



โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

การวิเคราะห์การตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวของดิน
ในอำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย

โดย

นายคมกฤษ อ่อนแก้ว

เลขประจำตัวนิสิต 5732707423

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี
ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของโครงการทางวิชาการที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงการทางวิชาการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด

The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the senior project authors' files submitted through the faculty.

การวิเคราะห์การตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวของดิน

ในอำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย

นายคมกฤษ อ่อนแก้ว

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

EARTHQUAKE SITE RESPONSE ANALYSIS OF SOILS
IN MUANG DISTRICT, CHIANG RAI PROVINCE.

MR. KHOMKRIT ONKAEW

A project submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of the Bachelor of Science in Geology
Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University
Academic Year 2017

หัวข้อโครงการ

การวิเคราะห์การตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวของดิน

ในอำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย

โดย

นายคมกฤษ อ่อนแก้ว

สาขาวิชา

ธรณีวิทยา

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการหลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐานบ ธิติมากร

วันที่ส่ง.....

วันที่อนุมัติ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐานบ ธิติมากร)

5732707423: ภาควิชาธรณีวิทยา

คำสำคัญ : การขยายแรงแผ่นดินไหวของดิน / สเปกตรัมความเร่ง / พูเรียร์แอมพลิจูด / ระยะเวลาการสั่นไหว / คาบการสั่นพื้นฐาน / ความเร็วคลื่นเฉือน

คмกฤษ อ่อนแก้ว : การวิเคราะห์การตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวของดินในอำเภอเมือง
จังหวัด เชียงราย (EARTHQUAKE SITE RESPONSE ANALYSIS OF SOILS IN
MUANG DISTRICT, CHIANG RAI PROVINCE)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐานบ ธิติมากร, 48 หน้า.

ในวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ.2554 มีรายงานเกี่ยวกับการรับรู้ถึงการสั่นไหวของแผ่นดินไหวในพื้นที่กรุงเทพฯ ที่เกิดจากแผ่นดินไหวที่เมืองเกนตุง ประเทศพม่า ขนาด 6.7 แมกนิจูด เหตุการณ์ครั้งนี้เกิดจากการที่กรุงเทพฯ ตั้งอยู่บนชั้นดินเหนียวอ่อน ทำให้คลื่นแผ่นดินไหวมีการขยายสัญญาณคลื่นประมาณ 3 – 4 เท่า หลาย ๆ พื้นที่ในประเทศไทยได้ตั้งอยู่บนชั้นดินอ่อน ซึ่งอำเภอเมือง จังหวัด เชียงรายเป็นพื้นที่หนึ่งที่ตั้งอยู่บนแอ่งตะกอน และจังหวัดเชียงรายนับถูกจัดให้เป็นพื้นที่เสี่ยงต่อธรณีพิบัติภัยแผ่นดินไหว เนื่องจากถูกล้อมด้วยรอยเลื่อนที่มีพลังหลายรอยเลื่อน ดังนั้นอำเภอเมือง จังหวัด เชียงราย จึงเป็นพื้นที่ที่เหมาะสมในการศึกษาการตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวของชั้นดิน โดยในการศึกษาครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวของดินจากข้อมูลหลุมเจาะและข้อมูลธรณีฟิสิกส์ ข้อมูลหลุมเจาะที่วัดป่าห้วยชุมเงิน มีความลึกทั้งหมด 30 เมตร โดยคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้สำหรับการศึกษานี้ใช้ทั้งหมด 9 คลื่นแผ่นดินไหว แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 คือ คลื่นแผ่นดินไหวที่มีขนาดแผ่นดินไหวเท่ากัน แต่มีระยะทางจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหวต่างกัน กลุ่มที่ 2 คือคลื่นแผ่นดินไหวที่มีระยะทางจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหวใกล้เคียงกัน แต่มีขนาดแผ่นดินไหวแตกต่างกัน กลุ่มที่ 3 คือคลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียง ผลของการศึกษาคือ การขยายแรงแผ่นดินไหวอยู่ในช่วง 1.2 ถึง 2.2 เท่า ค่าสเปกตรัมความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหวอยู่ในช่วง 0.05 ถึง 1.05 วินาที ซึ่งตรงกับค่าคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 1 ถึง 19 ชั้น ค่าระยะเวลาการสั่นไหวมีค่าค่อนข้างหลากหลาย นอกจากการวิเคราะห์การตอบสนองต่อชั้นดินแล้ว ยังได้เปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีทางธรณีฟิสิกส์ 2 วิธี คือ วิธีวัดคลื่นพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณและวิธีสำรวจคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะ ซึ่งพบว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของข้อมูลจากทั้ง 2 วิธี เท่ากับ 5.08% ซึ่งอยู่ในช่วงยอมรับได้ ดังนั้นสามารถใช้ข้อมูลความเร็วคลื่นเฉือนแทนกันได้

ภาควิชา _____ ธรณีวิทยา _____ ลายมือชื่อนิสิต _____

สาขาวิชา _____ ธรณีวิทยา _____ ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาหลัก _____

ปีการศึกษา _____ 2560 _____

5732707423: MAJOR GEOLOGY

KEYWORDS: SOIL AMPLIFICATION / SPACTRAL ACCELERATION / FOURIER AMPLITUDE / BRACKETED DURATION / FUNDAMENTAL PERIOD / SHEAR WAVE VELOCITY

KHOMKRIT ONKAEW: EARTHQUAKE SITE RESPONSE ANALYSIS OF SOILS IN MUANG DISTRICT, CHIANG RAI PROVINCE.

ADVISOR: ASST. PROF. DR.THANOP THITIMAKORN, 48 pp.

On March 24, 2011, The 6.7 magnitude earthquake in Kengtung, Myanmar affect people on high buildings in Bangkok. Because Bangkok City is located on a soft clay layer, the earthquake waves are amplified about 3 - 4 times by this layer. Muang district, Chiang Rai province is located on soil layer and Chiang Rai province is also classified in earthquake risk zone. Chiang Rai province is also located near many active faults. Therefore, in this study the main objective is to analyze earthquake site response of soils by using borehole and geophysical data. The borehole data is from Wat Pha Wai Khum Ngern and the total depth is 30 meters. There are 9 earthquake waves used in this study and they are divided into 3 groups. The first group is an earthquake with the same size but there are different distances from the fault rupture. The second group is an earthquake with the same distances from the fault rupture but different in size. The last group is an earthquake that is occurred in Thailand and nearby. The result of this study shows that the amplification ratio of Wat Pha Wai Khum Ngern borehole is range 1.2 to 2.2 times. Spectral acceleration is range 0.05 to 1.05 that related to the fundamental period of 1 to 19 storey reinforced concrete building. The bracketed duration of earthquakes is very diverse. The comparison of multichannel analysis of surface wave and downhole seismic shows that percent difference between these 2 methods is 5.08%. So, it is in an acceptable range.

Department _____ Geology _____ Student's Signature _____

Field of Study _____ Geology _____ Advisor's Signature _____

Academic Year _____ 2017 _____

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้จะไม่สำเร็จล่วงไปได้ด้วยดีหากขาดบุคคลดังต่อไปนี้

กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฐานบ ธิติมากร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้ความรู้คำแนะนำ และเป็นທີ່ปรึกษาที่ดีมาตลอดมาตั้งแต่เริ่มโครงการวิจัย แม้ว่าจะเกิดปัญหา ระหว่างการทำงาน หรืออุปสรรคใด ๆ ก็ได้ท่านอาจารย์คอยให้คำแนะนำ ให้กำลังใจ จนทำให้โครงการนี้สำเร็จล่วงไปได้ด้วยดี

กราบขอบพระคุณพี่สัณทวัฒน์ สุขรังสี จากสำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา ที่ให้การช่วยเหลือในด้านข้อมูลแผ่นดินไหว และให้คำแนะนำต่าง ๆ

กราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ประจำภาควิชาธรณีวิทยาทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ทางด้านธรณีวิทยา ช่วยแนะนำสั่งสอน และบ่มเพาะให้ผู้วิจัยมีความเป็นนักวิทยาศาสตร์และนักธรณีวิทยาที่ดีตลอดการศึกษา

ขอบขอบคุณนางสาวอิสราภรณ์ เศรษฐ์ธนนันท์ รุ่นพี่ Geo'56 สำหรับคำแนะนำต่าง ๆ ในการทำโครงการในครั้งนี้

กราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และขอบคุณน้องสาว สำหรับทุกการสนับสนุนและเป็นกำลังใจที่ดีที่สุดเสมอมา

ขอขอบคุณพี่บุคลากรประจำภาควิชาธรณีวิทยาทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์และสถานที่ หรือติดต่อธุระในด้านต่าง ๆ

และขอขอบคุณเพื่อนร่วมรุ่น Geo'58 ทุกคน ที่ร่วมทุกข์ ร่วมสุขและช่วยเหลือกันตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญรูปภาพ	ฌ
สารบัญตาราง	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่ศึกษา	3
2.1.1 ตะกอนยังไม่แข็งตัวยุคควอเทอร์นารี	3
2.1.2 จังหวัดเชียงรายกับการเกิดแผ่นดินไหว	6
2.2 คลื่นแผ่นดินไหว	7
2.2.1 คลื่นไหวสะเทือน	7
2.2.2 ความเร็วคลื่นเฉือน	8
2.2.3 การสำรวจด้วยคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะ	8
2.2.4 วิธีการวัดคลื่นพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณ	9
2.2.5 การเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธี Downhole Seismic กับ MASW	10
2.3 การแบ่งประเภทชั้นดินสำหรับการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหว	11
2.4 ค่าอัตราเร่งสูงสุดที่พื้นดิน	11
2.5 การขยายแรงแผ่นดินไหวของชั้นดิน	12

2.6 คาบการสั้นพื้นฐานของอาคาร	13
2.7 วิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมการตอบสนอง	15
2.8 ระยะเวลาการสั้นไหว	16
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	17
3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย	17
3.1.1 ข้อมูลหลุมเจาะและข้อมูลความเร็วคลื่นเฉือน	17
3.1.2 ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหว	19
3.2 การประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรม DEEPSOIL	24
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล	25
4.1 เปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือน	25
4.2 ผลการขยายสัญญาณคลื่นแผ่นดินไหวของชั้นดิน	27
4.3 อิทธิพลของระยะห่างจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหวที่มีผลต่อการตอบสนองต่อชั้นดิน	33
4.4 อิทธิพลของขนาดแผ่นดินไหวที่มีผลต่อการตอบสนองต่อชั้นดิน	36
4.5 อิทธิพลของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียง	39
4.6 ระยะเวลาในการสั้นไหว	42
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	45
5.1 สรุปผลการศึกษา	45
5.2 ข้อเสนอแนะ	46
บรรณานุกรม	47

สารบัญรูปภาพ

	หน้า	
รูป 2.1	แสดงแผนที่ธรณีวิทยาของจังหวัดเชียงราย	5
รูป 2.2	แสดงรอยเลื่อนมีพลังบริเวณจังหวัดเชียงราย	6
รูป 2.3	คลื่นไหวสะเทือนประเภทคลื่นในตัวกลาง	7
รูป 2.4	คลื่นไหวสะเทือนประเภทคลื่นผิวดิน	8
รูป 2.5	แสดงการสำรวจด้วยวิธี downhole seismic	9
รูป 2.6	แสดงการเก็บข้อมูลคลื่นพื้นผิวด้วยวิธี MASW	10
รูป 2.7	แสดงสเปกตรัมการตอบสนองของชั้นดินเหนียวกรุงเทพในช่วงความลึก 10 – 12 เมตร	15
รูป 2.8	แสดงการนับช่วงเวลาการสั่นไหว	16
รูป 3.1	แสดงตำแหน่งของหลุมเจาะที่วัดป่าห้วยขุมเงิน อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย	18
รูป 3.2	แสดงลำดับชั้นหินของหลุมเจาะและความเร็วคลื่นเฉือนของหลุมเจาะ	19
รูป 3.3	กราฟแสดงคลื่นแผ่นดินไหวในโดเมนเวลาของคลื่นแผ่นดินไหวชุดที่ 1	21
รูป 3.4	กราฟแสดงคลื่นแผ่นดินไหวในโดเมนเวลาของคลื่นแผ่นดินไหวชุดที่ 2	23
รูป 3.5	กราฟแสดงคลื่นแผ่นดินไหวในโดเมนเวลาของคลื่นแผ่นดินไหวชุดที่ 3	21
รูป 3.6	แสดงโปรแกรม DEEPSOIL	24
รูป 4.1	กราฟแสดงค่าความเร่งสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหวเชียงราย (Mw = 6.3)	27
รูป 4.2	กราฟแสดงค่าความเร่งสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหวชุดที่ 1	30
รูป 4.3	กราฟแสดงค่าความเร่งสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหวชุดที่ 2	31
รูป 4.4	กราฟแสดงค่าความเร่งสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหวชุดที่ 3	32
รูป 4.5	กราฟแสดง Response Spectrum ของแผ่นดินไหวชุดที่ 1	34
รูป 4.6	กราฟแสดง Fourier Amplitude ของแผ่นดินไหวชุดที่ 1	35
รูป 4.7	กราฟแสดง Response Spectrum ของแผ่นดินไหวชุดที่ 2	37
รูป 4.8	กราฟแสดง Fourier Amplitude ของแผ่นดินไหวชุดที่ 2	38
รูป 4.9	กราฟแสดง Response Spectrum ของแผ่นดินไหวชุดที่ 3	40
รูป 4.10	กราฟแสดง Fourier Amplitude ของแผ่นดินไหวชุดที่ 3	41

รูป 4.11	แสดงระยะเวลาการสั้นไหว (Bracketed duration) ของคลื่นแผ่นดินไหวชุดที่ 1	43
รูป 4.12	แสดงระยะเวลาการสั้นไหว (Bracketed duration) ของคลื่นแผ่นดินไหวชุดที่ 2	43

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตาราง 2.1	แสดง NEHRP Site Classification ของชั้นดิน	11
ตาราง 2.2	แสดงคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 20 ชั้น	14
ตาราง 3.1	แสดงข้อมูลหลุมเจาะที่วัดป่าห้วยขุมเงิน อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย	17
ตาราง 3.2	แสดงความเร็วคลื่นเฉือนของหลุมเจาะจากทั้ง 2 วิธี	18
ตาราง 3.3	แสดงข้อมูลของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้	20
ตาราง 4.1	แสดงความเร็วคลื่นเฉือนหลุมเจาะที่วัดป่าห้วยขุมเงิน อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย	26
ตาราง 4.2	แสดงการเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากวิธีวัดคลื่นพื้นผิวแบบหลาย ช่องรับสัญญาณและวิธีสำรวจโดยคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะ	26
ตาราง 4.3	แสดงการขยายแรงแผ่นดินไหวของชั้นดินบริเวณหลุมเจาะวัดป่าห้วยขุมเงิน โดยใช้ความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธี MASW	29

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

แผ่นดินไหวถือเป็นหนึ่งในภัยพิบัติที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้อย่างถูกต้อง มีบันทึกถึงการเกิดแผ่นดินไหวมากมายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ในการเกิดขึ้นแต่ละครั้งแผ่นดินไหวจะส่งผลกระทบต่อพื้นที่ต่างกัน ขึ้นกับชนิดของดิน ชนิดและลักษณะของหิน สิ่งปลูกสร้างในพื้นที่ ระยะห่างจากศูนย์กลางแผ่นดินไหว ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหว เป็นต้น ซึ่งประเทศไทยก็เป็นประเทศหนึ่งที่ได้รับผลกระทบจากการเกิดแผ่นดินไหว โดยเฉพาะภาคเหนือและภาคตะวันตกของประเทศ แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในประเทศไทยที่รุนแรงที่สุดที่ได้รับการบันทึกไว้ เกิดขึ้นเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ.2557 มีขนาด 6.3 แมกนิจูด อยู่บริเวณตำบลดงมะดะ อำเภอมะลาว จังหวัดเชียงราย หรือละติจูด 19.748 องศาเหนือ ลองจิจูด 99.692 องศาตะวันออก ความลึก 7 กิโลเมตร และมีคลื่นแผ่นดินไหวตามรวมทั้งสิ้น 1,254 ครั้ง (สำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา, 2558) ซึ่งส่งผลกระทบต่อชีวิต ทรัพย์สินและเศรษฐกิจ เพราะเกิดขึ้นในเมืองใหญ่ มีบ้านเรือนของชาวบ้านและอาคารมากมาย

จากรายงานเกี่ยวกับการรับรู้ถึงการสั่นไหวของแผ่นดินไหวในพื้นที่กรุงเทพฯ ที่เกิดจากแผ่นดินไหวที่เมืองเกตุข ประเทศพม่า ขนาด 6.7 แมกนิจูด ในวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ.2554 (สำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา, 2560) ซึ่งการรู้สึกถึงแผ่นดินไหวของคนในกรุงเทพฯ เกิดจากการที่กรุงเทพฯ ตั้งอยู่บนชั้นดินอ่อน ทำให้คลื่นแผ่นดินไหวมีการขยายสัญญาณคลื่นประมาณ 3 – 4 เท่า (ศรีสัมพันธ์ และคณะ, 2553)

อำเภอมะลาว จังหวัดเชียงรายเป็นพื้นที่หนึ่งที่ตั้งอยู่บนแอ่งตะกอน มีชั้นดินอ่อนที่ค่อนข้างหนาที่วางตัวอยู่บนชั้นดินแข็ง และจังหวัดเชียงรายยังถูกจัดให้เป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อธรณีพิบัติภัยแผ่นดินไหวค่อนข้างสูงกว่าจังหวัดอื่น ๆ ในประเทศไทย เนื่องจากถูกล้อมด้วยรอยเลื่อนที่มีพลังที่สามารถทำให้เกิดแผ่นดินไหวหลายรอยเลื่อน ดังนั้นอำเภอมะลาว จังหวัดเชียงราย จึงเป็นพื้นที่ที่เหมาะสมในการศึกษาการตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวของชั้นดิน โดยในการศึกษานี้เป็นการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวของดินจากข้อมูลหลุมเจาะและข้อมูลธรณีฟิสิกส์ เพื่อการตอบสนองของแรงแผ่นดินไหวที่แตกต่างกันเมื่อเปลี่ยนขนาดของแผ่นดินไหว

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวของชั้นดิน โดยอาศัยข้อมูลจากหลุมเจาะและข้อมูลจากธรณีฟิสิกส์

1.3 ขอบเขตการศึกษา

วิเคราะห์การตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวของชั้นดิน โดยใช้โปรแกรม DEEPSOIL Vol.7 ซึ่งใช้ข้อมูลหลุมเจาะ 1 หลุม เป็นข้อมูลหลุมเจาะที่วัดปายห้วยชุมเงิน อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย ร่วมกับข้อมูลธรณีฟิสิกส์จากวิธีวิเคราะห์คลื่นพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณ และวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ก. ในด้านความรู้และประสบการณ์

- เกิดการเรียนรู้ขั้นตอนการปฏิบัติงานตามระเบียบการวิจัย
- เกิดการเรียนรู้การใช้โปรแกรม DEEPSOIL Vol.7

ข. ความรู้ ความเข้าใจที่นำไปสู่การแก้ไขปัญหาของสังคมหรือสภาพแวดล้อม

- ได้ผลการตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวของชั้นดิน ในอำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย และอาจเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับงานวิจัยอื่น ๆ และการวางแผนการก่อสร้างทางด้านวิศวกรรม
- สามารถนำเอาองค์ความรู้และประสบการณ์ที่ได้จากงานวิจัยไปต่อยอดในอนาคตได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่ศึกษา

อำเภอเมือง จังหวัดเชียงรายเป็นศูนย์กลางเศรษฐกิจของจังหวัดเชียงราย มีประชากรจำนวน 223,936 คน ความหนาแน่น 175 คนต่อตารางกิโลเมตร มีพื้นที่ประมาณ 1,284.41 ตารางกิโลเมตร โดยตั้งอยู่บริเวณตอนกลางของจังหวัดเชียงราย พื้นที่ส่วนใหญ่อยู่บนแอ่งราบลุ่มระหว่างภูเขา (Intermontane basin) มีลักษณะรูปกระทะ มีแม่น้ำสำคัญคือ แม่กกและแม่น้ำภูกามแก้ว พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นเป็นชั้นดินตะกอนที่ไม่แข็งตัว และจากข้อมูลของกรมทรัพยากรธรณี (2550) ได้จัดประเภทตะกอนที่เกิดขึ้นในอำเภอเมือง จังหวัดเชียงรายเป็นตะกอนยังไม่แข็งตัวยุคควอเทอร์นารี (1.8 ล้านปี - ปัจจุบัน) ซึ่งเป็นกลุ่มตะกอนที่สะสมในที่ราบระหว่างหุบเขาที่ราบลุ่มแม่น้ำ และเนินตะพัก เป็นเกิดกระบวนการของทางน้ำปัจจุบัน (รูปที่ 2.1)

2.1.1 ตะกอนยังไม่แข็งตัวยุคควอเทอร์นารี

1) ตะกอนที่ราบน้ำท่วมถึง (Flood Plain Deposit)

ที่ราบน้ำท่วมถึงมีลักษณะแบนราบ เกิดจากการสะสมตัวของตะกอน ที่ถูกน้ำล้นฝั่งพัดพา มาในฤดูน้ำหลาก สะสมตัวบริเวณที่ราบระดับต่ำสุด ใกล้หรือติดกับแม่น้ำ มีลักษณะเป็นที่ราบกว้าง และที่ราบระหว่างหุบเขาตามแม่น้ำสายใหญ่ ทำให้ได้ตะกอนละเอียดเป็นชั้นหนา พบตะกอนชนิดนี้เป็นบริเวณกว้างขวางทางฝั่งใต้ของลำน้ำกก ส่วนทางฝั่งเหนือของน้ำกกนั้น พบเป็นบริเวณแคบ ๆ เท่านั้น ประกอบด้วยตะกอนละเอียดจำพวกตะกอนดินเหนียวและตะกอนดินทรายแป้ง บางบริเวณอาจมีเม็ดทรายละเอียดขนาด 100 ไมครอน หรือเม็ดเหล็ก (iron concretions) ปะปนอยู่กับตะกอนดินเหนียว และตะกอนดินทรายแป้ง มีสีดำเทา เทาอ่อน น้ำตาล ขาว มีจุดปะสีเหลือง สีแดง สีส้ม เนื้อแน่นเหนียว เป็นชั้นหนามากกว่า 7 เมตร

2) ตะกอนที่ราบบนน้ำท่วมถึงบริเวณใกล้ร่องน้ำ (Flood Plain on Channel)

