

การปรับปรุงฐานข้อมูลค่าคาบธรรมชาติของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย Improvement of the Database of Natural Periods for Reinforced Concrete Buildings in Thailand

นภสร สมะตะ¹ นคร ภู่วโรดม² Kyawt Tin Zar Ko³ ภัคพงษ์ ลิขิตสุวรรณ⁴ อรอนงค์ ลายคำ⁵ และ อมรเทพ จิรศักดิ์จำรูญศรี⁶

^{1,2,3,4,5} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี

⁶ ภาควิชาเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี

*Corresponding author; E-mail address: napasorm-few@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงฐานข้อมูลค่าคาบธรรมชาติของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย โดยเน้นศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติของโหมดการสั่นไหวพื้นฐานและโหมดที่สูงขึ้น กับความสูงของอาคารที่แตกต่างกัน ศึกษาอาคารในกรุงเทพมหานคร ปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และเชียงราย พร้อมวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Stochastic Subspace Identification เพื่อระบุค่าคาบธรรมชาติในหลายโหมด รวมถึงโหมดการบิด (torsional mode) ซึ่งมีประเด็นหลักที่ปรับปรุงคือ (1) การเพิ่มจำนวนของผลค่าคาบธรรมชาติ โดยเฉพาะกับกลุ่มอาคารที่สูงไม่เกิน 5 ชั้น (2) การใช้เทคนิคการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ขั้นสูง โดยวิธี Stochastic Subspace Identification (SSI) ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพและแม่นยำสูง ทำให้ได้ค่าคาบธรรมชาติสำหรับโหมดลำดับที่สูงขึ้นด้วย และ (3) การวิเคราะห์หาค่าคาบธรรมชาติของการสั่นในโหมดบิดตัวของอาคาร ผลการศึกษาแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ของค่าคาบกับคุณสมบัติทางกายภาพของอาคารและเปรียบเทียบกับผลการศึกษาที่ดำเนินการในอดีต

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ค่าคาบธรรมชาติมีความสัมพันธ์เชิงกำลังกับความสูงอาคาร โดยโหมดพื้นฐานมีค่าสหสัมพันธ์ที่สูงที่สุด R^2 เท่ากับ 0.9162 และสามารถเสนอสมการใหม่สำหรับการประเมินค่าคาบธรรมชาติในโหมดต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ การเพิ่มข้อมูลจากอาคารเดี่ยวยังช่วยให้ฐานข้อมูลมีความหลากหลายมากขึ้น และสะท้อนพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของอาคารได้ดียิ่งขึ้น บทความนี้จึงสามารถปิดช่องว่างจากงานวิจัยเดิม และเป็นประโยชน์ต่อการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบในอนาคต

คำสำคัญ: แผ่นดินไหว, ค่าคาบธรรมชาติ, คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์, อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

Abstract

This study aims to improve the database of natural periods for reinforced concrete buildings in Thailand by investigating the relationship between natural periods across multiple vibration

modes and the building height. A total of 112 buildings located in Bangkok, its metropolitan area, Chiang Mai, and Chiang Rai were analyzed based on ambient vibration measurements. The dynamic properties were extracted using the Stochastic Subspace Identification (SSI) technique, which enables accurate identification of not only fundamental modes but also higher-order and torsional vibration modes—an aspect rarely addressed in previous research.

The analysis revealed a power-law relationship between the natural period and building height, with the first vibration mode showing the highest correlation ($R^2 = 0.9162$). Regression equations for the first three vibration modes were developed, providing refined estimations for use in seismic design. Additionally, the inclusion of low-rise building data helped expand the range and balance of the database, enhancing its applicability. This research helps fill the knowledge gap in existing studies and contributes toward future updates of national seismic design standards.

Keywords: seismic design, natural period, dynamic properties, reinforced concrete buildings

1. บทนำ

การออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างที่ต้องรับแรงพลศาสตร์ เช่น แรงแผ่นดินไหวและแรงลมจำเป็นต้องอาศัยค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ เช่น ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) หรือค่าคาบธรรมชาติ (natural period) และอัตราส่วนความหน่วง (damping ratio) เพื่อให้สามารถประเมินพฤติกรรมการสั่นสะเทือนของอาคารได้อย่างถูกต้อง ในปัจจุบันสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่ใช้ในมาตรฐานการออกแบบอาคารด้านทานแผ่นดินไหวของประเทศไทย พัฒนาขึ้นจากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติโดยใช้ความสูงของอาคารเป็นตัวแปรหลัก ซึ่งอาจยังไม่ครอบคลุมถึงปัจจัยทางกายภาพอื่น ๆ ที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

ในประเทศไทยได้มีการพัฒนาสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติโดยอาศัยข้อมูลจากการตรวจวัดการสั่นสะเทือนของอาคารจริง (Ambient Vibration Measurement) และวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสถิติผ่านวิธีการวิเคราะห์ถดถอย (Regression analysis) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตยังมีข้อจำกัดในด้านความครอบคลุมของข้อมูลอาคารที่ต่ำกว่า 5 ชั้น หรืออาคารเดี่ยว และการพิจารณาโหมดการสั่นลำดับสูง รวมถึงโหมดการบิด การศึกษาครั้งนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงข้อมูลค่าคาบธรรมชาติของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย โดยใช้วิธี Stochastic Subspace Identification (SSI) ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติในโหมดลำดับสูงและการบิดตัวของอาคารได้อย่างแม่นยำ

