การศึกษาผลกระทบของความสั่นสะเทือนและคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารสูงในกรุงเทพมหานคร
A study of the impact of vibration velocity and dynamic properties of high-rise buildings in Bangkok

ภานุกร มหาลีลากุล[1] ณัฐศรณ์ กมลาศานิต[2] พสิษฐ์ คูสุวรรณ[3] และ รศ. ดร. วิทิต ปานสุข[4]

[1,2,3,4] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีกิจกรรมต่างๆที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นมากมาย ทั้งจากภายในอาคารที่เราอาศัยอยู่และรอบๆอาคารที่เราอยู่อาศัย เช่น การทำงานของเครื่องจักรภายในอาคาร การก่อสร้างในบริเวณรอบๆอาคาร การจราจร การสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว การสั่นสะเทือนเหล่านี้อาจทำให้เกิดความเสียหายทั้งต่อตัวอาคาร และต่อตัวผู้คน การศึกษานี้ได้ทำการตรวจวัดค่าความสั่นสะเทือนของอาคารสูงในกรุงเทพมหานคร จำนวน 6 อาคาร โดยมีความสูงระหว่าง 56-120 เมตร โดยทำการตรวจวัดความสั่นสะเทือน ตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 37 โดยวิเคราะห์หาค่าการสั่นสะเทือนที่มากที่สุด (Peak Particle Velocity) รวมถึงพิจารณาค่าความถี่ของแรงสั่นสะเทือนที่ส่งผลกระทบต่ออาคาร เพื่อประเมินความยอมรับได้ต่อการสั่นไหวไหวที่เกิดขึ้น อีกทั้งยังศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารที่ตอบสนองต่อสถาวะใช้งาน ผลการศึกษาพบว่าในสภาวะใช้งานปกติของอาคารมีขนาดของความสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นไม่เกินกว่าค่ามาตรฐานกำหนด แม้บางอาคารมีกิจกรรมของโครงการก่อสร้างใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน โดยพบว่าแรงสั่นสะเทือนของกิจกรรมดังกล่าวมีค่าคาบการสั่นใกล้เคียงกับคาบการสั่นไหวธรรมชาติของอาคาร แต่เนื่องจากความแรงของการสั่นสะเทือนมีขนาดน้อยมากจึงไม่ส่งผลกระตุ้นให้เกิดการสั่นไหวอย่างรุนแรงได้

คำสำคัญ: การการสั่นสะเทือน, ค่าความเร็วอนุภาคสูงสุด, , คาบการสั่นไหวธรรมชาติ, อาคารสูง , การสั่นพ้อง

Abstract

Nowadays, there are many activities that cause the vibrations. Both from inside the building and around the building, such as the working of the machines inside the building, Construction of in the area around the building, traffic, earthquakes. These vibrations can cause damage to buildings and people nearby around. As mentioned above the authors are interested in studying the vibrations by measuring the vibration of 6 High-Rise Building in Bangkok height 56 – 120 m in standards methods by analyzed the Peak Particle Velocity and the frequency from the vibrations to assess the acceptable of the vibration that occurs. Also study the dynamic properties of buildings that respond to their usage status. The results of the study showed that in normal use of the building, the magnitude of the vibration that occurred did not exceed the standard. Even some buildings have the activities close to standard values. It was found that the vibration of such activity was similar to the vibration period of the building. But because of the vibration strength is very small, it will not cause strong vibration.

Keywords: Vibration, Peak Particle Velocity, Fundamental Natural Period, High-Rise Building, resonance

