

การตรวจสอบและการวิเคราะห์เสถียรภาพของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจากค่าความถี่ธรรมชาติ Investigation and Stability Analysis of Reinforced Concrete Buildings Using Natural Frequency Values

นายภากรณ์ ชูศรี^{1,*} นายวิรัช ธรรม์บริสุทธิ์² นายวิญญู ศรีจันทร์³ และ วัฒนชัย สมิตธารกร⁴

^{1,2,3,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร

* E-mail address: 6230410021@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอถึงการตรวจสอบและการวิเคราะห์เสถียรภาพของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของอาคาร มีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบความสามารถในการใช้งานของอาคารด้วยการตรวจวัดการสั่นสะเทือนของอาคารเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติจากโครงสร้างของอาคารเพื่อเป็นแนวทางในการตรวจสอบสภาวะการใช้งานของอาคาร ซึ่งถือเป็น 1 ในตัวเลือกที่สามารถใช้ในการตรวจสอบอาคารได้ นอกจากนี้ วิธีการหาค่าความถี่ธรรมชาติของอาคาร เป็นวิธีการที่ได้การวัดค่าการสั่นของอาคารในทิศทางทั้ง 3 แกน จากเครื่องวัดค่าการสั่น โดยค่าที่ได้เป็นความเร่งของทั้ง 3 แกน จากนั้นค่าที่ได้ทั้งหมดสามารถนำไปหาค่าความถี่ธรรมชาติได้ อีกทั้งวิธีการหาค่าความถี่ธรรมชาติเป็น 1 ในวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing) ทำให้อาคารไม่มีความเสียหายเพิ่มเติมระหว่างที่ทำการตรวจสอบ ซึ่งจากขั้นตอนและวิธีการที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ทำการตรวจสอบเสถียรภาพของอาคารมีวิธีการที่หลากหลายมากขึ้น และวิธีการหาค่าความถี่ธรรมชาติเป็นวิธีที่เหมาะสมกับสภาพของอาคารที่ใช้ในการทดสอบ โดยในโครงการนี้จะยกตัวอย่างโดยการเปรียบเทียบค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารทั้งหมด 2 อาคาร ที่มีสภาพที่เสื่อมสภาพที่แตกต่างกัน

คำสำคัญ: ความถี่ธรรมชาติ; ความสามารถในการใช้งานอาคาร; การตรวจสอบอาคาร

Abstract

This project presents the investigation and stability analysis of reinforced concrete buildings by using the natural frequency comparison method. The purpose is to verify the serviceability of the building by measuring the

vibration of the building compared to the value obtained from the natural frequency analysis of the building structure as a guideline, which is one of the options that can be used to inspect the building. In addition, a method for determining the natural frequency of a building is a method that measures the vibration of a building in all three directions from a vibration meter. Where the value obtained is the acceleration of all three axes. Then all the obtained values can be used to find the natural frequency. In addition, the natural frequency determination method is one of the non-destructive testing methods that cause the building no additional damage during the testing phase. Which from the steps and method mentioned above will make building stability inspections more versatile and suitable for the conditions of the building used in the test. In this project, an example is given by comparing the natural frequencies of three buildings with different deteriorated conditions.

Key words: Natural frequency; Serviceability; Building inspection

1. บทนำ

การตรวจสอบความสามารถในการใช้งานอาคารมีอยู่หลากหลายประเภท และมีหลายส่วนที่สำคัญ หนึ่งใน การตรวจสอบที่สำคัญก็คือ การตรวจสอบความถี่ของอาคาร ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing) โดยอาคารหนึ่ง ๆ จะมี

ความถี่ธรรมชาติหรือความถี่ปกติของอาคารที่มีขนาดเล็กน้อยมากจนมนุษย์ไม่สามารถสัมผัสรับรู้ได้

ตัวอาคารเมื่อรับรู้ถึงการสั่นสะเทือนภายนอกตัวอาคารก็จะสั่นตามและค่อย ๆ ผ่อนถ่ายพลังงานจนการสั่นสะเทือนกลับสู่ความถี่ธรรมชาติ แต่ถ้าหากอาคารได้รับแรงสั่นสะเทือนที่มีความถี่ใกล้เคียงกันกับความถี่ธรรมชาติของอาคาร อาคารจะเริ่มสั่นด้วยความถี่นั้นและเมื่อเวลาผ่านไปแอมพลิจูดก็จะมากขึ้นเรื่อย ๆ จนเมื่อนานถึงจุดหนึ่งหรือแอมพลิจูดสูงพอที่จะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างอาคารที่ได้มีการออกแบบเอาไว้ หรืออาจทำให้อาคารเกิดความเสียหายอย่างหนักได้ [1]

การหาค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารสามารถทำได้ด้วยกันหลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น

1. การประเมินจากการวัดการตอบสนองความถี่ของอาคารจากการส่งแรงสั่นสะเทือนภายนอกเข้าไปกระทำแล้วหยุดให้แรงสั่นสะเทือน ตัวอาคารจะสั่นอย่างเป็นอิสระ (Free vibration) อยู่ต่ออีกระยะเวลาหนึ่งซึ่งสามารถนำไปตรวจสอบหาค่าความถี่ธรรมชาติได้ และการหาความถี่ธรรมชาติด้วยวิธีนี้จะค่อนข้างแม่นยำ
2. การประเมินด้วยสมการทางคณิตศาสตร์โดยคร่าว วิธีนี้จะไม่แม่นยำเทียบเท่ากับวิธีการอื่น ๆ
3. การประเมินค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารด้วยวิธีจำลองโครงสร้างของอาคาร วิธีนี้จะนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโครงสร้างอาคารมาวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ อาทิเช่น SAP2000, MIDAS Gen และอื่น ๆ
4. ประเมินจากการตรวจวัดความถี่ของอาคารเป็นระยะเวลาหนึ่งโดยไม่มีการสั่นสะเทือนจากภายนอกเข้าไปรบกวน แล้วนำมาวิเคราะห์ใน Frequency domain เพื่อหา Dominant frequency และใช้ค่านั้นเป็นความถี่ธรรมชาติต่อไป

ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้จะนำวิธีการประเมินที่ 3 และ 4 มาใช้เพื่อการศึกษาและตรวจสอบสถานะของอาคารที่สนใจต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี Dynamic Structure

ไดนามิกของโครงสร้างคือการวิเคราะห์โครงสร้างประเภทหนึ่งซึ่งครอบคลุมพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้แรงกระทำแบบไดนามิก (การกระทำที่มีความถี่สูง) แรงกระทำแบบไดนามิก ได้แก่ ผู้คน ลม คลื่น การจราจร แผ่นดินไหว และการระเบิด

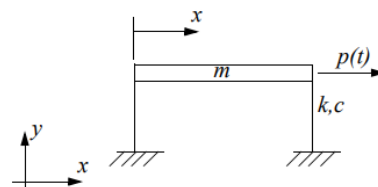
โครงสร้างใดๆที่สามารถอยู่ภายใต้การโหลดแบบไดนามิกในการคำนวณวิเคราะห์แบบไดนามิกนั้นสามารถใช้เพื่อหาค่าการกระจัดแบบไดนามิก ประวัติเวลา และการวิเคราะห์Modalได้

การวิเคราะห์โครงสร้างส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการหาพฤติกรรมของโครงสร้างทางกายภาพเมื่อถูกแรงกระทำ การกระทำนี้อาจอยู่ในรูปของการบรรทุกเนื่องจากน้ำหนักของสิ่งต่างๆ เช่น คน เฟอร์นิเจอร์ ลม ทิมะ ฯลฯ หรือแรงกระตุ้นอื่นๆ เช่น แผ่นดินไหว การสั่นของพื้นดินเนื่องจากการระเบิดในบริเวณใกล้เคียง เป็นต้น โดยพื้นฐานแล้ว แรงกระทำทั้งหมดเหล่านี้เป็นแบบไดนามิก รวมถึงน้ำหนักตัวเองของโครงสร้าง เพราะในบางช่วงเวลา แรงประเภทนี้ไม่ได้กระทำที่จุดๆเดียว ความแตกต่างเกิดขึ้นระหว่างการวิเคราะห์แบบไดนามิกและแบบคงที่บนพื้นฐานของที่ว่า การกระทำที่ใช้นั้นมี ความเร่งเพียงพอหรือไม่เมื่อเปรียบเทียบกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง ถ้าโหลดถูกโหลดซ้ำเพียงพอ แรงเฉื่อย (กฎการเคลื่อนที่ข้อที่หนึ่งของนิวตัน) จะถูกละเว้น และการวิเคราะห์จะง่ายขึ้นเป็นการวิเคราะห์แบบสถิต

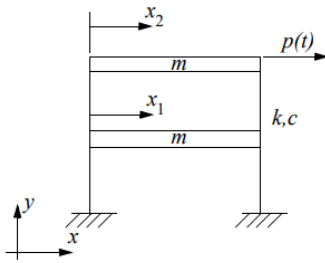
โหลดแบบคงที่คือโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงช้ามาก โหลดแบบไดนามิกคือโหลดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาค่อนข้างเร็วเมื่อเทียบกับความถี่ธรรมชาติของโครงสร้าง หากมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ การตอบสนองของโครงสร้างอาจถูกควบคุมด้วยการวิเคราะห์แบบคงที่ แต่ถ้าวการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (สัมพันธ์กับความสามารถในการตอบสนองของโครงสร้าง) การตอบสนองจะต้องถูกวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์แบบไดนามิก

การวิเคราะห์ไดนามิกสำหรับโครงสร้างอย่างง่ายสามารถทำได้ด้วยตนเอง แต่สำหรับโครงสร้างที่ซับซ้อน สามารถใช้การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อคำนวณรูปร่างโหมดและความถี่ได้

จำนวนองศาอิสระ(DOF) ถูกกำหนดให้เป็นจำนวนตัวแปรขั้นต่ำที่จำเป็นสำหรับคำอธิบายทั้งหมดของการเคลื่อนไหวของโครงสร้าง ตัวอย่างเช่นสำหรับโครงสร้างแบบ Single story



รูปที่ 2.1 โครงสร้าง 1 องศาอิสระ



รูปที่ 2.2 โครงสร้าง 2 องศาอิสระ

อาคารที่แสดงในรูปที่ 1 เราถือว่าเป็นพื้นแข็งเมื่อเทียบกับเสาสองต้น ดังนั้นการกระจัดของโครงสร้างจะอธิบายได้อย่างสมบูรณ์โดยการกระจัด x ของพื้น. ในทำนองเดียวกัน อาคารที่แสดงในรูปที่ 2 มีระดับความเป็นอิสระ 2 ระดับ เนื่องจากเราต้องการอธิบายการเคลื่อนไหวของแต่ละชั้นแยกกันเพื่ออธิบายการเคลื่อนไหวของทั้งหมด. ในรูปของ x_1 และ x_2

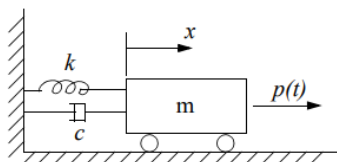
2.1.1 One degree of freedom

เราสามารถจำลองอาคารที่แสดงในรูปที่ 1 ได้ดังนี้โดยเทียบเท่าโมเดลไดนามิกอย่างง่ายที่แสดงในรูปที่ () ในแบบจำลองนี้ ความแข็งด้านข้างของคอลัมน์ถูกจำลองโดยสปริง (k) ตัวหน่วงถูกจำลองโดยโช้คอัพ (c) และมวลของพื้นจำลองโดยมวล (m) รูปที่ () แสดงแผนภาพ free body diagram ของโครงสร้าง แรงรวม รวมถึงแรงสปริง แรงหน่วง แรงโหลดไดนามิกภายนอกบนโครงสร้าง และแรงเฉื่อย กองกำลังเหล่านี้ถูกกำหนดเป็น:

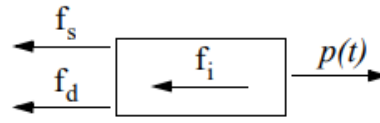
$$F_s = k * x \tag{2.1}$$

$$F_c = c * \dot{x} \tag{2.2}$$

$$F_i = m * \ddot{x} \tag{2.3}$$



รูปที่ 2.3 มวล m ที่ติดสปริงและตัวหน่วง



รูปที่ 2.4 Free Body Diagram

โดยที่ \dot{X} คืออนุพันธ์อันดับหนึ่งของการกระจัดตามเวลา (ความเร็ว) และ \ddot{X} คืออนุพันธ์อันดับสองของการกระจัดตามเวลา (ความเร่ง)

เมื่อทำการรวมผลลัพธ์ของแรงจะได้ว่า

$$\Sigma F = m\ddot{x}(t) \tag{2.4}$$

$$m\ddot{x}(t) = p(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) \tag{2.5}$$

$$p(t) = m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) \tag{2.6}$$

โดยที่มวล m และ stiffness k มากกว่าศูนย์สำหรับระบบทางกายภาพ

2.1.1.1 Undamped system

ลักษณะการสั่นของระบบที่ไม่เกิดการหน่วง($c=0$) จากสมการเชิงอนุพันธ์ที่เราได้

คำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญที่มีค่าสัมประสิทธิ์คงที่อยู่ในรูปของ

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0 \tag{2.7}$$

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \tag{2.8}$$

ได้คำตอบ $\ddot{x}(t)$ จากการหาอนุพันธ์ของสมการ

$$x(t) = A \cos(\omega_n t) + B \sin(\omega_n t) \tag{2.9}$$

จะได้ว่า

$$\ddot{x}(t) = -\omega_n^2 \cos(\omega_n t) - \omega_n^2 B \sin(\omega_n t)$$

$$= -\omega_n^2 x(t) \quad (2.10)$$

แทนค่า $\ddot{x}(t)$ ในสมการ

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (2.11)$$

จะได้

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (2.12)$$

$$m(-\omega_n^2 x(t)) + kx(t) = 0 \quad (2.13)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.14)$$

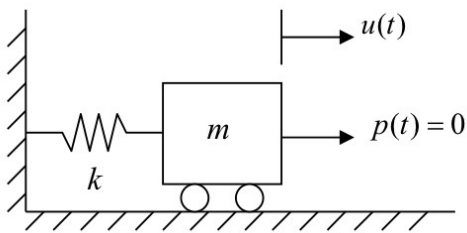
โดยที่ ω_n คือค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของการสั่น

และจะมีค่าคาบธรรมชาติของการสั่นเท่ากับ

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (2.15)$$

มีค่าความถี่ธรรมชาติเท่ากับ

$$f_n = \frac{1}{T_n} = \frac{\omega_n}{2\pi} \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.5 ระบบ undamped ของ SDOF

2.1.1.2 Damped system

ลักษณะการสั่นของระบบที่เกิดการหน่วง (c เป็นค่าคงที่) จากสมการเชิงอนุพันธ์ที่เราได้

คำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญที่มีค่าสัมประสิทธิ์คงที่อยู่ในรูปของ

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (2.17)$$

$$m\ddot{x}(t) + \frac{c}{m}\dot{x}(t) + \frac{k}{m}x(t) = 0 \quad (2.18)$$

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2 x(t) = 0 \quad (2.19)$$

โดยที่ ζ คือค่า damping ratio ที่ค่าเท่ากับ $\zeta = \frac{c}{2m\omega_n}$

คำตอบของสมการการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการหน่วง ζ

ถ้า $\zeta < 1$ ระบบจะแกว่งตามตำแหน่งสมดุลด้วยแอมพลิจูดที่ลดลง ระบบดังกล่าวเป็นระบบที่เรียกว่า Underdamped system

ถ้า $\zeta = 1$ จะไม่มีการสั่นและมวลจะกลับจากการกระจัดเริ่มต้นไปยังตำแหน่งสมดุลโดยไม่มีการแกว่ง ระบบดังกล่าวเป็นระบบที่เรียกว่า Critically damped

ถ้า $\zeta > 1$ จะไม่มีการสั่น แต่มวลจะกลับสู่ตำแหน่งสมดุลในอัตราที่ช้ากว่าระบบที่มีการหน่วงวิกฤต ระบบดังกล่าวเป็นระบบ Overdamped

สมการที่ใช้หาคำตอบของ differential equation ของค่า $\dot{x}(t)$ ในกรณีการสั่นอิสระแบบ damped คือสมการ

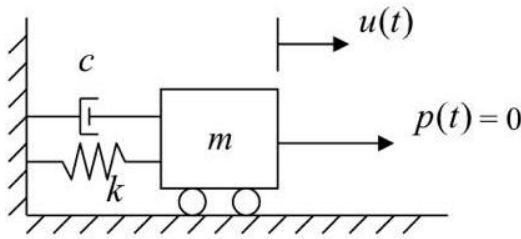
$$x(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left(x(0) \cos(\omega_d t) + \left(\frac{\dot{x}(0) + \zeta\omega_n x(0)}{\omega_d} \right) \sin(\omega_d t) \right) \quad (2.20)$$

โดยที่ ω_d คือค่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นแบบ damped มีค่า

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.21)$$

และจะมีค่าคาบธรรมชาติของการสั่นแบบ damped เท่ากับ

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{T_n}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (2.22)$$



รูปที่ 2.6 ระบบ damped ของ SDOF

Type of construction	Damping ratio
Steel	0.02 – 0.05
Concrete	0.05 – 0.07
Masonry	0.05 – 0.10
Wood	0.10 – 0.15

รูปที่ 2.7 ตารางความสัมพันธ์ของค่า Damping ratio กับประเภทของวัสดุโครงสร้าง

2.1.2 Multiple degree of freedom systems

โครงสร้าง multiple degree of freedom และแบบจำลองไดนามิกที่เทียบเท่าจะแสดงในรูปสมการ differential equations of motion ของ multiple degree of freedom ของระบบ

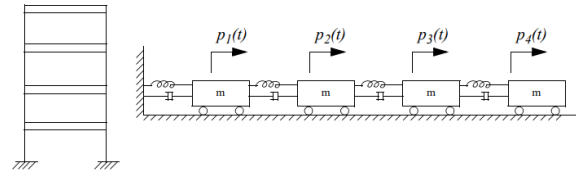
$$p(t) = M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) \quad (2.23)$$

สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของระบบอิสระหลายระดับคือโดยที่ M, C และ K เป็นเมทริกซ์ที่อธิบายถึงมวล การหน่วง และความแข็งของโครงสร้าง p(t) เป็นเวกเตอร์ของแรงภายนอก และ x เป็นเวกเตอร์ของการกระจัด ระบบที่มีองศาอิสระ n องศา มีเมทริกซ์มวล การหน่วง และความแข็งของขนาด n X n และ n ความถี่ธรรมชาติ คำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์นี้มีพจน์ 2n.

