



การศึกษาลักษณะเฉพาะของความเร็วคลื่นเฉือนของตะกอนระดับตื้น บริเวณตัวเมือง
หาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

**Shear-wave Velocity Characteristics of Shallow Sediment in HatYai City,
Songkhla Province**

เชษฐพร สุจิตะพันธ์

Chedtaporn Sujitapan

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาธรณีฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Geophysics

Prince of Songkla University

2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาลักษณะเฉพาะของความเร็วคลื่นเฉือนของตะกอนระดับต้น บริเวณ
 ตัวเมืองหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

ผู้เขียน นายเชษฐพร สุจิตะพันธ์

สาขาวิชา ธรณีฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สวัสดิ์ ยอดขยัน)

.....ประธานกรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสกร ปนานนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สวัสดิ์ ยอดขยัน)

.....
 (ดร.กำแหง วัฒนเสน)

.....กรรมการ
 (ดร.กำแหง วัฒนเสน)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวิมล โลหะวิจารณ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วน
 หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาธรณีฟิสิกส์

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่าผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอแสดงความขอบคุณ
บุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้อง

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สวัสดี ยอดขยัน)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายเชษฐพร สุจิตะพันธ์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายเชษฐพร สุจิตะพันธ์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาลักษณะเฉพาะของความเร็วคลื่นเฉือนของตะกอนระดับต้น บริเวณตัวเมืองหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

ผู้เขียน นายเชษฐพร สุจิตะพันธ์

สาขาวิชา ธรณีฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

คุณสมบัติยืดหยุ่นของโครงสร้างธรณีวิทยาใต้ผิวดินมีผลกระทบต่อการสั่นสะเทือนของพื้นดินเนื่องจากการเกิดแผ่นดินไหว โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญในการศึกษา วิเคราะห์ และประเมิน การเพิ่มความรุนแรงของการสั่นสะเทือนของพื้นดินเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว คือความเร็วคลื่นเฉือน ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธี Multichannel Analysis of Surface Wave (MASW) ในการสำรวจหาความเร็วของคลื่นเฉือน และนำค่าที่ได้มาคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนที่ระดับความลึก 30 เมตร (V_{s30}) เพื่อจัดกลุ่มลักษณะทางธรณีวิทยาที่มีผลต่อการปลูกสร้างอาคารให้ปลอดภัยจากแผ่นดินไหว ตามมาตรฐานของ NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program)

ทำการสำรวจด้วยวิธี MASW ทั้งหมด 25 จุดสำรวจในพื้นที่ตัวเมืองหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ผลการศึกษาพบว่าแผนที่การจัดกลุ่มลักษณะทางธรณีวิทยาตามข้อกำหนดของ NEHRP สอดคล้องกับแผนที่ธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา กล่าวคือ บริเวณที่เป็นที่ราบตะกอนน้ำพา ใกล้กับคลองอู่ตะเภาซึ่งอยู่ทางด้านตะวันตกของพื้นที่ศึกษามีค่าเฉลี่ย V_{s30} เท่ากับ 281.2 เมตร/วินาที จัดอยู่ในกลุ่ม D ตามข้อกำหนด NEHRP บริเวณที่เป็นตะกอนเศษหินตามเชิงเขา ซึ่งอยู่ทางด้านตะวันออกของพื้นที่ศึกษามีค่าเฉลี่ย V_{s30} เท่ากับ 456.5 เมตร/วินาที จัดอยู่ในกลุ่ม C ตามข้อกำหนด NEHRP ดังนั้นจากผลการศึกษาสรุปได้ว่า ด้านตะวันตกของตัวเมืองหาดใหญ่มีแนวโน้มที่จะเพิ่มความรุนแรงของพื้นดินของคลื่นแผ่นดินไหว นอกจากความเร็วคลื่นเฉือนแล้ว ความหนาของชั้นตะกอนจนถึงชั้นหินฐานและค่าคาบอติพิพลหลักก็เป็นพารามิเตอร์สำคัญในการช่วยประเมินการสั่นสะเทือนของพื้นดินเมื่อเกิดแผ่นดินไหวเช่นกัน

Thesis Title Shear-wave Velocity Characteristics of Shallow Sediment in HatYai City,
Songkhla Province

Author Mr. Chedtaporn Sujitapan

Major Program Geophysics

Academic year 2014

Abstract

The elastic properties of geological units under the local site are major influence on ground shaking due to an earthquake. In seismic hazard assessment, shear wave velocity (V_s) of the soil layer is an important parameter in evaluating the amplification behavior of the site during an earthquake. To classify the sites for earthquake resistant design of structures, the average shear wave velocity over 30 m depth of the soil (V_{s30}) is commonly used. In this study, the V_{s30} values were calculated by using the V_s derived from multichannel analysis of surface wave (MASW).

The MASW data were acquired at 25 preselected sites in HatYai city, southern Thailand to create a soil classification map based on the NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program) standard. It is found that the NEHRP site classification map and the geologic map of Hatyai city are in good agreement. Sites near the U-Tha Pao channel which are characterized by alluvial plain located west of HatYai city have the average V_{s30} values about 281.2 m/s, corresponding to NEHRP soil class D. Sites in eastern HatYai city are characterized by colluviums and valley filled soils, and have average V_{s30} values about 456.5 m/s, corresponding to NEHRP soil class C. Although the western part of HatYai city tends to be larger ground motion behavior, the deeper sediment the bedrock interface and the predominant site period information would improve the reliability of the ground motion assessment.

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(11)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 ตรวจสอบเอกสาร	3
1.2.1 ที่ตั้งของพื้นที่ศึกษา	3
1.2.2 ลักษณะทางธรณีวิทยาพื้นที่ศึกษา และบริเวณใกล้เคียง	4
1.2.3 ลักษณะทางธรณีสัณฐานวิทยาของพื้นที่ศึกษา	8
1.2.4 อุทกธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา	8
1.2.5 ทฤษฎีพื้นฐาน	9
1.2.5.1 คลื่นไหวสะเทือน (Seismic Waves)	9
1.2.5.2 การสำรวจด้วยคลื่นไหวสะเทือน	19
1.2.5.3 การขยายสัญญาณของคลื่นแผ่นดินไหว	30
1.2.5.4 การจัดกลุ่มลักษณะทางธรณีวิทยา	32
1.2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	39
2. วิธีการวิจัย	40
2.1 วัสดุและอุปกรณ์ (material and equipment)	40
2.1.1 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการสำรวจด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์	40
2.1.2 วัสดุและอุปกรณ์รวมทั้งโปรแกรมที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์ข้อมูล	41
2.2 วิธีดำเนินการวิจัย	42
2.2.1 การดำเนินการวิจัยในภาคสนาม	42
2.2.2 การดำเนินการวิจัยในห้องปฏิบัติการ	44
3. ผลและการวิเคราะห์ผล	56
3.1 ผลการสำรวจด้วยวิธี MASW (Multichannel Analysis of Surface Wave)	56

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.1.1 ผลการสำรวจด้วยวิธี MASW ในบริเวณที่เป็นที่เป็นตะกอนเศษหินตามเชิงเขา (Q_c)	58
3.1.2 ผลการสำรวจด้วยวิธี MASW ในบริเวณที่เป็นที่ราบตะกอนธารน้ำพา (Q_a)	59
3.1.3 ตัวอย่างแบบจำลองค่าความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาล และวิธีคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเหในบางจุดสำรวจ	61
3.2 แผนที่ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร (V_{s30})	75
3.3 แผนที่มีการจัดกลุ่มลักษณะทางธรณีวิทยาโดยใช้ข้อกำหนดของ NEHRP	78
3.4 แผนที่คาบอิทธิพลหลักของพื้นที่ศึกษา	85
4. สรุปและข้อเสนอแนะ	87
4.1 สรุปผล	87
4.2 ข้อเสนอแนะ	88
บรรณานุกรม	89
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์	95
ประวัติผู้เขียน	103

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 สถิติข้อมูลแผ่นดินไหวที่มีผลกระทบต่อจังหวัดสงขลาโดยเฉพาะบริเวณอำเภอหาดใหญ่ ในรอบ 12 ปี	2
1.2 ค่าความเร็วของคลื่นไหวสะเทือนชนิดคลื่นอัด (P-wave) และคลื่นเฉือน (S-wave)	14
1.3 การจัดกลุ่มลักษณะทางธรณีวิทยาโดยใช้ค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นเฉือน (V_s) ในระดับความลึก 30 เมตร	33
2.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลคลื่นไหวสะเทือน	45
2.2 ตัวอย่างข้อมูลความเร็วคลื่นเฉือนและความหนาของแต่ละชั้นดินและการคำนวณค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร ในบริเวณโรงเรียนวัดคอหงส์	54
3.1 ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร (V_{s30}) และจัดกลุ่มทางธรณีวิทยาโดยใช้ข้อกำหนดของ NEHRP ในบริเวณที่เป็นตะกอนเศษหินตามเชิงเขา (Q_c)	58
3.2 ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร (V_{s30}) และจัดกลุ่มทางธรณีวิทยาโดยใช้ข้อกำหนดของ NEHRP ในบริเวณที่ราบตะกอนน้ำพา (Q_a)	60
3.3 คาบธรรมชาติของแต่ละโครงสร้างอาคาร	85

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 พื้นที่อำเภอหาดใหญ่	4
1.2 โครงสร้างถนนและสอร์สบริเวณอำเภอหาดใหญ่	6
1.3 ธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาและบริเวณใกล้เคียง	7
1.4 ชั้นหินอุ้มน้ำในชั้นใต้ดินบริเวณตัวเมืองหาดใหญ่	10
1.5 (a) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความดัน (b) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อถูกแรงเฉือนมากระทำ	11
1.6 การเคลื่อนที่ของอนุภาคและทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น (a) คลื่นพี (b) คลื่น เฉือน (c) คลื่นเลิฟ (d) คลื่นเรย์เลย์	15
1.7 ทิศทางการเคลื่อนที่และการลดลงของแอมพลิจูดของคลื่นเรย์ลี (Rayleigh Wave) ตามความลึก	15
1.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลื่นเรย์และคลื่นเฉือน กับ อัตราส่วนบิวของ	16
1.9 การรวมกันของคลื่นสองคลื่นที่มีความถี่ต่างกันเล็กน้อย	17
1.10 ส่วนของเฟสและกลุ่มของคลื่น เมื่อ U คือ ความเร็วกลุ่ม c คือ ความเร็วเฟส	17
1.11 การกระจายความเร็วเฟสของคลื่นผิวในในตัวกลาง (a) ตัวกลางมีลักษณะเป็นเนื้อ เดียวกัน (b) ตัวกลางมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน	19
1.12 เส้นทางเดินของคลื่นแต่ละชนิด	20
1.13 เส้นสัญญาณที่บันทึกได้ของแต่ละคลื่น	20
1.14 การสำรวจคลื่นพื้นผิวโดยใช้ตัวรับสัญญาณ 2 ตัว	22
1.15 การสำรวจคลื่นพื้นผิวโดยใช้ตัวรับหลายตัว	23
1.16 ประเภทของการสำรวจด้วยวิธี MASW(a) passive remote method (b) active method (c) passive roadside	24
1.17 การสร้างกราฟกระจายความเร็วด้วยวิธี slowness-frequency ($p - \omega$)	26
1.18 การสร้างกราฟกระจายความเร็ว ด้วยวิธีของ Park et al. (1998)	27
1.19 ขั้นตอนกระบวนการผกผันเพื่อสร้างแบบจำลองคลื่นเฉือน	30
1.20 การสั้นพ้องของชั้นดินสองบริเวณที่มีความเร็วคลื่นเฉือนต่างกัน	31

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
1.21 แผนที่ความเร็วคลื่นเฉือนของ Dehradun city	35
1.22 แผนที่ความเร็วคลื่นเฉือนของ Chennai	36
1.23 แผนที่ความเร็วคลื่นเฉือนของ Bangalore city	37
1.24 แผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวอย่างละเอียดของกรุงเทพฯและปริมณฑล	38
1.25 แผนที่แสดงประเภทดินในประเทศไทยจากการวิเคราะห์ข้อมูล SRTM	39
2.1 วัสดุอุปกรณ์ในการสำรวจ (a) เครื่อง SmartSies™ S-24 Seismograph (b) จีไอโฟน แนวตั้ง 24 ตัว (c) อุปกรณ์กำเนิดคลื่น ใต้แก๊ว ค้อนและแผ่นเหล็ก	41
2.2 ตำแหน่งจุดสำรวจเพื่อหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนในพื้นที่ศึกษา	43
2.3 รูปแบบการวางตำแหน่งตัวรับและตัวกำเนิดคลื่น และการเก็บข้อมูลคลื่นไหว สะเทือน (a) วิธี MASW (b) วิธีคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (SH-wave refraction method)	43
2.4 การเก็บข้อมูลคลื่นไหวสะเทือน (a) การให้กำเนิดสัญญาณด้วยวิธี MASW (b) การ บันทึกสัญญาณด้วยเครื่อง Geometric Smartseis (c) การให้กำเนิดสัญญาณด้วยวิธี คลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (SH-wave refraction method)	44
2.5 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรม Surfseis version 3.0	46
2.6 การตัดเอาสัญญาณรบกวนและคลื่นที่มาถึงตัวรับสัญญาณตัวแรก (First Breaks) ออกไป (a) สัญญาณก่อนตัด (b) หลังตัดสัญญาณ	47
2.7 ข้อมูลในรูปแบบโดเมนของความถี่และแอมพลิจูด	47
2.8 การกรองคลื่นที่มีความถี่สูงออก (a) ก่อนกรอง (b) หลังกรอง	48
2.9 ช่วงสัญญาณคลื่นพื้นผิว	48
2.10 การเลือกจุดกราฟกระจายความเร็วจาก Phase velocity spectrum (a) ข้อมูลที่ไม่ ผ่านการปรับปรุงข้อมูล (b) ข้อมูลหลังการปรับปรุงข้อมูล	49
2.11 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนเบื้องต้น (Initial Model)	50
2.12 การตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการผกผัน	51

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2.13 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนใน 1 มิติ	51
2.14 กำหนดจุด first break ของแต่ละตัวรับคลื่น	52
2.15 แบบจำลองเบื้องต้น (initial model) ด้วยโปรแกรม Geotomo, Tomoplus	53
2.16 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือน	53
3.1 พื้นที่ศึกษาที่วางตัวในบริเวณแอ่งหาคใหญ่	56
3.2 แผนที่ธรณีวิทยา จุดสำรวจ และตำแหน่งของบ่อเจาะในพื้นที่ศึกษา	57
3.3 กราฟแสดงค่า (V_s30) ในบริเวณที่ราบตะกอนเศษหินตามเชิงเขา (Q_c) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของ (V_s30)=456.5 เมตร/วินาที	59
3.4 กราฟแสดงค่า (V_s30) ในบริเวณที่ราบตะกอนน้ำพา (Q_a) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของ (V_s30)=281.20 เมตร/วินาที	60
3.5 แนวสำรวจบริเวณ Site11	61
3.6 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลบริเวณ Site 11	62
3.7 แนวสำรวจบริเวณ Site16	63
3.8 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลบริเวณ Site 11	64
3.9 แนวสำรวจบริเวณ Site23	65
3.10 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลบริเวณ Site 23	65
3.11 แนวสำรวจบริเวณ Site4	66
3.12 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลบริเวณ Site 4	67
3.13 แนวสำรวจบริเวณ Site25	68
3.14 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลบริเวณ Site 25	68

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
------------------	-------------

3.15	แนวสำรวจบริเวณ Site14	69
3.16	แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลบริเวณ Site 14	70
3.17	แนวสำรวจบริเวณ Site17	71
3.18	แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลบริเวณ Site 17	72
3.19	แนวสำรวจบริเวณ Site12	73
3.20	แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลบริเวณ Site 12	74
3.21	แผนที่ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร ในพื้นที่ศึกษา	76
3.22	ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในแต่ละระดับความลึกในพื้นที่ศึกษา (a) 5 เมตร (b) 10 เมตร (c) 20 เมตร	77
3.23	แผนที่การจัดกลุ่มลักษณะทางธรณีวิทยาโดยใช้ข้อกำหนดของ NEHRP ในพื้นที่ศึกษา หมายเหตุ เส้นทึบคือแนวตัดขวางลักษณะทางธรณีวิทยาโดยใช้ความเร็วคลื่นเฉือน	79
3.24	ภาพตัดขวางทางธรณีวิทยาแนว A-A'	81
3.25	ภาพตัดขวางลักษณะทางธรณีวิทยาในแนว B-B'	82
3.26	ภาพตัดขวางลักษณะทางธรณีวิทยาในแนว C-C'	83
3.27	ภาพตัดขวางลักษณะทางธรณีวิทยาในแนว D-D'	84
3.28	แผนที่คาบอิทธิพลหลักของพื้นที่ศึกษา	86

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาใต้ผิวดินมีผลกระทบต่อการสั่นสะเทือนของพื้นดินหรือที่เรียกกันว่าแผ่นดินไหวซึ่งสังเกตได้จากที่ผ่านมาในอดีตเมื่อมีเหตุการณ์แผ่นดินไหวบริเวณที่เป็นตะกอนที่มีความอ่อน (soft soil) การสั่นสะเทือนของแผ่นดินจะทวีความรุนแรงมากขึ้นกว่าบริเวณที่พื้นดินมีความแข็ง (stiff soil) และบริเวณที่เป็นหิน (rock site) แม้ว่าบริเวณนั้นจะอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวหลายร้อยกิโลเมตร ดังที่ได้เคยเกิดขึ้นมาแล้วในอดีต ปรากฏการณ์การเพิ่มความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวที่เด่นชัดและรุนแรงที่สุด เกิดขึ้นที่เม็กซิโกซิตีในปี พ.ศ. 2528 ในเหตุการณ์ครั้งนั้นได้เกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ ($M_w = 8.1$) โดยมีจุดศูนย์กลางห่างจากเม็กซิโกซิตีถึง 350 กิโลเมตร แต่ได้ส่งผลให้เกิดการพังทลายของอาคารประมาณ 500 หลัง และมีผู้เสียชีวิตเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการขยายคลื่นแผ่นดินไหวของชั้นดินอ่อนในเม็กซิโกซิตี ในประเทศไทยได้มีการศึกษาถึงพื้นที่ที่มีความเสี่ยงจากการขยายคลื่นแผ่นดินไหวในบริเวณของกรุงเทพมหานคร จังหวัดเชียงใหม่ และเชียงราย จากการศึกษาวิจัยพบว่าสภาพดินอ่อนในบริเวณกรุงเทพมหานครซึ่งเป็นชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมากที่มีความหนาประมาณ 15-20 เมตร ปกคลุมอยู่นั้น สามารถขยายระดับการสั่นสะเทือนของคลื่นแผ่นดินไหวได้สูงถึง 3.5 เท่าโดยมีการคาบสั่นสะเทือนหลักที่ประมาณ 1.0-1.5 วินาที ในขณะที่ชั้นดินในเขตจังหวัดเชียงใหม่และเชียงรายมีความเสี่ยงต่อการขยายคลื่นแผ่นดินไหวน้อยกว่า โดยพบว่าการขยายคลื่นของชั้นดินในจังหวัดทั้งสองนั้นมีค่าประมาณ 2.0-3.0 เท่า (สุพจน์ และคณะ, 2548) จากการศึกษาคุณสมบัติของการเคลื่อนที่ของพื้นดิน (ground motion) สามารถบ่งชี้ได้ว่าคลื่นแผ่นดินไหวจะมีการปรับเปลี่ยนค่าแอมพลิจูด ความถี่ และรูปร่าง ตามลักษณะของตัวกลางที่เคลื่อนที่ผ่าน (Joyner and Boor, 1988) โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของพื้นดิน (ground motion) คือ ความเร็วคลื่นเฉือน (shear wave velocity) ซึ่งถ้าเราทราบค่าของความเร็วคลื่นเฉือนก็สามารถประเมินการขยายขนาดของคลื่นแผ่นดินไหวในแต่ละพื้นที่ได้ โดยทั่วไปแล้วความเร็วของคลื่นเฉือนจะขึ้นอยู่กับโครงสร้าง อายุ และการเชื่อมประสานของดินและหิน (Park et al., 1999)

วิธีในการหาความเร็วของคลื่นเฉือนของชั้นดินนั้นมีอยู่หลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นเป็นวิธีการทางวิศวกรรมนั้นคือวิธีเจาะสำรวจคลื่นไหวสะเทือน (Seismic Penetration Test/SCPT) วิธีวัดโดยตรงจากหลุมเจาะสำรวจ (Downhole Method) และวิธีการทางธรณีฟิสิกส์ ซึ่งวิธีการทาง

วิศวกรรมและการใช้หลุมเจาะสำรวจจะมีความซับซ้อนและยุ่งยาก อีกทั้งค่าใช้จ่ายและเวลาในการวัดสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทางธรณีฟิสิกส์ สำหรับวิธีการทางธรณีฟิสิกส์ในการสำรวจหาค่าความเร็วของคลื่นเฉือนนั้นมียุทธวิธี ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้เลือกใช้วิธี MASW (Multichannel Analysis of Surface Wave) โดยค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้สามารถนำมาคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นที่ระดับความลึก 30 เมตร ของชั้นดิน เพื่อนำความจัดกลุ่มลักษณะทางธรณีวิทยาที่มีผลต่อการปลูกสร้างอาคารให้ปลอดภัยจากแผ่นดินไหว ตามมาตรฐานของ NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program)

อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา เป็นอำเภอที่มีความสำคัญทางด้านเศรษฐกิจ การท่องเที่ยวและการศึกษาของภาคใต้ ภายในตัวเมืองประกอบด้วยสิ่งก่อสร้างและตึกที่มีความสูงอยู่เป็นจำนวนมาก เช่น โรงแรม โรงพยาบาล ห้างสรรพสินค้า เป็นต้น โดยที่ตัวเมืองหาดใหญ่ก็ตั้งอยู่บนแอ่งหาดใหญ่ ซึ่งเป็นดินตะกอนจึงส่งผลให้เมื่อเกิดแผ่นดินไหวจะทวีความรุนแรงมากขึ้นกว่าปกติ ทำให้มีความเสี่ยงที่จะได้รับความเสียหายจากคลื่นแผ่นดินไหวเป็นอย่างมาก เช่น จากเหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งรุนแรงในบริเวณเกาะสุมาตรา อินโดนีเซีย เมื่อวันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ.2547 ในตัวเมืองหาดใหญ่ซึ่งอยู่ห่างจากตำแหน่งศูนย์กลางแผ่นดินไหวประมาณ 600 กิโลเมตร ก็รู้สึกได้และได้รับความเสียหายจากแรงสั่นสะเทือน จากสถิติข้อมูลของสำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา แผ่นดินไหวที่มีผลกระทบต่อจังหวัดสงขลาโดยเฉพาะบริเวณอำเภอหาดใหญ่ในรอบ 12 ปีที่ผ่านมา มีทั้งหมด 7 เหตุการณ์ (ตารางที่ 1.1)

ตารางที่ 1.1 สถิติข้อมูลแผ่นดินไหวที่มีผลกระทบต่อจังหวัดสงขลาโดยเฉพาะบริเวณอำเภอหาดใหญ่ ในรอบ 12 ปี (ดัดแปลงจาก สำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา)

วันที่ – เวลา	ขนาด (M/I)	ศูนย์กลางแผ่นดินไหว	บริเวณที่รู้สึกได้ถึงแผ่นดินไหว
23 มิถุนายน 2555 11:34	6.3	ตอนเหนือเกาะสุมาตรา	รู้สึกบนอาคารสูง จ.ภูเก็ตและสงขลา
11 เมษายน 2555 15:38	8.6	ชายฝั่งตะวันตกทางตอนเหนือของเกาะสุมาตรา	รู้สึกได้ในหลายจังหวัดในภาคใต้และภาคกลาง รวมถึง ภาคอีสาน เกิดคลื่นสึนามิสูง 80 ซม. ที่ประเทศอินโดนีเซียและที่เกาะเมียง จ.พังงา

วันที่ – เวลา	ขนาด (M/I)	ศูนย์กลางแผ่นดินไหว	บริเวณที่รู้สึกได้ถึงแผ่นดินไหว
6 กันยายน 2554 00:55	6.7	ตอนเหนือเกาะสุมาตรา	รู้สึกที่ อ.เมือง ภูเก็ต อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา
9 พฤษภาคม 2553 19:59	7.3	ตอนเหนือเกาะสุมาตรา	รู้สึกสั้นไหวอาคารสูง จ. ภูเก็ต พังงา สุราษฎร์ธานี จ. สงขลาและ กรุงเทพมหานคร
1 ธันวาคม 2549 10:58	6.5	เกาะสุมาตรา อินโดนีเซีย	รู้สึกสั้นสะเทือนได้ที่ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา และ จ.นราธิวาส
26 ธันวาคม 2547 07:58	9.2	เกาะสุมาตรา อินโดนีเซีย	รู้สึกสั้นสะเทือนได้เกือบทุกจังหวัด ในภาคใต้ รวมถึงอาคารสูงหลายแห่งใน กทม.และเกิดคลื่นสึนามิ
2 พฤศจิกายน 2545 08:26	7.5	ตอนใต้เกาะสุมาตรา	รู้สึกได้ที่ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา

1.2 ตรวจสอบเอกสาร

1.2.1 ที่ตั้งของพื้นที่ศึกษา

อำเภอหาดใหญ่ เป็นอำเภอหนึ่งในจังหวัดสงขลา ซึ่งเป็นที่ตั้งของนครหาดใหญ่ เป็นเมืองใหญ่ที่สุดของภาคใต้ตอนล่าง โดยมีที่ตั้งอยู่ที่ทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ของจังหวัด ประมาณ ลองจิจูด 100 องศา 27 ลิปดา 24 พิลิปดา ตะวันออกและละติจูด 7 องศา 6 พิลิปดาเหนือ ระยะทางห่างจากตัวเมืองสงขลา 30 กิโลเมตร อยู่ห่างจากกรุงเทพมหานครประมาณ 993 กิโลเมตร (รูปที่ 1.1) มีอาณาเขต ดังต่อไปนี้

ทิศเหนือ ติดกับ ทะเลสาบสงขลา

ทิศตะวันออก ติดกับ อำเภอนาหม่อมและอำเภอจะนะ

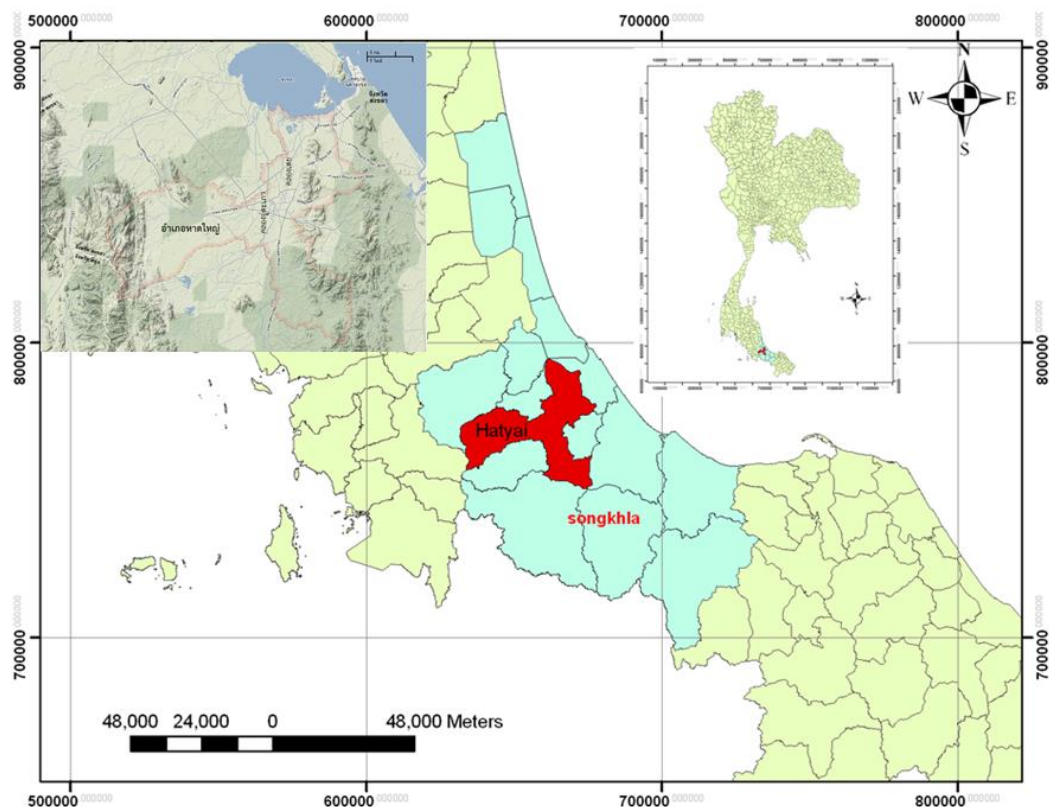
ทิศตะวันตก ติดกับ อำเภอรัตภูมิ

ทิศใต้ ติดกับ อำเภอสะเดาและอำเภอคลองหอยโข่ง

ตัวเมืองหาดใหญ่ มีแม่น้ำสายหลักไหลผ่านอยู่ 2 สาย คือ

1) คลองอู่ตะเภา อยู่ทางด้านทิศตะวันตกของตัวเมืองหาดใหญ่ ยาวประมาณ 15 กิโลเมตร โดยมีต้นกำเนิดมาจากภูเขาโตนงาช้างและวังพาไหลผ่านอำเภอสะเดา หาดใหญ่ แล้วจึงลงสู่ทะเลสาบสงขลา

2) คลองเตย เป็นแม่น้ำสายเล็กๆที่เป็นสาขาแยกออกมาจากคลองอุตะเถา อยู่ทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ของตัวเมือง ไหลเข้าสู่ทางด้านใต้ของสถานีรถไฟหาดใหญ่ผ่านบริเวณทุ่งเสา ไหลเวียนถนนสายต่างๆ และไปบรรจบกับคลองอุตะเถาแล้วจึงลงสู่ทะเลสาบสงขลา



รูปที่ 1.1 พื้นที่อำเภอหาดใหญ่

1.2.2 ลักษณะทางธรณีวิทยาพื้นที่ศึกษา และบริเวณใกล้เคียง (รูปที่ 1.3)

หินอัคนี

หินอัคนี มี 2 ยุค คือยุคไทรแอสซิก (Triassic) และยุคครีเทเชียส (Cretaceous) ซึ่งเป็นตัวการสำคัญในการให้กำเนิดแร่ดีบุก ทั้งสตรน และแร่อื่น ๆ

หินอัคนียุคครีเท ประกอบด้วย หินแกรนิต หินเพกมาไทต์ (pegmatite) หินแอปไลต์ (aplite) หินทัวร์มาลีนแกรนิต (tourmaline granite) พบอยู่ในพื้นที่อำเภอนาหม่อม อำเภอจะนะ และอำเภอเทพา

หินอัคนียุคไทรแอสซิก ประกอบด้วย หินไบโอไทต์แกรนิต (biotite granite) หินทัวร์มาลีนแกรนิต (tourmaline granite) หินแกรนิตเนื้อดอก (porphyritic granite) และสายแร่ค

วอร์ตซ์ (quartz veins) พบมากในพื้นที่รอยต่อจังหวัดสงขลาและจังหวัดสตูล และบางส่วนของอำเภอเมือง อำเภอหาดใหญ่ และอำเภอนาหม่อม

หินตะกอนและหินแปร

หินยุคคาร์บอนิเฟอรัส (Carboniferous) พบวางตัวตามแนวเหนือ-ใต้ จากบริเวณอำเภอสะเตาะ ดัดต่อขึ้นมาทางเหนือ จนถึงอำเภอเมือง อำเภอรัตภูมิ และยังคงไปในพื้นที่จังหวัดพัทลุง ประกอบด้วย หินควอร์ตไซต์ (quartzite) หินทราย หินเชิร์ต (chert) หินดินดาน (shale) หินดินดานเนื้อปนทราย หินดินดานเนื้อปนซิลิกา (siliceous shale) และหินทรายแป้ง (siltstone)

หินยุคเพอร์เมียน (Permian) หรือเรียกว่า กลุ่มหินราชบุรี (Rat Buri group) มักโผล่เป็นเขาโดดๆ ตามที่ราบบริเวณอำเภอรัตภูมิและตอนใต้ของอำเภอสะบ้าย้อย ประกอบด้วยหินปูน (limestone) เนื้อสมานแน่น (massive) สีเทา และหินปูนเป็นชั้น (bedded limestone) และหินเชิร์ต หินทราย หินดินดาน

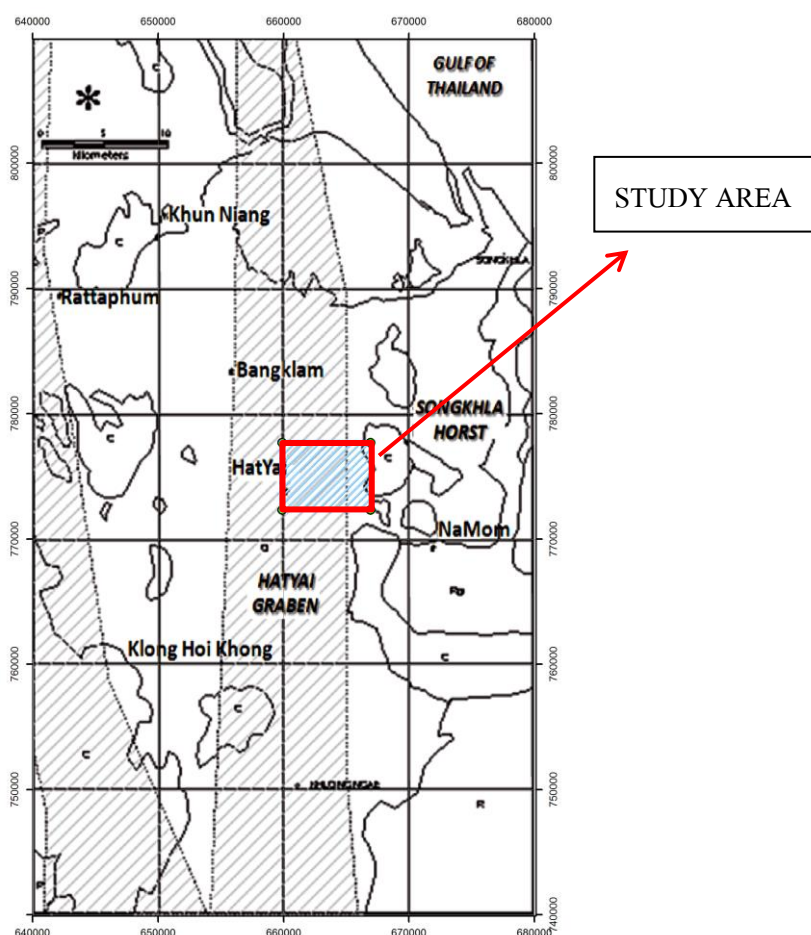
หินยุคไทรแอสซิก ประกอบด้วย หินทราย หินกรวดมน (conglomerate) หินทรายแป้ง หินโคลน (mudstone) หินดินดาน ชั้นหินนี้จัดอยู่ในหน่วยหินนาทวี (Na Thawi Formation) พบมากในพื้นที่อำเภอที่อยู่ด้านทิศตะวันออกและทิศใต้ของจังหวัดสงขลา

ตะกอนยุคควอเทอร์นารี (Quaternary) เป็นตะกอนที่ยังไม่ถูกประสานเชื่อมให้แข็งกลายเป็นหิน ได้แก่ ชั้นตะกอนกรวด ทราย ทรายแป้ง ดินเหนียว และโคลนตม ที่มีสภาพแวดล้อมการสะสมตัวของตะกอนในพื้นที่จังหวัดสงขลาตะกอนยุคควอเทอร์นารี สามารถแบ่งตะกอนได้ 6 หน่วย ตามลักษณะของตะกอนที่พบและลักษณะการสะสมตัวของตะกอน ได้แก่ ตะกอนเศษหินเชิงเขา (Q_c) ตะกอนตะก้นน้ำ (Q_f) ตะกอนทรายทางน้ำพา (Q_{as}) ตะกอนธารน้ำพา (Q_l) ตะกอนละเอียดชายฝั่งทะเล (Q_{mc}) และตะกอนชายฝั่งทะเล (Q_{ms}) (นิรันดร์ ชัยมณี และคณะ, 2526)

สำหรับลักษณะธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา (ตัวเมืองหาดใหญ่) ตั้งอยู่บนพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำระหว่างภูเขาคอหงส์และภูเขาวังพาที่วางตัวในแนวเหนือ-ใต้ซึ่งพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำถูกปกคลุมด้วยตะกอนในยุคควอเทอร์นารี วางตัวอยู่บนแอ่งหาดใหญ่ซึ่งเป็นแอ่งสะสมตะกอนในคาบสมุทรไทย โดยมีที่ตั้งอยู่ที่ประมาณ ลองจิจูด 100 องศา 15 ลิปดาและ 100 องศา 30 ลิปดา ตะวันออก และละติจูด 6 องศา 30 ลิปดา และ 7 องศา 15 ลิปดาเหนือ จากการแปลความค่าสนามโน้มถ่วงผิดปกติตกค้างของแอ่งหาดใหญ่ พบว่าแอ่งหาดใหญ่มีความลึกมากที่สุดประมาณ 1 กิโลเมตร มีความยาว 60 กิโลเมตร และมีความกว้างประมาณ 20 กิโลเมตร (วรวิภา โลหะวิจารณ์, 2548) แอ่งหาดใหญ่ ครอบคลุมพื้นที่ 5 อำเภอในจังหวัดสงขลา โดยประกอบด้วยพื้นที่ของ อ.หาดใหญ่ อ.บางกล่ำ อ.คลองหอยโข่ง อ.ควนเนียงและ อ.สิงหนคร ลักษณะภูมิประเทศโดยทั่วไปของแอ่งหาดใหญ่ เป็นที่ราบล้อมรอบด้วยภูเขา ประกอบด้วยเทือกเขาบรรทัดทางทิศ

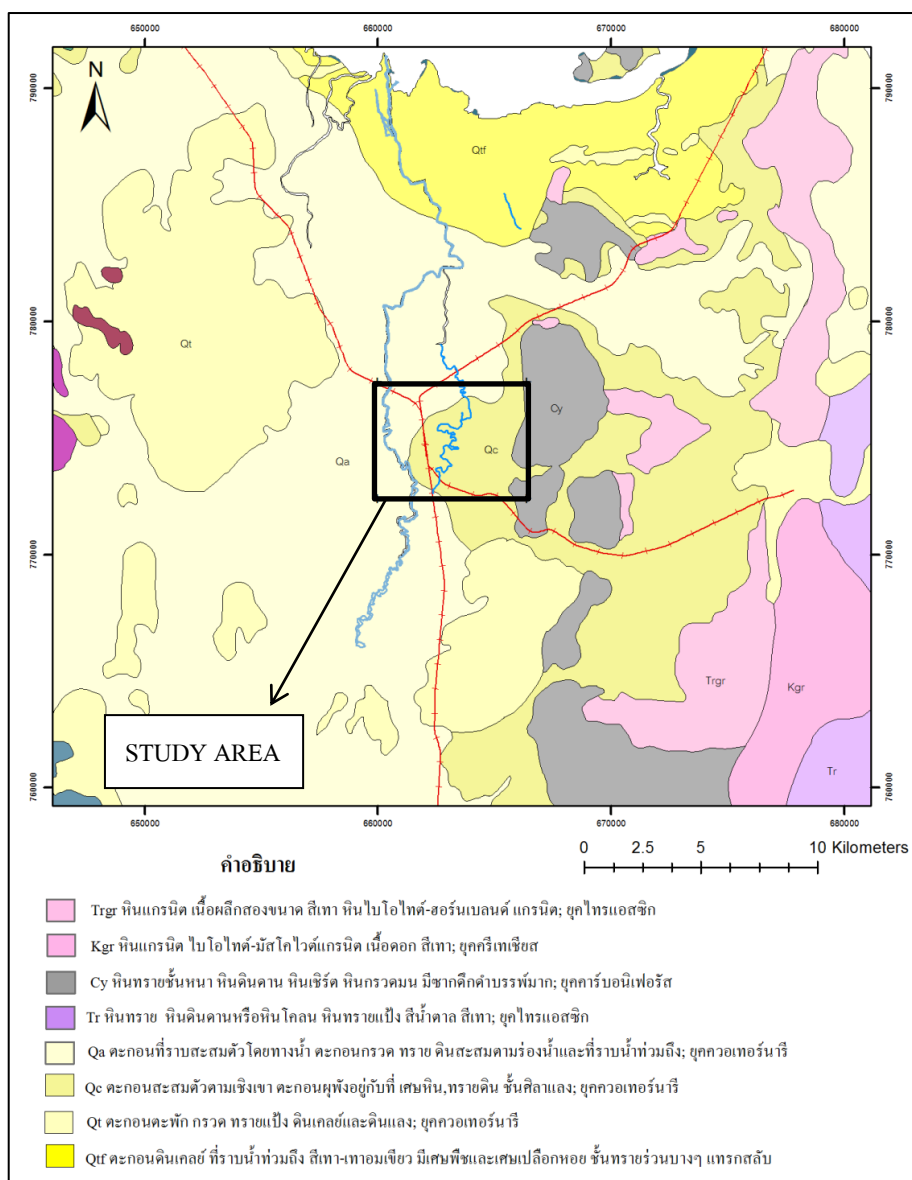
ตะวันตก เขาวังซึ่งทางด้านทิศใต้ และทิศเหนือและทิศตะวันออก บริเวณกลางแอ่งเป็นที่ราบสลับเนินเขา (อรุณ ลูกจันทร์ และคณะ, 2552) และมีลักษณะโครงสร้างแบบกรaben (Graben) (มวลหินแนวยาวได้ยุบตัวลงระหว่างรอยเลื่อน) เนื่องด้วยมีแนวเนินเขาและแอ่งขนาดเล็ก ซึ่งทางด้านตะวันออกของกรabenคือ โครงสร้างแบบฮอร์ส (Horst) (มวลหินคั่นขึ้นมา ระหว่างรอยเลื่อน) (รูปที่ 1.2) โดยที่โครงสร้างกรabenและฮอร์สนี้เป็นลักษณะเหมือนกันกับในบริเวณอ่าวไทยที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อน (Sawata et al., 1983)

ธรณีวิทยาแอ่งหาดใหญ่คือวางตัวอยู่บนหินตะกอน (sedimentary rock) โดยมีอายุ เรื่อยมาตั้งแต่ยุคคาร์บอนิเฟอรัส (Carboniferous) ไทรแอสสิก (Triassic) ไปจนถึงยุคเริ่มต้นของจูราสสิก (Jurassic) ซึ่งหินในยุคคาร์บอนิเฟอรัส (Carboniferous) ในแอ่งหาดใหญ่ส่วนใหญ่จะเป็นพวก หินทราย (sandstone) หินดินดาน (shale) และหินเชิร์ต (chert) (Chlermyanont et al, 1995)



รูปที่ 1.2 โครงสร้างกรabenและฮอร์สบริเวณแอ่งหาดใหญ่ (วรุฒิ โทหะวิจารณ์, 2548)

สำหรับตะกอนควอเทอร์นารีของพื้นที่ศึกษา (รูปที่ 1.3) ประกอบไปด้วย ตะกอนเศษหินเชิงเขา (Q_c) และตะกอนธารน้ำพา (Q_a) โดยตะกอนเศษหินเชิงเขา (Q_c) เป็นตะกอนที่ผุพังจากหินเดิมและไม่มีกรพัดพาโดยตัวกลางทางธรรมชาติ ซึ่งสามารถบ่งถึงหินที่อยู่ด้านล่างได้โดยประมาณ มักพบตามเชิงเขาเดี่ยวๆ และขอบของหินโผล่ ส่วนตะกอนธารน้ำพา (Q_a) ประกอบด้วยตะกอนกรวด ทราย และดินเหนียวที่สะสมตัวตามธารน้ำและที่ลุ่มน้ำท่วมถึง สำหรับตะกอนธารน้ำพาในส่วนของตัวเมืองหาดใหญ่มีความหนาประมาณ 230 เมตร จากผิวดิน ซึ่งเกิดจากการยุบตัวของแท่งหินแนวยาวระหว่างรอยเลื่อนหรือที่เรียกว่าโครงสร้างแบบกราเบน (Graben) (รูปที่ 1.2) ในยุคเทอร์เชียรี (Tertiary)



รูปที่ 1.3 ธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาและบริเวณใกล้เคียง (กรมทรัพยากรธรณี, 2550)

1.2.3 ลักษณะทางธรณีสัณฐานวิทยาของพื้นที่ศึกษา

โดยทั่วไปลักษณะธรณีสัณฐานของอำเภอหาดใหญ่จะเกิดจากระบวนการผุพังอยู่กับที่และพัดพาของแม่น้ำ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ คือ เขา (hill) ตะพัก (terrace) และที่ราบตะกอนน้ำพา (alluvial plain) (Tachavichitpaisam 1989)

1) เขา (hill) บริเวณนี้จะเป็นเขาเดี่ยวๆ วางตัวในแนวเหนือ-ใต้ โดยมีระดับความสูงมากกว่า 50 เมตรแต่ไม่เกิน 600 เมตร จากระดับน้ำทะเล ซึ่งจะประกอบไปด้วย หินทราย (Sandstone) หินดินดาน (Shale) ควอร์ตไซต์ (Quartzite) และหินแกรนิต (Granite) ลักษณะของเขาเช่นนี้จะอยู่ในบริเวณด้านตะวันออกของตัวเมืองหาดใหญ่ นั่นคือ เขาคอหงส์

2) ตะพัก (terrace) จะเกิดขึ้นมาจากเขาคอหงส์ โดยจะมีระดับความสูงจาก 10 เมตร จนถึง 50 เมตร จากระดับน้ำทะเล ซึ่งจะประกอบไปด้วย กรวด ดินเหนียวปนทรายเนื้อหยาบ และทรายแป้ง

3) ที่ราบตะกอนน้ำพา (alluvial plain) บริเวณนี้จะอยู่ทางด้านตะวันตก และตอนกลางของตัวเมืองหาดใหญ่ โดยพื้นที่จะเป็นที่ราบน้ำท่วมถึงของคลองคูตะเกาและคลองเตย ซึ่งมีความกว้างประมาณ 0.5 ถึง 3 กิโลเมตร ระดับความสูงของพื้นที่บริเวณนี้จะไม่สูงเกินกว่า 10 เมตร จากระดับน้ำทะเล (Chlermyanont et al., 1995)

1.2.4 อูทกธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา

Ramnarong et al. 1984 ได้ทำการศึกษาและแสดงอูทกธรณีวิทยาของแอ่งหาดใหญ่ โดยในบริเวณตัวเมืองหาดใหญ่สามารถแบ่งอูทกธรณีวิทยาออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

1) ทรายทะเลและคันดินธรรมชาติ (natural levee) ประกอบด้วยทรายละเอียดไปจนถึงทรายหยาบที่เกิดจากทะเล และคันดินธรรมชาติ โดยชั้นทรายที่อยู่ในชั้นหินอุ้มน้ำ (aquifers) มีความหนาประมาณ 3-5 เมตร ให้ปริมาณน้ำในอัตรา 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

2) ตะกอนน้ำพายุคใหม่ (young alluvium) เกิดจากการรวมตัวกันของตะกอนน้ำพายุคใหม่ของที่ราบน้ำท่วมถึงและร่องน้ำ โดยจะสะสมตัวอยู่ในชั้นใต้ดินระดับตื้นตามแม่น้ำ ซึ่งประกอบด้วยดินเหนียวร่วน (unconsolidated clay) ทราย และกรวด มีความหนาเฉลี่ย 15-50 เมตร

3) ตะกอนน้ำพายุคเก่า (old alluvium) ตะกอนของกลุ่มนี้จะปรากฏอยู่ในบริเวณขอบของแอ่งหาดใหญ่และบริเวณด้านใต้ของตะกอนน้ำพายุคใหม่ ที่สะสมตัวอยู่ตามแม่น้ำ ตะกอนกลุ่มนี้จะประกอบไปด้วยดินเหนียวร่วน (unconsolidated clay) ไปจนถึง ดินเหนียวกึ่งร่วน (semiconsolidated clay) ทราย และกรวด มีความหนาประมาณ 50-200 เมตร

สำหรับชั้นหินอุ้มน้ำในชั้นใต้ดินบริเวณตัวเมืองหาดใหญ่ จากการศึกษาพบว่า มี 3 ชั้นหินอุ้มน้ำ (รูปที่ 1.4) คือ ชั้นหินอุ้มน้ำหาดใหญ่ (Hat Yai aquifer) ชั้นหินอุ้มน้ำคูเต่า (Khu Tao aquifer) ชั้นหินอุ้มน้ำคอหงส์ (Kho Hong aquifer) ซึ่งชั้นหินอุ้มน้ำที่ให้ปริมาณน้ำในอัตราสูงสุด คือ ชั้นหินอุ้มน้ำหาดใหญ่ โดยจะอยู่ที่ความลึกประมาณ 20-40 เมตร (Chlermyanont et al., 1995)

1.2.5 ทฤษฎีพื้นฐาน

1.2.5.1 คลื่นไหวสะเทือน (Seismic Waves)

ทฤษฎีความยืดหยุ่น (Theory of elasticity)

1. ความเค้น (Stress) เมื่อมีแรงกระทำที่ตัวกลางหรือวัตถุจะเกิดความเค้นขึ้นทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดตัวกลางหรือวัตถุนั้น ถ้าแรงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่เรียกว่าความเค้นปกติ (Normal Stress) แต่ถ้าแรงที่กระทำมีทิศทางกับพื้นที่เรียกว่าความเค้นเฉือน (Shear Stress)

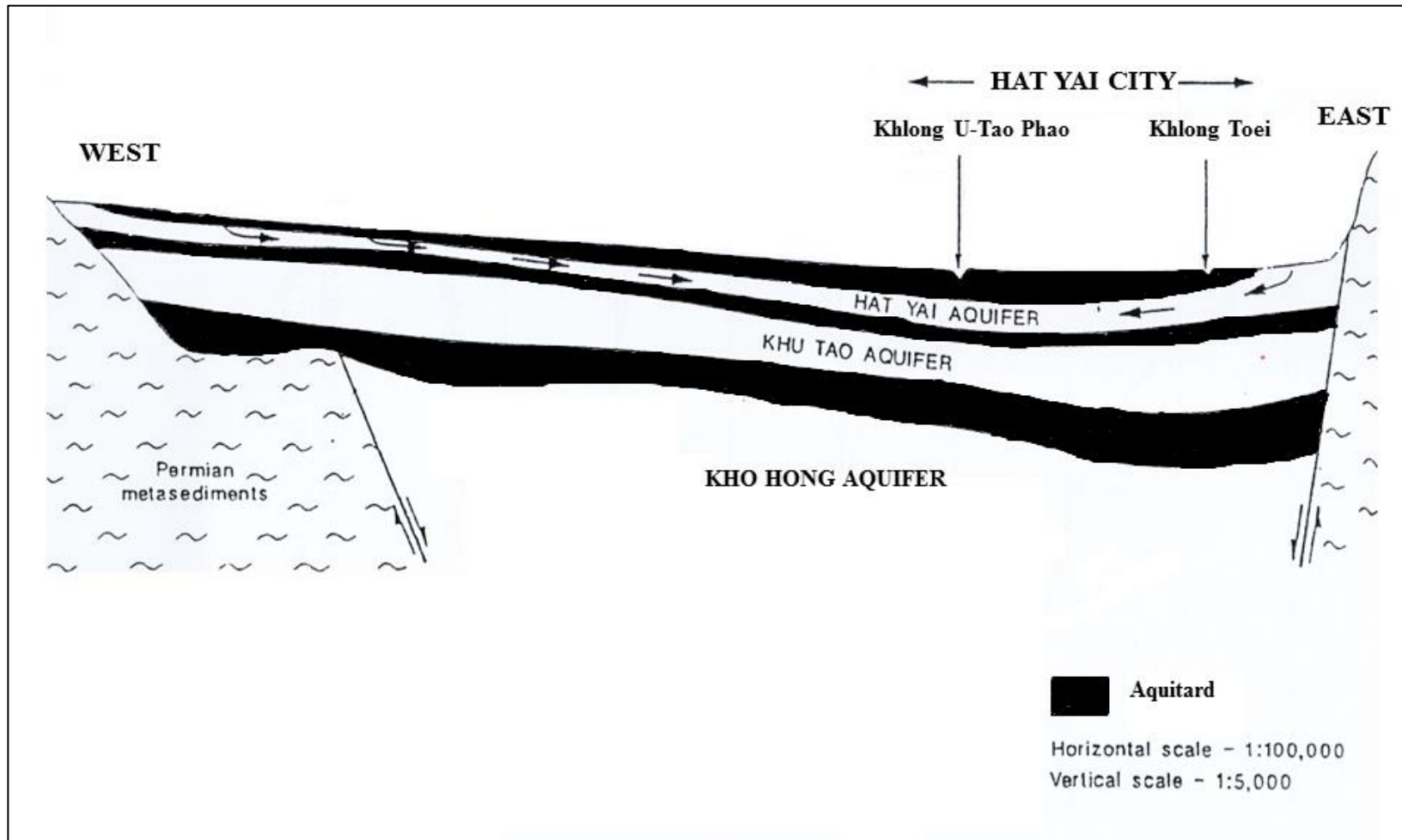
2. ความเครียด (Strain) เมื่อวัตถุได้รับแรงเค้นทำให้วัตถุนั้นมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเรียกว่าความเครียด ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าความเครียดก็คือการเปลี่ยนแปลงของขนาดเปรียบเทียบขนาดเดิมก่อนได้รับแรงเค้น

วัตถุซึ่งได้รับแรงกระทำจะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะ (Deformation) เช่น รูปร่างหรือขนาดสอดคล้องกับทฤษฎีความยืดหยุ่น (Theory of elasticity) วัตถุที่มีความยืดหยุ่นสมบูรณ์แบบจะคืนตัวสู่รูปร่างเดิมอย่างสมบูรณ์ ซึ่งขนาดการเปลี่ยนแปลงหรือความเครียดสัมพันธ์กับขนาดของแรงที่กระทำหรือความเค้นบนวัตถุตามกฎของฮุก (Hook's Law) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความเค้นต่อความเครียด เรียกว่า ค่ามอดูลัสของตัวกลาง โดยมอดูลัสสำหรับความเค้นและความเครียดต่างชนิดกันจะมีความสอดคล้องกันตามชนิดนั้นๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- มอดูลัสเฉือน (Shear modulus, μ) คือ ความสามารถในการต้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อถูกแรงเฉือนมากระทำ หรืออัตราส่วนของความเค้นเฉือน (τ) กับความเครียดเฉือน ($\tan \theta$) (รูปที่ 1.5b)

$$\mu = \frac{\tau}{\tan \theta} \quad (1.1)$$

เนื่องจากอากาศกับของเหลวไม่สามารถต้านแรงเฉือนได้ มอดูลัสเฉือนของอากาศและของเหลวมีค่าเท่ากับศูนย์ ($\mu = 0$)



รูปที่ 1.4 ชั้นหินอุ้มน้ำในชั้นใต้ดินบริเวณตัวเมืองหาดใหญ่ (Chlermyanont et al., 1995)

- ยั่งมอดูลัส (Young 's modulus ,E) คือ อัตราส่วนของความเค้นดึงต่อความเครียดในแนวยาวของวัตถุทรงกระบอกขนาดเล็ก เมื่อออกแรงดึงที่ด้านปลาย

$$E = \frac{(3\lambda + 2\mu)}{(\mu + \lambda)} \mu \quad (1.2)$$

โดยที่ λ คือ ค่าคงที่ลามเ่

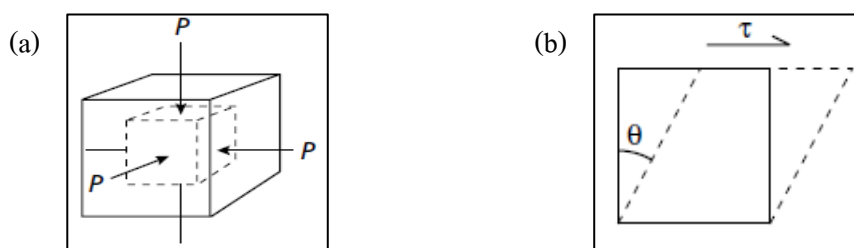
- บัลค์มอดูลัส (Bulk modulus ,K) คือ ความสามารถในการคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตร โดยอธิบายด้วยอัตราส่วนระหว่างความดัน (ΔP) หรือแรงที่มากกระทำในทิศทางตั้งฉากกับผิวด้านข้างของวัตถุทรงลูกบาศก์เล็กๆต่อหน่วยพื้นที่กับอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (ΔV) ต่อปริมาตรเดิม (V) (รูปที่ 1.5a)

$$K = \frac{(\Delta P)}{(\Delta V/V)} = \lambda + \frac{2}{3} \mu \quad (1.3)$$

- อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio, σ) คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างการหดตัวในแนวตั้งของวัตถุต่อการยืดตัวตามยาวเมื่อวัตถุถูกดึงที่ปลาย

$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (1.4)$$

อัตราส่วนปัวซองมีค่าเป็นบวกไม่มีหน่วยและมีค่าน้อยกว่า 0.5 (สำหรับของเหลวมีค่าเท่ากับ 0.5 เนื่องจาก $\mu = 0$) ค่ายั่งมอดูลัส ค่าคงที่ลามเ่และบัลค์มอดูลัส มีค่าเป็นบวกทั้งหมด มีหน่วยเป็น N/m^2 สำหรับหีนค่าคงที่ลามเ่ และ มอดูลัสเฉือน มีค่าเท่ากันโดยประมาณ ดังนั้นในหีนถ้าให้ $\mu = \lambda$ อัตราส่วนปัวซองจะมีค่าเท่ากับ 0.25 ซึ่งการประมาณค่าดังกล่าวเรียกว่า ความสัมพันธ์ปัวซอง(Poisson's relation)



รูปที่ 1.5 (a) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความดัน

(b) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อถูกแรงเฉือนมากกระทำ (Kearey and Brooks, 1991)

คลื่นไหวสะเทือนที่เกิดขึ้นเป็นคลื่นยืดหยุ่นที่ต้องอาศัยตัวกลางในการเดินทางโดยคลื่นทำให้ปริมาตรเล็กๆของตัวกลางในบริเวณที่ถูกระลอกหรือรบกวนเกิดการเปลี่ยนแปลงแล้วก็กลับคืนสู่รูปเดิมโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงให้เห็นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านไปแล้ว คลื่นไหวสะเทือน (Seismic waves) ที่เกิดขึ้นแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

1) คลื่นในตัวกลาง (body Wave) เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในตัวกลาง ได้แก่

คลื่นปฐมภูมิ (primary Wave) หรือคลื่นพี (P-wave) เป็นคลื่นที่ทำให้อนุภาคของตัวกลางมีการสั่นแบบอัด (compression) และขยาย (rarefaction) ในทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ผ่านของคลื่น (รูปที่ 1.6a) ซึ่งชื่อคลื่นปฐมภูมิได้จากการสังเกตพบว่าเป็นคลื่นที่สามารถบันทึกได้เป็นคลื่นชนิดแรกเมื่อเกิดแผ่นดินไหว โดยความเร็วของคลื่นชนิดนี้จะมีค่าคงที่เมื่ออยู่ในตัวกลางที่มีเนื้อเดียว (homogenous) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของคลื่น (non-dispersive)

คลื่นทุติยภูมิ (secondary Wave) หรือ คลื่นเอส (S-wave) หรือเรียกอีกอย่างว่าคลื่นเฉือน (shear wave) เป็นคลื่นที่เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางอนุภาคภายในตัวกลางจะมีการสั่น ซึ่งทิศทางของการสั่นจะตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น (รูปที่ 1.6b) คลื่นทุติยภูมิสามารถจำแนกออกเป็น 2 พวก คือ คลื่นเฉือนแนวนอน (SH-component) ซึ่งเป็นคลื่นทุติยภูมิที่ทำให้อนุภาคของตัวกลางเกิดการสั่นในแนวราบ และคลื่นเฉือนแนวตั้ง (SV-component) ซึ่งเป็นคลื่นทุติยภูมิที่ทำให้อนุภาคของตัวกลางเกิดการสั่นในแนวตั้ง โดยชื่อของคลื่นทุติยภูมินั้นได้มาจากเป็นคลื่นที่บันทึกได้เป็นชนิดที่สองเมื่อมีแผ่นดินไหวเกิดขึ้น โดยความเร็วของคลื่นชนิดนี้จะมีค่าคงที่ในตัวกลางและไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่เช่นเดียวกับคลื่นปฐมภูมิ

ความเร็วคลื่นทั้งสองชนิดในตัวกลางจะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นและค่ามอดูลัสของตัวกลางนั้นๆดังนี้

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (1.5)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1.6)$$

เมื่อ V_p คือ ความเร็วคลื่นพี

V_s คือ ความเร็วคลื่นเอส

ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง

K คือ บัลค์มอดูลัส

μ คือ มอดูลัสเฉือน

จากสมการที่ 6 จะเห็นได้ว่า คลื่นเฉือนไม่สามารถเคลื่อนที่ในน้ำและอากาศได้ เนื่องจากค่ามอดูลัสเฉือนของน้ำและอากาศมีค่าเท่ากับศูนย์

ในตัวกลางเดียวกันความเร็วคลื่นอัดจะมีความมากกว่าความเร็วของคลื่นเฉือนโดยอัตราส่วนระหว่างความเร็วคลื่นเฉือนกับความเร็วของคลื่นอัดมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio, σ) (Telford et al, 1990) ดังสมการ

$$\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{\mu}{\lambda + 2\mu}} = \sqrt{\frac{0.5 - \sigma}{1 - \sigma}} \quad (1.7)$$

โดยค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio, σ) มีค่าจาก 0 ถึง 0.5 ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างความเร็วคลื่นเฉือนกับคลื่นอัดมีค่ามากที่สุดเท่ากับ $1/\sqrt{2}$ ทำให้ค่าความเร็วของคลื่นเฉือนมีค่าตั้งแต่ค่า 0 จนถึงประมาณ 70% ของความเร็วคลื่นอัด

ความเร็วคลื่นไหวสะเทือนในหินขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ความพรุน การเชื่อมประสาน ความลึก อายุ ความดัน ของเหลวในช่องว่างของหิน เป็นต้น ความเร็วของหินตะกอนที่อิ่มตัวด้วยน้ำ มีค่าอยู่ในช่วง 1.5 - 6.5 km/s ความเร็วของคลื่นพิในน้ำมีค่าประมาณ 1.5 km/s โดยทั่วไปความเร็วคลื่นพิจะมีค่าต่ำกว่ามีก๊าซแทนที่น้ำใน ช่องว่าง และจะมีค่าต่ำบริเวณใกล้ผิวดินหรือเหนือระดับน้ำบาดาล โดยชั้นที่มีความเร็วคลื่นต่ำนี้จะอยู่ในช่วง 0.4 - 0.8 km/s หรือบางครั้งอาจมีค่าต่ำกว่านี้ (ตารางที่ 1.2)

2) คลื่นพื้นผิว (Surface Wave) เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่อยู่บนผิวดิน หรือที่รอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ชนิดที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน แบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคในตัวกลาง ได้แก่

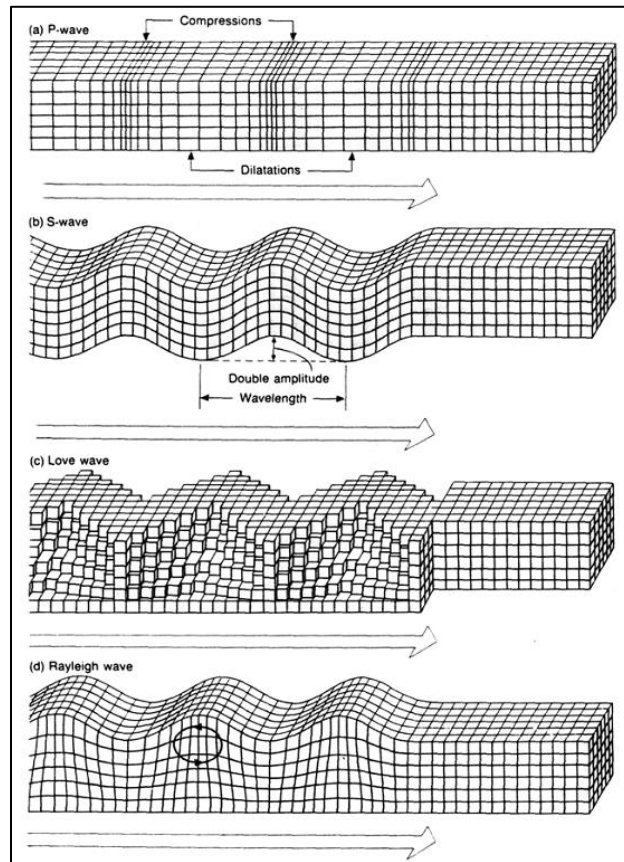
คลื่นเรย์ลี (Rayleigh Wave) เป็นคลื่นที่เดินทางบนผิวหน้าของตัวกลาง เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านจะทำให้อนุภาคของตัวกลางหมุนวนเป็นวงรีบนระนาบในแนวตั้ง (รูปที่ 1.6c) โดยที่แอมพลิจูดของคลื่นมีค่ามากที่สุดที่ผิว และมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วตามความลึก (รูปที่ 1.7) อีกทั้งความเร็วเฟสของคลื่นมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ เรียกว่า การกระจายความเร็วเฟส (Dispersion) ซึ่งลักษณะการกระจายความเร็วเฟส (Dispersion) ของคลื่นผิวดินนี้สามารถนำมา

ประยุกต์ใช้ในการประมวลผลเพื่อสร้างแบบจำลองความเร็วคลื่นทุติยภูมิ ในงานวิจัยครั้งนี้ได้นำคลื่นพื้นผิวชนิดนี้มาใช้ในการวิเคราะห์

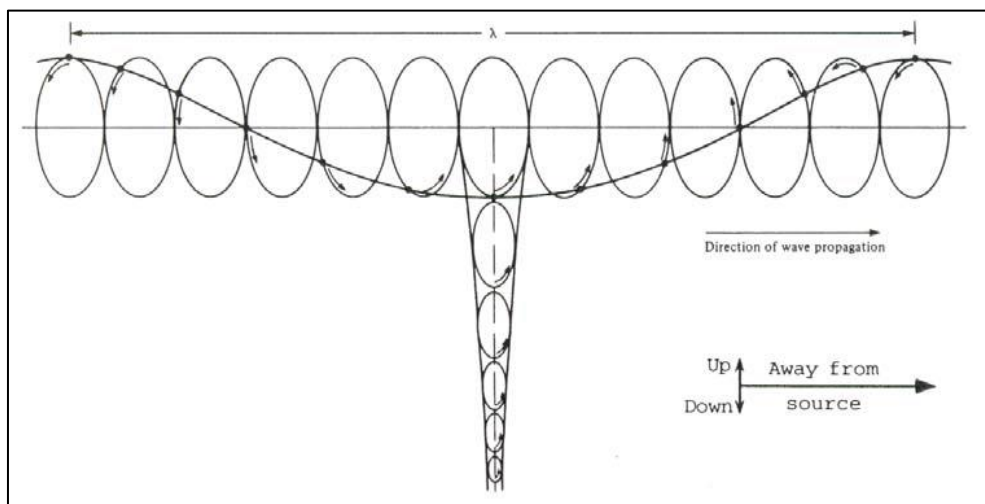
คลื่นเลิฟ (Love Wave) เป็นคลื่นที่เดินทางอยู่บนผิวดิน เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านอนุภาคของตัวกลางจะมีการสั่นอยู่บนระนาบในแนวราบ (รูปที่ 1.6d) โดยทิศทางของการสั่นตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น คล้ายกับลักษณะการสั่นของอนุภาคที่เกิดขึ้นจากคลื่นทุติยภูมิ แต่แอมพลิจูดของการสั่นลดลงอย่างรวดเร็วตามความลึก ความเร็วเฟสของคลื่นมีการกระจายความเร็วตามความถี่เช่นเดียวกับคลื่นเรย์ลี และมีความเร็วเท่ากับคลื่นเฉือนที่วิ่งในแนวราบ (SH-component)

ตารางที่ 1.2 ค่าความเร็วของคลื่นไหวสะเทือนชนิดคลื่นอัด (P-wave) และคลื่นเฉือน(S-wave) (ดัดแปลงจาก เพียงตา สาตรักษ์, 2544)

วัสดุ	ความเร็วคลื่นอัด(m/s)	ความเร็วคลื่นเฉือน(m/s)
ดินปนทราย	250-600	120-300
ทรายปนกรวด(แห้ง)	400-1,500	160-600
ทรายปนกรวด(เปียก)	500-1,800	200-700
ดินเหนียว(แห้ง)	700-1,200	300-600
ดินเหนียว(เปียก)	1,200-1,800	400-600
ทราย(แห้ง)	200-1,800	100-800
ทราย(เปียก)	800-1,800	300-750
น้ำ	1,400-1,600	-
น้ำทะเล	1,460-1,530	-
อากาศ	330-350	-
หินทราย	1,400-4,200	700-2,200
หินดินดาน	1,800-2,800	800-1,600
หินปูน	3,000-4,800	1,800-2,800
หินเกลือ	4,200-5,000	2,100-2,800
หินแกรนิต	4,500-5,500	2,500-3,300



รูปที่ 1.6 การเคลื่อนที่ของอนุภาคและทิศทางเคลื่อนที่ของคลื่น (a) คลื่นพี (b) คลื่นเอส (c) คลื่นเลิฟ (d) คลื่นเรย์ลี (Kearey and Brooks, 1991)



รูปที่ 1.7 ทิศทางการเคลื่อนที่และการลดลงของแอมพลิจูดของคลื่นเรย์ลี (Rayleigh Wave) ตามความลึก (Sheriff and Geldart, 1995)

Richart et al. (1970) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของคลื่นทุติยภูมิและคลื่นเรย์ลี ซึ่งเดินทางในตัวกลางยืดหยุ่น ดังแสดง

$$\left(\frac{V_R}{V_s}\right)^6 - 8\left(\frac{V_R}{V_s}\right)^4 + \left(24 - 16\frac{1-2\sigma}{2-2\sigma}\right)\left(\frac{V_R}{V_s}\right)^2 + 16\left(\frac{1-2\sigma}{2-2\sigma} - 1\right) = 0 \quad (1.8)$$

เมื่อ V_R คือ ความเร็วของคลื่นเรย์ลี และ σ คือ ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วคลื่นเฉือนและคลื่นอัด ดังสมการที่ 1.7 โดยทั่วไปค่าของอัตราส่วนปัวซองจะอยู่ระหว่าง 0 สำหรับตัวกลางที่เป็นของแข็ง ถึง 0.5 สำหรับตัวกลางที่เป็นของเหลว ดังนั้นค่าความเร็วของคลื่นเรย์ลี จะมีค่าประมาณ 0.87 - 0.96 เท่าของคลื่นเฉือน เมื่ออัตราส่วนปัวซองมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 0.5 ดังรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคลื่นเรย์และคลื่นเฉือน กับ อัตราส่วนปัวซอง (Dulaijan, 2008)

ความเร็วเฟสและความเร็วกลุ่ม

สมมติให้มีคลื่นสองลูก C และ D ซึ่งมีแอมพลิจูดเท่ากับ A ซึ่งมีความถี่เป็น ω_1 และ ω_2 เดินทางไปตามแนวราบ โดยที่คลื่น C เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฟสเท่ากับ c_1 และคลื่น D เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับ c_2 เมื่อคลื่นทั้งสองเคลื่อนที่มารวมกัน (ดังรูปที่ 1.9) แทนด้วยสัญลักษณ์ U จะเขียนได้เป็น

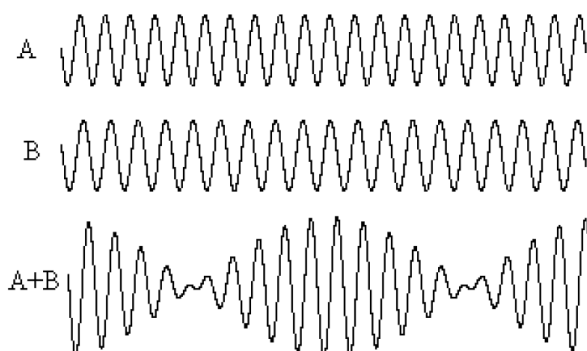
$$U = A\cos(\kappa_1 x - \omega_1 t) + A\cos(\kappa_2 x - \omega_2 t) \quad (1.9)$$

