ 3.20 เป็นสมการเส้นตรงซึ่ง a หมายถึงจุดตัดที่แกน y เมื่อ $x = 0$, β คือความชันของเส้นตรง แสดงเป็นกราฟแนวคิดแบบวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) ได้ดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 แนวคิดแบบวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) [8]

ค่าความผิดพลาดมาตรฐาน (Standard Error, S_e) หาได้จากสมการดังนี้

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [y_i - (a + \beta x_i)]^2}{n-1}} \quad (3.22)$$

โดยที่ y_i และ $(a + \beta x_i)$ ได้มาจากการตรวจวัดค่าคาบธรรมชาติข้อมูลที่ i และ n เป็นจำนวนข้อมูลที่ตรวจวัดมาทั้งหมด

เมื่อนำค่าที่ตรวจวัดคาบธรรมชาติของอาคารมาวิเคราะห์แบบ Regression แล้วสามารถหา α และ β ที่เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่ 3.20 ได้ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้จะให้ค่าคาบเฉลี่ยที่เหมาะสมที่สุด (T_R) สำหรับข้อมูลที่ทำการตรวจวัดมา และสมการที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบน

มาตรฐาน (S_e) ต่ำที่สุดเรียกว่า Best-Fit ดังนั้น การประมาณค่าคาบธรรมชาติที่วิเคราะห์ Regression ในรูปแบบ Best-Fit จึงสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$T_R = \alpha_R H^\beta \quad (3.23)$$

ในการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว มักใช้ค่าคาบธรรมชาติที่ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของข้อมูลจริง เพื่อให้การออกแบบอาคารมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น (Conservative) เนื่องจากการกำหนดให้ค่าคาบธรรมชาติที่ต่ำจะทำให้การคำนวณแรงเฉือนที่ฐานอาคารมีค่าสูง ซึ่งเป็นการประมาณคาบธรรมชาติแบบขอบเขตล่าง (Lower Bound Natural Period, T_L) สามารถหาได้จากสมการที่ 3.24 และค่าสัมประสิทธิ์ขอบเขตล่าง (α_L) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.25

$$T_L = \alpha_L H^\beta \quad (3.24)$$

$$\log(\alpha_L) = \log(\alpha_R) - S_e \quad (3.25)$$

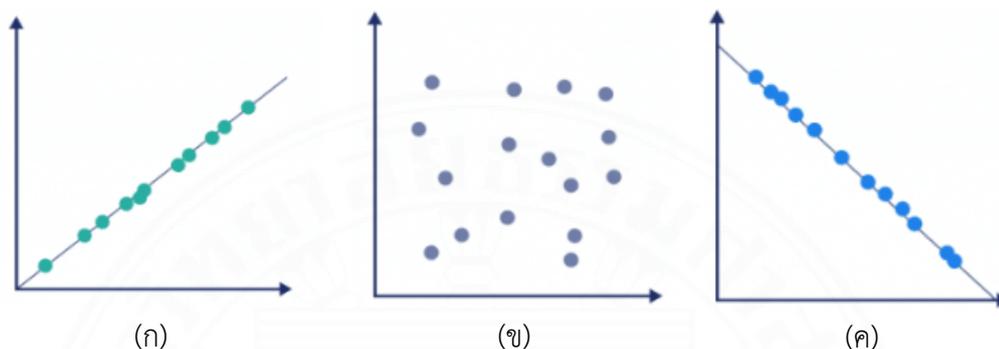
นอกจากนี้ยังมีการกำหนดขอบเขตของคาบธรรมชาติตามมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว เป็นการคำนวณค่าคาบธรรมชาติที่เหมาะสมที่ไม่ควรเกินค่าจากสูตรการประมาณไว้ ซึ่งคือการหาค่าคาบธรรมชาติขอบเขตบน (Upper Bound Natural Period, T_U) และค่าสัมประสิทธิ์ α_U สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.26 และ 3.27 ตามลำดับ

$$T_U = \alpha_U H^\beta \quad (3.26)$$

$$\log(\alpha_U) = \log(\alpha_U) + S_e \quad (3.27)$$

เบื้องต้นสามารถตรวจสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรตามและตัวแปรอิสระได้ ว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงหรือไม่โดยนำค่าของตัวแปรทั้งสองไปพลอตเป็นจุดเรียกว่า แผนภาพการกระจาย (Scatter Diagram) สามารถดูทิศทางความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว ได้โดย Correlation หรือ ค่าสหสัมพันธ์ คือการวัดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัวในลักษณะที่บอกถึงทิศทางของความสัมพันธ์นั้น ดังภาพที่ 3.9 โดยค่าสหสัมพันธ์จะอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 ซึ่งมีความหมายดังนี้ ค่า +1 (Perfect positive correlation) แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงบวกที่สมบูรณ์ (เมื่อค่าของตัว

แปรหนึ่งเพิ่มขึ้น ตัวแปรอีกตัวก็เพิ่มขึ้นในอัตราส่วนที่แน่นอน) ค่า 0 (Zero correlation) แสดงถึงการไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัว ค่า -1 (Perfect negative correlation) แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงลบที่สมบูรณ์ (เมื่อค่าของตัวแปรหนึ่งเพิ่มขึ้น ตัวแปรอีกตัวจะลดลงในอัตราส่วนที่แน่นอน)



ภาพที่ 3.9 กราฟ Correlation หรือ ค่าสหสัมพันธ์ (ก) Perfect positive correlation
(ข) Zero correlation (ค) Perfect negative correlation

3.4 สูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติของอาคาร

คาบธรรมชาติของอาคารมีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างอาคารเพื่อต้านทานแรงแผ่นดินไหว เนื่องจากคาบธรรมชาติเป็นตัวบ่งชี้พฤติกรรมการสั่นสะเทือนของอาคาร เมื่อเกิดแผ่นดินไหว คาบธรรมชาติที่ตรงกับคาบของแรงแผ่นดินไหวจะทำให้เกิดการสั่นมากยิ่งขึ้น ซึ่งอาจทำให้เกิดผลกระทบต่ออาคารอย่างรุนแรงได้ ดังนั้น การทราบคาบธรรมชาติช่วยให้วิศวกรสามารถใช้ในการออกแบบโครงสร้างให้มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นที่เหมาะสม เลือกใช้วัสดุที่สอดคล้องกับความต้องการและคำนวณแรงที่กระทำต่ออาคารได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ยังช่วยในการปรับปรุงและเสริมความแข็งแรงของอาคารที่มีอยู่เพื่อให้สามารถต้านทานแรงแผ่นดินไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัยมากขึ้น ปัจจุบันในมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแรงแผ่นดินไหว ได้กำหนดวิธีการประมาณค่าคาบธรรมชาติหลากหลายสูตรตามแต่ละประเทศ ดังต่อไปนี้

American Society of Engineers (ASCE, 2022)

$$T = C_t h_n^x \quad (3.28)$$

โดยที่ h_n คือ ความสูงของอาคาร (หน่วยเป็นฟุต)

C_t และ x คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ขึ้นอยู่กับประเภทของโครงสร้าง

ตารางที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การประมาณค่าคาบ C_t และ x สำหรับประเภทโครงสร้างตาม ACSE

ประเภทโครงสร้าง	C_t	x
โครงข้อแข็งโครงสร้างเหล็กต้านทานโมเมนต์	0.028 (0.0724)*	0.80
โครงข้อแข็งโครงสร้างคอนกรีตต้านทานโมเมนต์	0.016 (0.0466)*	0.90
โครงข้อแข็งที่มีค้ำยันแบบเอียงศูนย์โครงสร้างเหล็ก	0.030 (0.0731)*	0.75
โครงสร้างอื่นๆ	0.020 (0.0488)*	0.75

* ค่าในวงเล็บเป็นหน่วย SI

สำหรับอาคารต้านแรงแผ่นดินไหวที่มีความสูงไม่เกิน 12 ชั้น (ความสูงของชั้นมากกว่า 10 ฟุต หรือ 3 เมตร) ดังนี้ โดยที่ N คือจำนวนชั้น

$$T = 0.1N \quad (3.29)$$

The Building Standard Law in Japan (BSLJ, 1981)

$$T = 0.02H \quad (3.30)$$

โดยที่ H คือความสูงอาคาร (เมตร)

Australian Standard (AS, 2007)

$$T = 1.25 \times k_t \times h_n^{0.75} \quad (3.31)$$

โดยที่ h_n คือความสูงอาคาร (เมตร) และ k_t คือค่าปรับตามประเภทของโครงสร้างหากเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีค่าเท่ากับ 0.075

Korean Building Code (KBC, 2009)

$$T = 0.073H^{0.75} \quad (3.32)$$

โดยที่ T คือค่าคาบธรรมชาติ (วินาที) และ H คือความสูงของอาคาร (เมตร)

European Committee for Standardization (CEN, 2004)

$$T = C_t H^{3/4} \quad (3.33)$$

โดยที่ H คือความสูงอาคาร (เมตร)

ตารางที่ 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การประมาณค่าคาบ C_t ที่ใช้ใน Eurocode

ประเภทโครงสร้าง RC	C_t
โครงข้อแข็งรับโมเมนต์	0.075
โครงข้อแข็งรับโมเมนต์ ที่มี shear walls	0.050
โครงข้อแข็งรับโมเมนต์ที่มีระบบ frames + walls	0.085

National Building Code of Canada (NBCC, 2020)

$$T = 0.05H^{0.075} \quad (3.34)$$

โดยที่ H คือความสูงอาคาร (เมตร)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การศึกษาการปรับปรุงฐานข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทยและสนับสนุนการพัฒนาสูตรค่าคาบธรรมชาติ โดยวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร ได้แก่ ค่าคาบธรรมชาติ, อัตราส่วนความหน่วง และรูปร่างการสั่น จากข้อมูลตรวจวัดการสั่นสะเทือนของอาคารจริงในหลายพื้นที่ทั่วประเทศ การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ดำเนินการด้วยวิธี SSI ซึ่งสามารถระบุค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างจากสัญญาณ Ambient vibration ได้อย่างแม่นยำ อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารในลำดับที่สูงขึ้น และยังได้ดำเนินการรวบรวมข้อมูลลักษณะทางกายภาพของอาคารแต่ละหลัง อย่างความสูงรวมของอาคาร เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับค่าพลศาสตร์ของอาคาร ผ่านกระบวนการทางสถิติด้วยวิธี Regression Analysis อันเป็นพื้นฐานสำคัญในการสังเคราะห์และปรับปรุงฐานข้อมูลให้มีความครบถ้วนและเป็นระบบยิ่งขึ้น

4.1 ข้อมูลทั่วไปของอาคารที่ศึกษา

ข้อมูลการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้มาจากโครงการวิจัย “การปรับปรุงข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร และการพัฒนาระบบตรวจสอบสมรรถนะของโครงสร้างแบบระยะยาว” ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดโดยใช้เครื่องมือที่มีความแม่นยำสูง โดยกลุ่มตัวอย่างประกอบด้วยอาคารจำนวนทั้งสิ้น 112 หลัง กระจายตัวอยู่ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร ปริมณฑล และภาคเหนือของประเทศ ได้แก่ จังหวัดเชียงใหม่และเชียงราย ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีลักษณะทางกายภาพและการใช้งานอาคารที่หลากหลาย สำหรับการใช้งานอาคาร แบ่งออกเป็น 5 ประเภทหลัก ได้แก่ อาคารที่พักอาศัยจำนวน 44 หลัง อาคารสำนักงาน 21 หลัง อาคารสถานศึกษา 20 หลัง โรงพยาบาล 19 หลัง และโรงแรม 6 หลัง นอกจากนี้ยังมีอาคารจอดรถอีก 2 หลัง โดยลักษณะทางกายภาพของอาคารที่ศึกษาในงานวิจัยนี้มีความหลากหลายในด้านจำนวนชั้น ตั้งแต่ 3 ชั้นไปจนถึงมากกว่า 60 ชั้น ความสูงของอาคาร ตั้งแต่ประมาณ 8.5 เมตรไปจนถึงมากกว่า 240 เมตร รวมถึงขนาดด้านกว้างและยาวของอาคารที่มีตั้งแต่ไม่ถึง 10 เมตร ไปจนถึงขนาดใหญ่กว่า 120 เมตร ทั้งนี้รายละเอียดของอาคารแต่ละหลังที่ศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ประกอบการอธิบายด้านลักษณะทางกายภาพของอาคารในภาพรวม

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลของกลุ่มอาคารเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัด เชียงราย

ลำดับ	ที่ตั้ง	การใช้สอย	ชั้น	สูง (ม.)	กว้าง (ม.)	ยาว (ม.)
B01	กรุงเทพมหานคร	สำนักงาน	6	15.37	16.00	12.00
B02	กรุงเทพมหานคร	สำนักงาน	14	57.90	29.60	30.60
B03	กรุงเทพมหานคร	สำนักงาน	43	163.70	44.00	85.00
B04	กรุงเทพมหานคร	สำนักงาน	37	153.20	54.00	27.00
B05	กรุงเทพมหานคร	โรงพยาบาล	25	124.30	48.00	44.00
B06	กรุงเทพมหานคร	สถานศึกษา	8	52.00	32.00	25.00
B07	กรุงเทพมหานคร	โรงแรม	5	17.50	26.00	15.50
B08	กรุงเทพมหานคร	โรงแรม	5	17.50	26.00	15.50
B09	กรุงเทพมหานคร	โรงพยาบาล	20	76.75	54.00	56.00
B10	กรุงเทพมหานคร	ที่พักอาศัย	50	183.70	10.83	42.46
B11	กรุงเทพมหานคร	ที่พักอาศัย	30	107.75	14.65	41.20
B12	กรุงเทพมหานคร	สำนักงาน	51	242.40	43.77	35.50
B13	กรุงเทพมหานคร	ที่พักอาศัย	46	205.00	22.40	62.11
B14	กรุงเทพมหานคร	ที่พักอาศัย	40	120.20	14.90	129.15
B15	กรุงเทพมหานคร	ที่พักอาศัย	40	122.20	16.90	70.00
B16	กรุงเทพมหานคร	ที่พักอาศัย	38	123.32	15.40	66.30
B17	กรุงเทพมหานคร	โรงแรม	45	145.00	39.00	47.50
B18	กรุงเทพมหานคร	ที่พักอาศัย	36	126.00	104.30	27.00
B19	กรุงเทพมหานคร	ที่พักอาศัย	42	140.35	13.70	59.75
B20	กรุงเทพมหานคร	ที่พักอาศัย	43	142.40	19.20	51.30
B21	กรุงเทพมหานคร	สถานศึกษา	5	19.60	28.00	108.00
B22	กรุงเทพมหานคร	สถานศึกษา	4	15.80	24.00	14.10
B23	กรุงเทพมหานคร	สถานศึกษา	3	10.76	29.00	26.40
B24	กรุงเทพมหานคร	ที่พักอาศัย	61	214.30	82.00	13.50
B25	กรุงเทพมหานคร	ที่พักอาศัย	60	204.90	92.60	15.00
B26	กรุงเทพมหานคร	โรงพยาบาล	25	86.80	48.00	52.00
B27	กรุงเทพมหานคร	โรงพยาบาล	21	73.85	33.60	72.00

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลของกลุ่มอาคารเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัด เชียงราย (ต่อ)