เป็นตะกอนที่เกิดจากแม่น้ำกกกัดแหว่งไปมาในอดีต ทำให้ได้ที่ราบกว้างสองฝั่งลำน้ำในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ - ตะวันตกเฉียงใต้ พบร่องรอยทางน้ำกัดแหว่ง (meandering scar) และทางน้ำเก่า (abandoned channel) ตะกอนแบ่งเป็นสองส่วนไม่ต่อเนื่อง ส่วนบนประกอบด้วย ตะกอนดินเหนียวและตะกอนดินทรายแป้ง สีเทา สีน้ำตาล มีจุดปะสีแดง เหนียวเนื้อแน่น ความหนาแตกต่างกันไป ในบริเวณที่ห่างจากลำน้ำจะมีความหนามากประมาณ 3 - 5 เมตร และบริเวณใกล้ลำน้ำหนา 0.5 - 1 เมตร ส่วนล่างเป็นชั้นทราย ทรายปนกรวด ชั้นกรวด การคัดขนาดปานกลาง เม็ดค่อนข้างเหลี่ยมสีเทาถึงเทาอ่อน มีความหนาตั้งแต่ 0.5 - 4 เมตร

3) ตะกอนตะพักลำน้ำ (Terrace Deposit)

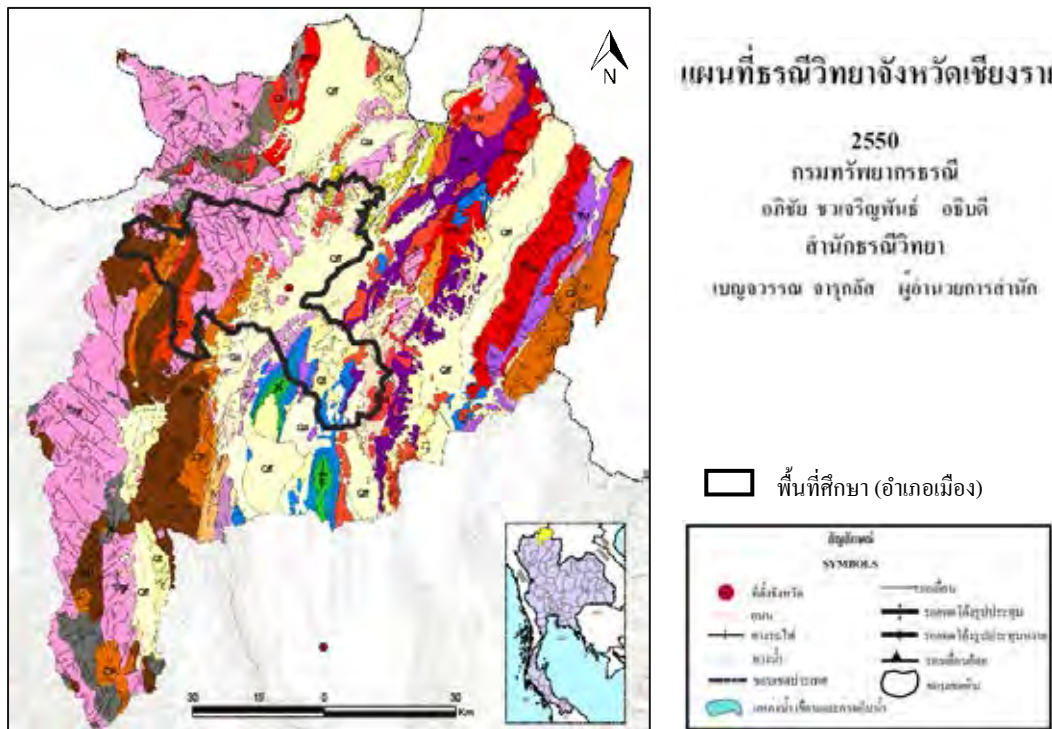
เป็นที่ราบสูง ตั้งแต่เส้นระดับ 400 ขึ้นไป จะถูกกัดเซาะให้แบนราบและเป็นลูกคลื่น มีรูปร่างสันฐานกลม ลักษณะทั่วไปคล้ายเนินหินแข็ง มีความหนาไม่แน่นอน ประกอบด้วยกรวด ทราย ลูกกรัง และศิลาแลง กรวดมีลักษณะกลมมน บางแห่งถูกสารละลายเหล็กออกไซด์เชื่อมประสานจนกลายเป็นชั้นลูกกรัง ลักษณะภูมิประเทศเป็นแบบขั้นบันได เกิดจากแม่น้ำกัดเซาะทางดิ่งมากขึ้น น้ำท่วมเฉพาะในปีที่มีปริมาณน้ำมาก

4) ตะกอนเนินดิน (Natural Levee)

เป็นสันแคบ ๆ ทั้งสองฝั่งแม่น้ำ เกิดจากตะกอนมาสะสมตอนที่น้ำล้นฝั่ง จึงมีระดับสูงกว่าที่ราบน้ำท่วมถึง พบเป็นสันยาวขนานกับลำน้ำแม่ลาวทั้งสองฝั่ง บางช่วงกว้างถึง 1 กิโลเมตร ตะกอนส่วนใหญ่ประกอบด้วยตะกอนทรายและดินทรายแป้ง ชั้นบาง ๆ แทรกสลับกัน มีสีน้ำตาลหรือสีน้ำตาลปนเทา มักมีแร่ไมกา และเม็ดเหล็กขนาดเล็กปะปนบ้าง มีการคัดขนาดดี ตะกอนจะไม่หนามาก และมักวางตัวอยู่บนชั้นทรายและชั้นกรวดที่สะสมตัวในร่องน้ำหรือที่ราบน้ำท่วมถึง

5) ตะกอนเชิงเขา (Colluvium)

เป็นที่ราบที่มีลักษณะคล้ายกับที่ราบน้ำท่วมถึง แต่มีระดับสูงกว่า และมักเกิดตามเชิงเขาหรือเนินเขา เกิดจากทางน้ำไหลผ่านแล้วกัดเซาะ พัดพาตะกอนต่าง ๆ มาสะสม ประกอบด้วย ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวปะปนกัน ไม่แสดงเป็นชั้นที่ชัดเจน ไม่มีการคัดขนาด เม็ดทรายค่อนข้างเหลี่ยม สีน้ำตาล น้ำตาลอ่อน บางแห่งมีกรวดปะปนด้วย

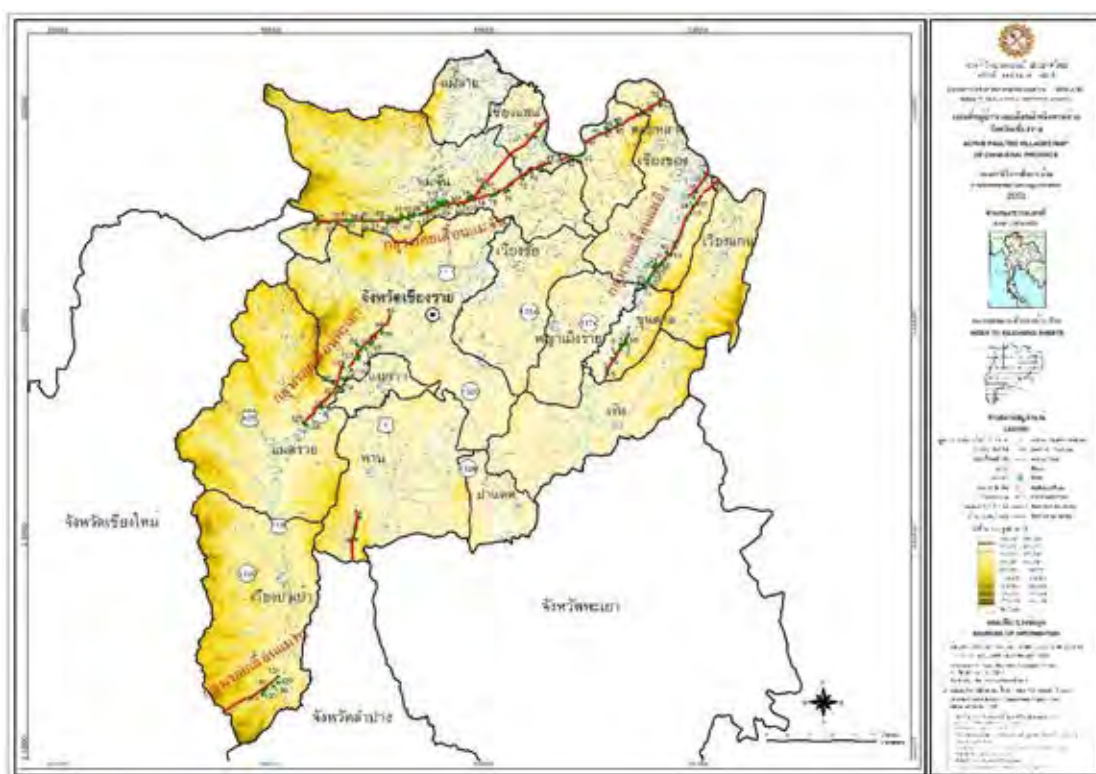


- Qa** ตะกอนธารน้ำพา กรวด ทราย ทรายแป้ง และดินเหนียวสะสมด้วยลมร่อนนำดินเหนียวและแอ่งน้ำท่วมถึง
- Qf** ตะกอนที่ราบน้ำท่วมถึง ดินเหนียวสะสมด้วยลมร่อนนำทราย หินกรวดบางส่วนสลับชั้นด้วยเลนส์ของทรายปนกรวด
- Qc** ตะกอนเศษหินเชิงเขาและตะกอนอยู่ก้นที่ กรวด ทราย ทรายแป้ง สีแดงและเศษหิน
- Ql** ตะกอนตะกอนน้ำ กรวด ทราย ทรายแป้ง ดินเหนียวและโคลนแดง
- Tmm** หินกึ่งแข็งตัว หินเคลือบและหินทรายแป้ง สีแดงถึงน้ำตาลแดง ดึกไนต์ หินเคลือบรูปนูนกลม หินปูนกลม หินโคลน หินเคลือบรูปนูนกลมในดินรูปนูนกลม พบซากหอยกาบ ไครยพืด (หอยกาบเดี่ยว) ปลาโบราณ หอยขอสรรพต หินกรวดมน หินทราย สีขาวถึงสีเทาขาว การกัดเซาะกลางดินคานสีเทาขาว
- K** หินทรายและหิน โกลน สีแดง
- JK** หินทราย ไรท์ โกลน สีขาว มีหินกรวดมนและหินดินดานแทรกสลับบ้าง
- J** หินกรวดมน สีแดง หินทราย สีน้ำตาลแดง แทรกสลับด้วยหินดินดานและหิน โกลน
- TrJ** หินกรวดมน หินทรายสีน้ำตาลแดง แทรกสลับด้วยหินดินดานและหิน โกลน
- Trbh** หิน โกลน สีเทา ถึงเทาเข้ม แทรกสลับด้วยหิน ทรายบ้าง แสดงชั้นมางงิงหนา มีซากหอยสองฝาสกุลฮาโดเนียและคาโอเนลลา
- Trpk** หินปูน สีเทาเข้ม แสดงชั้นปานกลางถึงชั้นมวลหนาหรือเป็นป็น สีเทา ค้ำแทรกสลับด้วยหินดินดานและหิน ทราย ในตอนกลางของลำดับชั้นหิน
- Trl** หินกรวดมนฐาน สีแดง รูปนูนกลม หินดินดาน สีเทา แทรกสลับด้วยหินทรายแป้งและหินทราย
- Tr** หินทราย หินทรายเนื้ออุภูเขาไฟ หินปูนเนื้ออ่อน หิน ไรท์ โกลนที่หักเป่าสภาพ หินดินดาน หินปูนเป็นเลนส์ หินซีเมนต์และหินปูนเนื้อไข่ปลา
- Png3** หินดินดาน และหิน โกลน สีเทา ค้ำ หินทราย หินปูน
- Png2** หินปูน แสดงชั้นและชั้นมวลหนาหรือเป็นป็น สีเทา ค้ำแทรกสลับด้วยหินดินดานและหินทราย
- Png1** หินทรายเนื้ออุภูเขาไฟ หินทราย หินดินดาน สีเทาถึงเขียวเทา หินปูนในตอนบนของการลำดับชั้นหิน
- CP** หินทราย หินปูนเนื้ออ่อน หินดินดาน และหินซีเมนต์
- CPk** หิน โกลนปนกรวด หินดินดาน หินทรายแป้ง หินซีเมนต์ หินทรายเนื้ออุภูเขาไฟ หินทรายเนื้ออุซิลิกา สีเทา เทเขียว และน้ำตาล
- C** หินกรวดมน หินทราย หินดินดาน หินชนวน หินซีเมนต์และหินปูนปนกรวดมน
- DC** หินซีเมนต์ หินที่หัก หินปูน และหินอุภูเขาไฟ ส่วนใหญ่หักแปรสภาพ
- Ss** หินฟอสไฟต์ หินฟอสไฟต์เนื้อคาร์บอน และหินฟอสไฟต์เนื้อซิลิกา
- Obs** หินแอตลาไลน์ โอลิซีนอะซอลต์ที่ ให้แร่พลอย สวาวไอดี มูออร์ไรต์ หินเนฟลิน ไนต์ที่ ให้พลอย หินบาซาไนต์ และหินเนฟลินสวาวไอดี
- Jv** หิน ไรท์ ไอดี หิน ไรท์ โกลนที่หัก และหินแอนดิไซดิกที่หัก
- Trgr** หิน ไรท์ ไอดี แกรนิต หวมรินแกรนิต แกรไนต์ ไอดี ไอดี ไรต์ ไรท์ ไอดี มีสโควด์แกรนิต นัสโคไอดี หวมรินแกรนิต ไรท์ ไอดี หวมรินแกรนิต
- PTrl** หิน ไรท์ ไอดี หินเพอร์ไอดี ไอดี หินเซอร์เพนไทไนต์ และหินฮอร์นเบลนไอดี
- PTrv** หิน ไรท์ ไอดี แอนด์ไรต์ หินที่หักที่แสดงการไหล หินกรวดที่เชื่อมภูเขาไฟ หิน ไรท์ โกลนที่หักและหินแอนดิไซดิกที่หัก
- Cb** หินเบสิก หินควอตซ์แคบไซร และหินหนึ่ง
- DCv** หินอะซอลต์ และหินที่หัก

รูปที่ 2.1 แสดงแผนที่ธรณีวิทยาของจังหวัดเชียงราย (กรมทรัพยากรธรณี, 2550)

2.1.2 จังหวัดเชียงรายกับการเกิดแผ่นดินไหว

จังหวัดเชียงรายถูกจัดให้เป็นพื้นที่เสี่ยงพิบัติภัยแผ่นดินไหวระดับปานกลาง เนื่องจากอยู่ใกล้กับรอยเลื่อนมีพลังหลายรอยเลื่อน เช่น รอยเลื่อนพะเยา รอยเลื่อนแม่จัน รอยเลื่อนแม่ทา รอยเลื่อนแม่อิง (รูปที่ 2.2) เป็นต้น (กรมทรัพยากรธรณี, 2555) และจากรายงานของสำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมทรัพยากรธรณี (2557) เมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2557 เวลา 18.08 น. (ตามเวลาประเทศไทย) ได้เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวค่านิยมศูนย์กลางพบว่ามีจุดศูนย์กลางอยู่บริเวณตำบลจอมหมอกแก้ว อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย ละติจูด 19.756 องศาเหนือ ลองจิจูด 99.687 องศาตะวันออก ขนาดแผ่นดินไหว 6.3 แมกนิจูด ความลึก 2 กิโลเมตร ความรุนแรงระดับ VIII ตามมาตราเมอร์คัลลี ซึ่งถือว่าเป็นแผ่นดินไหวที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ในประเทศไทยที่มีความรุนแรงมากที่สุด แผ่นดินไหวครั้งนี้จัดว่าเป็นแผ่นดินไหวตื้น ประชาชนรู้สึกสั่นไหวได้ในหลายพื้นที่ของภาคเหนือ โดยเฉพาะบริเวณจังหวัดเชียงราย เชียงใหม่ ลำพูน ลำปาง น่าน พะเยา รวมถึงจังหวัดเลยและหนองคายในภาคอีสาน อาคารสูงในกรุงเทพมหานครรู้สึกสั่นไหวหลายแห่ง เหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งนี้ยังทำให้เกิดแผ่นดินไหวตาม (aftershock) รวมทั้งสิ้น 941 ครั้ง กระจายตัวหลายบริเวณในเขตอำเภอแม่ลาว อำเภอพาน อำเภอแม่สรวย และอำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย ซึ่งครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้างตลอดแนวรอยเลื่อนพะเยา

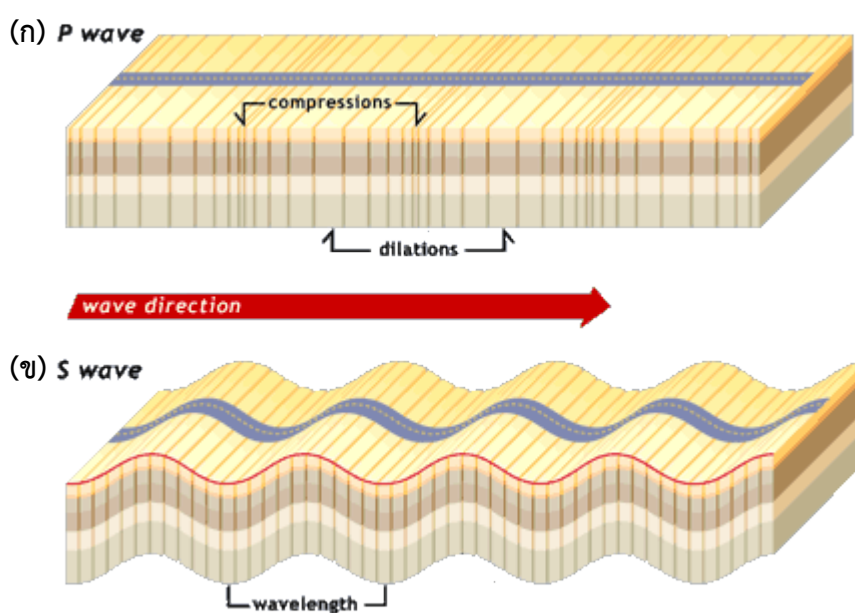


รูปที่ 2.2 แสดงรอยเลื่อนมีพลังบริเวณจังหวัดเชียงราย (กรมทรัพยากรธรณี, 2553)

2.2 คลื่นแผ่นดินไหว (Earthquake Wave)

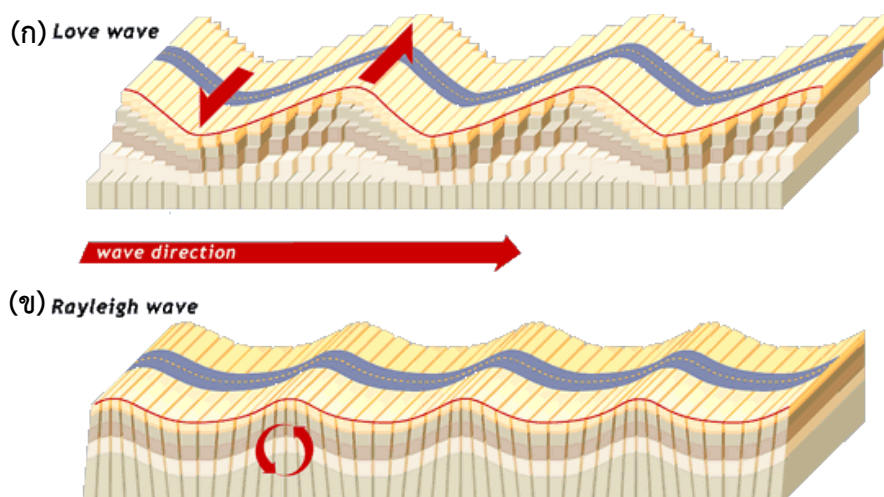
2.2.1 คลื่นไหวสะเทือน (Seismic Wave)

คลื่นแผ่นดินไหวหรือคลื่นไหวสะเทือนคือคลื่นที่เคลื่อนที่ภายในโลก ซึ่งโดยทั่วไปมักจะเกิดจากการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลก แผ่นดินไหว หรือบางครั้งเกิดจากน้ำมือมนุษย์ เช่น การระเบิดหิน การทดลองระเบิดทางทหาร นอกจากนั้นแล้วก็ยังเกิดจากการซัดของคลื่นเข้าสู่ฝั่งหรือเกิดจากพัดของลม คลื่นไหวสะเทือนสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ คือ คลื่นตัวกลาง (body wave) และคลื่นพื้นผิว (surface wave) คลื่นตัวกลางยังแบ่งออกได้เป็นสองประเภทโดยอาศัยลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคในตัวกลาง ได้แก่ คลื่นปฐมภูมิ (primary wave; P-wave) ซึ่งมีการเคลื่อนที่ของอนุภาคนานไปกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น (รูปที่ 2.3ก) และคลื่นทุติยภูมิหรือคลื่นเฉือน (secondary wave; S-wave) ซึ่งอนุภาคจะเคลื่อนที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น (รูปที่ 2.3ข) ส่วนคลื่นพื้นผิวก็แบ่งออกได้เป็นสองประเภทเช่นกันคือ คลื่นเรย์ลี (rayleigh wave) และคลื่นเลิฟ (love wave) คลื่นเรย์ลีจะเคลื่อนที่เป็นลักษณะหมุนหรือลิ่งไปบริเวณพื้นผิว (รูปที่ 2.4ก) ส่วนคลื่นเลิฟนั้นจะมีการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของคลื่น (รูปที่ 2.4ข) คลื่นเรย์ลีเป็นคลื่นที่ใช้ในการหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนของดินด้วยวิธีคลื่นพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณ (multichannel analysis of surface wave : MASW)



รูปที่ 2.3 คลื่นไหวสะเทือนประเภทคลื่นในตัวกลาง (ก) คลื่นปฐมภูมิ (ข) คลื่นทุติยภูมิ

(www.exploratorium.edu)



รูปที่ 2.4 คลื่นไหวสะเทือนประเภทคลื่นผิวดิน (ก) คลื่นเลิฟ (ข) คลื่นเรย์ลี

(www.exploratorium.edu)