เมื่อ $c_1 = \frac{\omega_1}{\kappa_1}$ และ $c_2 = \frac{\omega_2}{\kappa_2}$ โดยที่ κ คือ เลขคลื่น ดังนั้นเมื่อใช้คุณสมบัติ

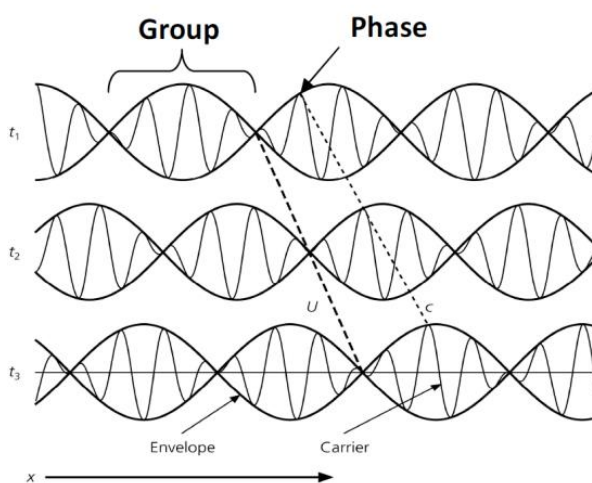
ทางตรีโกณมิติสามารถจัดรูปแบบของสมการใหม่ได้เป็น

$$U = 2A\cos\left[\left(\frac{\Delta\kappa}{2}\right)x - \left(\frac{\Delta\omega}{2}\right)t\right]\cos(\kappa_0 x - \omega_0 t) \quad (1.10)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } \Delta\omega &= \omega_1 - \omega_2 \quad \text{และ} \quad \Delta\kappa = \kappa_1 - \kappa_2 \\ \omega_0 &= \frac{(\omega_1 + \omega_2)}{2} \quad \text{และ} \quad \kappa_0 = \frac{(\kappa_1 + \kappa_2)}{2} \end{aligned}$$



รูปที่ 1.9 การรวมกันของคลื่นสองคลื่นที่มีความถี่ต่างกันเล็กน้อย (Stein,2002)



รูปที่ 1.10 ส่วนของเฟสและกลุ่มของคลื่น เมื่อ U คือ ความเร็วกลุ่ม c คือ ความเร็วเฟส (Stein, 2002)

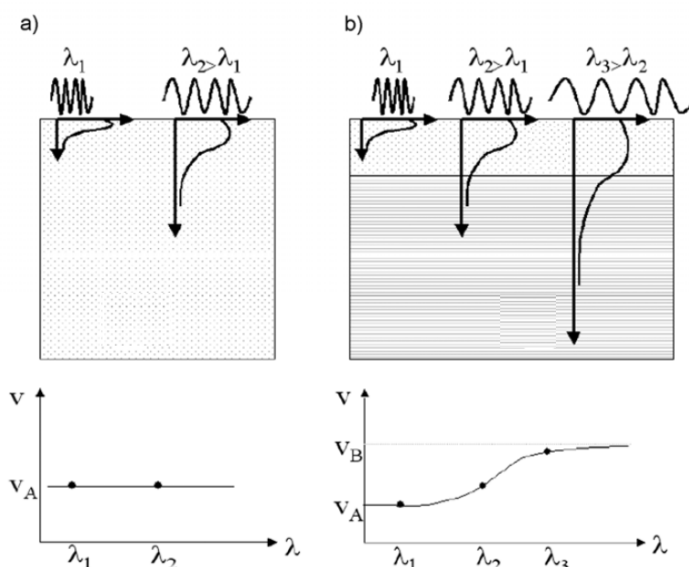
หากความเร็วเฟสและความถี่ของคลื่นทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน จะทำให้ $\Delta\omega$ และ $\Delta\kappa$ มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ ω_0 และ κ_0 ดังนั้นจะได้ว่าคลื่นรวมที่มีลักษณะความถี่สูงอยู่ภายในกลุ่มคลื่น จะมีความเร็วเฟสเท่ากับ $c_0 = \omega_0 / \kappa_0$ และความเร็วของกลุ่มคลื่น จะมีความเร็วกลุ่มเท่ากับ $U = \Delta\omega / \Delta\kappa$ (ดังรูปที่ 1.10) เมื่อความถี่แตกต่างกันน้อยมากจะได้ว่า $U = d\omega / d\kappa$ และความเร็วเฟสของแต่ละความถี่ (Individual Fourier Component) คือ $c(\omega) = \omega / \kappa(\omega)$ การที่ความเร็วเฟสเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ ทำให้มีลักษณะของการกระจายความเร็วเฟสเกิดขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฟสและความเร็วกลุ่ม ดังสมการที่ 2.1

$$U \approx c + \omega \frac{dc}{d\omega} \quad (1.11)$$

ถ้าความเร็วเฟสไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ นั่นคือ ไม่มีการกระจายความเร็วเฟส (dispersion) ทำให้ความเร็วเฟสมีค่าเท่ากับความเร็วกลุ่ม ($U = c$) แต่ถ้าความเร็วเฟสมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ จะเกิดการกระจายความเร็วเฟส ซึ่งความเร็วเฟสของคลื่นจะลดลงตามความถี่ (Sheriff and Geldart, 1995)

สมบัติการกระจายความเร็วเฟสของคลื่นผิวดิน

ลักษณะเด่นของคลื่นผิวดิน คือ การกระจายความเร็ว (Velocity dispersion) โดยความเร็วของคลื่นผิวดินจะเพิ่มขึ้นถ้าคาบเวลาของคลื่นเพิ่มขึ้น ซึ่งคุณสมบัตินี้จะเกิดขึ้นเมื่อตัวกลางมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogenous Medium) แต่ถ้าตัวกลางมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous Medium) การกระจายความเร็วเฟสของคลื่นผิวดินก็จะไม่เกิดขึ้น (รูปที่ 1.11a) จากรูปที่ 1.11b แสดงลักษณะของการกระจายความเร็วเฟสของคลื่นพื้นผิวที่จากแบบจำลองชั้นดินที่มีความเร็วคลื่นเฉือนเป็น β_1 และ β_2 โดยที่ $\beta_2 > \beta_1$ เมื่อคลื่นผิวดินที่มีความยาวคลื่นต่างกัน λ_1 , λ_2 และ λ_3 เคลื่อนที่ผ่าน โดยที่ $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$ คลื่นที่มีความยาวคลื่นมากกว่าจะโดนลดทอนพลังงานมากกว่าคลื่นที่มีความยาวคลื่นต่ำเมื่อลงสู่ชั้นดิน ทำให้เดินทางลงไปในชั้นดินได้ลึกกว่า ทำให้มีความเร็วคลื่นมากกว่า



รูปที่ 1.11 การกระจายความเร็วเฟสของคลื่นผิวดินในตัวกลาง (a) ตัวกลางมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (b) ตัวกลางมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Daniele Boiero, 2009)

1.2.5.2 การสำรวจด้วยคลื่นไหวสะเทือน

การสำรวจด้วยวิธีคลื่นไหวสะเทือนจะอาศัยหลักการเดียวกับการเกิดแผ่นดินไหว แต่แหล่งกำเนิดคลื่นสามารถควบคุมและเคลื่อนที่ได้ ระยะห่างระหว่างจุดกำเนิด (Source) และตัวรับคลื่น (Receiver) ก็ไม่ไกลมาก ในการกำเนิดคลื่นอาจจะใช้ก้อนทุบลงบนแผ่นเหล็กที่วางไว้ที่ผิวดิน หรือการจุดระเบิดของวัตถุระเบิดลงไปยังใต้ดิน ซึ่งคลื่นที่กำเนิดขึ้นมาจะมีทั้งคลื่นที่เป็นส่วนของคลื่นในตัวกลาง และคลื่นผิวดินแต่กระจายออกไปโดยแต่ละคลื่นจะมีลักษณะเฉพาะและเส้นทางเดินที่แตกต่างกัน (รูปที่ 1.12) ซึ่งประกอบไปด้วยคลื่นตรง (direct wave) คลื่นในอากาศ (air wave) คลื่นผิวดิน (surface wave) คลื่นหักเห (refracted wave) และคลื่นสะท้อน (reflected wave) เมื่อวางตัวรับคลื่นหรือจีโอโฟน (geophone) ไว้เป็นแนวราบบนผิวดินจะสามารถบันทึกเวลา และแอมพลิจูดของคลื่นแต่ละตัวในรูปสัญญาณดิจิทัล โดยใช้ไซสโมมิเตอร์ (seismometer) ดังรูปที่ 1.13 ซึ่งสามารถจำแนกคลื่นแต่ละชนิดออกจากกันได้ด้วยลักษณะเฉพาะตัว ดังนี้

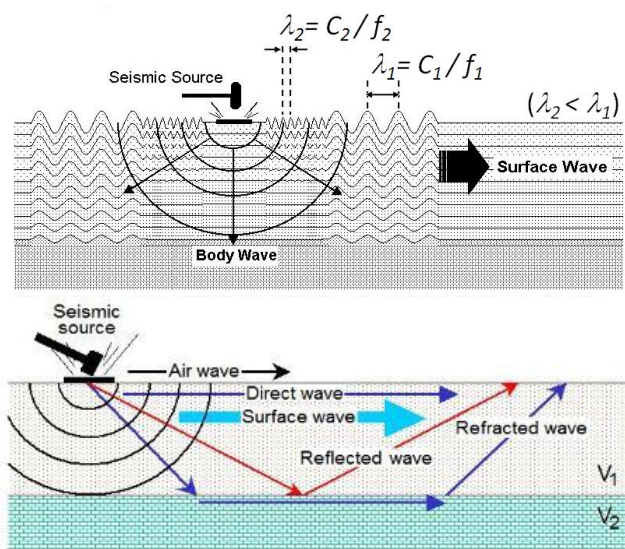
A คือ คลื่นในอากาศ สัญญาณมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความเร็วต่ำ (ประมาณ 330 เมตรต่อวินาที)

B คือ คลื่นตรง เป็นคลื่นในตัวกลางที่วิ่งตรงจากตัวปล่อยคลื่นโดยผ่านตัวกลางชั้นแรกไปยังตัวรับสัญญาณเป็นเส้นตรง ดังนั้นความเร็วของคลื่นชนิดนี้จึงขึ้นอยู่กับความเร็วของตัวกลางชั้นแรก และมักจะเห็นเป็นคลื่นแรกเมื่อตัวรับคลื่นอยู่ใกล้กับตัวกำเนิดคลื่น

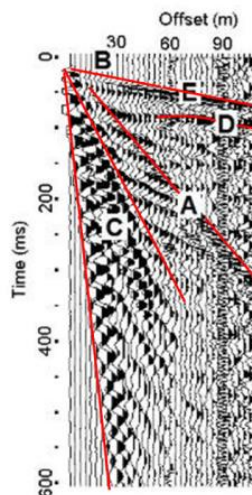
C คือ คลื่นผิวดิน ลักษณะสัญญาณมีการกระจายความเร็ว และมีแอมพลิจูดสูงกว่าคลื่นอื่นอย่างชัดเจน

D คือ คลื่นสะท้อน ลักษณะสัญญาณเป็นเส้นโค้งพาราโบลาในระยะแรก จากนั้นจะเป็นเส้นตรงราบไปกับเส้นของคลื่นตรง หมายความว่าที่ระยะไกลจากตัวกำเนิดคลื่นจะใช้เวลาจากตัวกำเนิดคลื่นถึงตัวรับสัญญาณใกล้เคียงกับคลื่นตรง

E คือ คลื่นหักเห ที่ระยะใกล้ตัวปล่อยสัญญาณหลายๆจะยังไม่ปรากฏคลื่นชนิดนี้ ลักษณะสัญญาณเป็นเส้นตรง โดยเมื่อเมื่อพ้นระยะที่เรียกว่า ระยะบรรจบ (x_{cross} , crossover distance) คลื่นชนิดนี้จะมาถึงตัวรับสัญญาณเป็นคลื่นแรก



รูปที่ 1.12 เส้นทางเดินของคลื่นแต่ละชนิด (ที่มา:www.MASW.com)



รูปที่ 1.13 เส้นสัญญาณที่บันทึกได้ของแต่ละคลื่น (ที่มา:www.MASW.com)

การลดทอนลงของคลื่นยืดหยุ่น (attenuation of elastic wave)

พลังงานของคลื่นที่ส่งผ่านลงไปในพื้นที่ดินหินจะมีขนาดลดลงซึ่งขบวนการสูญเสียพลังงานบางทีเรียกว่า การทำให้ลดลงของแอมพลิจูดของคลื่น เพราะพลังงานของคลื่นมีความสัมพันธ์กับแอมพลิจูดของคลื่น กระบวนการที่ทำให้สูญเสียพลังงาน (Kearey and Brooks, 1991) มีดังนี้

1. การแผ่เชิงเรขาคณิต (geometrical spreading) คลื่นยืดหยุ่นที่ส่งออกจากแหล่งกำเนิดคลื่น ซึ่งมีพลังงานเท่ากับ E จะกระจายตัวออกไปในทุกทิศทางเป็นรูปทรงกลม ถ้ากำหนดให้รัศมีของทรงกลมมีค่าเท่ากับ r ปริมาณของพลังงาน ในพื้นที่เล็กๆของทรงกลมมีค่าเท่ากับ $E/4\pi r^2$ ตามทางที่คลื่นเดินทางไป นั่นคือพลังงานของคลื่นจะลดลงตามเป็นสัดส่วนกับ r^{-2}

2. การสะท้อนและหักเหของคลื่นในรอยต่อระหว่างตัวกลางที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นต่างกัน ยังผลให้พลังงานส่วนหนึ่งสะท้อนกลับและส่วนหนึ่งหักเหไป

3. การดูดกลืน (absorption) คือ พลังงานของคลื่นยังสูญเสียไปเนื่องจากพื้นดินมีสมบัติที่ไม่ยืดหยุ่นสมบูรณ์ พลังงานจึงถูกดูดซับเนื่องจากแรงเสียดทานภายในของวัตถุ สมการที่อธิบายการดูดกลืนของคลื่นมีดังนี้ คือ

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (1.12)$$

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มของพลังงานเริ่มต้น

I คือ ความเข้มของพลังงานที่จุดสนใจ x

x คือ ระยะทางจากจุดเริ่มต้น

α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของพลังงานมีหน่วยเป็นเดซิเบลต่อความยาวคลื่น (dB/ λ)

นอกจากนี้ยังพบว่า การดูดกลืนคลื่นขึ้นกับค่าความเร็วคลื่นและค่าความถี่ของคลื่น ซึ่งสองค่าเป็นตัวแปรกับความยาวคลื่น และระยะทางจากจุดเริ่มต้นสู่จุดสุดท้ายที่สนใจ นั่นคือถ้าความถี่สูงจะสูญเสียพลังงานมากกว่าความถี่ต่ำ

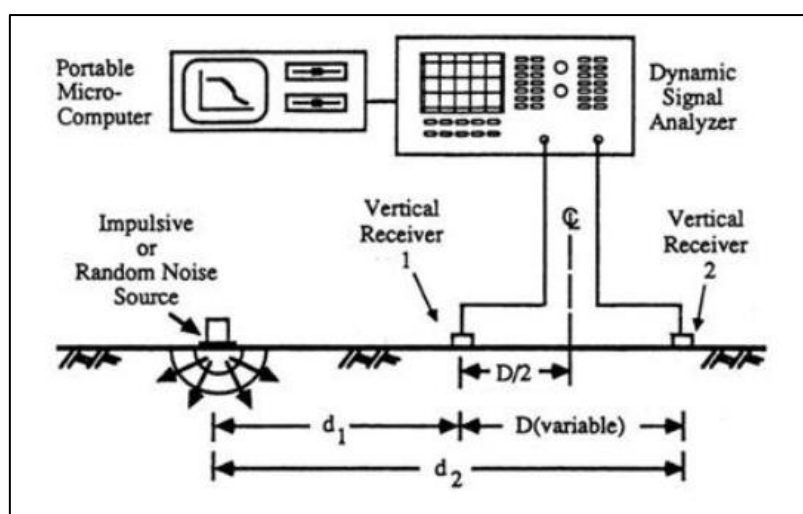
Surface-wave Method

เป็นวิธีหนึ่งในการสำรวจด้วยคลื่นไหวสะเทือน โดยใช้ข้อมูลคลื่นไหวสะเทือนใน ส่วนที่เป็นคลื่นพื้นผิว (surface wave) มาใช้ในการวิเคราะห์แล้วทำการสร้างแบบจำลองความเร็ว

คลื่นเฉือน ซึ่งความเร็วของคลื่นเฉือนเป็นพารามิเตอร์นั้นสัมพันธ์กับค่าคงที่ของความยืดหยุ่น เช่น ยังมอดูลัส (Young's modulus) มอดูลัสเฉือน (Shear modulus) อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ซึ่งนำมาใช้ในการประเมินค่าความยืดหยุ่นและความแข็ง (Stiffness) ของพื้นดินเพื่อจุดประสงค์ทางด้านธรณีวิศวกรรม (Park, 1999) โดยการสำรวจด้วยวิธีนี้จะอาศัยคุณสมบัติการกระจายความเร็วเฟส (Dispersion) ของคลื่นผิวดิน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการที่คลื่นที่มีความถี่ต่างกันสามารถเดินทางได้ในระดับความลึกที่แตกต่างกัน คลื่นที่มีความถี่ต่ำ (ความยาวคลื่นยาว) เดินทางลงไปได้ลึกกว่า ซึ่งในทั่วไปแล้วในชั้นดินที่ลึกกว่า คลื่นจะมีความเร็วมากกว่า ทำให้คลื่นที่มีความถี่ต่ำจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วมากกว่าคลื่นความถี่สูง ขั้นตอนในการสำรวจจะเหมือนกับการสำรวจด้วยคลื่นไหวสะเทือนวิธีอื่นๆ แต่ในส่วนของขั้นตอนของการประมวลผล จะทำการแปลงสัญญาณจากโดเมนของเวลาเป็นโดเมนของความถี่ เพื่อหากราฟการกระจายความเร็วเฟสของคลื่น แล้วนำมาสร้างแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือน

SASW (Spectral Analysis of Surface Wave)

การสำรวจคลื่นผิวดินวิธีนี้ จะทำการสำรวจโดยการกำเนิดคลื่น แล้วรับสัญญาณด้วยตัวรับสัญญาณ 2 ตัว (รูปที่ 1.14) ตัวรับสัญญาณทั้งสองจะบันทึกสัญญาณแอมพลิจูด และเวลาของคลื่นที่เคลื่อนที่มาถึง เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $y_1(t)$ และ $y_2(t)$ ทำการแปลงสัญญาณด้วยวิธี Fast Fourier Transform จะได้สัญญาณที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ $y_1(\omega)$ และ $y_2(\omega)$ ซึ่งมีความต่างเฟสของสัญญาณทั้งสองเป็น $\Delta\phi$



รูปที่ 1.14 การสำรวจคลื่นพื้นผิวโดยใช้ตัวรับสัญญาณ 2 ตัว (Rix et al., 1991)

จากความต่างเฟส 2π มีระยะต่างกัน λ
 และเมื่อมีความต่างเฟส $\Delta\phi$ ได้ระยะต่างกัน $\Delta x = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\phi$
 ทำให้ $\lambda = \frac{\Delta x}{\Delta\phi} 2\pi$

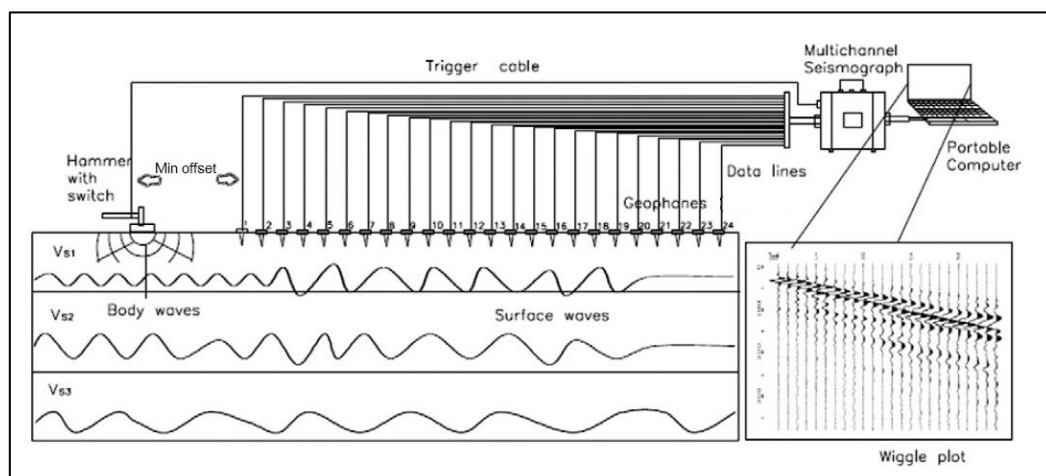
จากความเร็วของคลื่น คือ $c = \lambda f$ จะได้ $c = \frac{\Delta x}{\Delta\phi} 2\pi f$ ดังนั้น

$$c(\omega) = \omega \frac{\Delta x}{\Delta\phi} \quad (1.13)$$

เมื่อ Δx คือ ระยะห่างระหว่างตัวรับสัญญาณ จากฟังก์ชันความเร็วที่ได้สามารถสร้างกราฟการกระจายความเร็วเฟสของคลื่นได้ เพื่อนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองความเร็วของคลื่นเฉือน

MASW (Multichannel Analysis of Surface Wave)

หลักการในการสำรวจจะเหมือนกับการสำรวจโดยใช้ตัวรับสัญญาณ 2 ตัว แต่จะต่างกันตรงที่มีตัวรับสัญญาณหลายตัว ทำให้มีระยะห่างระหว่างตัวรับสัญญาณ (Δx) หลายค่า การสำรวจจะทำการปล่อยคลื่นออกไปจากจุดกำเนิดคลื่น โดยมีตัวรับสัญญาณวางไว้เป็นแนวยาว คอยรับสัญญาณและส่งข้อมูลไปบันทึกที่ตัวบันทึกข้อมูลไว้ในรูปของ แอมพลิจูดและเวลาที่คลื่นเดินทางมาถึง ดังรูปที่ 1.15



รูปที่ 1.15 การสำรวจคลื่นพื้นผิวโดยใช้ตัวรับหลายตัว (Maheswari et al., 2010)

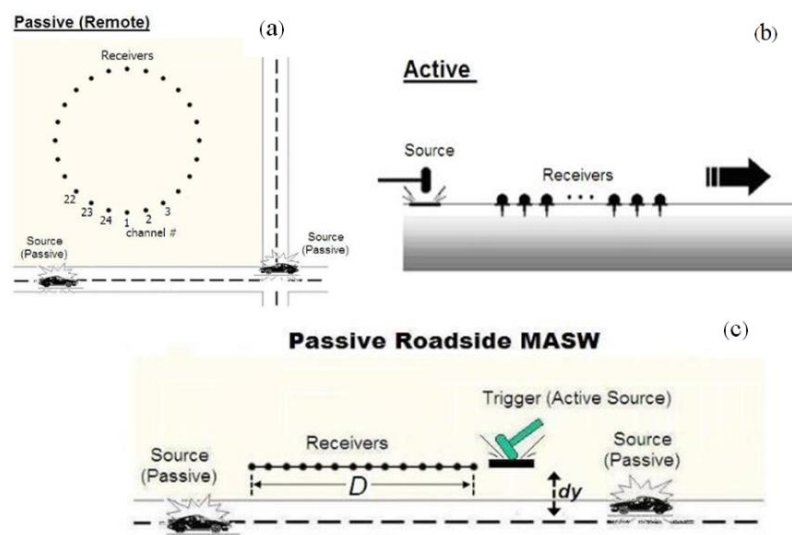
การสำรวจด้วยวิธี MASW แบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะแหล่งกำเนิดคลื่น

1) Active method เป็นวิธีการสำรวจต่างๆ ไป ที่อาศัยแหล่งกำเนิดคลื่นแบบ Active seismic source เช่น ค้อนขนาดใหญ่ (sledge hammer) ตูมน้ำหนัก (weight drop) ฯลฯ และวางแนวสำรวจด้วยตัวรับสัญญาณที่มีการเก็บข้อมูลแบบ roll-along โดยจะได้รับข้อมูลความเร็วคลื่นเฉือนอยู่ในช่วง 1-30 เมตร (รูปที่ 1.16b)

2) Passive method (Microtremor) เป็นการสำรวจที่มีแหล่งกำเนิดคลื่นจากสิ่งแวดล้อม หรือกิจกรรมต่างๆ ที่ไม่เกี่ยวกับแนวการสำรวจ เช่น การจราจร เสียงฟ้าร้อง การเคลื่อนที่ของน้ำขึ้น-น้ำลง การเปลี่ยนแปลงความดันบรรยากาศ ฯลฯ สามารถให้ข้อมูลความเร็วคลื่นเฉือนอยู่ในช่วง 20-100 เมตร ซึ่งวิธีการนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

Passive remote method วิธีการนี้จะวางแนวตัวรับสัญญาณเป็นแบบ 2 มิติ เช่น กากบาท หรือวงกลม เพื่อบันทึกคลื่นผิวดินชนิด passive ผลที่ได้จากวิธีการนี้จะให้ค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่แม่นยำที่สุด แต่จำเป็นต้องใช้พื้นที่เป็นบริเวณกว้าง จึงไม่ใช่ทุกพื้นที่ที่สามารถจะกระทำได้ (รูปที่ 1.16a)

Passive roadside MASW method เป็นการสำรวจที่วางแนวสำรวจเป็นเส้นตรง โดยอาศัยแหล่งกำเนิดคลื่นจากการจราจรในพื้นที่นั้นๆ เป็นวิธีการที่แก้ไขข้อจำกัดของ passive remote method ที่สามารถกระทำได้ถึงแม้จะเป็นพื้นที่ไม่กว้าง และไม่สะดวก แต่วิธีการนี้มักจะให้ความแม่นยำของค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่น้อยกว่า ประมาณ 10% (รูปที่ 1.16c)



รูปที่ 1.16 ประเภทของการสำรวจด้วยวิธี MASW (a) passive remote method (b) active method (c) passive roadside (ที่มา:www.MASW.com)

ขั้นตอนในการสำรวจด้วยวิธี MASW แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักๆคือ

1. การเก็บข้อมูล (data acquisition) ในที่นี้จะกล่าวถึงการเก็บข้อมูลในการสำรวจแบบ Active method ซึ่งใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ในการทำการสำรวจจะวางแนวสำรวจและบันทึกสัญญาณ ดังรูปที่ 1.15

2. การประมวลผลข้อมูล (data processing) มีอยู่สองขั้นตอนหลักๆ คือ

- นำข้อมูลสัญญาณคลื่นที่ได้จากการสำรวจในรูปแบบของโดเมนเวลามาแปลงเป็นโดเมนความถี่ และกำหนด (pick) ตำแหน่งความเร็วเฟส ที่จะเป็นตัวแทนของความเร็วเฟสของแต่ละความถี่ เพื่อหากราฟการกระจายความเร็ว (dispersion curve)

- ทำการแปลงกราฟการกระจายความเร็ว (inversion) เกิดเป็นความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดิน (V_s) ใน 1 มิติซึ่งสอดคล้องกับชั้นดินที่บริเวณกึ่งกลางของแนวตัวรับคลื่น

กราฟกระจายความเร็ว (dispersion curves)

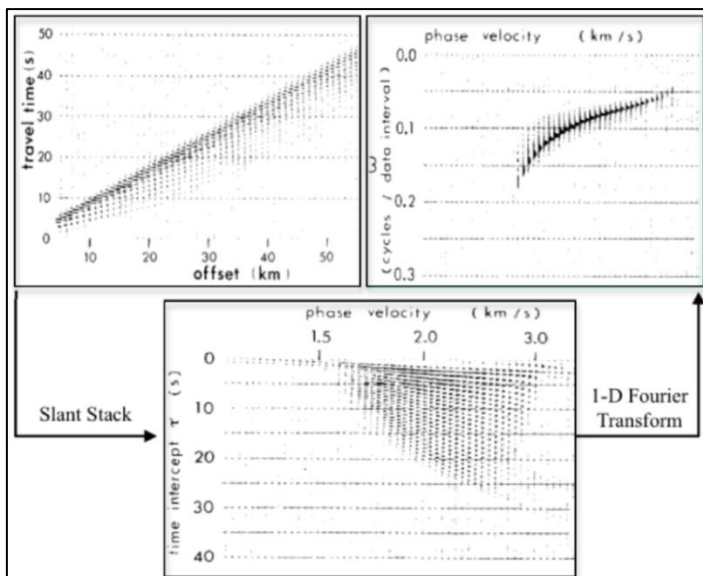
กราฟกระจายความเร็วจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร็วเฟส McMechan and Yedlin. (1981) ได้แสดงวิธีการสร้างกราฟกระจายความเร็ว คือ slowness-frequency ($p - \omega$) method โดยเริ่มจากการนำข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของระยะทางและเวลา ($x-t$) มาแปลงให้อยู่ในรูปของเวลา (τ) และส่วนกลับของความเร็ว (slowness, p) ด้วยวิธี slant stacking ดังสมการ

$$f(\tau, p) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, t + xp) dx \quad (1.14)$$

เมื่อ $\tau = t$ และ $p = \frac{1}{c}$ หลังจากนั้นใช้ 1-D Fourier transform แปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปของส่วนกลับของความเร็วและความถี่ ($p - \omega$) ดังสมการ

$$F(\omega, p) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau, p) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (1.15)$$

ตัวอย่างในการแปลงข้อมูลที่เก็บได้จากการเก็บข้อมูลในรูปแบบของระยะทางและเวลา ($x-t$) มาเป็น ในรูปแบบของส่วนกลับของความเร็วและความถี่ เพื่อสร้างกราฟกระจายความเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 1.17



รูปที่ 1.17 การสร้างกราฟกระจายความเร็วด้วยวิธี slowness-frequency ($p-\omega$) (คัดแปลงจาก McMechan and Yedlin, 1981)

Park et al. (1998) ได้พัฒนาวิธีในการสร้างกราฟกระจายความเร็ว (รูปที่ 1.18) โดยแปลงข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของระยะทางและเวลา ($x-t$) มาแปลงให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันของความถี่, $F(x, \omega)$ โดยใช้ Fourier transform ดังสมการ

$$U(x, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, t) e^{-i\omega t} dt \tag{1.16}$$

ฟังก์ชันของความถี่, $F(x, \omega)$ สามารถแยกออกได้เป็นสองส่วน คือ ส่วนเฟสสเปกตรัม $[P(x, \omega)]$ และส่วนของแอมพลิจูดสเปกตรัม $[A(x, \omega)]$ นั่นคือ

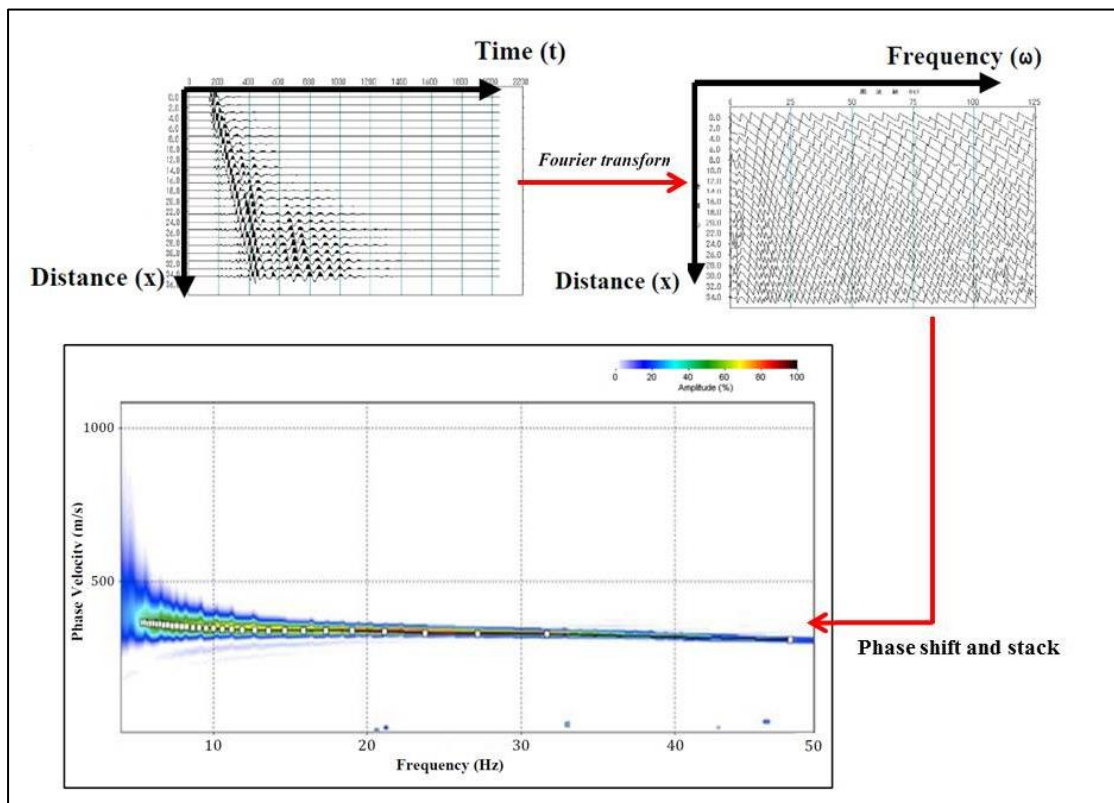
$$U(x, \omega) = A(x, \omega)P(x, \omega) = A(x, \omega)e^{-i\Phi x} \tag{1.17}$$

เมื่อ $\Phi = \frac{\omega}{c_\omega}$ โดยที่ c_ω คือ ความเร็วเฟส และ ω คือ ความถี่ในหน่วยเรเดียน ซึ่ง

จากสมการที่ 1.13 จะเห็นได้ว่าความเร็วเฟสของแต่ละความถี่สามารถหาจากความต่างของเฟสที่บันทึกได้แต่ละตัวรับสัญญาณ โดยความต่างเฟสในแต่ละสัญญาณที่บันทึกได้ของแต่ละความถี่ควรมีค่าเท่ากัน ดังนั้นเมื่อทำการอินทิเกรตเพื่อแปลง $U(x, \omega)$ ได้ดังสมการที่ 1.18

$$\begin{aligned}
 V(\omega, \phi) &= \int_{-\infty}^{+\infty} [U(x, \omega) / |U(x, \omega)|] e^{i\phi x} dx \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} [A(x, \omega) / |A(x, \omega)|] e^{-i(\Phi - \phi)x} dx
 \end{aligned}
 \tag{1.18}$$

จากสมการที่ 1.18 จะเป็นการแปลงข้อมูลโดยการรวมข้อมูลในแต่ละตัวรับสัญญาณซึ่งมีความต่างเฟส (ϕ) เท่ากันในแต่ละความถี่ ดังนั้นในแต่ละความถี่ (ω) ฟังก์ชัน $V(\omega, \phi)$ มีค่าสูงสุดเมื่อ $\Phi = \phi = \frac{\omega}{c_\omega}$ นั่นคือ ความเร็วเฟสของแต่ละความถี่ (c_ω) สามารถประมาณค่าได้เมื่อ $V(\omega, \phi)$ มีค่าแอมพลิจูดสูงสุด โดยในการสร้างกราฟกระจายความเร็วได้จากการแปลงข้อมูล $V(\omega, \phi)$ ไปอยู่ในรูปของ $I(\omega, c_\omega)$ จนกระทั่ง $c_\omega = \frac{\omega}{\phi}$ ซึ่ง $I(\omega, c_\omega)$ จะมีแอมพลิจูดสูงสุดตามแกนของ c_ω ในแต่ละความถี่ ซึ่งสามารถสร้างเป็นกราฟกระจายความเร็ว



รูปที่ 1.18 การสร้างกราฟกระจายความเร็วด้วยวิธีของ Park et al. (1998)

การผกผัน (Inversion)