ลำดับ	ที่ตั้ง	การใช้สอย	ชั้น	สูง (ม.)	กว้าง (ม.)	ยาว (ม.)
B28	กรุงเทพมหานคร	โรงพยาบาล	25	77.20	20.00	40.00
B29	กรุงเทพมหานคร	โรงพยาบาล	20	76.00	17.00	71.00
B30	กรุงเทพมหานคร	โรงพยาบาล	18	69.15	34.00	51.00
B31	กรุงเทพมหานคร	สถานศึกษา	10	12.00	47.00	56.00
B32	กรุงเทพมหานคร	สถานศึกษา	7	18.00	60.00	32.00
B33	กรุงเทพมหานคร	สถานศึกษา	15	42.00	42.00	42.00
B34	กรุงเทพมหานคร	สถานศึกษา	10	30.00	41.00	33.50
B35	กรุงเทพมหานคร	สถานศึกษา	10	27.00	43.00	58.00
B36	กรุงเทพมหานคร	สำนักงาน	36	138.4	60.2	58.8
B37	กรุงเทพมหานคร	ที่พักอาศัย	8	19.5	13.00	81.60
B38	กรุงเทพมหานคร	ที่พักอาศัย	9	20	35.50	56.00
B39	กรุงเทพมหานคร	ที่พักอาศัย	6	16	12.00	40.00
B40	กรุงเทพมหานคร	ที่พักอาศัย	7	19.2	12.00	20.00
B41	กรุงเทพมหานคร	ที่พักอาศัย	5	12.8	10.71	19.34
B42	กรุงเทพมหานคร	ที่พักอาศัย	6	19.2	16.32	13.44
B43	กรุงเทพมหานคร	ที่พักอาศัย	54	176.85	30.00	56.50
B44	กรุงเทพมหานคร	สำนักงาน	19	66.5	32.00	39.00
B45	กรุงเทพมหานคร	ที่จอดรถ	10	30	47.70	27.20
B46	กรุงเทพมหานคร	สถานศึกษา	11	37.4	50.00	34.00
B47	กรุงเทพมหานคร	สำนักงาน	4	12.7	18.50	12.50
B48	กรุงเทพมหานคร	สำนักงาน	4	12.5	10.80	7.50
B49	กรุงเทพมหานคร	สำนักงาน	25	98	36.60	36.60
B50	กรุงเทพมหานคร	โรงพยาบาล	8	19.55	17.50	60.00
B51	กรุงเทพมหานคร	สำนักงาน	24	86.05	31.00	51.35
B52	กรุงเทพมหานคร	สำนักงาน	4	12	17.00	60.00
B53	กรุงเทพมหานคร	สำนักงาน	3	9	18.50	20.00
B54	นนทบุรี	สำนักงาน	31	143.95	50.45	39.22

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลของกลุ่มอาคารเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัด เชียงราย (ต่อ)

ลำดับ	ที่ตั้ง	การใช้สอย	ชั้น	สูง (ม.)	กว้าง (ม.)	ยาว (ม.)
B55	ปทุมธานี	สถานศึกษา	7	25.25	54.60	62.40
B56	ปทุมธานี	สถานศึกษา	9	28.00	25.00	54.15
B57	ปทุมธานี	โรงพยาบาล	20	79.05	35.00	48.00
B58	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	36	126.25	11.50	52.00
B59	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	31	108.45	21.30	62.00
B60	ปทุมธานี	สถานศึกษา	12	36.00	57.00	53.00
B61	ปทุมธานี	สำนักงาน	5	24.85	40.00	12.00
B62	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	5	12.8	7.30	38.70
B63	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	4	12.8	30.00	7.00
B64	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	5	16	12.00	20.00
B65	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	5	16	7.00	35.00
B66	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	7	12.8	8.00	25.00
B67	ปทุมธานี	สำนักงาน	14	46.25	24.00	24.00
B68	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	7	21	30.00	15.00
B69	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	6	22	20.00	14.00
B70	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	8	24	14.50	10.20
B71	ปทุมธานี	สำนักงาน	7	24	70.00	19.00
B72	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	7	24	32.00	15.00
B73	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	8	24	40.00	10.20
B74	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	8	24	67.50	11.40
B75	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	8	25	24.00	14.00
B76	ปทุมธานี	สำนักงาน	7	26	20.00	8.00
B77	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	9	28	32.00	10.00
B78	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	8	28	27.00	12.00
B79	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	8	28	42.00	16.00
B80	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	9	30	36.00	17.00
B81	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	4	15	42.60	8.00

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลของกลุ่มอาคารเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัด เชียงราย (ต่อ)

ลำดับ	ที่ตั้ง	การใช้สอย	ชั้น	สูง (ม.)	กว้าง (ม.)	ยาว (ม.)
B82	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	5	15.5	35.80	14.40
B83	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	5	16	18.00	15.00
B84	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	5	17	26.00	13.00
B85	ปทุมธานี	ที่พักอาศัย	5	19	19.00	15.60
B86	สมุทรปราการ	สำนักงาน	3	8.5	7.25	42.00
N01	เชียงใหม่	โรงพยาบาล	17	59.80	18.80	64.00
N02	เชียงใหม่	สำนักงาน	6	22	100.00	100.00
N03	เชียงราย	โรงแรม	5	14.00	30.70	8.50
N04	เชียงราย	โรงแรม	5	14.00	40.00	9.00
N05	เชียงราย	โรงแรม	4	10.50	8.15	30.00
N06	เชียงราย	สถานศึกษา	6	17.50	38.00	16.30
N07	เชียงราย	สถานศึกษา	6	17.50	36.20	13.00
N08	เชียงราย	สถานศึกษา	5	14.00	37.80	12.00
N09	เชียงราย	สถานศึกษา	9	28.00	63.00	33.40
N10	เชียงราย	สถานศึกษา	7	21.00	45.00	40.00
N11	เชียงราย	ที่พักอาศัย	5	18.00	38.00	16.30
N12	เชียงราย	สถานศึกษา	5	14.00	38.00	48.00
N13	เชียงราย	สถานศึกษา	9	28.00	25.00	46.00
N14	เชียงราย	โรงพยาบาล	7	23.00	18.00	47.00
N15	เชียงราย	โรงพยาบาล	10	33.20	34.00	89.00
N16	เชียงราย	สำนักงาน	5	20.00	94.64	94.64
N17	เชียงราย	โรงพยาบาล	8	29.00	17.00	43.50
N18	เชียงราย	ที่พักอาศัย	8	20.50	15.40	34.40
N19	เชียงราย	ที่พักอาศัย	8	24.85	19.85	37.00
N20	เชียงราย	โรงพยาบาล	9	36.90	39.00	27.00
N21	เชียงราย	ที่จอดรถ	9	21.25	33.00	37.50
N22	เชียงราย	โรงพยาบาล	16	60.40	35.00	30.00

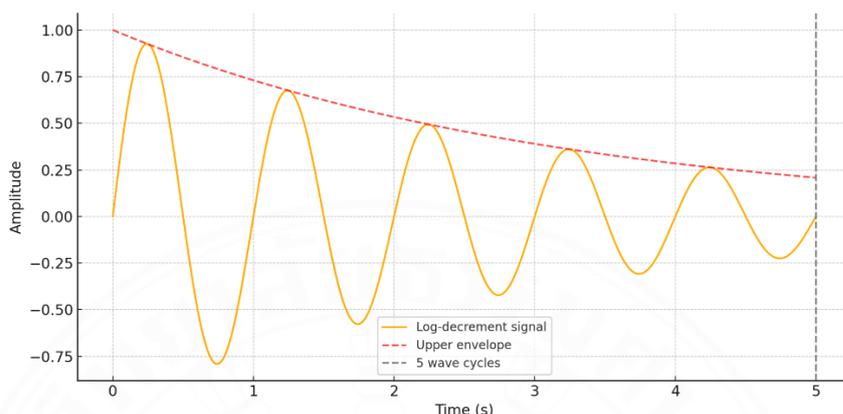
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลของกลุ่มอาคารเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัด เชียงราย (ต่อ)

N23	เชียงราย	โรงพยาบาล	4	10.5	70.50	49.25
N24	เชียงราย	โรงพยาบาล	6	18.85	37.50	16.00
N25	เชียงราย	โรงพยาบาล	6	20	35.00	20.20
N26	เชียงราย	โรงพยาบาล	6	18.8	42.00	18.00

4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารจากข้อมูลตรวจวัด

การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารในงานวิจัยนี้อาศัยข้อมูลการตอบสนองของอาคารจากการตรวจวัดจริงภายใต้แรงกระตุ้นจากสิ่งแวดล้อม (Ambient Vibration) ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่รบกวนการใช้งานของอาคาร และสามารถนำมาใช้วิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างโดยไม่ต้องทราบแรงกระทำโดยตรง (output-only system identification) วิธีการหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเทคนิค Stochastic Subspace Identification (SSI) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่มีความสามารถในการแยกแยะโหมดการสั่นของอาคารได้อย่างแม่นยำ แม้ในกรณีที่โหมดมีความถี่ใกล้เคียงกันหรือสัญญาณมีสัญญาณรบกวนสูง โดย SSI สามารถประมาณค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์จากข้อมูลการตอบสนองเท่านั้น ทั้งนี้ในการประมวลผลจำเป็นต้องกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้ผลลัพธ์มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น ตัวอย่างพารามิเตอร์ที่ต้องคำนึงถึง ได้แก่ จำนวนโพล (Number of Poles) ซึ่งควรกำหนดค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดอย่างเหมาะสม เพื่อให้สามารถตรวจจับโหมดการสั่นที่แท้จริงได้ครบถ้วน และค่าระยะเวลาหน่วง (Time Lag หรือ T_s) ที่ใช้ในการคำนวณเมทริกซ์ความสัมพันธ์แบบคองที่ (Covariance Matrix) ควรให้ T_s มีความยาวอย่างน้อย 5 รอบของคลื่นเพื่อครอบคลุมลักษณะการลดทอนของสัญญาณ ภาพที่ 4.1 แสดงตัวอย่างของสัญญาณแบบลดทอน (log-decrement signal) ซึ่งเป็นผลจากการสั่นอิสระของระบบ โดยแสดงคลื่นที่ลดขนาดลงตามเวลา พร้อมเส้นกรอบแสดงช่วงของ 5 รอบคลื่น เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดค่า T_s อย่างเหมาะสม เช่น หากอาคารมีความถี่ธรรมชาติประมาณ 0.3 Hz ซึ่งมีคาบการสั่นประมาณ 3 วินาที ควรกำหนดค่า T_s เป็นประมาณ 15 วินาที เพื่อให้ครอบคลุมพฤติกรรมการสั่นอย่างเหมาะสม ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบและเปรียบเทียบความแม่นยำของผลลัพธ์ ยังมีการใช้เทคนิค FFT และ RSI ประกอบการวิเคราะห์เพิ่มเติม เพื่อประเมินแนวโน้มและประสิทธิภาพของแต่ละวิธีในเชิงเปรียบเทียบ ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์จะถูกนำมาใช้ในการแยกและวัดค่าพารามิเตอร์หลัก 3 ประการ ได้แก่ ความถี่ธรรมชาติ ที่สะท้อน

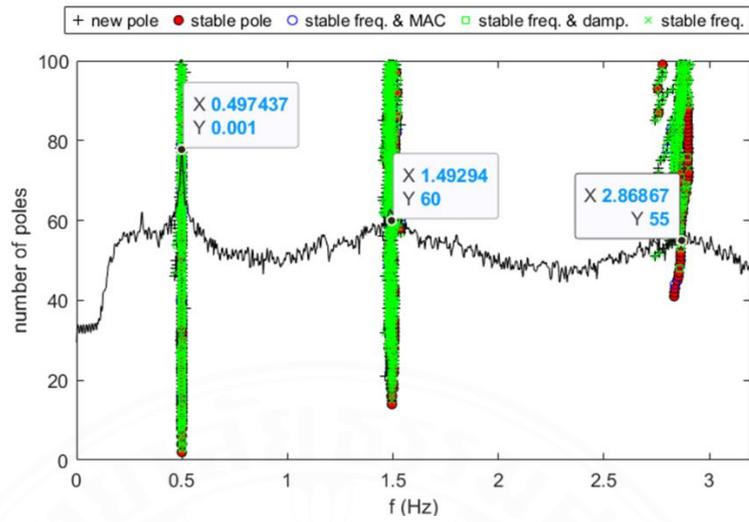
พฤติกรรมการตอบสนองหลักของอาคารต่อแรงกระทำ อัตราส่วนความหน่วง ที่แสดงถึงการสูญเสียพลังงานของระบบ และรูปร่างการสั่น ที่ใช้ในการพิจารณาการเคลื่อนที่ของอาคารในแต่ละโหมด



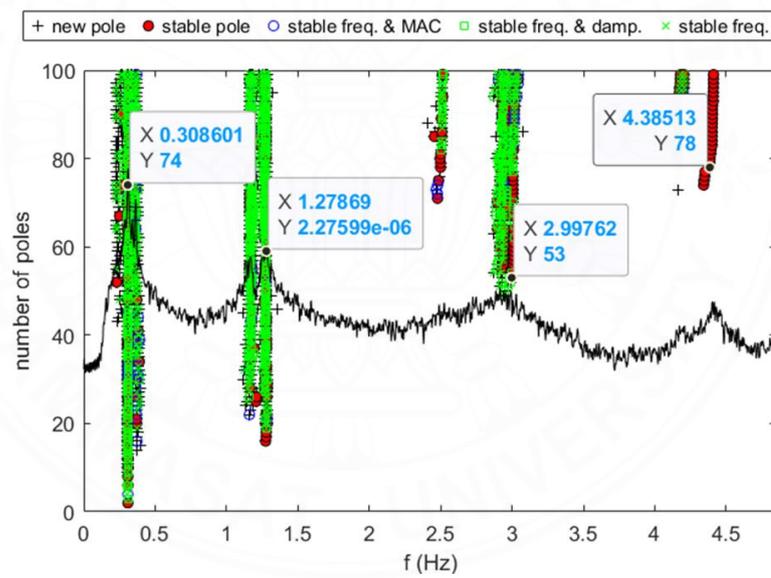
ภาพที่ 4.1 ตัวอย่างสัญญาณลดทอนแบบ Log-decrement

4.2.1 ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency)

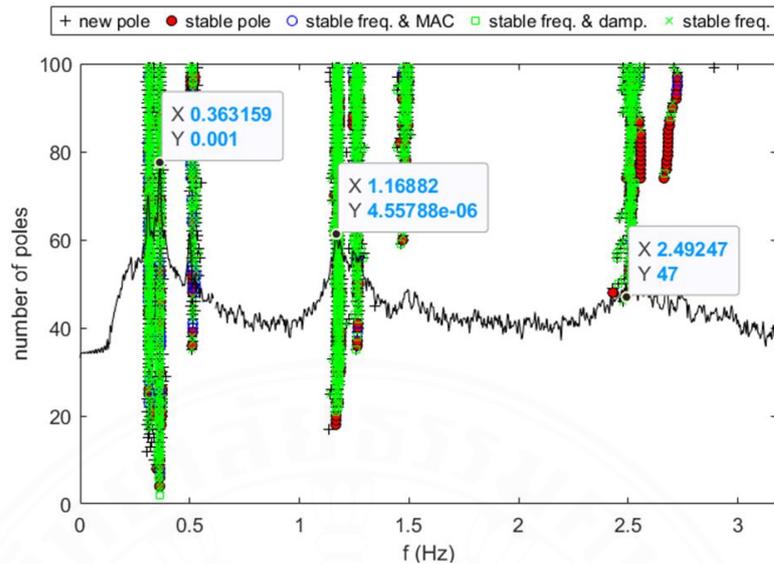
การวิเคราะห์ข้อมูลการตอบสนองของอาคารที่ได้จากการตรวจวัดจริงสามารถแยกแยะค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารได้ในแต่ละทิศทางและแต่ละโหมดการสั่น โดยใช้ผลลัพธ์ Stabilization Diagram จากการประมวลผลด้วยวิธี SSI เพื่อพิจารณาค่าความถี่ที่มีความเสถียร โดยอ้างอิงจากจุดที่ความถี่คงที่ในหลายระดับของจำนวนโพล มีการกระจายตัวต่ำ และแยกจากสัญญาณรบกวนได้ชัดเจนในการวิเคราะห์ครั้งนี้ ได้สุ่มเลือกอาคารตัวอย่างหนึ่งเพื่อแสดงลักษณะของโหมดการสั่นในแต่ละทิศทาง ได้แก่ ทิศทาง X, Y และ R (การบิดตัวของอาคาร) จากภาพที่ 4.2 พบค่าความถี่ธรรมชาติในทิศทาง X ที่ 0.4974 Hz, 1.4929 Hz และ 2.8687 Hz ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะโหมดสั่นระดับต่าง ๆ ส่วนภาพที่ 4.3 ซึ่งเป็นผลในทิศทาง Y พบความถี่ที่ 0.3086 Hz, 1.2757 Hz และ 2.99762 Hz ขณะที่ภาพที่ 4.4 แสดงความถี่ในทิศทางการบิด อยู่ที่ 0.3631 Hz, 1.1688 Hz และ 2.4925 Hz โดยค่าที่ได้ในแต่ละช่วงความถี่สามารถตีความได้ว่าเป็นการสั่นในโหมดที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ การจำแนกทิศทางของสัญญาณในการวิเคราะห์ทำได้โดยพิจารณาดำเนินการติดตั้งหัววัดโดยทิศทาง X หมายถึงแนวขนานกับแนวยาวของอาคาร ทิศทาง Y เป็นแนวตั้งฉาก ส่วนทิศทางการบิด ได้จากการวิเคราะห์ค่าการบิดของอาคารจากสัญญาณสองตำแหน่งในทิศทางทแยงรวมกัน ซึ่งวิธีนี้ช่วยให้สามารถตรวจจับการบิดตัวของอาคารได้โดยเฉพาะในอาคารที่มีรูปทรงไม่สมมาตร