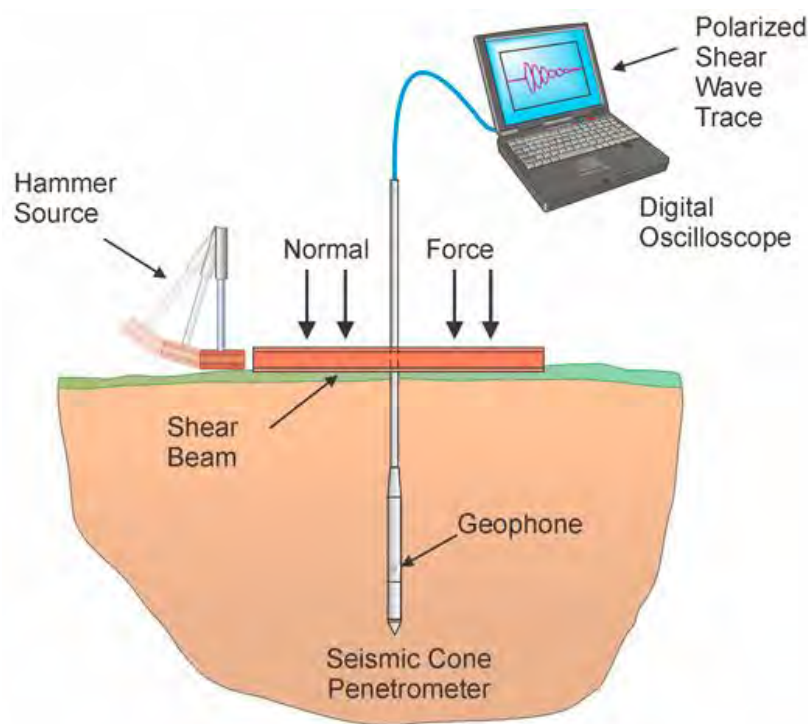
2.2.2 ความเร็วคลื่นเฉือน (Shear Wave Velocity)

ความเร็วคลื่นเฉือน เป็นคุณสมบัติเฉพาะของชั้นดิน ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการศึกษาทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค และใช้ในการประเมินการตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวของชั้นดิน การวัดความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดิน สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การสำรวจโดยคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะ (Downhole seismic) และ วิธีการวัดคลื่นพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณ (Multichannel Analysis of Surface Wave; MASW) ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน

2.2.3 การสำรวจด้วยคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะ (Downhole seismic)

วิธี Downhole seismic เป็นวิธีการวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือนในหลุมเจาะสำรวจ โดยการนำเอาตัวรับสัญญาณไปไว้ในหลุมเจาะ แล้วทำการกำเนิดคลื่นเฉือนบนพื้นดินใกล้กับบริเวณหลุมเจาะ โดยทั่วไปจะสมมติให้คลื่นเดินทางในแนวตั้ง รูปที่ 2.5 แสดงการสำรวจโดยวิธี Downhole Seismic ในการทดสอบจะทำการวัดระยะเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่มาถึงตัวรับสัญญาณแล้วคำนวณความเร็วของคลื่นตามตำแหน่งของจุดกำเนิด และจุดรับสัญญาณ

วิธี Downhole seismic นี้สามารถทำการหาความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินที่มีความเร็วต่ำ ซึ่งแทรกอยู่ระหว่างชั้นดินที่มีความเร็วสูง ถ้าตัวรับสัญญาณในหลุมเจาะมีระยะห่างไม่มาก ตัวกำเนิดคลื่นที่ใช้ในวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกันกับที่ใช้ในการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนทั่ว ๆ ไป ทั้งนี้ขนาดของตัวกำเนิดคลื่นจะขึ้นอยู่กับความลึกของการสำรวจ ในการสำรวจระดับตื้นตัวกำเนิดคลื่นอาจจะเป็นก้อนปอนด์ขนาด 5 ถึง 10 กิโลกรัม ส่วนการสำรวจในระดับลึกตัวกำเนิดคลื่นจะมีขนาดใหญ่สามารถกำเนิดคลื่นที่มีพลังงานมาก ๆ



รูปที่ 2.5 แสดงการสำรวจด้วยวิธี downhole seismic (www.static1.squarespace.com)

2.2.4 วิธีการวัดคลื่นพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณ (Multichannel Analysis of Surface Wave : MASW)

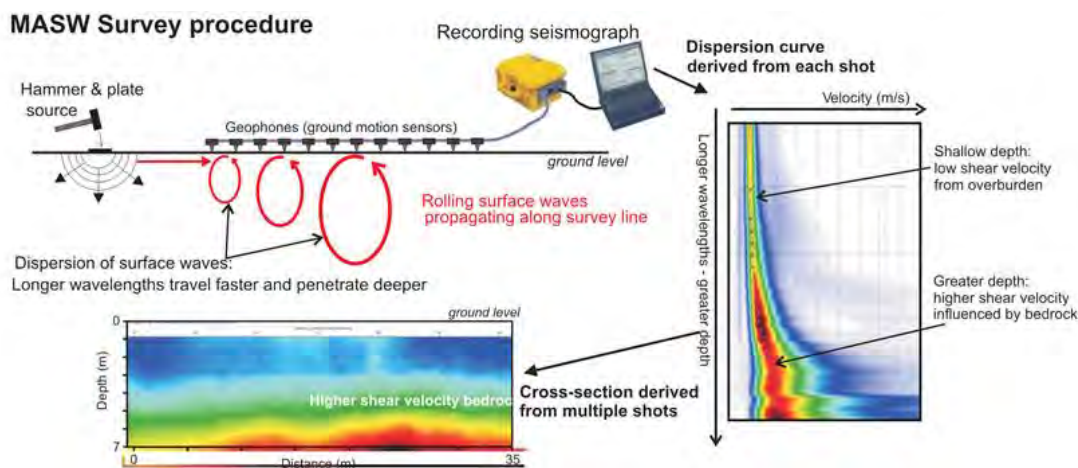
MASW เป็นวิธีหนึ่งในการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนบนพื้นผิว (surface seismic method) ข้อแตกต่างก็คือวิธีนี้จะนำคลื่นพื้นผิวชนิดคลื่นเรย์ลีมาใช้ในการวิเคราะห์ แล้วทำการแปลงคลื่นพื้นผิวให้เป็นความเร็วคลื่นเฉือนอีกทีหนึ่ง (Park et al, 1999) โดยปกติคลื่นพื้นผิวมักจะถูกจัดให้เป็นคลื่นรบกวน (noise) ในการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนทั่ว ๆ ไป และจะต้องกำจัดออกในขั้นการประมวลผล แต่ในวิธี MASW คลื่นพื้นผิวจะถูกจัดให้เป็นสัญญาณที่ต้องการ

คลื่นพื้นผิวมีคุณสมบัติเด่นหลายประการที่ทำให้เหมาะสมสำหรับการสำรวจทางวิศวกรรม และสามารถใช้ได้ในพื้นที่ซึ่งวิธีธรณีฟิสิกส์อื่น ๆ ใช้ไม่ได้ผล อย่างแรกก็คือคลื่นพื้นผิวสามารถให้กำเนิดได้ง่าย อย่างที่สอง คือคลื่นพื้นผิวมีพลังงานของคลื่นมากเมื่อเทียบกับคลื่นชนิดอื่น ๆ จึงทำให้สามารถตรวจจับ และแยกแยะได้ง่าย ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้วิธี MASW มีความเหมาะสมอย่างมากในการสำรวจทางวิศวกรรม รวมไปถึงมีค่าใช้จ่ายที่ถูกลง และทำได้รวดเร็ว

การเก็บข้อมูล MASW มีความใกล้เคียงกับการเก็บข้อมูลการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนทั่วไป ความแตกต่างก็คือวิธี MASW จะใช้ตัวรับสัญญาณที่มีความถี่ต่ำอยู่ในช่วง 4 – 10 เฮิรตซ์ ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่สอดคล้องกับความถี่ของคลื่นพื้นผิวที่มักจะมีค่าต่ำกว่าคลื่นชนิดอื่น ๆ รูปที่ 2.6 แสดงการเก็บข้อมูล MASW ในสนาม เครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจประกอบไปด้วย เครื่องรับสัญญาณ (Seismograph) เครื่องคอมพิวเตอร์ (Computer) ตัวรับสัญญาณ (Geophone) เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Source)

การเก็บข้อมูลเริ่มจากการวางตัวรับสัญญาณหลาย ๆ ตัวลงบนพื้นดินเป็นแนวเส้นตรงที่ระยะห่างเท่า ๆ กันหลังจากนั้นจะทำการกำเนิดคลื่นพื้นผิวในระยะห่างที่เหมาะสมจากตัวรับสัญญาณตัวที่ 1 สัญญาณที่ถูกตรวจวัดได้จากตัวรับสัญญาณทุกตัวจะถูกส่งไปที่เครื่องบันทึกสัญญาณ แล้วส่งไปเก็บไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์

การประมวลผลข้อมูล MASW ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 เป็นการนำข้อมูลที่ได้อาจจากการสำรวจมาผ่านกระบวนการเบื้องต้นในการกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ให้เหมาะสมสำหรับข้อมูลแต่ละชุด หลังจากนั้นทำการเปลี่ยนข้อมูลในขั้นตอนที่ 1 ให้อยู่ในกราฟระหว่างความถี่กับความเร็วของคลื่นพื้นผิวโดยกระบวนการ Fourier Transform กราฟดังกล่าวเรียกว่า Dispersion curve ซึ่งสำหรับวิธี MASW นี้จะพิจารณาเฉพาะ Fundamental mode ของคลื่นพื้นผิวเท่านั้น ในขั้นตอนที่ 3 เป็นการหาความเร็วคลื่นเฉือนจาก Dispersion curve ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 ด้วยวิธีการคำนวณย้อนกลับ (Inversion) ผลที่ได้คือกราฟที่แสดงค่าความเร็วคลื่นเฉือนเทียบกับความลึก



รูปที่ 2.6 แสดงการเก็บข้อมูลคลื่นพื้นผิวด้วยวิธี MASW (Modified from Park et al, 1999)

2.2.5 การเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธี Downhole Seismic กับ MASW

จากงานวิจัยของ อธิติมากรและคณะ (2551) ได้ศึกษาและประเมินศักยภาพของวิธีการวัดคลื่นพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณเปรียบเทียบกับวิธีการวัดคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะ เพื่อการหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนของดินกรุงเทพฯ จากข้อมูลและผลวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยครั้งนี้สรุปได้ว่าวิธี MASW สามารถใช้ในการหาความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินในกรุงเทพฯ ได้ และสามารถทำได้รวดเร็วกว่า ง่ายกว่า และมีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าวิธี Downhole seismic ความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธี MASW มีความใกล้เคียงมากเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีการวัดในหลุมเจาะ โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ที่ 12.81% ซึ่งถือว่ายอมรับได้

จากงานวิจัยของ Miller et al. (2001) ได้ศึกษาและประเมินศักยภาพของวิธีการวัดคลื่นพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณเปรียบเทียบกับวิธีการวัดคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะเช่นกัน ซึ่งเป็น

งานวิจัยที่ได้เปรียบเทียบกับในหลาย ๆ พื้นที่ เพื่อวัดค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของทั้ง 2 วิธี และกำหนดเป็นค่ามาตรฐาน โดยได้ผลการวิจัยว่าถ้าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมีค่าน้อยกว่า 18% จะเป็นค่าที่อยู่ในช่วงยอมรับได้ และถ้าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมีค่าน้อยกว่า 9% จะเป็นค่าที่ถือว่าอยู่ในช่วงที่ดี

2.3 การแบ่งประเภทชั้นดินสำหรับกรวิเคราะห์การตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหว

National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP) ได้มีการจัดประเภทของชั้นดินเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้านการตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวขึ้น โดยใช้ความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยในช่วงความลึก 30 เมตรแรก (V_{s30}) เป็นตัวกำหนดชนิดของดิน ซึ่งเรียกการแบ่งประเภทนี้ว่า NEHRP Site Classification ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดง NEHRP Site Classification ของชั้นดิน (NEHRP, 2003)

ชนิดของดินตาม NEHRP	คำอธิบายทั่วไป	ความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ 30 เมตรแรก (เมตร/วินาที)
A	Hard rock	> 1500
B	Rock	$760 < V_s \leq 1500$
C	Very dense soil and soft rock	$360 < V_s \leq 760$
D	Stiff soil	$180 \leq V_s \leq 360$
E	Soft soil	< 180
F	Soils requiring site specific evaluations	-

2.4 ค่าอัตราเร่งสูงสุดที่พื้นดิน (Peak Ground Acceleration; PGA)

ค่าอัตราเร่งสูงสุดของพื้นดิน (Peak Ground Acceleration; PGA) เป็นค่าที่มีความสำคัญในการออกแบบเชิงวิศวกรรมของอาคารในบริเวณที่มีความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหว มีหน่วยเป็นค่าอัตราเร่ง ฟุต/วินาที² หรือ เซนติเมตร/วินาที² หรือ เป็นสัดส่วนของค่าอัตราเร่งหรือแรงโน้มถ่วงของโลก (% ของค่า g) หรือหน่วยเป็น gal (ประมาณ 980 gal เท่ากับ 1 g) ค่า PGA สามารถหาได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือ จากการวิเคราะห์จากคลื่นความสั่นสะเทือนที่ตรวจวัด โดยค่า PGA กับคลื่นแผ่นดินไหวสามารถดูได้จากค่าแอมพลิจูดที่สูงที่สุดของคลื่นแผ่นดินไหวที่แสดงค่าอัตราเร่งของคลื่นในโดเมนเวลา

2.5 การขยายแรงแผ่นดินไหวของชั้นดิน (Soil Amplification)

แผ่นดินไหวเป็นปฏิกิริยาที่คาดการณ์ได้ยาก ซึ่งแผ่นดินไหวจะถูกลดพลังงานลง เมื่อเดินทางผ่านแผ่นเปลือกโลก แต่ในบางครั้งเมื่อคลื่นแผ่นดินไหวเดินทางผ่านชั้นดินอ่อน จะถูกขยายสัญญาณขึ้น ซึ่งการขยายสัญญาณและพลังงานแผ่นดินไหวนี้ถือเป็นคุณสมบัติเฉพาะของชั้นดินแต่ละบริเวณ จากรายงานของสำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา (2558) สำหรับแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นเมื่อวันที่ 5 พฤษภาคม 2557 เวลา 18.08 น. (ตามเวลาประเทศไทย) บริเวณตำบลจอมหมอกแก้ว อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย ละติจูด 19.756 องศาเหนือ ลองจิจูด 99.687 องศาตะวันออก ขนาดแผ่นดินไหว 6.3 ความลึก 2 กิโลเมตร ความรุนแรงระดับ VIII ตามมาตราเมอร์คัลลี ประชาชนรู้สึกสั่นไหวได้ในหลายพื้นที่ หนึ่งในนั้นคือประชาชนที่อาศัยอยู่บนอาคารสูงในกรุงเทพฯ เนื่องจากกรุงเทพฯตั้งอยู่บนชั้นดินอ่อนซึ่งมีคุณลักษณะในการขยายแรงสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหวได้ถึง 3 - 4 เท่า

จากงานวิจัยของ เศรษฐ์ธนนท์ (2558) ได้ศึกษาผลกระทบของแรงค์ประกอบและสมบัติความยืดหยุ่น ต่อตัวประกอบการขยายของตัวอย่างดินจากจังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งได้สรุปผลการวิจัยว่าตัวประกอบการขยายค่าระหว่าง 1.7 ถึง 2.1 สำหรับชั้นดินในอำเภอบางพลี และ 1.2 ถึง 1.5 สำหรับชั้นดินในอำเภอบางเสาธง จังหวัดสมุทรปราการ

จากงานวิจัยของ จินตประสาธ (2559) ได้ศึกษาการประเมินการขยายแรงแผ่นดินไหวของชั้นดินโดยใช้ข้อมูลธรณีฟิสิกส์และธรณีเทคนิคในอำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย และได้จัดทำแผนที่แสดงอัตราการขยายแรงแผ่นดินไหวของชั้นดินโดยใช้โปรแกรม SHAKE2000 สรุปได้ว่าอัตราการขยายแรงแผ่นดินไหวของชั้นดินในอำเภอเมือง จังหวัดเชียงรายอยู่ในช่วง 1.77 – 3.58 เท่า

อัตราการขยายแรงแผ่นดินไหวของชั้นดิน (amplification ratio) หาได้จากสมการ:

$$\text{Amplification ratio} = \frac{PGA_{\text{surface}}}{PGA_{\text{bedrock}}}$$

โดย PGA_{surface} = ค่าอัตราเร่งสูงสุดที่พื้นผิว

PGA_{bedrock} = ค่าอัตราเร่งสูงสุดที่หินฐาน

2.6 คาบการสั่นพื้นฐาน (Fundamental Period) ของอาคาร

คาบการสั่นพื้นฐานของอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ เป็นคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่สำคัญตัวแปรหนึ่งในงานก่อสร้างทางด้านวิศวกรรม จากงานวิจัยของ วานิชชัยและคณะ (2543) ได้ทำการศึกษาคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในกรุงเทพฯ ที่มีความสูงระหว่าง 20 ถึง 150 เมตร จำนวน 21 อาคาร ทำการศึกษาโดยวัดการสั่นไหวโดยธรรมชาติของอาคารด้วยหัตถ์วัดแบบความเร่งที่มีความไวสูง โดยสัญญาณความเร่งที่วัดได้ ซึ่งอยู่ในรูปของโดเมนเวลา (time domain) ได้ถูกแปลงเป็นโดเมนความถี่ (frequency domain) ด้วยวิธี Fourier Transform จากนั้นสัญญาณในรูปโดเมนความถี่ถูกนำมาใช้ในการหาความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นไหวของอาคาร รูปแบบวิธีการวัดและการวิเคราะห์ที่ได้รับการปรับปรุงให้สามารถหารูปแบบการสั่นไหวของอาคารในลักษณะ 3 มิติ เช่น การสั่นไหวทางด้านข้างร่วมกับการหมุนตัว ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่ออาคารมีจุดศูนย์กลางมวลอยู่ไม่ตรงกับจุดศูนย์กลางสติเฟนสของโครงสร้าง นอกจากนี้การโยกตัวอย่างเป็นจังหวะของกลุ่มคนได้ถูกนำมาใช้กระตุ้นการสั่นไหวของอาคารในกรณีที่มีการสั่นไหวในโหมดนั้นไม่ชัดเจน การกระตุ้นด้วยวิธีนี้สามารถทำให้การหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโหมดนั้น ๆ มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารได้ถูกใช้พื้นฐานในการสร้างสูตรสำหรับการประมาณคาบการสั่นไหวพื้นฐาน (Fundamental Period) ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังสมการ:

$$T = 0.015H^{1.05} \quad (\text{วานิชชัยและคณะ, 2543})$$

โดย T = คาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร (วินาที)

H = ความสูงของอาคาร (เมตร)

ซึ่งได้สรุปคาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร ตั้งแต่ 1 ชั้น ถึง 20 ชั้น ดังตารางที่ 2.2

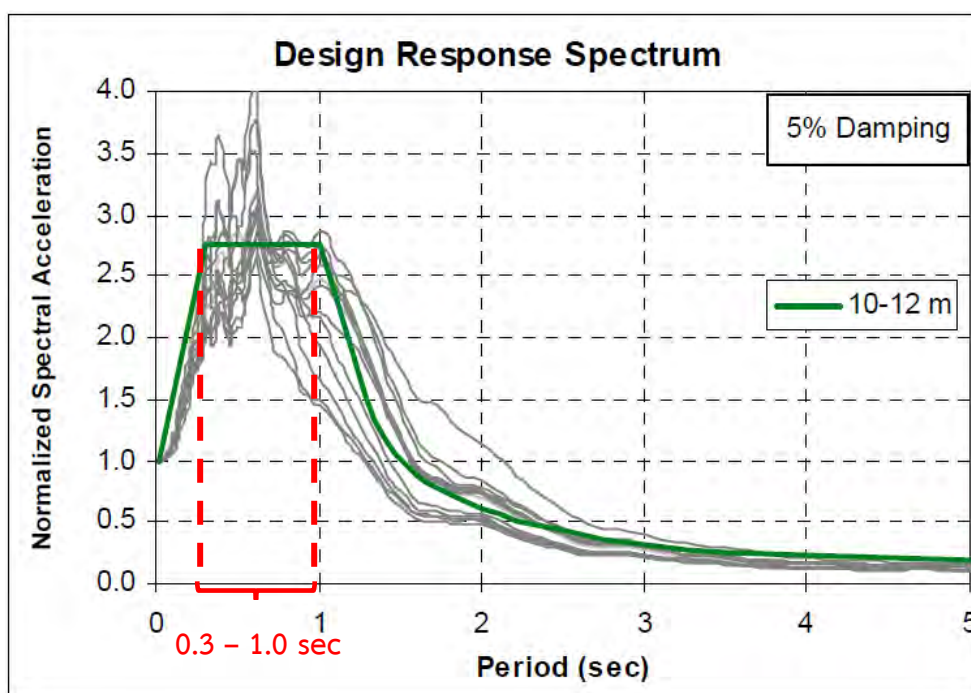
ตารางที่ 2.2 แสดงคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 20 ชั้น

จำนวนชั้น	ความสูงของอาคาร (เมตร)	คาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร (วินาที)
1	3	0.05
2	6	0.10
3	9	0.15
4	12	0.20
5	15	0.26
6	18	0.31
7	21	0.37
8	24	0.42
9	27	0.48
10	30	0.53
11	33	0.59
12	36	0.65
13	39	0.70
14	42	0.76
15	45	0.82
16	48	0.87
17	51	0.93
18	54	0.99
19	57	1.05
20	60	1.10

2.7 วิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมการตอบสนอง (Response Spectrum Method)

โดยวิธีนี้จะต้องคำนวณหาความถี่ธรรมชาติและรูปแบบการสั่นที่สอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติ โดยการวิเคราะห์แบบอีลาสติก จากนั้นค่าความเร่งของแต่ละรูปแบบการสั่นก็หาได้จากสเปกตรัมการตอบสนอง (Response Spectrum) และนำไปคำนวณหาแรงแผ่นดินไหวของแต่ละรูปแบบการสั่น โดยเทียบกับความเร่งสูงสุด แรงแผ่นดินไหวที่คำนวณได้นี้จะนำมารวมกัน (กระทำซ้อนกัน) โดยวิธีการที่เรียกว่า SRSS (Square – Root of the Sum of the Square) ปกติแล้วรูปแบบการสั่นเพียงสองหรือสามแบบแรกเท่านั้นที่จะนำมาเพราะเหตุว่ารูปแบบการสั่นที่สูงกว่านี้จะมีผลเล็กน้อยต่อแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดตลอดจนการเคลื่อนที่ ซึ่งถ้าคาบการสั่นที่ได้จากความถี่ธรรมชาติของชั้นดินไปตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารหรือโครงสร้างพื้นฐาน จะทำให้เกิดการสั่นพ้องขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดการสั่นที่รุนแรงและนำไปสู่การพังทลายได้