1. คำนำ

ในปัจจุบันมีกิจกรรมต่างๆที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นมากมาย ทั้งจากภายในอาคารที่เราอยู่อาศัยและรอบๆอาคารที่เราอยู่อาศัย เช่น การทำงานของเครื่องจักรภายในอาคาร การก่อสร้างอาคารสูงในบริเวณรอบๆอาคาร การจราจร การสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหว เป็นต้น ซึ่งการสั่นสะเทือนเหล่านี้จะทำให้อาคารได้รับผลกระทบและเกิดการตอบสนองในรูปแบบต่างๆ เช่น การแสดงออกมาในรูปของการสั่นโดยธรรมชาติ (Ambient Vibration) การแสดงออกมาในรูปการสั่นสะเทือนที่อาจเร่งจากพฤติกรรมการสั่นไหว (Resonance) หรือจะเป็นการแสดงออกมาอยู่ในรูปแบบของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้าง ทั้งนี้การแสดงออกเหล่านี้จำเป็นต้องมีการประมาณในเบื้องต้นรวมถึงประเมินตามมาตรฐานต่างๆ เพื่อเป็นการยืนยันว่าโครงสร้างของอาคารยังเป็นปกติ

สำหรับการประเมินผลกระทบจากการสั่นไหวสามารถตรวจวัดได้ด้วยเครื่องมือตรวจวัดความเร่ง โดยตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ได้มีการกำหนดมาตรฐานความสั่นสะเทือนเพื่อป้องกันผลกระทบ

ต่ออาคาร โดยใช้หลักการของ Peak Particle Velocity และความถี่ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลานั้น อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบพฤติกรรมด้านพลศาสตร์ของอาคารโดยการตรวจวัดการสั่นไหวโดยธรรมชาติของอาคารได้อีกด้วย

จากเหตุผลที่กล่าวมานั้น ทำให้เราต้องศึกษาเกี่ยวกับการตอบสนองของอาคารต่อการสั่นสะเทือน เพื่อที่จะเข้าใจถึงปัญหา และสามารถหาข้อสรุปได้เกี่ยวกับความปกติของอาคารที่ทำการตรวจวัด

2. ทฤษฎีและมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

2.1 Peak Particle Velocity

Peak Particle Velocity (PPV) เป็นค่าที่ใช้บ่งชี้สำหรับการประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างทางวิศวกรรม โดยสามารถทราบค่า PPV ได้จากการหาค่าความเร็วของความสั่นสะเทือนในแนวแกนนอน (แกน X หรือ แกน Y) หรือ แนวแกนตั้ง (แกน Z) ที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งมีหน่วยโดยที่ใช้ทั่วไปคือ มิลลิเมตรต่อวินาที (mm/s) หรือ นิ้วต่อวินาที (in/s)

2.2 Dynamic Characteristics of Building

ว่าด้วยเรื่องการสั่นกลับไปกลับมาของอาคารขณะที่เกิดการสั้นสะเทือน การสั่นนั้นขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการสั่น (intensity), ระยะเวลาของการสั่น (duration) และจำนวนของการสั่น (amount) และทั้งหมดที่กล่าวมานี้จะส่งผลต่ออาคารอย่างไรนั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบของอาคารหรือที่เรียกว่า Dynamic Characteristics ของแต่ละอาคาร

ซึ่ง Dynamic Characteristics ที่สำคัญนั้นถูกเรียกว่า modes of oscillation ซึ่งคือการสั่นของตึกในรูปแบบต่าง โดยจะเรียกการสั่นแต่ละแบบเป็น mode ที่ต่างกันออกไป นั่นทำให้เราต้องมาหา mode ของการสั่นที่ทำให้ตึกเกิดความเสียหาย โดยการหาคาบการสั่นตามธรรมชาติของตึก (Natural Period)

2.3 Natural Period

คาบการสั่นตามธรรมชาติของตึกคือเวลาที่ใช้ในการสั่นกลับไปกลับมาของตึก 1 รอบ ซึ่งถูกควบคุมโดย มวลของตึก (mass) และค่า stiffness ของตึก โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการ 2.1

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \qquad (2.1)$$

เมื่อ T คือ คาบการสั่น (sec)

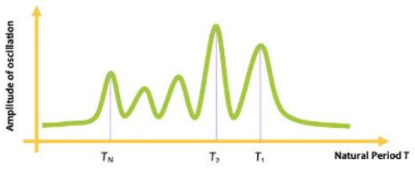
M คือ มวล มีหน่วยเป็น (kg)