ภาพที่ 4.2 stabilization diagram ความถี่ธรรมชาติของอาคารตัวอย่างในทิศทาง X

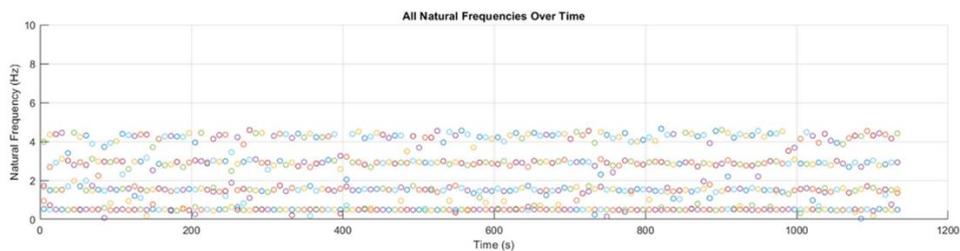


ภาพที่ 4.3 stabilization diagram ความถี่ธรรมชาติของอาคารตัวอย่างในทิศทาง Y

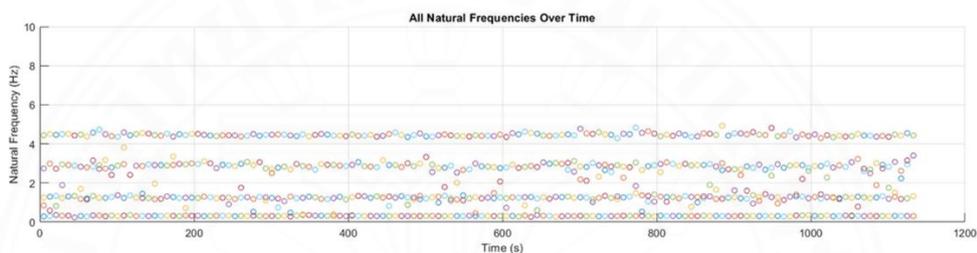


ภาพที่ 4.4 stabilization diagram ความถี่ธรรมชาติของอาคารตัวอย่างในทิศทาง R

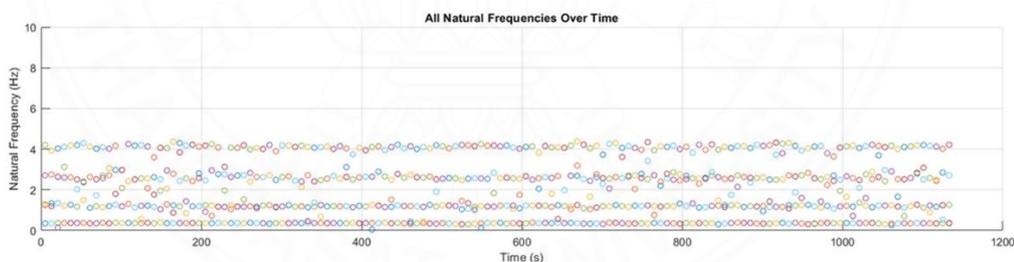
การวิเคราะห์อาคารหลังเดียวกันนี้ด้วยวิธี RSI ผลลัพธ์ดังแสดงในภาพที่ 4.5-4.7 โดยแสดงการกระจายของค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้ในแต่ละช่วงเวลา ตลอดระยะเวลาที่ทำการวัดจริง ผลลัพธ์ถูกนำเสนอในรูปแบบกราฟ 3 ทิศทาง ได้แก่ ทิศทาง X ทิศทาง Y และ R ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าค่าความถี่ในแต่ละทิศทางมีความสม่ำเสมอ ไม่เกิดความผันผวนที่ผิดปกติ และยังคงอยู่ในช่วงค่าที่แน่นอนตลอดช่วงเวลา แสดงให้เห็นว่าอาคารมีพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ที่เสถียรและไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญในระหว่างการวัด โดยในทิศทาง X พบค่าความถี่ธรรมชาติหลัก 4 ค่า ได้แก่ 0.4827, 1.5137, 2.9172 และ 4.2801 Hz ส่วนทิศทาง Y มีค่าอยู่ที่ 0.3088, 1.2758, 2.9833 และ 4.4062 Hz ขณะที่ในทิศทาง R พบค่าความถี่อยู่ที่ 0.3586, 1.1930, 2.5110 และ 4.1376 Hz ตามลำดับ ค่าที่ได้จากการประมวลผลด้วยวิธี RSI นี้มีแนวโน้มสอดคล้องใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี SSI ที่ดำเนินการไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งยืนยันได้ว่าวิธี RSI ไม่เพียงสามารถติดตามค่าความถี่ธรรมชาติได้อย่างต่อเนื่องในปัสัยเวลาเท่านั้น แต่ยังสามารถให้ค่าที่มีความถูกต้องในระดับที่เชื่อถือได้



ภาพที่ 4.5 ผลลัพธ์ความถี่ธรรมชาติของอาคารตัวอย่างในทิศทาง X จากการวิเคราะห์ RSI



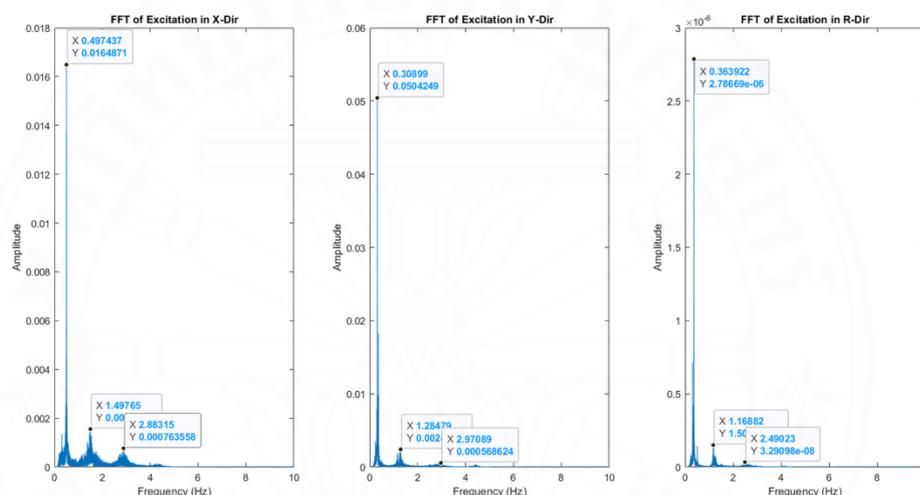
ภาพที่ 4.6 ผลลัพธ์ความถี่ธรรมชาติของอาคารตัวอย่างในทิศทาง Y จากการวิเคราะห์ RSI



ภาพที่ 4.7 ผลลัพธ์ความถี่ธรรมชาติของอาคารตัวอย่างในทิศทาง R จากการวิเคราะห์ RSI

นอกจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี SSI และ RSI แล้ว งานวิจัยนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติของอาคารตัวอย่างด้วยเทคนิค Fast Fourier Transform (FFT) เพื่อใช้เป็นอีกหนึ่งวิธีในการยืนยันแนวโน้มของค่าความถี่ที่ได้ โดย FFT จะทำการแปลงข้อมูลจากพิสัยเวลาไปยังพิสัยความถี่ และแสดงผลเป็นกราฟของแอมพลิจูดตามความถี่ ดังภาพที่ 4.8 ซึ่งสามารถระบุค่าความถี่หลักของโครงสร้างจากจุดพีคของสเปกตรัมได้โดยตรงสามารถสังเกตค่าความถี่ธรรมชาติหลักในแต่ละทิศทาง โดยเริ่มจากโหมดที่ 1 ซึ่งปรากฏเป็นพีคเด่นที่สุดในทุกทิศทาง ได้แก่ ประมาณ 0.50 Hz ใน

ทิศทาง X, 0.31 Hz ในทิศทาง Y และ 0.36 Hz ในทิศทาง R ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากวิธี SSI และ RSI อย่างชัดเจน สำหรับโหมดที่ 2 พบพิกที่ประมาณ 1.50 Hz ในทิศทาง X, 1.28 Hz ในทิศทาง Y และ 1.17 Hz ในทิศทาง R ซึ่งยังอยู่ในช่วงค่าที่มีความสอดคล้องกันระหว่างสามวิธีวิเคราะห์ ส่วนโหมดที่ 3 มีการปรากฏพิกที่ค่าประมาณ 2.88 Hz ในทิศทาง X, 2.97 Hz ในทิศทาง Y และ 2.49 Hz ในทิศทาง R ซึ่งลักษณะของพิกจะเริ่มแผ่กว้างและค่าความสูงของแอมพลิจูดลดลง ทั้งนี้พบว่าในทุกโหมด ความสอดคล้องของผลลัพธ์จาก FFT กับ SSI และ RSI เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ช่วยเสริมความเชื่อมั่นในค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการวิเคราะห์ในภาพรวมของอาคารหลังนี้



ภาพที่ 4.8 ผลลัพธ์ความถี่ธรรมชาติของอาคารตัวอย่างในทิศทาง X Y R จากการวิเคราะห์ FFT

ผลการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารจากทั้งสามวิธี ได้แก่ SSI, RSI และ FFT ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันอย่างดี โดยเฉพาะในโหมดที่ 1 และโหมดที่ 2 ซึ่งค่าความถี่จากแต่ละวิธีมีความใกล้เคียงกันในทุกทิศทาง ทั้ง X, Y และ R สะท้อนให้เห็นถึงความเสถียรของพฤติกรรมโครงสร้างและความแม่นยำของค่าที่วิเคราะห์ได้ สำหรับในงานวิจัยนี้ วิธี SSI ถูกใช้เป็นวิธีหลักในการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร เนื่องจากมีความเหมาะสมในการแยกโหมดการสั่นและวิเคราะห์ค่า damping ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ RSI และ FFT ถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์จากอีกมุมหนึ่ง ซึ่งช่วยเพิ่มความมั่นใจในค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ และเสริมความน่าเชื่อถือของฐานข้อมูลที่จัดเก็บในงานวิจัยนี้ให้มีความครบถ้วนและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

จากการวิเคราะห์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 112 อาคาร ในพื้นที่ เขต กรุงเทพมหานครและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัดเชียงราย ได้ทำการประมวลผลค่าคาบธรรมชาติของอาคารในแต่ละทิศทาง ได้แก่ แกน X และแกน Y รวมถึงพิจารณา สามโหนดการสั่นหลัก ของอาคารแต่ละแห่ง โดยผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสรุปไว้ใน ตารางที่ 4.2 คาบธรรมชาติของอาคารในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัดเชียงราย ซึ่งแสดงค่าคาบธรรมชาติในแต่ละทิศทางและแต่ละโหนดที่ได้จากการประมวลผล เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของอาคาร อย่างไรก็ตาม ในการจัดเตรียมฐานข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ พบว่าในบางกรณีมีอาคารที่แสดงค่าความถี่ธรรมชาติได้เพียงโหนดที่หนึ่งเท่านั้น ซึ่งไม่ได้เกิดจากข้อจำกัดในการตรวจวัดหรือวิเคราะห์โดยตรง แต่เป็นผลจากการนำข้อมูลจากการตรวจวัดที่มีอยู่ก่อนแล้ว ซึ่งยังไม่เคยนำมารวมอยู่ในการวิเคราะห์มาก่อน มาใช้เสริมในชุดข้อมูลครั้งนี้ เพื่อเพิ่มจำนวนตัวอย่างในโหนดพื้นฐานให้มีความครอบคลุมมากยิ่งขึ้น การดำเนินการในลักษณะนี้ช่วยให้การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติกับลักษณะทางกายภาพของอาคารในโหนดที่หนึ่งมีความหลากหลายทางข้อมูลมากขึ้น

ตารางที่ 4.2 คาบธรรมชาติของอาคารในเขตกรุงเทพและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัดเชียงราย

ลำดับ	สูง (ม.)	Period (sec)					
		x1	y1	x2	y2	x3	y3
B01	15.37	0.3056	0.3472	0.1658	0.1703		
B02	57.90	1.1168	1.0582	0.6229	0.6143	0.3674	0.3705
B03	163.70	2.5650	2.6453	1.1150	1.1113	0.8224	0.8277
B04	153.20	2.9172	2.6272	0.9527	0.7465	0.3639	0.3501
B05	124.30	2.1706	2.0404	0.5829	0.5493	0.3108	0.3208
B06	52.00	1.3348	1.2716	0.4354	0.3416	0.2841	0.2800
B07	17.50	0.3610	0.3539	0.0392	0.0381		
B08	17.50	0.3508	0.3560	0.0392	0.0381		
B09	76.75	1.5454	1.7593	0.5025	0.4976		
B10	183.70	4.0960	5.1200	1.0779	1.2047	0.8086	0.5251
B11	107.75	2.2217	2.2217	0.5792	0.5792	0.2987	0.2987
B12	242.40	3.5442	4.0772	1.0800	1.0759	0.5790	0.5399

ตารางที่ 4.2 คาบธรรมชาติของอาคารในเขตกรุงเทพและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัด เชียงราย (ต่อ)

ลำดับ	สูง (ม.)	Period (sec)					
		x1	y1	x2	y2	x3	y3
B13	205.00	6.0681	3.3437	1.3710	0.9870	0.6502	0.7516
B14	120.20	3.5617	3.8081	0.6768	1.0440	0.2991	0.6769
B15	122.20	2.0044	2.9771	0.6700	0.7888	0.3544	0.3442
B16	123.32	3.0994	3.0943	1.3607	1.3608	0.5550	0.5595
B17	145.00	2.8499	3.0186	0.9088	0.8466	0.4960	0.3937
B18	126.00	2.6279	3.2626	0.5729	0.7170	0.4561	0.4550
B19	140.35	2.5376	3.6838	0.7131	0.8565	0.4255	0.3889
B20	142.40	2.3991	2.3563	0.9048	0.9241	0.7108	0.7083
B21	19.60	0.3703	0.4526	0.1551	0.1593		
B22	15.80	0.4411	0.4706				
B23	10.76	0.6450	0.5302	0.3977		0.3191	
B24	214.30	3.3146	6.0241	0.9534	1.2104		
B25	204.90	3.2616	5.5371	0.8022	1.0842		
B26	86.80	1.5746	1.6759	0.4544	0.5504	0.2307	0.2686
B27	73.85	1.0940		0.3596		0.1907	
B28	77.20	0.9193	1.4368	0.3372	0.4415	0.1657	0.2233
B29	76.00	1.2982	1.5265	0.4144	0.5417	0.1628	0.1634
B30	69.15	1.0119	1.1474	0.3449	0.3800	0.1902	
B31	12.00	0.7491	0.6098				
B32	18.00	0.1979	0.1944	0.1003	0.0880		
B33	42.00	1.0840	1.0627	0.2803			
B34	30.00	0.8355	0.5747	0.3742	0.3889	0.2036	0.2630
B35	27.00	0.2343	0.2385	0.1087	0.1107		
B36	138.4	2.3256	2.5641				
B37	19.5	0.3584	0.3953				
B38	20	0.3205	0.3460				