เริ่มจากสมมติแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือน (Initial model) ขึ้นมาก่อน แล้วแปลงกลับไปเป็นกราฟการกระจายความเร็ว เปรียบเทียบกราฟที่ได้จากการคำนวณและกราฟที่ได้จากการสำรวจเมื่อค่าที่ได้มีความต่างกันและเกิดความไม่สอดคล้องกัน จะทำการแก้ไขและสร้างแบบจำลองความเร็วขึ้นมาใหม่ ที่สอดคล้องกับข้อมูลมากขึ้น โดยใช้กระบวนการ Weighted Least-square ด้วยวิธี Levenberg-Marquardt (L-M method) และวิธี singular-value decomposition (SVD) (Xia et al. , 1999) ทำซ้ำจนค่า RMSE อยู่ในช่วงที่ต้องการ ซึ่งหมายถึงกราฟการกระจายความเร็วที่ได้จากการสำรวจ และ กราฟจากการคำนวณด้วยความเร็วคลื่นเฉือน มีความใกล้เคียงกันมากพอ กระบวนการผกผันก็จะเสร็จสิ้นและแสดงผลในรูปของแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนสุดท้าย (รูปที่ 1.19)

กำหนดแบบจำลองชั้นดิน (m) ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์ คือ ความเร็วคลื่นเฉือน (V_s) ความเร็วคลื่นพี (V_p) ความหนาแน่น (ρ) ความหนาของชั้นดิน (h) โดยพารามิเตอร์ทั้งหมดเกี่ยวข้องกับการกระจายความเร็วเฟสของคลื่นพื้นผิว และสร้างเป็นสมการได้ดังแสดง

$$F(f_j, c_{Rj}, V_s, V_p, \rho, h) = 0 \quad (j = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (1.19)$$

โดยที่ f_j คือ ความถี่ในหน่วย Hz c_{Rj} คือ ความเร็วเฟสของคลื่นเรย์ลีในแต่ละความถี่ f_j ซึ่งพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการกระจายความเร็วเฟสของชั้นดินมากที่สุดคือ ค่าความเร็วคลื่นเฉือน (V_s) (Xia et al. , 1999) ดังนั้นสามารถสร้างเวกเตอร์ของความเร็วคลื่นเฉือนได้เป็นสมการดังแสดง

$$x = (v_{s1}, v_{s2}, \dots, v_{sm})^T \quad (1.20)$$

จากนั้นทำการคำนวณและสร้างฟังก์ชันของกราฟกระจายความเร็ว (Forward Modeling) จากแบบจำลองคลื่นเฉือนที่สร้างขึ้นมาได้เป็น $C_R(x_0)$ และสร้างเวกเตอร์ของกราฟกระจายความเร็วที่วัดได้จากการเก็บข้อมูล แทนด้วย

$$Y = [Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_m]^T \quad (1.21)$$

จากนั้นสร้าง Jacobian Matrix ของแบบจำลองขนาด $m \times n$ ($m > n$) ได้คือ

$$A = \left[-\frac{\partial F / \partial V_{si}}{\partial F / \partial c_R} \Big|_{f=f_j} \right] (j = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (1.22)$$

คำนวณผลต่างระหว่างกราฟกระจายความเร็วที่ได้จากการสำรวจ และกราฟกระจายความเร็วที่คำนวณได้จากแบบจำลองความเร็วคลื่นเงื่อนไขได้เป็น ΔY

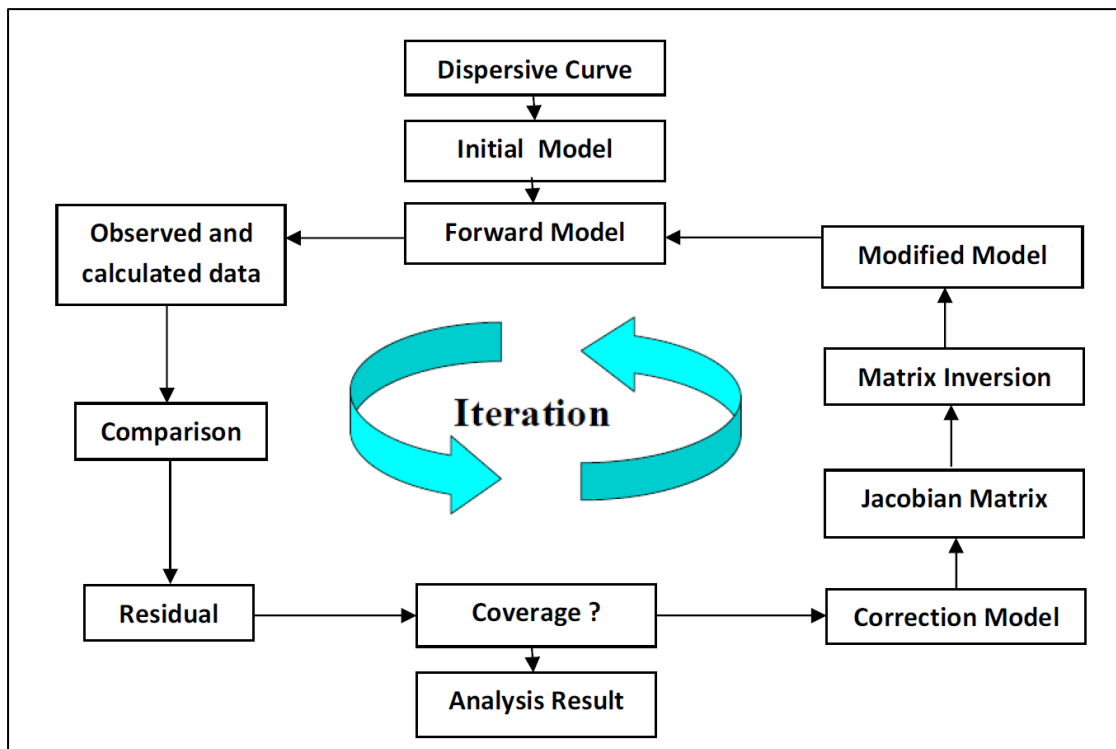
$$\Delta Y = A \Delta m \quad (1.23)$$

จะเห็นได้ว่า $\Delta Y = A \Delta m$ ดังนั้น ใช้ Jacobian Matrix(A) ช่วยในการแก้สมการหาค่า Δm เมื่อได้ค่า Δm แล้วนำไปปรับแก้ค่าแบบจำลอง m

$$m_{i+1} = m_i + \Delta m_i \quad (1.24)$$

เมื่อ i คือ จำนวนรอบของการคำนวณทำซ้ำจนค่า Root Mean Square Error มีค่าน้อยจนอยู่ในช่วงที่ต้องการ นั่นคือ กราฟกระจายความเร็วจากการสำรวจมีค่าใกล้เคียงกับที่ได้จากการคำนวณ กระบวนการผกผันก็จะเสร็จสิ้นและแสดงผลในรูปของแบบจำลองความเร็วคลื่นเงื่อนไขสุดท้าย โดยที่

$$RMSE = \sqrt{\frac{\Delta Y^T \Delta Y}{n}} \quad (1.25)$$



รูปที่ 1.19 ขั้นตอนกระบวนการผกผันเพื่อสร้างแบบจำลองคลื่นเหนือ (ดัดแปลงจาก SAGEEP, 2003)

1.2.5.3 การขยายสัญญาณของคลื่นแผ่นดินไหว

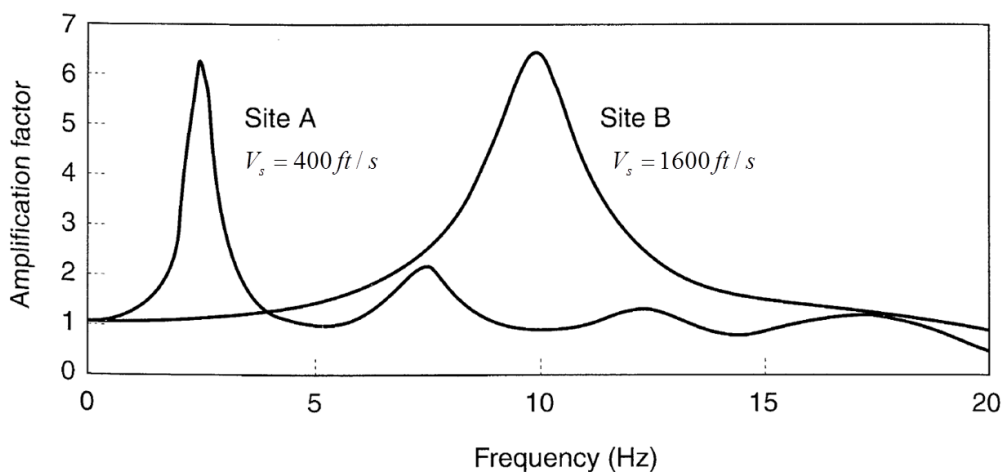
ปัจจุบันพบว่า มีหลายปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อระดับความรุนแรงและความเสียหายเนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหว เช่น ขนาดของแผ่นดินไหว ตำแหน่งศูนย์กลางแผ่นดินไหว (Epicenter Distance) และคุณสมบัติที่ตั้งของชั้นดิน (Local Site Effect) (Kramer, 1996) โดยจะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของชั้นดินซึ่งจำเป็นต่อการประเมินการศึกษาผลกระทบของแผ่นดินไหวต่อโครงสร้าง คุณสมบัติทางพลศาสตร์ของชั้นดิน ได้แก่ ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) หรือคาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period) และความเร็วคลื่นเหนือ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเกิดแผ่นดินไหวขึ้นชั้นดินอาจสามารถเพิ่มระดับความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหว (Site Amplification) โดยเฉพาะในกรณีที่เป็นชั้นดินอ่อน สำหรับการเพิ่มระดับความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวนั้นเกิดจากการกำทอน (Resonance) ของคลื่นแผ่นดินไหวกับค่าความถี่ธรรมชาติ (f_0) ของโครงสร้างชั้นดินหาได้จาก (Kramer, 1996)

$$f_0 = \frac{V_s}{4H} = \frac{1}{T} \quad (1.26)$$

เมื่อ H คือ ความหนาของชั้นดินที่วางตัวอยู่บนหินฐาน

V_s คือ ค่าเฉลี่ยความเร็วของคลื่นเฉือนของชั้นดินที่วางตัวบนหินฐาน

ตัวอย่างการหาค่าความถี่ธรรมชาติของชั้นดินโดยสมมุติชั้นดินในสองบริเวณ คือ บริเวณ A และ B ซึ่งมีความหนาชั้นดินเท่ากัน แต่ค่าความเร็วเฉือนบริเวณ B มากกว่าเป็น 4 เท่าของ บริเวณ A (รูปที่ 1.20) จะได้ว่าค่าความถี่ธรรมชาติของบริเวณ B จะมากกว่า 4 เท่าเช่นกัน นั่นแสดงว่าบริเวณที่มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนต่ำจะกำทอนและเพิ่มระดับความรุนแรงกับคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความถี่ต่ำ (คาบยาว)



รูปที่ 1.20 การสั่นพ้องของชั้นดินสองบริเวณที่มีความเร็วคลื่นเฉือนต่างกัน (Kramer, 1996)

นอกจากนี้พลศาสตร์ของอาคารก็มีอิทธิพลต่อระดับความรุนแรงต่อการสั่นสะเทือนของตัวอาคารเมื่อเกิดแผ่นดินไหว เนื่องจากถ้าคาบธรรมชาติของตัวอาคารมีค่าเท่ากับคาบธรรมชาติของชั้นดินจะเกิดการกำทอนและเพิ่มระดับการสั่นไหวและเสียหายของตัวอาคาร โดยคาบธรรมชาติ (T) ของตัวอาคารสามารถหาได้จากสมการ (Di Julio, 2001)

$$T_1 = 0.1N \quad (1.27)$$

โดยที่ N คือ จำนวนชั้นของตัวอาคารซึ่งจะต้องมีความสูงในแต่ละชั้นไม่เกิน 3 เมตรและสร้างด้วยวัสดุที่เป็นคอนกรีตและเหล็ก ดังนั้นเมื่อเกิดแผ่นดินไหวถ้าคลื่นแผ่นดินไหวที่เดินทางมาเกิดการกำทอนทั้งกับชั้นดินและตัวโครงสร้างของอาคารจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการกำทอน 2 ชั้น (Double Resonance) (Wanitchai et. al, 2000) ทำให้เพิ่มระดับความรุนแรงและความเสียหายจากคลื่นแผ่นดินไหว

1.2.5.4 การจัดกลุ่มลักษณะทางธรณีวิทยา

การจัดกลุ่มลักษณะทางธรณีวิทยาของชั้นดินนั้นมีความสำคัญในการศึกษาการขยายความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวในแต่ละบริเวณ Borchardt et al. (1991) ได้เสนอวิธีในการจัดกลุ่มธรณีวิทยา โดยอาศัยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการขยายความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวกับค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร ซึ่งต่อมาวิธีนี้ได้ถูกนำมาพัฒนาโดยองค์กร BSSC (Building Seismic Safety Council) สร้างเป็นข้อกำหนดในการจัดกลุ่มธรณีวิทยาของ NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program) โดยการแบ่งกลุ่มของชั้นดินออกเป็น 5 กลุ่ม (ตารางที่ 3) คือ A, B, C, D, E และ F ตามค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร ค่ากำลังเฉือนแบบไม่คายน้ำ (S_u) และจำนวนครั้งในการตอกกระบอกฝ่าให้จมลงไปในดิน 1 ฟุต (ค่า N)

สำหรับวัตถุประสงค์ของข้อกำหนดของ NEHRP เพื่อจัดกลุ่มลักษณะทางธรณีวิทยาที่มีผลต่อการปลูกสร้างอาคารให้ปลอดภัยจากการสั่นสะเทือนจากการเกิดแผ่นดินไหว เพื่อลดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินโดยองค์กร BSSC ซึ่งเป็นองค์กรที่ถูกก่อตั้งขึ้นในปี ค.ศ. 1979 ซึ่งได้สร้างข้อกำหนดในการจัดกลุ่มธรณีวิทยามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1985 และมีการปรับปรุงเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกเอาเป็นค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นเฉือน ในระดับความลึก 30 เมตร ของชั้นดิน มาใช้ในการจัดกลุ่มลักษณะทางธรณีวิทยา

การพิจารณาค่า V_{s30} ในแต่ละกลุ่มนั้นมีความสำคัญมากในการพิจารณาโครงสร้างทางธรณีวิทยาใต้ผิวดิน โดยเฉพาะในบริเวณพื้นที่ที่เป็นเมืองใหญ่ที่ตั้งอยู่ในบริเวณใกล้เคียงจุดศูนย์กลางของแผ่นดินไหว เนื่องจากพารามิเตอร์นี้จะช่วยในการประเมินความเสี่ยงที่จะได้รับผลกระทบเมื่อมีการเกิดแผ่นดินไหว ในการคำนวณค่า V_{s30} คำนวณได้จาก (BSSC, 2000)

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad (1.28)$$

โดยที่ d_i คือ ความหนาของแต่ละชั้น

V_{si} คือ ความเร็วคลื่นเฉือน (V_s) ของแต่ละชั้น

n คือ จำนวนชั้นดินจนถึงระดับความลึก 30 เมตร

ตารางที่ 1.3 การจัดกลุ่มลักษณะทางธรณีวิทยาโดยใช้ค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นเฉือน (V_s) ในระดับความลึก 30 เมตร (ดัดแปลงจาก BSSC, 2000)

Site Class	Range of V_s 30 (m/s)	ลักษณะทางธรณีวิทยา
A	$1,500 < V_s 30$	หินแข็ง (Hard rock)
B	$760 < V_s 30 \leq 1,500$	หินทั่วไป (Rock)
C	$360 < V_s 30 \leq 760$	ดินที่อัดกันแน่นมาก (Very dense soil) และหินที่ค่อนข้างอ่อน (Soft rock)
D	$180 < V_s 30 \leq 360$	ดินที่ค่อนข้างแข็ง (Stiff soil)
E	$V_s 30 \leq 180$	ดินทั่วไป (Soil) และดินเหนียว (Soft clay) ที่มีความแข็งเท่ากับดิน

1.2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sawata et al. (1983) ได้ศึกษาแอ่งหาคใหญ่ พบว่าแอ่งหาคใหญ่เป็นลักษณะรอยเลื่อนแบบ Horst and Graben และมีพิกัดอยู่ระหว่าง UTM 720000 - 810000 โดยมีขอบเขตคือทางทิศเหนือของแอ่งจะชนกับอ่าวไทย และทางทิศใต้ชนกับชายแดนประเทศไทยกับประเทศมาเลเซีย และความลึกของแอ่งในบริเวณตัวเมืองหาคใหญ่จะมีค่ามากกว่า 200 เมตร

วรวิทย์ โลหะวิจารณ์ (2548) ได้ศึกษาแอ่งหาคใหญ่ด้วยวิธีวัดค่าสนามโน้มถ่วง พบว่าค่าสนามโน้มถ่วงผิดปกติของแอ่งหาคใหญ่ มีค่าประมาณ $-140 \mu\text{m s}^{-2}$ มีความยาวจำกัดในแนวเหนือใต้ แอ่งมีความลึกมากที่สุด 1 กิโลเมตร มีความยาว 60 กิโลเมตร และความกว้างประมาณ 20 กิโลเมตร ซึ่งไม่ได้มีความต่อเนื่องจากตอนใต้ของอ่าวไทยมาถึงฝั่งประเทศมาเลเซีย

กุลนันท์ สุริโย (2549) ได้ทำการศึกษารูปร่างของน้ำเค็มในแอ่งหาคใหญ่ พบว่าจากการศึกษาการตัดขวางทางอุทกธรณีวิทยาโดยอาศัยข้อมูลของการหยั่งธรณี ข้อมูลการสำรวจความต้านทานของชั้นหินและข้อมูลชั้นดินจากบ่อบาดาล สามารถสรุปได้ว่า แอ่งหาคใหญ่ เป็นชั้นน้ำบาดาลในแหล่งกรวดทรายจำนวน 3 ชั้น คือ ชั้นน้ำหาคใหญ่ ชั้นน้ำคูเต่า และชั้นน้ำคองหงส์ ซึ่งเป็นชั้นน้ำมีแรงดันและกึ่งภายใต้แรงดันอยู่ที่ระดับลึก 20 - 50 เมตร, 600 - 100 เมตร และ มากกว่า 100 เมตร ตามลำดับ

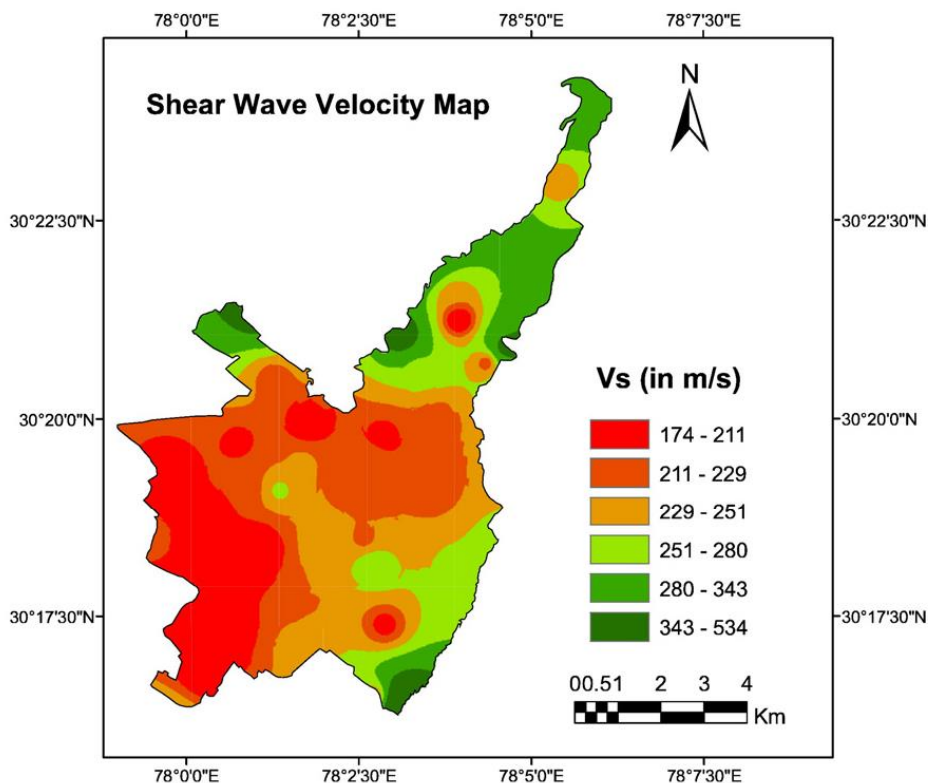
Borcherdi et al. (1991) ได้ศึกษาและแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายสัญญาณของการเคลื่อนที่ของพื้นดินกับค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นเฉือน ที่ระดับความลึกไม่เกิน 30

เมตร ($V_s 30$) แล้วจึงสร้างเป็นแผนที่ทางธรณีวิทยาเพื่อแบ่งระดับของความเร็วเฉือนของแต่ละพื้นที่ โดยแบ่งระดับของความเร็วเฉือนออกเป็น 4 กลุ่มด้วยกัน คือ A, B, C และ D ซึ่งพื้นที่ที่ได้ทำการศึกษาคือเมือง San Francisco ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งจากการศึกษาพบว่าบริเวณพื้นที่ที่อยู่ในกลุ่ม D มีการขยายสัญญาณของคลื่นแผ่นดินไหวมากกว่าบริเวณอื่นๆ

Wills et al. (2000) ได้พัฒนาและสร้างแผนที่ทางธรณีวิทยาสำหรับ California ประเทศสหรัฐอเมริกาโดยใช้ค่าเฉลี่ยของความเร็วเฉือน ที่ระดับความลึกไม่เกิน 30 เมตร ($V_s 30$) เป็นพื้นฐาน โดยค่า ($V_s 30$) ได้มาจากการวัดคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเหทั้งหมด 556 โปรไฟล์ในพื้นที่ที่ศึกษา เพื่อประโยชน์ทางการศึกษาผลกระทบที่ได้รับเมื่อมีการเกิดแผ่นดินไหว และพบว่าบริเวณที่มีค่า ($V_s 30$) มีโอกาสขยายสัญญาณของคลื่นแผ่นดินไหวมากกว่าบริเวณอื่นๆ

Shafiee et al. (2007) ได้ใช้ค่าเฉลี่ยของความเร็วเฉือน ที่ระดับความลึกไม่เกิน 30 เมตร ($V_s 30$) จัดกลุ่มพื้นที่ทางธรณีวิทยา บริเวณเมือง Tehran ซึ่งเป็นเมืองหลวงของประเทศอิหร่าน โดยใช้เกณฑ์ของ NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program) ในการจัดกลุ่ม การหาค่า $V_s 30$ ซึ่งได้มาจากการสำรวจด้วยวิธีคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเหทั้งหมด 188 โปรไฟล์ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าโซนที่เป็นภูเขาค่า $V_s 30$ อยู่ใน class A และ B แต่ในบริเวณที่เป็นที่ราบลุ่มค่า $V_s 30$ อยู่ใน class C และบริเวณที่เป็นตะกอนแม่น้ำ ค่า $V_s 30$ อยู่ใน class D

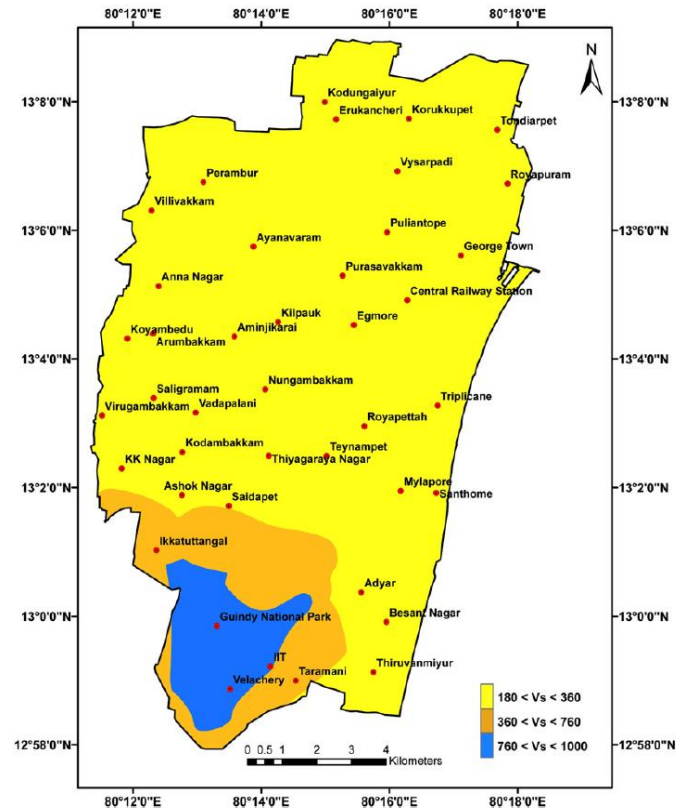
Mahajan (2009) ทำการสำรวจด้วยวิธี MASW (Multichannel Analysis of Surface Wave) และการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบสะท้อนทำการวัดค่าความเร็วเฉือนทั้งหมด 50 จุด บริเวณเทือกเขาย่อยหิมาลัย ซึ่งถูกปกคลุมไปด้วยดินตะกอนแม่น้ำ นำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหาค่า $V_s 30$ พบว่าบริเวณดินตะกอน Dehradun มีค่า $V_s 30$ อยู่ใน class D (180 - 360 เมตร/วินาที) โดยใช้เกณฑ์ของ NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program) ในการแบ่ง class ดินตะกอนทางด้านตะวันตกเฉียงเหนือ ทางด้านตะวันออก ทางด้านตะวันออกเฉียงใต้ มีค่า $V_s 30$ มากกว่า 360 เมตร/วินาที ซึ่งจัดอยู่ใน class C (360 - 760 เมตร/วินาที) และบริเวณทางด้านตะวันตกเฉียงใต้ มีค่า $V_s 30$ น้อยกว่า 180 เมตร/วินาที ซึ่งจัดอยู่ใน class E ซึ่งจากที่ได้ทำการสำรวจ ถึงแม้ว่าบริเวณตะวันตกเฉียงใต้จะจัดอยู่ใน class D และ E แต่การขยายสัญญาณของคลื่นแผ่นดินไหวในบริเวณทางตอนเหนือและตะวันตกเฉียงเหนือซึ่งเป็นส่วนของเมืองใหญ่ จะมีมากกว่าเนื่องจากมีความแตกต่างของค่าความเร็วในแต่ละชั้นดินมีมาก ดังรูปที่ 1.21



รูปที่ 1.21 แผนที่ความเร็วคลื่นเฉือนของ Dehradun city (Mahajan et al., 2009)

Maheswari et al. (2010) ได้ทำการวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือนด้วยวิธี MASW (Multichannel Analysis of Surface Wave) ทั้งหมด 30 จุด ที่เมือง Chennai ประเทศอินเดีย แล้วนำค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้มาทำการคำนวณหาค่า $V_s(30)$ และได้นำข้อมูลของหลุมเจาะทั้งหมด 300 หลุมในพื้นที่มาช่วยในการวิเคราะห์โครงสร้างทางธรณีวิทยา แล้วสร้างเป็นแผนที่ค่า $V_s(30)$ โดยการจัดกลุ่มค่านี้โดยใช้เกณฑ์ของ NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program) ผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่ในเมืองนี้จัดอยู่ใน class D ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าพื้นที่ในบริเวณนี้มีความเสี่ยงที่จะได้รับความเสียหายจากการเกิดแผ่นดินไหวเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะตึกที่มีความสูงไม่เกิน 6 ชั้น ซึ่งมีอยู่หนาแน่นในเมืองนี้ ดังรูปที่ 1.22

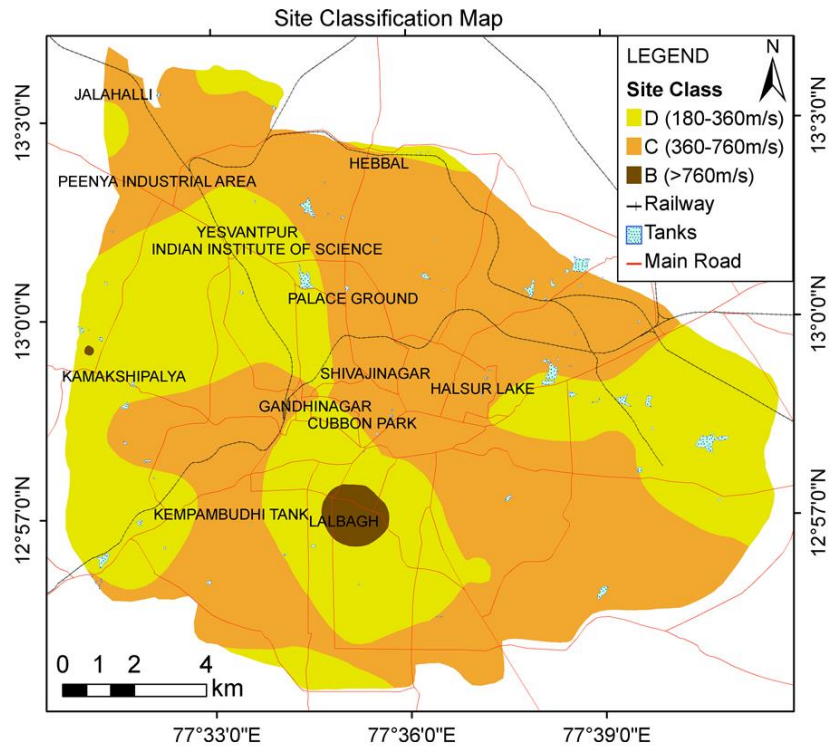
Anbazhagan et al. (2009) ได้ทำการประเมินความเสี่ยงที่ได้รับผลกระทบจากธรณีพิบัติภัยในพื้นที่ Bangalore Mahanagar Palike (BMP) ประเทศอินเดีย ด้วยการจัดกลุ่มพื้นที่ทางธรณีวิทยาโดยใช้เกณฑ์ของ NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program) ซึ่งทำการวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือนด้วยวิธี MASW (Multichannel Analysis of Surface Wave) มาทำการคำนวณหาค่า $V_s(30)$ ในการสำรวจทำการสำรวจในพื้นที่ทั้งหมด 58 จุด ได้ค่า $V_s(30)$ ส่วนใหญ่อยู่ใน class D และ C และมีส่วนเล็กๆบางส่วนของพื้นที่อยู่ใน class B ดังรูปที่ 1.23



รูปที่ 1.22 แผนที่ความเร็วคลื่นเฉือนของ Chennai (Maheswari et al., 2010)

Shibuya และ Tamrakar (2003) ทำการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ รวมถึงคุณสมบัติทางพลศาสตร์โดยการวัดความเร็วคลื่นเฉือน โดยวิธีเจาะสำรวจคลื่นไหวสะเทือน (Seismic Penetration Test/SCPT) ของดินบริเวณกรุงเทพและปริมณฑล พบว่าดินเหนียวอ่อนด้านบนมีความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่า 100 m/s และความเร็วคลื่นเฉือนจะเพิ่มขึ้นจนถึงชั้นดินเหนียวมีค่าอยู่ระหว่าง 180-200 m/s สำหรับชั้นทรายชั้นแรกวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือนได้ 250 m/s

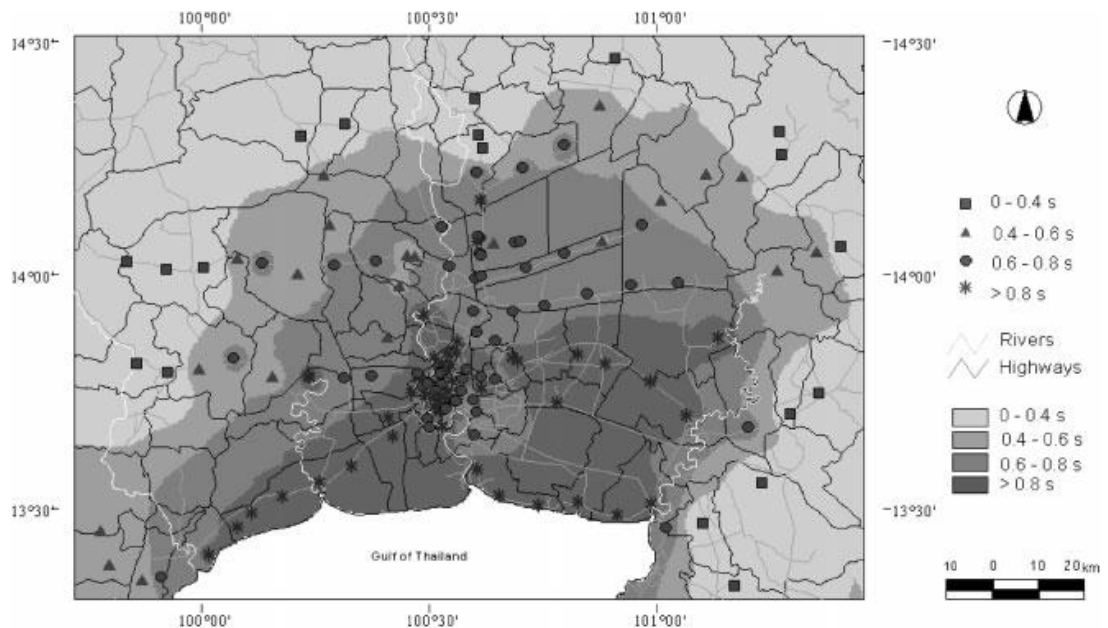
Tuladhar (2004) หาความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกโดยใช้วิธีวัดโดยตรงแบบดาวน์โฮล (Downhole method) และใช้ค่า N สำหรับการตอกกระบอกผ่าทดสอบและกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่คายน้ำของดินในกรุงเทพและปริมณฑล และได้สร้างแผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวอย่างละเอียด (Seismic Microzonation Map) (รูปที่ 1.24) โดยใช้ข้อมูลทั้งหมด 150 จุด ในการหาค่าคาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period) และค่าการขยายคลื่น (Amplification Factor) ของชั้นดิน ด้วยวิธี H/V spectrum ratio



รูปที่ 1.23 แผนที่ความเร็วคลื่นเฉือนของ Bangalore city (Anbazhagan et al., 2009)

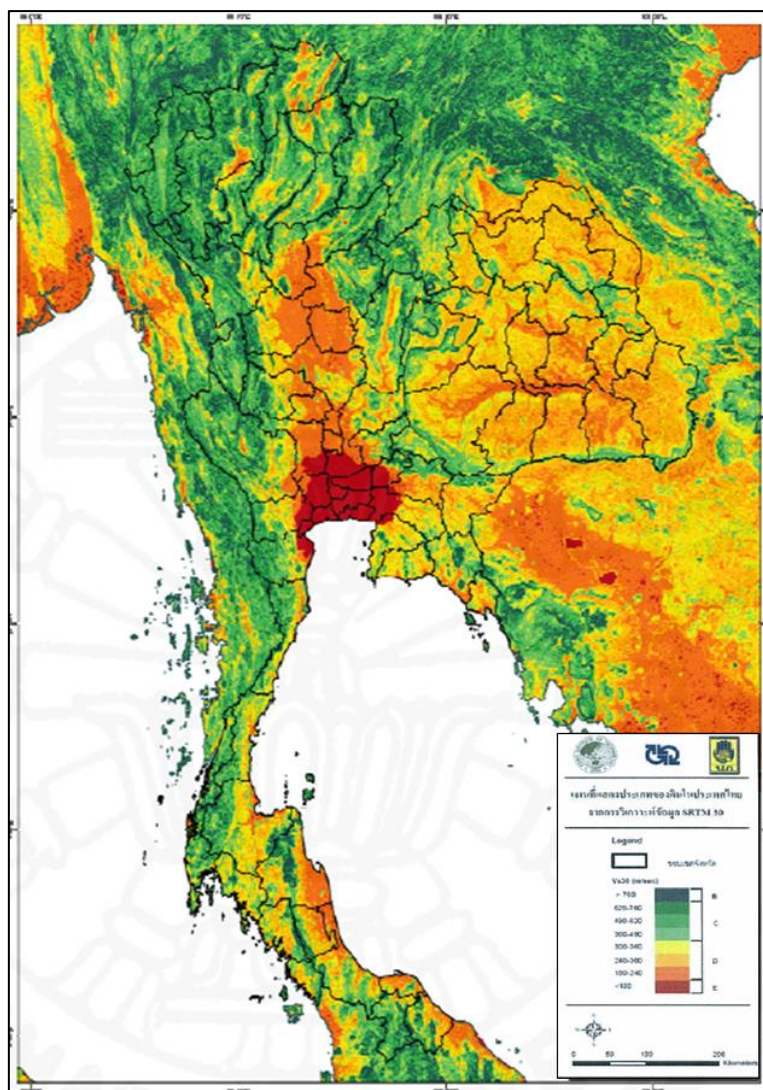
ประภาพร จันทะมาศ (2550) ทำการเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินที่ได้จากวิธี MASW กับ วิธีวัดโดยตรงแบบดาวล์ไฮดรอลิกของพื้นที่กรุงเทพและปริมณฑลและจำแนกดินตามข้อกำหนดของ NEHRP ได้ดังนี้คือ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยสามารถจำแนกเป็นดินประเภท E

สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (2552) จัดทำแผนที่ประเภทของดินของประเทศไทยโดยใช้ข้อมูลจากความสูงของพื้นที่จากภาพถ่ายทางอากาศ (Shuttle Radar Topography Mission/SRTM) ซึ่งเป็นข้อมูลโทรมัสมัสดินหนึ่งที่ใช้ในการระบุระดับความสูงของพื้นดินเชิงเลข (Digital Elevation Data) โดยการนำระดับความสูงดังกล่าวไปใช้แบ่งประเภทของดินตามข้อกำหนดของ NEHRP สามารถทำได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยในระดับ 30 เมตร กับความชันของพื้นดินของแต่ละพื้นที่ของประเทศไทยโดยไม่ต้องทำการทดสอบในสนาม (รูปที่ 1.25)



รูปที่ 1.24 แผนที่เสี่ยงภัยแผ่นดินไหวอย่างละเอียดของกรุงเทพฯและปริมณฑล (Tuladhar, 2004)

สุพจน์ และ รัตมณี (2548) ได้ทำการศึกษาการเพิ่มความรุนแรงของแผ่นดินไหวเนื่องจากสภาพดิน (Site Amplification) ในบริเวณกรุงเทพมหานครและจังหวัดเชียงราย พบว่าจากการวิเคราะห์ชั้นดินในกรุงเทพมหานครซึ่งมีชั้นดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมากที่มีความหนา 15 - 20 เมตรปกคลุมอยู่นั้น มีการขยายสัญญาณของคลื่นแผ่นดินไหวได้สูงถึง 3.5 เท่า โดยมีคาบการสั่นสะเทือนหลักที่ประมาณ 1.0 - 1.5 วินาที ในขณะที่ชั้นดินในเขตจังหวัดเชียงใหม่และเชียงรายมีความเสี่ยงต่อการขยายสัญญาณคลื่นแผ่นดินไหวน้อยกว่า โดยพบว่าการขยายคลื่นของชั้นดินในจังหวัดทั้งสองนั้นมีค่าประมาณ 2.0 - 3.0 เท่า



รูปที่ 1.25 แผนที่แสดงประเภทดินในประเทศไทยจากการวิเคราะห์ข้อมูล SRTM (สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย 2009)

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาโครงสร้างใต้ผิวดินและหาความเร็วคลื่นเฉือนจากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการ MASW (Multichannel Analysis of Surface Wave) เพื่อจำแนกลักษณะทางธรณีวิทยาที่ตอบสนองทางด้านแผ่นดินไหวจากค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

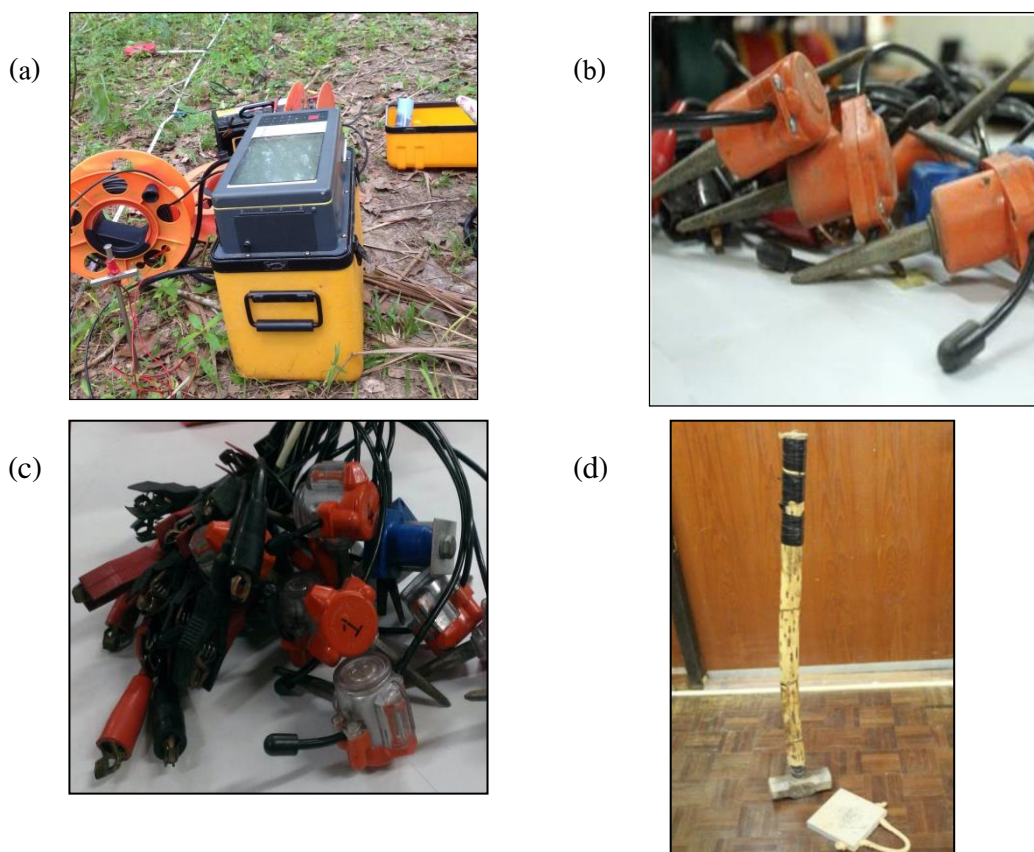
ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีทางธรณีฟิสิกส์นั้นคือ วิธี MASW (Multichannel Analysis of Surface Wave) ในการศึกษาลักษณะเฉพาะของความเร็วคลื่นเฉือนของธรณีวิทยาใต้ผิวดินบริเวณตัวเมืองหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา และวิธีคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (SH-wave refraction method) เพื่อนำผลของความเร็วคลื่นเฉือนในบางจุดสำรวจมาเปรียบเทียบกับวิธี MASW

2.1 วัสดุและอุปกรณ์ (material and equipment)

วัสดุและอุปกรณ์ในงานวิจัยครั้งนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนได้แก่ 1) วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการสำรวจด้วยวิธีทางธรณีฟิสิกส์และ 2) วัสดุและอุปกรณ์รวมทั้งโปรแกรมที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์และแปลความข้อมูลในห้องปฏิบัติการ

2.1.1 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการสำรวจด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์

1. เครื่อง SmartSies™ S-24 Seismograph (รูปที่ 2.1(a)) เป็นอุปกรณ์วัดและบันทึกคลื่นไหวสะเทือน
2. จีโอโฟนแนวตั้ง (vertical component geophones) 24 ตัว (รูปที่ 2.1(b)) และจีโอโฟนแนวนอน (horizontal component geophones) 12 ตัว (รูปที่ 2.1(c)) ใช้สำหรับรับสัญญาณคลื่นไหวสะเทือนที่ได้จากแหล่งกำเนิดคลื่นและส่งสัญญาณไปบันทึกยังเครื่อง SmartSies™ S-24 seismograph ผ่านทางสายเคเบิล (cable) ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างจีโอโฟนแต่ละตัวเข้ากับเครื่อง SmartSies™ S-24 seismograph
3. อุปกรณ์กำเนิดคลื่น (รูปที่ 2.1(d)) ได้แก่ แผ่นเหล็ก แท่งไม้ ค้อนทุบขนาด 5 kg และเครื่องส่งสัญญาณ (hammer switch)
4. แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์
5. เทปวัดระยะ ความยาว 50 เมตร
6. เครื่องมืออ่านพิกัดภูมิศาสตร์ (GPS) สำหรับอ่านพิกัดของตำแหน่งสำรวจทางธรณีฟิสิกส์และการวางแผนการสำรวจ



รูปที่ 2.1 วัสดุอุปกรณ์ในการสำรวจ (a) เครื่อง SmartSies™ S-24 Seismograph (b) จีโอโฟนแนวตั้ง 24 ตัว (c) จีโอโฟนแนวราบ (d) อุปกรณ์กำเนิดคลื่น ได้แก่ ค้อนและแผ่นเหล็ก

2.1.2 วัสดุและอุปกรณ์รวมทั้งโปรแกรมที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์ข้อมูล

- 1) เครื่องคอมพิวเตอร์
- 2) โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่นำมาใช้วิเคราะห์และแปลความหมายข้อมูลประกอบด้วย

2.1) โปรแกรม MapInfo Professional Version 9.3 ซึ่งผลิตโดย Esri, Inc. สำหรับสร้างแผนที่

2.2) โปรแกรม SurfSeis version 3.0 ผลิตโดย Kansas Geological Survey สำหรับวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลที่ได้จากวิธี MASW เพื่อสร้างภาพตัดขวางของค่าความเร็วคลื่นเฉือนใน 1 มิติ

2.3) โปรแกรม Geotomo, Tomoplus ผลิตโดย Hounton, Texas สำหรับวิเคราะห์และประมวลผลข้อมูลจากวิธีคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห เพื่อสร้างภาพตัดขวางความเร็วคลื่นเฉือน

2.4) โปรแกรม Microsoft Excel 2007 สำหรับวิเคราะห์และคำนวณค่าความเร็วคลื่นเฉือน ในระดับความลึก 30 เมตร

2.5) โปรแกรม Surfer version 8.0 ผลิตโดย Golden software, Inc. สำหรับสร้างแผนที่เส้นชั้นความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร ของพื้นที่ศึกษา

2.6) โปรแกรม Grapher version 8 ผลิตโดย Golden software, Inc สำหรับเขียนกราฟ

2.2 วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้แบ่งออกเป็น 2 ตอน ซึ่งประกอบด้วย

1. การดำเนินการวิจัยในภาคสนาม
2. การดำเนินการวิจัยในห้องปฏิบัติการ

2.2.1 การดำเนินการวิจัยในภาคสนาม

การดำเนินการวิจัยในภาคสนาม มีขั้นตอนดังนี้

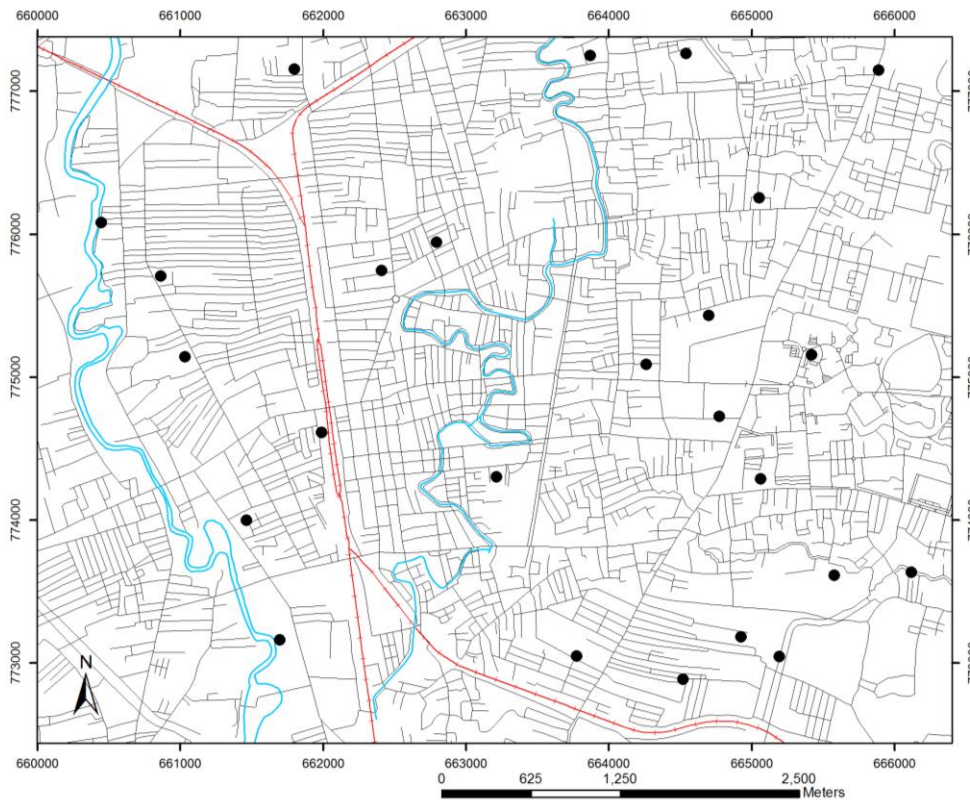
1) กำหนดจุดสำรวจเพื่อหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนบนพื้นที่ศึกษาซึ่งอยู่ในบริเวณตัวเมืองหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ซึ่งมีทั้งหมด 25 จุด (รูปที่ 2.2)

2) ทำการเก็บข้อมูลคลื่นไหวสะเทือน ทั้ง 25 จุด ด้วยวิธี MASW แนวการสำรวจในแต่ละจุดสำรวจมีระยะทาง 46 เมตร โดยมีรูปแบบการวางตำแหน่งของตัวรับคลื่นและตัวกำเนิดคลื่นแบบตัวกำเนิดคลื่นอยู่ปลาย (Off-end) ด้วยการวางจีไอโฟนแนวตั้ง 24 ตัว โดยแต่ละตัวจะมีระยะห่างระหว่างกัน (Receiver Interval) 2 เมตร กำหนดระยะห่างระหว่างตัวกำเนิดคลื่นกับตัวรับสัญญาณตัวแรก (Minimum Offset) 25 เมตร (รูปที่ 2.3a)

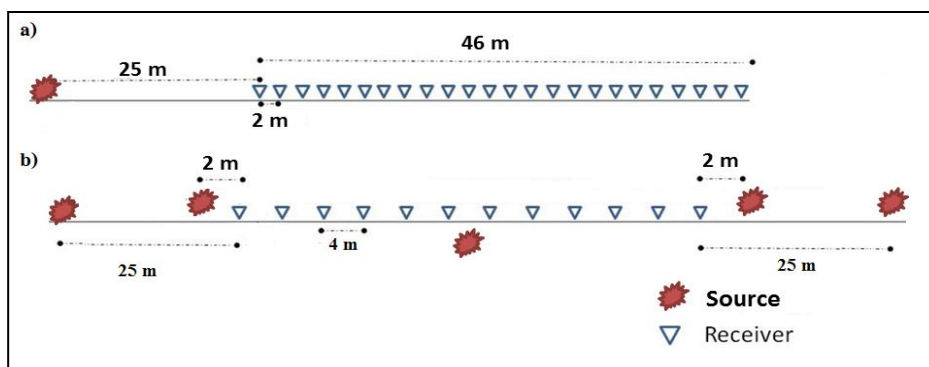
การให้กำเนิดคลื่นจะใช้ค้อนทุบลงบนแผ่นเหล็ก โดยทำการทุบ 15 ครั้ง (รูปที่ 2.4(a)) หลังจากนั้นสัญญาณจะผ่านตัวรับสัญญาณ (Receiver) ไปบันทึกสัญญาณด้วยเครื่อง Geometric Smartseis (รูปที่ 2.4(b)) ด้วยพารามิเตอร์ดังตารางที่ 2.1 หลังจากทำการเก็บข้อมูลคลื่นไหวสะเทือนในภาคสนามแล้วจึงทำการประมวลผลข้อมูลที่ได้มาประมวลผลข้อมูล เพื่อสร้างแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือน 1 มิติ

3) ทำการเก็บข้อมูลคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห โดยมีรูปแบบการวางตำแหน่งจีไอโฟนแนวราบ 12 ตัวและตำแหน่งกำเนิดคลื่น ดังรูปที่ 2.3b ซึ่งจีไอโฟนแต่ละตัวห่างกัน 4 เมตรและให้กำเนิดคลื่นด้วยการใช้ค้อนทุบตรงปลายของแท่งไม้ที่ตั้งฉากกับแนวการสำรวจ ด้วยการทุบ 15 ครั้ง (รูปที่ 2.6) สัญญาณจะผ่านตัวรับสัญญาณ (Receiver) ไปบันทึกสัญญาณด้วยเครื่องบันทึกสัญญาณ

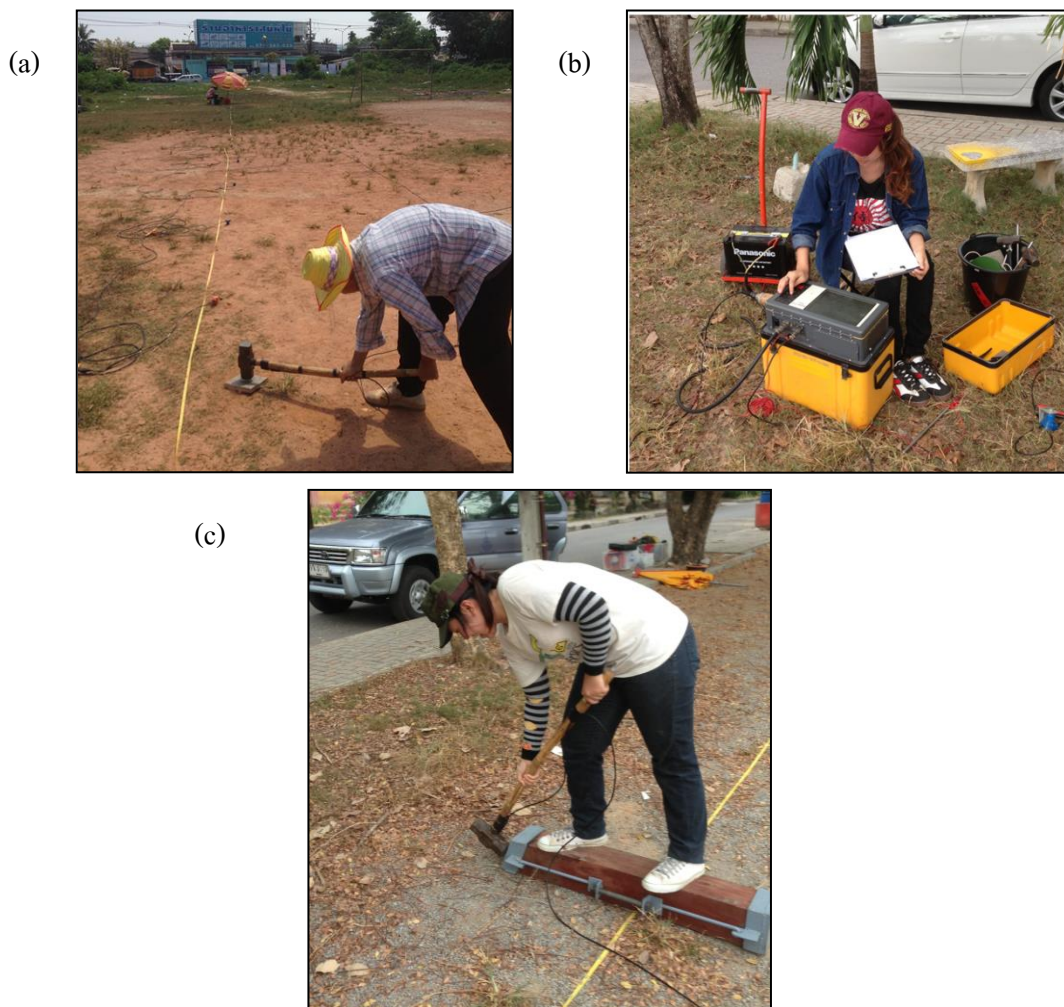
ด้วยพารามิเตอร์ดังตารางที่ 2.1 เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ในการสร้างแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนมาเปรียบเทียบกับวิธี MASW ในบางจุดสำรวจ



รูปที่ 2.2 ตำแหน่งจุดสำรวจเพื่อหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนในพื้นที่ศึกษา



รูปที่ 2.3 รูปแบบการวางตำแหน่งตัวรับและตัวกำเนิดคลื่น และการเก็บข้อมูลคลื่นไหวสะเทือน (a) วิธี MASW (b) วิธีคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (SH-wave refraction method)



รูปที่ 2.4 การเก็บข้อมูลคลื่นไหวสะเทือน (a) การให้กำเนิดสัญญาณด้วยวิธี MASW (b) การบันทึกสัญญาณด้วยเครื่อง Geometric Smartseis (c) การให้กำเนิดสัญญาณด้วยวิธีคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (SH-wave refraction method)

2.2.2 การดำเนินการวิจัยในห้องปฏิบัติการ

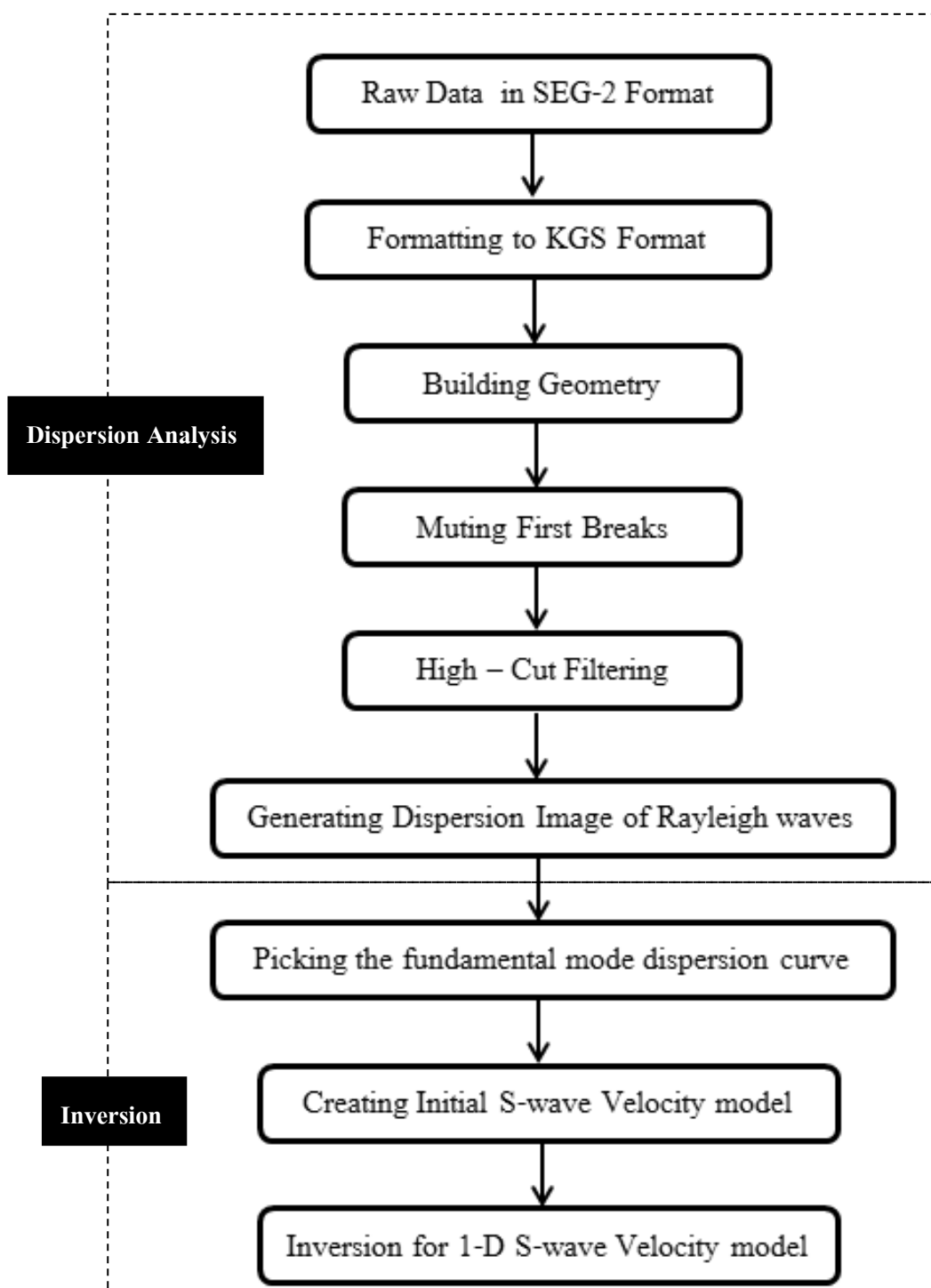
1) ทำการประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นไหวสะเทือนวิธี MASW โดยใช้โปรแกรม Surfseis version 3.0 ซึ่งมีขั้นตอนในการประมวลผลอยู่ 2 ขั้นตอนหลักๆ คือ ขั้นตอนการวิเคราะห์และสร้างกราฟกระจายความเร็วของคลื่นพื้นผิว (Dispersion analysis) กับขั้นตอนการผกผันกราฟกระจายความเร็ว (Inversion) ดังแสดงในแผนภูมิ รูปที่ 2.5

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลคลื่นไหวสะเทือน

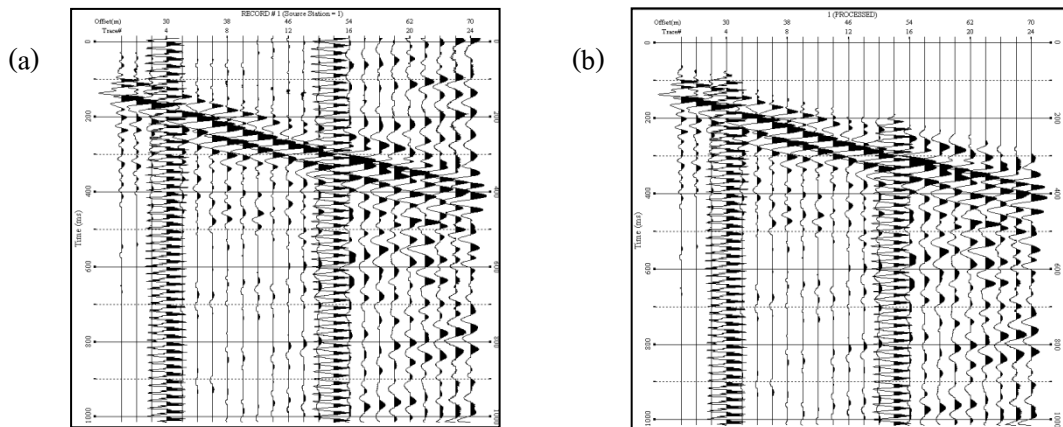
Parameter	MASW	SH-refraction
Source type	5 kg sledgehammer	5 kg sledgehammer
Receiver	14 Hz (vertical)	14 Hz (horizontal)
Receiver interval	2 m	4 m
Number of channels	24	12
Recording system	Geometric Smartseis	Geometric Smartseis
Sampling rate	0.5 ms	0.5 ms
Record length	1000 ms	1000 ms
Minimum source offset	25 m	25 m

ขั้นตอนการสร้างกราฟกระจายความเร็วของคลื่นพื้นผิว (Dispersion Analysis)

- ข้อมูลที่ได้จากการบันทึกด้วยเครื่อง Geometric Smartseis จะมีรูปแบบของข้อมูลในรูปของ SEG-2 ในการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Surfseis version 3.0 จะต้องแปลงรูปแบบของข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบของ KGS (Kansas Geological Survey)
- เมื่อข้อมูลอยู่ในรูปแบบของ KGS ทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล นั่นคือ ตำแหน่งจุดกำเนิดสัญญาณและตัวรับสัญญาณ ระยะห่างระหว่างตัวรับสัญญาณ
- ทำการปรับปรุงสัญญาณคลื่น โดยตัดเอาสัญญาณรบกวน (Noise) และสัญญาณคลื่นที่มาถึงตัวรับสัญญาณตัวแรก (First Breaks) (รูปที่ 2.6) ซึ่งเป็นคลื่นตรงและคลื่นหักเหทิ้งออกไป

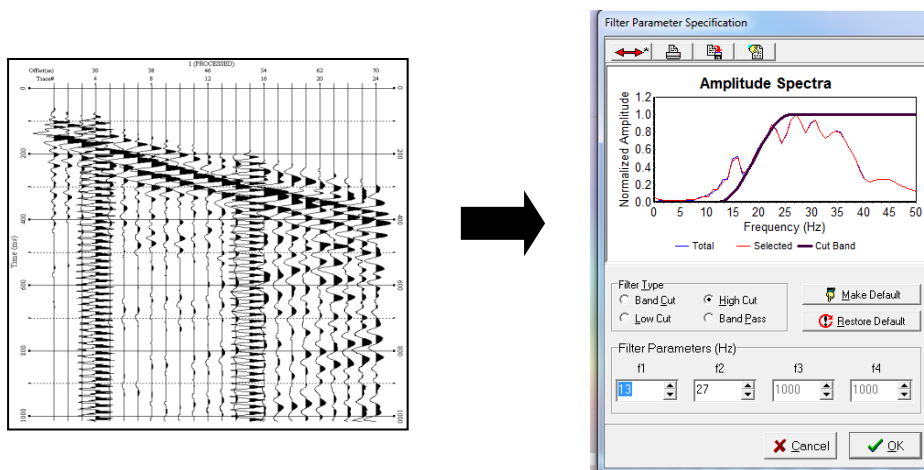


รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรม Surfseis version 3.0

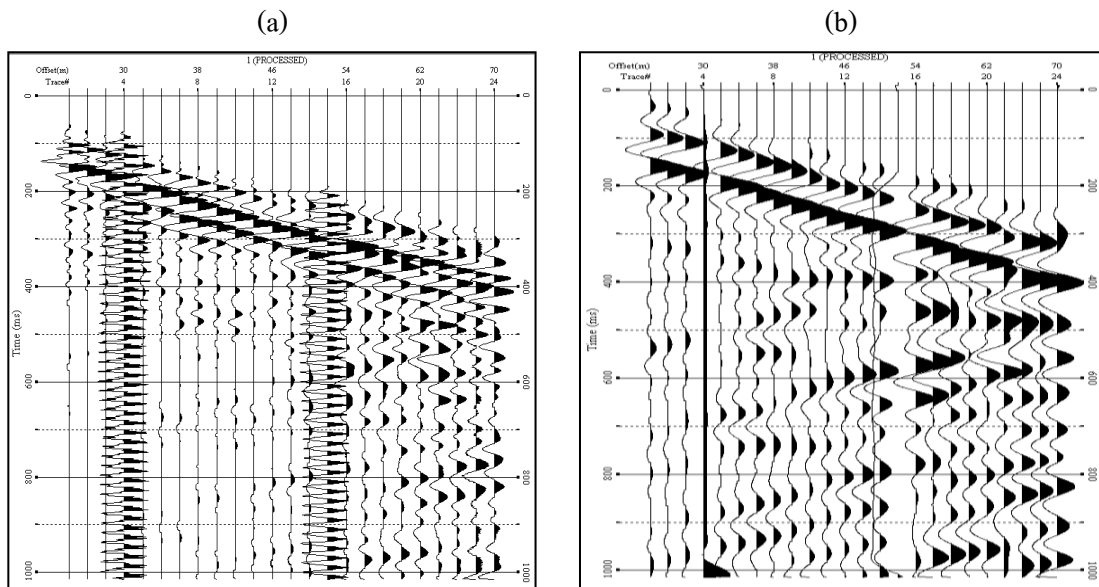


รูปที่ 2.6 การตัดเอาสัญญาณรบกวนและคลื่นที่มาถึงตัวรับสัญญาณตัวแรก (First Breaks) ออกไป (a) สัญญาณก่อนตัด (b) หลังตัดสัญญาณ

- ทำการกรองคลื่นที่มีความถี่สูงออก (High-cut filtering) (รูปที่ 2.8) เพื่อเป็นการปรับปรุงสัญญาณ โดยต้องการกำจัดสัญญาณรบกวนต่างๆที่มีความถี่สูง และจะคัดเลือกเอาเฉพาะสัญญาณที่มีความถี่ต่ำซึ่งเป็นคลื่นพื้นผิวเท่านั้น ซึ่งช่วงความถี่สูงที่ถูกกรองออกไปขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่ทำการสำรวจ โดยจะต้องดูจากข้อมูลซึ่งให้อยู่ในรูปโดเมนของความถี่และแอมพลิจูดก่อนทำการกรอง (รูปที่ 2.7)

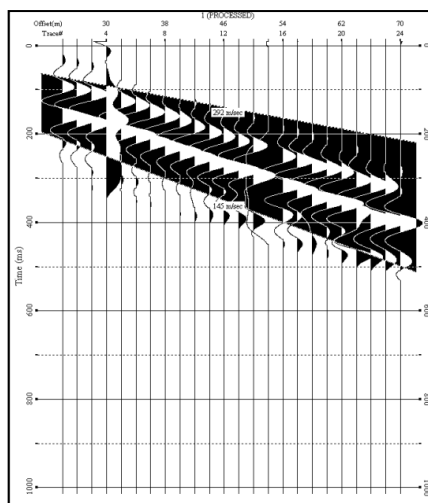


รูปที่ 2.7 ข้อมูลในรูปโดเมนของความถี่และแอมพลิจูด



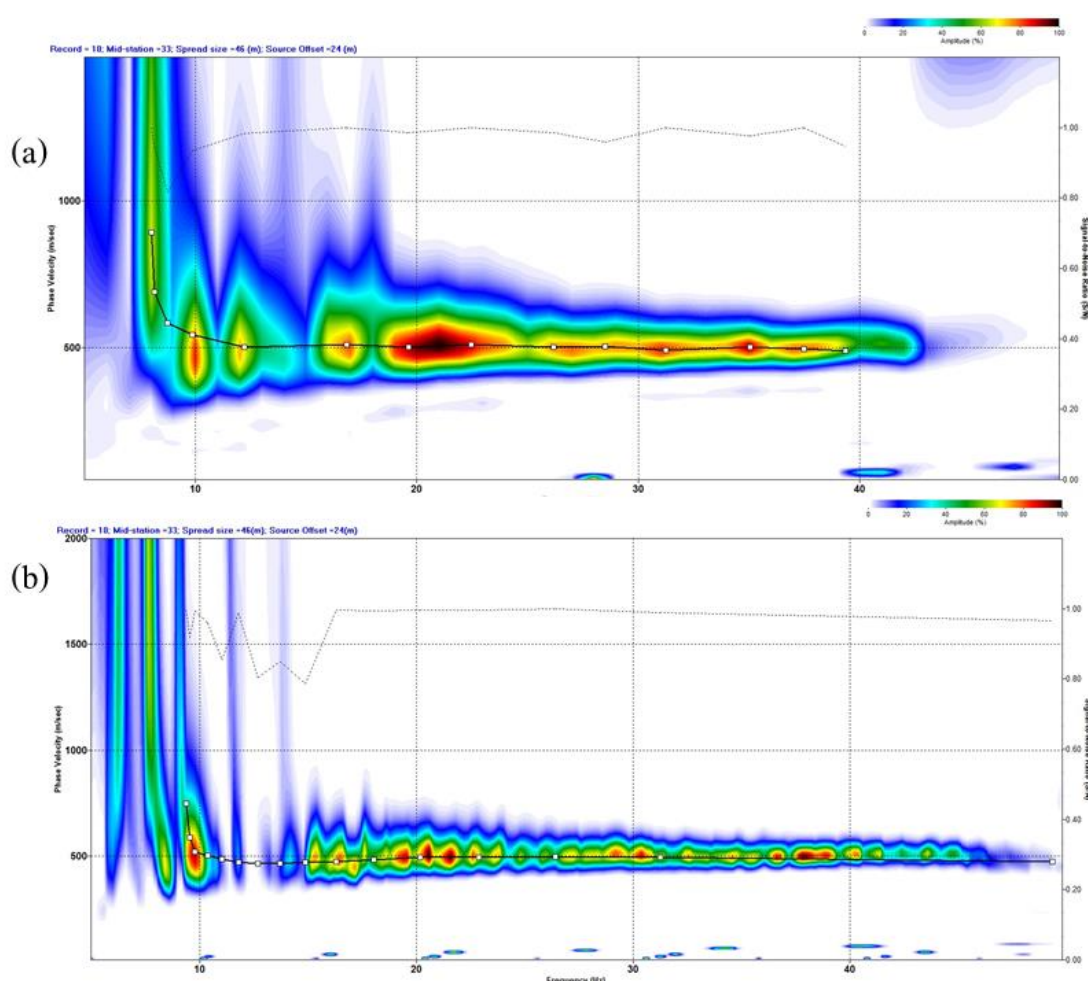
รูปที่ 2.8 การกรองคลื่นที่มีความถี่สูงออก (a) ก่อนกรอง (b) หลังกรอง