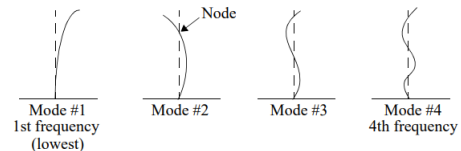
โครงสร้างอธิบายโดยสมการจะมี n ความถี่ธรรมชาติ แต่ละความถี่ธรรมชาติ ω_n จะมีเวกเตอร์รูปร่างโหมดที่ เกี่ยวข้องเป็น φ_n ซึ่งเป็นตัวอธิบายการเสียรูปของโครงสร้าง เมื่อระบบสั่นที่ความถี่ธรรมชาติที่เกี่ยวข้อง จำนวนnode จะสัมพันธ์กันกับเลขความถี่ธรรมชาติโดย

$$\#nodes = n - 1$$

โดยที่ n คือหมายเลขความถี่ที่เกี่ยวข้องกับรูปแบบของโหมด



รูปที่ 2.8 รูปของโครงสร้างแบบ multi degree of freedom และ dynamic model



รูปที่ 2.9 โค้ดแอมของ mode shape ของโครงสร้าง 4 DOF

2.2 การตรวจสอบโครงสร้างอาคาร

การตรวจสอบโครงสร้างอาคารเก่า และอาคารที่เสียหาย มีเป้าหมายเพื่อประเมินสมรรถนะของโครงสร้างนั้นๆ ว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่ ซึ่งในการตรวจสอบครอบคลุมตั้งแต่การตรวจสอบเอกสาร การตรวจสอบโครงสร้างจริง ทั้งสภาพความเสียหาย ลักษณะการใช้งาน สมบัติของวัสดุ โดยหากผลการประเมินสมรรถนะของโครงสร้างพบว่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ต้องมีการพิจารณาบำรุงรักษาโครงสร้างนั้นๆ เพื่อให้สมรรถนะของโครงสร้างเป็นที่ยอมรับตลอดอายุการใช้งาน

การตรวจสอบโครงสร้างจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ การตรวจสอบโครงสร้างเบื้องต้น และการตรวจสอบโครงสร้างโดยละเอียด

การตรวจสอบโครงสร้างเบื้องต้น ได้แก่ การตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้อง เช่น แบบก่อสร้าง ข้อกำหนดการก่อสร้าง ข้อกำหนดและมาตรฐานการออกแบบ รายงานการก่อสร้าง ประวัติการใช้งาน และประวัติการบำรุงรักษาโครงสร้าง การตรวจสอบโครงสร้างและความเสียหายด้วยตาเปล่า โดยผู้ประเมิน วิศวกรรมโครงสร้างมีหน้าที่ประเมินสมรรถนะของโครงสร้างว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่ จากข้อมูล การตรวจสอบเบื้องต้น ซึ่งในกรณีที่มีข้อมูลไม่เพียงพอสำหรับการประเมินสมรรถนะของโครงสร้าง จำเป็นต้องมีการตรวจสอบโครงสร้างโดยละเอียดในขั้นตอนต่อไป

การตรวจสอบโครงสร้างโดยละเอียด ได้แก่ การตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม การตรวจสอบ ด้วยเครื่องมือทดสอบแบบทำลาย หรือแบบไม่ทำลาย ในกรณีที่ต้องมีการตรวจสอบเพื่อวัตถุประสงค์การประเมินกำลังการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง

หรือในการออกแบบการบำรุงรักษาโครงสร้าง ต้องมีการคำนึงถึงผลของการเสื่อมสภาพของวัสดุต่อกำลัง ของโครงสร้าง โดยหากไม่มีข้อมูลดังกล่าวจำเป็นต้องมีการตรวจสอบสมบัติของวัสดุของโครงสร้างจริงเพิ่มเติมโดยอย่างน้อยต้องมีการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต และกำลังดึงของเหล็กเสริม เป็นต้น

2.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างเบื้องต้น

การตรวจสอบโครงสร้างเบื้องต้น ได้แก่ การตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้อง และการตรวจสอบสภาพของโครงสร้าง ณ ปัจจุบัน ด้วยวิธีตรวจพินิจ

การตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้อง เช่น ข้อกำหนดและมาตรฐานการออกแบบ เอกสารการคำนวณโครงสร้าง แบบรายละเอียดโครงสร้าง ข้อกำหนดการก่อสร้าง ข้อมูลการทดสอบวัสดุ ระหว่างการก่อสร้าง รายงานการก่อสร้าง ประวัติการใช้งาน และประวัติการบำรุงรักษาโครงสร้าง

การตรวจสอบสภาพของโครงสร้าง ณ ปัจจุบันด้วยวิธีตรวจพินิจ ได้แก่ การตรวจสอบความสอดคล้องของลักษณะโครงสร้างจริง และข้อมูลเอกสารที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้าง เช่น รูปแบบโครงสร้าง ตำแหน่ง จำนวน และขนาดชิ้นส่วนโครงสร้าง ลักษณะการใช้งาน โครงสร้าง รวมทั้งการตรวจสอบสภาพความเสียหาย ของโครงสร้าง ตามมาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย การตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีตรวจพินิจ การตรวจสอบควรมีการบันทึกลักษณะทางกายภาพของโครงสร้าง รวมทั้งตำแหน่ง การเกิดการเสื่อมสภาพ การถ่ายแรงในชิ้นส่วนโครงสร้างแต่ละชิ้นส่วนข้อจำกัดอื่นๆ ในการบำรุงรักษา เช่น ระยะห่างระหว่างโครงสร้างข้างเคียง ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานแผ่นดินไหว

การตรวจสอบต้องมีการคำนึงถึงผลของการเสื่อมสภาพของวัสดุต่อสมรรถนะของโครงสร้าง โดยหากไม่มีข้อมูลดังกล่าวจำเป็นต้องมีการตรวจสอบสมบัติของวัสดุของโครงสร้างจริงโดยละเอียดเพิ่มเติมเพื่อเป็น ข้อมูลในการประเมินสมรรถนะของโครงสร้าง

ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลไม่เพียงพอในการประเมินสมรรถนะของโครงสร้าง จำเป็นต้องมีการตรวจสอบโครงสร้างโดยละเอียดในขั้นตอนต่อไป

2.2.2 การตรวจสอบโดยละเอียด

ในกรณีที่การตรวจสอบเบื้องต้นให้ข้อมูลไม่เพียงพอในการประเมินสมรรถนะของโครงสร้างจึงต้องดำเนินการตรวจสอบโดย

ละเอียดเพิ่มเติม ได้แก่ การตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม หรือ การตรวจสอบสมบัติของวัสดุที่เกิดการเสื่อมสภาพ

ในการประเมินสมรรถนะของโครงสร้างจริงที่เกิดการเสื่อมสภาพแล้ว จำเป็นต้องคำนึงถึงสมบัติของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการเสื่อมสภาพด้วย

การตรวจสอบโดยละเอียดมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสมรรถนะของโครงสร้าง 3 ด้านได้แก่ การรับน้ำหนักบรรทุก ความสามารถในการใช้งาน อายุการใช้งาน

ตาราง 2.1 การตรวจสอบโดยละเอียดเพื่อประเมินสมรรถนะของโครงสร้างด้านกำลังการรับน้ำหนักบรรทุก

การตรวจสอบโดยละเอียดเพื่อประเมินสมรรถนะของโครงสร้างด้านกำลังการรับน้ำหนักบรรทุก		
ประเภทความเสียหาย	รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิง
กำลังอัดคอนกรีต	1. เจาะคอนกรีตเพื่อทดสอบกำลังอัด 2. Pull out test	ASTM C42-03 และ C39-01 ASTM C900-01
	3. คอนกรีตแตก 4. Windsor probe 5. คลื่นอัลตราโซนิค	มยผ. 1502-51 มยผ. 1503-51 มยผ. 1504-51
แรงดึงคอนกรีต	1. เจาะคอนกรีต เพื่อทดสอบกำลังดึง 2. Pull off test	ASTM C496-04 ASTM C1583-04
กำลังดึงของเหล็กเสริม	1. การตัดชิ้นตัวอย่างเหล็กเพื่อทดสอบกำลังดึงของเหล็กเสริม 2. Hardness test *ค่า Hardness value เหมาะสำหรับการตรวจสอบเพื่อเปรียบเทียบความสม่ำเสมอของสมบัติเหล็กเสริมในบริเวณต่าง ๆ กัน เช่น ใช้ในการประเมินว่า เหล็กเสริมในบริเวณที่ถูกไฟไหม้มีค่า Hardness value ต่างไปจากเหล็กเสริมในบริเวณที่ไม่ถูกไฟไหม้ หรือไม่	ASTM A370-03 ASTM A370-03
ความหนาแน่นของคอนกรีต	1. เจาะคอนกรีต	ASTM C42-03 และ C39-01
การทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่น	ตัวอย่างคอนกรีตที่ได้จากการเจาะและตัดอุปกรณ์วัดความเครียด	ASTM C42-03
กำลังการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้าง	ทดสอบการรับน้ำหนักบรรทุกจริง	ACI 318R-11
จำนวนและตำแหน่งของเหล็กเสริม	1. Covermeter 2. คลื่นเรดาร์ 3. เปิดผิวคอนกรีต	มยผ. 1505-51 มยผ. 1507-51 -
ขนาดและระยะหุ้มคอนกรีต	1. Covermeter 2. คลื่นเรดาร์ 3. เปิดผิวคอนกรีต และทำการตรวจสอบด้วยการตรวจพินิจ	มยผ. 1505-51 มยผ. 1507-51 -

ตาราง 2.2 การตรวจสอบโดยละเอียดเพื่อประเมินสมรรถนะของโครงสร้างด้านความสามารถในการใช้งาน

การตรวจสอบโดยละเอียดเพื่อประเมินสมรรถนะของโครงสร้างด้านความสามารถในการใช้งาน		
ประเภทความเสียหาย	รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิง
ค่าการทวัดตัวที่ยอมรับได้ในรูปของการเสียรูปเชิงมุม (Angular Distortion: β)	ทำการวัดด้วยกล้องระดับ	-
การแอ่นตัวขององค์อาคาร	ทำการวัดด้วยกล้องระดับ	-
ปริมาณการร้าวที่มองเห็นของของเหลวเก็บกัก	การประเมินการรั่วซึมของของเหลวเก็บกัก	ACI 350.1R-01 และ ASTM E2128-01
การตรวจสอบความถี่และความถี่ของการสั่นสะเทือน	วัดความถี่ของอาคารและองค์อาคาร	BS 7385-1-90 ISO 4866-10 BS 7385-2-93 Murray et al. (1999) ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติฉบับที่ 37

ตาราง 2.3 การตรวจสอบโดยละเอียดเพื่อประเมินสมรรถนะของโครงสร้างด้านอายุการใช้งานและความคงทน

การตรวจสอบโดยละเอียดเพื่อประเมินสมรรถนะของโครงสร้างด้านอายุการใช้งานและความคงทน		
ประเภทความเสียหาย	รายการทดสอบ	มาตรฐานอ้างอิง
การแตกร้าวเนื่องจากกาหดตัวของคอนกรีต	ตรวจสอบด้วยการตรวจพินิจ	มยผ. 1501-51
การแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ	ตรวจสอบด้วยการตรวจพินิจ	มยผ. 1501-51
การแตกร้าวเนื่องจากกาหดตัวของคอนกรีต	ตรวจสอบด้วยการตรวจพินิจ	มยผ. 1501-51
การแตกร้าวเนื่องจากกาหดตัวของคอนกรีต	ตรวจสอบด้วยการตรวจพินิจ	มยผ. 1501-51
การเป็นสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคลอไรด์	ปริมาณคลอไรด์ในคอนกรีตที่ตำแหน่งเหล็กเสริม	ASTM C1152-03
การเกิดสนิมในเหล็กเสริม	1. ศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ 2. Linear polarization 3. เบ็ดผิวคอนกรีต และทำการตรวจสอบ ด้วยการตรวจพินิจ	มยผ. 1506-51 SHRPS-324 -
การเป็นสนิมของเหล็กเสริมเนื่องจากคาร์บอนเข้	ความลึกคาร์บอนเข้	EN 14630-06
ปฏิกิริยาระหว่างต่างกับมวลรวม	ตรวจสอบด้วยการตรวจพินิจ	มยผ. 1501-51
กาเกิด Delayed Ettringite Formation	ตรวจสอบด้วยการตรวจพินิจ	มยผ. 1501-51
การสึกกร่อน	ตรวจสอบด้วยการตรวจพินิจ	มยผ. 1501-51
การเผชิญกับซัลเฟตและกรด	ตรวจสอบด้วยการตรวจพินิจ	มยผ. 1501-51
ไฟไหม้	เจาะคอนกรีต เพื่อทดสอบกำลังอัด เจาะคอนกรีต เพื่อทดสอบกำลังดึง คือณะภาค คลื่นอัลตราโซนิค Infrared thermography	ASTM C39-01 ASTM C496-04 มยผ. 1502-51 มยผ. 1504-51 ASTM D4788-03
การเกิดสนิมของมวลรวม	ตรวจสอบด้วยการตรวจพินิจ	มยผ. 1501-51

2.2.3 ข้อกำหนดมาตรฐานความลั่นสะเทือนต่ออาคาร

จากประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 37 (พ.ศ.2553) เรื่อง กำหนดมาตรฐานความลั่นสะเทือนเพื่อป้องกันผลกระทบต่ออาคาร ระบุไว้ดังนี้

ตาราง 2.4 ข้อกำหนดมาตรฐานความลั่นสะเทือนเพื่อ

ป้องกันผลกระทบต่ออาคาร

อาคารประเภทที่	จุดตรวจวัด	ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความเร็วอนุภาคสูงสุดไม่เกิน (มิลลิเมตรต่อวินาที)	
			ความลั่นสะเทือนกรณีที่ 1	ความลั่นสะเทือนกรณีที่ 2
1	1.1 ฐานรากหรือชั้นล่างของอาคาร	$f < 10$	20	-
		$10 < f < 50$	$0.5 f + 15$	
		$50 < f < 100$	$0.2 f + 30$	
	1.2 ชั้นบนสุดของอาคาร	ทุกความถี่	40*	10*
		1.3 พื้นอาคารในแต่ละชั้น	ทุกความถี่	20**
2	2.1 ฐานรากหรือชั้นล่างของอาคาร	$f < 10$	5	
		$10 < f < 50$	$0.25 f + 2.5$	-
		$50 < f < 100$	$0.1 f + 10$	
		$f > 100$	20	
	2.2 ชั้นบนสุดของอาคาร	ทุกความถี่	15*	5*
	2.3 พื้นอาคารในแต่ละชั้น	ทุกความถี่	20**	10**
3	3.1 ฐานรากหรือชั้นล่างของอาคาร	$f < 10$	3	-
		$10 < f < 50$	$0.125 f + 1.75$	
		$50 < f < 100$	$0.04 f + 6$	
		$f > 100$	10	
	3.2 ชั้นบนสุดของอาคาร	ทุกความถี่	8*	2.5*
3.3 พื้นอาคารในแต่ละชั้น	ทุกความถี่	20**	10**	