ตารางที่ 4.2 คาบธรรมชาติของอาคารในเขตกรุงเทพและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัด เชียงราย (ต่อ)

ลำดับ	สูง (ม.)	Period (sec)					
		x1	y1	x2	y2	x3	y3
B39	16	0.3135	0.3135				
B40	19.2	0.3704	0.3077				
B41	12.8	0.3571	0.3205				
B42	19.2	0.3135	0.2597				
B43	176.85	3.5714	3.3333				
B44	66.5	0.9434	1.5385				
B45	30	0.4545	0.8264				
B46	37.4	0.7576	0.7143				
B47	12.7	0.3049	0.3236				
B48	12.5	0.3086	0.3610				
B49	98	1.6949	1.5385				
B50	19.55	0.4425	0.3289				
B51	86.05	1.8182	2.3810				
B52	12	0.5356	0.3435				
B53	9	0.2816	0.3253				
B54	143.95	3.0713	2.8003	0.7447	0.7363	0.4196	0.4202
B55	25.25	0.7011	0.6794	0.3947	0.4311	0.2954	0.3449
B56	28.00	0.7395	0.7054	0.3794	0.3697		
B57	79.05	1.0087	1.4702	0.3125	0.2933	0.1302	0.1558
B58	126.25	1.8681	3.0989	0.6752	0.8203	0.3606	0.3367
B59	108.45	2.4600	2.3294	0.7225	0.7417	0.3684	0.3496
B60	36.00	0.7843	0.8889	0.1079	0.1103		
B61	24.85	0.2844	0.3115	0.1058	0.1026		
B62	12.8	0.3195	0.2392				
B63	12.8	0.3268	0.2849				
B64	16	0.2994	0.2809				

ตารางที่ 4.2 คาบธรรมชาติของอาคารในเขตกรุงเทพและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัด เชียงราย (ต่อ)

ลำดับ	สูง (ม.)	Period (sec)					
		x1	y1	x2	y2	x3	y3
B65	16	0.3135	0.3436				
B66	12.8	0.3401	0.2653				
B67	46.25	0.6234	0.6631				
B68	21	0.3283	0.3030				
B69	22	0.3448	0.2488				
B70	24	0.4630	0.4016				
B71	24	0.5556	0.5000				
B72	24	0.6667	0.4545				
B73	24	0.5263	0.3571				
B74	24	0.7143	0.4762				
B75	25	0.4464	0.3546				
B76	26	0.7576	0.2857				
B77	28	0.5319	0.3472				
B78	28	0.4098	0.2899				
B79	28	0.3704	0.3175				
B80	30	0.4902	0.3968				
B81	15	0.3610	0.3175				
B82	15.5	0.3279	0.2421				
B83	16	0.3333	0.2857				
B84	17	0.3333					
B85	19	0.3610	0.3205				
B86	8.5	0.2688	0.2132				
N01	59.80	0.9070	0.9023	0.3224	0.2728	0.1836	0.1541
N02	22	0.4032	0.4329				
N03	14.00	0.2527	0.2260	0.0833	0.1034		
N04	14.00	0.2837	0.2694	0.0842	0.0762		

ตารางที่ 4.2 คาบธรรมชาติของอาคารในเขตกรุงเทพและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัด เชียงราย (ต่อ)

ลำดับ	สูง (ม.)	Period (sec)					
		x1	y1	x2	y2	x3	y3
N05	10.50	0.2347	0.2415	0.1279	0.1316		
N06	17.50	0.2962	0.3476	0.1989	0.2081	0.1072	0.1052
N07	17.50	0.5398	0.5340	0.2915	0.2870	0.0838	0.0997
N08	14.00	0.2951	0.2694	0.1839	0.1886	0.0839	0.0894
N09	28.00	0.6434	0.5898	0.2092	0.1843		
N10	21.00	0.7466	0.5926	0.2169	0.1926		
N11	18.00	0.3741	0.4702	0.2429	0.2427		
N12	14.00	0.3149	0.3163	0.1156	0.1172		
N13	28.00	0.6772	0.7608	0.2121	0.2071	0.1427	0.1209
N14	23.00	0.3977	0.3578		0.2480	0.0744	0.0909
N15	33.20	0.5216	0.5022	0.2891	0.3098		
N16	20.00	0.3246	0.2794	0.1618	0.1525		
N17	29.00	0.6172	0.4861	0.1648	0.1579		
N18	20.50	0.3348	0.2512	0.0987	0.0806		
N19	24.85	0.6121	0.5041	0.1928	0.1541	0.0995	0.1013
N20	36.90	0.7848	0.6628	0.2341	0.2043	0.0640	0.0639
N21	21.25	0.6363	0.4833	0.1873	0.1530		
N22	60.40	1.0738	1.0543	0.3415	0.3393	0.2383	0.1695
N23	10.5	0.3164	0.3327				
N24	18.85	0.4110	0.4762				
N25	20	0.3715	0.4272				
N26	18.8	0.3557	0.4087				

4.2.2 อัตราส่วนความหน่วงของอาคาร (Damping ratio)

จากการวิเคราะห์อัตราส่วนความหน่วงของอาคารแต่ละหลังในงานวิจัยนี้ พบว่า อัตราส่วนความหน่วงในแต่ละโหมดการสั่นมีค่าที่หลากหลาย ทั้งในทิศทาง X, Y และ R (หรือโหมดการบิด) โดยค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ครอบคลุมตั้งแต่ช่วงต่ำกว่า 0.01 ไปจนถึงมากกว่า 0.08 ขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของอาคารแต่ละหลังและพฤติกรรมการสั่นสะเทือนในแต่ละทิศทาง ดังตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าค่าความหน่วงในโหมดที่หนึ่ง มีค่าตั้งแต่ประมาณ 0.01 ถึง 0.08 โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 1%–5% ซึ่งเป็นช่วงค่าปกติของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ยังอยู่ในสภาพดี ส่วนโหมดที่สอง และโหมดที่สาม บางอาคารเริ่มแสดงค่าความหน่วงสูงขึ้นหรือมีการกระจายตัวมากขึ้น ซึ่งอาจสะท้อนถึงผลกระทบจากความซับซ้อนของพฤติกรรมโครงสร้างหรืออิทธิพลจากสัญญาณรบกวน

นอกจากนี้ ยังพบว่าไม่สามารถวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนความหน่วงได้ครบถ้วนในทุกโหมดสำหรับอาคารทุกหลัง ทั้งนี้เกิดจากข้อจำกัดในการแสดงผลของโหมดบางโหมดที่ไม่ปรากฏอย่างชัดเจนหรือไม่เสถียรในการวิเคราะห์ เช่น มีการกระจายตัวสูงมากจนไม่สามารถยืนยันว่าเป็นโหมดจริงของระบบได้ รวมถึงบางกรณีที่คุณภาพของข้อมูลที่ตรวจวัดอาจมีสัญญาณรบกวนสูงมาก หรือมีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ต่ำ ทำให้ไม่สามารถประเมินค่าความหน่วงได้อย่างแม่นยำเนื่องจากอัตราส่วนความหน่วงเป็น พารามิเตอร์ที่ไวต่อสัญญาณรบกวน เพราะค่านี้คำนวณจาก ความชันของการลดทอนของแอมพลิจูดในพิสัยเวลา ซึ่งหากสัญญาณมี SNR ต่ำจะทำให้การวิเคราะห์ค่าความหน่วงคลาดเคลื่อนได้ง่าย อีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ไม่สามารถหาอัตราส่วนความหน่วงได้ครบทุกอาคาร คือ ในบางชุดข้อมูล อาคารนั้นมีการวิเคราะห์เฉพาะในโหมดความถี่ธรรมชาติโหมดแรกเท่านั้น โดยเฉพาะข้อมูลที่นำมาเสริมจากชุดตรวจวัดก่อนหน้านี้ ซึ่งยังไม่เคยนำมาวิเคราะห์อย่างครบถ้วนในทุกมิติ การนำข้อมูลกลุ่มนี้เข้ามาใช้เพื่อเสริมความครอบคลุมในโหมดแรก ช่วยให้ฐานข้อมูลมีปริมาณเพียงพอสำหรับการศึกษาการสั่นของอาคารในช่วงพื้นฐาน

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนความหน่วงทั้งสามโหมดของอาคารที่ศึกษาในทิศทาง x และ y

No.	Damping					
	x1	y1	x2	y2	x3	y3
A01	0.0390	0.0168	0.0168	0.0749		
A04	0.0339	0.0296	0.0393	0.0247	0.0189	0.0367
A05	0.0227	0.0256	0.0160	0.0107	0.0154	0.0205
A07	0.0234	0.0067	0.0184	0.0217	0.0439	0.0237
A08	0.0208	0.0182	0.0236	0.0751	0.0171	0.0209
A10	0.0069	0.0041	0.0082	0.0025	0.0025	0.0257
A11	0.0505	0.0601	0.0461	0.0341		
A12	0.0338	0.1053	0.0096	0.0087		
A13	0.0194	0.0459	0.0425	0.0221		
A14	0.0184	0.0046	0.0167	0.0045	0.0059	0.0035
A15	0.0081	0.0052	0.0102	0.0085	0.0062	0.0084
A16	0.0056	0.0062	0.0059	0.0383	0.0122	0.0199
A17	0.0239	0.0181	0.0112	0.0112	0.0214	0.0184
A18	0.0073	0.0126	0.0222	0.0216	0.0250	0.0027
A19	0.0039	0.0068	0.0143	0.0187	0.0522	0.0350
A20	0.0141	0.0102	0.0105	0.0106	0.0442	0.0429
A21	0.0171	0.0081	0.0170	0.0459	0.0393	0.0531
A22	0.0100	0.0044	0.0475	0.0318	0.0056	0.0076
A23	0.0047	0.0021	0.0160	0.0352	0.0191	0.0358
A24	0.0123	0.0068	0.0179	0.0150	0.0451	0.0280
A25	0.0646	0.0657	0.0301	0.0227		
A27	0.0121		0.0550		0.0859	
A31	0.0323	0.0443	0.0774	0.0209	0.0649	0.0107
A32	0.0192	0.0221	0.0101	0.0123	0.0310	0.0384
A34	0.0124	0.0174	0.0379	0.0681	0.0190	0.0150
A35	0.0156		0.0423		0.0395	
A36	0.0172	0.0172	0.0360	0.0204	0.0203	0.0242

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนความหน่วงทั้งสามโหมดของอาคารที่ศึกษาในทิศทาง x และ y (ต่อ)

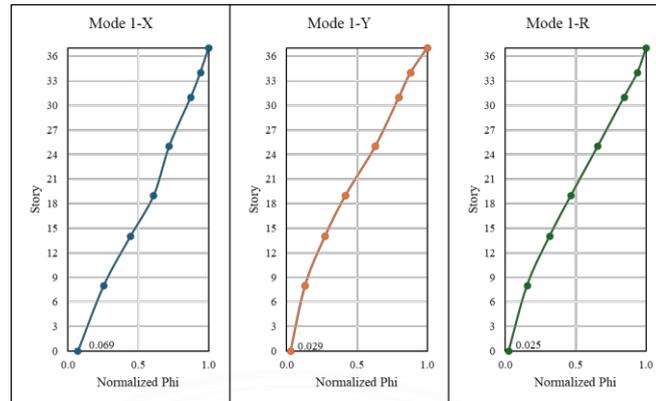
ลำดับ	Damping					
	x1	y1	x2	y2	x3	y3
A37	0.0561	0.0600	0.0206	0.0501	0.0096	0.0081
A38	0.0314	0.0188	0.0870	0.0701	0.0001	
A60	0.0133					
A61	0.0615	0.0553	0.0362	0.0202		
A62	0.0693	0.0552	0.0627			
A63	0.0746	0.0770	0.0656	0.0914	0.0156	0.0263
A64	0.0170	0.0193	0.0127	0.0094		
B54	0.0076	0.0079	0.0055	0.0100	0.0206	0.0197
B55	0.1151	0.2214	0.0624	0.0112	0.0095	0.0921
B56	0.0630	0.0592	0.0951	0.0440		
B57	0.0341	0.0281	0.0373	0.0712	0.0411	0.0227
B58	0.0071	0.0090	0.0061	0.0094	0.0089	0.0063
B59	0.0050	0.0047	0.0149	0.0105	0.0012	0.0103
B60	0.0233	0.0483	0.0060	0.0312		
B61	0.0408	0.0295	0.0116	0.0361		
N01	0.0267	0.0453	0.0162	0.0272	0.0215	0.0180
N03	0.0676	0.0731	0.0150	0.0286		
N04	0.0606	0.0482	0.0107	0.0076		
N05	0.0586	0.0371	0.0082	0.0134		
N06	0.0190	0.0105	0.0207	0.0204	0.0138	0.0189
N07	0.0092	0.0109	0.0304	0.0132	0.0248	0.0085
N08	0.0212	0.0208	0.0232	0.0262	0.0203	0.0368
N09	0.0154	0.0332	0.0203	0.0289		
N10	0.0037	0.0090	0.0148	0.0446		
N11	0.0077	0.0070	0.0052	0.0051		
N12	0.0077	0.0080	0.0231	0.0235		
N13	0.0216	0.0201	0.0365	0.0384	0.0357	0.0459

ตารางที่ 4.3 อัตราส่วนความหน่วงทั้งสามโหมดของอาคารที่ศึกษาในทิศทาง x และ y (ต่อ)

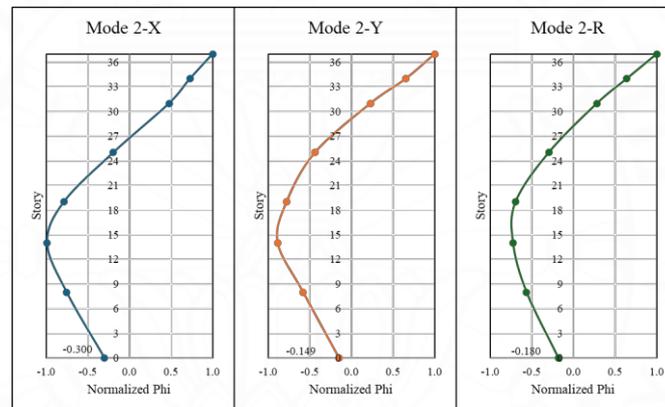
ลำดับ	Damping					
	x1	y1	x2	y2	x3	y3
N14	0.0578	0.0513		0.0590	0.0170	0.0119
N15	0.0082	0.0063	0.0416	0.0211		
N16	0.0230	0.0352	0.0260	0.0325		
N17	0.0101	0.0099	0.0429	0.0216		
N18	0.0361	0.0426	0.0370	0.0711		
N19	0.0169	0.0532	0.0302	0.0390	0.0093	0.0045
N20	0.0090	0.0181	0.0182	0.0244	0.0000	0.0001
N21	0.0075	0.0054	0.0274	0.0180		
N22	0.0068	0.0091	0.0416	0.0587	0.0225	0.0414

4.2.3 รูปร่างการสั่นของอาคาร (Mode shape)