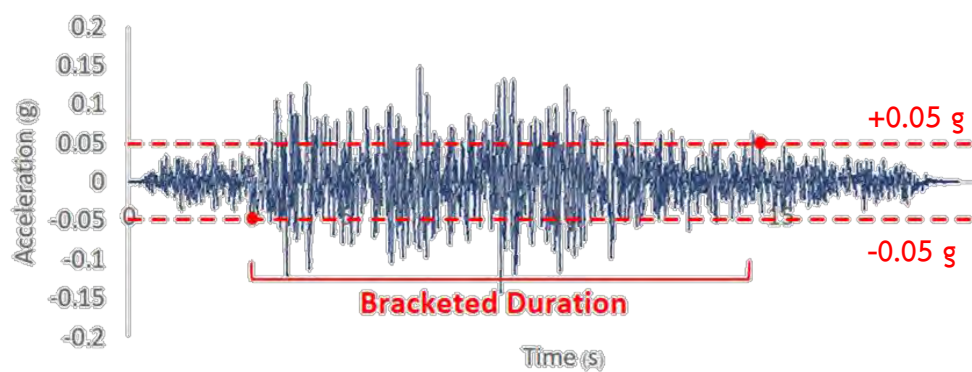
จากงานวิจัยของ ยานูวิริยะกุล (2542) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของชั้นดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ เซึ่งพื้นที่เนื่องจากแรงกระทำแผ่นดินไหว จากรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงช่วงกราฟที่สูงขึ้น ซึ่งตรงกับคาบการสั่นที่ 0.3 – 1.0 วินาที ทางผู้วิจัยสรุปให้คาบการสั่นของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ในช่วงความลึก 10 – 12 เมตร ตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารที่สูง 3 – 10 ชั้น



รูปที่ 2.7 กราฟแสดงสเปกตรัมการตอบสนองของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ในช่วงความลึก 10 – 12 เมตร

2.8 ระยะเวลาการสั่นไหว (Bracketed Duration)

ระยะเวลาการสั่นไหว (Bracketed Duration) คือ ช่วงเวลาที่คลื่นแผ่นดินไหวมักมีผลกระทบต่ออาคารหรือสิ่งปลูกสร้างต่าง ๆ โดยเริ่มนับจากจุดที่คลื่นมีค่าอัตราเร่งสูงสุดที่ผิวดินมากกว่า 0.05 g ไปจนถึงจุดสุดท้ายที่คลื่นมีค่าอัตราเร่งมากกว่า 0.05 g (Bolt, 1969)



รูปที่ 2.8 แสดงการนับช่วงเวลาการสั่นไหว (Bracketed Duration)

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 ข้อมูลหลุมเจาะและข้อมูลความเร็วคลื่นเฉือน

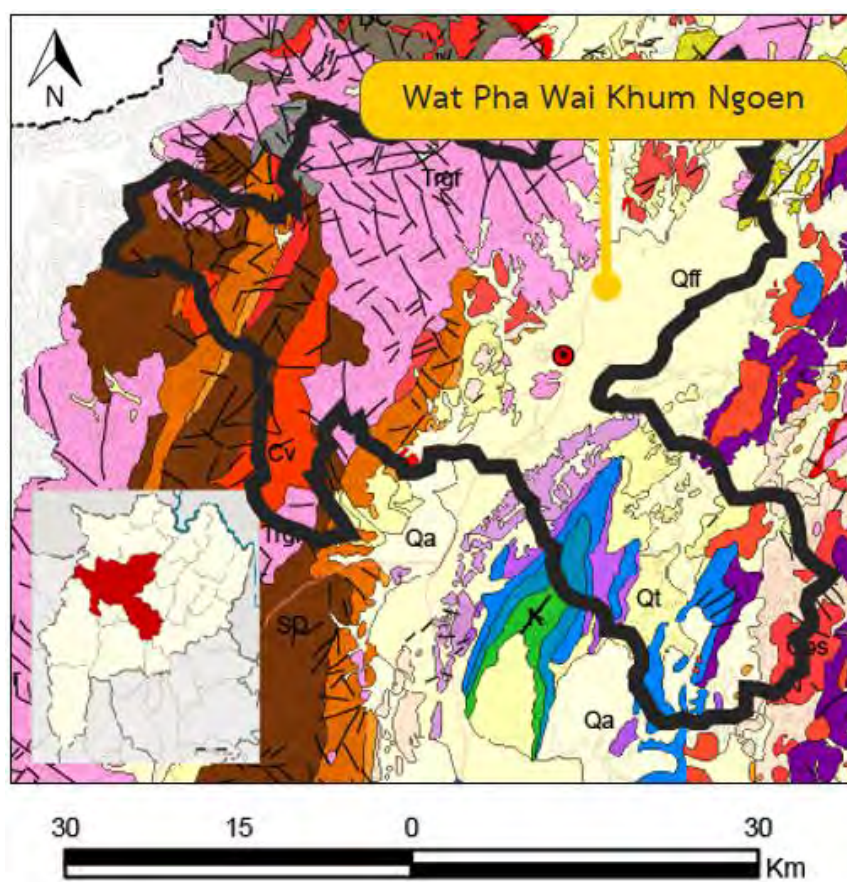
ข้อมูลหลุมเจาะที่ใช้เป็นข้อมูลหลุมเจาะที่วัดป่าห้วยขุมเงิน (รูปที่ 3.1) อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 (จินตประสาธ, 2559) และข้อมูลความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธี MASW (จินตประสาธ, 2559) กับวิธี Downhole seismic (กรมทรัพยากรธรณี, 2557) ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และรูปที่ 3.2 โดยชั้นดินมีความลึกทั้งหมด 30 เมตร ชั้นบนสุดเป็นดินทรายขนาดปานกลาง หนา 3 เมตร มีหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 16 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธี MASW เท่ากับ 250 เมตรต่อวินาที และมีความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธี Downhole seismic เท่ากับ 150 เมตรต่อวินาที ชั้นที่ 2 เป็นดินทรายเนื้อแน่นขนาดปานกลาง หนา 12 เมตร มีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 18 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธี MASW เท่ากับ 300 เมตรต่อวินาที และมีความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธี Downhole seismic เท่ากับ 325 เมตรต่อวินาที ชั้นที่ 3 เป็นดินทรายปนทรายแป้ง มีกรวดเล็กน้อย หนา 15 เมตร มีค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 20 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธี MASW เท่ากับ 450 เมตรต่อวินาที และมีความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธี Downhole seismic เท่ากับ 845 เมตรต่อวินาที และชั้นที่วางตัวล่างสุดเป็นหินฐานมีความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธี MASW เท่ากับ 700 เมตรต่อวินาที และมีความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธี Downhole seismic เท่ากับ 1,090 เมตรต่อวินาที ซึ่งกำหนดให้ทุกชั้นมีอัตราส่วนการหน่วงเท่ากับ 5%

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลหลุมเจาะที่วัดป่าห้วยขุมเงิน อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย

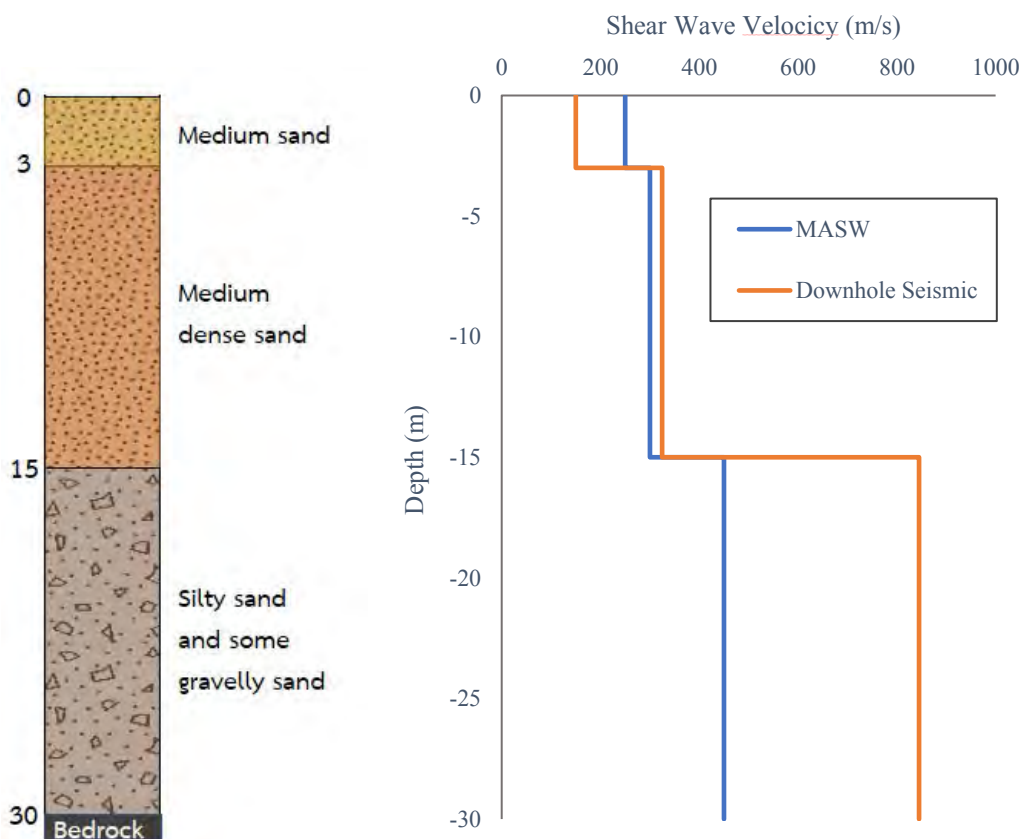
ชั้นที่	ชนิดดิน	ความหนา (เมตร)	อัตราส่วน การหน่วง (%)	หน่วยน้ำหนัก (กิโลกรัม/เมตร ³)
1	ดินทราย ขนาดปานกลาง	3	5	16
2	ดินทรายเนื้อแน่น ขนาดปานกลาง	12	5	18
3	ดินทรายปนทรายแป้ง ที่มีกรวดเล็กน้อย	15	5	20
4	หินฐาน	-	5	22

ตารางที่ 3.2 แสดงความเร็วคลื่นเฉือนของหลุมเจาะจากทั้ง 2 วิธี

ชั้นที่	ชนิดดิน	ความเร็วคลื่นเฉือน (เมตร/วินาที) (จินตประสาท, 2559)	ความเร็วคลื่นเฉือน (เมตร/วินาที) (กรมทรัพยากรธรณี, 2557)
1	ดินทราย ขนาดปานกลาง	250	150
2	ดินทรายเนื้อแน่น ขนาดปานกลาง	300	325
3	ดินทราย ปนทรายแป้ง ที่มีกรวดเล็กน้อย	450	845
4	หินฐาน	700	1090



รูปที่ 3.1 แสดงตำแหน่งของหลุมเจาะที่วัดป่าห้วยชุมเงิน อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย



รูปที่ 3.2 (ก) แสดงลำดับชั้นหินของหลุมเจาะ (ข) กราฟแสดงความเร็วคลื่นเฉือนของหลุมเจาะ

3.1.2 ข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหว

คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบไปด้วย 9 คลื่นแผ่นดินไหว แบ่งเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่มีขนาดแผ่นดินไหวใกล้เคียงกัน ระยะทางจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหวแตกต่างกัน (รูปที่ 3.3) ประกอบด้วยคลื่นแผ่นดินไหว Nahanni คลื่นแผ่นดินไหว Kobe และคลื่นแผ่นดินไหว Loma Gilroy กลุ่มที่ 2 เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่มีระยะห่างจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหวใกล้เคียงกัน ขนาดแผ่นดินไหวแตกต่างกัน (รูปที่ 3.4) ประกอบด้วยคลื่นแผ่นดินไหว Chichi คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli และคลื่นแผ่นดินไหว Coyote และกลุ่มที่ 3 เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียง (รูปที่ 3.5) ประกอบด้วยคลื่นแผ่นดินไหว Chiang Rai คลื่นแผ่นดินไหว Myanmar และคลื่นแผ่นดินไหว Yunnan โดยรายละเอียดของแต่ละคลื่นแผ่นดินไหวแสดงไว้ในตารางที่ 3.3

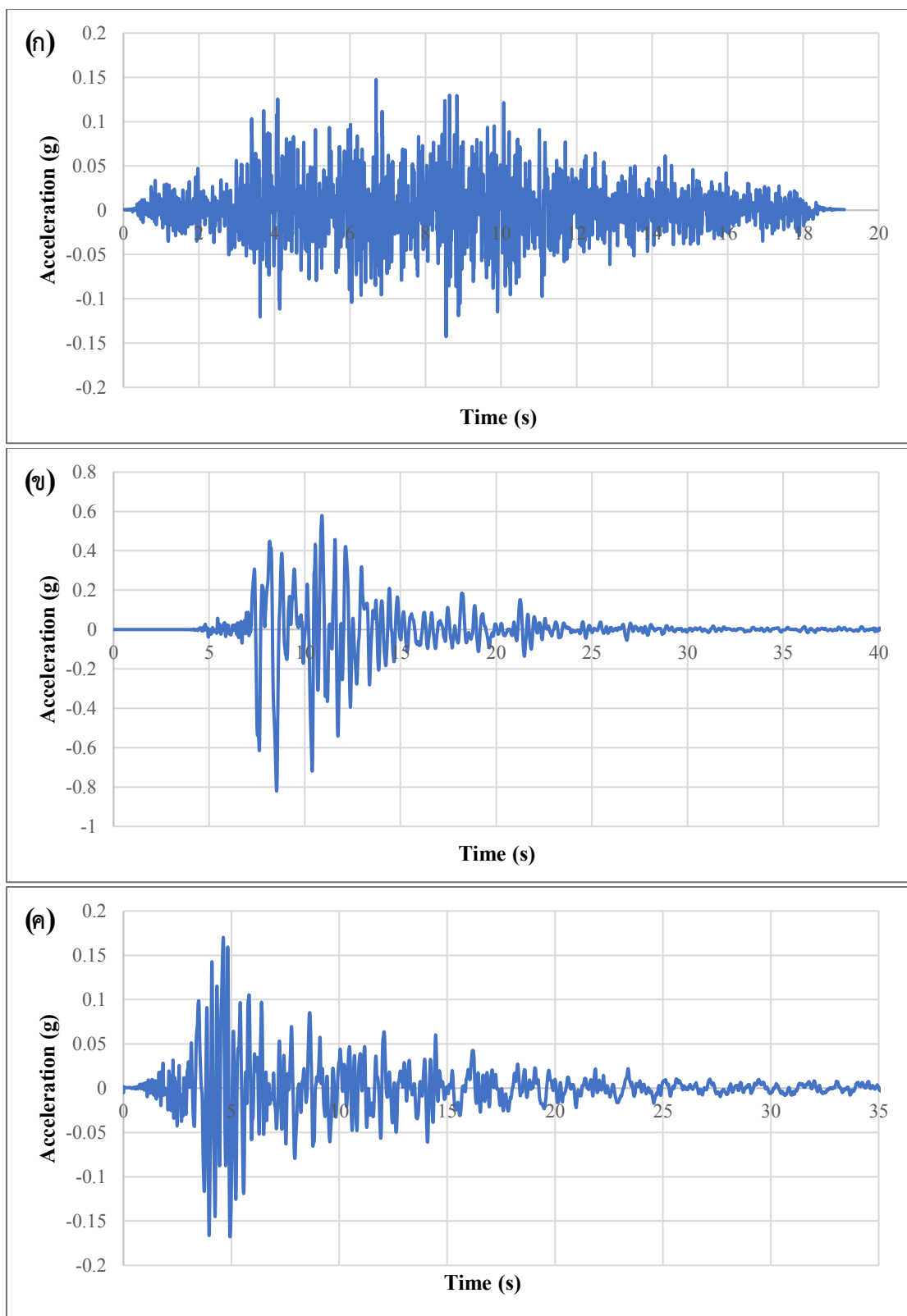
คลื่นแผ่นดินไหวชุดที่ 1 และคลื่นแผ่นดินไหวชุดที่ 2 เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่มีอยู่ในโปรแกรม Deepsoil ใช้ในการวิเคราะห์การตอบสนองของชั้นดิน เป็นการบันทึกข้อมูลคลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวใหญ่ ๆ ทั่วโลก ซึ่งทำการบันทึกโดย The Pacific Earthquake Engineering

Research Center (PEER) เป็นศูนย์วิจัยและศูนย์การเรียนรู้ทางด้านการออกแบบอาคารและโครงสร้างพื้นฐานเพื่อต้านทานแผ่นดินไหว มีสำนักงานใหญ่อยู่ที่มหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนีย ซึ่งบันทึกเป็นฐานข้อมูลแรงสั่นสะเทือนจากแผ่นดินไหวที่รุนแรง (PEER Strong Ground Motion Database)

สำหรับคลื่นแผ่นดินไหวชุดที่ 3 เป็นข้อมูลจากสำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมทรัพยากรธรณี เป็นข้อมูลในรูปแบบของคลื่นแผ่นดินไหวในโดเมนเวลาที่บันทึกได้ (wave record) จากเหตุการณ์แผ่นดินไหว 3 เหตุการณ์ แล้วถูกแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลเชิงตัวเลข (numerical data) ด้วยโปรแกรม SeisGram2K เพื่อนำไปใช้ในการจำลองการตอบสนองของชั้นดินด้วยโปรแกรม DEEPSOIL หน่วยของข้อมูลถูกแปลงเป็นเมตรต่อวินาทีโดยการหารด้วย 213909.5 ซึ่งเป็นค่าคงที่ของเครื่องวัดความเร่งการเคลื่อนที่ของวัตถุ (accelerator) ของสำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมทรัพยากรธรณี และถูกแปลงอีกครั้งเป็นหน่วยสัดส่วนของค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (% ของค่า g) หรือหน่วย gal (ประมาณ 980 gal เท่ากับ 1 g)

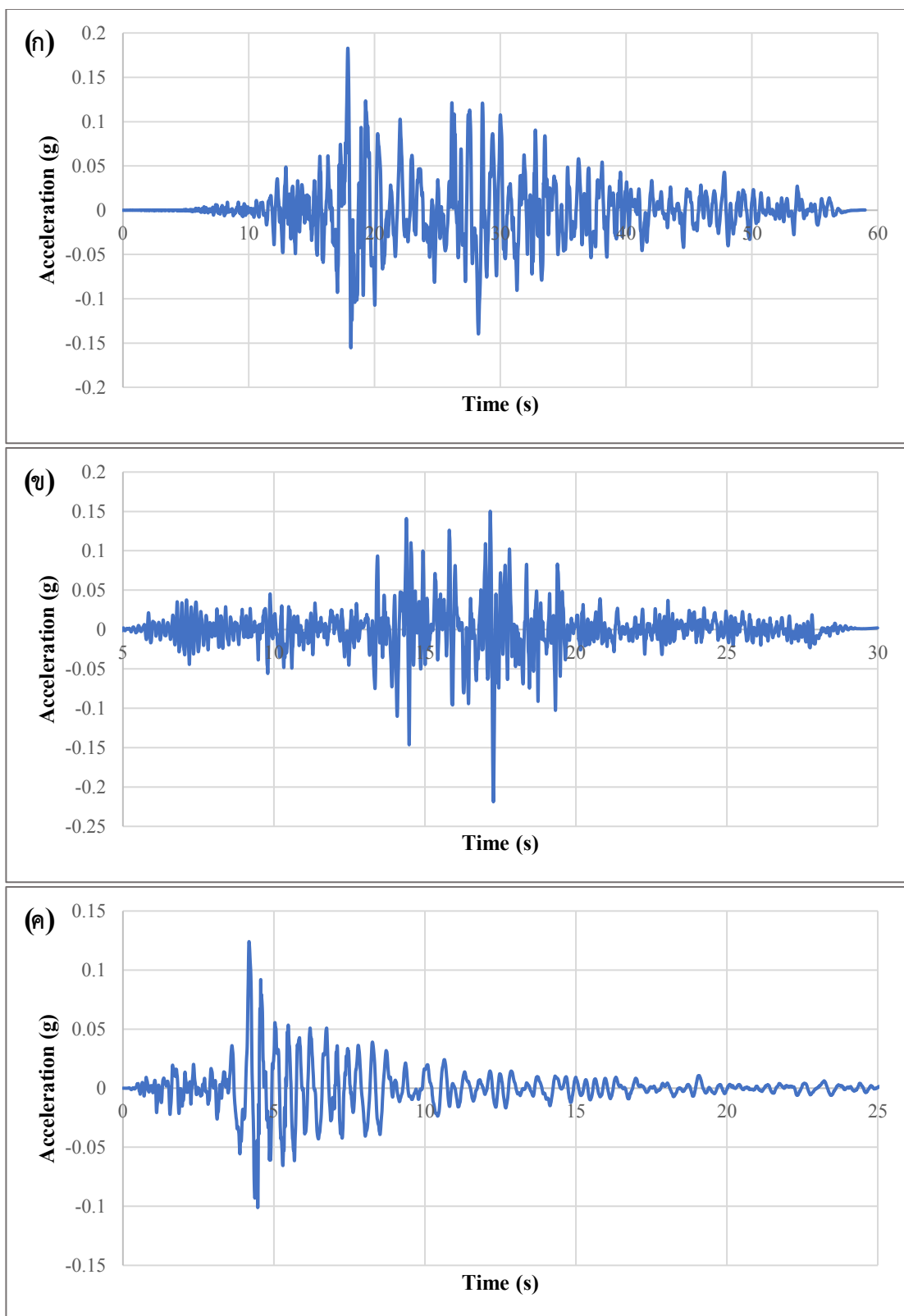
ตารางที่ 3.3 แสดงข้อมูลของคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

กลุ่ม ที่	พารามิเตอร์	วันที่เกิด แผ่นดินไหว	ขนาดแผ่นดินไหว (แมกนิจูด : M_w)	ระยะห่างจาก จุดกำเนิด (กม.)	PGA (g)
1	Nahanni	23/12/2528	6.8	16.0	0.148
	Kobe	16/01/2538	6.9	0.6	0.821
	Loma Gilroy	18/10/2532	6.9	19.9	0.170
2	Chichi	20/09/2542	7.6	15.29	0.183
	Kocaeli	17/08/2542	7.4	17.0	0.218
	Coyote	06/08/2522	5.7	17.2	0.124
3	Chiang Rai	05/05/2557	6.3	20	0.0072
	Myanmar	15/01/2560	5.1	175.3	0.0157
	Yunnan	28/01/2557	6.0	458	0.0034