หมายเหตุ

- 1) f = ความถี่ของความลั่นสะเทือน ณ เวลาที่มีความเร็วอนุภาคสูงสุดมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์
- 2) * = กำหนดมาตรฐานไว้เฉพาะค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดในแกนนอน
- 3) ** = กำหนดมาตรฐานไว้เฉพาะค่าความเร็วอนุภาคสูงสุดในแกนนตั้ง
- 4) การวัดค่าความลั่นสะเทือนสูงสุดสำหรับความลั่นสะเทือนกรณีที่ 2 ตามข้อ 1.2, 2.2 และ 3.2 ให้วัดที่ชั้นบนสุดของอาคารหรือชั้นอื่นซึ่งมีค่าความลั่นสะเทือนสูงสุด
- 5) การวัดค่าความลั่นสะเทือนที่พื้นอาคารในแต่ละชั้นตามข้อ 1.3, 2.3 และ 3.3 ให้ยกเว้นการวัดที่ฐานรากหรือชั้นล่างของอาคาร

โดยในข้อกำหนดมาตรฐานได้กำหนดประเภทของอาคารไว้ว่า

อาคารประเภท 1 หมายความว่า

- 1) อาคารที่ใช้เป็นโรงงานตามกฎหมายว่าด้วยโรงงาน
- 2) อาคารพาณิชย์ อาคารสำนักงาน อาคารคลังสินค้า อาคารพิเศษ อาคารขนาดใหญ่ ตามกฎหมายว่าด้วยการควบคุมอาคาร
- 3) อาคารอื่นใดที่มีการใช้ประโยชน์ในอาคารเช่นเดียวกันกับอาคารตาม 1) และ 2)

อาคารประเภท 2 หมายความว่า

- 1) อาคารอยู่อาศัย อาคารอยู่อาศัยรวม ห้างแถว ตึกแถว บ้านแถว บ้านแฝด ตามกฎหมายว่าด้วยการควบคุมอาคาร
- 2) อาคารชุดตามกฎหมายว่าด้วยอาคารชุด
- 3) หอพักตามกฎหมายว่าด้วยหอพัก
- 4) อาคารที่ใช้เป็นสถานพยาบาลตามกฎหมายว่าด้วยสถานพยาบาล และอาคารที่ใช้เป็นโรงพยาบาลของทางราชการ
- 5) อาคารที่ใช้เป็นสถานที่ศึกษาตามกฎหมายว่าด้วยโรงเรียนเอกชน อาคารที่ใช้เป็นโรงเรียนของทางราชการ อาคารที่ใช้เป็นสถานที่ศึกษาของสถาบันอุดมศึกษาของเอกชนตามกฎหมายว่าด้วยสถาบันอุดมศึกษาเอกชน และอาคารที่ใช้เป็นสถานที่ศึกษาของสถาบันอุดมศึกษาของทางราชการ
- 6) อาคารที่ใช้ประโยชน์เพื่อกิจกรรมทางศาสนา
- 7) อาคารอื่นใดที่มีลักษณะของการใช้ประโยชน์ในอาคาร เช่นเดียวกับอาคารตาม 1) 2) 3) 4) 5) และ 6)

อาคารประเภท 3 หมายความว่า

- 1) โบราณสถานตามกฎหมายว่าด้วยโบราณสถาน โบราณวัตถุ ศิลปวัตถุ และพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติ
- 2) อาคารหรือสิ่งปลูกสร้างในลักษณะอื่นใดที่มีลักษณะไม่มั่นคงแข็งแรงแต่มีคุณค่าทางวัฒนธรรม

ในส่วนของความเร็วอนุภาคสูงสุด ระบุไว้ว่า

ความเร็วอนุภาคสูงสุด หมายถึง ค่าความเร็วของความสั่นสะเทือนในแนวแกนนอน (แกน X หรือ แกน Y) หรือแนวแกนตั้ง (แกน Z) ที่มีค่าสูงสุด

“ความสั่นสะเทือนกรณีที่ ๑” หมายความว่า ความสั่นสะเทือนที่ไม่ทำให้เกิดการล้าและการล้าของโครงสร้างอาคาร

“ความสั่นสะเทือนกรณีที่ ๒” หมายความว่า ความสั่นสะเทือนที่ทำให้เกิดการล้าหรือการล้าของโครงสร้างอาคาร

“การล้าพ้อง (Resonance) ของโครงสร้างอาคาร” หมายความว่า ปรากฏการณ์ใด ๆ ที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนใกล้เคียงหรือมีค่าเท่ากับความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของโครงสร้างอาคารนั้น

“ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ของโครงสร้างอาคาร” หมายความว่า ความถี่ในการสั่นสะเทือนของโครงสร้างอาคารหรือส่วนประกอบของอาคารแต่ละอาคารที่มีลักษณะเฉพาะภายใต้การสั่นแบบอิสระ

2.3 การทดสอบภาคสนามการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานจากผลตอบสนองความเร่งของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล

จากวิทยานิพนธ์ของ นายอิทธิวัฒน์ มณีรัตน์โรจน์ และ ผศ. ดร. พัทธพงษ์ อาสนจินดา นักศึกษาปริญญาโทและอาจารย์จากมหาวิทยาลัยบูรพา มีเนื้อหาเกี่ยวกับการหาความถี่ธรรมชาติของสะพานโดยใช้ความเร่งของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลด้วยวิธีการทดสอบแบบทางอ้อมเทียบกับค่าความถี่ที่ได้จากทดสอบทางตรง ซึ่งวิธีการทดสอบทางตรงดังกล่าวเลือกใช้การทดสอบการสั่นไหวอิสระ (free vibration test) เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน

ในส่วนของวิธีการตอบสนองความเร่งของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลซึ่งเป็นวิธีทดสอบทางอ้อม ได้ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ในการเก็บข้อมูลสัญญาณความเร่ง คือ หัววัดความเร่ง (acceleration transducer) ในการวัดโดยทำการติดตั้งหัววัดความเร่งที่ 2 ตำแหน่ง คือ ที่กึ่งกลางความยาวสะพานและกึ่งกลางเพลาลังของยานพาหนะ ในส่วนของรถยนต์ที่ใช้ในการทดสอบ ได้เลือกมา 2 ประเภท คือ รถนั่งสามตอนอเนกประสงค์ (SUV) และรถนั่งสองตอนท้ายบรรทุก (pickup truck)

ในการเก็บข้อมูลทดสอบจะใช้ความถี่ในการเก็บข้อมูลที่ 25,000 Hz ซึ่งเป็นความละเอียดสูงสุดของอุปกรณ์วัด และทำการทดสอบทั้งหมด 39 กรณี หลังจากนั้นนำข้อมูลไปวิเคราะห์ โดยการวิเคราะห์ความถี่ของสะพานจะพิจารณาจากสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณความเร่งที่ตรวจวัดจากรถยนต์ทดสอบ ซึ่งสเปกตรัมดังกล่าวจะได้จากการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT)

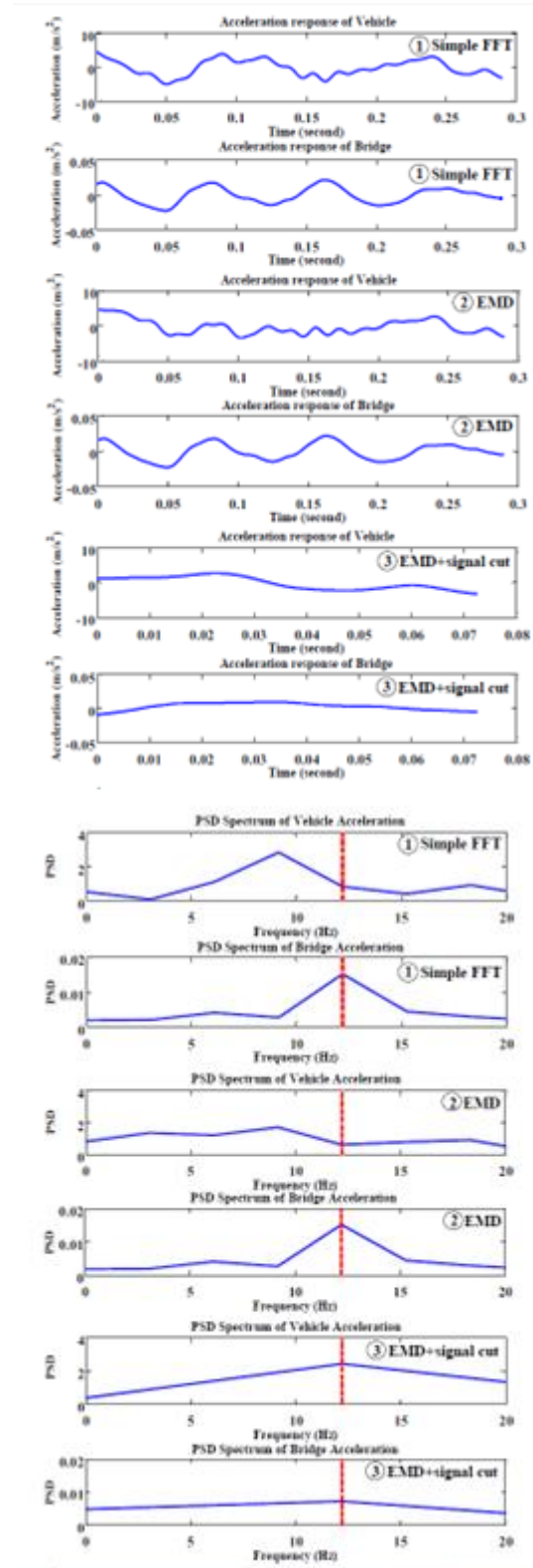
โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการวิเคราะห์ความถี่ซึ่งแบ่งเป็น 3 ลำดับขั้นตอน ได้แก่

- 1) การระบุความถี่จากสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณความเร่งตรวจวัดที่ทำการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วตามปกติ (Simple FFT)
- 2) การระบุความถี่จากสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณความเร่งตรวจวัดที่ห้กลับ IMF ที่ไม่พึ่งประสงค์ออก

จากวิธีแยกรูปแบบเชิงประจักษ์ก่อนแล้วจึงสร้างสเปกตรัมด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (EMD)

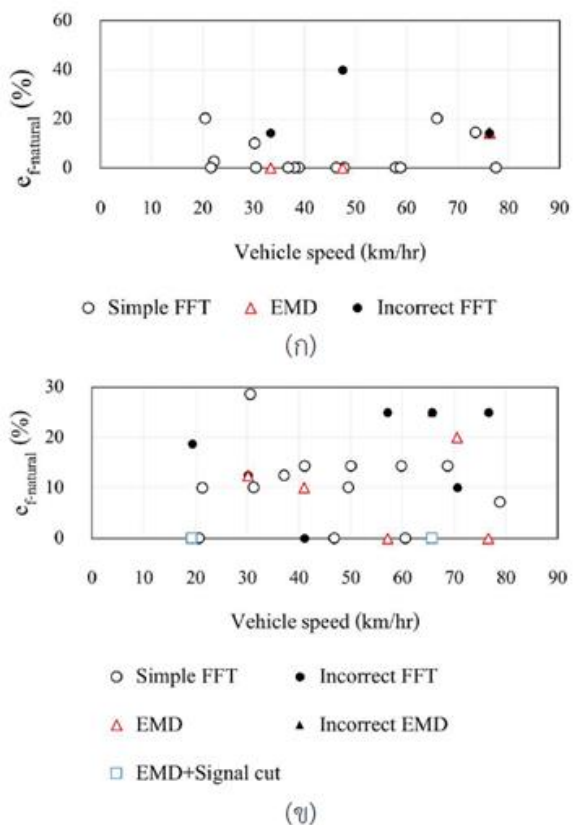
- 3) การระบุความถี่จากสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณความถี่ในช่วงที่ 2 (EMD) ซึ่งได้นำมาทำการตัดช่วงสัญญาณแล้วจึงสร้างสเปกตรัมด้วยการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (EMD + Signal cut)

ในการทดสอบพบว่า มี 29 กรณี สามารถระบุค่าความถี่ของสะพานได้ในขั้นตอนแรก (Simple FFT) มี 8 กรณี สามารถระบุค่าความถี่ของสะพานได้ในขั้นตอนที่ 2 (EMD) และมี 2 กรณีที่ใช้กระบวนการวิเคราะห์ความถี่ทั้ง 3 ขั้นตอนแล้วพบว่าค่าความถี่ของยานพาหนะและค่าสเปกตรัมที่ได้สามารถสังเกตและระบุค่าความถี่ของสะพานได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.X โดยทั้ง 2 กรณีเป็นรถยนต์ประเภท Pickup ทั้งคู่



รูปที่ 2.10 สัญญาณความถี่ (ซ้าย) และ สเปกตรัมความถี่ (ขวา) ของรถยนต์ที่ใช้ทดสอบ

ในการทดสอบนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าความถี่ที่ระบุได้จากกระบวนการที่ได้นำเสนอกับค่าความถี่จริงของสะพานที่ได้จากสัญญาณความเร่งที่ติดตั้งได้สะพานเพื่อหาระดับความถูกต้องของค่าความถี่ที่สามารถระบุได้ พบว่าความถี่ที่ระบุได้จากสัญญาณความเร่งของรถประเภท SUV มีความถูกต้องมากกว่ารถประเภท Pickup ดังแสดง ในรูปที่ 2.X และ 2.X เนื่องจากว่าพฤติกรรมของรถ SUV มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมการสั่นไหวของสะพาน ซึ่งระดับความถูกต้องของค่าความถี่ที่ระบุได้ด้วยกระบวนการที่นำเสนออยู่ในช่วงร้อยละ 87.55 และร้อยละ 85.67 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สำหรับรถประเภท SUV และ Pickup ตามลำดับ



รูปที่ 2.11 ค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่ที่ระบุได้เทียบกับความถี่ธรรมชาติจริงของสะพาน
(ก) รถ SUV และ (ข) รถ Pickup

จากผลของความเร็วยานพาหนะที่ส่งผลต่อความละเอียดของสเปกตรัมความถี่และระดับความถูกต้องของการระบุค่าความถี่ธรรมชาติของสะพาน เพื่อให้การใช้วิธีการทดสอบแบบทางอ้อมมีประสิทธิภาพมากขึ้นและมีความเชื่อถือได้ในการใช้ติดตามประเมินสภาพความแข็งแรงตามอายุของโครงสร้างสะพาน จึงแนะนำให้การทดสอบแต่ละรอบเวลาของการประเมินใช้ยานพาหนะคันเดิมและใช้ความเร็วของยานพาหนะทดสอบที่ใกล้เคียงกับการทดสอบครั้งก่อนหน้า เพื่อให้มีความละเอียดใกล้เคียงกันและสามารถเทียบอัตราการสทอนของค่าความถี่ที่ระบุได้ว่ามีนัยสำคัญกับสภาพความแข็งแรงของสะพานอย่างไร

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบด้วยประเภทยานพาหนะและจำนวนสะพานที่จำกัด ซึ่งยังมีสะพานที่มีลักษณะองค์อาคารและความยาวช่วงที่แตกต่างออกไป เช่นเดียวกับรถยนต์อีกหลายประเภทที่ยังไม่ได้ถูกนำมาทดสอบ โดยมีลักษณะช่วงล่างที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาผลของประเภทและช่วงล่างให้ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งอาจนำไปสู่การพัฒนากระบวนการทดสอบแบบทางอ้อมเพื่อนำไปใช้ในการประเมินความเสียหายของโครงสร้างสะพานได้

3.วิธีการวิจัย

3.1 การตรวจสอบและศึกษาโครงสร้างอาคาร

ในการตรวจสอบและศึกษาโครงสร้างอาคารของตึกประสมสถาปัตยกรรม และตึกภาควิชาวิศวกรรมโยธา เพื่อจะทำการศึกษาโครงสร้างและความถี่ธรรมชาติของอาคารทั้งสอง โดยการตรวจสอบจะมีอยู่ 2 ขั้นตอน ได้แก่การตรวจสอบแปลนโครงสร้าง และการตรวจสอบแรงสั่นสะเทือนด้วยเครื่องตรวจวัดแรงสั่นสะเทือน