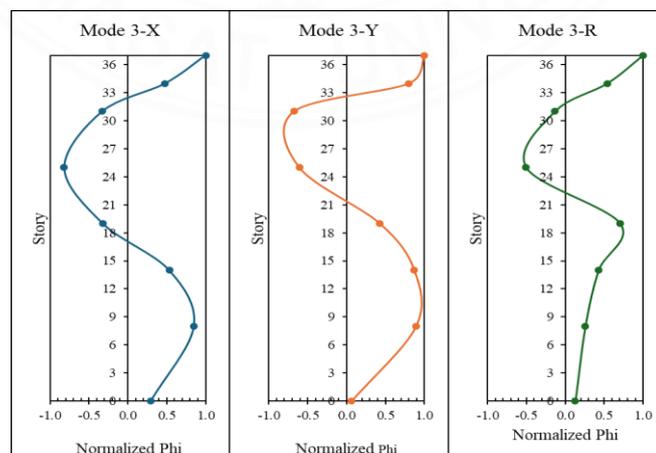
จากการวิเคราะห์ลักษณะการเคลื่อนไหวของอาคารในแต่ละโหมดการสั่นถือเป็นองค์ประกอบสำคัญในการศึกษาพฤติกรรมพลศาสตร์ของโครงสร้าง โดยเฉพาะเมื่อข้อมูลมาจากการตรวจวัดจริง การแยกแยะรูปร่างการสั่นในแต่ละทิศทางจึงช่วยให้สามารถระบุรูปแบบของการตอบสนองต่อแรงกระทำที่มีผลต่อเสถียรภาพและความปลอดภัยของอาคาร จากผลการวิเคราะห์ที่แสดงในภาพที่ 4.9 ถึง 4.11 ซึ่งแสดงรูปร่างการสั่นของอาคารตัวอย่างในโหมดที่ 1, 2 และ 3 ครบคลุมทั้งสามทิศทาง ได้แก่ X, Y และ R (การบิด) จะเห็นได้ว่ารูปร่างการสั่นในโหมดที่ 1 ของทั้งสามทิศทางแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง โดยมีการโก่งตัวมากที่สุดที่ชั้นบนสุดของอาคาร ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของโหมดพื้นฐานของโครงสร้างทั่วไป เมื่อพิจารณาโหมดที่ 2 ภาพที่ 4.10 พบว่ารูปร่างการสั่นเริ่มมีจุดเปลี่ยนทิศทาง ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงหรือมวลในบางช่วงของอาคาร รวมถึงอิทธิพลจากระบบโครงสร้างเสริมต่าง ๆ เช่น ผนัง หรือคาน ในโหมดที่ 3 รูปร่างการสั่นมีความซับซ้อนยิ่งขึ้น โดยปรากฏจุดเปลี่ยนทิศทางอย่างชัดเจนอย่างน้อย 2 จุดในแต่ละทิศทาง รูปแบบดังกล่าวบ่งชี้ถึงพฤติกรรมโครงสร้างที่มีอิทธิพลของหลายโหมดในการสั่นพร้อมกัน (mode coupling)



ภาพที่ 4.9 รูปร่างการสั่นของตัวอย่างอาคารที่ศึกษา โหมดที่ 1 ทั้งสามทิศทาง



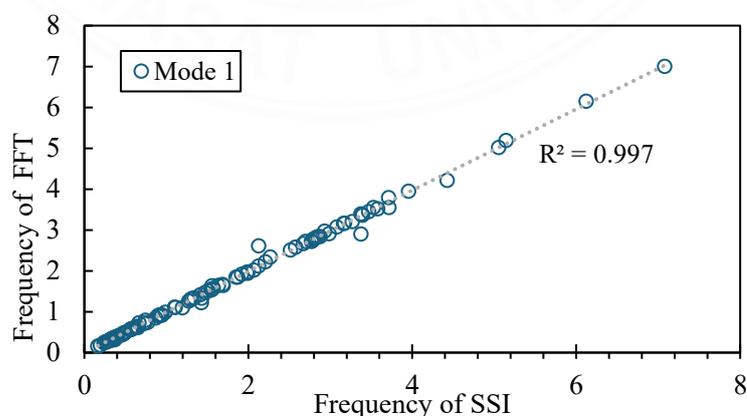
ภาพที่ 4.10 รูปร่างการสั่นของตัวอย่างอาคารที่ศึกษา โหมดที่ 2 ทั้งสามทิศทาง



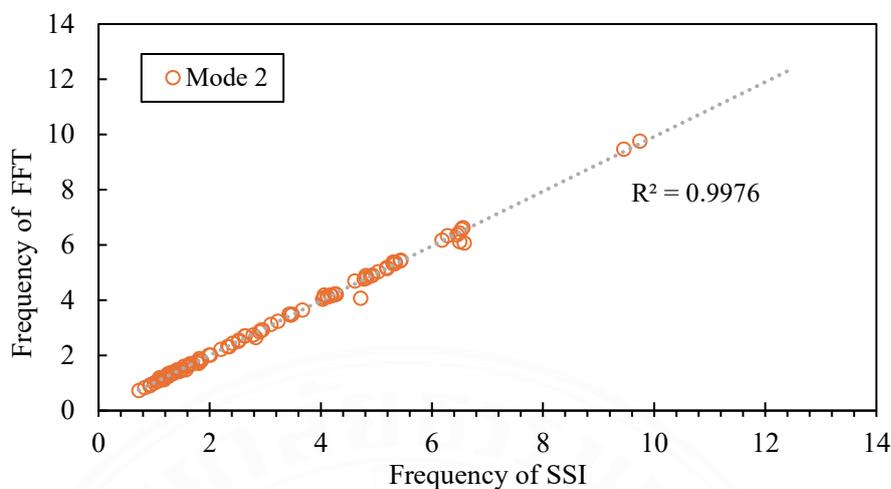
ภาพที่ 4.11 รูปร่างการสั่นของตัวอย่างอาคารที่ศึกษา โหมดที่ 3 ทั้งสามทิศทาง

4.2.4 การเปรียบเทียบผลของค่าคาบธรรมชาติ

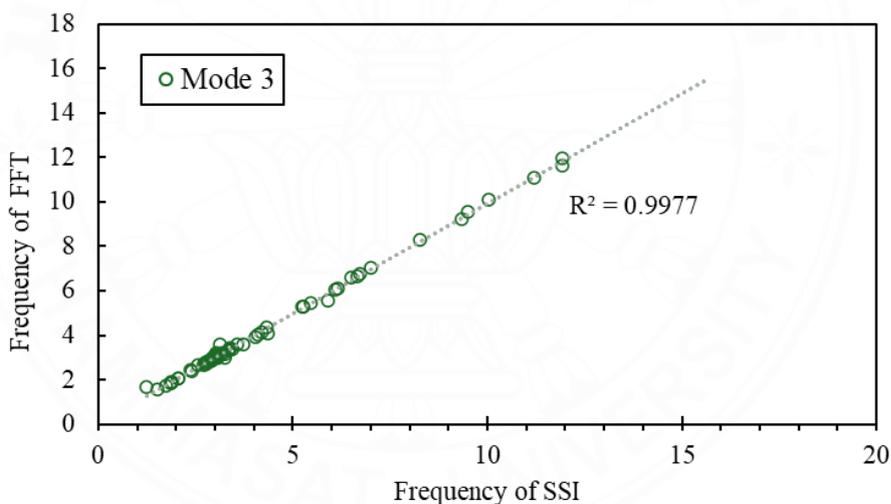
การเปรียบเทียบค่าคาบธรรมชาติที่ได้จากวิธี SSI และ Fast Fourier Transform (FFT) ดังแสดงในภาพที่ 4.12 4.13 และ 4.14 แสดงกราฟกระจายที่ใช้เปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของโหมดที่ 1 โหมดที่ 2 และโหมดที่ 3 ตามลำดับ จากวิธี SSI และ FFT โดยมีแกน X แสดงค่าความถี่ธรรมชาติจากวิธี SSI และแกน Y แสดงค่าความถี่ธรรมชาติจากวิธี FFT จุดข้อมูลแต่ละจุดแทนอาคารหนึ่งหลัง และเส้นประแสดงเส้นแนวโน้ม พร้อมค่า R ที่ใกล้เคียงกับหนึ่ง บ่งชี้ว่าค่าจากทั้งสองวิธีมีความสัมพันธ์กันสูงมาก หมายความว่าวิธี SSI และ FFT ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันทั้งสามโหมด นอกจากนี้ จุดส่วนใหญ่เรียงตัวใกล้เส้นแนวโน้ม แสดงให้เห็นว่าค่าความถี่จากทั้งสองวิธีมีความสอดคล้องกันอย่างดี โดยมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า SSI เป็นทางเลือกที่น่าเชื่อถือในการวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติ โดยอาจมีข้อได้เปรียบในบางกรณี เช่น การใช้ข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนต่ำหรือการประมวลผลข้อมูลจากโครงสร้างที่ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม ในโหมดที่ 3 ซึ่งเป็นโหมดที่มีความถี่สูงขึ้น พบว่าวิธี FFT ไม่สามารถแสดงผลได้อย่างชัดเจนเท่ากับวิธี SSI เนื่องจากลักษณะของสัญญาณที่ซับซ้อนและระดับความถี่ที่สูงทำให้พลังงานของโหมดเหล่านี้อ่อนลงเมื่อเทียบกับโหมดพื้นฐาน ในการศึกษาจึงใช้ผลการวิเคราะห์จากวิธี SSI ซึ่งมีความแม่นยำและสามารถระบุโหมดได้ชัดเจนเป็นแนวทางเบื้องต้นในการระบุช่วงค่าความถี่ที่ควรปรากฏในโหมดที่ 3 จากนั้นจึงทำการตรวจสอบข้อมูลจาก FFT ภายใต้วงความถี่ดังกล่าว เพื่อยืนยันและประมาณค่าความถี่ธรรมชาติในโหมดที่สามของวิธี FFT ได้อย่างเหมาะสม วิธีการนี้ช่วยให้สามารถขยายการเปรียบเทียบให้ครอบคลุมทุกโหมดได้แม้ในกรณีที่วิธี FFT มีข้อจำกัดในการระบุโหมดที่สูง จึงแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้วิธี SSI ในการนำเสนอค่าความถี่ธรรมชาติอย่างครอบคลุม



ภาพที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 1 ของวิธี SSI และ FFT



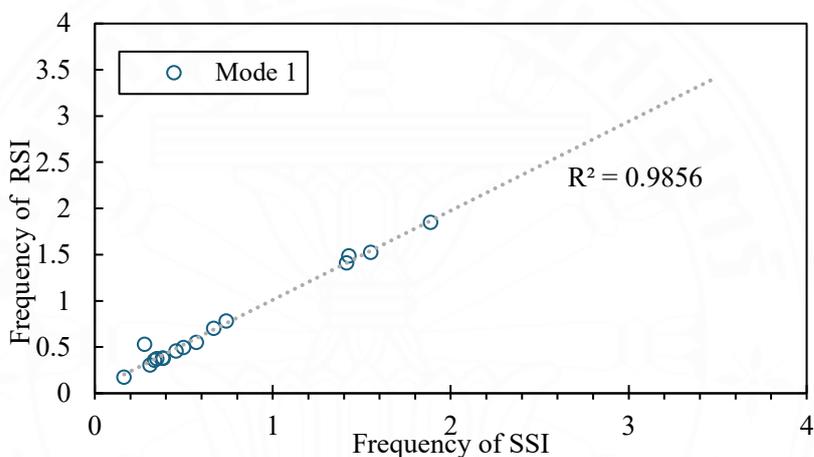
ภาพที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 2 ของวิธี SSI และ FFT



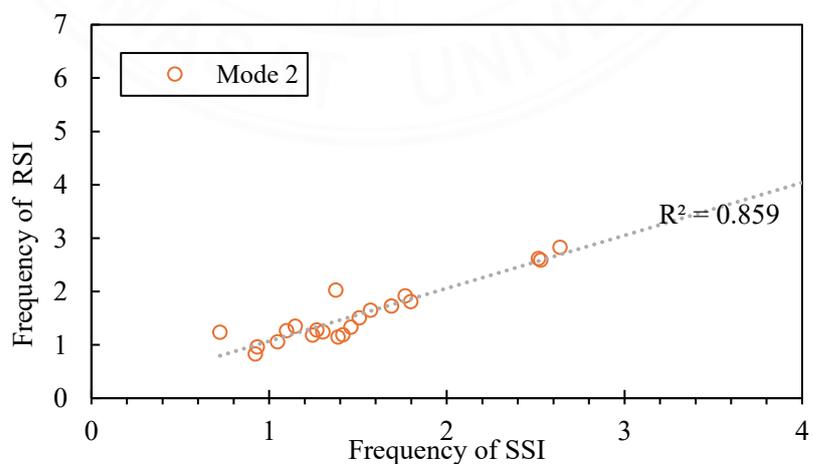
ภาพที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 3 ของวิธี SSI และ FFT

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธี Recursive Subspace Identification (RSI) เทียบกับ SSI ได้มีการเปรียบเทียบค่าคาบธรรมชาติที่ได้จากทั้งสองวิธีในโหมดที่ 1 ถึง 3 ดังแสดงใน ภาพที่ 4.15 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ โดยค่าคาบธรรมชาติจากวิธี SSI ถูกประเมินจากชุดข้อมูล ทั้งหมดในภาพรวม ขณะที่วิธี RSI ทำการประเมินค่าจากข้อมูลแบบแบ่งช่วง (window-based) ตลอดช่วงเวลาการวัด ผลการเปรียบเทียบค่าคาบธรรมชาติที่ได้พบว่าค่าที่ได้จากทั้งสองวิธีมีความ ใกล้เคียงกันในโหมดที่ 1 และ 2 ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของโหมดหลักที่มักมีพลังงานเด่นชัดและมี

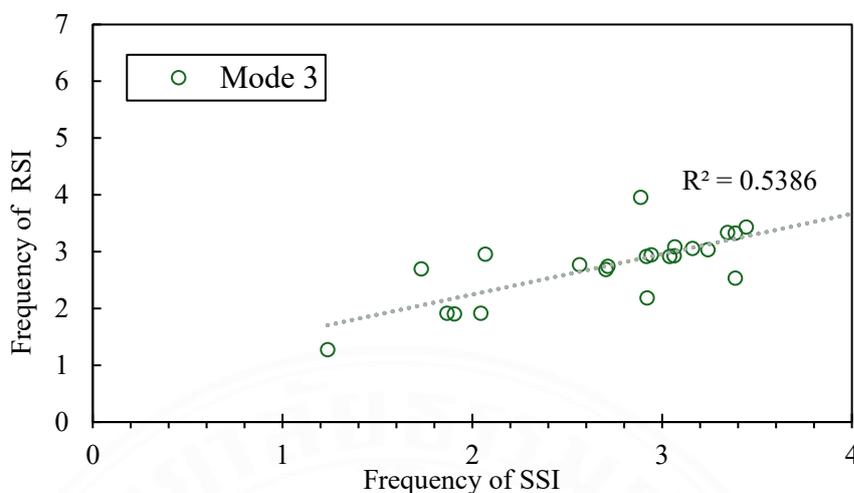
เสถียรภาพสูง ทำให้ทั้ง SSI และ RSI สามารถประเมินได้อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตาม ในโหมดที่ 3 ซึ่งมักมีพลังงานต่ำกว่าและความไม่แน่นอนจากข้อมูลรบกวนมากขึ้น พบว่าค่าที่ได้จาก RSI เริ่มมีความเบี่ยงเบนจาก SSI ในบางช่วงข้อมูล โดยเฉพาะกรณีที่สัญญาณมีความซับซ้อนหรือคุณภาพของข้อมูลลดลง ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่อาจพบได้ในโหมดที่สูงขึ้น ถึงแม้ว่าผลลัพธ์โดยรวมยังคงอยู่ในแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน แต่ในแง่การใช้งานจริงควรใช้การตรวจสอบร่วมกับการแสดงผลรูปแบบอื่นเพิ่มเติมเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลลัพธ์จาก RSI โดยเฉพาะเมื่อใช้ในการติดตามความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างในระยะยาว



ภาพที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 1 ของวิธี SSI และ RSI



ภาพที่ 4.16 การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 2 ของวิธี SSI และ RSI

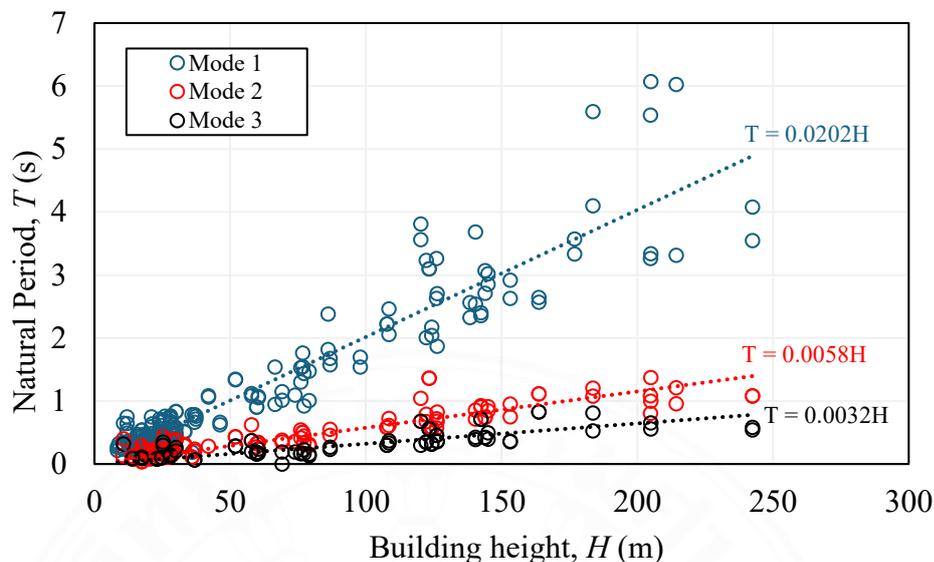


ภาพที่ 4.17 การเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 3 ของวิธี SSI และ RSI