- หลังจากทำการปรับปรุงสัญญาณแล้วเลือกเอาของข้อมูลเฉพาะช่วงที่เป็นคลื่นพื้นผิว (รูปที่ 2.9) มาแปลงข้อมูลจากโดเมนของเวลาให้อยู่ในรูปของความถี่และความเร็วเฟส (Phase velocity spectrum) (รูปที่ 2.10) โดยใช้วิธีของ Park et al. (1998) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 (รูปที่ 1.18)



รูปที่ 2.9 ช่วงสัญญาณคลื่นพื้นผิว

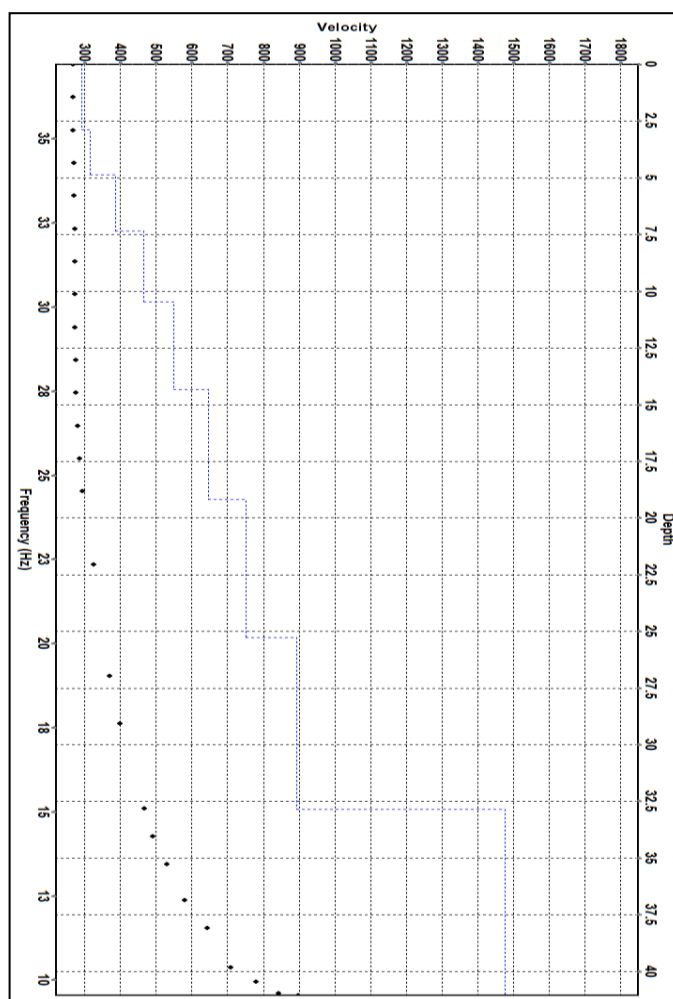
- เมื่อได้ข้อมูลในรูปของความถี่และความเร็วเฟส (Phase velocity spectrum) ทำการเลือกจุดข้อมูลเพื่อนำไปสร้างกราฟกระจายความเร็ว การเลือกจุดข้อมูลที่เหมาะสมจะเลือกจุดข้อมูลที่อยู่ในช่วงที่มีแอมพลิจูดสูงและเลือกโหมดมูลฐานเท่านั้น (รูปที่ 2.10) การปรับปรุงสัญญาณทั้งการตัดเอาสัญญาณรบกวนและการกรองคลื่นที่มีความถี่สูงออก จะทำให้การเลือกจุดเพื่อสร้างกราฟกระจายความเร็วง่ายและแม่นยำขึ้น (รูปที่ 2.10a)



รูปที่ 2.10 การเลือกจุดกราฟกระจายความเร็วจาก Phase velocity spectrum (a) ข้อมูลหลังการปรับปรุงข้อมูล (b) ข้อมูลหลังการปรับปรุงข้อมูลที่ไม่ผ่านการปรับปรุงข้อมูล

ขั้นตอนการผกผันกราฟกระจายความเร็ว (Inversion)

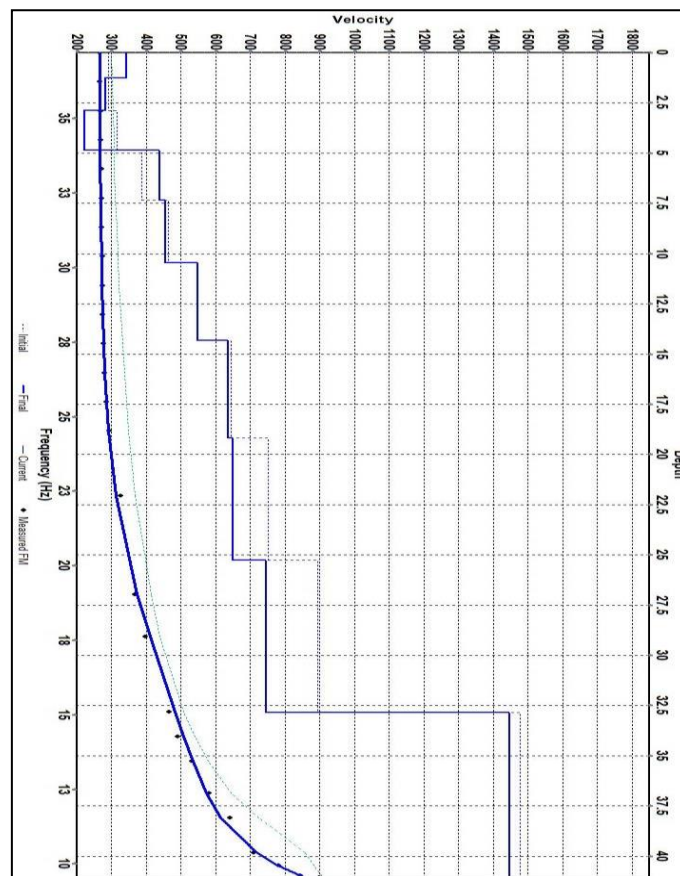
- ทำการสร้างแบบจำลองความเร็วคลื่นเนื้องต้น (Initial Model) (รูปที่ 2.11) จากกราฟกระจายความเร็วที่ได้จากการเลือกจุดจาก Phase velocity spectrum ซึ่งแบบจำลองความเร็วเนื้องต้นสามารถตั้งค่าพารามิเตอร์ได้เองถ้าหากมีข้อมูลความเร็วของคลื่นพีและความหนาของชั้นดินในแต่ละชั้นจากหลุมเจาะ ถ้าไม่มีข้อมูลจากหลุมเจาะ โปรแกรมจะตั้งค่าจำนวนชั้นดิน (layer) ของแบบจำลองเนื้องต้น (Initial Model) ไว้ 10 ชั้น
- ทำการผกผัน (Inversion) เพื่อสร้างแบบจำลองความเร็วคลื่นเนื้องต้นใน 1 มิติ (รูปที่ 2.13) ซึ่งกระบวนการผกผัน (Inversion) ของโปรแกรม Surfseis นั้นอาศัยหลักการของ Xia et al. (1999) ซึ่งมีขั้นตอนของกระบวนการโดยสังเขปดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 การทำผกผัน (Inversion) สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ได้ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 แบบจำลองความเร็วคลื่นเนื้องต้น (Initial Model)

Input Files	Iteration	Initial V/s Layer	Output Files												
Stopping Criteria R-M-S Error (in Phase Velocity) <input type="text" value="5.00"/> Max. Iteration <input type="text" value="15"/>		Poisson's Ratio or Vp A-Priori Assumptions <input type="radio"/> Vp fixed (update Poisson's ratio) <input checked="" type="radio"/> Poisson's ratio fixed (update Vp)													
<input type="checkbox"/> Stop automatically when converging		Inversion-velocity Range													
Weighting of Individual Points <input type="radio"/> Signal-to-Noise Ratio (S/N) <input checked="" type="radio"/> Equal		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Initial Model</th> <th>Scale</th> <th>For Inversion</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Minimum velocity</td> <td>193</td> <td><input type="text" value="0.40"/></td> <td>77</td> </tr> <tr> <td>Maximum velocity</td> <td>861</td> <td><input type="text" value="3.50"/></td> <td>3012</td> </tr> </tbody> </table>			Initial Model	Scale	For Inversion	Minimum velocity	193	<input type="text" value="0.40"/>	77	Maximum velocity	861	<input type="text" value="3.50"/>	3012
	Initial Model	Scale	For Inversion												
Minimum velocity	193	<input type="text" value="0.40"/>	77												
Maximum velocity	861	<input type="text" value="3.50"/>	3012												
<input checked="" type="checkbox"/> Synchronize inversion displays															
<input type="button" value="Restore Defaults"/>		<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/>													

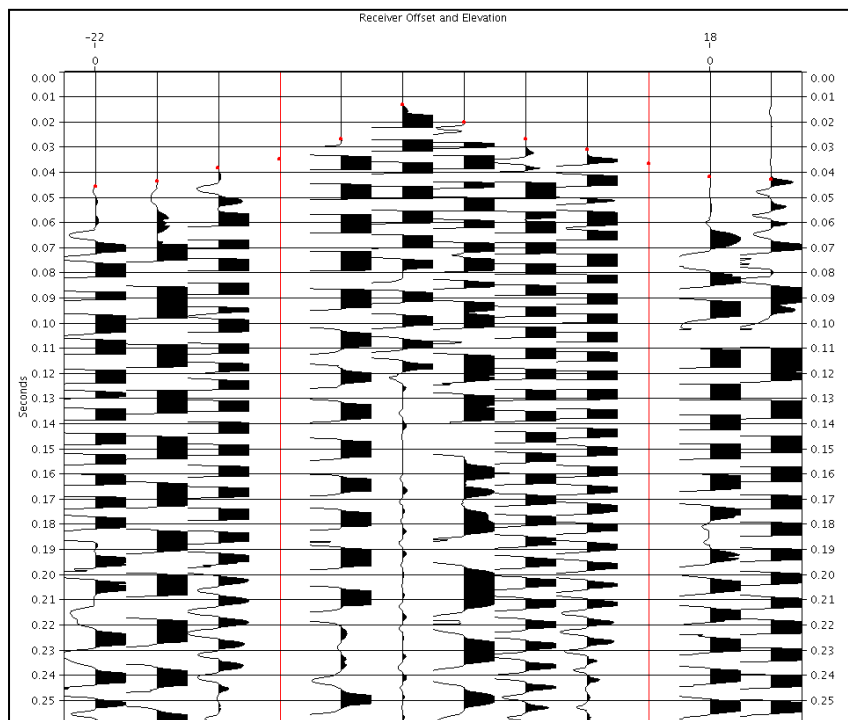
รูปที่ 2.12 การตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการผกผัน



รูปที่ 2.13 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนใน 1 มิติ

2) นำค่าความเร็วเฉือนที่ได้จากวิธี MASW มาเปรียบเทียบกับแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลจากการสำรวจด้วยวิธีคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห ด้วยโปรแกรม Geotomo, Tomoplus ซึ่งมีขั้นตอนในการประมวลข้อมูล 3 ขั้นตอนโดยสังเขป ดังนี้

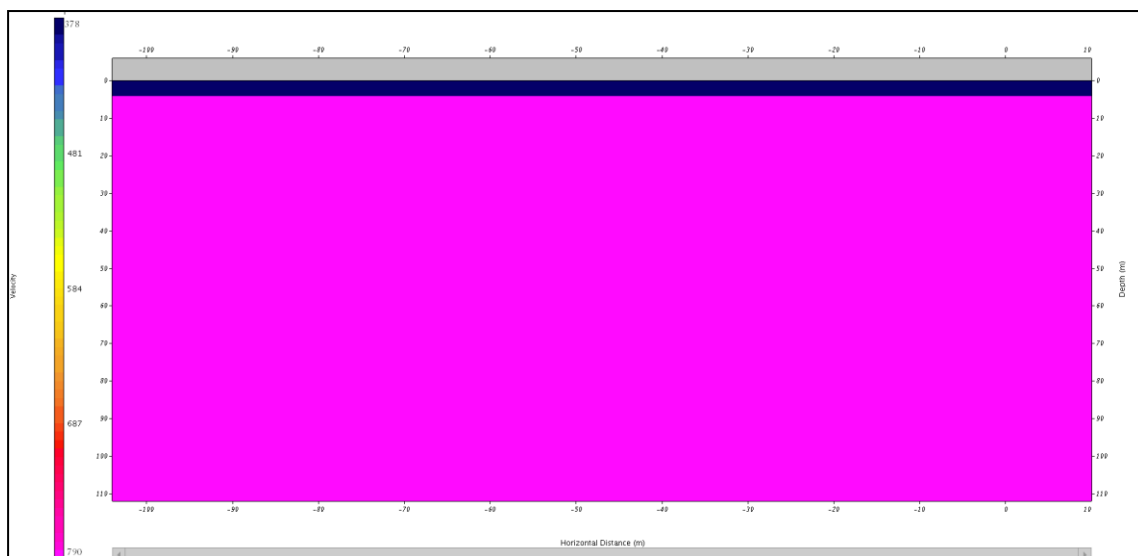
- ทำการกำหนดจุด first break ของแต่ละตัวรับคลื่น เพื่อให้ทราบถึงระยะเวลาที่คลื่นเดินทางจากจุดกำเนิดคลื่นมาถึงตัวรับสัญญาณ (รูปที่ 2.14)



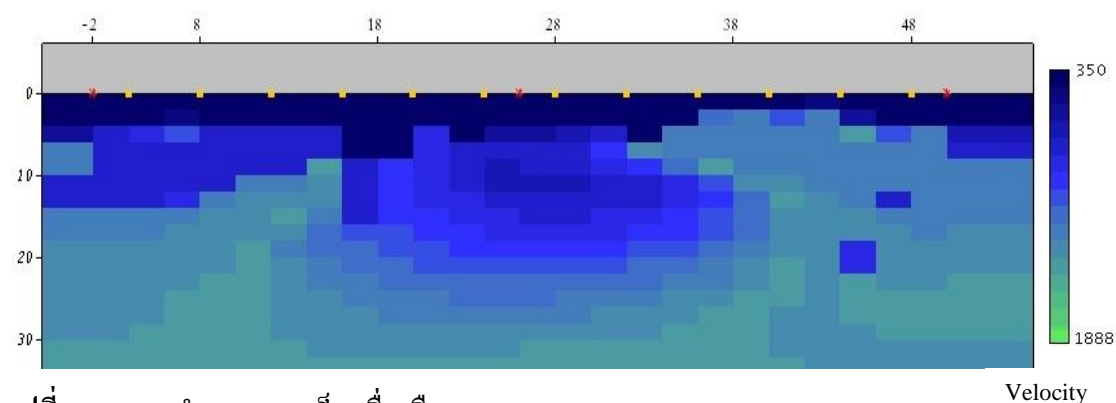
รูปที่ 2.14 กำหนดจุด first break ของแต่ละตัวรับคลื่น

- หลังจากนั้นนำข้อมูลเวลาที่คลื่นเดินทางมาถึงซึ่งได้จากการกำหนดจุด first break ของแต่ละตัวรับสัญญาณมาแสดงบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาเพื่อสร้างแบบจำลองเบื้องต้น (Initial model) โดยความชัน (slope) ของกราฟจะแทนความเร็วในแต่ละชั้นดินของแบบจำลองเบื้องต้น และสร้างเป็นแบบจำลองเบื้องต้น ดังรูปที่ 2.15

- นำแบบจำลองเบื้องต้นมาเข้าสู่กระบวนการผกผันด้วยวิธี non-linear least squares inversion เพื่อสร้างแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือน ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 แบบจำลองเบื้องต้น (initial model) ด้วยโปรแกรม Geotomo, Tomoplus



รูปที่ 2.16 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือน

3) ข้อมูลความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธี MASW ในแต่ละจุดสำรวจนำมาคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร ($v_{s,30}$) โดยใช้สมการที่ 1.38

ตัวอย่างการคำนวณค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร ($v_{s,30}$) ด้วยวิธี MASW ในจุดสำรวจบริเวณพื้นที่โรงเรียนเทศบาล วัดคองหงส์ (โศภณพิทยาคูณานุสรณ์) ซึ่งมีความเร็วคลื่นเฉือนและความหนาของแต่ละชั้นดินซึ่งได้จากการประมวลผลสามารถคำนวณค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างข้อมูลความเร็วคลื่นเฉือนและความหนาของแต่ละชั้นดินและการคำนวณค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตรในบริเวณ โรงเรียนวัดคอหงส์

พิกัด(UTM)		d_i (m)	V_{si} (m/s)	$\frac{d_i}{V_{si}}$	$\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}$	V_{s30} (m/s)
665051E	776255N	0.939	278.119	0.0033763	0.0631274	475.2
		1.173	277.155	0.0042323		
		1.467	285.355	0.0051409		
		1.833	294.599	0.0062220		
		2.292	326.105	0.0070284		
		2.865	449.670	0.0063713		
		3.581	572.671	0.0062532		
		4.476	585.053	0.0076506		
		5.595	548.382	0.0102027		
		5.775	868.463	0.0066497		

4) นำค่าพิกัดและค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร (V_{s30}) ในแต่ละจุดสำรวจมาสร้างแผนที่คอนทัวร์ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร (V_{s30}) ของพื้นที่ศึกษาด้วยโปรแกรม Surfer version 8.0 โดยเลือก Kriging gridding method

5) จัดกลุ่มลักษณะธรณีวิทยาเพื่อจำแนกลักษณะของชั้นดินที่ตอบสนองทางด้านแผ่นดินไหวจากค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร โดยใช้ข้อกำหนดของ NEHRP ในการจัดกลุ่ม ตามตารางที่ 1.3 (บทที่ 1) ซึ่งค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตรและกลุ่มทางธรณีวิทยาของแต่ละจุดในพื้นที่แสดงในบทที่ 3

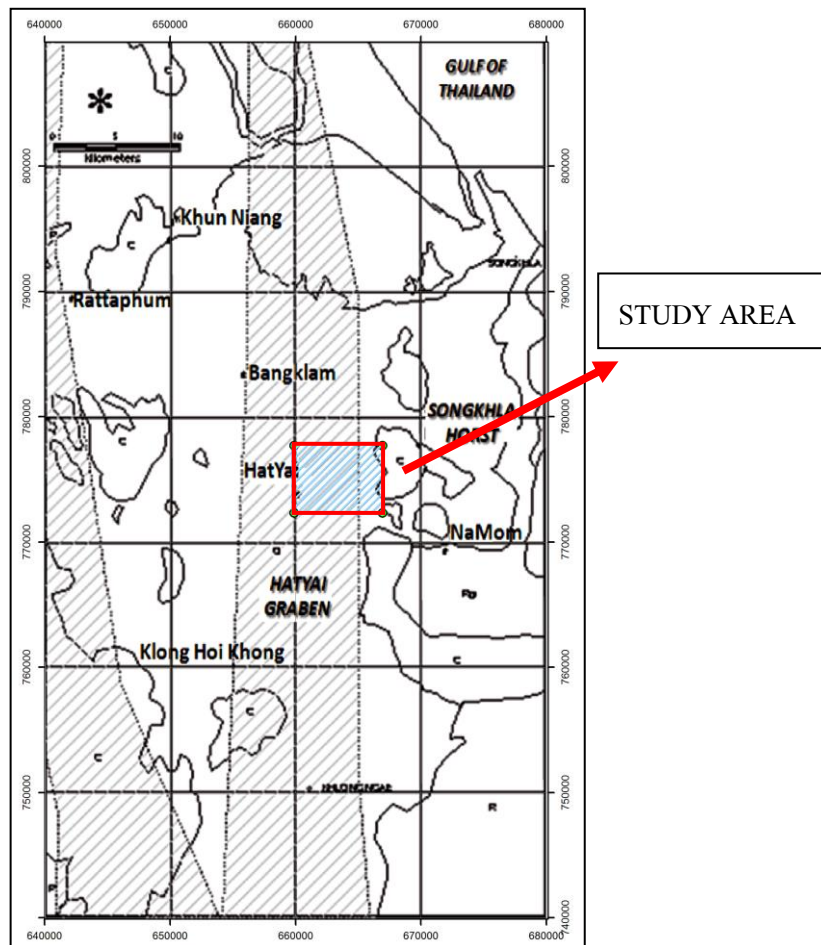
- 6) สร้างแผนที่ลักษณะทางวิทยาที่ทำการจัดกลุ่มโดยใช้ข้อกำหนดของ NEHRP ในบริเวณพื้นที่ศึกษา และนำมาเปรียบเทียบกับแผนที่ธรณีวิทยาของกรมทรัพยากรธรณี
- 7) สร้างภาพตัดขวางโครงสร้างของชั้นดินโดยใช้ความเร็วของคลื่นเฉือนในแนวเหนือ-ใต้ และแนวตะวันออก-ตะวันตกของพื้นที่ศึกษา
- 8) สร้างแผนที่คาบอิทธิพลหลักในพื้นที่ศึกษาและนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลแผนที่ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร (V_s30)

บทที่ 3

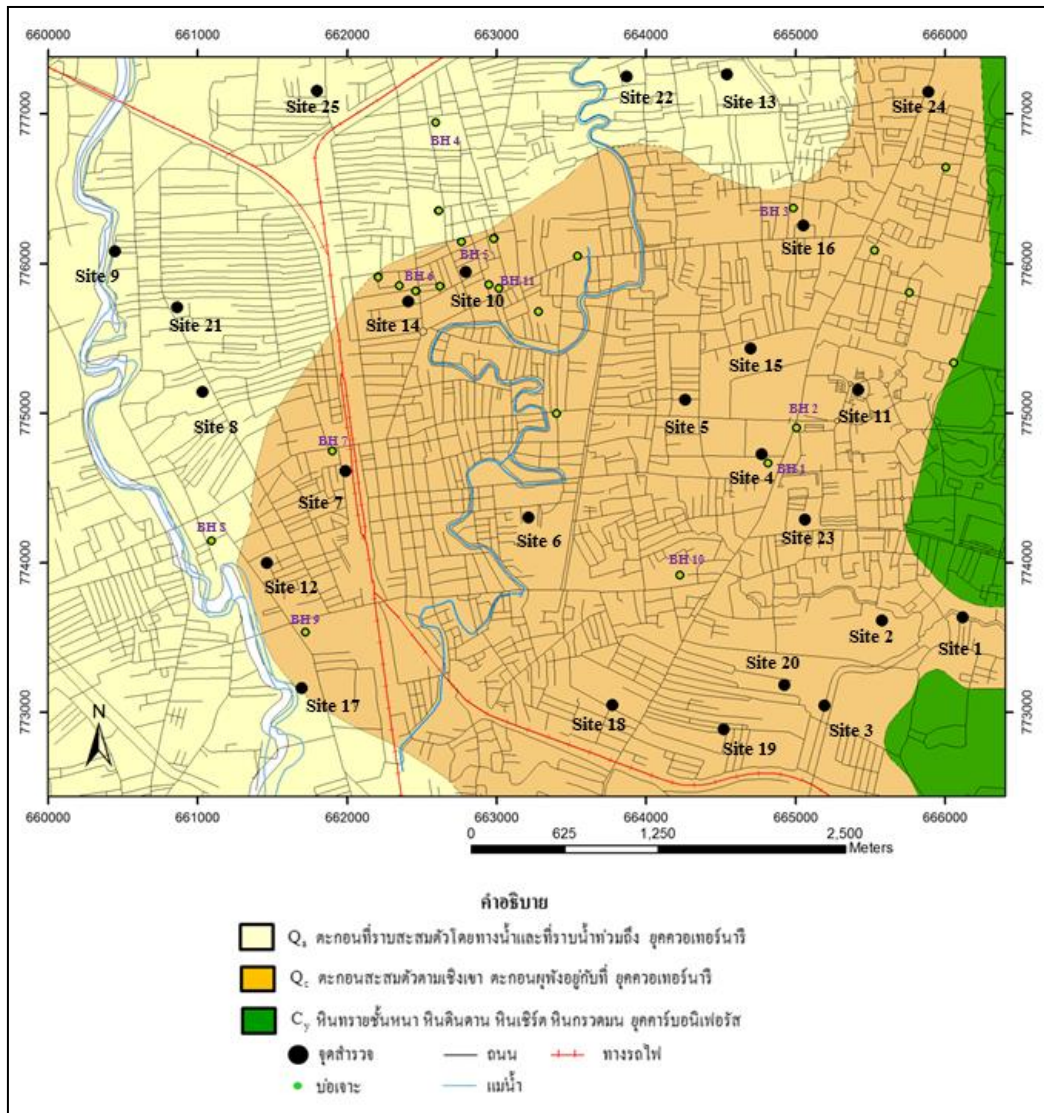
ผลและการวิเคราะห์ผล

3.1 ผลการสำรวจด้วยวิธี MASW (Multichannel Analysis of Surface Wave)

จากการศึกษาข้อมูลธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาพบว่า มีลักษณะเป็นแอ่งตะกอนซึ่งเกิดจากการยุบตัวของแท่งหินแนวยาวระหว่างรอยเลื่อน (Graben) (รูปที่ 3.1) โดยจากแผนที่ธรณีวิทยาของกรมทรัพยากรธรณี (รูปที่ 3.2) พบว่า บริเวณพื้นที่ศึกษาตั้งอยู่บนพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำ ซึ่งถูกปกคลุมด้วยตะกอนในยุคควอเทอร์นารี (Quaternary) โดยประกอบไปด้วย ตะกอนเศษหินเชิงเขา (Q_c) และตะกอนธารน้ำพา (Q_a)



รูปที่ 3.1 พื้นที่ศึกษาที่วางตัวในบริเวณแอ่งหาดใหญ่ (วรวิทย์ โลหะวิจารณ์, 2548)



รูปที่ 3.2 แผนที่ธรณีวิทยา จุดสำรวจ และตำแหน่งของบ่อเจาะในพื้นที่ศึกษา

ในการสำรวจทำการสำรวจทั้งหมด 25 จุดสำรวจ แบ่งเป็น 7 จุด ในบริเวณที่มีธรณีวิทยาเป็นที่ราบตะกอนธารน้ำพา (Q₁) ซึ่งเป็นตะกอนที่สะสมตัวโดยทางน้ำ และเป็นที่ราบน้ำท่วมถึง และอีก 18 จุด ในบริเวณที่เป็นตะกอนเศษหินตามเชิงเขา (Q₂) ซึ่งเป็นตะกอนสะสมตัวตามเชิงเขา ผูกงอกอยู่กับที่ (รูปที่ 3.2)

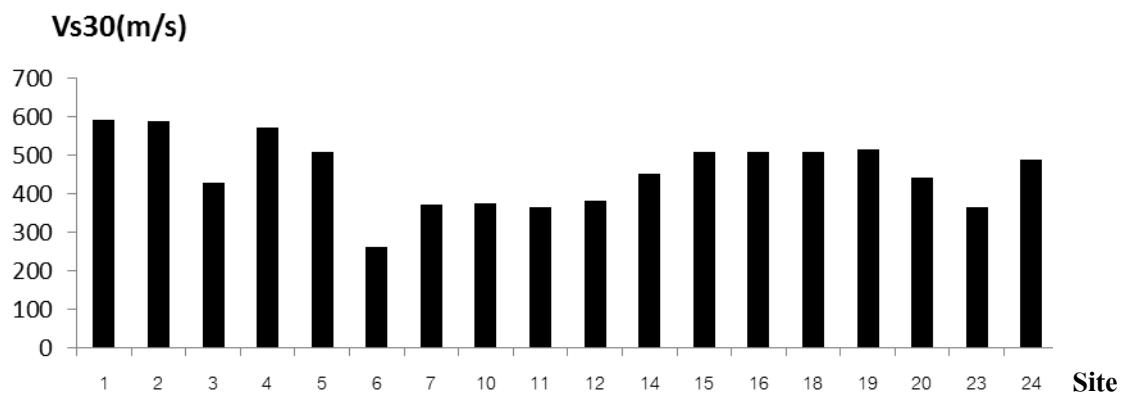
3.1.1 ผลการสำรวจด้วยวิธี MASW ในบริเวณที่เป็นตะกอนเศษหินตามเชิงเขา (Q_c)

บริเวณนี้เป็นบริเวณที่ตะกอนเกิดจากตะกอนเศษหินตามเชิงเขาที่เกิดจากการผุพังอยู่กับที่ โดยอยู่ทางบริเวณตอนกลาง และทางตะวันออกของพื้นที่ศึกษา (รูปที่ 3.2) มีจุดสำรวจทั้งหมด 18 จุดในบริเวณนี้ ซึ่งแต่ละจุดมีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร (V_s30) และจัดกลุ่มทางธรณีวิทยาโดยใช้ข้อกำหนดของ NEHRP ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร (V_s30) และจัดกลุ่มทางธรณีวิทยาโดยใช้ข้อกำหนดของ NEHRP ในบริเวณที่เป็นตะกอนเศษหินตามเชิงเขา (Q_c)

Site	พิกัด(UTM, WGS84, Zone47)		(V_s30)(m/s)	Site Class
1	666117	773638	592.5	C
2	665577	773615	586.9	C
3	665191	773047	428.5	C
4	664773	774728	570.3	C
5	664261	775093	508.4	C
6	663210	774305	260.5	D
7	661985	774615	369.8	C
10	662792	775946	374.3	C
11	665416	775159	365.4	C
12	661460	774000	379.9	C
14	662407	775747	449.8	C
15	664706	775433	507.2	C
16	665051	776255	506.9	C
18	663771	773053	508.5	C
19	664517	772890	514.9	C
20	664923	773185	440.5	C
23	665061	774290	363.2	C
24	665888	777148	488.7	C

จากตารางที่ 3.1 จะได้ว่าบริเวณตะกอนเกิดจากตะกอนเศษหินตามเชิงเขาที่เกิดจากการผุพังอยู่กับที่ ในพื้นที่ศึกษาค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร (V_s30) เกือบทุกจุดสำรวจมีค่าอยู่ในช่วง 360 – 760 เมตร/วินาที โดยมีค่าเฉลี่ย V_s30 เท่ากับ 456.5 เมตร/วินาที (รูปที่ 3.3) จึงสามารถจัดกลุ่มทางธรณีวิทยาโดยใช้ข้อกำหนดของ NEHRP ในบริเวณนี้ อยู่ในกลุ่มประเภท C นั่นคือเป็นพวก Soft rock แต่มีหนึ่งจุดสำรวจที่มีค่า V_s30 ต่ำกว่า 360 เมตร/วินาที นั่นคือจุดสำรวจ site 6 โดยมีค่า V_s30 เท่ากับ 260.5 เมตร/วินาที ซึ่งน่าจะเกิดจากบริเวณจุดที่สำรวจมีการสะสมของตะกอนที่เป็นตะกอนธารน้ำพัดพามาจากคลองเตยซึ่งเป็นตะกอนที่มีความอ่อนและค่อนข้างหนาปกคลุมอยู่ด้านบน ทำให้มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนค่อนข้างต่ำ



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงค่า (V_s30) ในบริเวณที่ราบตะกอนเศษหินตามเชิงเขา ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของ (V_s30)=456.5 เมตร/วินาที

3.1.2 ผลการสำรวจด้วยวิธี MASW ในบริเวณที่เป็นที่ราบตะกอนธารน้ำพา (Q_a)

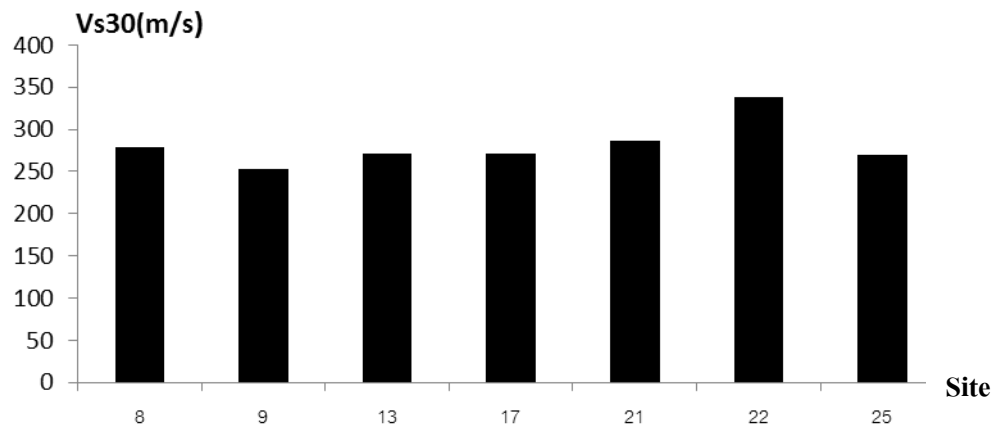
บริเวณนี้เป็นบริเวณตะกอนที่เกิดจากการสะสมตัวของทางน้ำและเป็นที่ราบน้ำท่วมถึง (Flood Plain) มีแม่น้ำ 1 สายไหลผ่านคือ คลองอู่ตะเภาซึ่งเป็นแม่น้ำสายหลักที่ไหลผ่านตัวเมืองหาดใหญ่และไหลลงสู่ทะเลสาบสงขลา บริเวณนี้จะอยู่ทางบริเวณด้านทิศตะวันตกของพื้นที่ศึกษา (รูปที่ 3.2) มีจุดสำรวจทั้งหมด 7 จุด ซึ่งแต่ละจุดมีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร (V_s30) และจัดกลุ่มทางธรณีวิทยาโดยใช้ข้อกำหนดของ NEHRP ดังตารางที่ 3.2

จากตารางที่ 3.2 จะได้ว่าบริเวณที่เป็นที่ราบตะกอนน้ำพาและที่ราบน้ำท่วมถึง (Q_a) ซึ่งอยู่ทางด้านตะวันตกของตัวเมืองหาดใหญ่ มีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร (V_s30) มากที่สุด คือ 337 เมตร/วินาที ค่าน้อยที่สุด คือ 253 เมตร/วินาที และมีค่าเฉลี่ย (V_s30) เท่ากับ 281.20 เมตร/วินาที (รูปที่ 3.4) ดังนั้นจึงสามารถจัดกลุ่มทางธรณีวิทยาโดยใช้

ข้อกำหนดของ NEHRP ในบริเวณพื้นที่ที่เป็นที่ราบตะกอนน้ำพา อยู่ในกลุ่มประเภท D นั่นคือเป็นพวก Stiff Soil

ตารางที่ 3.2 ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร ($V_s 30$) และจัดกลุ่มทางธรณีวิทยาโดยใช้ข้อกำหนดของ NEHRP ในบริเวณที่ราบตะกอนน้ำพา (Q_a)

Site	พิกัด(UTM,WGS84,Zone47)		$(V_s 30)$ (m/s)	Site Class
8	661030	775144	279.52	D
9	660444	776084	253.65	D
13	664540	777265	271.72	D
17	661692	773164	270.75	D
21	660860	775709	285.99	D
22	663867	777252	337.58	D
25	661796	777158	269.23	D