3.1.1 การตรวจสอบแบบแปลนโครงสร้าง

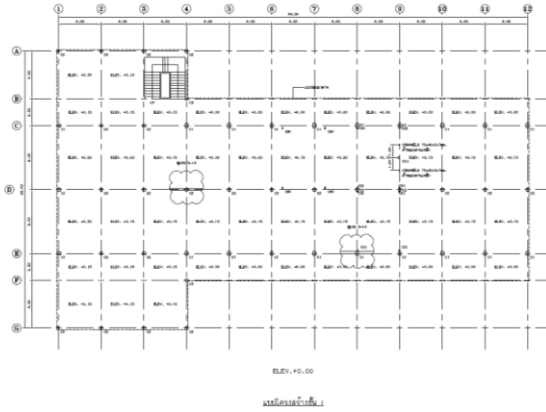
ในการวิจัยครั้งนี้มีการศึกษาแบบแปลนโครงสร้างของตึกประสม สถาปัตยกรรม และตึกภาควิชาวิศวกรรมโยธา เพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาโมเดลโครงสร้างตึกด้วยโปรแกรม SAP2000 สำหรับใช้วิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของตึกจากแบบโครงสร้างต่อไป

3.1.1.1 แบบแปลนโครงสร้างตึกประสม สถาปัตยกรรม

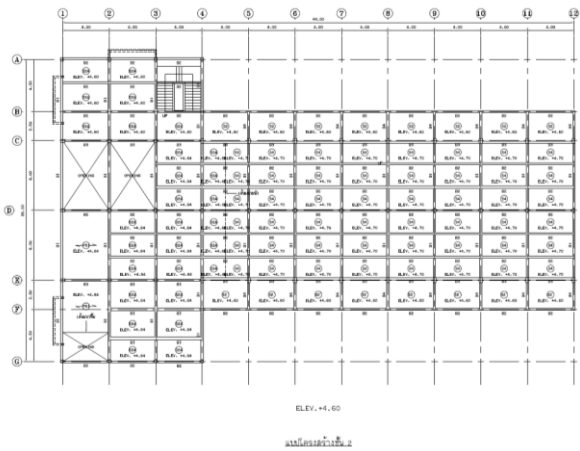
ตึกประสม สถาปัตยกรรม เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 3 ชั้น ตั้งอยู่ที่คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อาคารดังกล่าวก่อสร้างเมื่อปี พ.ศ.2505 (ปัจจุบันมีอายุ 51 ปี) อาคารเดิมมีขนาดประมาณ 39 x 124 เมตร (กว้าง x ยาว) ภายหลังได้มีการรื้อถอนอาคารบางส่วน ทำให้ปัจจุบันอาคารจึงมีขนาดโดยประมาณ 26 x 44 เมตร (กว้าง x ยาว) อาคารดังกล่าวผ่านการใช้งานมานาน และปัจจุบันยังคงใช้เป็นอาคารเรียน

ระบบโครงสร้างของอาคารเป็นระบบพื้น-คาน-เสา ชนิดหล่อในที่ ยกเว้นพื้นชั้น 1 ที่เป็นพื้นวางบนดิน ความสูงชั้น 4.60 เมตร โดยประมาณ ความยาวช่วง (Span Length) ส่วนใหญ่ประมาณ 4 x 6 เมตร (กว้าง x ยาว) บริเวณชั้น 2 และชั้น 3 มีพื้นยื่นและคานยื่น โดยมีระยะยื่นประมาณ 2.5 เมตร และบริเวณชั้นหลังคา มีระยะยื่นประมาณ 3 เมตร โครงหลังคาเป็นแป้ไม้วางบนโครงหลังคา คสล.

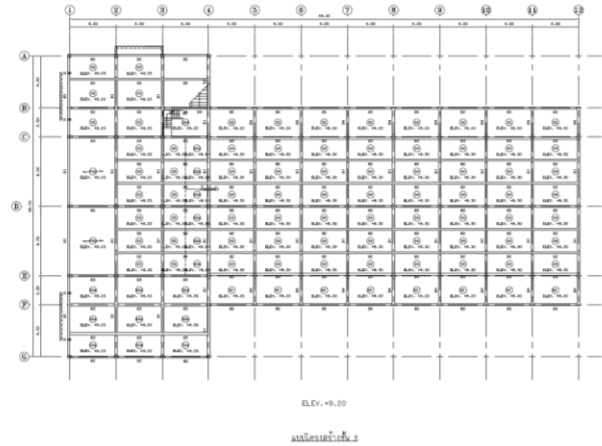
โดยที่แปลนแต่ละชั้นมีลักษณะดังนี้



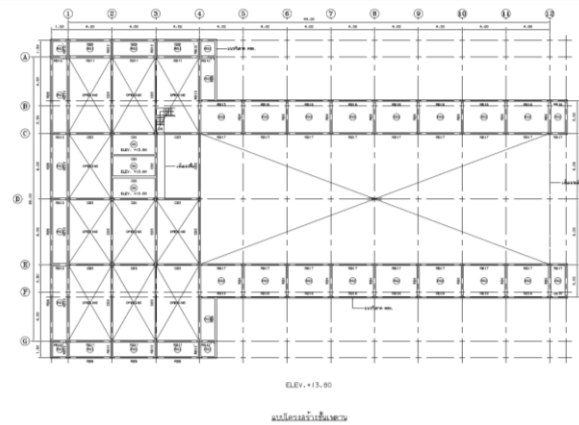
รูปที่ 3.1 แบบแปลนโครงสร้างชั้น 1



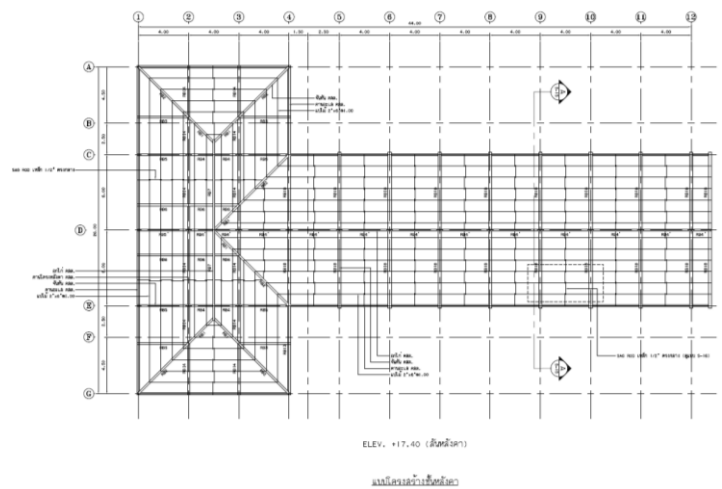
รูปที่ 3.2 แบบแปลนโครงสร้างชั้น 2



รูปที่ 3.3 แบบแปลนโครงสร้างชั้น 3



รูปที่ 3.4 แบบแปลนโครงสร้างชั้นเพดาน

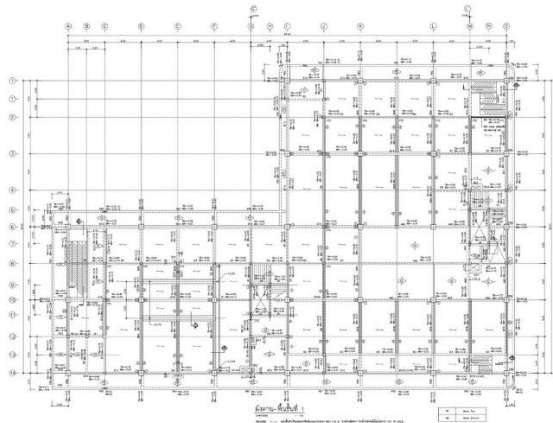


รูปที่ 3.5 แบบแปลนโครงสร้างชั้นหลังคา

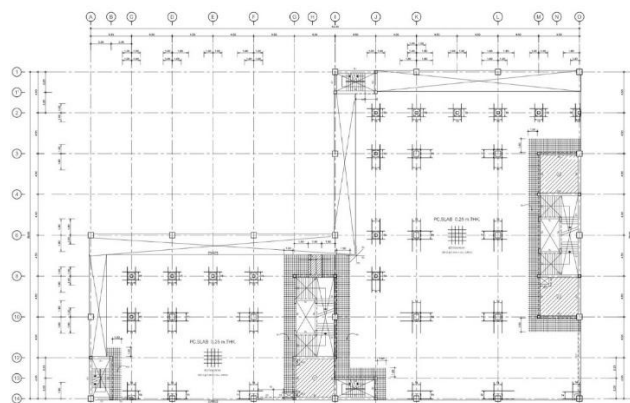
3.1.1.2 แบบแปลนโครงสร้างตึกภาควิชาวิศวกรรมโยธา

ตึกภาควิชาวิศวกรรมโยธา เป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก สูง 5 ชั้น ตั้งอยู่ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อาคารดังกล่าวก่อสร้างเมื่อปี พ.ศ.2548 (ปัจจุบันมีอายุ 18 ปี) อาคารมีขนาดโดยประมาณ 36 x 54 เมตร (กว้าง x ยาว)ปัจจุบันยังคงใช้เป็นอาคารเรียน

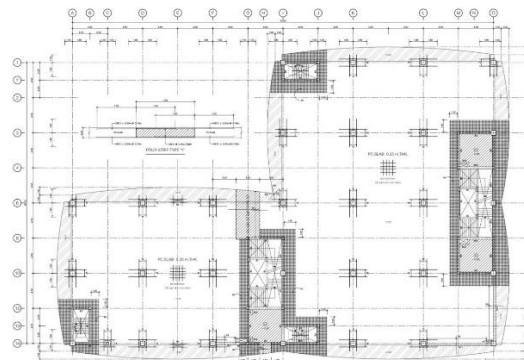
ระบบโครงสร้างของอาคารเป็นระบบพื้น-คาน-เสา ชนิดหล่อในที่ ในชั้นที่ 1 ในชั้นที่2-5 จะเป็นพื้นสำเร็จรูปไร้คาน ความสูงชั้นที่1-2 มีค่า 5.0 เมตรโดยประมาณ และในชั้นที่ 3-5 มีค่า 4.0 เมตร โดยประมาณ ความยาวช่วง (Span Length) ส่วนใหญ่ประมาณ 5 x 5 เมตร (กว้าง x ยาว) บริเวณชั้น 3,4 และชั้น 5 มีพื้นยื่นและคานยื่น โดยมีระยะยื่นประมาณ 2 เมตร และบริเวณชั้นหลังคา มีระยะยื่นประมาณ 2 เมตร โครงหลังคาเป็นโครงหลังคา คสล.



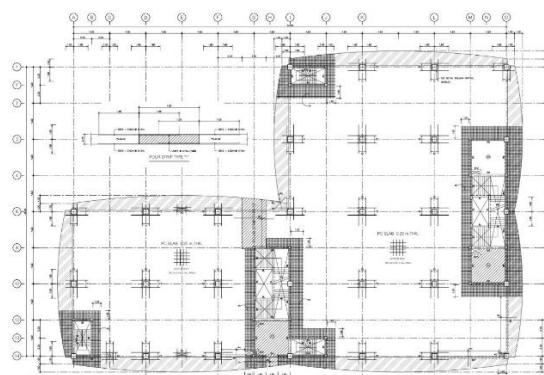
รูปที่ 3.6 แบบแปลนโครงสร้างชั้นที่ 1



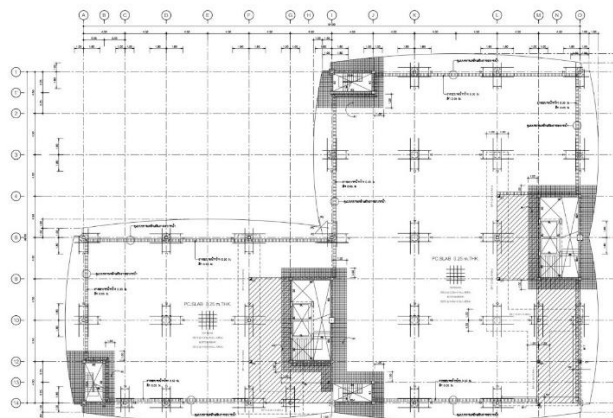
รูปที่ 3.7 แบบแปลนโครงสร้างชั้นที่ 2



รูปที่ 3.8 แบบแปลนโครงสร้างชั้นที่ 3



รูปที่ 3.9 แบบแปลนโครงสร้างชั้นที่ 4และ5



รูปที่ 3.10 แบบแปลนโครงสร้างชั้นดาดฟ้า

3.1.2 การตรวจสอบแรงล้นสะเทือนด้วยเครื่องตรวจวัดแรงล้นสะเทือน

การตรวจสอบและบันทึกแรงสั่นสะเทือนของตึกจะใช้เครื่อง Titan Accelerometer ร่วมกับเครื่อง Taurus Portable Seismograph จากบริษัท Nanometrics Inc.

3.1.2.1 เครื่อง Taurus Portable Seismograph

เครื่อง Taurus Portable Seismograph เป็นเครื่องระบุตำแหน่ง และตัวบันทึกข้อมูลขนาดเล็กในตัวที่ใช้พลังงานต่ำ โดยเครื่อง Taurus Portable Seismograph สามารถใช้เป็นเครื่องบันทึกข้อมูลอนุกรมเวลาแบบเดี่ยวหรือสามารถใช้ร่วมเป็นส่วนหนึ่งกับเครื่องช่วยการรับข้อมูลได้ มีสามช่องสัญญาณที่แปลงข้อมูลแบบอนาล็อกเป็นแบบดิจิทัล มีตัวรับสัญญาณ GPS ระบบนาฬิกา และที่เก็บข้อมูลที่สามารรถอดได้ สามารถบันทึกข้อมูลในอัตรา 100 sample per second โดยสามารถบันทึกข้อมูลติดต่อกันได้ถึง 600 วันด้วยขนาดความจุฮาร์ดดิสก์ 40 GB และสามารถนำออกข้อมูลที่บันทึกในรูปแบบไฟล์ ASCII, MiniSEED หรือ SEISAN ได้ [2] โดยในการวิจัยครั้งนี้จะนำออกข้อมูลเป็นไฟล์ ASCII เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ต่อไป

3.1.2.2 เครื่อง Titan Accelerometer

เครื่อง Titan Accelerometer เป็นเครื่องวัดความเร่งแบบมาตรฐานสามแกน ที่มีประสิทธิภาพในการวัดความถี่ในช่วงตั้งแต่ Direct current (0 Hz) จนถึง 430 Hz อีกทั้งยังมีสัญญาณรบกวนจากตัวเครื่องเองต่ำเป็นพิเศษ ซึ่งสามารถเทียบได้กับ Seismometers แบบความถี่กว้างบางรุ่นเลยทีเดียว [3]

3.1.2.3 วิธีการเก็บข้อมูลด้วยเครื่อง Titan Accelerometer ร่วมกับเครื่อง Taurus Portable Seismograph

1. นำเครื่อง Titan Accelerometer ติดตั้งตามทิศทางแนวแกนของตึกบริเวณหัวเสาบนโครงสร้างหลักเพื่อที่จะสามารถรับสัญญาณคลื่นความถี่ได้ดีที่สุด และปรับระดับพองน้ำด้วยสกรูของขาทั้งสามของตัวเครื่อง

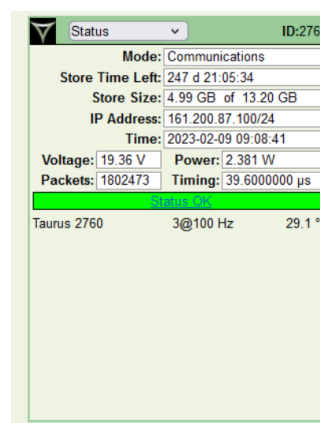
2. นำเครื่อง Taurus Portable Seismograph ติดตั้งไว้บริเวณใกล้เคียง โดยเชื่อมต่อสายจากตัวเครื่อง Titan Accelerometer ไปที่ช่อง Sensor Connector และ เชื่อมต่อสายไฟฟ้าไปที่ช่อง Power Connector จากนั้นจึงกดปุ่มกลางบน Key pad เป็นระยะเวลา 1 วินาที เพื่อเปิดเครื่อง Taurus Portable Seismograph เป็นอันเสร็จสิ้นขั้นตอนการติดตั้งเครื่องเพื่อเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนร่วมกัน

3. ติดตั้งเครื่องไว้สักประมาณหนึ่งเพื่อเก็บข้อมูลแรงสั่นสะเทือน



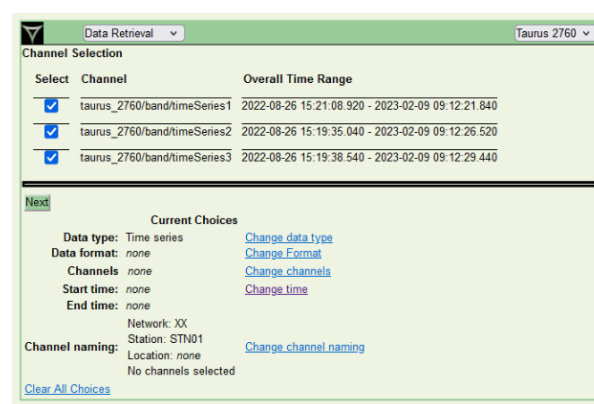
รูปที่ 3.11 ภาพเครื่อง Taurus Portable Seismograph และ Titan Accelerometer