การศึกษาในครั้งนี้อาศัยข้อมูลจากการตรวจวัดการสั่นสะเทือนของอาคารจำนวนทั้งสิ้น 112 หลัง ครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพมหานคร ปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัดเชียงราย โดยเพิ่มข้อมูลอาคารที่มีความสูงไม่เกิน 5 ชั้น เพื่อให้ข้อมูลดังกล่าวมีความสมมูลมากยิ่งขึ้นระหว่างกลุ่มอาคารเดี่ยวและอาคารสูง ข้อมูลการตรวจวัดดังกล่าวได้จากโครงการวิจัยระดับชาติ เรื่อง “การปรับปรุงข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารและการพัฒนาระบบตรวจสอบสมรรถนะของโครงสร้างแบบระยะยาว” งานวิจัยนี้เป็นส่วนช่วยในการปรับปรุงและขยายฐานข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารในประเทศไทยเพื่อสนับสนุนการพัฒนาสูตรประมาณค่าคาบธรรมชาติของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในประเทศไทย ซึ่งงานวิจัยในอดีตมักให้ความสำคัญกับอาคารสูงเป็นหลัก และใช้วิธีการวิเคราะห์พื้นฐานที่ไม่สามารถแยกโหมดการสั่นลำดับสูงได้ ส่งผลให้ฐานข้อมูลที่ใช้พัฒนาสูตรมีความไม่สมดุลในเชิงตัวอย่างและความซับซ้อนของพฤติกรรมโครงสร้าง งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การเติมเต็มช่องว่างดังกล่าว ด้วยการใช้เทคนิค SSI ซึ่งสามารถวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติได้หลายโหมด ทั้งในแนวแกนราบและการบิดตัว พร้อมทั้งขยายฐานข้อมูลด้วยการเพิ่มอาคารเดี่ยวเข้ามาศึกษา โดยเฉพาะนอกจากนี้ บทความนี้ยังเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับงานวิจัยก่อนหน้า เพื่อแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่เปลี่ยนแปลงเมื่อฐานข้อมูลมีความหลากหลายมากขึ้น ช่วยสะท้อนถึงความจำเป็นในการปรับปรุงสูตรที่ใช้ในการออกแบบ และเสนอสมการเชิงสถิติใหม่ที่สามารถใช้อ้างอิงในการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวในบริบทประเทศไทยได้แม่นยำยิ่งขึ้น

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเก็บข้อมูลและการตรวจวัดอาคาร

การตรวจวัดการสั่นสะเทือนของอาคารถือเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารพฤติกรรมการสั่นของโครงสร้าง เพื่อให้สามารถเข้าใจผลกระทบจากแรงกระทำต่างๆ ที่ส่งผลต่อความมั่นคงและสมรรถนะของอาคารในระยะยาว ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษานี้ได้มาจากโครงการวิจัยเรื่อง “การปรับปรุงข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร และการพัฒนาระบบตรวจสอบสมรรถนะของโครงสร้างแบบระยะยาว” การนำข้อมูลจากโครงการดังกล่าวมาวิเคราะห์เพื่อศึกษาและประเมินคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร การตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนในสภาพแวดล้อมธรรมชาติ เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย

โดยอาศัยแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติภายในและภายนอกอาคาร เช่น แรงลม การเคลื่อนไหวของยานพาหนะ และกิจกรรมของผู้ใช้อาคาร เป็นต้น โดยวิธีดังกล่าวสามารถให้ข้อมูลค่าคาบธรรมชาติ (Natural Period), อัตราส่วนความหน่วง (Damping Ratio), และรูปแบบการสั่นของอาคาร (Mode Shapes) ของโครงสร้างอาคารขนาดตัวอักษรและการเว้นระยะ

2.2 การประมวลผลข้อมูลและการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์

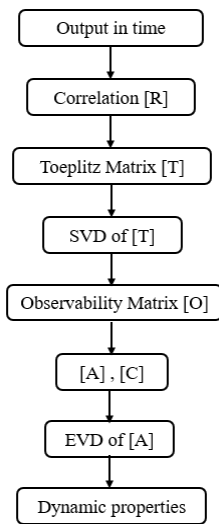
ข้อมูลการสั่นสะเทือนที่ได้จากการตรวจวัดภาคสนามถูกนำมาประมวลผลเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร ด้วยวิธี SSI ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รับจากการตรวจวัดได้อย่างแม่นยำ อีกทั้งแยกแยะโหมดการสั่นและสามารถระบุค่าคาบธรรมชาติของโหมดลำดับสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากเป็นวิธีวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้แรงกระทำจากสิ่งแวดล้อม และไม่จำเป็นต้องทราบขนาดของแรงที่กระทำต่ออาคารโดยตรง