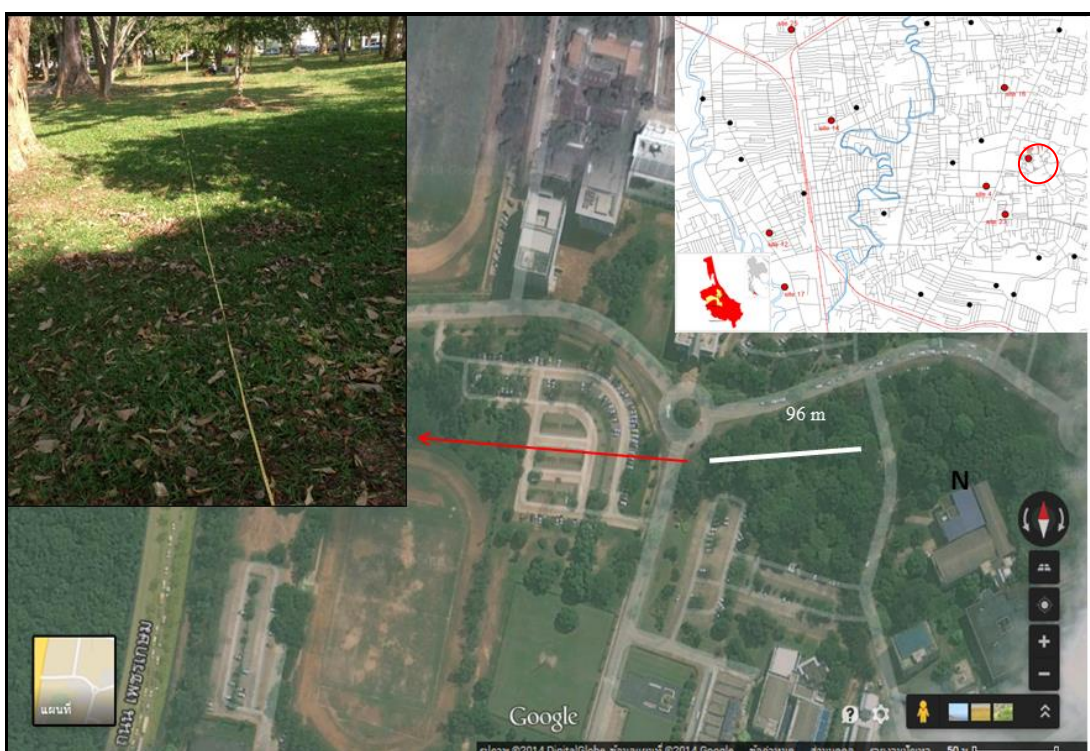


รูปที่ 3.4 กราฟแสดงค่า ($V_s 30$) ในบริเวณที่ราบตะกอนน้ำพา (Q_a) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของ ($V_s 30$)=281.20 เมตร/วินาที

3.1.3 ตัวอย่างแบบจำลองค่าความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะ น้ำบาดาล และวิธีคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเหในบางจุดสำรวจ

(1) Site 11

Site 11 อยู่ภายในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตรงข้ามกับคณะวิทยาการจัดการ โดยมีแนวในการสำรวจในแนวตะวันตก - ตะวันออก (รูปที่ 3.5) ธรณีวิทยาบริเวณนี้เป็นตะกอนสะสมตัวตามเชิงเขา ยุคควอเทอร์นารี (Q)

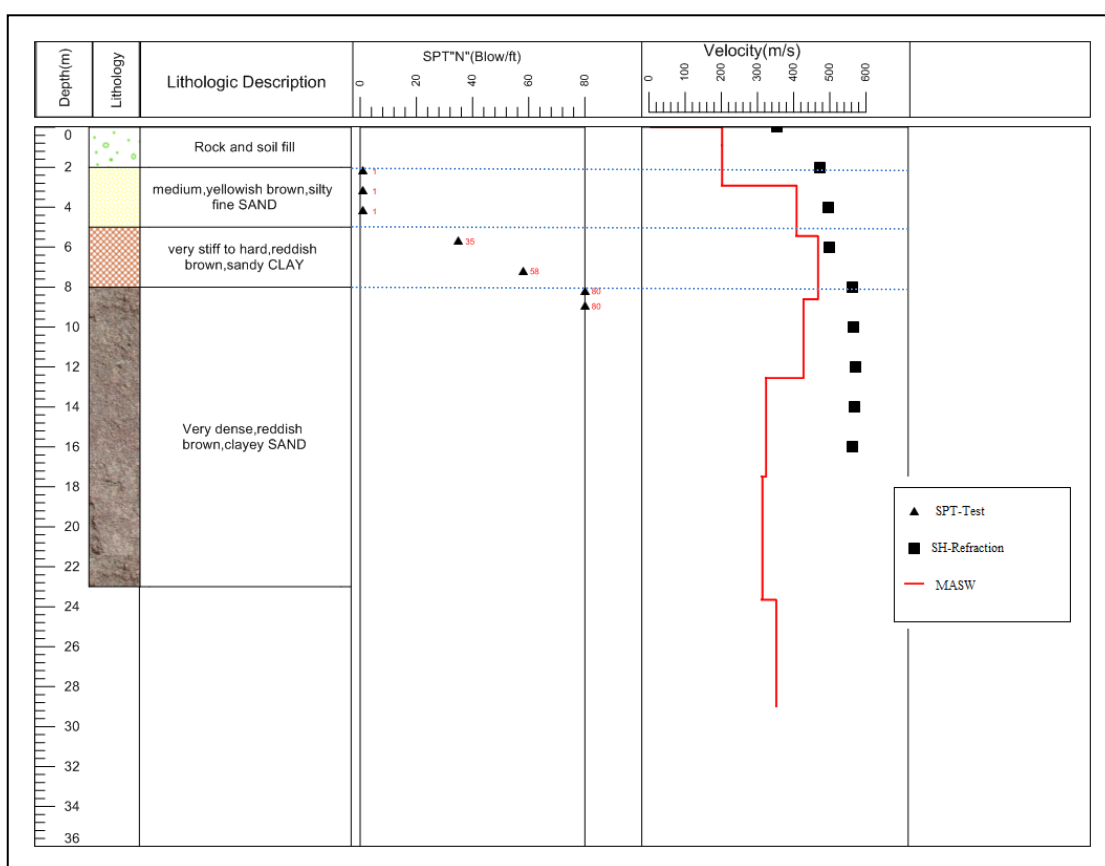


รูปที่ 3.5 แนวสำรวจบริเวณ Site11

ในจุดสำรวจนี้ได้ทำการสำรวจด้วยคลื่นไหวสะเทือน 2 วิธี คือ MASW และ แบบหักเห ผลที่ได้จากการสำรวจ (รูปที่ 3.6) พบว่า แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากการสำรวจทั้งสองวิธีสอดคล้องกับบ่อเจาะและข้อมูลการทดสอบ SPT (Standard Penetration test) ที่อยู่ในบริเวณจุดสำรวจ โดยในชั้นที่หนึ่งเป็นดินตะกอนสะสมตัวกันอย่างหลวมๆบนผิวดินมีความหนาประมาณ 2 เมตร ซึ่งจากแบบจำลองที่ได้จากวิธีสำรวจแบบหักเหมีความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 359 เมตร/วินาที ส่วนจากวิธี MASW มีความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 200 เมตร/วินาที ชั้นที่สองเป็นชั้นตะกอนทรายแป้งและชั้นดินเหนียวปนทรายค่อนข้างแข็งมีความหนาประมาณ 6 เมตร เมตร จากแบบจำลองที่ได้จากวิธีสำรวจแบบหักเหมีความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 459 - 483 เมตร/วินาที ส่วน

จากวิธี MASW มีความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 400 - 460 เมตร/วินาที และชั้นที่สามเป็นชั้นทรายปนดินเหนียวแข็ง จากแบบจำลองที่ได้จากวิธีสำรวจแบบหักเหมีความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 540 - 550 เมตร/วินาที ส่วนจากวิธี MASW มีความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 400 - 420 เมตร/วินาที ซึ่งจะเห็นได้ว่า ความเร็วคลื่นเฉือนจากทั้งสองวิธีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลจากหลายปัจจัย เช่น คุณภาพของข้อมูล ขั้นตอนการผกผัน (Inversion) เป็นต้น

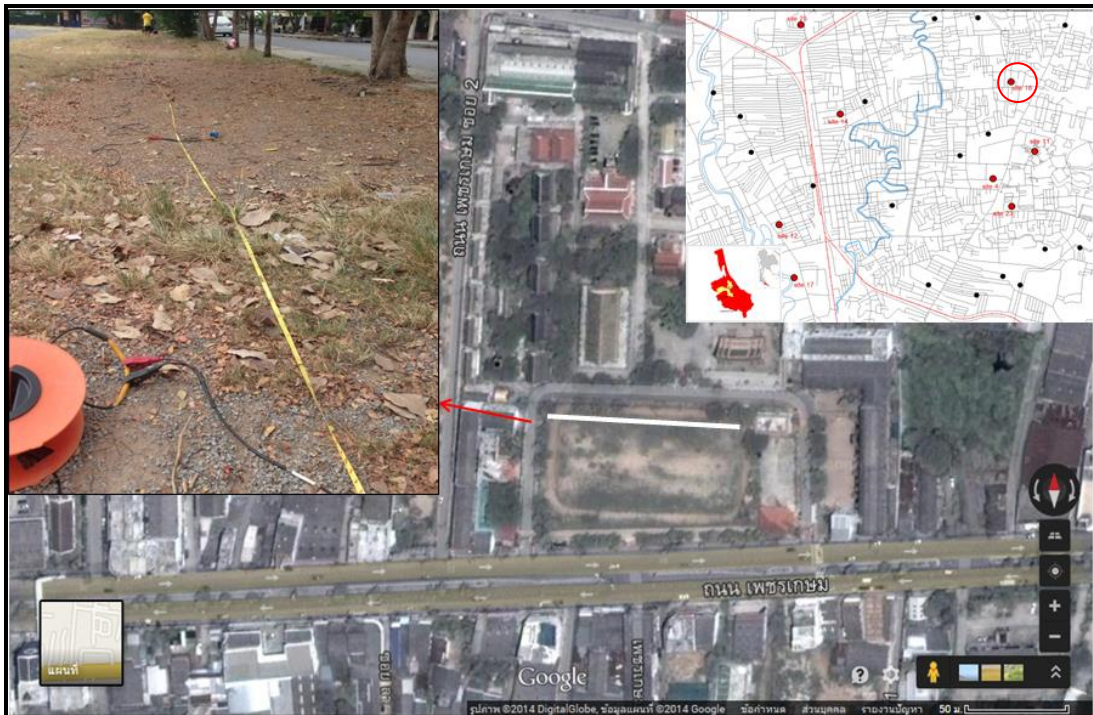
ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับ 30 เมตร (V_{s30}) ในบริเวณนี้มีค่าประมาณ 365 เมตร/วินาที ซึ่งสามารถจัดกลุ่มทางธรณีวิทยาโดยใช้ข้อกำหนด NEHRP อยู่ในกลุ่ม C (พวก very dense soil or soft rock)



รูปที่ 3.6 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลบริเวณ Site 11 (ข้อมูลหลุมเจาะจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์)

(2) Site 16

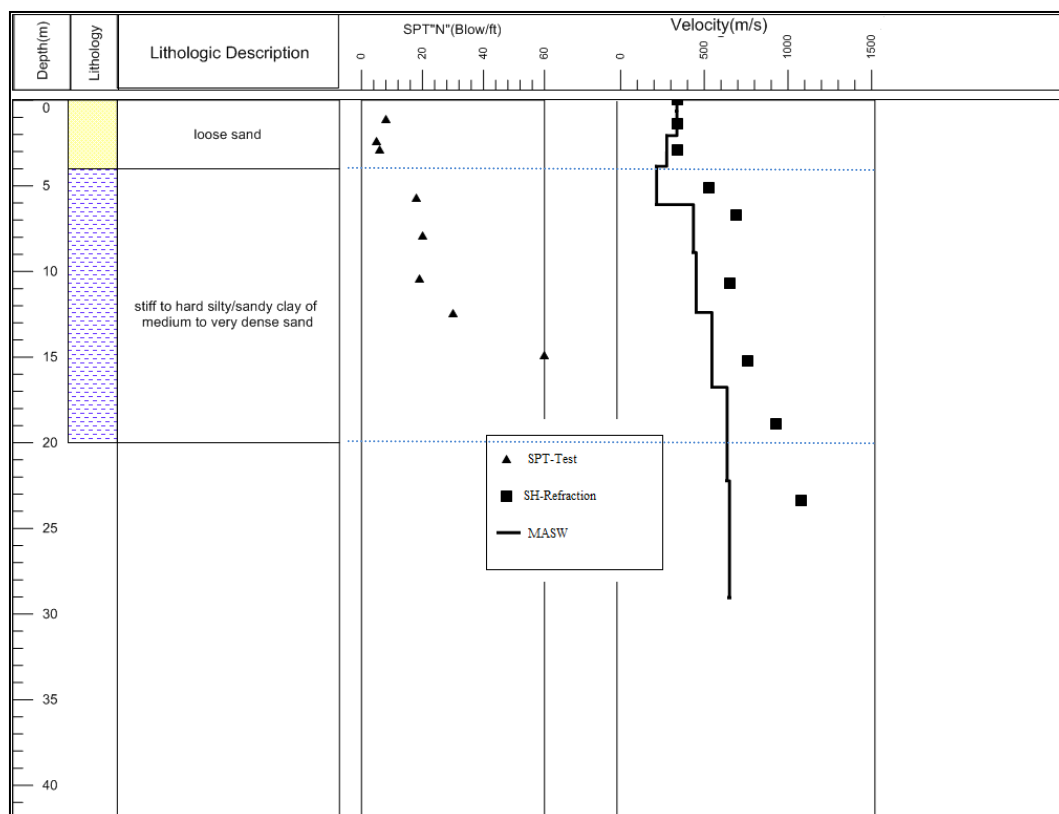
Site 16 อยู่ในบริเวณ โรงเรียนเทศบาล 3 (วัดคอกหงส์) โดยมีแนวการสำรวจในแนว ตะวันตก - ตะวันออก (รูปที่ 3.7) ธรณีวิทยาบริเวณนี้เป็นตะกอนสะสมตัวตามเชิงเขา ยุคควอเทอร์นารี (Q_c)



รูปที่ 3.7 แนวสำรวจบริเวณ Site 16

ในจุดสำรวจนี้ได้ทำการสำรวจด้วยคลื่นไหวสะเทือน 2 วิธี คือ MASW และ แบบหักเห ผลที่ได้จากการสำรวจ (รูปที่ 3.8) พบว่า แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากการสำรวจทั้งสองวิธีสอดคล้องกับบ่อเจาะและข้อมูลการทดสอบ SPT (Standard Penetration test) ที่อยู่ในบริเวณจุดสำรวจ โดยในชั้นที่หนึ่งเป็นดินตะกอนทรายสะสมตัวกันอย่างหลวมๆบนผิวดินมีความหนาประมาณ 4 เมตร ซึ่งจากแบบจำลองที่ได้จากวิธีสำรวจแบบหักเหมีความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 350 เมตร/วินาที ส่วนจากวิธี MASW มีความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 220 - 340 เมตร/วินาที ชั้นที่สองเป็นชั้นตะกอนทรายและชั้นดินเหนียวปนทรายค่อนข้างแข็งค่อนข้างหนา จากแบบจำลองที่ได้จากวิธีสำรวจแบบหักเหมีความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 540 - 950 เมตร/วินาที ส่วนจากวิธี MASW มีความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 437 - 744 เมตร/วินาที

ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับ 30 เมตร (V_{30}) ในบริเวณนี้มีค่าประมาณ 506 เมตร/วินาที ซึ่งสามารถจัดกลุ่มทางธรณีวิทยาโดยใช้ข้อกำหนด NEHRP อยู่ในกลุ่ม C (พวก very dense soil or soft rock)



รูปที่ 3.8 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลบริเวณ Site 16 (ข้อมูลหลุมเจาะจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์)

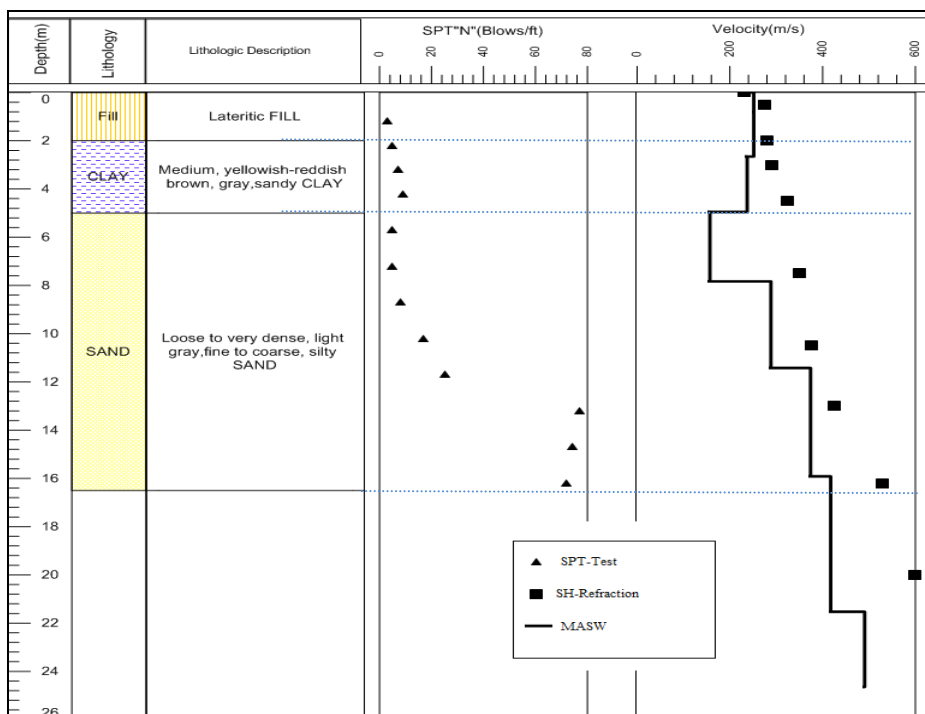
(3) Site 23

Site23 อยู่ในบริเวณ โรงขยะรีไซเคิล หอพักบุคลากรคณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยมีแนวในการสำรวจในแนวเหนือ - ใต้ (รูปที่ 3.9) ในจุดสำรวจนี้ได้ทำการสำรวจด้วยคลื่นไหวสะเทือน 2 วิธี คือ MASW และ แบบหักเหผลที่ได้จากการสำรวจ (รูปที่ 3.10) พบว่า แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากการสำรวจทั้งสองวิธีสอดคล้องกับบ่อเจาะและข้อมูลการทดสอบ SPT ที่อยู่ในบริเวณจุดสำรวจ โดยในชั้นที่หนึ่งเป็นดินตะกอนสะสมตัวกันอย่างหลวมๆบนผิวดินมีความหนาประมาณ 2 เมตร ซึ่งจากแบบจำลองที่ได้จากวิธีสำรวจแบบหักเหมีความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 300 เมตร/วินาที ส่วนจากวิธี MASW มีความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 250 เมตร/วินาที ชั้นที่สองเป็นชั้นดินเหนียวปนทรายมีความหนาประมาณ 3 เมตร จากแบบจำลองที่ได้จากวิธีสำรวจแบบหักเหมีความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 325 - 350 เมตร/วินาที ส่วนจากวิธี MASW มีความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 237 - 250 เมตร/วินาที และชั้นที่สามเป็นชั้นทรายแข็ง จากแบบจำลองที่ได้จากวิธีสำรวจแบบหักเหมีความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 375 - 600 เมตร/วินาที ส่วนจากวิธี MASW มีความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 288-489 เมตร/วินาที

ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับ 30 เมตร (V_s30) ในบริเวณนี้มีค่าประมาณ 363 เมตร/วินาที ซึ่งสามารถจัดกลุ่มทางธรณีวิทยาโดยใช้ข้อกำหนด NEHRP อยู่ในกลุ่ม C (พวก very dense soil or soft rock)



รูปที่ 3.9 แนวสำรวจบริเวณ Site 23



รูปที่ 3.10 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลบริเวณ Site 23 (ข้อมูลหลุมเจาะจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์)

(4) Site 4

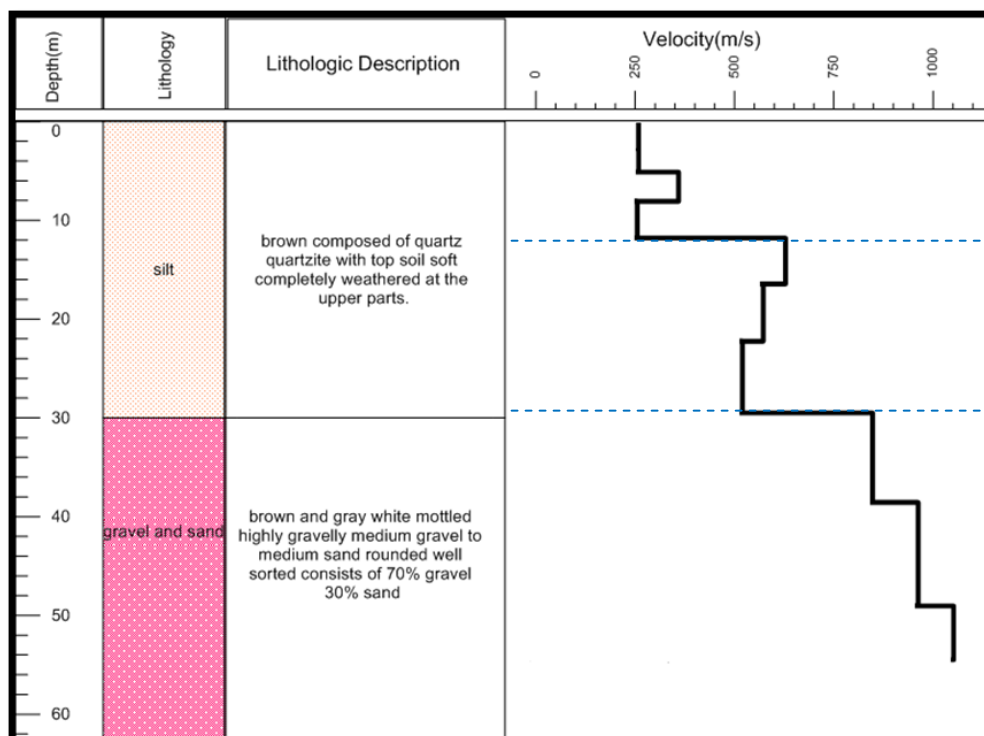
Site 4 อยู่บริเวณข้างห้างสรรพสินค้าเทสโกโลดส์ ตรงข้ามกับโรงพยาบาลสงขลานครินทร์ (รูปที่ 3.11) โดยจะอยู่ห่างจากแนวเขาคอหงส์ประมาณ 1800 เมตร ธรณีวิทยาของจุดสำรวจนี้เป็นตะกอนสะสมตัวตามเชิงเขา ยุคควอเทอร์นารี (Q₄)



รูปที่ 3.11 แนวสำรวจบริเวณ Site 4

ในจุดสำรวจนี้ได้ทำการสำรวจด้วยคลื่นไหวสะเทือน คือ MASW ผลที่ได้จากการสำรวจ (รูปที่ 3.12) พบว่า แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากการสำรวจสอดคล้องกับบ่อเจาะน้ำบาดาลในบริเวณใกล้เคียง ชั้นดินชั้นแรกที่มีความเร็วประมาณ 250 - 350 เมตร/วินาที น่าจะเป็นชั้นของดินชั้นบน (topsoil) ชั้นที่สองมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 500 - 600 เมตร/วินาที เป็นชั้นตะกอนทรายแป้ง (Silt) ในขณะที่ชั้นดินชั้นที่สามที่มีค่าความเร็ว 800 - 1,100 เมตร/วินาที เป็นชั้นของกรวด ทราย และเศษของหินทรายที่เกิดจากการผุพังอยู่กับที่ของหินทรายอยู่ที่ความลึกประมาณ 30 เมตร

ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับ 30 เมตร ($V_{s,30}$) ในบริเวณนี้มีค่าประมาณ 570 เมตร/วินาที ซึ่งสามารถจัดกลุ่มทางธรณีวิทยาโดยใช้ข้อกำหนด NEHRP อยู่ในกลุ่ม C (พวก very dense soil or soft rock)



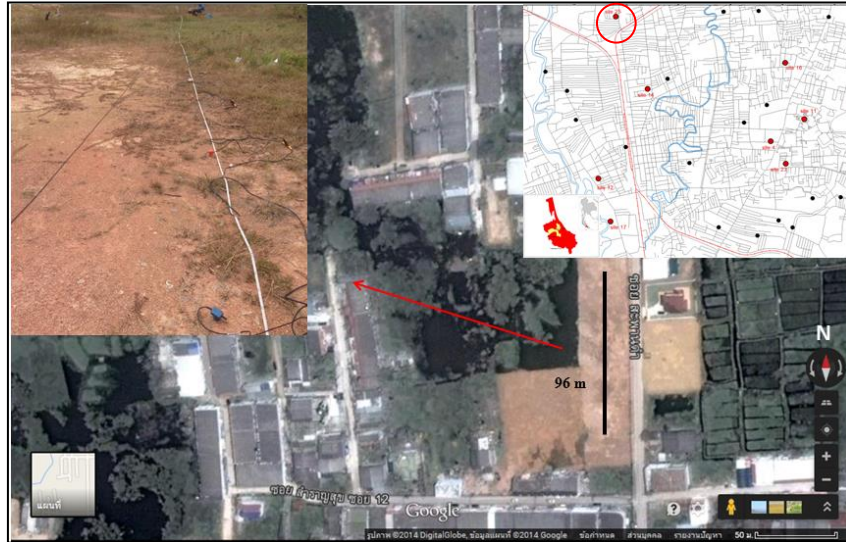
รูปที่ 3.12 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลบริเวณ Site 4 (ข้อมูลหลุมเจาะจากกรมทรัพยากรน้ำบาดาล)

(5) Site 25

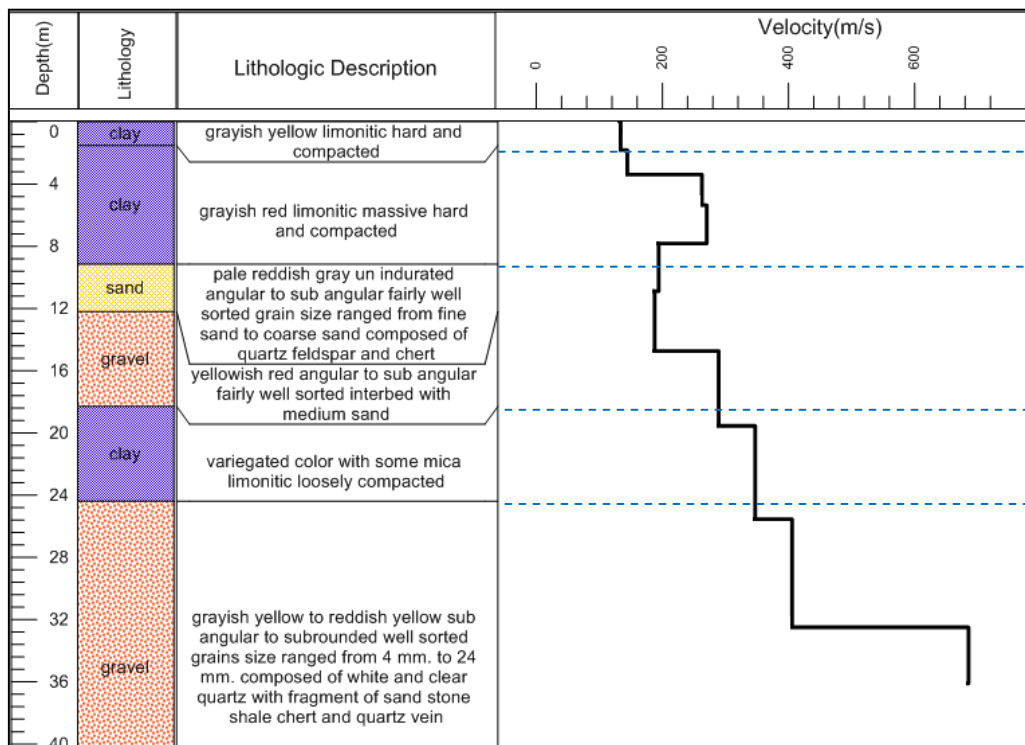
Site 25 อยู่บริเวณถนนรัตติกาล ซอยสะพานคำ ตำบลคลองแห โดยมีแนวในการสำรวจด้วยวิธี MASW ในแนวเหนือ - ใต้ (รูปที่ 3.13) ธรณีวิทยาบริเวณนี้เป็นตะกอนสะสมตัวตามที่ราบตะกอนน้ำพา ยุคควอเทอร์นารี (Q_4)

จากการสำรวจสามารถสร้างแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือน (รูปที่ 3.14) จากแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนซึ่งสอดคล้องกับบ่อเจาะน้ำบาดาลในบริเวณใกล้เคียงสามารถแปลความหมายชั้นดินได้คือ ชั้นดินชั้นแรกมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 140 เมตร/วินาที มีความหนาประมาณ 3 เมตร ชั้นที่สองมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 280 เมตร/วินาที มีความหนาประมาณ 5 เมตร ดินทั้งสองชั้นเป็นพวกดินเหนียว ชั้นที่สามมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 200-300 เมตร/วินาที มีความหนาประมาณ 12 เมตรเป็นชั้นกรวดปนทรายสลับด้วยชั้นดินเหนียวที่มีความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 360 - 400 เมตร/วินาที มีความหนาประมาณ 6 เมตรและชั้นสุดท้ายมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 680 เมตร/วินาทีเป็นชั้นกรวด ดิน และเศษหินที่ทับถมอัดตัวประสานกัน อยู่ที่ระดับความลึกจากผิวดินประมาณ 32 เมตร

ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับ 30 เมตร (V_s30) ในบริเวณนี้มีค่าประมาณ 270 เมตร/วินาที ซึ่งสามารถจัดกลุ่มทางธรณีวิทยาโดยใช้ข้อกำหนด NEHRP อยู่ในกลุ่ม D (พวก Stiff Soil)



รูปที่ 3.13 แนวสำรวจบริเวณ Site 25



รูปที่ 3.14 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลบริเวณ Site 25 (ข้อมูลหลุมเจาะจากกรมทรัพยากรน้ำบาดาล)

(6) Site 14

Site 14 อยู่ในบริเวณ โรงเรียนเทศบาล1 (เอ็งเสียงสามัคคี) โดยมีแนวในการสำรวจด้วยวิธี MASW ในแนวตะวันตก - ตะวันออก (รูปที่ 3.15) ธรณีวิทยาบริเวณนี้เป็นตะกอนสะสมตัวตามเชิงเขา ยุคควอเทอร์นารี (Q_c)



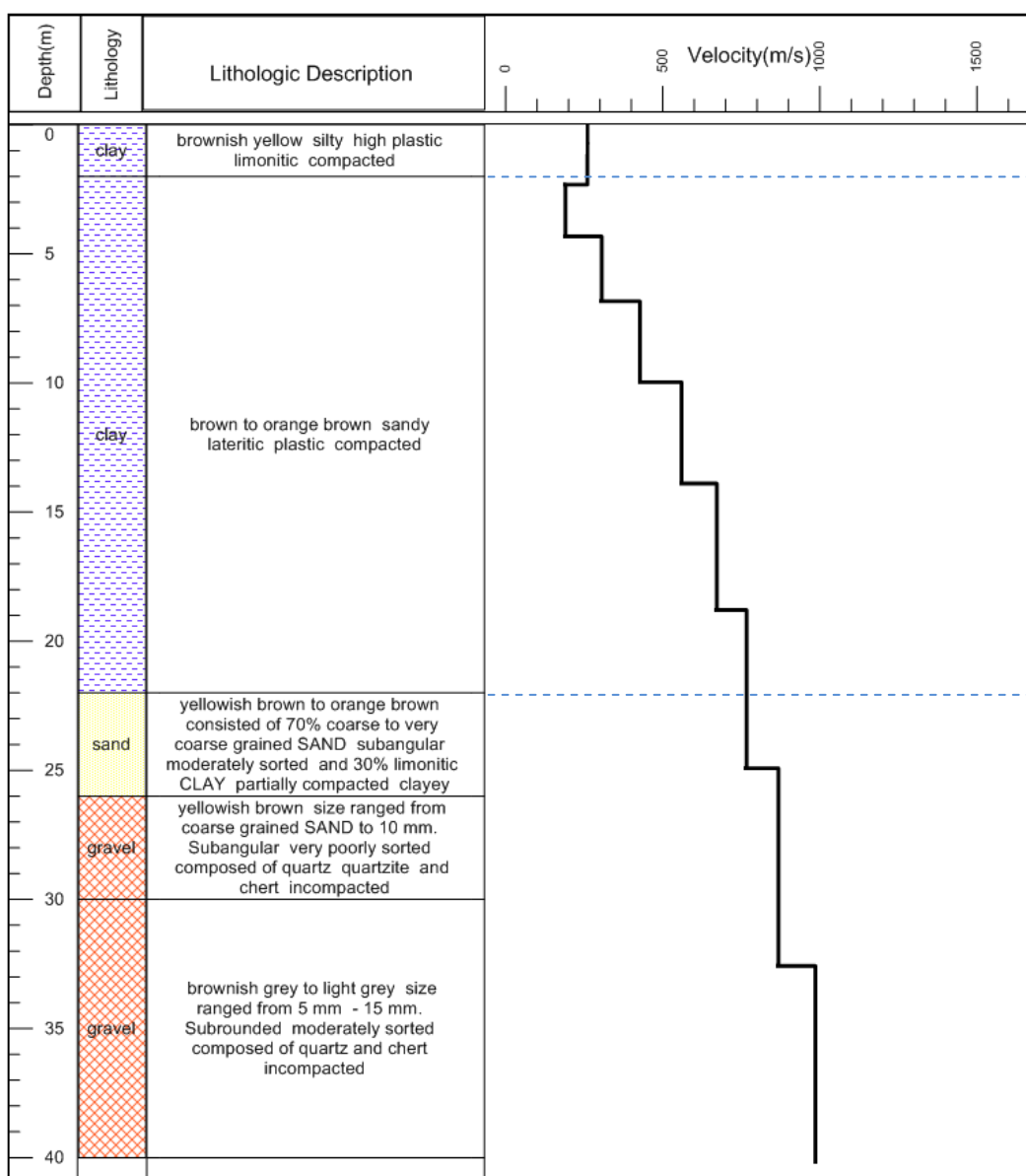
รูปที่ 3.15 แนวสำรวจบริเวณ Site14

จากการสำรวจสามารถสร้างแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนได้ดังรูปที่ 3.16 จากรูปที่ 3.16 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนสามารถแปลความหมายชั้นดินได้คือ ชั้นดินชั้นแรกมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 300 เมตร/วินาที มีความหนาประมาณ 2 เมตร ชั้นที่สองมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 300 - 550 เมตร/วินาที มีความหนาประมาณ 17 เมตร ชั้นที่สามมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 800 - 1000 เมตร/วินาที มีความหนาประมาณ 22 เมตร และชั้นสุดท้ายมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 1600 เมตร/วินาทีอยู่ที่ระดับความลึกจากผิวดินประมาณ 41 เมตร

เมื่อนำแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนไปเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลในโรงเรียนเทศบาล1 (เอ็งเสียงสามัคคี) จะได้ว่าชั้นบนเป็นพวกดินชั้นบนพวกดินเหนียวซึ่งมีความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 300 เมตร/วินาที ต่อมาเป็นชั้นดินเหนียวที่จับตัวกันแน่นกว่าด้านบนทำให้มีความเร็วคลื่นเฉือนมากกว่าจนถึงระดับความลึกประมาณ 19 เมตร ชั้นสุดท้ายเป็นชั้นของ

กรวดปนทรายซึ่งมีเศษหิน กรวด ดิน ที่ทับถมอัดตัวประสานกันแน่น ความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 800 - 1000 เมตร/วินาที

ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับ 30 เมตร (V_{s30}) ในบริเวณนี้มีค่าประมาณ 450 เมตร/วินาที ซึ่งสามารถจัดกลุ่มทางธรณีวิทยาโดยใช้ข้อกำหนด NEHRP อยู่ในกลุ่ม C (พวก very dense soil or soft rock)



รูปที่ 3.16 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลบริเวณ Site 14 (ข้อมูลหลุมเจาะจากกรมทรัพยากรน้ำบาดาล)

(7) Site 17

Site 17 อยู่ในบริเวณหลังร้านสยามอิเล็กทรอนิกส์ ถนนพลพิชัย โดยมีแนวในการสำรวจด้วยวิธี MASW ในแนวเหนือ - ใต้ (รูปที่ 3.17) ธรณีวิทยาบริเวณนี้เป็นรอยต่อระหว่างตะกอนสะสมตัวตามเชิงเขา (Q_1) กับตะกอนสะสมตัวตามที่ราบตะกอนน้ำพา (Q_2) ยุคควอเทอร์นารี