4. เข้าเว็บ <http://161.200.87.100/> ซึ่งเป็นเว็บของตัวเครื่อง Taurus Portable Seismograph

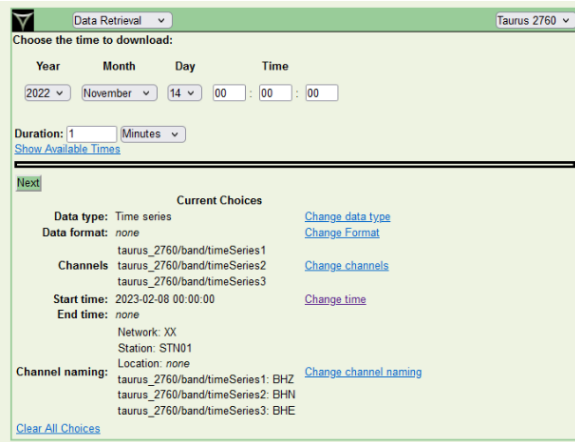


รูปที่ 3.12 ภาพหน้าเว็บ <http://161.200.87.100/>

5. เลือกหัวข้อ Data Retrieval และเลือกช่วงเวลาและทิศทางที่เราสนใจ

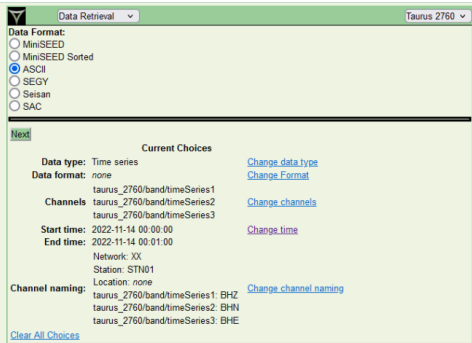


รูปที่ 3.13 ภาพแสดงหัวข้อ Data Retrieval



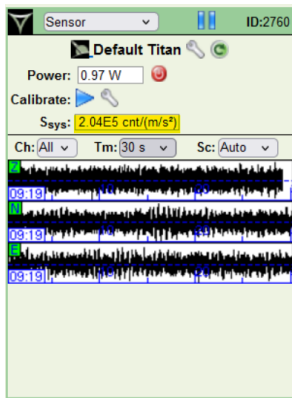
รูปที่ 3.14 ภาพการเลือกช่วงเวลาและทิศของข้อมูล

6. ความไหลคข้อมูลออกมาเป็นไฟล์ ASCII



รูปที่ 3.15 ภาพการเลือกความไหลคข้อมูลเป็นไฟล์ ASCII

7. เข้าเมนู Sensor เพื่อนำค่าปรับแก้มาปรับปรุงข้อมูลที่วัดได้



รูปที่ 3.16 ภาพค่าปรับแก้จากเครื่อง Taurus Portable Seismograph

3.1.2.4 ข้อมูลที่ได้จากเครื่อง Taurus Portable Seismograph

ข้อมูลที่ได้จากเครื่อง Taurus Portable Seismograph จะได้ออกมาเป็นไฟล์ ASCII ซึ่งเมื่อนำมาเปิดจะเปิดออกมาเป็นไฟล์ Text เพื่อนำไปใช้ต่อไป

```

StnLocChn: STN01 BHE
Network ID: XX
Site Name: STN01
Comment: ...
Sensor Type: ...
Data Format: ...
Latitude: -90.0
Longitude: -100.0
Elevation: ...
Depth: ...
Azimuth: ...
Dip: ...
Sensitivity: ...
Sens Freq: ...
Sens Units: ...
Calib Units: ...
Sample Rate: 100sps
Max Clock Drift: ...
Channel Flags: ...
Update Flag: ...
Start Valid Time: ...
End Valid Time: ...
Response File: ...
Start Time: 2023-03-31_04:19:58.1500
End Time: 2023-03-31_04:20:01.6000
Number of Samples: 346
DC Offset: ...
Max Amplitude: ...
Min Amplitude: ...
Format: YFILE
59, 27, 22, 49, 108,
64, 277, 220, 92, 112,
64, 30, -108, -108, 4,
-24, -92, -46, -63, -60,
-166, -132, -36, -145, -115,
-140, -92, -39, 32, 59,
-47, 8, 64, 115, 129,
48, 140, 117, 38, 109,
-74, 30, 99, 27, 142,
57, 90, 93, 7, -75,
-10, 57, -75, 4, -18,
-73, -2, -90, -48, 126,
64, 2, 46, 39, 37,
32, -8, -130, 10, 76,
-24, 44, -3, 93, 86,
62, 113, -2, 55, 63,
41, 24, 22, 22, -97,
-86, -54, -9, -42, -94,
51, 11, 39, 39, -172,
-32, 71, -33, -64, 28,
48, -80, 47, 88, -51,
27, 27, -61, -14, -23,
53, 16, -69, 102, -11,
-23, 73, 4, 36, 54,
102, 86, 75, 96, 169,
96, 23, 137, 17, -53,
-88, -159, -89, -64, -123,
-108, -179, -176, -38, 10
    
```

รูปที่ 3.17 ภาพตัวอย่างข้อมูลที่สามารถเก็บได้จากตึกประสม สภาปิธานนท์ ณ เวลา 11:19:58.15 (GMT+7) ในวันที่ 31 มีนาคม 2566 ตามเวลาประเทศไทย ในทิศทาง E

3.2 ทำการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติด้วยโปรแกรมภาษา Python และ MATLAB

3.2.1 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมภาษา Python เพื่อจัดระเบียบข้อมูล

3.2.1.1 Python version 3.11.1

ภาษา Python เป็นภาษาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ระดับสูงที่ถูกออกแบบมาให้เป็นภาษาสคริปต์ที่อ่านง่ายคล้ายภาษามนุษย์ สามารถใช้ในการเขียนโปรแกรมได้หลากหลายประเภทโดยไม่จำกัดอยู่ด้านใดด้านหนึ่ง (General-purpose language) นั่นจึงทำให้เป็นหนึ่งในภาษาที่ถูกใช้อย่างแพร่หลาย [4] และด้วยเหตุนี้เองในงานวิจัยชิ้นนี้จึงนำภาษา Python มาเขียนโปรแกรมเพื่อช่วยในการจัดระเบียบข้อมูลจากเครื่อง Taurus Portable Seismograph ต่อไป

3.2.1.2 การทำงานของโปรแกรม

จัดเรียงและปรับค่าด้วยค่าปรับแก้ของข้อมูลตัวเลขที่ได้จากเครื่อง Taurus Portable Seismograph ในแต่ละทิศทาง

59,	27,	22,	49,	108,
64,	277,	220,	92,	112,
64,	30,	-108,	-108,	4,
-24,	-92,	-46,	-63,	-60,
-166,	-132,	-36,	-145,	-115,
-140,	-92,	-39,	32,	59,
-47,	8,	64,	115,	129,
48,	148,	117,	36,	109,
-74,	30,	99,	27,	142,
57,	90,	93,	7,	-75,
-10,	57,	-75,	4,	-18,
-73,	-2,	-90,	-80,	126,
64,	2,	46,	39,	-37,
32,	-8,	-130,	10,	76,
-24,	44,	-3,	93,	86,
62,	113,	-2,	55,	63,
41,	24,	22,	22,	-97,
-86,	-54,	-9,	-42,	-94,
51,	11,	39,	39,	-172,
-32,	71,	-33,	-64,	28,
40,	-80,	47,	85,	-51,
27,	27,	-61,	-14,	-23,
53,	16,	-69,	102,	-11,
-23,	73,	4,	36,	54,
102,	86,	75,	96,	169,
96,	23,	137,	17,	-53,
-88,	-159,	-89,	-64,	-123,
-198,	-173,	-125,	-38,	19,
-45,	-56,	-87,	-40,	-1,
60,	60,	64,	247,	167,
116,	97,	-32,	15,	-146,
-95,	125,	143,	139,	17,
-8,	45,	-79,	-40,	111,
88,	139,	144,	50,	98,
60,	40,	-96,	-14,	-53,
-54,	-9,	-62,	-111,	-133,
-222,	-248,	-130,	-60,	-101,
-137,	-131,	-55,	-77,	-140,
-72,	-90,	-51,	-68,	-72,
118,	53,	86,	133,	103,
150,	92,	180,	190,	140,
147,	87,	149,	106,	69,
102,	53,	79,	50,	50,
5,	22,	31,	-138,	-138,
-75,	-35,	0,	-51,	-61,
-85,	-79,	-80,	-152,	-192,
-86,	8,	-6,	-37,	-39,
-113,	2,	-100,	-16,	-29,
74,	2,	47,	19,	-100,
130,	38,	57,	89,	-18,
83,	29,	103,	28,	23,
88,	65,	182,	65,	29,
0,	49,	116,	62,	121,
39,	25,	19,	-85,	-61,
-40,	-15,	-28,	-127,	-21,
-17,	-112,	-118,	-211,	-107,
-80,	-54,	40,	34,	40,
3,	130,	111,	64,	-26,
10	160	-37	3	14

รูปที่ 3.18 ภาพตัวอย่างข้อมูลก่อนปรับแก้ของตึกประสม สถาปิตานนท์ ทิศ E

3.2.1.3 อธิบายการทำงานของโปรแกรมภาษา Python

```

1 with open('Raw Data.txt', 'r') as f:
2     data = f.read()
3
4 data_clean = data.replace(' ', '').replace('\n', '').strip().split(',')
5
6 k = 204000
7
8 # data_divided = [int(x.strip())k for x in bhe_clean if x != '']
9 data_divided = list()
10 for x in data_clean:
11     if x != '':
12         data_divided.append(int(x.strip())/k)
13
14 data_str = ', '.join([str(x) for x in data_divided])
15
16 with open('Result.txt', 'w') as f:
17     f.write(data_str)
    
```

รูปที่ 3.19 ภาพโปรแกรมภาษา Python

บรรทัดที่ 1 เปิดไฟล์ชื่อ Raw Data.txt ที่เก็บข้อมูลตัวเลขก่อนปรับแก้เพื่ออ่านและเก็บไว้ในตัวแปร f

บรรทัดที่ 2 อ่านข้อมูลของตัวแปร f และเก็บไว้ในตัวแปรชื่อ data

บรรทัดที่ 4 เป็นการจัดระเบียบข้อมูลเก็บไว้ในตัวแปร data_clean โดยใช้คำสั่ง replace เพื่อตัดช่องว่างและการขึ้นบรรทัดใหม่ออก ใช้คำสั่ง strip เพื่อกำจัดช่องว่างและแยกข้อมูลด้วย “ , ” ผ่านคำสั่ง split

บรรทัดที่ 6 เป็นการประกาศตัวแปร k ให้มีค่า 204000 ซึ่งเป็นค่าปรับแก้ที่ได้จากเครื่อง Taurus Portable Seismograph

บรรทัดที่ 9 เป็นการประกาศตัวแปร data_divided เป็น list ว่า

บรรทัดที่ 10 ถึง 12 ภายใน for loop สำหรับตัวแปร x ทุกตัวใน data_clean ถ้าไม่ใช่ช่องว่างให้เปลี่ยนเป็น integer นำไปหารด้วย k และเก็บไว้ใน data_divided

บรรทัดที่ 14 เปลี่ยน x จาก integer ใน data_divided เป็น string และเก็บไว้ในตัวแปร data_str ด้วยคำสั่ง join

บรรทัดที่ 16 สร้างไฟล์ชื่อ Result.txt เพื่อเขียนเก็บไว้ในตัวแปร f

บรรทัดที่ 17 สั่งเขียน data_str ในตัวแปร f ด้วยคำสั่ง write เป็นอันจบกระบวนการ

3.2.1.4 การนำไปใช้ และตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้

บันทึกไฟล์ Raw Data.txt ไว้ใน folder เดียวกับไฟล์โปรแกรม Python (ชื่อไฟล์ Reader.py) และทำการรันโปรแกรมภาษา Python ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม Visual Studio Code เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการ ใน Folder เดียวกันจะปรากฏไฟล์ชื่อ Result.txt ซึ่งเป็นไฟล์ข้อมูลที่ปรับแก้แล้วจากนั้นก็เปลี่ยนชื่อไฟล์และนำไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

```

1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 """
3 Created on 11/11/2022
4
5 @author:
6 """
7
8 import sys
9
10 # Import the module
11 from datetime import datetime
12
13 # Define the file name
14 file_name = 'Raw Data.txt'
15
16 # Open the file
17 with open(file_name, 'r') as f:
18     # Read the file
19     data = f.read()
20
21 # Clean the data
22 data_clean = data.replace(' ', '').replace('\n', '').strip().split(',')
23
24 # Define the constant k
25 k = 204000
26
27 # Initialize the list
28 data_divided = []
29
30 # Iterate over the data
31 for x in data_clean:
32     if x != '':
33         data_divided.append(int(x.strip())/k)
34
35 # Join the list
36 data_str = ', '.join([str(x) for x in data_divided])
37
38 # Write to the file
39 with open('Result.txt', 'w') as f:
40     f.write(data_str)
    
```

รูปที่ 3.20 ภาพตัวอย่างผลลัพธ์จากไฟล์ Result.txt ที่ได้ของตึกประสม สถาปิตานนท์ ทิศ E

3.2.2 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมโดย MATLAB เพื่อวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ

3.2.2.1 MATLAB

โปรแกรม MATLAB หรือชื่อเต็มคือ MATrix LABoratory พัฒนาขึ้นโดยบริษัท MathWorks เป็นโปรแกรมสำหรับการคำนวณเชิงตัวเลข และ Visualization ที่มีประสิทธิภาพสูง มีการคำนวณภายในอยู่บนพื้นฐานของเมทริกซ์ ซึ่งใช้งานง่ายและเหมาะกับงานทางวิศวกรรม และวิทยาศาสตร์ที่มีการคำนวณอย่างซับซ้อน [5]

สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ก็จะนำโปรแกรม MATLAB เข้ามาช่วยในการหาค่าความถี่ธรรมชาติจากข้อมูลที่ได้จากโปรแกรมภาษา Python ต่อไป

3.2.2.2 การทำงานของโปรแกรม MATLAB

```

1 function I = fastft(x)
2 % Raw Data (acceleration, m/s^2) %
3
4 L = length(x); % number of samples (samples)
5 t = 0:length(x)-1;
6 Fs = 100; % sampling frequency (samples/sec)
7 f = (0:L-1)*Fs/L; % frequency (Hz, 1/s) sample/sec / samples
8
9 figure(1)
10 plot(t,x) % visualize raw data
11 grid on, xlabel('Time (0.01 sec)'), ylabel('Acceleration (m/s^2)')
12
13 % Take the FFT
14 X = fft(x); % complex numbers!!! --> angle and amplitude
15 X_norm = 1/L * X;
16
17 % Amplitude and Phase Spectrum %
18 figure(2)
19 subplot(1,2,1)
20 stem(f,abs(X_norm),'*'),xlabel('frequency (Hz)'),ylabel('Amplitude'), grid on
21 subplot(1,2,2)
22 stem(f,angle(X_norm),'x'),xlabel('frequency (Hz)'),ylabel('Phase Angle'), grid on
23
24 %%%%% A*cos(2*pi*f + phase angle) %%%%%
25
26 % Make a Table of Value (Coeffs, Freq, Amplitude, Angle) %
27 table1 = table(X_norm,'f',abs(X_norm'),angle(X_norm'));
28 table1.Properties.VariableNames = {'FFT Coeffs','Frequency','Amplitude','Phase'};
29 disp(table1)
30
31 %figure(3) is for One-side fig.2 subplot(1)
32
33 X_norm1= X_norm(1:L/2);
34 f1 = (0:L/2-1)*Fs/L;
35
36 figure(3)
37 plot(f1,abs(X_norm1),xlabel('frequency (Hz)'),ylabel('Amplitude'), grid on
38

```

รูปที่ 3.21 ภาพฟังก์ชัน fastft ในโปรแกรม MATLAB

บรรทัดที่ 1 ประกาศ function ชื่อ fastft

บรรทัดที่ 4 ถึง 7 ให้ค่าตัวแปร 4 ตัว ได้แก่ L คือจำนวนข้อมูล, t คือเวลาในหน่วยมิลิวินาที, FS คือความถี่ของการเก็บข้อมูล และ f คือความถี่ในหน่วย Hz