K คือ stiffness มีหน่วยเป็น ($N.m^{-1}$)

2.4 Fundamental Natural Period of Building

อาคารทุกอาคารมีความถี่ธรรมชาติ ซึ่งเป็นความถี่ที่ส่งผลให้โครงสร้างอาคารมีความต้านทาน ต่อแรงสั่นสะเทือนน้อยที่สุด ทั้งจากปัจจัยภายนอก (เช่น แรงลม, แรงแผ่นดินไหว) และปัจจัยภายใน (เช่น โครงสร้างอาคาร) ซึ่งความถี่แต่ละความถี่จะส่งผลให้เกิด mode ต่างๆที่ได้กล่าวมาข้างต้น และ mode การสั่นกลับไปกลับมาที่มีความถี่น้อยที่สุดจะถูกเรียกว่า Fundamental Mode และคาบการสั่นที่ Fundamental Mode จะถูกเรียกว่า Fundamental Natural Period ตามจุด T1 ในภาพที่ 2.1 และความถี่ที่ Fundamental Mode จะถูกเรียกว่า Fundamental Natural Frequency

ในความเป็นจริงนั้น Natural Modes ของอาคารมีอยู่อย่างไม่จำกัด แต่ในทางวิศวกรรมนั้น Modes ของอาคารจะมีอยู่อย่างจำกัด โดยการนำ Finite Element Model (FEM) ของตัวอาคารมาวิเคราะห์กับ modes ต่างๆ โดยวิเคราะห์จากการเคลื่อนที่ 3 แกน (X,Y,Z) และ การหมุน 3 แกน modes ที่มีการตอบสนองมากที่สุดจึงจะถูกนับเป็น mode ซึ่งจะสังเกตได้จากภาพที่ 2.1 จะแทน modes ที่มีการตอบสนอง เป็น T_N



ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์คาบธรรมชาติ และแอมพลิจูดของการสั่น

2.5 มาตรฐาน DIN 4150

เป็นมาตรฐานของประเทศเยอรมันนี ที่กล่าวถึงค่า PPV และค่าความถี่ในช่วงที่เกิด PPV ของอาคารที่ตรวจวัด

ตารางที่ 2.1 มาตรฐาน DIN 4150

Line	Type of structure	Guideline values for velocity, v_1, in mm/s			
		Vibration at the foundation at a frequency of (Hz)			Vibration at horizontal plane of highest floor at all frequency
		1-10	10-50	50-100	
1	Buildings used for commercial purposes, industrial buildings, and building of similar design	20	20 to 40	40 to 50	40
2	Dwelling and buildings of similar design and/or occupancy	5	5 to 15	15 to 20	15
3	Structure that, because of their sensitivity to vibration, cannot be classified under lines 1 and 2 and are of great intrinsic value	3	3 to 8	8 to 10	8

2.6 ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 37

เป็นมาตรฐานที่กำหนดค่าการสั่นสะเทือนที่ยอมรับได้เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นต่อโครงสร้างของอาคาร

ตารางที่ 2.2 ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 37

อาคารประเภทที่	จุดตรวจวัด	ความถี่ (Hz)	PPV ความสั่นสะเทือนกรณีที่ 1 (mm/s)
1	1.1 ฐานรากหรือชั้นล่างของอาคาร	f≤10	20
		10<f≤50	0.5f + 15
		50<f≤100	0.2f + 30
		f>100	50
	1.2 ชั้นบนสุดของอาคาร	ทุกความถี่	40
	1.3 พื้นอาคารในแต่ละชั้น	ทุกความถี่	20
2	2.1 ฐานรากหรือชั้นล่างของอาคาร	f≤10	5
		10<f≤50	0.25f + 2.5
		50<f≤100	0.1f + 10
		f>100	20
	2.2 ชั้นบนสุดของอาคาร	ทุกความถี่	15
	2.3 พื้นอาคารในแต่ละชั้น	ทุกความถี่	20
3	3.1 ฐานรากหรือชั้นล่างของอาคาร	f≤10	3
		10<f≤50	0.125f + 1.75
		50<f≤100	0.04f + 6
		f>100	10
	3.2 ชั้นบนสุดของอาคาร	ทุกความถี่	8
	3.3 พื้นอาคารในแต่ละชั้น	ทุกความถี่	20