4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์กับคุณลักษณะทางกายภาพของอาคาร

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติและความสูงของอาคารแต่ละโหมด

ผลการวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติของอาคารทั้งในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล รวมถึงจังหวัดเชียงใหม่และเชียงราย ด้วยวิธี SSI แสดงค่าคาบธรรมชาติในสามโหมดดังภาพที่ 4.18 โดยพบว่าใน โหมดที่ 1 ค่าคาบธรรมชาติมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อความสูงของอาคารเพิ่มขึ้น และเป็นโหมดที่มีความสัมพันธ์ต่อความสูงมากที่สุด เนื่องจากแสดงการสั่นไหวหลักที่เกี่ยวข้องกับการโยกตัวของอาคาร ส่วนในโหมดที่ 2 ค่าคาบธรรมชาติมีระดับต่ำกว่า โหมดที่ 1 และเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้ากว่า สะท้อนถึงการสั่นในรูปแบบที่ซับซ้อนมากขึ้น เช่น การโก่งตัวในทิศทางที่แตกต่าง ขณะที่โหมดที่ 3 มีค่าคาบธรรมชาติที่ต่ำที่สุด และแนวโน้มของกราฟมีความชันน้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าการสั่นในโหมดนี้ได้รับผลกระทบจากความสูงของอาคารน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์เชิงเส้น (0.0202, 0.0057, 0.0032) พบว่าโหมดที่ 1 มีคาบธรรมชาติมากกว่าโหมดที่ 2 ประมาณ 3.5 และโหมดที่ 1 มากกว่าโหมดที่ 3 ประมาณ 6 เท่า โดยรวมแล้วแนวโน้มของกราฟในแต่ละโหมดแสดงถึงลักษณะการตอบสนองทางพลศาสตร์ของอาคารที่เปลี่ยนไปตามความสูง



ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างคาบธรรมชาติและความสูงอาคารทั้งสามโหมด

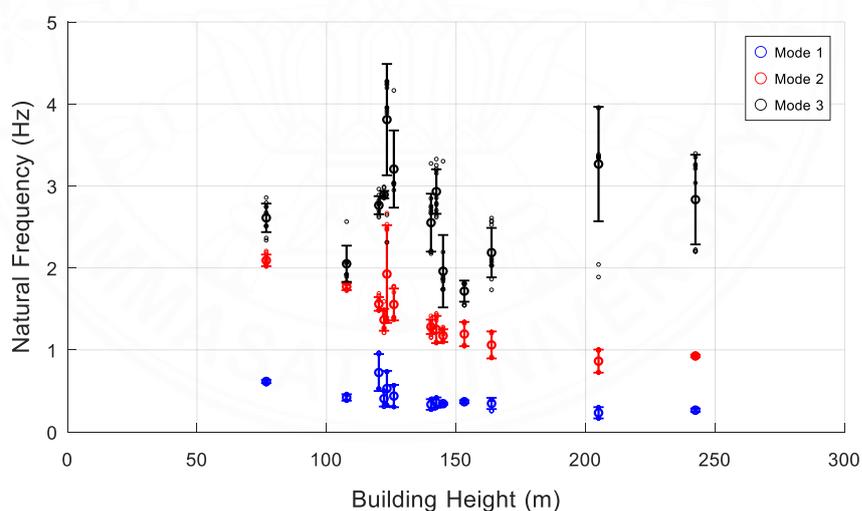
ผลการวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติของอาคารโดยรวม พบว่าค่าคาบธรรมชาติในแต่ละโหมดมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามความสูงของอาคารแตกต่างกันไป ซึ่งสะท้อนถึงพฤติกรรมการตอบสนองทางพลศาสตร์ของโครงสร้าง เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์ในภาพรวมผ่านกราฟเดียวกัน พบว่าโหมดที่ 1 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อความสูงของอาคารเพิ่มขึ้น ขณะที่โหมดที่ 2 และโหมดที่ 3 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เพื่อให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างค่าคาบธรรมชาติและความสูงของอาคารในแต่ละโหมดได้อย่างชัดเจน จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เชิงถดถอยแยกสำหรับแต่ละโหมด เพื่อพิจารณาค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นและแนวโน้มเฉพาะของแต่ละรูปร่างการสั่นไหว จากผลการวิเคราะห์ข้อมูล ความสัมพันธ์ระหว่างคาบธรรมชาติและความสูงอาคารทั้งสามโหมด สามารถเขียนสูตรสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับความสูงของอาคารในรูปทั่วไปของโหมดที่ 1 2 และ 3 จากสมการที่ 3.20 ได้ดังสมการที่ 4.1 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ ดังนี้

$$T = \frac{H}{50} \quad (4.1)$$

$$T = \frac{H}{175} \quad (4.2)$$

$$T = \frac{H}{313} \quad (4.3)$$

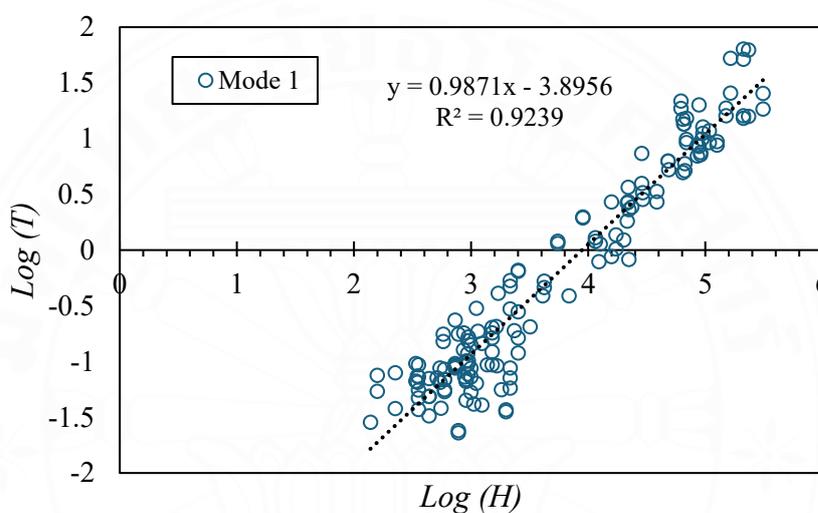
จากภาพที่ 4.19 แสดงผลจากการวิเคราะห์อาคารแต่ละหลังที่ผ่านการวัดค่าความถี่ธรรมชาติหลายครั้งในอาคารเดียวกัน จากการวัดซ้ำในแต่ละอาคารทำให้ได้ค่าความถี่หลายค่าแล้วจึงนำมาคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยและหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อลดผลกระทบจากความแปรปรวนของการวัดผลลัพธ์ที่ปรากฏในภาพแสดงทั้งค่าเฉลี่ยและช่วงค่าที่แสดงการกระจายตัวของข้อมูลในแต่ละอาคารและแต่ละโหมด โดยโหมดที่ 1 ซึ่งเป็นโหมดพื้นฐาน มีค่าความถี่สม่ำเสมอและมีส่วนเบี่ยงเบนแคบส่วนใหญ่ค่าจะอยู่ใกล้กันแม้ในอาคารสูง แสดงถึงพฤติกรรมที่มีเสถียรภาพ โหมดที่ 2 มีการกระจายตัวกว้างขึ้นเพียงเล็กน้อย ค่าความถี่ในอาคารเดียวกันบางครั้งแตกต่างกันมากกว่าโหมดแรก สะท้อนว่าพฤติกรรมโครงสร้างในโหมดนี้อ่อนไหวต่อสภาวะหรือองค์ประกอบของอาคารมากกว่า ส่วนโหมดที่ 3 มีการกระจายตัวมากที่สุด ช่วงค่าความถี่ของอาคารเดียวกันอาจห่างกันมากและช่วงส่วนเบี่ยงเบนในหลายกรณีค่อนข้างกว้าง โดยเฉพาะในอาคารสูง แสดงถึงความซับซ้อนของโหมดการสั่นที่สูงขึ้นและความไม่แน่นอนมากกว่าที่พบในโหมดที่ 1 และ 2 ซึ่งทั้งหมดนี้ช่วยยืนยันว่าการวิเคราะห์โดยใช้ค่าเฉลี่ยร่วมกับส่วนเบี่ยงเบนจากการวัดหลายครั้งให้ภาพรวมที่น่าเชื่อถือและสะท้อนพฤติกรรมพลศาสตร์ของอาคารได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น



ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ธรรมชาติกับความสูงของอาคารในแต่ละโหมด พร้อมแสดงค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนของผลการวิเคราะห์

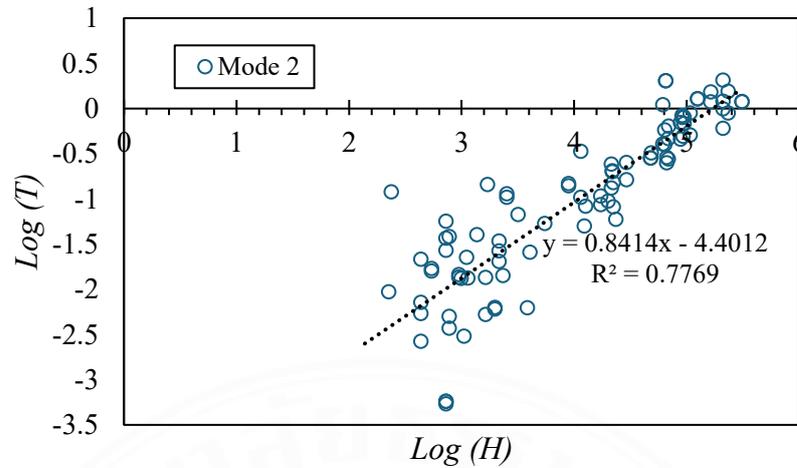
4.3.2 การวิเคราะห์เชิงถดถอยในรูปแบบลอการิทึมของค่าคาบธรรมชาติ

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงถดถอยทั้งในกรุงเทพฯและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และเชียงราย ดังภาพที่ 4.20 แสดงการวิเคราะห์เชิงถดถอยของค่าคาบธรรมชาติกับความสูงของอาคารสำหรับโหมดที่ 1 โดยสมการเส้นตรงที่ได้คือ $y = 0.9871x - 3.8956$ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความชัน (β) เท่ากับ 0.9871 และจุดตัดแกน y เท่ากับ -3.8956 ทำให้มีค่า α เท่ากับ 0.0204 และความสัมพันธ์ของข้อมูล, R^2 คือ 0.9239 บอกได้ว่ามีความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างตัวแปรสองตัว



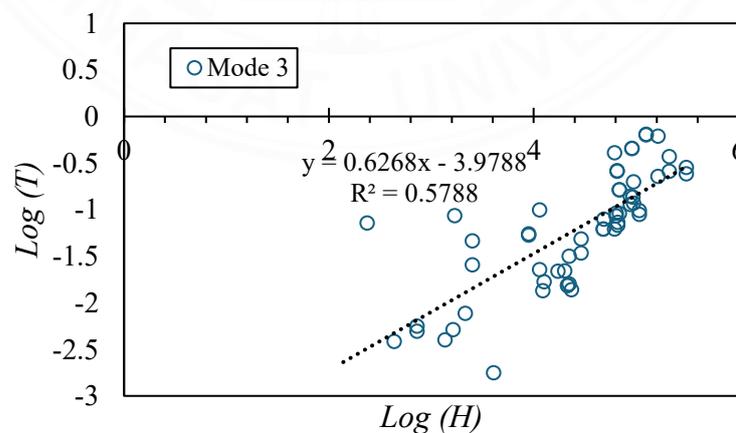
ภาพที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์เชิงถดถอยของค่าคาบธรรมชาติและความสูงของอาคาร สำหรับโหมดที่ 1

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงถดถอยทั้งในกรุงเทพฯและปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และเชียงราย ดังภาพที่ 4.21 แสดงการวิเคราะห์เชิงถดถอยของค่าคาบธรรมชาติกับความสูงของอาคารสำหรับโหมดที่ 2 โดยสมการเส้นตรงที่ได้คือ $y = 0.8414x - 4.4012$ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความชัน (β) เท่ากับ 0.8414 และจุดตัดแกน y เท่ากับ -4.4012 ทำให้มีค่า α เท่ากับ 0.0123 และความสัมพันธ์ของข้อมูล, R^2 คือ 0.7769 บอกได้ว่ามีความสัมพันธ์ที่ดีระหว่างตัวแปรสองตัว



ภาพที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์เชิงถดถอยของค่าคาบธรรมชาติและความสูงของอาคาร
สำหรับโหมดที่ 2

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงถดถอยของอาคารในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จังหวัด เชียงใหม่และเชียงราย ดังภาพที่ 4.22 แสดงการวิเคราะห์เชิงถดถอยของค่าคาบธรรมชาติกับความสูง ของอาคารสำหรับโหมดที่ 3 โดยสมการเส้นตรงที่ได้คือ $y = 0.6268x - 3.9788$ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ ความชัน (β) เท่ากับ 0.6268 และจุดตัดแกน y เท่ากับ -3.9788 ทำให้มีค่า α เท่ากับ 0.0188 และความสัมพันธ์ของข้อมูล, R^2 คือ 0.5788 บอกได้ว่ามีความสัมพันธ์ที่ปานกลางระหว่างตัวแปร สองตัว



ภาพที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์เชิงถดถอยของค่าคาบธรรมชาติและความสูงของอาคาร
สำหรับโหมดที่ 3

โดยสรุปการวิเคราะห์เชิงทดลองในรูปแบบลอการิทึมระหว่างค่าคาบธรรมชาติและความสูงของอาคาร สามารถเขียนเป็นสมการการประมาณค่าคาบธรรมชาติกับความสูงของอาคารในรูปทั่วไปของโหมดที่ 1 2 และ 3 ได้ดังสมการที่ 4.4 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่ชัดเจนว่า เมื่อความสูงของอาคารเพิ่มขึ้น ค่าคาบธรรมชาติก็มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับหลักการพื้นฐานทางด้านวิศวกรรมโครงสร้างที่ว่าโครงสร้างที่มีความสูงมากจะมีการสั่นในอัตราที่ช้าลง หรือมีคาบการสั่นที่ยาวขึ้น ผลการวิเคราะห์นี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการประมาณค่าคาบธรรมชาติของอาคารเบื้องต้น

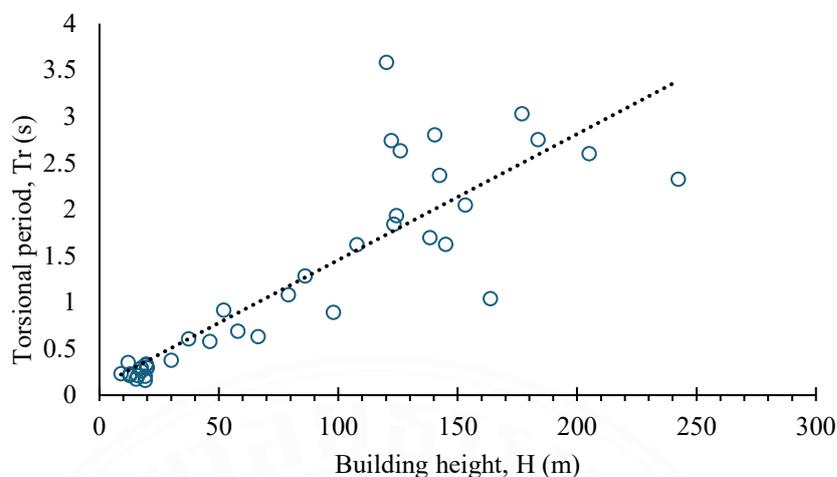
$$T = 0.0204H^{0.98} \quad (4.4)$$

$$T = 0.0123H^{0.84} \quad (4.5)$$

$$T = 0.0188H^{0.63} \quad (4.6)$$

4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติโหมดการบิดกับความสูงของอาคาร