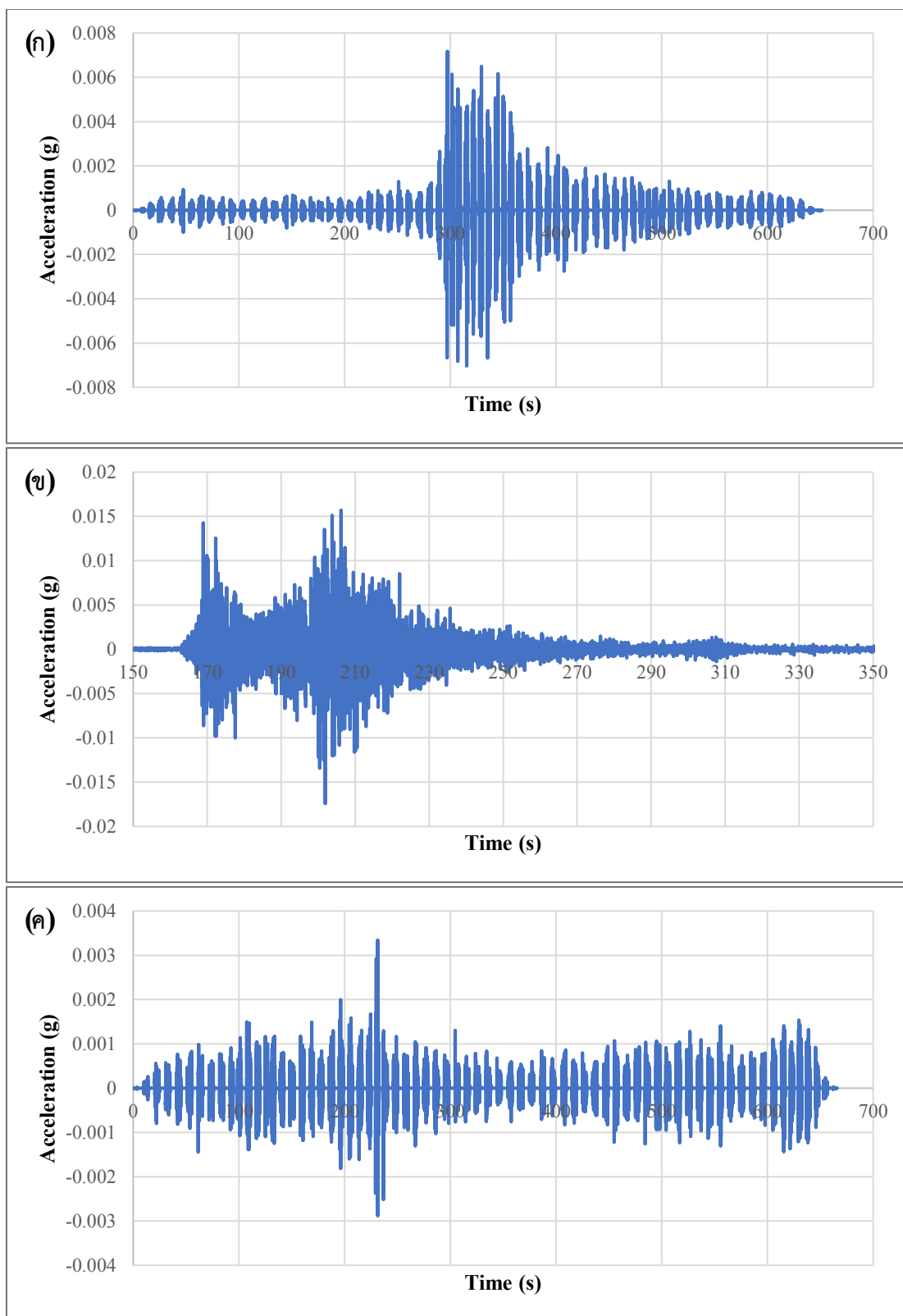


รูปที่ 3.3 กราฟแสดงคลื่นแผ่นดินไหวในโดเมนเวลาของคลื่นแผ่นดินไหวชุดที่ 1

(ก) คลื่นแผ่นดินไหว Nahanni (ข) คลื่นแผ่นดินไหว Kobe (ค) คลื่นแผ่นดินไหว Loma Gilroy



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงคลื่นแผ่นดินไหวในโดเมนเวลาของคลื่นแผ่นดินไหวชุดที่ 2
 (ก) คลื่นแผ่นดินไหว Chichi (ข) คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (ค) คลื่นแผ่นดินไหว Coyote

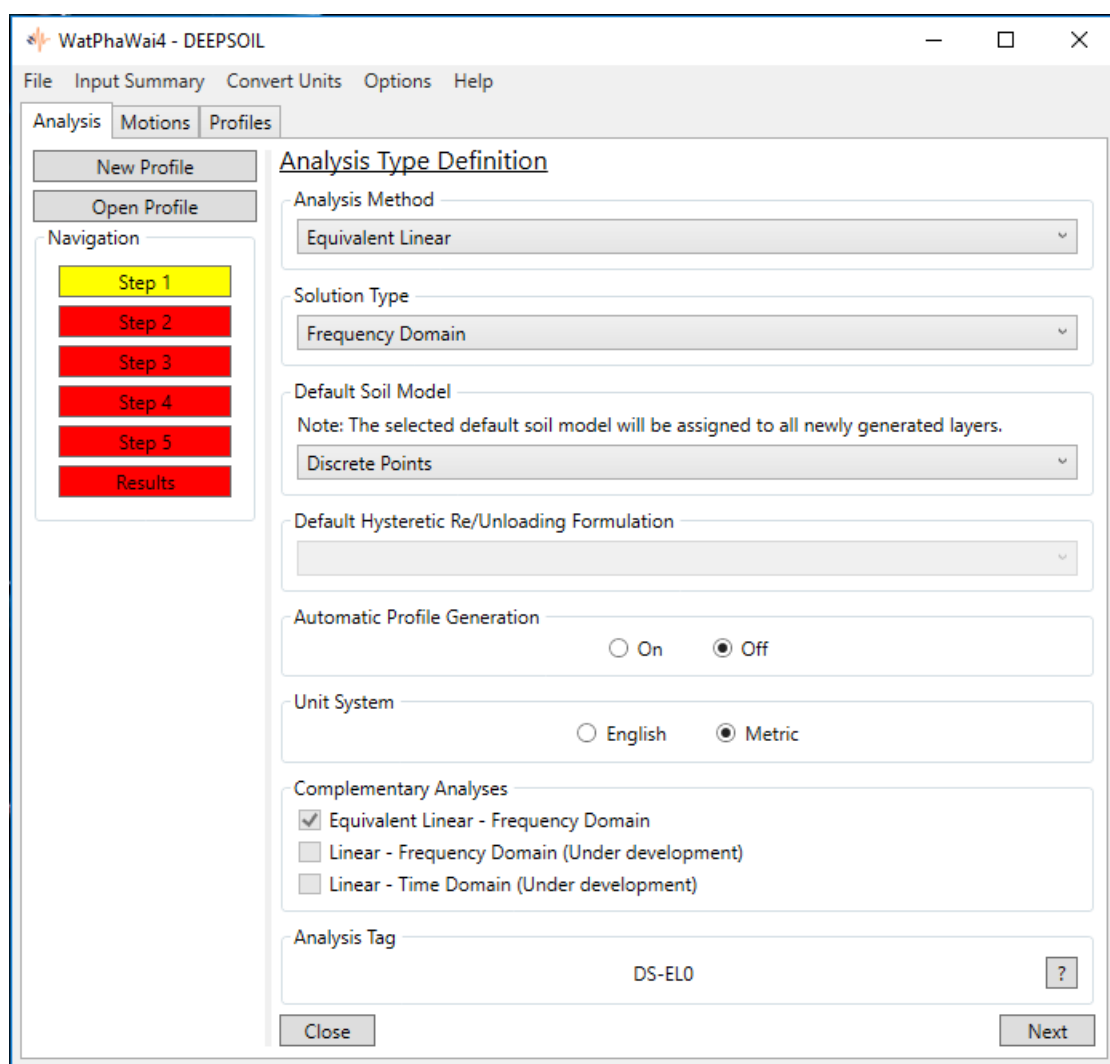


รูปที่ 3.5 กราฟแสดงคลื่นแผ่นดินไหวในโดเมนเวลาของคลื่นแผ่นดินไหวชุดที่ 3

(ก) คลื่นแผ่นดินไหว Chiang Rai (ข) คลื่นแผ่นดินไหว Myanmar (ค) คลื่นแผ่นดินไหว Yunnan

3.2 การประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรม DEEPSOIL

โปรแกรม DEEPSOIL (รูปที่ 3.6) เป็นโปรแกรมวิเคราะห์การตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวของชั้นดินแบบ 1 มิติ (Hashash et al., 2017) เพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการออกแบบอาคารและโครงสร้างพื้นฐานให้ต้านทานแรงแผ่นดินไหว โปรแกรมสามารถวิเคราะห์ได้ 3 รูปแบบ รูปแบบที่ 1 วิเคราะห์โดเมนเวลาแบบสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น 1 มิติ (1D nonlinear time domain analyses) รูปแบบที่ 2 วิเคราะห์โดเมนความถี่แบบสมการเชิงเส้นอควิวาเลนท์ 1 มิติ (1D equivalent linear frequency domain analyses) รูปแบบที่ 3 วิเคราะห์ทั้งโดเมนเวลาและความถี่สมการเชิงเส้น 1 มิติ (1D linear time and frequency domain analyses) โดยการศึกษาในครั้งนี้ จะใช้การวิเคราะห์โดเมนความถี่แบบสมการเชิงเส้นอควิวาเลนท์ 1 มิติ โดยใช้ค่าเริ่มต้นของแบบจำลองชั้นดินเป็นแบบจุดแยก (discrete point)



รูปที่ 3.6 แสดงโปรแกรม DEEPSOIL (Hashash et al., 2017)

บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

4.1 เปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือน

จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ 30 เมตร จากวิธีวัดคลื่นพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณ (Multichannel Analysis of Surface Wave : MASW) มีค่าเท่ากับ 299 เมตรต่อวินาที และค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ 30 เมตร จากวิธีสำรวจโดยคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะ (Downhole seismic) มีค่าเท่ากับ 315 เมตร ซึ่งค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยที่ 30 เมตร จากทั้งสองวิธีมีความแตกต่างอยู่ที่ 5.08 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่ายอมรับได้

การแบ่งชนิดของดินสำหรับการพิจารณาการขยายแรงแผ่นดินไหวของชั้นดินในทางวิศวกรรมศาสตร์ ทั้งสองวิธีจัดให้ชั้นดินที่วัดป่าห้วยชุมเงินเป็นชั้นดินชนิด D (ตารางที่ 4.2) คือ เป็นดินที่ค่อนข้างแข็ง ซึ่งเมื่อทดสอบด้วยการตอกทดลองมาตรฐาน (Standard Penetration test: SPT) จะมีการทดสอบตั้งแต่ 15 - 50 ครั้ง (NEHRP, 2003)

ความถี่ธรรมชาติ และ คาบการสั่นธรรมชาติของชั้นดิน ถือเป็นคุณสมบัติของดินอย่างหนึ่ง โดยความถี่ธรรมชาติของชั้นดินบริเวณวัดป่าห้วยชุมเงินจากการใช้ความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีวัดคลื่นพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณเท่ากับ 2.93 เฮิรต และค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากวิธีสำรวจโดยคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะเท่ากับ 3.35 เฮิรต ซึ่งแตกต่างกัน 12.54 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่ายอมรับได้ สำหรับค่าคาบการสั่นธรรมชาติของชั้นดินจากวิธีวัดคลื่นพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณและวิธีสำรวจโดยคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะ เท่ากับ 0.341 วินาที และ 0.299 วินาที ตามลำดับ มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 12.32 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่ายอมรับได้ (ตารางที่ 4.2)

ค่าการขยายแรงแผ่นดินไหวของชั้นดิน โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ.2557 มีขนาด 6.3 แมกนิจูด ระยะทางจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหวถึงพื้นที่ศึกษาประมาณ 20 กิโลเมตร ซึ่งการขยายแรงแผ่นดินไหวโดยใช้คลื่นเฉือนจากวิธีวัดคลื่นพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณมีการขยายแรงแผ่นดินไหว 141 เท่า (รูปที่ 4.1ก) และค่าการขยายแรงแผ่นดินไหวโดยใช้ความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีสำรวจโดยคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะมีค่า 1.52 เท่า (รูปที่ 4.1ข) ความแตกต่างของการขยายแรงแผ่นดินไหวจึงมีค่าเท่ากับ 7.24 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่ายอมรับได้

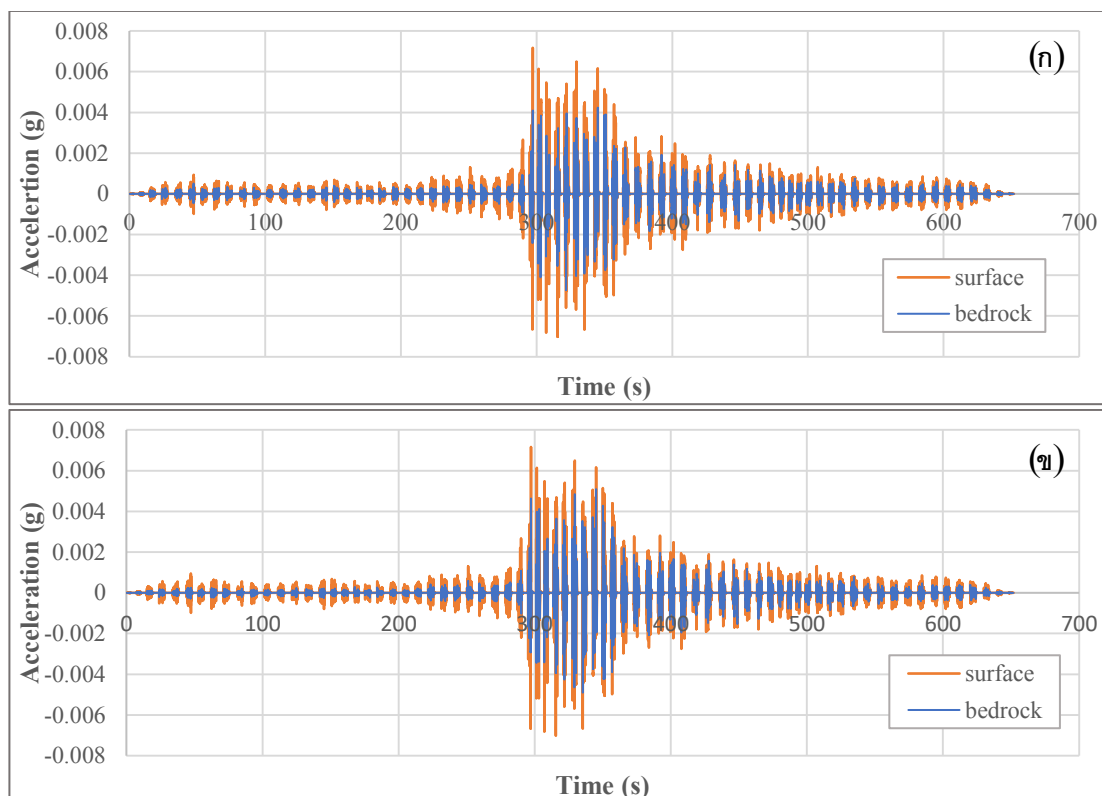
สรุปการใช้ความเร็วคลื่นเฉือนในการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวของชั้นดิน จากทั้ง 2 วิธี คือ ความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีวัดคลื่นพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณและวิธีสำรวจโดยคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะสามารถใช้ทดแทนกันได้

ตารางที่ 4.1 แสดงความเร็วคลื่นเฉือนหลุมเจาะที่วัดป่าห้วยชุมเงิน อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย

ชั้นที่	ชนิดดิน	ความหนา (เมตร)	ความเร็วคลื่นเฉือน (เมตร/วินาที) MASW (จินตประสาท, 2559)	ความเร็วคลื่นเฉือน (เมตร/วินาที) Downhole Seismic (กรมทรัพยากรธรณี, 2557)
1	ดินทราย ขนาดปานกลาง	3	250	150
2	ดินทรายเนื้อแน่น ขนาดปานกลาง	12	300	325
3	ดินทราย ปนทรายแป้ง ที่มีกรวดเล็กน้อย	15	450	845
4	หินฐาน	-	700	1090

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากวิธีวัดคลื่นพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณและวิธีสำรวจโดยคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะ

พารามิเตอร์	MASW	Downhole Seismic	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง
$V_{S(30)}$ (เมตร/วินาที)	299	315	5.08 %
NEHRP Site Class	D	D	-
ความถี่ธรรมชาติ ของชั้นดิน (เฮิรต)	2.93	3.35	12.54 %
คาบของชั้นดิน (วินาที)	0.341	0.299	12.32 %
จำนวนเท่าการขยาย แรงแผ่นดินไหว	1.41 เท่า	1.52 เท่า	7.24 %



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าความเร่งสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหวเชียงราย ($M_w = 6.3$)

(ก) ใช้ความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธี MASW (ข) ใช้ความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธี Downhole seismic

4.2 ผลการขยายสัญญาณคลื่นแผ่นดินไหวของชั้นดิน

คลื่นแผ่นดินไหวชุดที่หนึ่งเป็นชุดคลื่นแผ่นดินไหวที่มีขนาดแผ่นดินไหวใกล้เคียงกัน แต่มีระยะห่างจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหวแตกต่างกัน โดยคลื่นแผ่นดินไหวที่ผ่านชั้นดินแล้วมีค่าความเร่งสูงสุดที่ผิวดินมากที่สุดคือ คลื่นแผ่นดินไหว Kobe โดยมีค่าความเร่งสูงสุดที่ผิวดินเท่ากับ 0.821 g แต่มีค่าความเร่งสูงสุดที่หินฐานเท่ากับ 0.619 g (รูปที่ 4.2ข) ทำให้มีค่าการขยายแรงแผ่นดินไหว 1.33 เท่า ส่วนคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดการขยายแรงแผ่นดินไหวมากที่สุดในชุดนี้คือ คลื่นแผ่นดินไหว Loma Gilroy โดยมีการขยายแรงแผ่นดินไหว 1.89 เท่า ซึ่งมีค่าความเร่งสูงสุดที่ผิวดินเท่ากับ 0.170 g และมีค่าความเร่งสูงสุดที่หินฐานเท่ากับ 0.090 g (รูปที่ 4.2ค) คลื่นแผ่นดินไหว Nahanni มีการขยายแรงแผ่นดินไหวน้อยที่สุด คือ 1.27 เท่า และเป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่าความเร่งสูงสุดที่ผิวดินน้อยที่สุดเท่ากับ 0.148 g และมีค่าความเร่งสูงสุดที่หินฐานเท่ากับ 0.116 g (รูปที่ 4.2ก)

คลื่นแผ่นดินไหวชุดที่สองเป็นชุดคลื่นแผ่นดินไหวที่มีระยะห่างจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหวใกล้เคียงกัน แต่มีขนาดแผ่นดินไหวแตกต่างกัน โดยคลื่นแผ่นดินไหวที่ผ่านชั้นดินแล้วมีค่าความเร่งสูงสุดที่ผิวดินมากที่สุดและมีการขยายสัญญาณแผ่นดินไหวมากที่สุด คือ คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli โดยมีค่าความเร่งสูงสุดที่ผิวดินเท่ากับ 0.219 g มีค่าความเร่งสูงสุดที่หินฐานเท่ากับ 0.105 g ทำให้มี

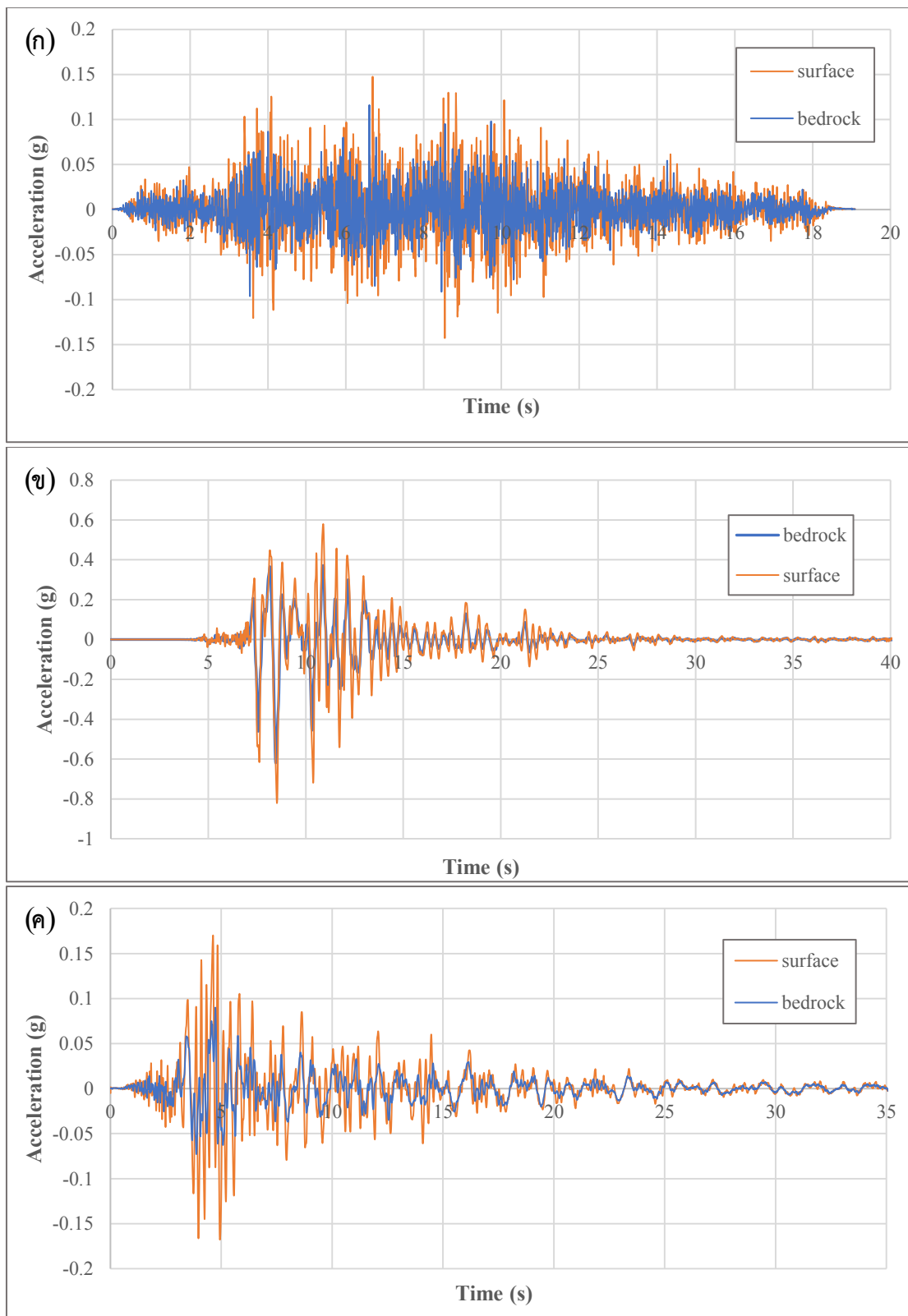
ค่าการขยายแรงแผ่นดินไหว 2.09 เท่า (รูปที่ 4.3ข) คลื่นแผ่นดินไหว Chichi มีการขยายแรงแผ่นดินไหวน้อยที่สุด คือ 1.36 เท่า มีค่าความเร่งสูงสุดที่ผิวดินและค่าความเร่งสูงสุดที่หินฐานเท่ากับ 0.183 g และ 0.135 g ตามลำดับ (รูปที่ 4.3ก) ส่วนคลื่นแผ่นดินไหว Coyote เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่าความเร่งสูงสุดที่ผิวดินน้อยที่สุดเท่ากับ 0.124 g และมีค่าความเร่งสูงสุดที่หินฐานเท่ากับ 0.067 g ทำให้มีการขยายแรงแผ่นดินไหวเท่ากับ 1.85 เท่า (รูปที่ 4.3ค)