2.7 กฎกระทรวง

กฎกระทรวงปี พ.ศ.2550 เรื่อง กำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน ความคงทนของอาคาร และพื้นดินที่รองรับอาคารในการต้านการแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ได้กำหนดการประมาณคาบธรรมชาติของตึกไว้ด้วยสมการที่ 2.2

$$T = \frac{0.09h_n}{\sqrt{D}} \qquad (2.2)$$

T คือ คาบการสั่นของอาคาร (วินาที)

h_n คือ ความสูงของตึก (เมตร)

D คือ ความกว้างของตึก (เมตร)

2.8 มยผ.1301/1302-61

มยผ.1301/1302-61คือ มาตรฐานการออกแบบต้านการสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว ได้กำหนดการประมาณคาบธรรมชาติของตึกไว้ด้วยสมการที่ 2.3

$$T = 0.02H \qquad (2.1)$$

T คือ คาบการสั่นของอาคาร (วินาที)

H คือ ความสูงของตึก (เมตร)

2.9 การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพมหานคร

ศ.ดร.เป็นหนึ่ง วานิชชัย ได้ทำการศึกษาศึกษาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพมหานคร เพื่อหาสูตรสำหรับการประมาณคาบการสั่นไหวพื้นฐาน โดยใช้เซ็นเซอร์ความละเอียดสูงเพื่อหารูปแบบการสั่นไหวของอาคารในลักษณะ 3 มิติ โดยนำข้อมูลที่วัดได้ซึ่งอยู่ในรูปของ Time Domain มาทำการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปของ Frequency Domain ผ่านวิธี Fast Fourier Transform จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อหาสูตรคาบการสั่นของอาคารตามสมมุติฐานว่า $T = \alpha H^{\beta}$ ได้สูตรดังต่อไปนี้

$$T = 0.015H^{1.05}$$
$$T_u = 0.018H^{1.05}$$
$$T_l = 0.012H^{1.05}$$

T คือ คาบการสั่นของอาคาร (วินาที)

T_u คือ ขอบเขตบนของคาบการสั่นของอาคาร (วินาที)

T_l คือ ขอบเขตล่างของคาบการสั่นของอาคาร (วินาที)

H คือ ความสูงของตึก (เมตร)

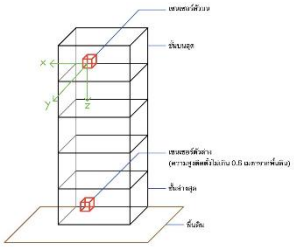
2.10 REAL-TIME SEISMIC MONITORING NEEDS OF A BUILDING OWNER AND THE SOLUTION -- A COOPERATIVE EFFORT

งานวิจัยนี้เป็นการตรวจสอบอาคารหลังการเกิดแผ่นดินไหวผ่านความสัมพันธ์ระหว่าง drift ratio และความเสียหายของอาคาร เพื่อประกอบการตัดสินใจได้อย่างทันท่วงทีหลังการเกิดแผ่นดินไหว ทำการทดลองโดยติด Accelerometer sensors 30 ตัว ไว้ในอาคาร 24 ชั้น ในขั้นตอนการวิเคราะห์ได้ใช้ Fast Fourier Transform เพื่ออ่านค่าความถี่และความต่างเฟสของอาคารในการวิเคราะห์โหมดการสั่นไหวต่างๆของอาคาร เพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้างต่อไป