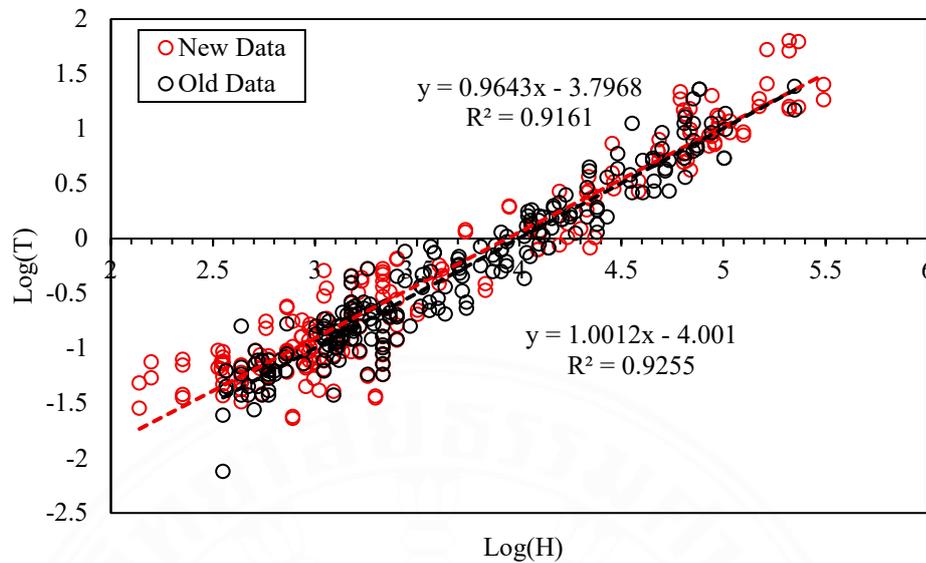
โหมดการสั่นในทิศทางบิด (Torsional Mode) เป็นลักษณะการสั่นที่แตกต่างจากการสั่นในแนวราบตามแกน x และ y เนื่องจากเกิดจากแรงบิดที่ทำให้อาคารหมุนรอบแกนตั้งฉากกับพื้น ซึ่งพฤติกรรมลักษณะนี้มักปรากฏในอาคารที่มีความไม่สมมาตร ไม่ว่าจะเป็นด้านรูปทรงเรขาคณิต ความแข็งในแนวระนาบ หรือการกระจายมวล ภาพที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติในทิศทางบิด (T_r) กับความสูงของอาคาร ซึ่งพบว่า T_r มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความสูง นั่นคือ อาคารที่สูงกว่าจะสั่นช้ากว่าในโหมดบิดเช่นเดียวกับโหมดการสั่นหลัก อย่างไรก็ตาม ข้อมูลยังแสดงให้เห็นว่า อาคารสูงมีค่าคาบในโหมดนี้ที่กระจายตัวมากกว่าอาคารเดี่ยว ซึ่งสะท้อนถึงอิทธิพลของปัจจัยโครงสร้างอื่น ๆ ที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยความสูงเพียงอย่างเดียว เช่น ความไม่สมมาตรของแปลนอาคาร ระบบรับแรงด้านข้าง และลักษณะการวางองค์ประกอบโครงสร้าง จากผลการวิเคราะห์จึงสรุปได้ว่า แม้ความสูงจะมีผลต่อค่าคาบในโหมดบิด แต่ไม่สามารถใช้เป็นตัวแปรเดียวในการประมาณค่า T_r ได้อย่างแม่นยำ การประเมินพฤติกรรมโหมดการสั่นในทิศทางบิดควรพิจารณาควบคู่กับข้อมูลโครงสร้างอื่นเพื่อให้ได้ผลที่สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของอาคาร



ภาพที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติในทิศทางบิดกับความสูงของอาคาร

4.3.4 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับการศึกษาในอดีต

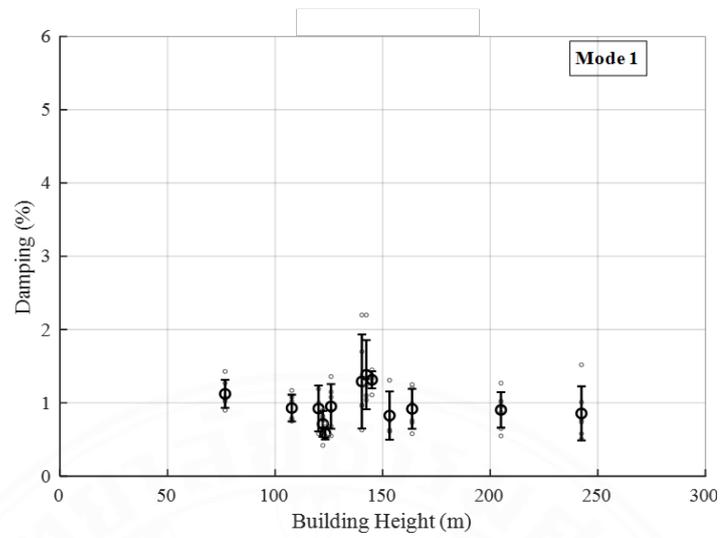
จากการศึกษาค่าคาบธรรมชาติของอาคารในประเทศไทยที่ผ่านมา พบว่ามีการตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ในพื้นที่สำคัญ เช่น กรุงเทพมหานครและจังหวัดในภาคเหนือ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงแผ่นดินไหวและมีความหลากหลายในรูปแบบของอาคาร อย่างไรก็ตาม งานวิจัยก่อนหน้าได้มุ่งเน้นการศึกษาอาคารสูงเป็นหลัก ทำให้ฐานข้อมูลที่ได้ยังมีข้อจำกัดด้านความครอบคลุม โดยเฉพาะในกลุ่มอาคารที่มีความสูงไม่เกิน 5 ชั้น งานวิจัยนี้จึงได้ดำเนินการปรับปรุงฐานข้อมูลด้วยการเพิ่มจำนวนอาคารตัวอย่าง โดยเฉพาะในกลุ่มอาคารเตี้ย เพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างอาคารเตี้ยและอาคารสูงมากยิ่งขึ้น รวมถึงมีการบูรณาการข้อมูลจากงานวิจัยเดิมเข้ากับข้อมูลใหม่ที่วัดจากอาคารจริงเพิ่มเติม ภาพที่ 4.24 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติของอาคารระหว่างข้อมูลในอดีตและข้อมูลปัจจุบัน โดยพบว่าแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log(H)$ และ $\log(T)$ ของทั้งสองชุดข้อมูลยังคงมีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่มีความแตกต่างเล็กน้อยในด้านค่าสมการเชิงเส้น โดยข้อมูลในอดีตมีค่าความชันที่สูงกว่า และมีค่า R^2 ที่มากกว่า ซึ่งอาจเป็นผลจากความสม่ำเสมอของกลุ่มข้อมูลอาคารสูงที่เน้นศึกษาในอดีต ขณะที่ข้อมูลในปัจจุบัน แม้มีความชันของกราฟต่ำกว่าเล็กน้อย แต่ให้ภาพรวมของฐานข้อมูลที่ครอบคลุมมากขึ้น และสะท้อนลักษณะโครงสร้างของอาคารที่หลากหลายมากกว่าเดิม ทั้งในแง่ของขนาด ความสูง และประเภทการใช้งาน



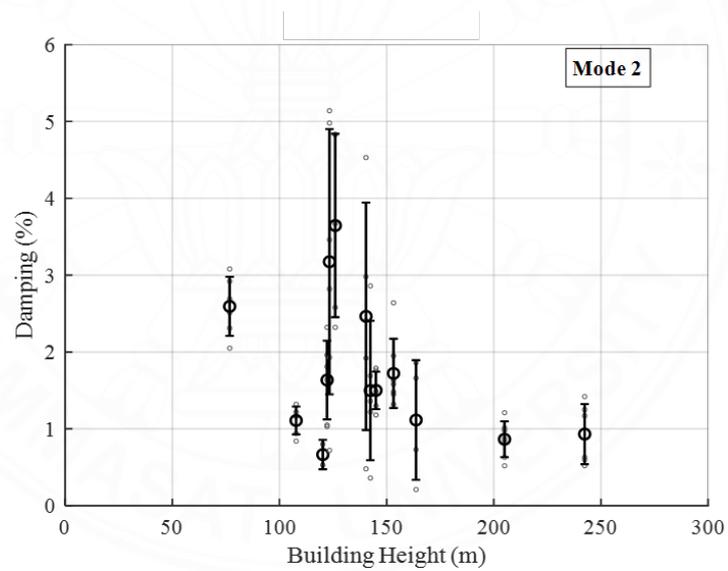
ภาพที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์เชิงถดถอยการศึกษาในอดีตกับปัจจุบัน
ของค่าคาบธรรมชาติและความสูงของอาคาร

4.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความหน่วงกับความสูงของอาคาร

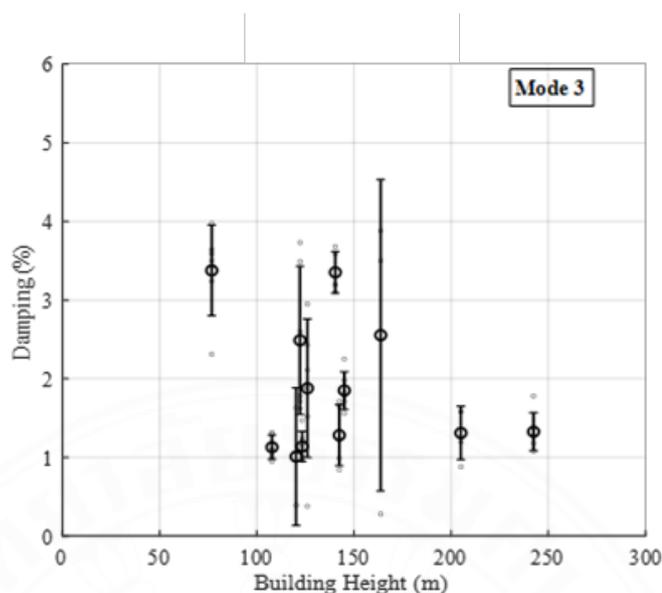
เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio) ของอาคารสูงในช่วงประมาณ 50–250 เมตร จากกราฟที่แสดงผลการวัดหลายชั้นภายในอาคารเดียวกัน พบว่าในหนึ่งอาคารมักได้ค่าอัตราส่วนความหน่วงหลายค่า ทำให้สามารถวิเคราะห์ช่วงค่าและความแปรผันได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จากค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D) ที่ปรากฏในกราฟ พบว่าในโหมดที่ 1 ค่าอัตราส่วนความหน่วงของอาคารส่วนใหญ่อยู่ประมาณ 0.5–1.5% แสดงถึงลักษณะการสูญเสียพลังงานที่ค่อนข้างคงที่และเสถียรในโหมดการสั่นหลัก ขณะที่ในโหมดที่ 2 มีบางอาคารที่ค่าอัตราส่วนความหน่วงสูงขึ้นถึงราว 4% แต่โดยรวมยังคงไม่เกิน 2% ในอาคารส่วนใหญ่ โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับโหมดที่ 1 ส่วนในโหมดที่ 3 ก็มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือ ค่าอัตราส่วนความหน่วงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในอาคารส่วนใหญ่ซึ่งไม่เกิน 4% ทั้งนี้ การกระจายตัวของค่าดังกล่าวที่เพิ่มขึ้นในโหมดสูงกว่าอาจสะท้อนถึงอิทธิพลของรูปร่างการสั่นที่ซับซ้อนขึ้น หรือการมีองค์ประกอบโครงสร้างอื่น เช่น ผนังเดิม หรือระบบประกอบที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อกลไกการสูญเสียพลังงาน นอกจากนี้ ค่า S.D ที่ปรากฏยังช่วยยืนยันว่าความแปรผันของอัตราส่วนความหน่วงในแต่ละอาคารส่วนใหญ่ยังอยู่ในระดับยอมรับได้ ไม่ได้มีการกระจายตัวที่สูงจนแสดงถึงความไม่เสถียร



ภาพที่ 4.25 ช่วงค่าอัตราส่วนความหน่วงของอาคารสูง โหมดที่ 1

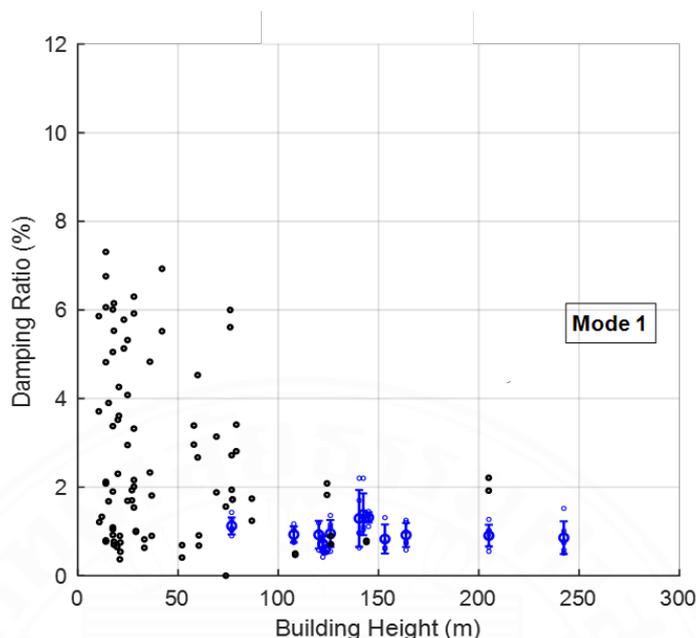


ภาพที่ 4.26 ช่วงค่าอัตราส่วนความหน่วงของอาคารสูง โหมดที่ 2



ภาพที่ 4.27 ช่วงค่าอัตราส่วนความหน่วงของอาคารสูง โหมดที่ 3

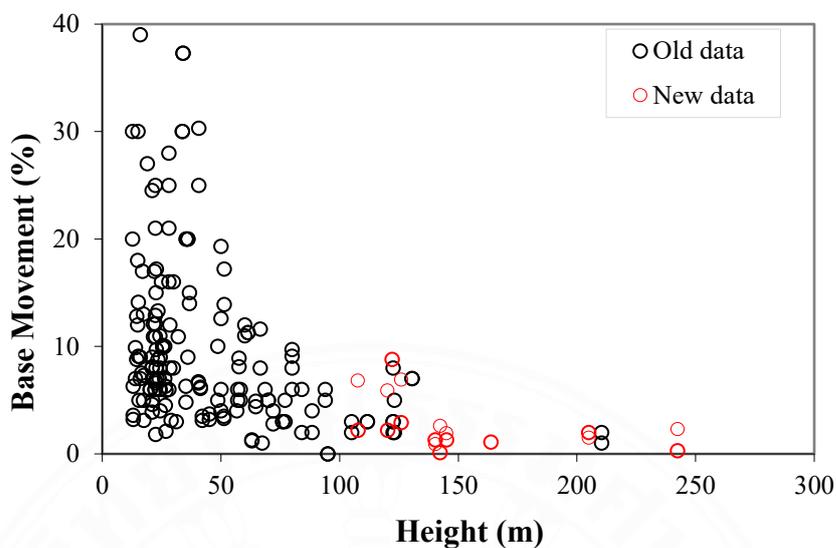
จากการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการตรวจวัดการสั่นไหวของอาคารจริงกับค่าที่มาตรฐานการออกแบบทั่วไปกำหนดไว้ พบว่ามาตรฐานมักสมมติค่าอัตราส่วนความหน่วง (damping ratio) เท่ากับ 5% ขณะที่ในงานวิจัยนี้ ผลการวัดแสดงให้เห็นว่าค่าดังกล่าวสำหรับอาคารสูงในช่วงประมาณ 100–250 เมตร (high-rise) กลับมีค่าเพียงราว 2% ซึ่งต่ำกว่าที่มาตรฐานระบุอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.28 จะเห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามระดับความสูง โดยกลุ่มอาคารเตี้ย (0–50 เมตร, low-rise) มีค่าดังกล่าวเฉลี่ย 6% รองลงมาคืออาคารสูงปานกลาง (50–100 เมตร, mid-rise) ที่อยู่ประมาณ 4% และลดลงเหลือประมาณ 2% ในกลุ่มอาคารสูง ทั้งนี้ แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนว่าความสูงของอาคารมีอิทธิพลต่อการสูญเสียพลังงานจากการสั่น โดยอาคารเตี้ยซึ่งมักมีความแข็งแรงมากกว่าอาคารสูง อาจถ่ายเทพลังงานกลับสู่โครงสร้างได้รวดเร็ว ทำให้ค่าดังกล่าวปรากฏสูง ขณะที่อาคารสูงที่มีความยืดหยุ่นหรือความเหนียวมากกว่า จะใช้เวลานานกว่าในการหยุดการสั่น ส่งผลให้การสลายพลังงานต่อรอบการสั่นมีค่าน้อยกว่า การค้นพบนี้ไม่เพียงช่วยยืนยันข้อสันนิษฐานเกี่ยวกับผลของความสูงที่มีต่อกลไกการหน่วง แต่ยังชี้ให้เห็นว่าการนำค่าอัตราส่วนความหน่วงคงที่ตามมาตรฐานมาใช้ในการวิเคราะห์อาจไม่สะท้อนพฤติกรรมที่แท้จริงของอาคารแต่ละประเภทได้เพียงพอ ซึ่งอาจมีนัยสำคัญต่อความถูกต้องในการประเมินการตอบสนองจากแผ่นดินไหวในงานออกแบบวิศวกรรมโครงสร้าง