2.2.1 กระบวนการวิเคราะห์โดย วิธี Stochastic Subspace Identification (SSI)

วิธี SSI เป็นรูปแบบหนึ่งของทฤษฎีการระบุลักษณะของระบบ (System Identification Theory) ช่วยในการประมาณ ค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารจากแหล่งกำเนิดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เนื่องจากโครงสร้างเป็นระบบเชิงเส้นที่มีพฤติกรรมแบบสุ่ม วิธีดังกล่าวจึงใช้หลักการของการวิเคราะห์เวกเตอร์สถานะ (State-Space Analysis) ซึ่งอาศัยข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองเชิงสถานะของระบบ และจำแนกค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง โดยมีกระบวนการที่สำคัญในการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ ดังนี้

- 1) การจัดเตรียมข้อมูลสำหรับการตรวจวัดในทิศทาง x , y และ การบิด (Torsion) ซึ่งการวิเคราะห์การบิดตัวของอาคารอาศัยสัญญาณการสั่นในทิศทาง x , y ร่วมกับตำแหน่งของเซนเซอร์
- 2) การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร ด้วยวิธี SSI เพื่อระบุค่าความถี่ธรรมชาติ
- 3) วิเคราะห์แผนภาพเสถียร (Stabilization Diagram) เพื่อระบุโหมดความถี่ที่แท้จริงของโครงสร้างแสดงผลลัพธ์

การวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติด้วยวิธีดังกล่าว ไม่จำเป็นต้องใช้แรงกระทำภายนอก เช่น เครื่องกระตุ้นการสั่นหรือแรงแผ่นดินไหว และสามารถระบุโหมดการสั่นลำดับสูงของโครงสร้างจากข้อมูลที่ตรวจวัดจริง อีกทั้งมีความสามารถในการกรองสัญญาณรบกวนและแยกแยะพฤติกรรมการสั่นที่เกิดจากโครงสร้างจริงออกจากผลกระทบที่เกิดจากข้อผิดพลาดของเครื่องมือวัด โดยมีขั้นตอนการคำนวณเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติดังแสดงใน รูปที่ 1 เริ่มต้นจากข้อมูลการสั่นสะเทือนในพิสัยเวลา (Time Domain) นำมาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของข้อมูล และสร้างเมทริกซ์ในรูปแบบ Toeplitz หรือ Hankel Matrix จากนั้นใช้วิธี Singular Value Decomposition เพื่อนำไปสร้าง Observability Matrix และคำนวณคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร



รูปที่ 1 ขั้นตอนการคำนวณเพื่อหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์

2.2.2 สูตรการประมาณค่าคาบธรรมชาติอาคารสำหรับการออกแบบ ต้านทานแรงแผ่นดินไหว

สมการการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่เหมาะสมตามมาตรฐานการ
ออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว มยผ.
1301/1302-01 มีการเสนอสูตรคาบธรรมชาติที่ใช้ออกแบบอาคาร
ต้านทานแรงแผ่นดินไหว ดังสมการ 1 ซึ่งมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องความสูง
ของอาคารเป็นหลัก โดยสามารถเขียนเป็นสูตรสมการประมาณค่าคาบ
ธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับความสูงของอาคารในรูปทั่วไป ได้ดังสมการที่ 2

$$T = 0.02H \quad (1)$$

$$T = \alpha H^\beta \quad (2)$$

โดย α และ β คือ ค่าคงที่ซึ่งคำนวณได้จากการวิเคราะห์การถดถอย
(Regression Analysis) สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบสมการเส้นตรง ได้
ดังสมการที่ 3

$$y = a + \beta x \quad (3)$$

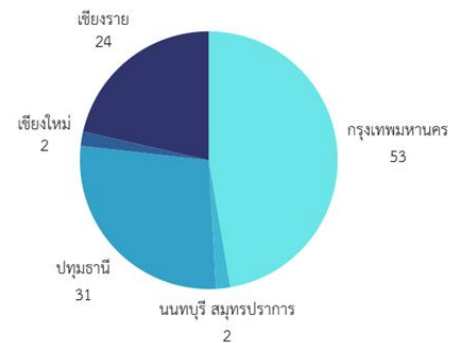
โดยที่ $y = \log(T)$, $a = \log(\alpha)$ และ $x = \log(H)$

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

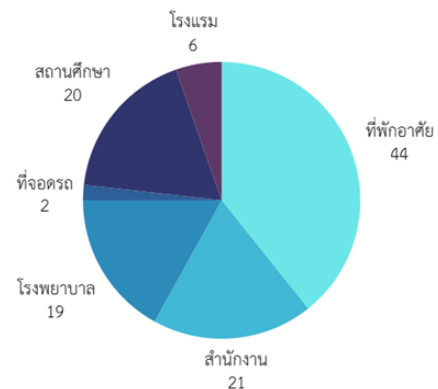
3.1 ข้อมูลอาคารที่ศึกษา

การศึกษาใช้ข้อมูลจากอาคาร 112 หลัง ตั้งอยู่ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร
และปริมณฑล จังหวัดเชียงใหม่ และจังหวัดเชียงราย ซึ่งแต่ละพื้นที่มี
ลักษณะทางกายภาพและสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน เช่น กรุงเทพมหานคร
มีการกระจายตัวของมวลอาคารแน่นหนา ส่วนจังหวัดเชียงรายและเชียงใหม่