คลื่นแผ่นดินไหวชุดที่สามเป็นชุดคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียง โดยคลื่นแผ่นดินไหวที่ผ่านชั้นดินแล้วมีค่าความเร่งสูงสุดที่ผิวดินมากที่สุดคือ คลื่นแผ่นดินไหว Myanmar โดยมีค่าความเร่งสูงสุดที่ผิวดินเท่ากับ 0.0174 g แต่มีค่าความเร่งสูงสุดที่หินฐานเท่ากับ 0.0081 g ทำให้มีการขยายแรงแผ่นดินไหว 2.15 เท่า (รูปที่ 4.4ข) ส่วนคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดการขยายแรงแผ่นดินไหวมากที่สุดในชุดนี้คือ คลื่นแผ่นดินไหว Yunnan โดยมีการขยายแรงแผ่นดินไหว 2.17 เท่า ซึ่งมีค่าความเร่งสูงสุดที่ผิวดินเท่ากับ 0.0033 g และมีค่าความเร่งสูงสุดที่หินฐานเท่ากับ 0.0015 g (รูปที่ 4.4ค) คลื่นแผ่นดินไหว Chiang Rai มีค่าการขยายแรงแผ่นดินไหวเท่ากับ 1.52 เท่า มีค่าความเร่งสูงสุดที่ผิวดินเท่ากับ 0.0072 g และมีค่าความเร่งสูงสุดที่หินฐานเท่ากับ 0.0042 g (รูปที่ 4.4ก)

สรุปการขยายแรงแผ่นดินไหวของชั้นดิน แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 โดยคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดการขยายแรงแผ่นดินไหวมากที่สุดจากคลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 3 ชุด คือ คลื่นแผ่นดินไหว Yunnan ซึ่งมีขนาดแมกนิจูดเท่ากับ 6.0 เกิดการขยายแรงแผ่นดินไหว 2.17 เท่า แต่เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่าความเร่งสูงสุดที่ผิวดินน้อย และคาดว่าจะมีผลต่อโครงสร้างที่วางตัวอยู่บนชั้นดินน้อยที่สุด โดยมีค่าความเร่งสูงสุดที่ผิวดินและค่าความเร่งสูงสุดที่หินฐานเท่ากับ 0.0033 g และ 0.0015 g ตามลำดับ ส่วนคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดการขยายแรงแผ่นดินไหวน้อยที่สุดคือ คลื่นแผ่นดินไหว Nahanni มีการขยายแรงแผ่นดินไหวเท่ากับ 1.27 เท่า มีค่าความเร่งสูงสุดที่ผิวดินและค่าความเร่งสูงสุดที่หินฐานเท่ากับ 0.116 g และ 0.148 g ตามลำดับ ส่วนคลื่นแผ่นดินไหวที่มีค่าความเร่งสูงสุดที่ผิวดินมากที่สุด และคาดว่าจะมีผลกระทบต่อโครงสร้างที่วางตัวอยู่บนชั้นดินมากที่สุดคือ คลื่นแผ่นดินไหว Kobe โดยมีค่าความเร่งสูงสุดที่ผิวดินเท่ากับ 0.821 g มีค่าความเร่งสูงสุดที่หินฐานเท่ากับ 0.619 g แต่มีการขยายแรงแผ่นดินไหวเพียง 1.33 เท่า

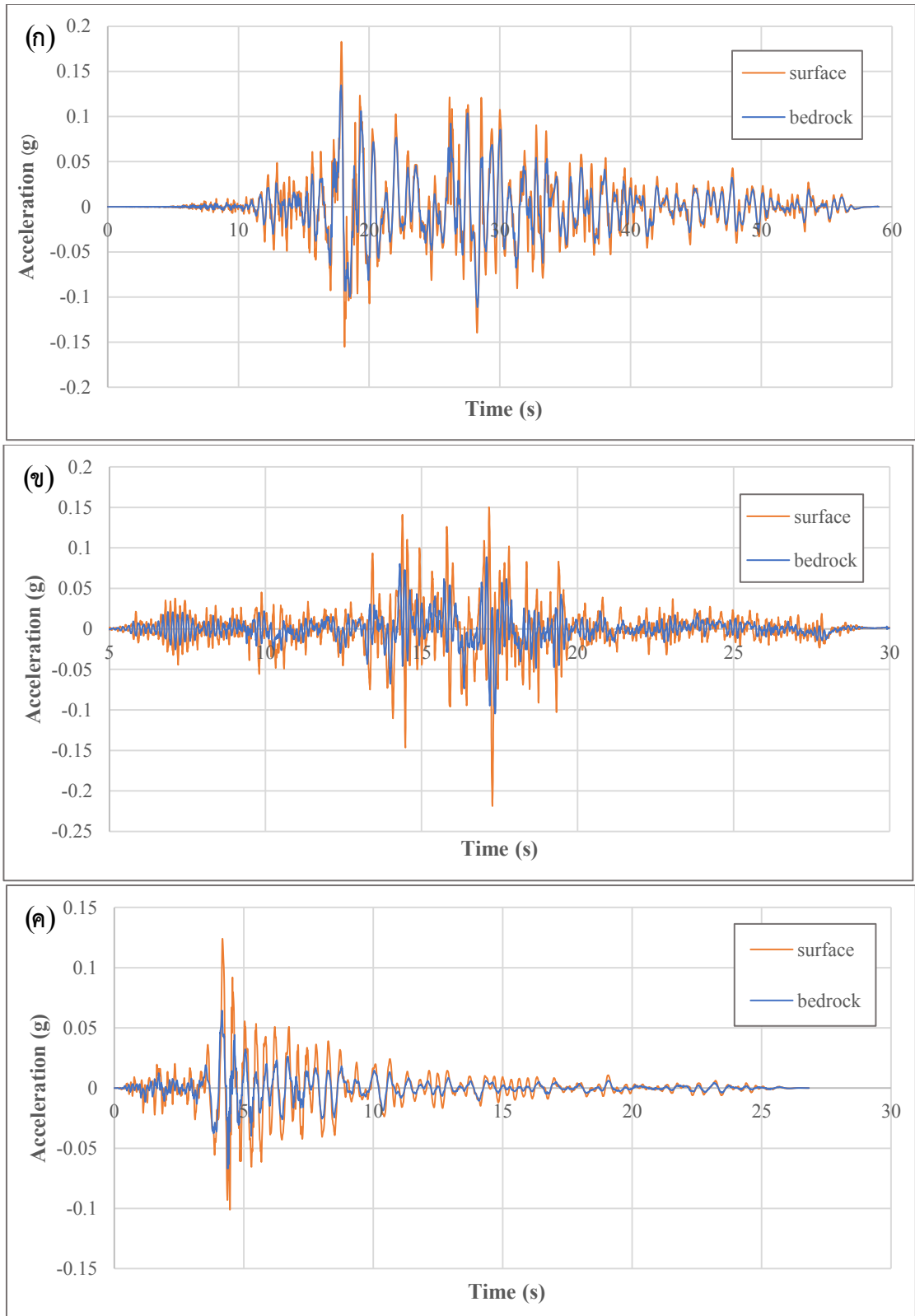
ตารางที่ 4.3 แสดงการขยายแรงแผ่นดินไหวของชั้นดินบริเวณหลุมเจาะวัดป่าหวายชุมเงิน โดยใช้ความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธี MASW

ชุดที่	คลื่น แผ่นดินไหว	ค่าความเร่งสูงสุด ที่หินฐาน (g)	ค่าความเร่งสูงสุด ที่ผิวดิน (g)	จำนวนเท่าของการขยาย แรงแผ่นดินไหว (เท่า)
1	Nahanni	0.116	0.148	1.27
	Kobe	0.619	0.821	1.33
	Loma Gilroy	0.090	0.170	1.89
2	Chichi	0.135	0.183	1.36
	Kocaeli	0.105	0.219	2.09
	Coyote	0.067	0.124	1.85
3	Chiang Rai	0.0042	0.0072	1.52
	Myanmar	0.0081	0.0174	2.15
	Yunnan	0.0015	0.0033	2.17



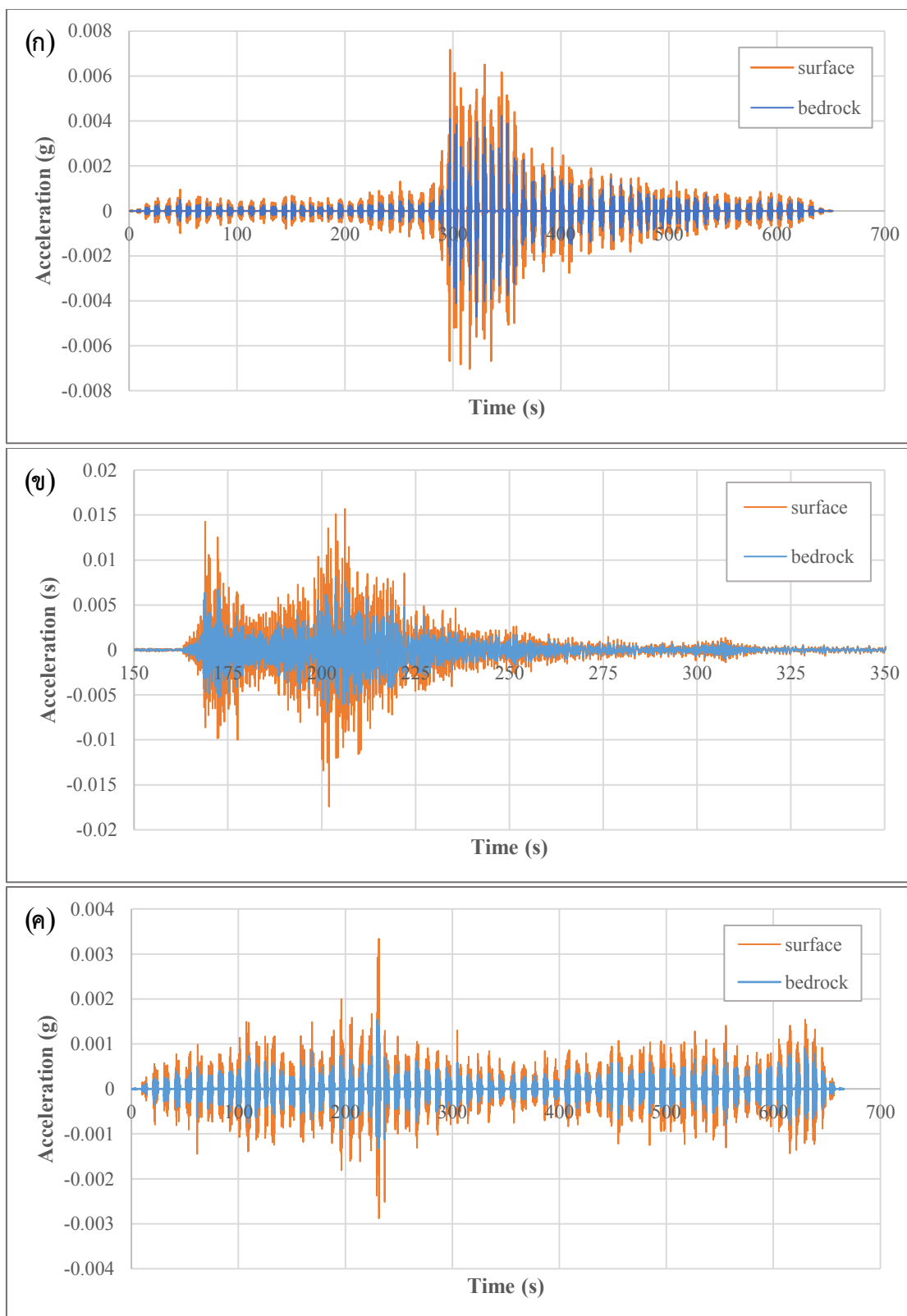
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่าความเร่งสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหวชุดที่ 1

(ก) คลื่นแผ่นดินไหว Nahanni (ข) คลื่นแผ่นดินไหว Kobe (ค) คลื่นแผ่นดินไหว Loma Gilroy



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่าความเร่งสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหวชุดที่ 2

(ก) คลื่นแผ่นดินไหว Chichi (ข) คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (ค) คลื่นแผ่นดินไหว Coyote



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าความเร่งสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหวชุดที่ 3

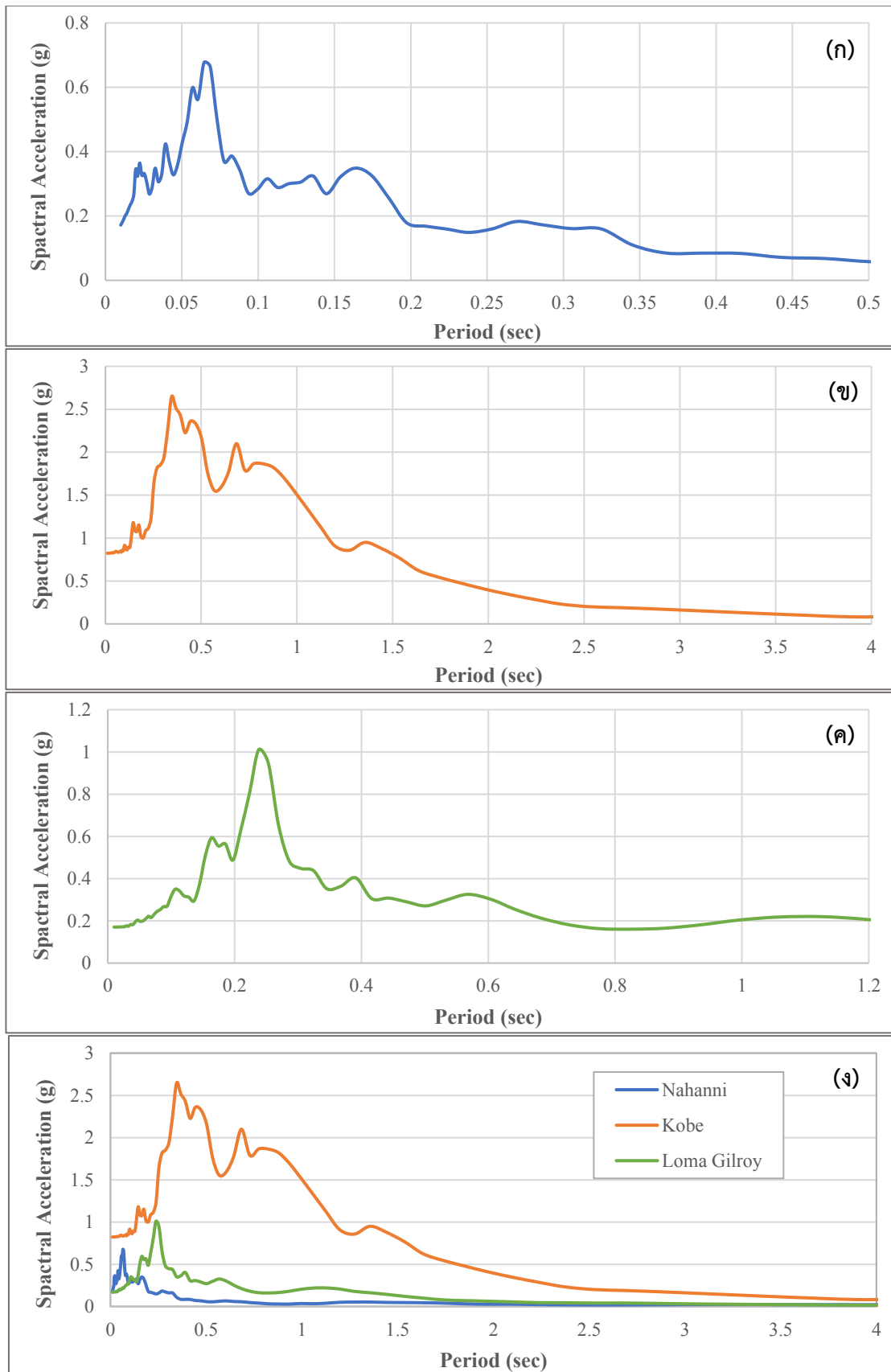
(ก) คลื่นแผ่นดินไหว Chiang Rai (ข) คลื่นแผ่นดินไหว Myanmar (ค) คลื่นแผ่นดินไหว Yunnan

4.3 อิทธิพลของระยะห่างจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหวที่มีผลต่อการตอบสนองต่อชั้นดิน

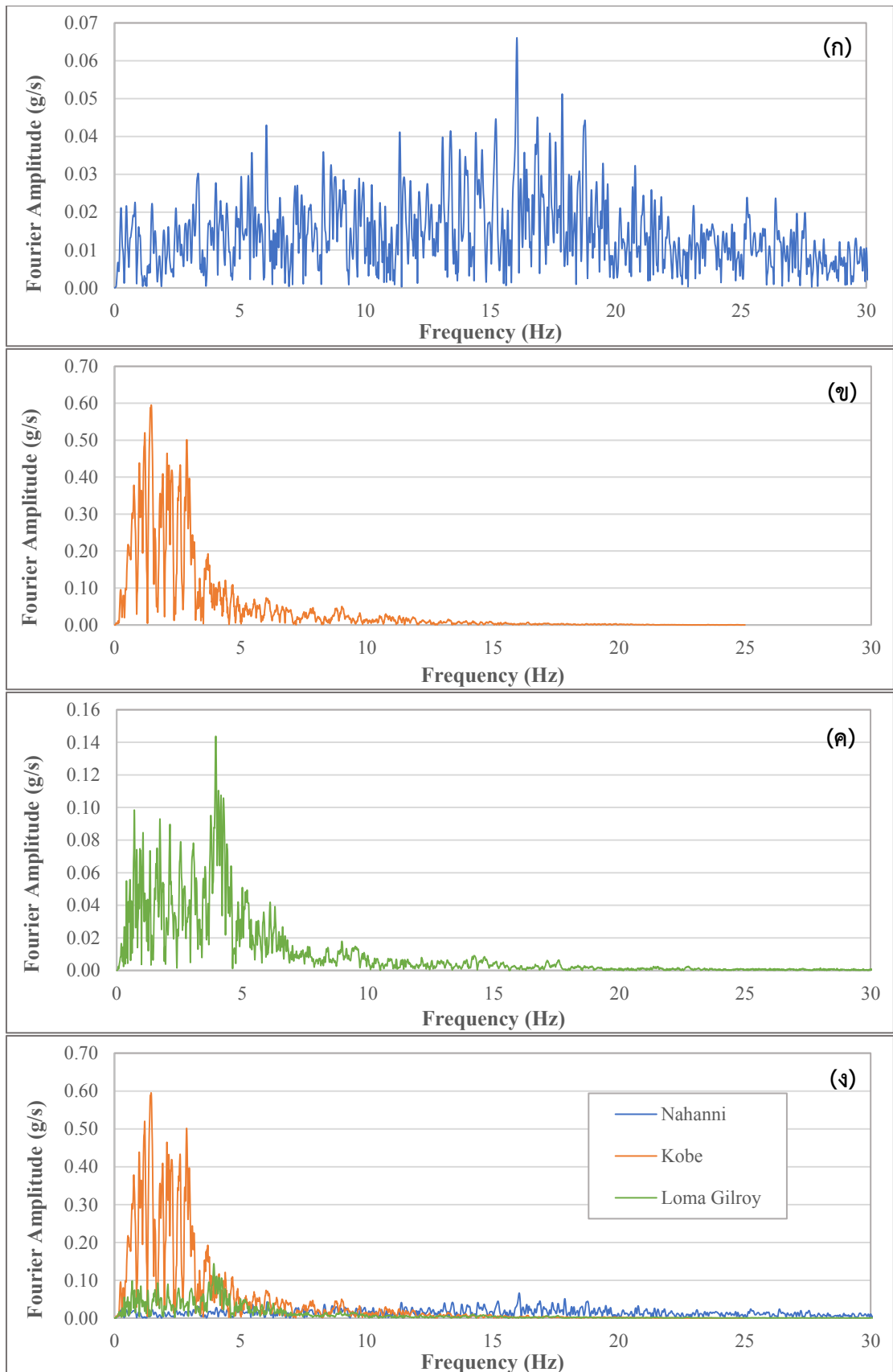
ค่าสเปกตรัมความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหว Kobe แสดงช่วงกราฟที่ค่อนข้างสูงในช่วงคาบการสั่น 0.25 – 1.10 วินาที (รูปที่ 4.5ข) ซึ่งเป็นช่วงคาบการสั่นที่สูงที่สุดในคลื่นแผ่นดินไหวกลุ่มที่ 1 โดยตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารที่สูง 5 - 20 ชั้น คลื่นแผ่นดินไหว Nahanni มีช่วงค่าสเปกตรัมความเร่งที่ค่อนข้างสูง อยู่ในช่วงคาบการสั่น 0.05 – 0.10 วินาที (รูปที่ 4.5ก) ซึ่งตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารที่สูง 1 – 2 ชั้น คลื่นแผ่นดินไหว Loma Gilroy มีช่วงค่าสเปกตรัมความเร่งที่ค่อนข้างสูงอยู่ในช่วงคาบการสั่น 0.15 – 0.30 วินาที (รูปที่ 4.5ค) ซึ่งตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารที่สูง 3 – 6 ชั้น

ค่าฟูเรียร์แอมพลิจูดบนโดเมนความถี่เป็นอีกค่าหนึ่งที่สามารถบอกคาบการสั่นของชั้นดินที่มีค่าตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร โดยคลื่นแผ่นดินไหว Nahanni มีช่วงค่าฟูเรียร์แอมพลิจูดที่ค่อนข้างสูงในช่วงความถี่ 15 - 18 เฮิรต (รูปที่ 4.6ก) เมื่อคำนวณเป็นคาบการสั่น จะได้เท่ากับคาบการสั่นที่ 0.05 – 0.06 วินาที ซึ่งตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารสูงไม่เกิน 1 ชั้น คลื่นแผ่นดินไหว Kobe มีช่วงค่าฟูเรียร์แอมพลิจูดที่ค่อนข้างสูงในช่วงความถี่ 0 – 3 เฮิรต (รูปที่ 4.6ข) ตรงกับคาบการสั่นที่ 0 – 0.33 วินาที ซึ่งตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารสูงไม่เกิน 6 ชั้น คลื่นแผ่นดินไหว Loma Gilroy มีช่วงค่าฟูเรียร์แอมพลิจูดที่ค่อนข้างสูงในช่วงความถี่ 0 – 4 เฮิรต (รูปที่ 4.6ค) ตรงกับคาบการสั่นที่ 0 – 0.25 วินาที ซึ่งตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารสูงไม่เกิน 4 ชั้น