ภาพที่ 4.28 อัตราส่วนความหน่วงของอาคารสูงและอาคารเตี้ยที่ศึกษา

4.3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวที่ฐานกับความสูงของอาคาร

ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวที่ฐานกับความสูงของอาคาร แสดงดังภาพที่ 4.29 โดยจุดสีดำแสดงข้อมูลจากงานวิจัยในอดีต ส่วนจุดสีแดงแสดงข้อมูลใหม่ที่เพิ่มเข้ามาจากการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ เมื่อพิจารณาผลรวมทั้งหมดพบว่าค่าการเคลื่อนตัวที่ฐานมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อความสูงของอาคารเพิ่มขึ้น กล่าวคือ อาคารที่มีความสูงน้อยกว่า 50 เมตรส่วนใหญ่มีค่าการเคลื่อนตัวที่ฐานสูงมาก บางตัวอย่างสูงเกิน 30% ซึ่งสะท้อนพฤติกรรมของอาคารเตี้ยที่มักมีฐานรากบนชั้นดินที่อ่อนตัว และการตอบสนองต่อแรงสั่นสะเทือนจึงมีการเคลื่อนตัวที่ฐานมากกว่าอาคารสูง ในช่วงความสูงประมาณ 50–150 เมตร ค่าการเคลื่อนตัวที่ฐานจากข้อมูลเดิมเริ่มลดลงและกระจายตัวแคบลงอยู่ราว 0–10% การเพิ่มข้อมูลใหม่จากงานวิจัยนี้ซึ่งแสดงด้วยจุดสีแดง ช่วยเติมเต็มช่วงข้อมูลในกลุ่มอาคารสูงมากกว่า 150 เมตร ไปจนถึงประมาณ 250 เมตร ซึ่งเดิมแทบไม่มีข้อมูล ปรากฏว่าอาคารในช่วงความสูงระดับนี้ให้ค่าการเคลื่อนตัวที่ฐานต่ำมากใกล้ศูนย์หรือไม่เกิน 5% โดยค่าที่ได้มีความกระจุกตัวและไม่แสดงความแปรปรวนสูงเหมือนในกลุ่มอาคารเตี้ย



ภาพที่ 4.29 การเคลื่อนตัวที่ฐานสัมพันธ์กับค่าที่ยอดกับความสูงของอาคาร

โดยรวมแล้ว การนำข้อมูลใหม่มาเพิ่มทำให้ฐานข้อมูลเดิมมีความสมบูรณ์และครอบคลุมมากขึ้น โดยเฉพาะในกลุ่มอาคารสูงที่ขาดข้อมูลมาก่อน การเห็นแนวโน้มของค่าการเคลื่อนตัวที่ฐานที่ลดลงตามความสูงอย่างชัดเจน ช่วยยืนยันว่าพฤติกรรมการสั่นของอาคารมีความสัมพันธ์กับสภาพฐานรากและระดับความสูงของโครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญ และทำให้การนำไปใช้ในการประเมินหรือออกแบบอาคารในพื้นที่ที่มีสภาพฐานรากแตกต่างกันสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้ยิ่งขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อปรับปรุงและเพิ่มฐานข้อมูลค่าคาบธรรมชาติ (Natural Period) ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย โดยเน้นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติในหลายโหมด ได้แก่ โหมดพื้นฐาน (Fundamental Mode) โหมดสูง (Higher Modes) และโหมดการบิด (Torsional Mode) กับลักษณะทางกายภาพของอาคาร เช่น ความสูง เป็นต้น เพื่อสนับสนุนการพัฒนาสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติที่มีความแม่นยำและสอดคล้องกับอาคารในประเทศไทยได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและประเมินสมรรถนะอาคารต้านทานแผ่นดินไหวในอนาคต

การศึกษานี้ได้รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลจากอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 112 อาคาร ช่วงความสูงตั้งแต่ 8.5 ถึง 242.4 เมตร ในเขตกรุงเทพมหานคร ปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และเชียงราย ซึ่งมีทั้งอาคารสูงและอาคารเตี้ยหลากหลายประเภท เช่น อาคารสำนักงาน อาคารพักอาศัย โรงแรม โรงพยาบาล และอาคารสถานศึกษา โดยดำเนินการตรวจวัดการสั่นสะเทือนภายใต้แรงกระทำจากสภาพแวดล้อม ข้อมูลรูปแบบพิสัยเวลาที่ Sampling Rate 200 Hz เป็นระยะเวลาประมาณ 20-30 นาที ต่ออาคาร จากนั้นได้นำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ ได้แก่ ค่าคาบธรรมชาติ ความถี่ธรรมชาติ อัตราส่วนความหน่วง และรูปร่างการสั่น ด้วยเทคนิค Stochastic Subspace Identification (SSI) รวมถึงเปรียบเทียบผลลัพธ์ค่าคาบธรรมชาติกับวิธี Fast Fourier Transform (FFT) เพื่อยืนยันความถูกต้อง ผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

1. ค่าคาบธรรมชาติมีความสัมพันธ์เชิงกำลังกับความสูงของอาคาร โดยเฉพาะโหมดที่ 1 ซึ่งมีค่าสหสัมพันธ์สูงที่สุด, $R^2 \approx 0.9164$ และสามารถสร้างสมการเชิงประจักษ์สำหรับโหมดที่ 1, 2 และ 3 ได้อย่างแม่นยำ
2. ค่าอัตราส่วนความหน่วงเฉลี่ยของโหมดที่ 1 ประมาณ 0.5-1.5% โดยอาคารเตี้ยมักมีค่าความหน่วงสูงกว่าอาคารสูง และพบความแปรผันตามทิศทางและลักษณะของโครงสร้าง
3. พบรูปร่างการสั่นในทิศทาง X, Y และการหมุนรอบแกนตั้ง (Rotation) อย่างชัดเจน โดยโหมดที่สูงขึ้นมีความซับซ้อนมากขึ้น และแสดงลักษณะโค้งตัวหลายทิศทาง โดยเฉพาะในอาคารสูง

4. พบโหมดการบิดในอาคารหลายหลัง ทั้งอาคารเตี้ยและอาคารสูง โดยเฉพาะในกรณีที่มีรูปทรงอาคารหรือการกระจายมวลและความแข็งไม่สมดุล
5. RSI ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับ SSI อย่างมากในโหมดที่ 1 และ 2 แม้ในโหมดที่ 3 จะเริ่มมีความแปรปรวนในบางช่วง แต่ RSI แสดงข้อดีที่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าคาบธรรมชาติในพิสัยเวลาได้ จึงมีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้กับระบบติดตามสุขภาพโครงสร้างแบบต่อเนื่อง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี FFT ซึ่งเป็นเทคนิคแบบความถี่พบว่าแม้ FFT จะให้ภาพรวมของพลังงานสัญญาณในแต่ละความถี่ได้รวดเร็ว แต่มีข้อจำกัดในการแยกโหมดการสั่นโดยเฉพาะในกรณีที่มีโหมดใกล้เคียงกัน และไม่สามารถให้ข้อมูลด้านอัตราส่วนความหน่วง หรือ รูปร่างการสั่นได้ อย่างชัดเจน ขณะที่ SSI และ RSI สามารถแยกโหมดได้อย่างแม่นยำแม้ในกรณีที่มีโหมดใกล้เคียงกัน และให้ข้อมูลครบทั้งในด้านคาบธรรมชาติ ความหน่วง และรูปแบบการสั่น
6. เมื่อเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลจากงานวิจัยก่อนหน้า ฐานข้อมูลใหม่ที่ได้จากงานวิจัยนี้มีความหลากหลายมากกว่า ทั้งในด้านช่วงความสูงของอาคาร ชนิดของพฤติกรรมโครงสร้าง (รวมถึงโหมดการบิด) และแหล่งข้อมูล ทำให้สามารถประมาณค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างได้ครอบคลุม และสะท้อนสภาพอาคารในประเทศไทยได้แม่นยำได้มากกว่า
7. การเคลื่อนตัวที่ฐานของอาคารพบว่า อาคารเตี้ยมีแนวโน้มการเคลื่อนตัวที่ฐานสูงกว่าอาคารสูงอย่างชัดเจน ซึ่งสัมพันธ์กับสภาพฐานรากและความแข็งของโครงสร้าง เมื่อเพิ่มข้อมูลอาคารสูงจากงานวิจัยนี้ พบว่าการเคลื่อนตัวที่ฐานของอาคารสูงอยู่ในระดับต่ำมากและมีความแปรปรวนต่ำ สะท้อนถึงพฤติกรรมที่มั่นคงและเสถียรของอาคารในกลุ่มนี้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากจากผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้ สามารถนำเสนอข้อเสนอแนะเพื่อใช้ในการพัฒนาทั้งองค์ความรู้และแนวทางการประยุกต์ใช้จริงในงานวิศวกรรมโครงสร้างได้อย่างครอบคลุม โดยเฉพาะในประเด็นการศึกษาค่าคาบธรรมชาติของอาคารซึ่งพบว่า ความสูงเพียงอย่างเดียวไม่ใช่ตัวแปรที่สามารถอธิบายพฤติกรรมการสั่นของอาคารได้ทั้งหมด ยังมีปัจจัยสำคัญอื่นที่ควรได้รับการพิจารณา ร่วม ได้แก่ ขนาด ความกว้าง ความยาว รูปทรงเรขาคณิต การกระจายมวล และโมเมนต์ความเฉื่อย

ของโครงสร้าง ซึ่งอาจส่งผลต่อค่าคาบธรรมชาติในลักษณะที่แตกต่างกัน การวิจัยในอนาคตจึงควรมีการเก็บรวบรวมข้อมูลเหล่านี้อย่างเป็นระบบ และนำมาวิเคราะห์ร่วมกันเพื่อพัฒนาสมการเชิงประจักษ์หรือแบบจำลองเชิงพลศาสตร์ที่มีความแม่นยำยิ่งขึ้น ในขณะเดียวกัน ควรให้ความสำคัญกับการวิเคราะห์โหมดที่สูงขึ้นและโหมดการบิดของอาคาร เนื่องจากจากการศึกษานี้พบว่า แม้สามารถวิเคราะห์ได้ แต่ค่าความสอดคล้องเชิงสถิติยังอยู่ในระดับที่ไม่สูงนัก ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความไม่ชัดเจนของสัญญาณ หรือพฤติกรรมโครงสร้างที่ซับซ้อนยิ่งขึ้นในโหมดเหล่านั้น การวิจัยเพิ่มเติมจึงควรมุ่งเน้นที่การพัฒนาเทคนิคการแยกโหมด หรือเพิ่มความละเอียดของการวัด เพื่อให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมของอาคารในสถานะที่ซับซ้อนได้ดีขึ้น ทั้งนี้ยังควรส่งเสริมให้มีการตรวจวัดข้อมูลจริงในอาคารหลากหลายรูปแบบ โดยเฉพาะในพื้นที่ภูมิภาคอื่น ๆ ของประเทศที่ยังขาดข้อมูล เช่น ภาคใต้ หรือภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เพื่อสร้างฐานข้อมูลที่ครอบคลุมและสะท้อนความหลากหลายของโครงสร้างในประเทศไทย



รายการอ้างอิง

- Goel, R. K., & Chopra, A. K. (1997). Period formulas for moment-resisting frame buildings. *Journal of Structural Engineering*, 123(11), 1454–1461.
- Goel, R. K., & Chopra, A. K. (1997). Period formulas for moment-resisting frame buildings. *Journal of Structural Engineering*, 123(11), 1454–1461.
- Lee, L. H., Chang, K. K., & Chun, Y. S. (2000). Experimental formula for the fundamental period of RC buildings with shear-wall dominant systems. *The Structural Design of Tall Buildings*, 9(4), 295–307.
- Kwon, O. S., & Kim, E. S. (2010). Evaluation of building period formulas for seismic design. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 39(14), 1569–1583.
- นคร ภู่วโรตม. (2553). คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารและคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดิน เพื่อการแบ่งเขตความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียดในจังหวัดเชียงใหม่: รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม.
- Murat, P., Naci, C., Zehra Sule, G., Cihan, B., & Hakan, O. (2011, May). *A new formulation for the fundamental period of reinforced concrete planar shear walls*. Paper presented at the International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering (BCCCE), Epoka University, Albania. Retrieved from <http://dspace.epoka.edu.al/bitstream/handle/1/858/363-1568-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ha, T., Shin, S.-H., & Kim, H. (2020). Damping and natural period evaluation of tall RC buildings using full-scale data in Korea. *Applied Sciences*, 10(5), 1568.
- Inel, M., Ozmen, H. B., & Cayci, B. T. (2019). Determination of period of RC buildings by the ambient vibration method. *Advances in Civil Engineering*, Article ID 1213078, 10 pages.
- Hatzigeorgiou, G. D., & Kanapitsas, G. (2013). Evaluation of fundamental period of low-rise and mid-rise reinforced concrete buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(11), 1599–1616.
- Zengin, B. (2021). Evaluation of the period and soft story conditions of reinforced concrete buildings with and without infill walls. *CHALLENGE*, 7(3), 151–161.

- เกรียงไกร ไชยเย็น. (2565). การระบุคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างจากผลการตอบสนองการสั่นไหวจากธรรมชาติ (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต) .มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. (2552). มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1302).
- กระทรวงมหาดไทย. (2564). กฎกระทรวงกำหนดการรับน้ำหนักความต้านทานความคงทนของอาคารและพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านทานแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว พ.ศ. 2564.
- Carlo Rainieri, & Giovanni Fabbrocino. (2014). *Operational modal analysis of civil engineering structures*. Springer.
- นคร ภู่วโรดม, เป็นหนึ่ง วานิชชัย, อธิวัฒน์ อรรถธรรมรัตน์, และ อมรเทพ จิรศักดิ์จารุญศรี. (2567). การปรับปรุงข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารและการพัฒนาระบบตรวจสอบสมรรถนะของโครงสร้างแบบระยะยาว. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ศูนย์วิจัยสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ

นภสร สมะตะ

วุฒิการศึกษา

ปีการศึกษา 2566: วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผลงานทางวิชาการ

Samata, N., et al. (2025). Improvement of the database of natural periods for reinforced concrete buildings in Thailand. In Proceedings of the 30th National Convention on Civil Engineering, 1-7.