มีภูมิประเทศเป็นภูเขาและระดับความสูงของพื้นดินต่างกัน ส่งผลต่อแรงสั่น
และการสะท้อนของคลื่นแผ่นดินไหว ซึ่งอาจมีผลต่อพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์
ของอาคาร อาคารที่ใช้ในการศึกษาแบ่งเป็นหลายประเภท ได้แก่ อาคาร
สำนักงาน อาคารพักอาศัย อาคารการศึกษา และโรงพยาบาล โดยมีความสูง
ตั้งแต่ 8.50 เมตร (ประมาณ 2-3 ชั้น) ถึง 242.4 เมตร (มากกว่า 60 ชั้น) ซึ่ง
ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบพฤติกรรมการสั่นในอาคารเตี้ยและสูงได้
ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น



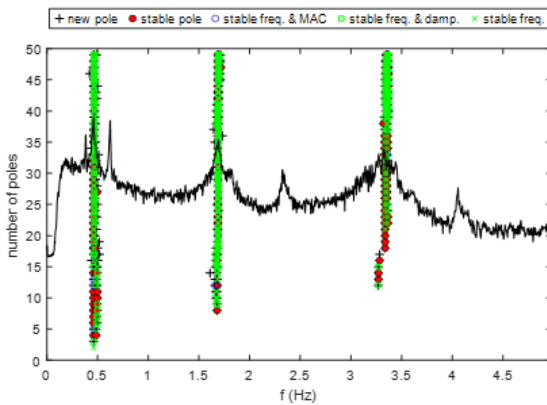
รูปที่ 2 ตำแหน่งที่ตั้งของอาคารที่ศึกษา



รูปที่ 3 ประเภทการใช้สอยของอาคารที่ศึกษา

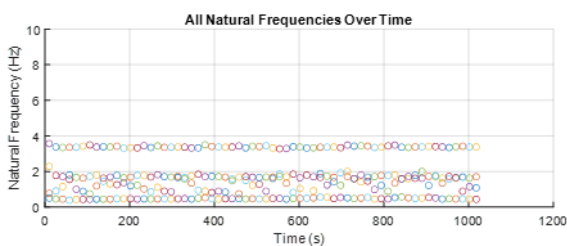
3.2 การวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติ

การวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติของอาคารในงานวิจัยนี้ดำเนินการโดยการ
ประมวลผลข้อมูลการสั่นสะเทือนที่ได้รับจากเซนเซอร์วัดความเร่งหรือ
ความเร็ว เพื่อระบุค่าคาบธรรมชาติของโครงสร้าง ด้วยวิธี SSI ในการ
วิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติของอาคารจากข้อมูลการตรวจวัด วิธี ดังกล่าวถูก
นำมาใช้เพื่อการแยกโหมดการสั่น ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ คือ
แผนภาพเสถียร โดยแสดงให้เห็นถึงความเสถียรของค่าที่ตรวจพบในแต่ละ
ช่วงความถี่ และช่วยในการเลือกค่าความถี่ ดังรูปที่ 4 แสดงตัวอย่างผลการ
วิเคราะห์จากอาคารหนึ่งหลัง



รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารด้วยวิธี SSI

รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างแผนภาพเสถียรที่ได้จากวิธี SSI ซึ่งใช้สำหรับระบุค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารตัวอย่างหลังหนึ่ง พบว่าค่าความถี่ธรรมชาติที่มีความเสถียร หรือมีการรวมกลุ่มของโพล (Poles) ที่คงที่ในแนวตั้ง ได้แก่ 0.4608, 1.6894 และ 3.3264 Hz ซึ่งสามารถระบุได้ว่าเป็นค่าความถี่ธรรมชาติที่แท้จริงของอาคารหลังดังกล่าว นอกจากนี้ ความแม่นยำในการระบุค่าความถี่ธรรมชาติสามารถเพิ่มขึ้นโดยอาศัยวิธี Recursive Subspace Identification (RSI) ในการระบุความถี่ในโดเมนเวลา แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งเป็นการประยุกต์วิธี Recursive Subspace Identification (RSI) เพื่อวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนเวลา อีกทั้งยังช่วยกรองสัญญาณรบกวนและยืนยันค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จาก SSI ทำให้ผลลัพธ์มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในการวิเคราะห์อาคารที่มีโหมดสั่นซับซ้อน