บรรทัดที่ 9 ถึง 11 เป็นคำสั่งสร้างรูปชื่อ figure 1 และพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง t ในแกน x กับ x ในแกน y โดยในแกน x จะตั้งชื่อแกนว่า "Time (0.01 sec)" และแกน y จะตั้งชื่อว่า "Acceleration (m/s^2)"

บรรทัดที่ 14 เป็นการให้ค่าตัวแปร X โดยใช้งานคำสั่ง fft ของ MATLAB กับข้อมูลที่ได้มาจากโปรแกรมภาษา Python ก่อนหน้านี้

หมายเหตุ fft เป็นคำสั่งทำ Fast Fourier Transform หรือการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วของโปรแกรม MATLAB

บรรทัดที่ 15 เป็นการทำ Normalize ของข้อมูลสัญญาณหลังการทำ fft โดยเก็บไว้ในตัวแปร X_norm

หมายเหตุ เมื่อมีการนำเอา Fast Fourier Transform (FFT) มาใช้กับข้อมูลสัญญาณในโปรแกรม MATLAB ผลลัพธ์ของคำสั่ง fft จะมีค่าแตกต่างกันไปตามความยาวของสัญญาณ ซึ่งนั่นหมายความว่าถ้าเรามีสองสัญญาณที่มีความถี่เท่ากันแต่มีความยาวที่แตกต่างกัน ผลลัพธ์ของคำสั่ง fft จะมีค่าที่แตกต่างกันไปด้วย และเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้ ออกมามีความหมายและสามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ จึงจำเป็นต้องทำการ Normalize ผลลัพธ์ที่ได้เสียก่อน ซึ่งสามารถทำได้ โดยการทำการหารผลลัพธ์ของคำสั่ง fft ด้วยความยาวของสัญญาณนั่นเอง

บรรทัดที่ 18 ถึง 22 เป็นคำสั่งสร้างรูป figure 2 และพล็อต 2 กราฟย่อยภายในได้แก่ กราฟฝั่งซ้ายคือกราฟความสัมพันธ์ f ในแกน x และตั้งชื่อแกนว่า "frequency (Hz)" กับ abs(X_norm) ในแกน y และตั้งชื่อแกนว่า "Amplitude" ในรูปแบบ stem และมี grid และกราฟฝั่งขวาคือกราฟความสัมพันธ์ f ในแกน x และตั้งชื่อแกนว่า "frequency (Hz)" กับ angle(X_norm) ในแกน y และตั้งชื่อแกนว่า "Phase Angle" ในรูปแบบ stem และมี grid

บรรทัดที่ 27 ถึง 29 เป็นคำสั่งสร้างตาราง table1 โดยในตารางจะมีค่า Fast Fourier Transform Coefficient ในชื่อ FFT Coeffs จากตัวแปร X_norm, ค่าความถี่ในชื่อ Frequency จากตัวแปร f, ค่าแอมพลิจูดในชื่อ Amplitude จากตัวแปร abs(X_norm), ค่า Phase Angle ในชื่อ Phase จากตัวแปร angle(X_norm)

บรรทัดที่ 33 ถึง 37 จะเป็นคำสั่งสำหรับพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับแอมพลิจูดเช่นเดียวกับกราฟฝั่งซ้ายใน figure 2 แต่แสดงเฉพาะข้อมูลแค่ครั้งเดียวที่สามารถนำมาใช้ได้จากข้อมูลทั้งหมด

3.2.2.3 การนำไปใช้ และตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้

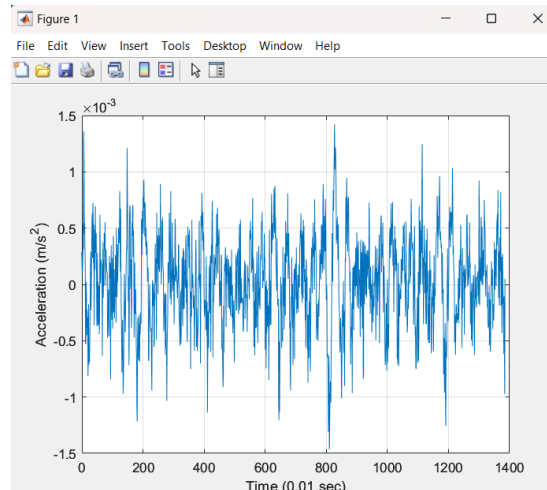
Copy ค่าจาก Result.txt ที่ได้จากโปรแกรมภาษา Python ไว้ในตัวแปร x และสั่งใช้งานฟังก์ชัน fastft กับตัวแปร x ด้วยคำสั่ง fastft(x) เป็นอันสิ้นสุดกระบวนการ


```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.
>> x = [0.0002892156862745098, 0.00013235294117647058, 0.00010784313725490196, 0.00024019607843137254
x =
Columns 1 through 10
    0.0003    0.0001    0.0001    0.0002    0.0005    0.0003    0.0014    0.0011    0.0005    0.0005
Columns 11 through 20
    0.0003    0.0001   -0.0005   -0.0005    0.0000   -0.0001   -0.0005   -0.0002   -0.0003   -0.0003
Columns 21 through 30
   -0.0008   -0.0006   -0.0002   -0.0007   -0.0006   -0.0007   -0.0005   -0.0002   0.0002   0.0003
Columns 31 through 40
   -0.0002   0.0000   0.0003   0.0006   0.0006   0.0002   0.0007   0.0006   0.0002   0.0005
Columns 41 through 50
   -0.0004   0.0001   0.0005   0.0001   0.0007   0.0003   0.0004   0.0005   0.0000   -0.0004
Columns 51 through 60
   -0.0000   0.0003   -0.0004   0.0000   -0.0001   -0.0004   -0.0000   -0.0004   -0.0002   0.0006
Columns 61 through 70

```

รูปที่ 3.22 ภาพตัวอย่างการให้ค่าตัวแปร x ด้วยข้อมูลจากโปรแกรม ภาษา Python ที่ได้ของตึกประสม สถาปิตานนท์ ทิศ E



รูปที่ 3.24 ภาพตัวอย่างผลลัพธ์ figure 1 ที่ได้ของตึกประสม สถาปิตานนท์ ทิศ E

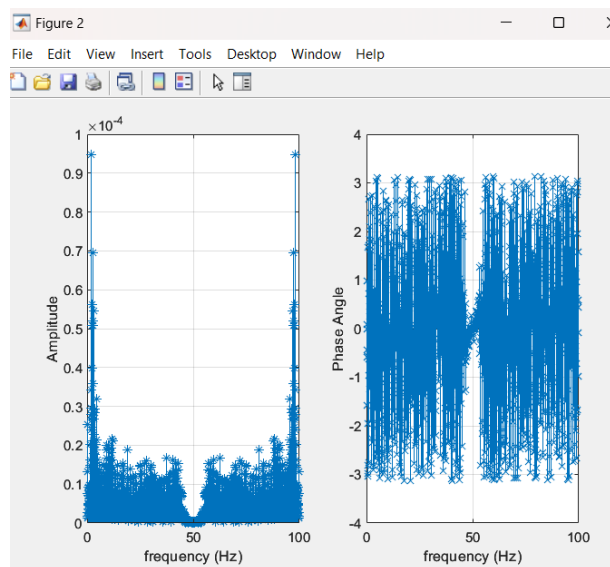
```

Command Window
New to MATLAB? See resources for Getting Started.
>> fastft(x)

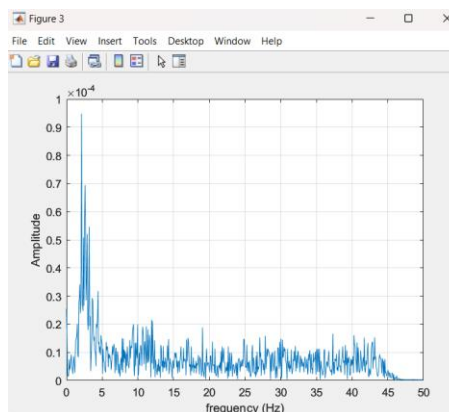
```

FFT Coeffs	Frequency	Amplitude	Phase
2.5458e-05+0i	0	2.5458e-05	0
7.3631e-06-1.1027e-05i	0.07215	1.326e-05	-0.98207
-2.8373e-09+2.6904e-06i	0.1443	2.6904e-06	1.5719
1.1246e-06+7.6456e-07i	0.21645	1.3599e-06	0.59707
1.7939e-06-1.4538e-07i	0.2886	1.7998e-06	-0.080867
6.7931e-06+3.1777e-06i	0.36075	7.4996e-06	0.43754
-3.7113e-06+4.0376e-07i	0.4329	3.7332e-06	3.0332
3.95e-06+2.5153e-06i	0.50505	4.6829e-06	0.56704
-6.9977e-06+1.1472e-06i	0.5772	7.0911e-06	2.9791
-8.759e-07-9.2448e-06i	0.64935	9.2862e-06	-1.6653
-1.883e-06+4.6044e-06i	0.7215	4.9745e-06	1.959
-4.2504e-06+1.4559e-06i	0.79365	4.4928e-06	2.8116
1.3524e-06+1.9171e-06i	0.8658	2.3461e-06	0.95644
4.7303e-06-4.122e-06i	0.93795	6.2742e-06	-0.71679
-8.053e-06+3.2096e-06i	1.0101	8.6691e-06	2.7623
-7.426e-07-5.662e-06i	1.0823	5.7104e-06	-1.7012
2.226e-06+1.6355e-06i	1.1544	2.7622e-06	0.63365
-8.6175e-06-4.4093e-06i	1.2266	9.68e-06	-2.6687
1.2821e-05-6.4e-06i	1.2987	1.4329e-05	-0.46301
-8.3345e-07-1.4763e-05i	1.3709	1.4786e-05	-1.6272
1.5705e-05-4.1725e-06i	1.443	1.625e-05	-0.25967
-5.2787e-06-1.9482e-05i	1.5152	2.0184e-05	-1.8354
2.8839e-06+8.4463e-06i	1.5873	8.925e-06	1.2418
-4.1181e-06-7.1117e-06i	1.6595	8.2179e-06	-2.0957
-2.5527e-05-1.1266e-05i	1.7316	2.7903e-05	-2.726

รูปที่ 3.23 ภาพตัวอย่างการสั่งใช้คำสั่ง fastft(x) และผลลัพธ์ table 1 ที่ได้ของตึกประสม สถาปิตานนท์ ทิศ E



รูปที่ 3.25 ภาพตัวอย่างผลลัพธ์ figure 2



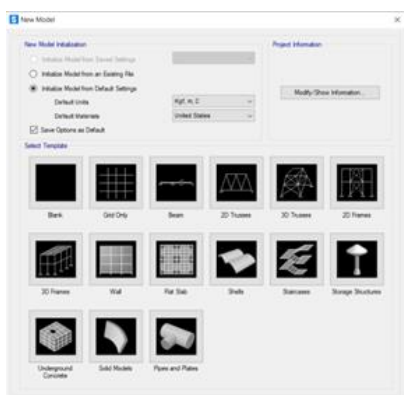
รูปที่ 3.26 ภาพตัวอย่างผลลัพธ์ figure 3

3.3 ทำการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติของตึกด้วยโปรแกรม SAP2000

SAP2000 เป็นโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างซึ่งสามารถใช้สำหรับปัญหาที่ง่ายที่สุดไปจนถึงโครงการที่ซับซ้อนที่สุด SAP2000 มีระบบพื้นฐานและขั้นสูงตั้งแต่ 2D และ 3D และสภาพแวดล้อมการสร้างแบบจำลองวัตถุที่ใช้งานง่ายที่ลดความซับซ้อนของกระบวนการทางวิศวกรรม สามารถใช้สำหรับการออกแบบระบบโครงสร้าง และเป็นซอฟต์แวร์วิศวกรรมโยธาขั้นสูงที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบ และวิเคราะห์ระบบโครงสร้างทุกประเภท พร้อมคุณสมบัติการวิเคราะห์ที่ซับซ้อนการกำหนด

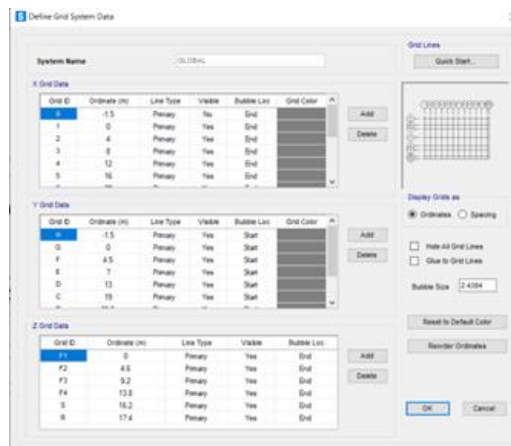
3.3.1 ขั้นตอนจำลองโมเดลโครงสร้างตึกโดยโปรแกรม SAP2000

1. การเริ่มต้นใช้งานโปรแกรม SAP2000 ให้กดที่คำสั่ง New Model ให้หน้าจอขึ้นดังรูปที่ 3.X จากนั้นเลือกใช้หน่วยเป็น Kgf, m, C และเลือก Template เป็น Blank เพื่อให้ง่ายต่อการจำลองโมเดลตึก



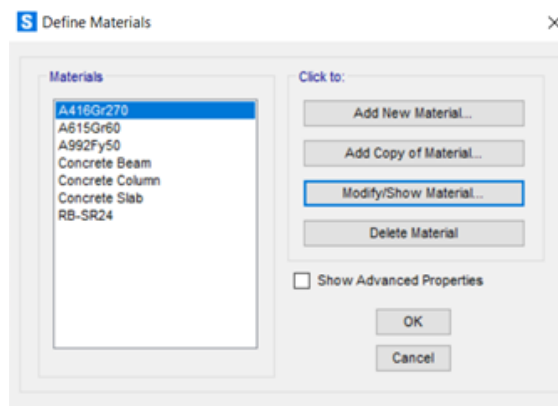
รูปที่ 3.27 ภาพการตั้งค่าหน้าโมเดลตึก

2. การสร้าง Grid Line ให้คลิกขวา 1 ครั้งแล้วเลือกคำสั่ง Edit Grid Data จากนั้นเลือกคำสั่ง Modify/Show System เพื่อตั้งค่า Grid Line ให้ตรงกับแบบโครงสร้างอาคารที่ทำการวิเคราะห์



รูปที่ 3.28 ภาพตัวอย่าง Grid line ของอาคารประสม สถาปัตตานนท์

3. การตั้งค่าคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ ให้เลือกคำสั่ง Define แล้วเลือกคำสั่ง Materials เพื่อตั้งค่าคุณสมบัติวัสดุต่อไป



รูปที่ 3.29 ภาพตัวอย่างการตั้งค่าคุณสมบัติวัสดุของอาคารประสม สถาปัตตานนท์

ในการตั้งค่าคุณสมบัติวัสดุให้ตั้งค่าตามแบบโครงสร้างของอาคารที่ใช้วิเคราะห์ ดังนี้

3.1 อาคารประสม สถาปัตตานนท์

$$\text{Unit weight of Reinforced Concrete} = 2400 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Concrete Compressive Strength of Slab}(f_c) = 122 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Concrete Compressive Strength of Beam}(f_c) = 99 \text{ kg/cm}^2$$

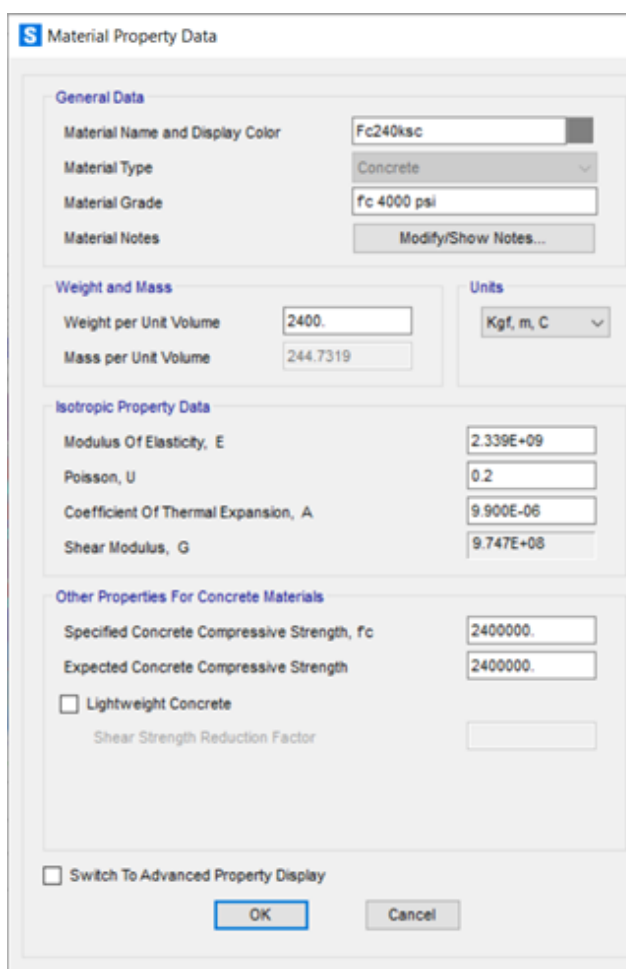
$$\text{Concrete Compressive Strength of Column}(f_c) = 96 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Yield Strength of Reinforcing Steel – Round Bar}(f_y) = 2400 \text{ kg/cm}^2$$