เมื่อนำค่าสเปกตรัมความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหว มาวิเคราะห์ร่วมกับค่าฟูเรียร์แอมพลิจูดบนโดเมนความถี่ จะสามารถบอกช่วงคาบการสั่นของชั้นดินที่แคบลงได้ เพื่อพิจารณาคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก สรุปได้ว่าคลื่นแผ่นดินไหว Nahanni มีอิทธิพลต่ออาคารสูงไม่เกิน 1 ชั้น คลื่นแผ่นดินไหว Kobe มีอิทธิพลต่ออาคารสูง 5 – 6 ชั้น และคลื่นแผ่นดินไหว Loma Gilroy มีอิทธิพลต่ออาคารสูง 3 – 4 ชั้น



รูปที่ 4.5 กราฟแสดง Response Spectrum ของแผ่นดินไหวชุดที่ 1 (ก) คลื่นแผ่นดินไหว Nahanni (ข) คลื่นแผ่นดินไหว Kobe (ค) คลื่นแผ่นดินไหว Loma Gilroy (ง) เปรียบเทียบทั้ง 3 คลื่น



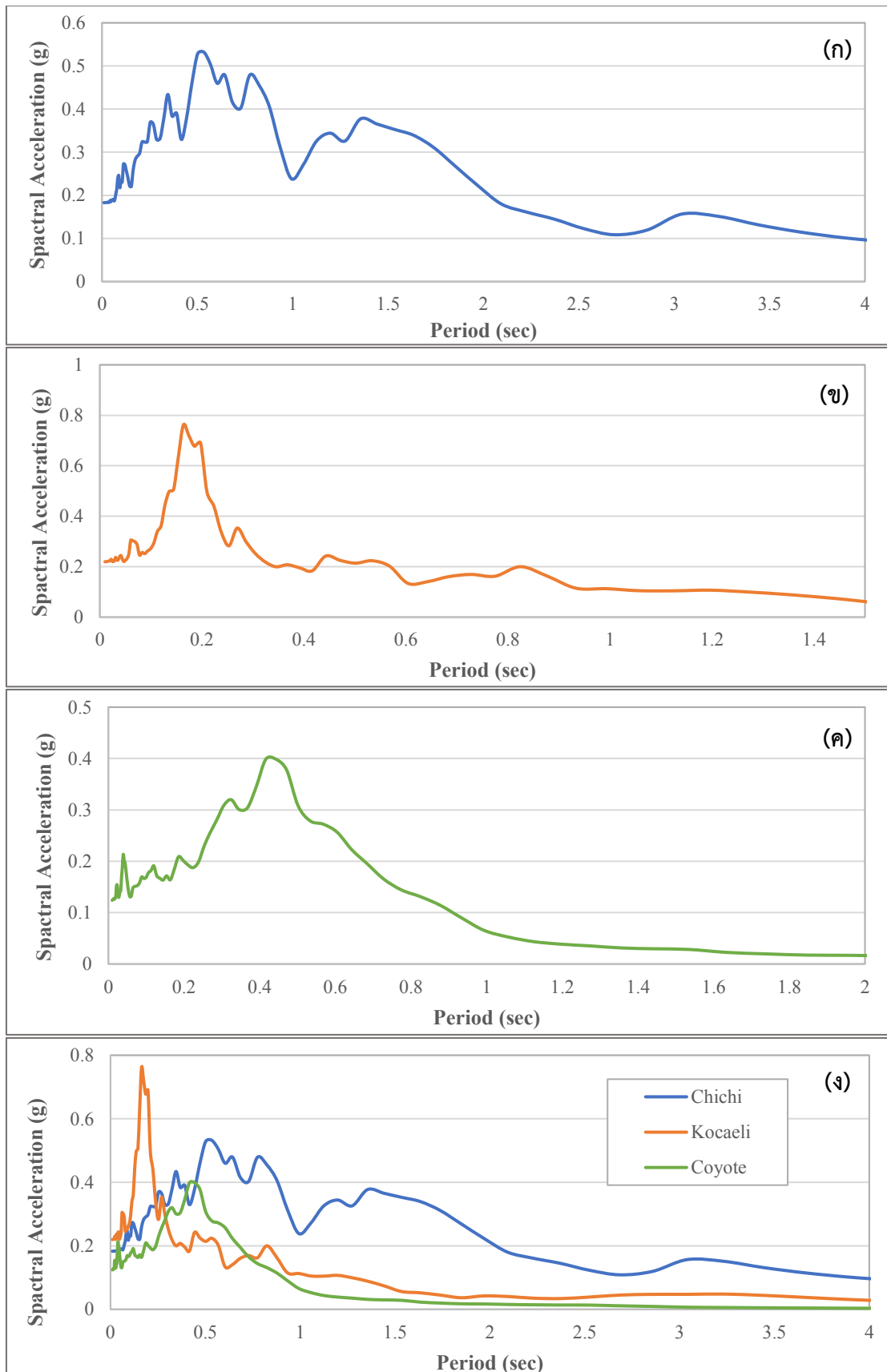
รูปที่ 4.6 กราฟแสดง Fourier Amplitude ของแผ่นดินไหวชุดที่ 1 (ก) คลื่นแผ่นดินไหว Nahanni (ข) คลื่นแผ่นดินไหว Kobe (ค) คลื่นแผ่นดินไหว Loma Gilroy (ง) เปรียบเทียบทั้ง 3 คลื่น

4.4 อิทธิพลของขนาดแผ่นดินไหวที่มีผลต่อการตอบสนองต่อชั้นดิน

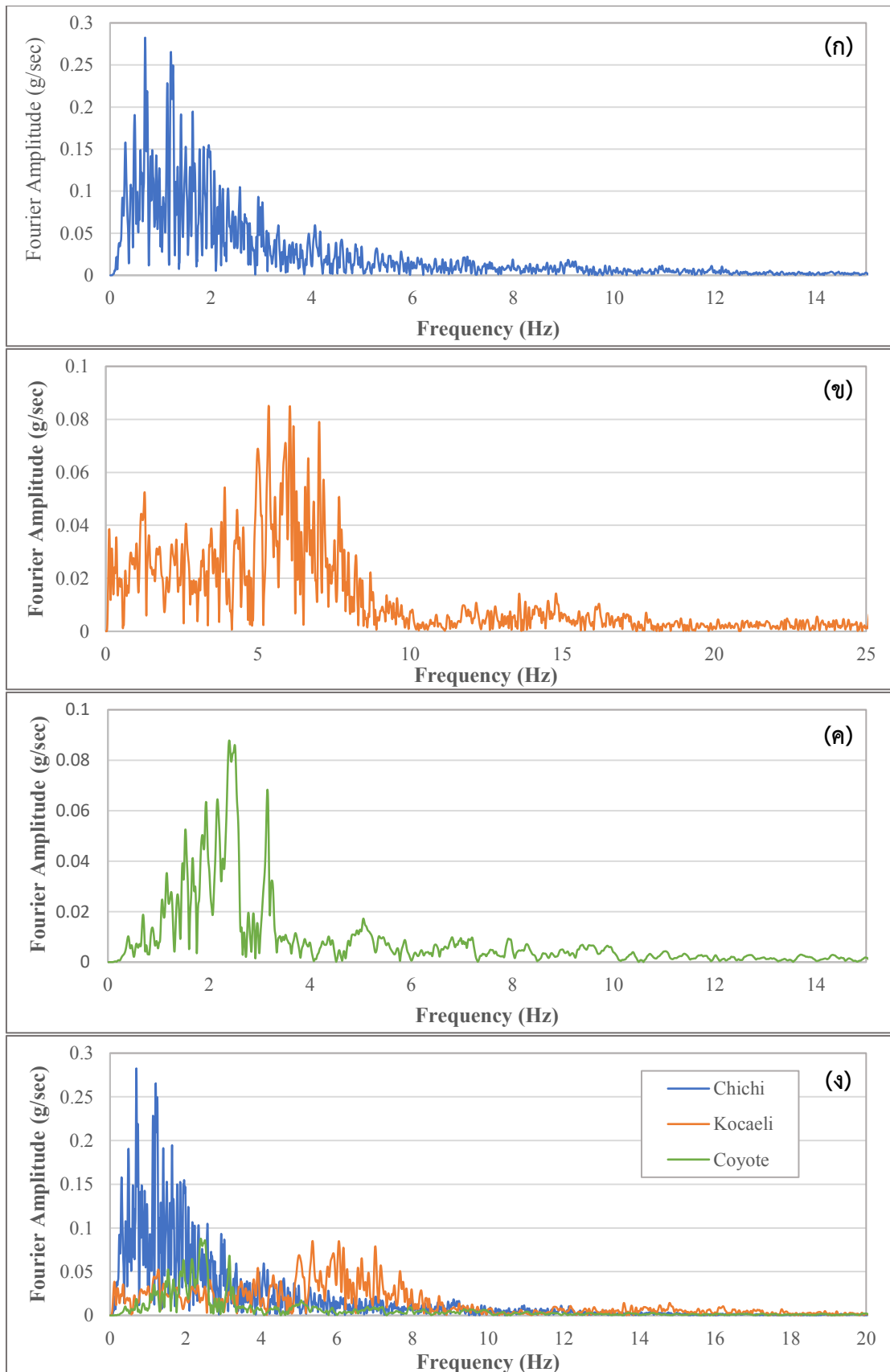
ค่าสเปกตรัมความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหว Chichi แสดงช่วงกราฟที่ค่อนข้างสูงในช่วงคาบการสั่น 0.20 – 1.00 วินาที (รูปที่ 4.7ก) ซึ่งเป็นช่วงคาบการสั่นที่สูงที่สุดในคลื่นแผ่นดินไหวกลุ่มที่ 2 โดยตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารที่สูง 4 – 18 ชั้น คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli มีช่วงค่าสเปกตรัมความเร่งที่ค่อนข้างสูง อยู่ในช่วงคาบการสั่น 0.10 – 0.25 วินาที (รูปที่ 4.7ข) ซึ่งตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารที่สูง 2 – 5 ชั้น คลื่นแผ่นดินไหว Coyote มีช่วงค่าสเปกตรัมความเร่งที่ค่อนข้างสูงอยู่ในช่วงคาบการสั่น 0.2 – 0.6 วินาที (รูปที่ 4.7ค) ซึ่งตรงกับคาบการสั่นธรรมชาติของตึกที่สูง 4 – 13 ชั้น

ค่าฟูเรียร์แอมพลิจูดบนโดเมนความถี่เป็นอีกค่าหนึ่งที่สามารถบอกคาบการสั่นของชั้นดินที่มีค่าตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร โดยคลื่นแผ่นดินไหว Chichi มีช่วงค่าฟูเรียร์แอมพลิจูดที่ค่อนข้างสูงในช่วงความถี่ 0 – 2 เฮิรต (รูปที่ 4.8ก) เมื่อคำนวณเป็นคาบการสั่น จะได้เท่ากับคาบการสั่นที่ 0 – 0.5 วินาที ซึ่งตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของตึกสูงไม่เกิน 9 ชั้น คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli มีช่วงค่าฟูเรียร์แอมพลิจูดที่ค่อนข้างสูงในช่วงความถี่ 5 – 8 เฮิรต (รูปที่ 4.8ข) ตรงกับคาบการสั่นที่ 0.125 – 0.2 วินาที ซึ่งตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของตึกสูง 3 – 9 ชั้น คลื่นแผ่นดินไหว Coyote มีช่วงค่าฟูเรียร์แอมพลิจูดที่ค่อนข้างสูงในช่วงความถี่ 2 – 3 เฮิรต (รูปที่ 4.8ค) ตรงกับคาบการสั่นที่ 0.33 – 0.5 วินาที ซึ่งตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของตึกสูง 7 – 9 ชั้น

เมื่อนำค่าสเปกตรัมความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหว มาวิเคราะห์ร่วมกับค่าฟูเรียร์แอมพลิจูดบนโดเมนความถี่ จะสามารถบอกช่วงคาบการสั่นของชั้นดินที่แคบลงได้ เพื่อพิจารณาคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก สรุปได้ว่าคลื่นแผ่นดินไหว Chichi มีอิทธิพลต่ออาคารสูง 4 – 9 ชั้น คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli มีอิทธิพลต่ออาคารสูง 3 – 4 ชั้น และคลื่นแผ่นดินไหว Coyote มีอิทธิพลต่ออาคารสูง 7 – 9 ชั้น



รูปที่ 4.7 กราฟแสดง Response Spectrum ของแผ่นดินไหวชุดที่ 2 (ก) คลื่นแผ่นดินไหว Chichi (ข) คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (ค) คลื่นแผ่นดินไหว Coyote (ง) เปรียบเทียบทั้ง 3 คลื่น



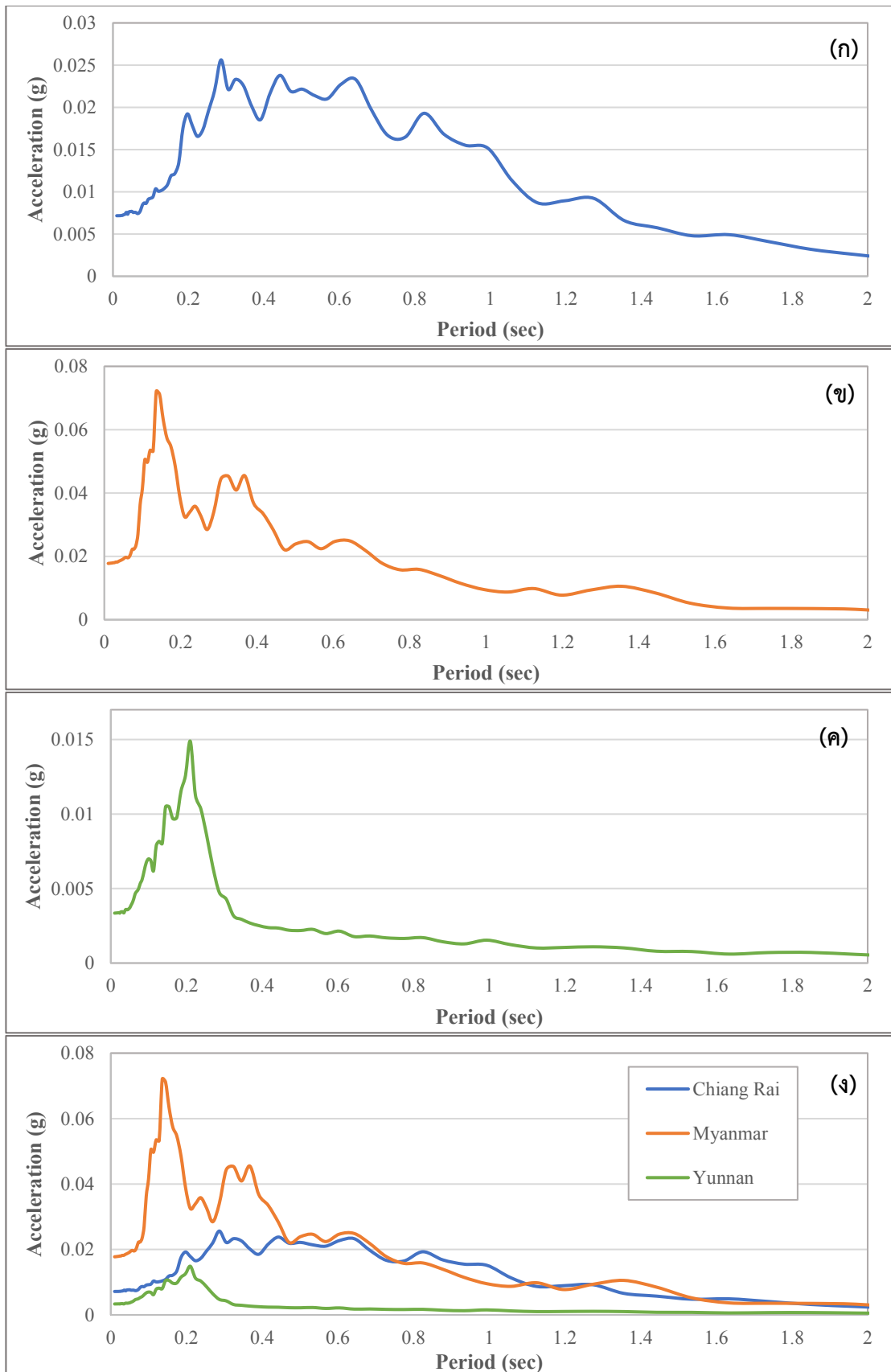
รูปที่ 4.8 กราฟแสดง Fourier Amplitude ของแผ่นดินไหวชุดที่ 2 (ก) คลื่นแผ่นดินไหว Chichi (ข) คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (ค) คลื่นแผ่นดินไหว Coyote (ง) เปรียบเทียบทั้ง 3 คลื่น

4.5 อิทธิพลของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียง

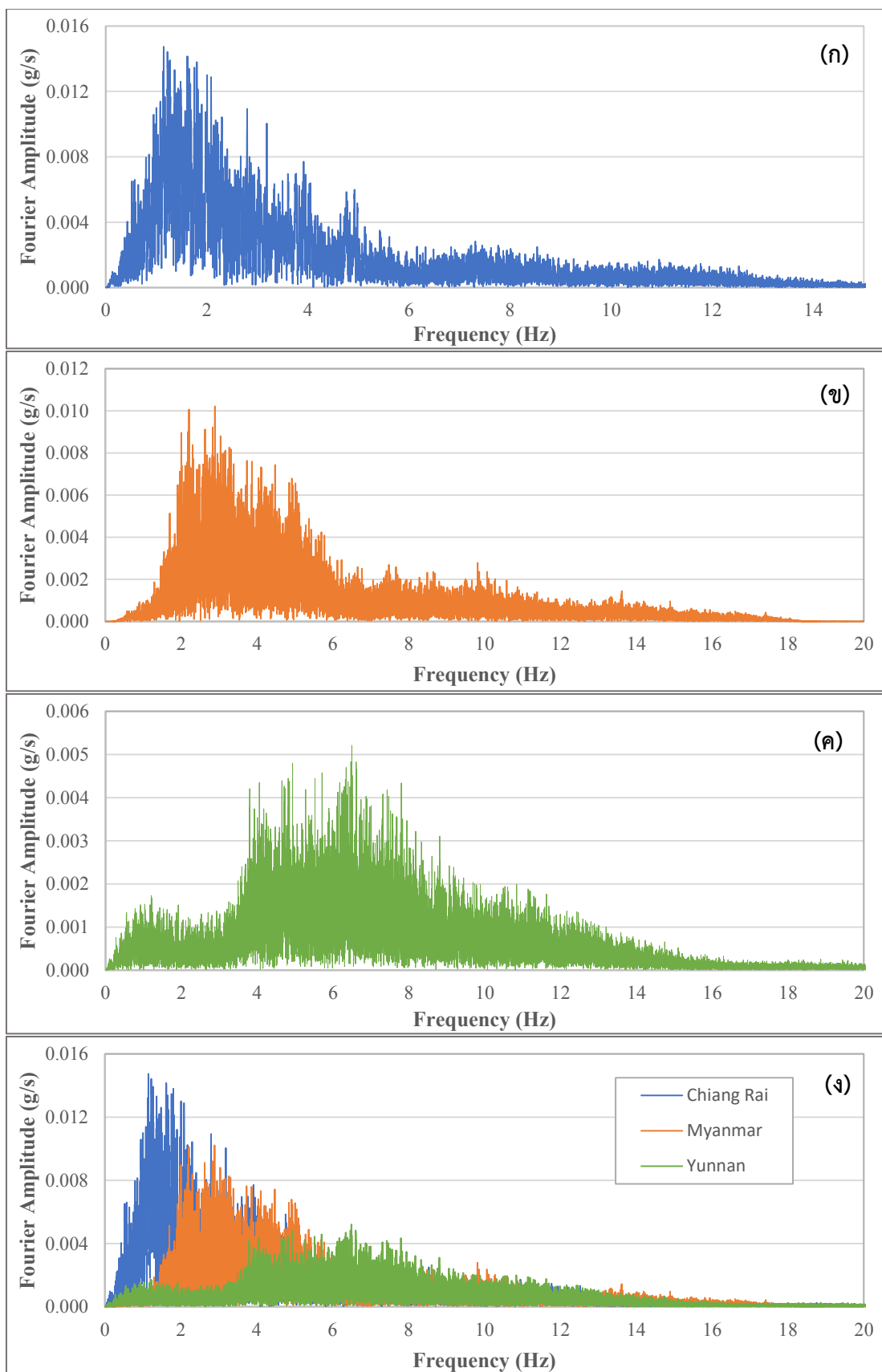
ค่าสเปกตรัมความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหว Chiang Rai แสดงช่วงกราฟที่ค่อนข้างสูงในช่วงคาบการสั่น 0.20 – 1.10 วินาที (รูปที่ 4.9ก) ซึ่งเป็นช่วงคาบการสั่นที่สูงที่สุดในคลื่นแผ่นดินไหวกลุ่มที่ 3 โดยตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารที่สูง 4 - 20 ชั้น คลื่นแผ่นดินไหว Myanmar มีช่วงค่าสเปกตรัมความเร่งที่ค่อนข้างสูง อยู่ในช่วงคาบการสั่น 0.10 – 0.40 วินาที (รูปที่ 4.9ข) ซึ่งตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารที่สูง 2 – 7 ชั้น คลื่นแผ่นดินไหว Yunnan มีช่วงค่าสเปกตรัมความเร่งที่ค่อนข้างสูงอยู่ในช่วงคาบการสั่น 0.10 – 0.30 วินาที (รูปที่ 4.9ค) ซึ่งตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารที่สูง 2 – 6 ชั้น

ค่าฟูเรียร์แอมพลิจูดบนโดเมนความถี่เป็นอีกค่าหนึ่งที่สามารถบอกคาบการสั่นของชั้นดินที่มีค่าตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของอาคาร โดยคลื่นแผ่นดินไหว Chiang Rai มีช่วงค่าฟูเรียร์แอมพลิจูดที่ค่อนข้างสูงในช่วงความถี่ 1 - 3 เฮิร์ต (รูปที่ 4.10ก) เมื่อคำนวณเป็นคาบการสั่น จะได้เท่ากับคาบการสั่นที่ 0.33 – 1 วินาที ซึ่งตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารสูง 7 - 18 ชั้น คลื่นแผ่นดินไหว Myanmar มีช่วงค่าฟูเรียร์แอมพลิจูดที่ค่อนข้างสูงในช่วงความถี่ 2 – 5 เฮิร์ต (รูปที่ 4.10ข) ตรงกับคาบการสั่นที่ 0 – 0.33 วินาที ซึ่งตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารสูง 4 - 9 ชั้น คลื่นแผ่นดินไหว Yunnan มีช่วงค่าฟูเรียร์แอมพลิจูดที่ค่อนข้างสูงในช่วงความถี่ 4 – 8 เฮิร์ต (รูปที่ 4.10ค) ตรงกับคาบการสั่นที่ 0.125 – 0.25 วินาที ซึ่งตรงกับคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารสูง 3 - 4 ชั้น