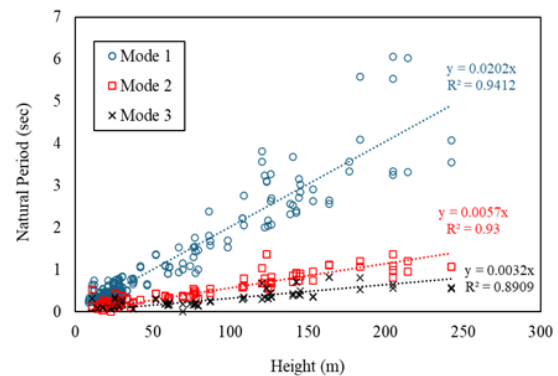


รูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารด้วยวิธี RSI

3.3 ผลการวิเคราะห์เชิงถดถอยค่าคาบธรรมชาติของอาคาร

ผลการวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติของอาคารในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล รวมถึงจังหวัดเชียงใหม่และจังหวัดเชียงราย ด้วยวิธี SSI จำนวน 3 โหมดเปรียบเทียบกับความสูงของอาคาร แสดงในรูปที่ 6 พบว่าค่าคาบธรรมชาติทั้งสามโหมดมีแนวโน้มความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น อย่างไรก็ตาม ความชันของกราฟในแต่ละโหมดมีค่าต่างกัน โดยโหมดที่ 1 ซึ่งเป็นโหมดหลัก มีคาบธรรมชาติเพิ่มขึ้นตามความสูงอย่างชัดเจน แสดงว่าอาคารที่สูงหรืออาคารที่สูงกว่า 23 เมตร จะมีการสั่นที่ช้ากว่าอาคารเตี้ยหรืออาคารที่

สูงน้อยกว่า 23 เมตร โหมดที่ 2 และโหมดที่ 3 แสดงค่าคาบที่ลดลง ค่าสหสัมพันธ์ความสัมพันธ์ของทั้งสามโหมดอยู่ในเกณฑ์ที่ดีในรูปแบบเชิงเส้น แสดงให้เห็นว่าคาบธรรมชาติสามารถประมาณได้จากความสูงของอาคาร เมื่อพิจารณาอัตราส่วนค่าความชันจากสมการเชิงเส้นของโหมดที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 0.02, 0.0057 และ 0.0032 ตามลำดับ พบว่าโหมดที่ 1 มีค่าคาบธรรมชาติมากกว่าโหมดที่ 2 และโหมดที่ 3 ประมาณ 3.5 และ 6 เท่า โดยรวมแล้วแนวโน้มของกราฟในแต่ละโหมดแสดงถึงลักษณะการตอบสนองทางพลศาสตร์ของอาคารที่เปลี่ยนไปตามความสูง



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างคาบธรรมชาติและความสูงอาคารทั้งสามโหมด

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูล ความสัมพันธ์ระหว่างคาบธรรมชาติและความสูงอาคารทั้งสามโหมด สามารถเขียนสูตรสมการประมาณค่าคาบธรรมชาติที่เกี่ยวข้องกับความสูงของอาคารในรูปแบบของโหมดที่ 1 2 และ 3 จากสมการที่ 2 ได้ดังสมการที่ 4 5 และ 6 ตามลำดับ ดังนี้

$$T = \frac{H}{50} \quad (4)$$

$$T = \frac{H}{175} \quad (5)$$

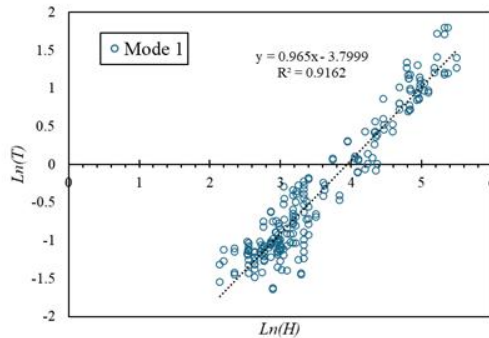
$$T = \frac{H}{313} \quad (6)$$

เพื่อให้เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติกับลักษณะทางกายภาพของอาคาร งานวิจัยนี้ดำเนินการวิเคราะห์เชิงถดถอย โดยใช้ความสูงของอาคารเป็นตัวแปรอิสระหลัก เนื่องจากเป็นปัจจัยทางกายภาพที่สามารถประเมินได้ง่าย และมีผลโดยตรงต่อค่าคาบธรรมชาติของอาคาร โดยการวิเคราะห์นี้ใช้การแปลงค่าคาบธรรมชาติ (T) และความสูง (H) ของอาคารให้อยู่ในรูปลอการิทึม

รูปที่ 7 แสดงผลการวิเคราะห์เชิงถดถอยระหว่างค่าคาบธรรมชาติและความสูงของอาคารในรูปลอการิทึมสำหรับโหมดที่ 1 เขียนสมการเชิงเส้นกลับในรูปทั่วไปจะได้ดังสมการที่ 7

$$T = 0.0224H^{0.965} \quad (7)$$

พบว่าค่าคาบธรรมชาติเพิ่มขึ้นตามความสูงของอาคารในอัตราใกล้เคียงเชิงเส้น เนื่องจากเลขชี้กำลังมีค่าใกล้เคียง 1 แต่ยังคงอยู่ในรูปแบบของความสัมพันธ์เชิงกำลัง นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์, α มีค่าเท่ากับ 0.0224 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์ตาม มยผ. 1301/1302-61 ที่มีค่าเท่ากับ 0.02