3.2 อาคารภาควิชาวิศวกรรมโยธา

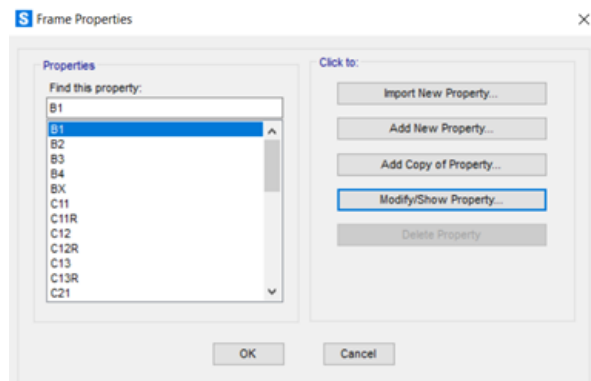
$$\text{Unit weight of Reinforced Concrete} = 2400 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Concrete Compressive Strength}(f_c) = 240 \text{ kg/cm}^2$$

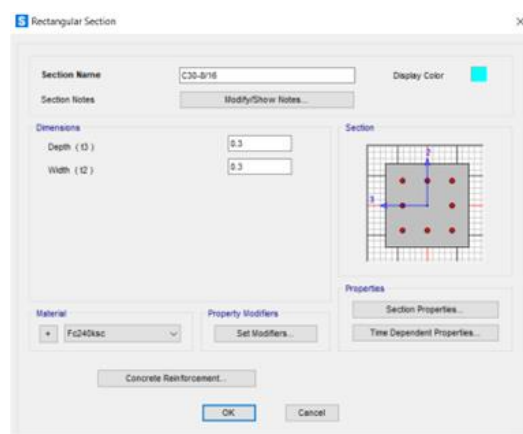


รูปที่ 3.30 ภาพตัวอย่างการตั้งค่าคุณสมบัติวัสดุคอนกรีตของอาคารภาควิชาวิศวกรรมโยธา

4. การกำหนดขนาดของหน้าตัดที่ใช้ในโครงสร้าง ให้เลือกคำสั่ง Define แล้วเลือกคำสั่ง Section Properties จากนั้นเลือก Frame Sections เพื่อตั้งค่าคุณสมบัติวัสดุต่อไป



รูปที่ 3.31 ภาพตัวอย่างการกำหนดขนาดของหน้าตัดของอาคารประสม สถาปัตยกรรม



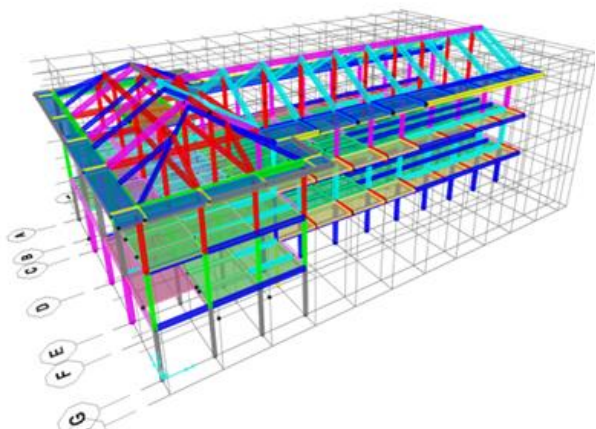
รูปที่ 3.32 ภาพตัวอย่างการกำหนดขนาดของหน้าตัดประเภทเสาของอาคารภาควิชาวิศวกรรมโยธา

สำหรับโครงสร้างของอาคารประสม สถาปัตยกรรม มีการกำหนดหน้าตัดของพื้นด้วยการใช้คำสั่งเดิมแต่เปลี่ยนคำสั่งจาก Frame Sections เป็น Area Sections

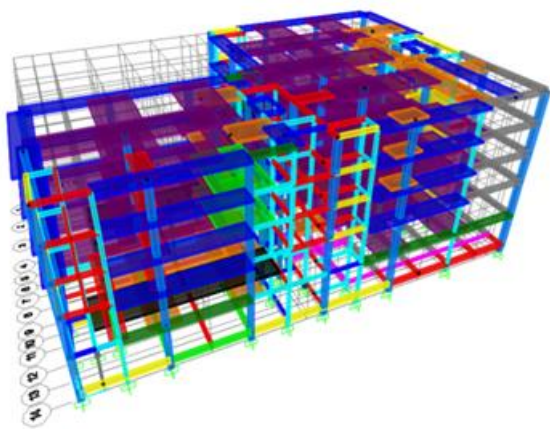
5. การวาดโครงสร้างเสาและคาน ให้เลือกคำสั่ง Draw Frame/Cable จากนั้นให้เลือกหน้าตัดที่ต้องการวาดที่ช่อง Section แล้วเลือกหน้าตัดที่ต้องการวาดได้ตามแบบโครงสร้างของอาคาร

Properties of Object	
Line Object Type	Straight Frame
Section	C11
Moment Releases	Continuous
Local Axis Rotation	0.
XY Plane Offset Normal	0.
Drawing Control Type	None <space bar>

รูปที่ 3.33 ภาพคำสั่งการวาดโครงสร้างเสาและคาน



รูปที่ 3.34 แบบจำลองโครงสร้างอาคารประสม สถาปัตยกรรม



รูปที่ 3.35 แบบจำลองโครงสร้างอาคารภาควิศวกรรมโยธา

สำหรับโครงสร้างของอาคารประสม สถาปัตยกรรม มีการวาดหน้าตัดของพื้นด้วยการใช้คำสั่ง Draw Rectangular Area ในการวาดในส่วนของพื้น

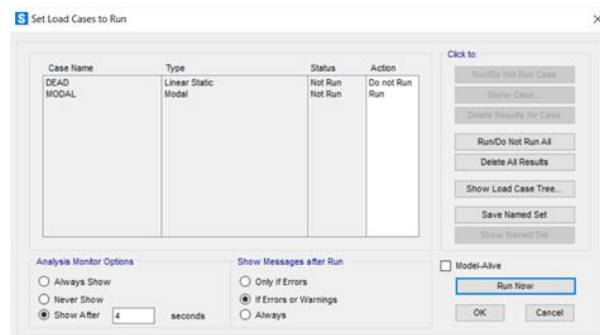
Properties of Object	
Section	S2

รูปที่ 3.36 ภาพคำสั่งการวาดโครงสร้างพื้น

3.3.2 ขั้นตอนวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ ด้วยโปรแกรม SAP2000

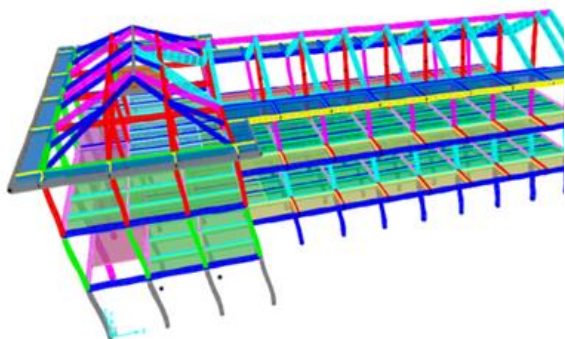
หลังจากที่ทำการจำลองโมเดลโครงสร้างอาคารเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ ด้วยโปรแกรม SAP2000

- 1 การ run โครงสร้างอาคาร ให้ใช้คำสั่ง Run Analysis สำหรับในการวิเคราะห์โครงสร้าง

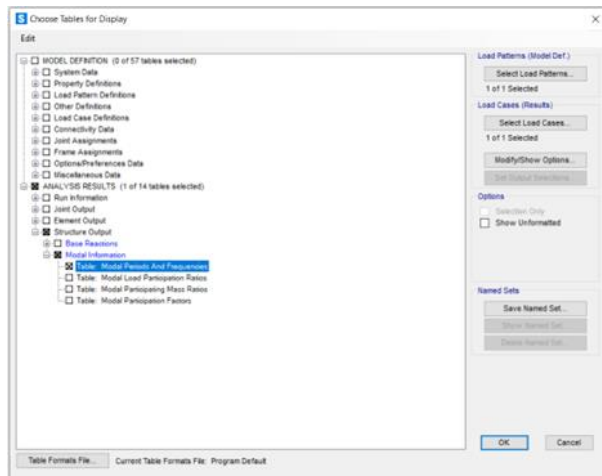


รูปที่ 3.37 ภาพคำสั่งการ run โครงสร้าง

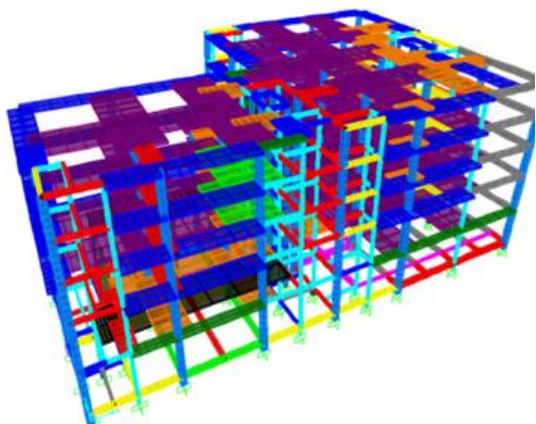
โดยก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ ให้เลือก Action เฉพาะ Modal ให้เป็น Run จากนั้นให้กดคำสั่ง Run Now เพื่อเริ่มวิเคราะห์โครงสร้าง



รูปที่ 3.38 ภาพตัวอย่างการ run โครงสร้างอาคารประสม สถาปิตานนท์



รูปที่ 3.40 ภาพคำสั่งการเลือกตารางแสดงผล



รูปที่ 3.39 ภาพตัวอย่างการ run โครงสร้างอาคารภาควิชาชีพกรรมโยธา

OutputCase	StepType	StepNum	Period Sec	Frequency Cycles	CntFreq rad/sec	Eigenvalue rad/sec ²
MODAL	Mode	1	1.82033	0.41174099	3.8823865	14.871038
MODAL	Mode	2	1.49258	0.6827976	4.5073977	18.538349
MODAL	Mode	3	1.229789	0.81316074	5.1823365	26.184209
MODAL	Mode	4	0.991789	1.05421854	6.5068115	39.8122029
MODAL	Mode	5	0.889151	1.18854774	7.2291045	52.2589541
MODAL	Mode	6	0.859115	1.33810765	8.8641538	83.3878591
MODAL	Mode	7	0.644828	1.55273232	9.75910493	95.1815828
MODAL	Mode	8	0.596579	1.8925443	18.6398285	113.188801
MODAL	Mode	9	0.547427	1.8267465	11.4792899	131.748528
MODAL	Mode	10	0.515421	1.94518338	12.1894691	148.888002
MODAL	Mode	11	0.473952	2.1125531	13.2854023	175.971058
MODAL	Mode	12	0.463302	2.15888797	13.5646866	184.908833

รูปที่ 3.41 รายการ Frequency และ Mode Shape ของอาคารประสม สถาปิตานนท์

2 การดึงข้อมูลการวิเคราะห์ค่าความถี่ให้
เลือกคำสั่ง Display แล้วเลือก Show
Table จากนั้นให้เลือกคำสั่งตั้งรูปที่ 3.X
แล้วกด OK

OutputCase	StepType	StepNum	Period Sec	Frequency Cycles	CntFreq rad/sec	Eigenvalue rad/sec ²
MODAL	Mode	1	1.528749	0.65432698	4.11921728	16.8822421
MODAL	Mode	2	1.55076	0.68828195	4.18868921	17.8281980
MODAL	Mode	3	1.352866	0.73917185	4.64435250	21.5781911
MODAL	Mode	4	0.44229	2.28098876	14.2982027	201.81253
MODAL	Mode	5	0.438957	2.27812844	14.3138895	204.887483
MODAL	Mode	6	0.398057	2.50747816	15.7549489	248.218449
MODAL	Mode	7	0.348296	2.93859167	18.4837180	340.908810
MODAL	Mode	8	0.312779	3.1974510	20.6882551	403.537990
MODAL	Mode	9	0.288723	3.48352218	21.7818817	473.82543
MODAL	Mode	10	0.268769	3.74856591	23.5528543	554.748714
MODAL	Mode	11	0.248532	4.02362798	25.2811844	638.138793
MODAL	Mode	12	0.248798	4.15444215	26.1831286	681.373389

รูปที่ 3.42 รายการ Frequency และ Mode Shape ของอาคารภาควิชาชีพกรรมโยธา

4. ผลการวิจัย

จากการดำเนินการวิจัยเพื่อตรวจสอบความสามารถในการใช้งานของอาคารด้วยการตรวจวัดการสั่นสะเทือนของอาคาร เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติจากโครงสร้างของอาคารของอาคารทั้งสองหลัง อันได้แก่ อาคารประสมสถาปัตยกรรม และอาคารวิชาภาควิชาวิศวกรรมโยธา ณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยนั้น ได้ผลการวิจัยแบ่งออกมาแต่ละหัวข้อดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติด้วยเครื่องตรวจวัดแรงสั่นสะเทือน

จากวิธีการตั้งที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ถึงวิธีการเก็บข้อมูลด้วยเครื่อง Taurus Portable Seismograph ร่วมกับเครื่อง Titan Accelerometer และประมวลผลด้วยโปรแกรมภาษา Python และโปรแกรม MATLAB ได้ให้ผลดังนี้

1. ตึกภาควิชาวิศวกรรมโยธา

ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล 10 วินาที

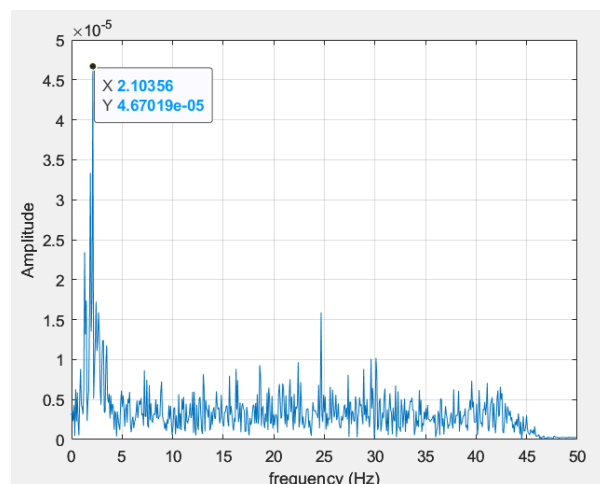
ช่วงเวลาของข้อมูล

วันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2566

เวลาเริ่มต้น 16:59:59.1600

เวลาสิ้นสุด 17:00:11.5100

ทิศทาง E

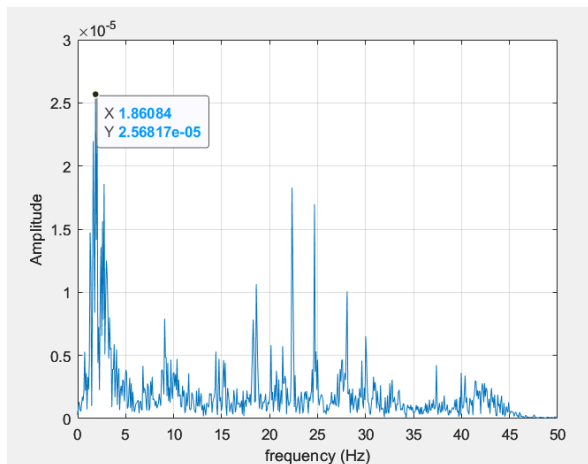


รูปที่ 4.1 ความถี่จากการสั่นสะเทือนของตึกภาควิชาวิศวกรรมโยธาในทิศ E

ตารางที่ 1 รายการ Peak Frequency ต่อจาก 1st Dominant Frequency ของตึกภาควิชาวิศวกรรมโยธาในทิศ E

No.	Frequency (Hz)
1	2.1036
2	2.2654
3	2.4272
4	2.589
5	2.7508
6	2.9126
7	3.0744
8	3.2362
9	2.2981
10	3.5599
11	3.7217
12	3.8835
13	4.0453
14	4.2071
15	4.3689
16	4.5307
17	4.6926
18	4.8544
19	5.0162
20	5.178