3. การดำเนินงาน

3.1 การทดสอบภาคสนาม

การศึกษาค่า PPV ของอาคารต่างๆ การทดสอบได้ทำการวัดขนาดความเร่งของอาคารทั้งหมด 6 อาคาร ได้แก่ 1.อาคารวิศวะฯ 100 ปี 2.อาคาร The Sukhothai Residences 3.THE QUATTRO by Sansiri Tower A 4.THE QUATTRO by Sansiri Tower B 5.THE KEY แจ้งวัฒนะ Tower A 6.THE KEY แจ้งวัฒนะ Tower B โดยทำการติดตั้งเครื่องมือวัดความเร่งไว้ที่ชั้นบนและชั้นล่างของตัวอาคารตามมาตรฐาน DIN 4150 ดังแสดงในรูปที่ 3.1



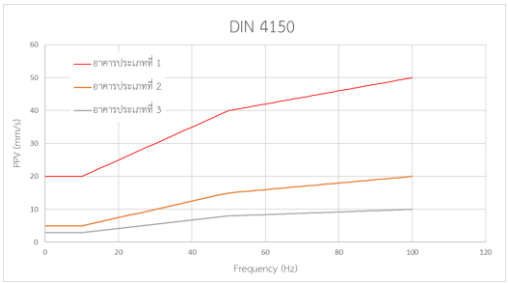
ภาพที่3.1 ลักษณะการติดตั้งเครื่องมือวัดความเร่งตามมาตรฐานDIN 4150

เครื่องมือวัดความเร่งจะถูกเชื่อต่อเข้ากับ Data logger เพื่อบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 7 วัน ด้วยความที่ 500 Hz ดังภาพที่ 3.2

ภาพที่ 3.2 การเชื่อมต่อเครื่องมือวัดความเร่งเข้ากับ Data logger

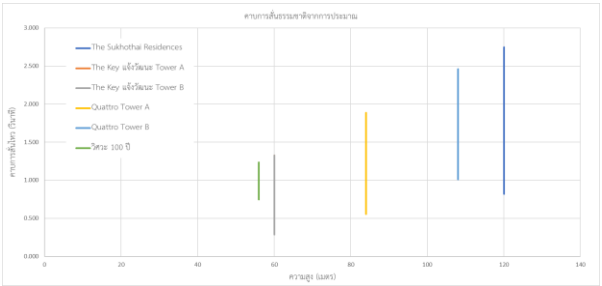
3.2 การประเมิน

ค่าความเร่งการสั่นสะเทือนที่ตรวจวัดจะถูกนำมาฟิลเตอร์เพื่อคัดกรองข้อมูลก่อน หลังจากนั้นจึงนำไปหาค่าความเร็วด้วยวิธีการอินทิเกรต แล้วจึงหาค่า PPV และหาความถี่ขณะนั้นด้วยการใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT) ก่อนที่จะนำค่าที่ได้ไปพล็อตลงในกราฟของมาตรฐาน DIN 4150 และ ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 37 ซึ่งหากค่าที่เราพล็อตอยู่ภายใต้เส้นกราฟของประเภทตึกที่เราสนใจที่ทางมาตรฐานได้กำหนดไว้นั้น ก็จะแปลว่าโครงสร้างของเรานั้นปลอดภัยและไม่มีความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากการสั่นสะเทือน ดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 มาตรฐาน DIN 4150

สำหรับค่าคาบการสั่นสะเทือนธรรมชาติของตึกจะถูกนำมาพล็อตลงในกราฟที่แสดงค่าประมาณคาบการสั่นสะเทือนธรรมชาติของตึกจากแหล่งต่างๆ เพื่อแสดงแนวโน้มและความถูกต้องของการประมาณ และ ของการวัดจริงจาก ดังแสดงในภาพที่ 3.4