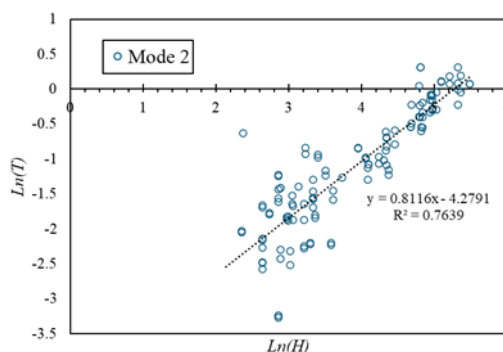


รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์เชิงถดถอยของค่าคาบธรรมชาติและความสูงของอาคาร
โหมดที่ 1

ผลการวิเคราะห์เชิงถดถอยของค่าคาบธรรมชาติและความสูงของอาคารในโหมดที่ 2 ซึ่งแสดงในรูปที่ 8 พบว่าแนวโน้มคาบธรรมชาติของโหมดที่ 2 เพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของอาคารเพิ่มขึ้น แต่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่าโหมดที่ 1 เมื่อเขียนสมการเชิงเส้นกลับในรูปทั่วไปจะได้ดังสมการที่ 8

$$T = 0.0139H^{0.8116} \quad (8)$$

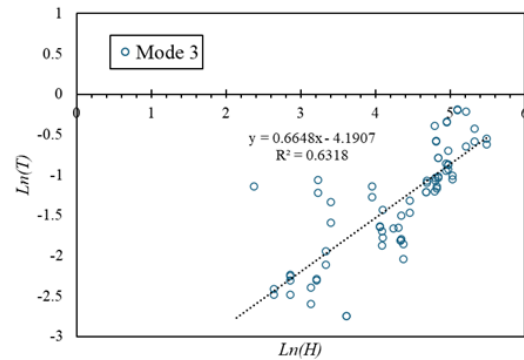
พบว่าค่าคาบธรรมชาติเพิ่มขึ้นตามความสูงของอาคารในอัตราใกล้เคียงเชิงเส้น เนื่องจากเลขชี้กำลังมีค่าใกล้เคียง 1 แต่ยังคงอยู่ในรูปแบบของความสัมพันธ์เชิงกำลัง และค่าสัมประสิทธิ์, α มีค่าเท่ากับ 0.0139



รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์เชิงถดถอยของค่าคาบธรรมชาติและความสูงของอาคาร
โหมดที่ 2

ผลการวิเคราะห์เชิงถดถอยของค่าคาบธรรมชาติและความสูงของอาคารในโหมดที่ 3 ซึ่งแสดงในรูปที่ 9 พบว่าแนวโน้มคาบธรรมชาติของโหมดที่ 3 เขียนสมการเชิงเส้นกลับในรูปทั่วไปจะได้ดังสมการที่ 9

$$T = 0.0151H^{0.6648} \quad (9)$$

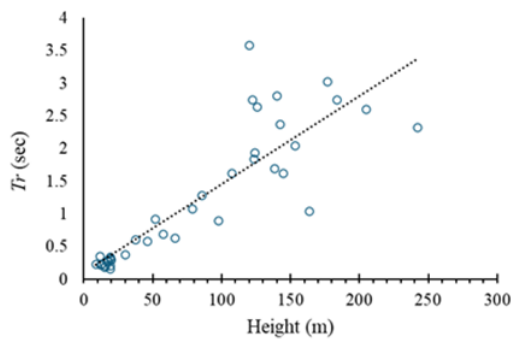


รูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์เชิงถดถอยของค่าคาบธรรมชาติและความสูงของอาคาร
โหมดที่ 3

พบว่าค่าคาบธรรมชาติเพิ่มขึ้นตามความสูงของอาคารในอัตราใกล้เคียงเชิงเส้น เนื่องจากเลขชี้กำลังมีค่าใกล้เคียง 1 แต่ยังคงอยู่ในรูปแบบของความสัมพันธ์เชิงกำลัง และค่าสัมประสิทธิ์, α มีค่าเท่ากับ 0.0139

จากการวิเคราะห์เชิงถดถอยระหว่างค่าคาบธรรมชาติและความสูงของอาคารทั้งสามโหมด พบแนวโน้มที่สอดคล้องกันว่า ความสัมพันธ์ระหว่างคาบธรรมชาติและความสูงสามารถอธิบายได้ด้วยสมการกำลัง โดยโหมดที่หนึ่งมีความสัมพันธ์มากที่สุด รองลงมาคือโหมดที่สองและสามตามลำดับ การเปรียบเทียบแนวโน้มนี้บ่งชี้ให้เห็นข้อจำกัดของการใช้ความสูงเพียงอย่างเดียวในการประมาณค่าคาบธรรมชาติของโหมดที่สูง

ผลการวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติในทิศทางบิดของอาคาร (Torsional Mode) เป็นลักษณะการสั่นที่แตกต่างจากโหมดการสั่นในแนวราบตามแกน x และ y เนื่องจากเกิดจากแรงบิดรอบแกนตั้งฉากกับพื้นอาคาร พฤติกรรมการสั่นในลักษณะนี้มักเกิดขึ้นในอาคารที่ไม่สมมาตรทั้งด้านรูปทรง ความแข็ง หรือการกระจายตัวของมวล ในที่นี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติในทิศทางบิดกับความสูงของอาคาร เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มของพฤติกรรมการสั่นในโหมดนี้

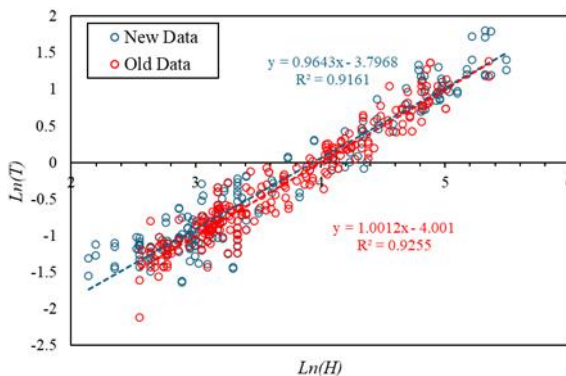


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติของการสั่นในทิศทางบิดกับความสูงของอาคาร

รูปที่ 11 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบธรรมชาติของการสั่นในทิศทางบิด (T_r) กับความสูงของอาคาร จะเห็นได้ว่าคาบธรรมชาติของโหมดบิดตัวของอาคารมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความสูงของอาคาร โดยอาคารสูงมีความแปรปรวนที่สูงกว่าอาคารเตี้ย

3.4 การเปรียบเทียบกับผลการศึกษาที่ดำเนินการในอดีต

จากการศึกษาค่าคาบธรรมชาติของอาคารในประเทศไทยที่ผ่านมาได้มีการดำเนินการตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพลศาสตร์กับอาคารในพื้นที่กรุงเทพมหานครและจังหวัดในภาคเหนือ ซึ่งเป็นพื้นที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหว มีความหนาแน่นของอาคารสูงรวมถึงมีโครงสร้างอาคารที่ต่างกัน อย่างไรก็ตาม งานวิจัยก่อนหน้านี้มุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติของอาคารสูงเป็นหลัก ส่งผลให้ฐานข้อมูลที่ได้ยังไม่มีความครอบคลุมเพียงพอ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงดำเนินการปรับปรุงและขยายฐานข้อมูลค่าคาบธรรมชาติให้ครอบคลุมมากขึ้น ด้วยการเพิ่มจำนวนตัวอย่างอาคารที่ใช้ในการศึกษา รวมถึงการบูรณาการข้อมูลจากการศึกษาก่อนหน้ากับข้อมูลใหม่ด้วยการเพิ่มข้อมูลสัดส่วนอาคารเตี้ย ทำให้ข้อมูลมีความครอบคลุมและมีความสมดุลระหว่างอาคารสูงและอาคารเตี้ยมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 10 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติในอดีตและปัจจุบัน

รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติของอาคารจากงานวิจัยในอดีตและงานวิจัยนี้ พบว่าแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(T)$ และ $\ln(H)$ ทั้งสองชุดข้อมูลมีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความชันและสมการเชิงเส้นที่แตกต่างกันเล็กน้อย โดยค่าความชันของข้อมูลในอดีตมีแนวโน้มสูงกว่าปัจจุบันเล็กน้อยและมีค่า R^2 ที่มากกว่าแสดงถึงงานในอดีตมีค่าความสัมพันธ์ระหว่างคาบธรรมชาติและความสูงมากกว่างานวิจัยนี้ เนื่องจากมาจากการเพิ่มเติมข้อมูลอาคารเตี้ยในชุดข้อมูลปัจจุบัน แต่ในขณะเดียวกันชุดข้อมูลปัจจุบันมีภาพรวมของข้อมูลที่ครอบคลุมมากกว่าเนื่องจากมีทั้งอาคารเตี้ยและอาคารสูง

4. บทสรุป

การศึกษานี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติของอาคารจากข้อมูลการตรวจวัดการสั่นสะเทือนจริงของอาคารจำนวนมากในหลายพื้นที่โดยอาศัยวิธี SSI ซึ่งสามารถระบุโหมดที่แท้จริงหรือค่าคาบธรรมชาติของอาคารออกจากโหมดเทียมได้ จากการวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติสามโหมดแรกของกลุ่มตัวอย่างอาคาร พบว่าโหมดที่หนึ่งมีความสัมพันธ์กับความสูงของอาคารในลักษณะเชิงเส้นในสเกลลอการิทึม โดยมีค่าสหสัมพันธ์สูงที่สุด, R^2 เท่ากับ 0.9162 แสดงให้เห็นว่าโหมดที่หนึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบกับความสูงของอาคารอย่างชัดเจน สำหรับโหมดที่สองและโหมดที่สาม ค่าคาบธรรมชาติแสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความสูงของอาคารเช่นเดียวกัน แต่มีค่า R^2 ลดลงตามลำดับ โดยเฉพาะในโหมดที่สามความสัมพันธ์ระหว่างค่าคาบกับความสูง โหมดที่ 1, 2 และ 3 มีค่าเท่ากับ 0.02, 0.0057 และ 0.0032 ตามลำดับ พบว่าโหมดที่ 1 มีค่าคาบธรรมชาติมากกว่าโหมดที่ 2 และโหมดที่ 3 ประมาณ 3.5 และ 6 เท่า มีค่า R^2 เท่ากับ 0.6318