ทิศทาง N



รูปที่ 4.2 ความถี่จากการสั่นสะเทือนของตึกภาควิชาวิศวกรรมโยธาในทิศ N

ตารางที่ 2 รายการ Peak Frequency ต่อจาก 1st Dominant Frequency ของตึกภาควิชาวิศวกรรมโยธาในทิศ N

No.	Frequency (Hz)
1	1.8608
2	2.0227
3	2.1845
4	2.3463
5	2.5081
6	2.6699
7	2.8317
8	2.9935
9	3.1553
10	3.3172
11	3.479
12	3.6408
13	3.8026
14	3.9644
15	4.1262

16	4.288
17	4.4498
18	4.6117
19	4.7735
20	4.9353

2. ตึกประสม สถาปัตยกรรม

ระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล 10 วินาที

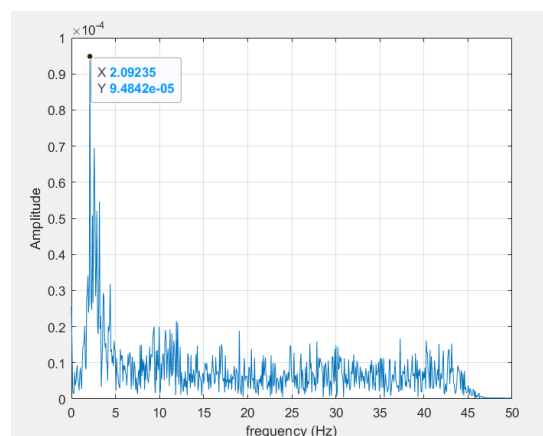
ช่วงเวลาของข้อมูล

วันที่ 31 มีนาคม 2566

เวลาเริ่มต้น 11:19:58.1500

เวลาสิ้นสุด 11:20:01.6000

ทิศทาง E



รูปที่ 4.3 ความถี่จากการสั่นสะเทือนของตึกประสม สถาปัตยกรรมในทิศ E

ตารางที่ 3 รายการ Peak Frequency ต่อจาก 1st Dominant Frequency ของตึกประสม สถาปัตยกรรมในทิศ E

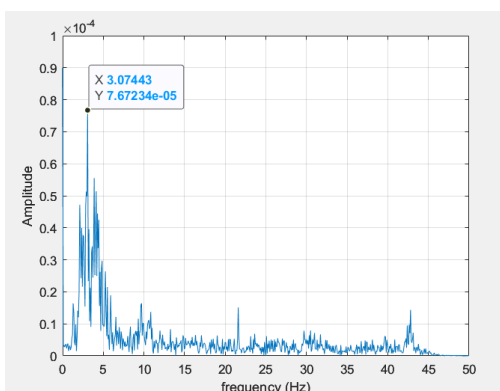
No.	Frequency (Hz)
1	2.0924
2	2.2367
3	2.381

4	2.5253
5	2.6696
6	2.8139
7	2.9582
8	3.1025
9	3.2468
10	3.3911
11	3.5354
12	3.6797
13	3.824
14	3.9683
15	4.1126
16	4.2569
17	4.4012
18	4.5455
19	4.6898
20	4.8341

ตารางที่ 4 รายการ Peak Frequency ต่อจาก 1st Dominant Frequency ของตึกประสม สถาปิตานนท์ในทิศ N

No.	Frequency (Hz)
1	3.0744
2	3.2362
3	3.3981
4	3.5599
5	3.7217
6	3.8835
7	4.0453
8	4.2071
9	4.3689
10	4.5307
11	4.6926
12	4.8544
13	5.0162
14	5.178
15	5.3398
16	5.5016
17	5.6634
18	5.8252
19	5.9871
20	6.1489

ทิศทาง N



รูปที่ 4.4 ความถี่จากการสั่นสะเทือนของตึกประสม สถาปิตานนท์ใน

ทิศ N

จากกราฟและค่าที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงความถี่ต่าง ๆ ที่ซ่อนตัวอยู่และถูกแยกออกมาด้วยการทำ Fast Fourier Transform โดยปกติแล้วหากโครงสร้างของเราเป็น SDOF (Single Degree Of Freedom) ความถี่ที่มีค่า Amplitude สูงที่สุดจะเป็นตัวแทน Natural Frequency ของโครงสร้างแต่โครงสร้างในงานชิ้นนี้เป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนและมี DOF มากกว่าหนึ่ง หรือก็คือเป็นโครงสร้างแบบ

MDOF(Multiple Degree Of Freedom) ที่แต่ละชั้นหรือ Story จะมี Natural Frequency ของตนเองทำให้เราต้องพิจารณาถึง Mode Shape ด้วยว่าแท้จริงแล้วค่าที่เราตรวจวัดมาได้นั้นมาจากการสั่นไหวประเภทไหน

ในส่วนของผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นอีกด้วยว่าความถี่จาก Mode Shape หลักของตึกประสมสถาปัตยกรรมที่มีค่ามากกว่าความถี่หลักจากตึกภาควิชาวิศวกรรมโยธา ซึ่งทำให้ข้อมูลที่ได้ในส่วนนี้ค่อนข้างมีความน่าเชื่อถือและความสมเหตุสมผลเนื่องจากตึกที่มีความสูงมากกว่าย่อมมีความถี่ต่ำกว่าเป็นธรรมดาแน่นอน

4.2 ผลการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติด้วยโปรแกรม SAP2000

โปรแกรม SAP2000 สามารถทำการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติและ Mode Shape ออกมาได้ซึ่งในส่วนเบื้องหลังของโปรแกรมในการใช้หา Modal Damping นั้นเป็นวิธี Stiffness Weight หรือที่เรียกว่า Composite Modal Damping ซึ่งใช้สำหรับวิเคราะห์ Time History ต่อไป โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติด้วยโปรแกรม SAP2000 มีผลออกมาดังนี้

ตารางที่ 5 รายการ Frequency และ Mode Shape ของตึกภาควิชาวิศวกรรมโยธาด้วยโปรแกรม SAP2000

No.	Frequency (Hz)
1	0.6541
2	0.6663
3	0.7392
4	2.2610
5	2.2781
6	2.5075
7	2.9386
8	3.1971
9	3.4635
10	3.7486
11	4.0236
12	4.1544

จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า Natural Frequency ที่ได้ในสาม Mode Shape แรกเกิดขึ้นจากการสั่นในทิศทางต่าง ๆ ดังนี้ ใน Mode Shape อันดับหนึ่งนั้นมีการสั่นในทิศตะวันออกเฉียงเหนือ-ตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งเป็นทิศทางในแนวแกนแข็งของตึก การสั่นใน Mode Shape อันดับที่สองเป็นการสั่นในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งเป็นทิศทางตามแนวแกนอ่อนของตึก และการสั่นใน Mode Shape อันดับที่สามเป็นการสั่นแบบมี Torsion รวมอยู่ด้วย ก่อนที่การสั่นใน Mode Shape อันดับถัด ๆ ไปจะเริ่มวิเคราะห์ยากขึ้น

ตารางที่ 6 รายการ Frequency และ Mode Shape ของตึกประสมสถาปัตยกรรมที่ด้วยโปรแกรม SAP2000

No.	Frequency (Hz)
1	0.6137
2	0.6853
3	0.8132
4	1.0042
5	1.1505
6	1.5381
7	1.5527
8	1.6933
9	1.8268
10	1.9402
11	2.1113
12	2.1589

จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า Natural Frequency ที่ได้ในสาม Mode Shape แรกเกิดขึ้นจากการสั่นในทิศทางต่าง ๆ ดังนี้ ใน Mode Shape อันดับหนึ่งนั้นมีการสั่นในทิศตะวันออก-ตะวันตก ซึ่งเป็นทิศทางในแกนแนวอ่อน การสั่นใน Mode Shape อันดับที่สองเป็นการสั่นที่มีส่วนประกอบของการบิดหรือ Torsion และการสั่นใน Mode Shape อันดับที่สามเป็นการสั่นแบบมี Torsion รวมอยู่ด้วยซึ่งมีความคล้ายคลึงกับในกรณีของ Mode Shape อันดับที่สอง

4.3 การอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

ในการทำงานวิจัยชิ้นนี้เนื่องจากได้มีข้อจำกัดในเรื่องของเวลาและการเก็บรวบรวมข้อมูลทำให้ข้อมูลความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างของตึกด้วยโปรแกรม SAP2000 นั้นมีจุดที่ไม่สมบูรณ์นักอยู่หลายจุด ซึ่งส่วนหลัก ๆ นั้นอันได้แก่

1. Load

ขอบเขตของงานวิจัยชิ้นนี้มีการคำนึงถึง Load แต่ประเภทเดียวคือ Dead Load ซึ่งไม่ได้มีการรวม Superimposed Dead Load และ Live Load ด้วย ซึ่งจากสมการระหว่าง Metrix Mode Shape และ Stiffness แสดงเห็นว่า Load นั้นมีผลต่อความถี่ผลลัพธ์ที่ได้ออกมา

2. Fixed Foundation

ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SAP2000 เราไม่ได้มีการคำนึงถึงชนิดของฐานรากและลักษณะของดินที่จะทำให้เกิดผลต่อความถี่ผลลัพธ์ที่ได้

3. Prestress Concrete Slab

ในส่วนของตึกภาคทวิวิศวกรรมโยธานั้น โครงสร้างพื้นตั้งแต่ชั้นที่ 2 ขึ้นไปนั้นจะเป็น Prestress Concrete Slab แต่ถึงแม้จะได้ใส่เป็น Prestress Concrete Slab แต่ก็มีกรรมวิธีใส่คานเพื่อทดแทนในส่วนของ Stiffness และ Dead Load ของพื้นเป็นที่เรียบร้อย

4. ข้อมูลโครงสร้างที่ไม่เพียงพอ

จากแบบแปลนโครงสร้างของทั้งสองตึกมีข้อสงสัยได้ถึง ความไม่ถูกต้องของแบบแปลนในบางส่วน ซึ่งส่งผลให้การพัฒนาโมเดลโครงสร้างตึกภายในโปรแกรม SAP2000 นั้นต้องมีการสมมุติอยู่หลายส่วน อีกทั้งในส่วนของตึกประสม สถาปัตงานนั้นแบบแปลนโครงสร้างที่ได้ก็มาจากการสำรวจใหม่ในภายหลังซึ่งยังมีข้อมูลที่ไม่เพียงพออีกด้วย

ด้วยสาเหตุในช่วงต้นทำให้ผลลัพธ์ที่ได้นั้นอาจไม่แม่นยำนัก แต่ก็เพียงพอที่จะนำมาวิเคราะห์ได้

อีกทั้งในการวิจัยครั้งนี้ยังติดปัญหาอีกอย่างนั่นก็คือการไม่สามารถสรุปผลจากความถี่ที่ตรวจวัดได้ด้วยเครื่องตรวจวัดแรงสั่นสะเทือน แม้ในท้ายที่สุดของการทำการวิจัยจะทำให้เราทราบความถี่ต่าง ๆ ที่ทับซ้อนกันของตึกทั้งสอง แต่นั่นกลับไม่เพียงพอที่จะเอามาเปรียบเทียบกับความถี่ธรรมชาติที่ได้จากโปรแกรม SAP2000 เนื่องจาก ไม่สามารถทราบ Mode Shape ของความถี่นั้น ๆ ได้นั่นเอง

ซึ่งวิธีการแก้ไขอาจทำได้โดยการติดตั้งเครื่องตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนไว้หลาย ๆ จุดในตัวตึกที่ต้องการศึกษา เพื่อท้ายที่สุดแล้วจะสามารถเชื่อมโยงการเคลื่อนไหวของแต่ละจุด ณ เวลาเดียวกันและด้วยการวิเคราะห์เพิ่มเติมก็อาจจะทำให้สามารถระบุ Mode Shape ของความถี่นั้น ๆ ได้ต่อไป

5.สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้จัดทำขึ้นเพื่อตรวจสอบความสามารถในการใช้งานของอาคารด้วยการตรวจวัดการสั่นสะเทือนของอาคารเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติจากโครงสร้างของอาคารเพื่อเป็นแนวทางในการตรวจสอบสภาวะการใช้งานของอาคาร แต่ด้วยสาเหตุต่าง ๆ ทำให้งานชิ้นนี้ไม่สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งเอาไว้ได้

จากการวิจัยทำให้ได้ทราบถึงความถี่ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนและยังได้ทราบถึงความถี่ที่เกิดจากโครงสร้างของตึกทั้งสอง อีกทั้งข้อจำกัดจากการพัฒนาโมเดลครั้งนี้เพื่อใช้พัฒนาในอนาคต ตัวอย่างเช่นการระบุ Load ให้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น การศึกษาถึงลักษณะฐานรากและการศึกษาลักษณะดินที่ตั้งของอาคารเองก็มีส่วนช่วยในเรื่องความแม่นยำของความถี่จากโครงสร้างของตึกด้วย และหากตั้งใจจะทำหัวข้อนี้ก็ควรจะเลือกวิจัยกับตึกที่มีแบบแปลนโครงสร้างที่ชัดเจน

และสิ่งที่ทำให้งานชิ้นนี้ไม่สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ได้ก็คือการไม่สามารถระบุ Mode Shape ของความถี่ที่เก็บมาจากเครื่องตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนได้ ทำให้การเปรียบเทียบระหว่างความถี่ที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างของตึกด้วยโปรแกรม SAP2000 และความถี่จากเครื่องตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนไม่สามารถทำได้นั่นเอง

แต่นั่นก็ทำให้มองเห็นแนวทางในอนาคตสำหรับผู้สนใจจะศึกษาต่อในการเก็บข้อมูลด้วยเครื่องสั่นสะเทือนนั้นสาเหตุที่ทำให้ไม่สามารถทราบ Mode Shape นั้นมาจากการที่เราเก็บข้อมูลเพียงตำแหน่งเดียว ทางแก้ปัญหาก็คือการติดตั้งเครื่องตรวจวัดแรงสั่นสะเทือนไว้หลาย ๆ จุดในตัวตึกที่ต้องการศึกษา เพื่อท้ายที่สุดแล้วจะสามารถเชื่อมโยงการเคลื่อนไหวของแต่ละจุด ณ เวลาเดียวกันและด้วยการวิเคราะห์เพิ่มเติมก็อาจจะทำให้สามารถระบุ Mode Shape ของความถี่นั้น ๆ ได้และสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้ได้ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

[1] ส่วนเสียงและความสั่นสะเทือน กองจัดการคุณภาพอากาศและเสียง กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. คู่มือการตรวจวัดความสั่นสะเทือนเพื่อป้องกันผลกระทบต่ออาคาร. กรุงเทพมหานคร: ซีซี จำกัด, 2564

[2] Nanometric. *Taurus Portable Seismograph User Guide*. Kanata Ontario Canada: 2007.

[3] Nanometrics. (n.d.). Titan. Nanometrics Inc.

<https://nanometrics.ca/products/accelerometers/titan>

[4] Division of Engineering Brown University. (n.d.). EN4: Dynamic and Vibrations.

https://www.brown.edu/Departments/Engineering/Courses/En4/notes_old/Freevibes/freevibes.html

[5] มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (24 พฤษภาคม 2011). การใช้ Matlab ในการคำนวณทางวิศวกรรม. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.

<https://pirun.ku.ac.th/~fengslj/02212471/doc54a/chap01.pdf>

[6] รศ.ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี. (2564). เอกสารประกอบการสอนวิชา Dynamic Structure

[7] [เอกสารไม่ได้ตีพิมพ์]. สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[8] Phil Parisi. (2021, November 2). 2021 Fourier Transforms FFT in MATLAB | MATLAB Tutorial.

<https://www.youtube.com/watch?v=2kvemW3W1Vk>

[9] Sarayut Nonsiri, PhD. (ม.ป.ป.). ภาษาโปรแกรม Python คืออะไร. 9Expert Training.

<https://www.9experttraining.com/articles/python-คืออะไร>

[10] กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. มยผ. 1301/1302-61. ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร: เอส.พี.เอ็ม. การพิมพ์ จำกัด, 2564.

[11] กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. มยผ.1902-62. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2562.

[12] Computer & Structures. *CSI Analysis Reference Manual (ver.19)*. Berkeley California USA: 2016.

[13] อธิวัฒน์ มณีรัตน์โรจน์ และ พัทธพงษ์ อาสนจินดา. (2560). การทดสอบภาคสนามการหาความถี่ธรรมชาติของสะพาน จากผลตอบสนองความถี่ของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล

[14] ราชกิจจานุเบกษา. (2553). ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติฉบับที่ ๓๗ กำหนดมาตรฐานความสั่นสะเทือนเพื่อป้องกันผลกระทบต่ออาคาร