เมื่อนำค่าสเปกตรัมความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหว มาวิเคราะห์ร่วมกับค่าฟูเรียร์แอมพลิจูดบนโดเมนความถี่ จะสามารถบอกช่วงคาบการสั่นของชั้นดินที่แคบลงได้ เพื่อพิจารณาคาบการสั่นพื้นฐานของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก สรุปได้ว่าคลื่นแผ่นดินไหว Chiang Rai มีอิทธิพลต่ออาคารสูง 7 - 18 ชั้น คลื่นแผ่นดินไหว Myanmar มีอิทธิพลต่ออาคารสูง 4 – 7 ชั้น และคลื่นแผ่นดินไหว Yunnan มีอิทธิพลต่ออาคารสูง 3 – 4 ชั้น



รูปที่ 4.9 กราฟแสดง Response Spectrum ของแผ่นดินไหวชุดที่ 3 (ก) คลื่นแผ่นดินไหว Chiang Rai (ข) คลื่นแผ่นดินไหว Myanmar (ค) คลื่นแผ่นดินไหว Yunnan (ง) เปรียบเทียบทั้ง 3 คลื่น



รูปที่ 4.10 กราฟแสดง Fourier Amplitude ของแผ่นดินไหวชุดที่ 3 (ก) คลื่นแผ่นดินไหว Chiang Rai (ข) คลื่นแผ่นดินไหว Myanmar (ค) คลื่นแผ่นดินไหว Yunnan (ง) เปรียบเทียบทั้ง 3 คลื่น

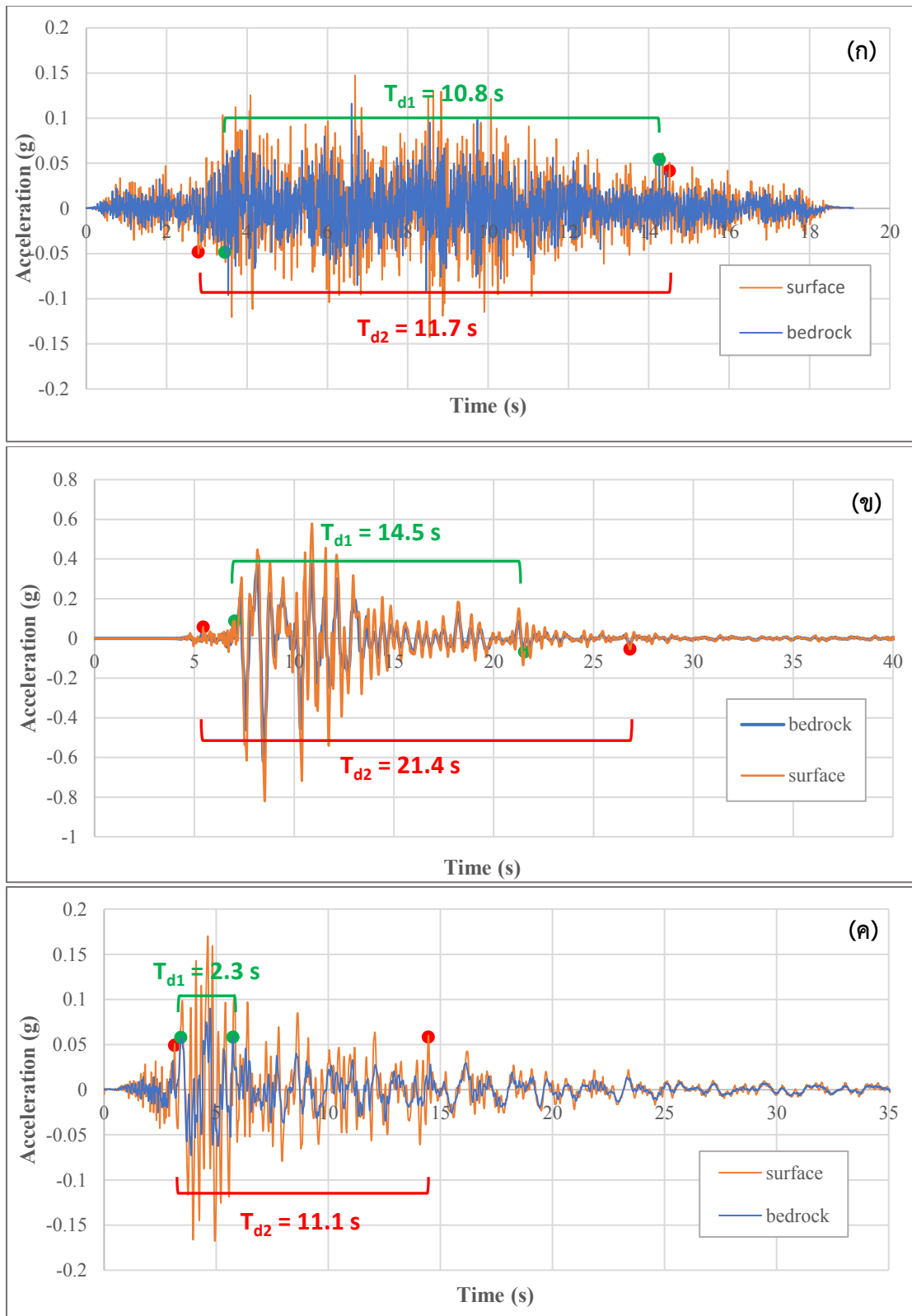
4.6 ระยะเวลาในการสั่นไหว (Bracketed duration)

นอกจากชั้นดินจะทำให้เกิดการขยายแรงแผ่นดินไหวแล้ว ผลของการขยายแรงแผ่นดินไหวนั้น ยังทำให้มีการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการสั่นไหวอีกด้วย

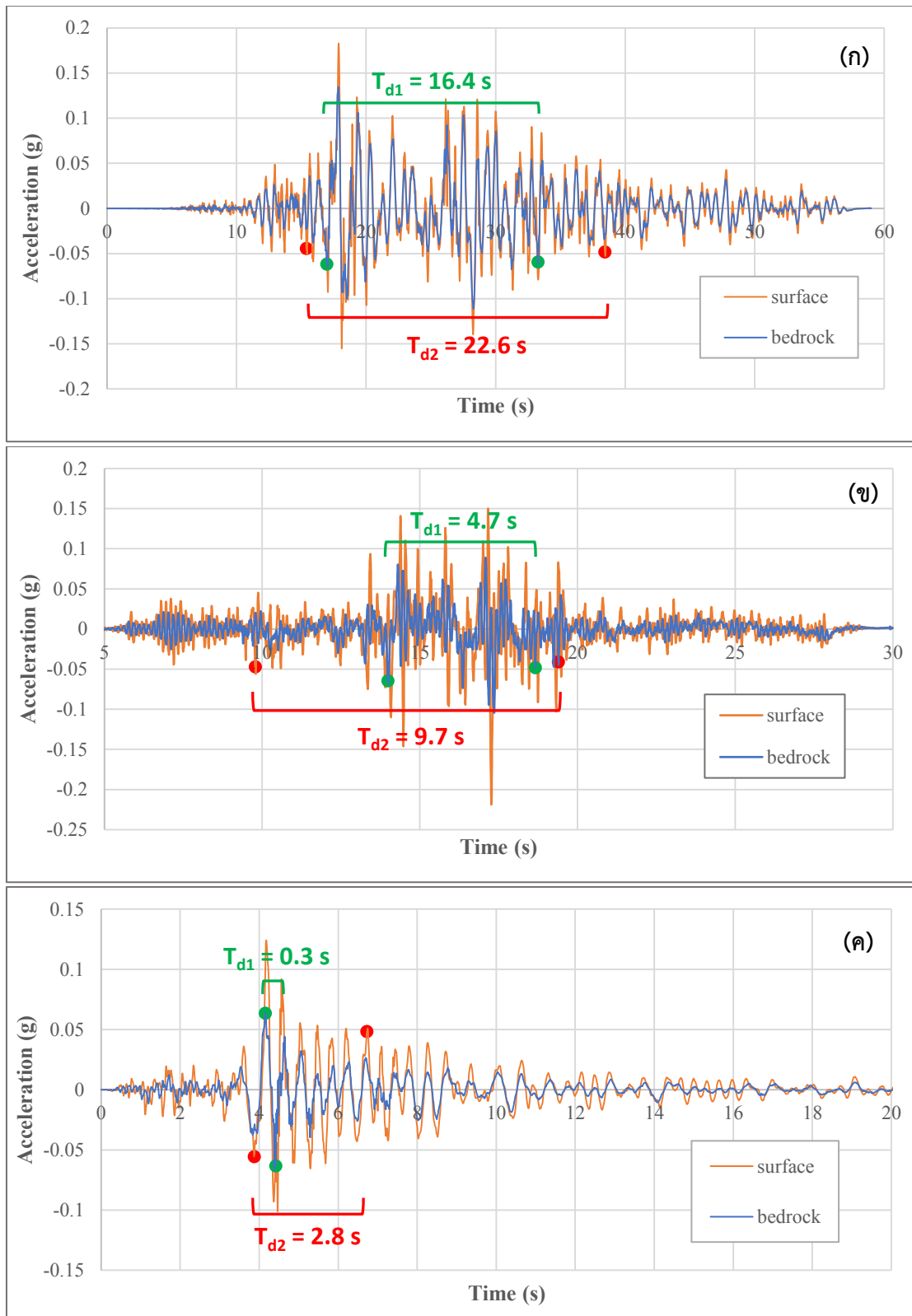
คลื่นแผ่นดินไหวในชุดที่ 1 ที่มีระยะเวลาในการสั่นไหวมากที่สุดคือ คลื่นแผ่นดินไหว Kobe โดยมีความเร่งสูงสุดมากกว่า 0.05 g เริ่มที่เวลา 5.4 วินาที และไปสิ้นสุดที่เวลา 26.8 วินาที ทำให้มีระยะเวลาในการสั่นไหวเท่ากับ 21.4 วินาที ซึ่งเพิ่มขึ้นมาจากระยะเวลาการสั่นไหวเดิมที่เท่ากับ 14.5 วินาที (รูปที่ 4.11ข) ส่วนคลื่นแผ่นดินไหว Nahanni และคลื่นแผ่นดินไหว Loma Gilroy มีระยะเวลาในการสั่นไหวใกล้เคียงกัน คือ 11.7 วินาที และ 11.1 วินาที ตามลำดับ โดยคลื่นแผ่นดินไหว Nahanni มีระยะเวลาการสั่นไหวเดิมเท่ากับ 10.8 วินาที (รูปที่ 4.11ก) ส่วนโดยคลื่นแผ่นดินไหว Loma Gilroy มีระยะเวลาการสั่นไหวเดิมเท่ากับ 2.3 วินาที (รูปที่ 4.11ค)

คลื่นแผ่นดินไหวในชุดที่ 2 ที่มีระยะเวลาในการสั่นไหวมากที่สุดคือ คลื่นแผ่นดินไหว Chichi โดยมีความเร่งสูงสุดมากกว่า 0.05 g เริ่มที่เวลา 15.9 วินาที และไปสิ้นสุดที่เวลา 38.5 วินาที ทำให้มีระยะเวลาในการสั่นไหวเท่ากับ 22.6 (รูปที่ 4.12ก) โดยมีคาบการสั่นไหวเดิมอยู่ที่ 16.4 วินาที คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli มีระยะเวลาในการสั่นไหว 9.7 วินาที มีความเร่งสูงสุดมากกว่า 0.05 g เริ่มที่เวลา 2.8 วินาทีและไปสิ้นสุดที่ 14.5 วินาที ซึ่งมีระยะเวลาการสั่นไหวเดิมเท่ากับ 4.7 วินาที (รูปที่ 4.12ข) ส่วนคลื่นแผ่นดินไหว Coyote มีระยะเวลาในการสั่นไหว คือ 2.8 วินาที มีความเร่งสูงสุดมากกว่า 0.05 g เริ่มที่เวลา 3.9 วินาที ถึง 6.7 วินาที และมีระยะเวลาการสั่นไหวเดิมเท่ากับ 0.3 วินาที ซึ่งถือว่าน้อยที่สุด (รูปที่ 4.12ค)

ส่วนคลื่นแผ่นดินไหวชุดที่ 3 ที่เป็นคลื่นแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในประเทศไทยและพื้นที่ใกล้เคียง ไม่มีค่าความเร่งของคลื่นมากกว่า 0.05 g ทำให้ไม่ปรากฏระยะเวลาของการสั่นไหว อาจจะเป็นที่ระยะทางของจุดกำเนิดแผ่นดินไหวที่มีระยะมากกว่าเมื่อเทียบกับคลื่นแผ่นดินไหวในชุดที่ 1 และคลื่นแผ่นดินไหวชุดที่ 2



รูปที่ 4.11 แสดงระยะเวลาการสั่นไหว (Bracketed duration) ของคลื่นแผ่นดินไหวชุดที่ 1
 (ก) คลื่นแผ่นดินไหว Nahanni (ข) คลื่นแผ่นดินไหว Kobe (ค) คลื่นแผ่นดินไหว Loma Gilroy



รูปที่ 4.12 แสดงระยะเวลาการสั่นไหว (Bracketed duration) ของคลื่นแผ่นดินไหวชุดที่ 2 (ก) คลื่นแผ่นดินไหว Chichi (ข) คลื่นแผ่นดินไหว Kocaeli (ค) คลื่นแผ่นดินไหว Coyote

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

การใช้ความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีวัดคลื่นพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณที่มีราคาถูกลงกว่าและทำง่ายกว่า เปรียบเทียบกับความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะที่ราคาแพงกว่าและทำยากกว่า มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนที่ 30 เมตรแรกเท่ากับ 5.08% ซึ่งอยู่ในช่วงยอมรับได้ การแบ่งชนิดชั้นดินโดยใช้ NEHRP Site Classification สำหรับงานด้านการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหว โดยจากทั้งสองวิธี ได้ชนิดดินเป็นชนิด D ทั้งคู่ คือ เป็นดินที่ค่อนข้างแข็ง สำหรับค่าความถี่ธรรมชาติของชั้นดินและค่าคาบการสั่นจากทั้ง 2 วิธี มีความใกล้เคียงกัน โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ที่ 12.54% และ 12.32% ตามลำดับ ซึ่งถือว่ายอมรับได้ และการเปรียบเทียบค่าการขยายแรงแผ่นดินไหวที่ได้จาก 2 วิธี โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหว Chiang Rai จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวในวันที่ 5 พฤษภาคม พ.ศ.2557 มีขนาด 6.3 แมกนิจูด ระยะทางจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหวถึงพื้นที่ศึกษาประมาณ 20 กิโลเมตร มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของอัตราขยายแรงแผ่นดินไหวเท่ากับ 7.24% ซึ่งอยู่ในช่วงยอมรับได้ สรุปการใช้ความเร็วคลื่นเฉือนในการวิเคราะห์การตอบสนองต่อแรงแผ่นดินไหวของชั้นดินจากทั้ง 2 วิธี คือ ความเร็วคลื่นเฉือนจากวิธีวัดคลื่นพื้นผิวแบบหลายช่องรับสัญญาณและวิธีสำรวจโดยคลื่นไหวสะเทือนในหลุมเจาะสามารถใช้ทดแทนกันได้

ผลการขยายแรงแผ่นดินไหวของชั้นดิน โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวทั้ง 9 คลื่น มีการขยายแรงแผ่นดินไหวประมาณ 1.2 – 2.2 เท่า จากการศึกษพบว่าขนาดแผ่นดินไหว ระยะทางจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหว ไม่มีผลต่อการถูกขยายแรงแผ่นดินไหว โดยแผ่นดินไหวที่ใกล้เคียงกับการเกิดในประเทศไทยมากที่สุด คือ คลื่นแผ่นดินไหว Chiang Rai โดยมีการขยายแรงแผ่นดินไหวจากชั้นดินบริเวณวัดป่าห้วยชุมเงินอยู่ที่ 1.52 เท่า

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความเสี่ยงจากคลื่นแผ่นดินไหวส่วนใหญ่อยู่ในช่วงความสูง 1 – 9 ชั้น โดยคลื่นแผ่นดินไหว Chiang Rai มีผลต่ออาคารที่ความสูงแตกต่างจากคลื่นแผ่นดินไหวอื่น ๆ ซึ่งคลื่นแผ่นดินไหว Chiang Rai มีอิทธิพลต่ออาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ความสูง 7 – 18 เมตร ซึ่งการพิจารณานี้ พิจารณาจากค่าสเปกตรัมความเร่งของคลื่นแผ่นดินไหวและค่าฟูเรียร์แอมพลิจูดในโดเมนความถี่ของคลื่นแผ่นดินไหวเมื่อผ่านการขยายสัญญาณแผ่นดินไหวจากชั้นดินแล้ว

ระยะเวลาการสั้นไหวของชั้นดินบริเวณวัดป่าห้วยชุมเงินนี้มีความหลากหลาย ขึ้นกับคลื่นแผ่นดินไหวแต่ละคลื่น ไม่สามารถสรุปถึงความสัมพันธ์กับขนาดแผ่นดินไหวและระยะทางจากจุดกำเนิดแผ่นดินไหวได้ แต่ระยะเวลาการสั้นไหวของทุกคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีระยะเวลาเพิ่มขึ้นทุกคลื่นแผ่นดินไหวเมื่อผ่านการขยายสัญญาณแผ่นดินไหวของชั้นดินแล้ว ซึ่งการที่ระยะเวลาการสั้นไหวของชั้นดินเพิ่มขึ้นนั้น ยิ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งปลูกสร้างและอาคารมากขึ้นด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้ข้อมูลหลุมเจาะเพียงหลุมเดียว คือ หลุมเจาะที่วัดป่าห้วยชุมเงิน ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการศึกษาอาจจะไม่ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด และลักษณะการเกิดขึ้นของตะกอนไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมดและไม่ได้เป็นแนวระนาบไปตลอด ต้องใช้ข้อมูลหลุมเจาะอื่น ๆ มาใช้ในการวิเคราะห์ร่วมด้วย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมและถูกต้องมากที่สุด

การพิจารณาความเสี่ยงภัยจากการขยายแรงแผ่นดินไหวของชั้นดินที่มีต่ออาคาร การศึกษาครั้งนี้ เน้นไปที่อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก เพราะอาคารส่วนใหญ่ในประเทศไทยเป็นอาคารประเภทนี้ ควรมีการศึกษาอาคารประเภทอื่นเพิ่มเติม รวมถึงคุณสมบัติของอาคารอื่น ๆ ด้วย เช่น รูปทรงอาคาร วัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างอาคาร เป็นต้น

บรรณานุกรม

- กรมทรัพยากรธรณี. 2550. **ธรณีวิทยาประเทศไทย**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 628 หน้า.
- กรมทรัพยากรธรณี, กองธรณีวิทยา. 2550. **แผนที่ธรณีวิทยาประเทศไทย 1 : 50,000 ระวัง ND47-8 จังหวัดเชียงราย**. กรุงเทพฯ: กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี.
- กรมทรัพยากรธรณี, กองธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อม. 2553. **แผนที่แผนที่หมู่บ้านรอยเลื่อนมีพลังพาดผ่าน จังหวัดเชียงราย มาตราส่วน 1 : 50,000 ชุด L7018**. กรุงเทพฯ: กองธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อม กรมทรัพยากรธรณี.
- กรมทรัพยากรธรณี, กองธรณีวิทยา. 2557. **ข้อมูลหลุมเจาะและข้อมูลความเร็วคลื่นเฉือน วัดป่าหวายชุมชน ตำบลบ้านดู่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย**. โครงการสำรวจธรณีฟิสิกส์โดยการวัดความเร็วคลื่นเฉือนในหลุมเจาะ ปี 2557, กรุงเทพฯ: กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี.
- กรมอุตุนิยมวิทยา, สำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว. 2558. **รายงานการเกิดแผ่นดินไหวบริเวณประเทศไทยและประเทศใกล้เคียง พ.ศ.2557**. น.20. กรุงเทพฯ.
- กรมอุตุนิยมวิทยา, สำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว. 2560. **รายงานการเกิดแผ่นดินไหวบริเวณประเทศไทยและประเทศใกล้เคียง พ.ศ.2554**. น.16. กรุงเทพฯ.
- ฐานบ ธิติมากร, นื่องนุช เหลืองสุนทรกุล, ประภาพร จันทมาศและอังคศิริ หาญศิริ. 2551. **การหาความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินกรุงเทพฯจากการวิเคราะห์คลื่นพื้นผิว**. วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา 19, 4 (2551).
- รัชดาภรณ์ จินตประสาท. 2559. **การประเมินการขยายแรงแผ่นดินไหวของชั้นดินโดยใช้ข้อมูลธรณีฟิสิกส์และธรณีเทคนิคในอำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, บรรพต กุลสุวรรณ, วรากร ไม้เรียงและอดิชาติ สุรินทร์คำ. 2553. **การพัฒนาฐานข้อมูลดินทางวิศวกรรมเพื่อสนับสนุนการพัฒนาและบำรุงรักษาโครงสร้างพื้นฐาน: กรณีศึกษาพื้นที่ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ**. โยธาสาร, 69(1).

อิสรากรณ์ เศรษฐ์ธนนันท์. 2558. **ผลกระทบของแรงค์ประกอบและสมบัติความยืดหยุ่น ต่อตัวประกอบกรขยายของตัวอย่างดินจากจังหวัดสมุทรปราการ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Building Seismic Safety Council, B. 2003. **NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures**. Report FEMA-450 (Provisions), Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington.

Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Okan, I., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D. 2017. **DEEPSOIL 7.0, User Manual**. (Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign).

Kramer, S.L. 1996. **Geotechnical Earthquake Engineering**. United States of America: Plentic Hall, 653 pp.

Miller, R.D. 1999. **Comparing Shear-Wave Velocity Profiles Invested from Multichannel Surface Wave with Borehole Measurements**. (Kansas Geological Survey, Lawrence, Kansas, USA)

Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J. 1999. **Multichannel Analysis of Surface Waves** Geophysics, 64(3), 800-808.

Phanikanth, V.S., Choudhury, and D., Reddy, G.R. 2011. **Equivalent-Linear Seismic Ground Response Analysis of Some Typical Sites in Mumbai**. Geotech Geol Eng (2011) 29: 1109–1126.

Warnitchai, P. 2000. **Identification of Dynamic Properties of Reinforced Concrete Buildings in Bangkok**. (Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Asian Institute of Technology).

Yanuviriyakul, A. 2009. **Response Behaviors of Soft Bangkok Clay induce by Earthquake Forces**. (Master's thesis, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University).