การศึกษาค่าคาบธรรมชาติในทิศทางการบิดตัวของอาคาร (Torsional Mode) พบว่าแนวโน้มคือ ค่าคาบเพิ่มขึ้นตามความสูงของอาคาร แต่มีความกระจายตัวของข้อมูลค่อนข้างมาก โดยเฉพาะในอาคารสูง ซึ่งมีความหลากหลายในรูปแบบการออกแบบและการก่อสร้างสูง บ่งชี้ว่าความสูงของอาคารเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าคาบธรรมชาติ แต่ยังจำเป็นต้องพิจารณาองค์ประกอบทางโครงสร้างอื่น ๆ ประกอบด้วย

ในด้านการเปรียบเทียบกับผลการศึกษาค่าคาบธรรมชาติในอดีตซึ่งส่วนใหญ่มุ่งเน้นเฉพาะอาคารสูงและโหมดการสั่นพื้นฐานเพียงอย่างเดียว งานวิจัยนี้ได้เพิ่มองค์ประกอบที่สำคัญสองประการ ได้แก่ (1) การขยายฐานข้อมูลให้ครอบคลุมอาคารเตี้ย และ (2) การพิจารณาค่าคาบธรรมชาติของโหมดลำดับที่สูงขึ้นและโหมดการบิด ซึ่งในอดีตยังไม่ปรากฏอย่างชัดเจน พบว่าค่าสหสัมพันธ์ระหว่างคาบธรรมชาติกับความสูงในปัจจุบันมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอดีต โดยสมการที่ได้จากข้อมูลใหม่มีค่าความชันของเส้นเชิงเส้นลดลงเล็กน้อย นอกจากนี้ การศึกษารังนี้ยังได้เพิ่มจำนวนข้อมูลอาคารในกลุ่มที่มีความสูงไม่เกิน 5 ชั้น หรืออาคารเตี้ย ส่งผลให้ฐานข้อมูลมีความหลากหลายและครอบคลุมกลุ่มอาคารเตี้ย ซึ่งช่วยให้การวิเคราะห์ค่าคาบธรรมชาติสามารถสะท้อนพฤติกรรมโครงสร้างของกลุ่มอาคารที่ศึกษาได้ดียิ่งขึ้น

ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อค่าคาบธรรมชาติของอาคาร เช่น องค์ประกอบทางโครงสร้าง คุณสมบัติของวัสดุ ประเภทของอาคาร การกระจายน้ำหนัก และความไม่สมมาตรของอาคาร เป็นต้น หากมีการขยายขอบเขตงานศึกษาคอบคลุมพื้นที่ต่างๆ ทั่วประเทศ และเพิ่มชนิดของอาคารที่หลากหลายมากขึ้นในอนาคต จะช่วยให้ผลลัพธ์มีความแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้นรวมถึงช่วยสนับสนุนเป็นฐานข้อมูลสำหรับการปรับปรุงมาตรฐานการออกแบบอาคารของประเทศไทยในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) เลขที่ทุน N25A660680

เอกสารอ้างอิง

- [1] นคร ภู่วโรดม (2553). คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารและคุณลักษณะบริเวณที่ตั้งของชั้นดิน เพื่อการแบ่งเขตความรุนแรงของแผ่นดินไหวอย่างละเอียดในจังหวัดเชียงใหม่
- [2] เกรียงไกร ไชยเย็น, “การระบุคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างจากผลการตอบสนองการสั่นไหวจากธรรมชาติ,” (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2565)
- [3] กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย, 2552, มาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว (มยผ. 1302)

- [4] นคร ภู่วโรดม และคณะ (2567). การปรับปรุงข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร และการพัฒนาระบบตรวจสอบสมรรถนะของโครงสร้างแบบระยะยาว. รายงานวิจัย, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย, มหาวิทยาลัยมหิดล.
- [5] Goel, R. K., & Chopra, A. K. (1997). Period formulas for moment-resisting frame buildings. *Journal of Structural Engineering*, 123(11), 1454-1461.
- [6] Goel, R. K., & Chopra, A. K. (1998). Period formulas for concrete shear wall buildings. *Journal of Structural Engineering*, 124(4), 426-433.
- [7] 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.
- [8] Kwon, O. S., & Kim, E. S. (2010). Evaluation of building period formulas for seismic design. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 39(14), 1569-1583.
- [9] Hatzigeorgiou, G. D., & Kanapitsas, G. (2013). Evaluation of the fundamental period of low-rise and mid-rise reinforced concrete buildings. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 42(11), 1599-1616.