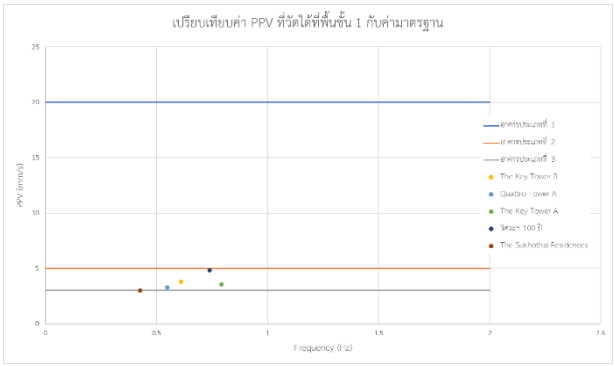


ภาพที่ 3.4 ช่วงคาบการสั่นธรรมชาติที่ได้จากค่าประมาณ

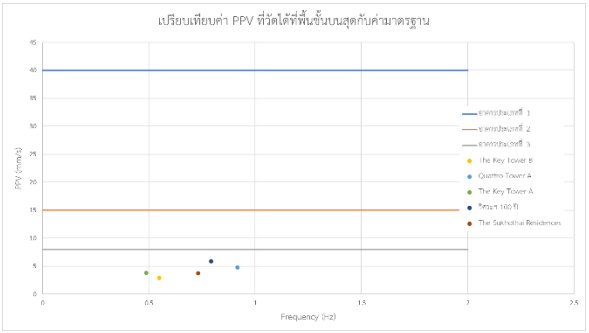
4. ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 ประเมินผลตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติฉบับที่ 37

ผลการประเมินตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 37 โดยแบ่งเป็นการทดสอบที่พื้นชั้น 1 ตามภาพที่ 4.1 และการทดสอบที่ชั้นบนสุด ตามภาพที่ 4.2



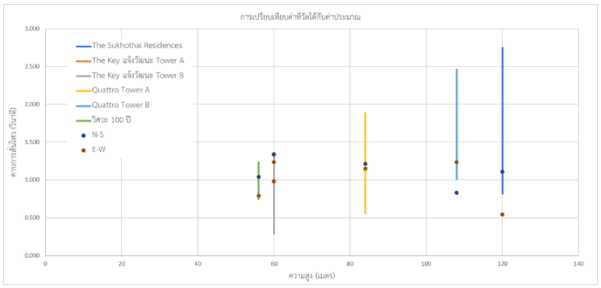
ภาพที่ 4.1 เปรียบเทียบค่า PPV ที่วัดได้ที่พื้นชั้น 1 กับค่ามาตรฐาน



ภาพที่ 4.2 เปรียบเทียบค่า PPV ที่วัดได้ที่พื้นชั้นบนสุดกับค่ามาตรฐาน

4.2 การตรวจวัดคาบการสั่นไหวธรรมชาติของอาคาร

ผลการตรวจวัดคาบการสั่นไหวธรรมชาติของอาคารเปรียบเทียบกับค่าประมาณต่างๆ ตามภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าคาบการสั่นไหวธรรมชาติที่วัดได้กับค่าประมาณ

5. สรุปและอภิปรายล

จากการประเมินผลค่าการสั่นสะเทือนตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 37 พบว่าอาคารทุกอาคารมีค่า Peak Particle Velocity (PPV) ต่ำกว่ามาตรฐาน ซึ่งหมายความว่า หากมีกรณีที่ตึกเกิดรอยร้าว สามารถยืนยันได้ว่ารอยร้าวดังกล่าว ไม่ได้เกิดจากการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติของตัวอาคารเองอย่างแน่นอน อาจเกิดจากสาเหตุอื่นๆ เช่น มีการก่อสร้างบริเวณใกล้เคียงทำให้มีแรงสั่นสะเทือนจากภายนอกมา

กระทบต่อตัวอาคาร, อาคารมีการฉาบปูนที่ไม่ได้มาตรฐานส่งผลให้เกิดรอยร้าวจากการฉาบ. ซึ่งทั้งหมดที่ได้ยกตัวอย่างมานี้มีประโยชน์อย่างมากทั้งในด้านความปลอดภัย และทางด้านกฎหมาย. ในด้านของความปลอดภัยนั้นทำให้ผู้ใช้อาคารสามารถมั่นใจได้ว่า หากไม่มีแรงสั่นสะเทือนจากภายนอกเข้ามารบกวนในปริมาณที่มาตรฐานกำหนดไว้ นั่นหมายความว่าตัวอาคารจะปลอดภัยอย่างแน่นอน. ในด้านของกฎหมายนั้นหากมีการก่อสร้างบริเวณรอบข้างอาคาร แล้วอาคารเกิดรอยร้าว แต่ค่า PPV ของตัวอาคารก่อนที่จะมีการก่อสร้างอยู่ในมาตรฐาน ก็จะช่วยให้สามารถสรุปได้ว่าตัวอาคารไม่ได้เกิดรอยร้าวจากการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติของตัวอาคารเอง

จากการเก็บข้อมูลในครั้งนี้พบว่ามีค่าเพียงค่าเดียวเท่านั้นที่มีค่าเข้าใกล้ค่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ นั่นคือค่าของ PPV ที่ Ground Floor ของ อาคารวิศวฯ 100 ปี ในวันที่ 25/1/2564 เวลา 13.18 ซึ่งมีค่า 4.84 mm/s ตามภาพที่ 4.19 และ ตารางที่ 4.11 ซึ่งจะเห็นว่า เป็นค่าที่โดดออกมาจากค่าอื่นอย่างเห็นได้ชัด สันนิษฐานว่าเกิดจากแรงสั่นสะเทือนจากภายนอกเข้ามารบกวน เพราะในช่วงระยะเวลาที่ติดตั้งเครื่อง accelerometer sensors ที่อาคารวิศวฯ 100 ปีนั้น บริเวณถนนหน้าคณะรัฐศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีการก่อสร้างปรับปรุงถนน คาดว่าเกิดจากแรงสั่นสะเทือนภายนอกนี้

ในส่วนของการวิเคราะห์ข้อมูล และ เปรียบเทียบกับทฤษฎีจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (งานวิจัยเรื่องการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพมหานคร) นั้น พบว่าคาบการสั่นสะเทือนบางค่านั้นมีค่าใกล้เคียง และไม่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้โดยการคำนวณจากสูตรในงานวิจัย สามารถสังเกตุได้ว่า ในงานวิจัยที่นำมาเปรียบเทียบนั้นมีการใช้การกระตุ้นการสั่นไหวของอาคารโดยใช้การโยกเป็นจังหวะของกลุ่มคน เพื่อทำให้ค่าที่วัดได้นั้นมีความชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งในงานวิจัยของผู้จัดทำไม่ได้ใช้การกระตุ้นการสั่นไหวของกลุ่มคน จึงทำให้ผลของคาบที่วัดได้ไม่ตรงตามสูตรจากงานวิจัยทั้งหมด

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ทางทีมงานผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่างๆที่ให้คำปรึกษา แนะนำ ประสานงาน และช่วงเหลือเป็นอย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิทิต ปานสุข อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ที่ให้ความรู้ ให้คำปรึกษา รวมถึงคำแนะนำต่างๆ และคอยผลักดันส่งเสริมให้การทำวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ดร.พชร เครือวิทย์ ที่คอยให้คำแนะนำ และคำปรึกษาที่ดีๆ เกี่ยวกับงานวิจัยนี้ อีกทั้งยังช่วยในการขัดเกลาคำพูด เป็นเสมือนที่ปรึกษาอีกคนหนึ่ง

เอกสารอ้างอิง

[1] M.Celebi, A.Sanli M.Sinvlair, S.Gallant and D.Radulescu. Real-Time Seismic Monitoring Needs of a Building Owner- and the Solution: A Cooperative Effort. 2004

[2] ราชกิจจานุเบกษา ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ ๓๗ เรื่อง กำหนดมาตรฐานความสั่นสะเทือนเพื่อป้องกันผลกระทบต่ออาคาร. 2553

[3] DIN 4150-3 Structural vibration Part3: Effects of vibration on structures. 1999

[4] ชาคร เพ็ชร์เจริญ, รองศาสตราจารย์ เป็นหนึ่ง วานิชชัย. การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพมหานคร., สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ปทุมธานี

[5] C.V.R. Murty, Rupen Goswami, A.R.Vijayanarayanan, Vipul V. Mehta. Some Concepts in Earthquake Behavior of Building. 2012