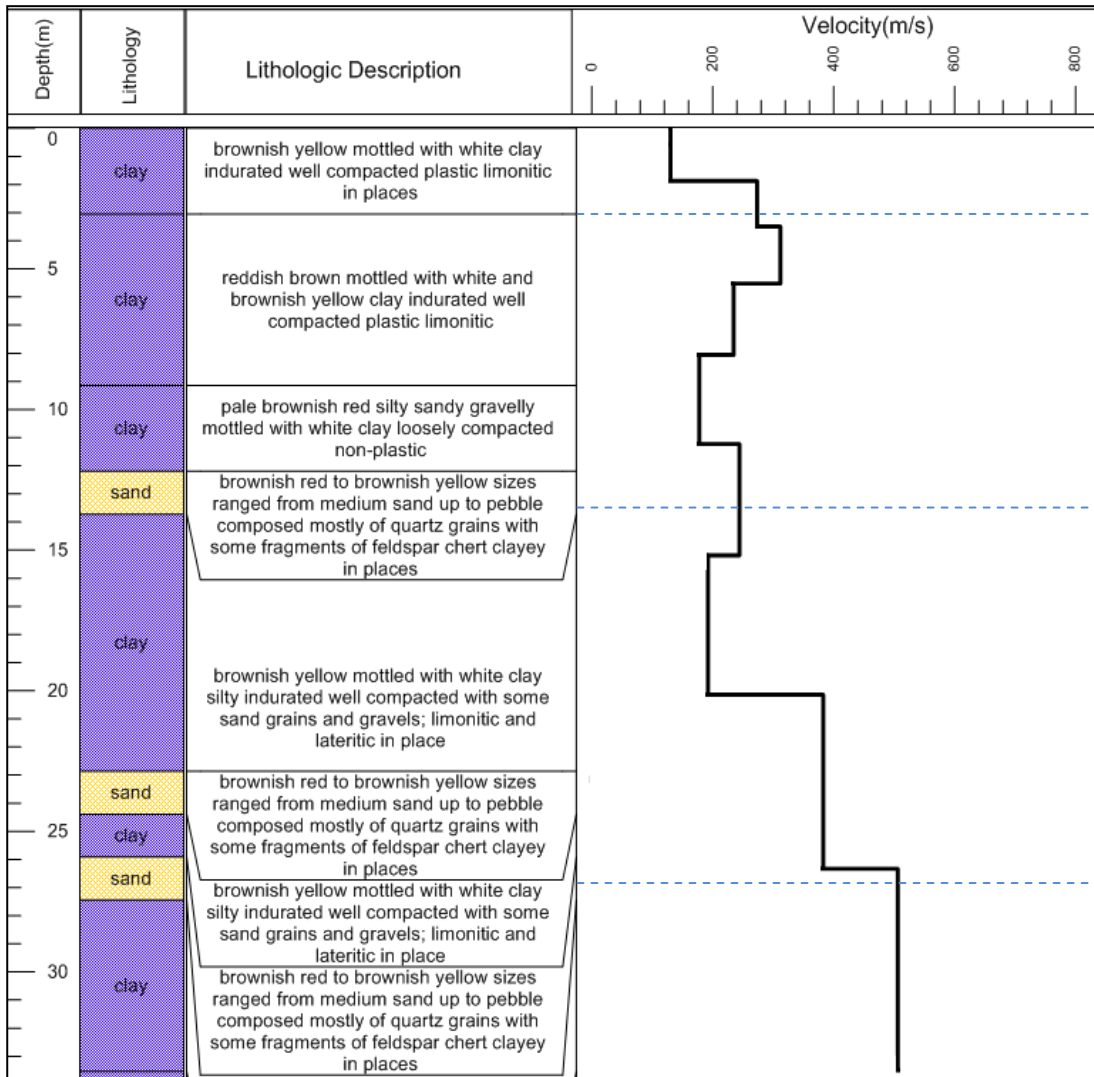


รูปที่ 3.17 แนวสำรวจบริเวณ Site17

จากการสำรวจสามารถสร้างแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนได้ดังรูปที่ 3.20 จากรูปที่ 3.18 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนสามารถแปลความหมายชั้นดินได้คือ ชั้นดินชั้นแรกมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 120 เมตร/วินาที มีความหนาประมาณ 2 เมตร ชั้นที่สองมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 180 - 320 เมตร/วินาที มีความหนาประมาณ 8 เมตร ชั้นที่สามมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 320 - 400 เมตร/วินาที มีความหนาประมาณ 12 เมตร และชั้นสุดท้ายมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 520 เมตร/วินาทีอยู่ที่ระดับความลึกจากผิวดินประมาณ 26 เมตร

เมื่อนำแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนไปเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลในโรงประปาหาดใหญ่ ได้ว่าชั้นดินชั้นแรกน่าจะเป็นพวกดินชั้นบน ซึ่งมีความเร็วคลื่นเฉือน 120 เมตร/วินาที ชั้นต่อมาจะเป็นพวกชั้นดินเหนียวแทรกด้วยชั้นทรายโดยมีความเร็วคลื่นเฉือนแตกต่างกันออกไปประมาณ 180 - 520 เมตร/วินาที โดยมีความหนาประมาณ 38 เมตร ซึ่งความเร็วจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและการอัดตัวกันของดินเหนียว

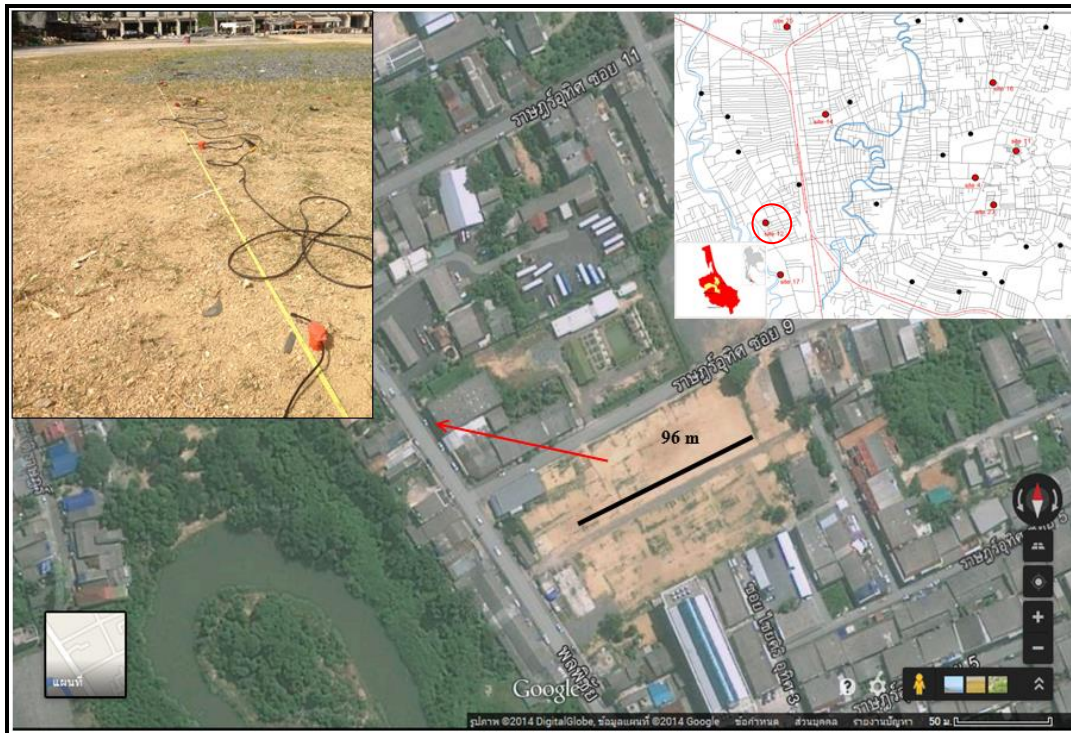
ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับ 30 เมตร (V_s30) ในบริเวณนี้มีค่าประมาณ 270 เมตร/วินาที ซึ่งสามารถจัดกลุ่มทางธรณีวิทยาโดยใช้ข้อกำหนด NEHRP อยู่ในกลุ่ม D (พวก Stiff Soil)



รูปที่ 3.18 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลบริเวณ Site 17 (ข้อมูลหลุมเจาะจากกรมทรัพยากรน้ำบาดาล)

(6) Site 12

Site 12 อยู่ในบริเวณถนนราษฎร์อุทิศ ซอย 9 ตรงกันข้ามร้าน กิสหวันแดง โดยมีแนวในการสำรวจด้วยวิธี MASW ในแนวตะวันตกเฉียงใต้ - ตะวันออกเฉียงเหนือ (รูปที่ 3.19) ธรณีวิทยาบริเวณนี้เป็นตะกอนสะสมตัวตามเชิงเขา (Q_c) ยุคควอเทอร์นารี

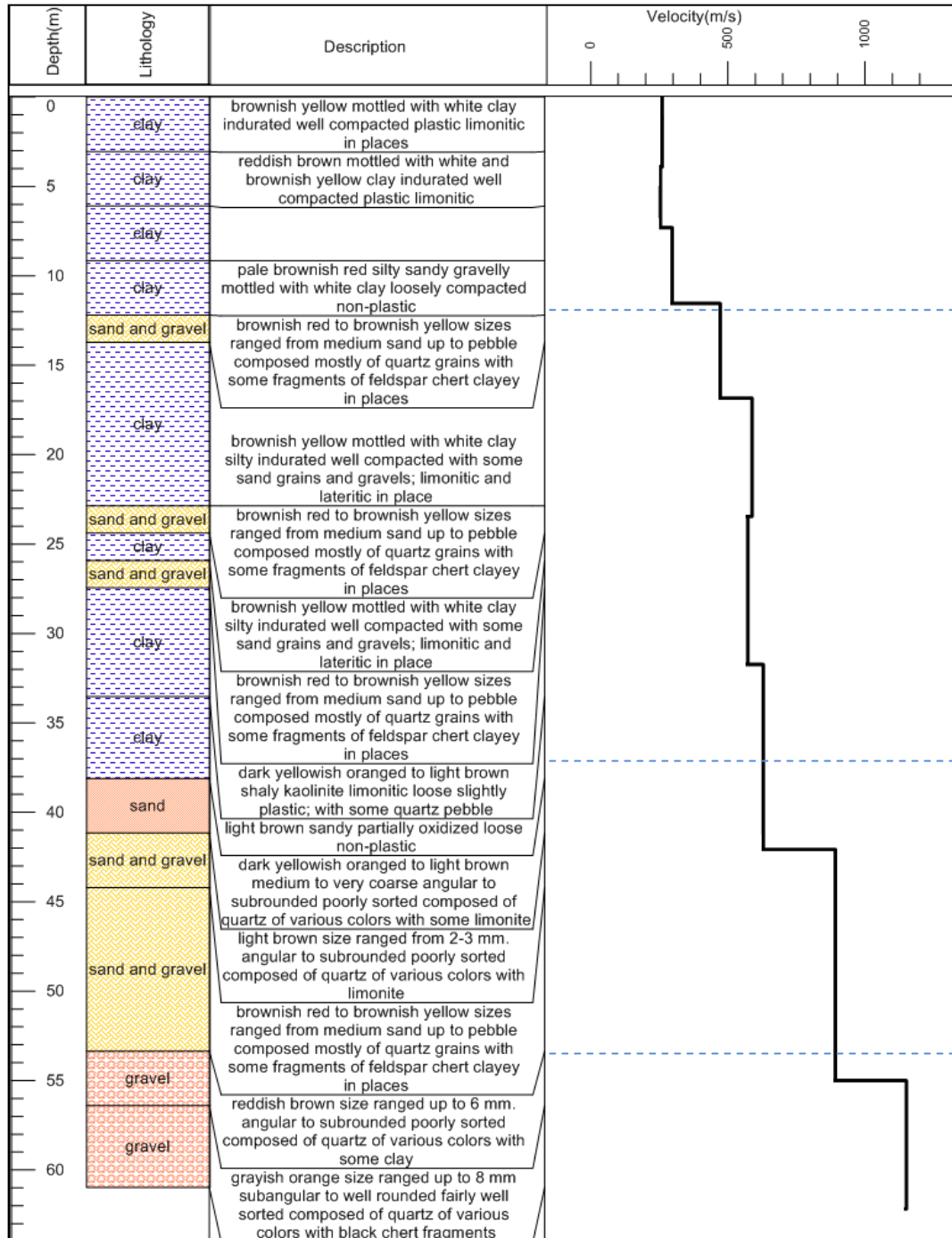


รูปที่ 3.19 แนวสำรวจบริเวณ Site12

จากการสำรวจสามารถสร้างแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนได้ดังรูปที่ 3.20 ซึ่งจากแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนสามารถแปลความหมายชั้นดินได้คือ ชั้นดินชั้นแรกมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 250 - 300 เมตร/วินาที มีความหนาประมาณ 12 เมตร ชั้นที่สองมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 480 - 600 เมตร/วินาที มีความหนาประมาณ 30 เมตร ชั้นที่สามมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 900 เมตร/วินาที มีความหนาประมาณ 13 เมตร และชั้นสุดท้ายมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 1200 เมตร/วินาที อยู่ในระดับความลึกจากผิวดินประมาณ 55 เมตร

ดังนั้นเมื่อนำแบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนไปเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลในโรงเรียนวิทยาลัยสมบูรณกุลกันยา พบว่าชั้นดินชั้นแรกจะเป็นพวกชั้นดินเหนียวโดยมีความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 250 - 300 เมตร/วินาที โดยมีความหนาประมาณ 12 เมตร ชั้นที่สองเป็นชั้นของดินเหนียวโดยมีชั้นทรายแทรกสลับ มีความหนาประมาณ 30 เมตร ต่อมาเป็นชั้นทรายเป็นกรวดที่จับตัวกันหนาประมาณ 12 เมตร และชั้นสุดท้ายเป็นกรวด ดิน และเศษหินที่ทับถมอัดตัวประสานกันแน่นอยู่ที่ความลึกประมาณ 53 เมตร

ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับ 30 เมตร (V_s30) ในบริเวณนี้มีค่าประมาณ 380 เมตร/วินาที ซึ่งสามารถจัดกลุ่มทางธรณีวิทยาโดยใช้ข้อกำหนด NEHRP อยู่ในกลุ่ม C (พวก very dense soil or soft rock)



รูปที่ 3.20 แบบจำลองความเร็วคลื่นเฉือนเปรียบเทียบกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลบริเวณ Site 12 (ข้อมูลหลุมเจาะจากกรมทรัพยากรน้ำบาดาล)

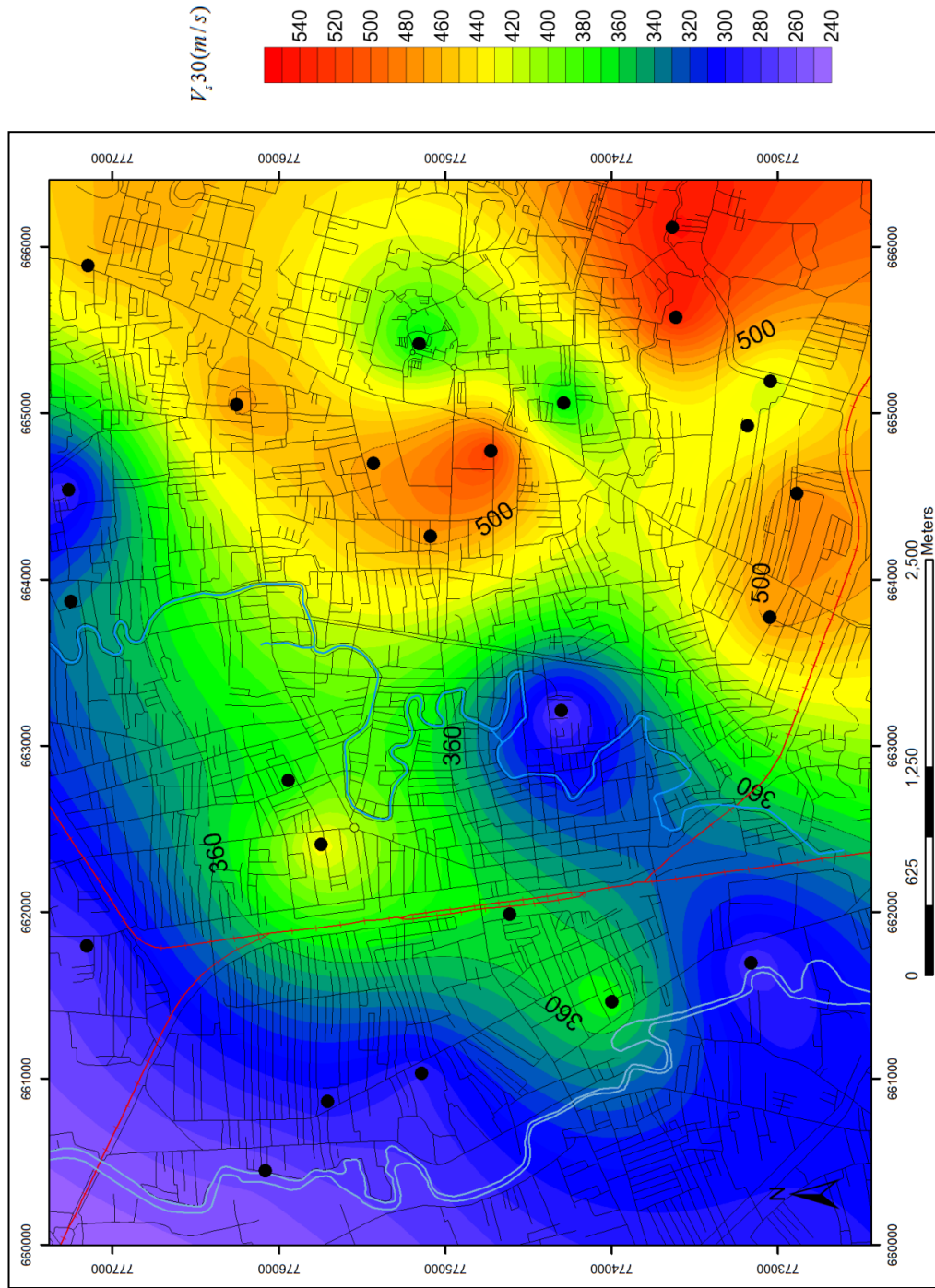
3.2 แผนที่ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร (v_{30})

แผนที่การกระจายค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร (รูปที่ 3.21) สร้างโดยการนำค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธี MASW ทั้งหมด 25 จุดสำรวจมาคำนวณด้วยสมการที่ 1.28

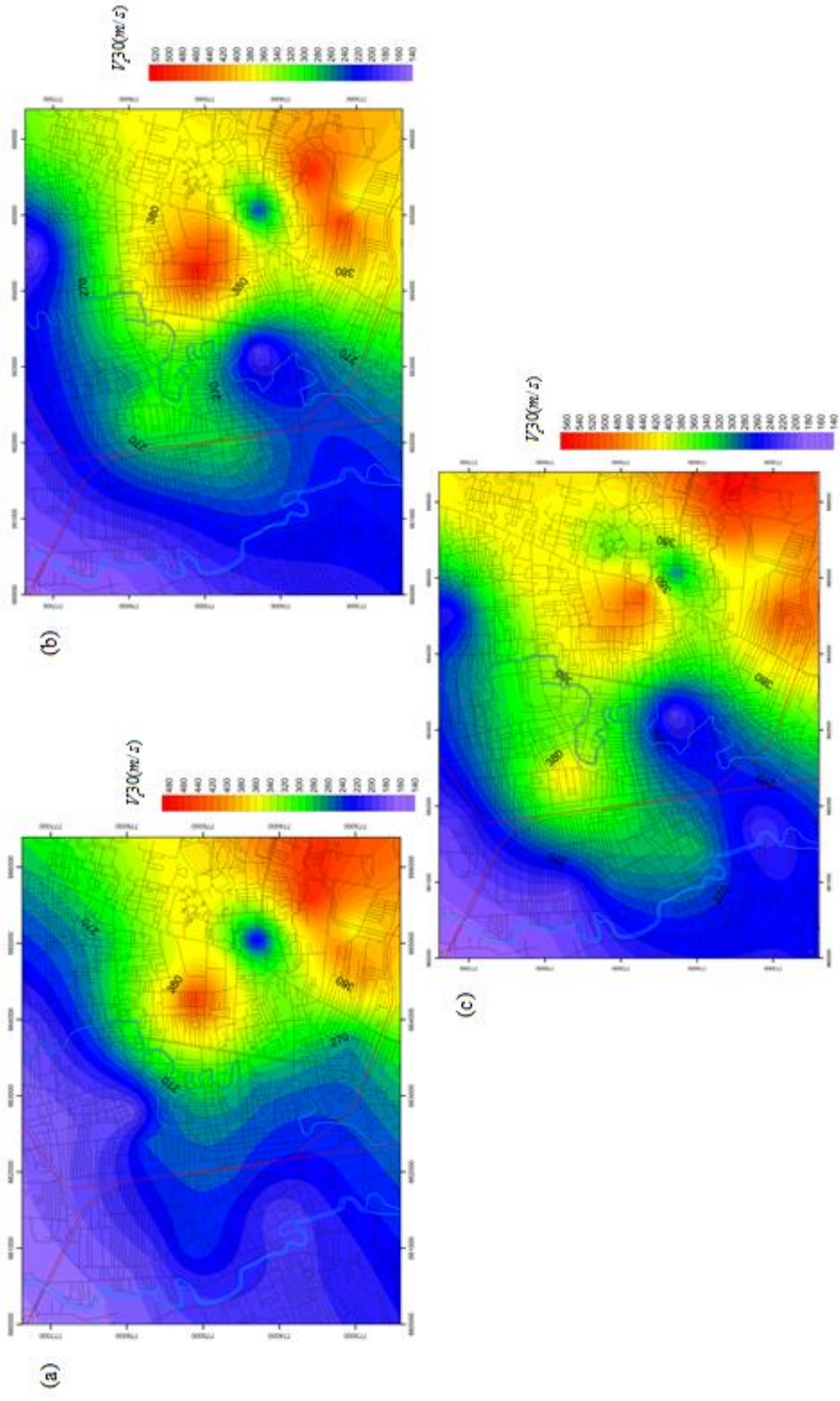
จากรูปที่ 3.21 สามารถแบ่งบริเวณค่าความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร ได้เป็น 3 กลุ่ม คือ บริเวณที่มีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตรสูง ปานกลาง และต่ำ ในบริเวณตอนบน ด้านตะวันตก และบางจุดในตอนกลางของพื้นที่ศึกษา (บริเวณสีน้ำเงิน) มีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตรค่อนข้างต่ำ คือ ประมาณ 240 - 330 เมตร/วินาที บริเวณตอนกลางและบางจุดในบริเวณด้านตะวันออก (บริเวณสีเขียว) มีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตรปานกลาง คือ ประมาณ 330 - 420 เมตร/วินาที และสุดท้ายบริเวณด้านตะวันออกและบางจุดบริเวณตอนกลาง (บริเวณสีเหลืองและสีแดง) มีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตรค่อนข้างสูง คือ ประมาณ 420 - 550 เมตร/วินาที

จากแผนที่การกระจายค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร พบว่าค่าความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตรในแต่ละบริเวณส่วนใหญ่ค่อนข้างสอดคล้องกับธรณีวิทยาของพื้นที่ นั่นคือ บริเวณที่มีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร สูง อยู่บริเวณด้านตะวันออกของพื้นที่ศึกษาติดกับแนวเขาคอหงส์และมีระดับหินฐานค่อนข้างดี โดยมีตะกอนพวกตะกอนสะสมตัวตามเชิงเขา ยุคควอเทอร์นารีปกคลุมอยู่ด้านบน ต่อมาบริเวณที่มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร ปานกลาง อยู่บริเวณตอนกลางของพื้นที่ศึกษาและมีลักษณะของตะกอนสะสมตัวตามเชิงเขา ยุคควอเทอร์นารีปกคลุมอยู่ด้านบนเช่นเดียวกับทางด้านตะวันออกแต่ความหนาของตะกอนมีมากกว่าทำให้ค่าความเร็วคลื่นเฉือนมีค่าน้อยกว่าด้านตะวันออก และสุดท้ายเป็นบริเวณที่มีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร ต่ำ อยู่บริเวณด้านตะวันตกและตอนกลางของพื้นที่ศึกษา เนื่องจากในบริเวณนี้มีชั้นตะกอนสะสมตัวตามที่ราบตะกอนน้ำพา ยุคควอเทอร์นารีปกคลุมอยู่ด้านบน ชั้นตะกอนค่อนข้างหนา ตะกอนทั้งหมดเกิดจากการพัดพาของคลองอยู่ตะเภาที่ไหลผ่าน

เพื่อที่จะแบ่งลักษณะธรณีวิทยาตามความลึกในพื้นที่ศึกษา สามารถใช้ค่าความเร็วคลื่นเฉือนโดยการสร้างแผนที่ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในแต่ละระดับความลึก คือ 5 เมตร 10 เมตร และ 20 เมตร ตามลำดับ (รูปที่ 3.22) โดยทั่วไปลักษณะทางธรณีวิทยาในบริเวณที่มีตะกอนเป็นชั้นหนา เช่น บริเวณที่ตะกอนสะสมตัวแบบที่ราบตะกอนน้ำพา จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนตามความลึกน้อยกว่าในบริเวณที่มีตะกอนเป็นชั้นดี ๆ



รูปที่ 3.21 แผนที่ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเหนือในระดัับความลึก 30 เมตร ในพื้นที่ศึกษา (จุดสีดำคือจุดสำรวจ)



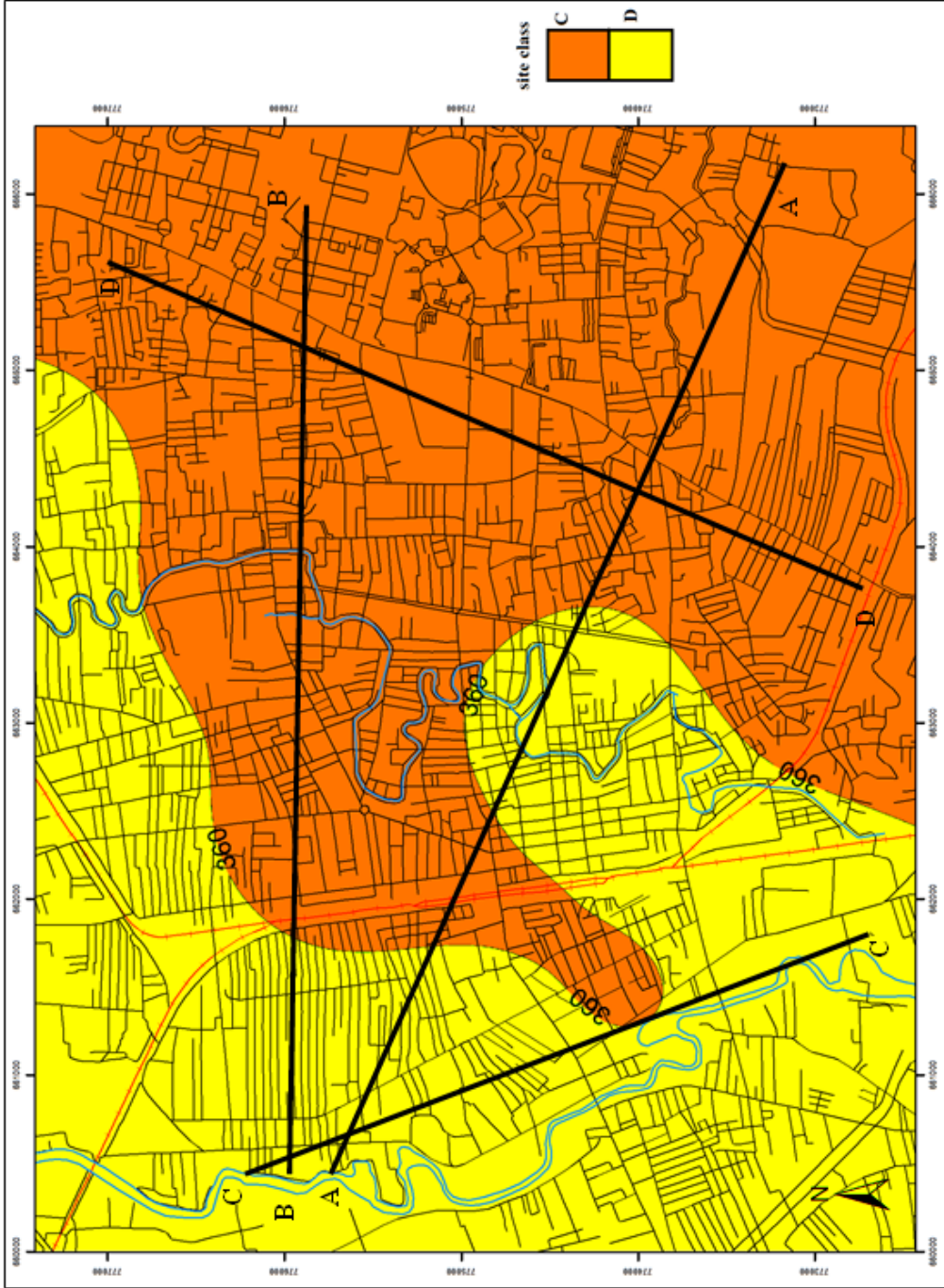
รูปที่ 3.22 ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเหนือในแต่ละระดับความลึกในพื้นที่ศึกษา (a) 5 เมตร (b) 10 เมตร (c) 20 เมตร

จากรูปที่ 3.22 ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนบริเวณผิวดินมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากดินชั้นบนจับตัวกันอย่างหลวมๆ และค่าความเร็วเพิ่มขึ้นตามความลึก โดยเฉพาะทางด้านตะวันออกของพื้นที่ศึกษา การเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วของคลื่นเฉือนตามความลึกจะมีมากกว่าด้านตะวันตก ซึ่งมีลักษณะเป็นแอ่งตะกอน ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 5 เมตร (รูปที่ 3.22(a)) มีค่าอยู่ระหว่าง 160 – 460 เมตร/วินาที โดยในบริเวณตะวันตกของพื้นที่ศึกษามีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 160-230 เมตร/วินาที ซึ่งจัดเป็นดินที่ค่อนข้างอ่อน (soft soil) ในระดับความลึก 5 เมตร ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 10 เมตร (รูปที่ 3.22(b)) มีค่าอยู่ระหว่าง 172 - 520 เมตร/วินาที ซึ่งจากรูปที่ 3.22(b) โดยบริเวณตอนกลางของพื้นที่ศึกษามีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 10 เมตรประมาณ 270 - 380 เมตร/วินาที ซึ่งจัดเป็นดินค่อนข้างแข็ง (stiff soil) ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 20 เมตร (รูปที่ 3.22(c)) มีค่าอยู่ระหว่าง 210 - 555 เมตร/วินาที ซึ่งจากรูปที่ 3.22(b) ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 20 เมตร ส่วนใหญ่จัดเป็นดินอัดกันแน่นมาก (very dense soil) เมื่อเปรียบเทียบกับในระดับความลึก 5 เมตร ยกเว้นตอนบนและด้านตะวันตกของพื้นที่ศึกษาซึ่งมีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนประมาณ 210 - 250 เมตร/วินาที ซึ่งจัดเป็นดินที่ค่อนข้างอ่อนในระดับความลึก 20 เมตร

3.3 แผนที่มีการจัดกลุ่มลักษณะทางธรณีวิทยาโดยใช้ข้อกำหนดของ NEHRP

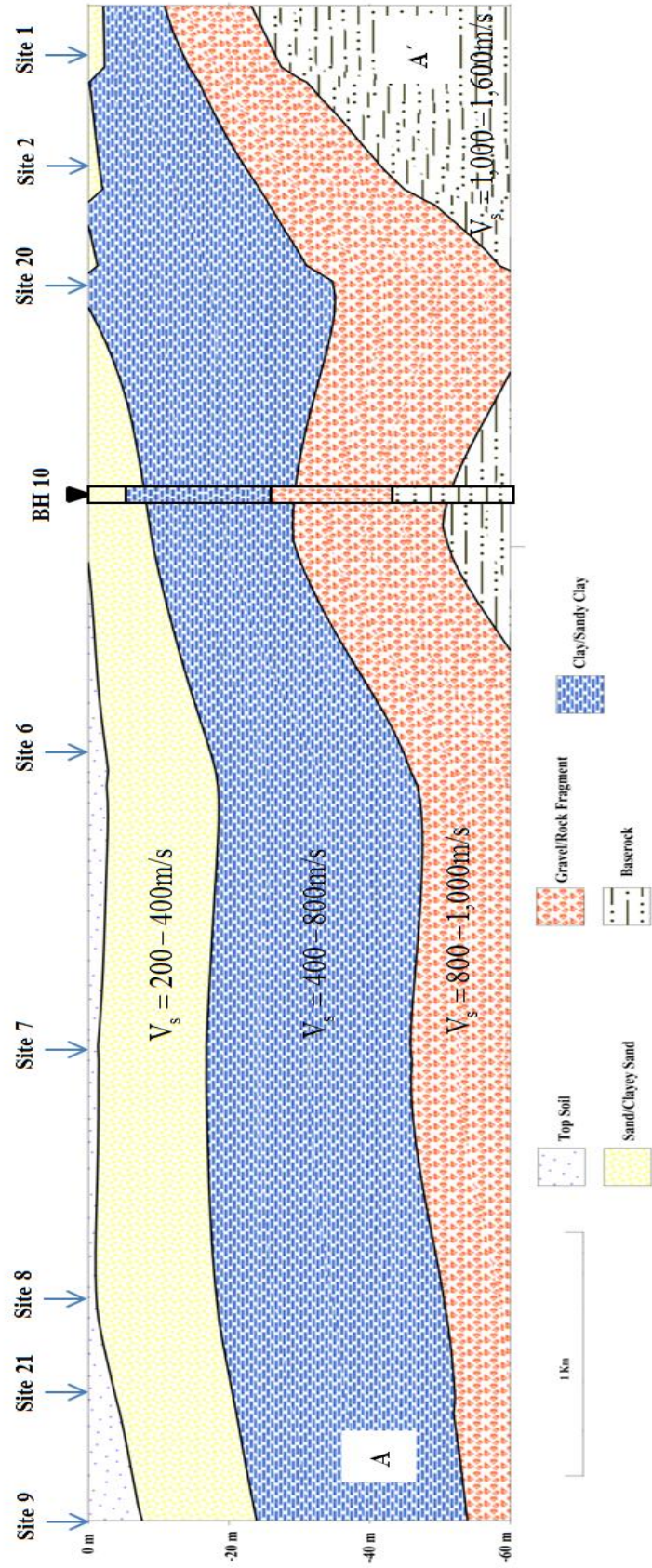
แผนที่มีการจัดกลุ่มลักษณะทางธรณีวิทยาโดยใช้ข้อกำหนดของ NEHRP แสดงดังรูปที่ 3.23 ซึ่งจากรูปสามารถแบ่งธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาตามข้อกำหนดของ NEHRP ได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร 180 - 360 เมตร/วินาที จัดอยู่ในกลุ่ม D นั่นคือ พวดินที่ค่อนข้างแข็ง (stiff soil) กลุ่มที่มีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับ 30 เมตร 360 - 760 เมตร/วินาที จัดอยู่ในกลุ่ม C นั่นคือ พวดินที่อัดตัวกันแน่นมาก (very dense soil) และหินแข็งที่ฝังอยู่กับที่ (soft rock)

จากรูปที่ 3.23 การจัดกลุ่มลักษณะทางธรณีวิทยาโดยใช้ข้อกำหนดของ NEHRP สอดคล้องกับธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา บริเวณที่มีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตรค่อนข้างสูง (กลุ่ม C) อยู่ทางด้านตะวันออกและตอนกลางของพื้นที่ศึกษา ซึ่งเป็นบริเวณที่ชั้นของหินฐานอยู่ในระดับตื้นและชั้นตะกอนที่ปกคลุมอยู่ด้านบนไม่หนา บริเวณที่มีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตรค่อนข้างต่ำ (กลุ่ม D) อยู่ด้านตะวันตกและด้านบนของพื้นที่ศึกษา ดังนั้นจากแผนที่มีการจัดกลุ่มลักษณะทางธรณีวิทยา บริเวณที่มีค่าเฉลี่ยความเร็วในกลุ่ม D (บริเวณตอนบนและด้านตะวันตก) น่าจะมีโอกาสเกิดการขยายขนาดของคลื่นแผ่นดินไหวระยะไกลมากกว่ากลุ่ม C (บริเวณตอนกลางและด้านตะวันออก)

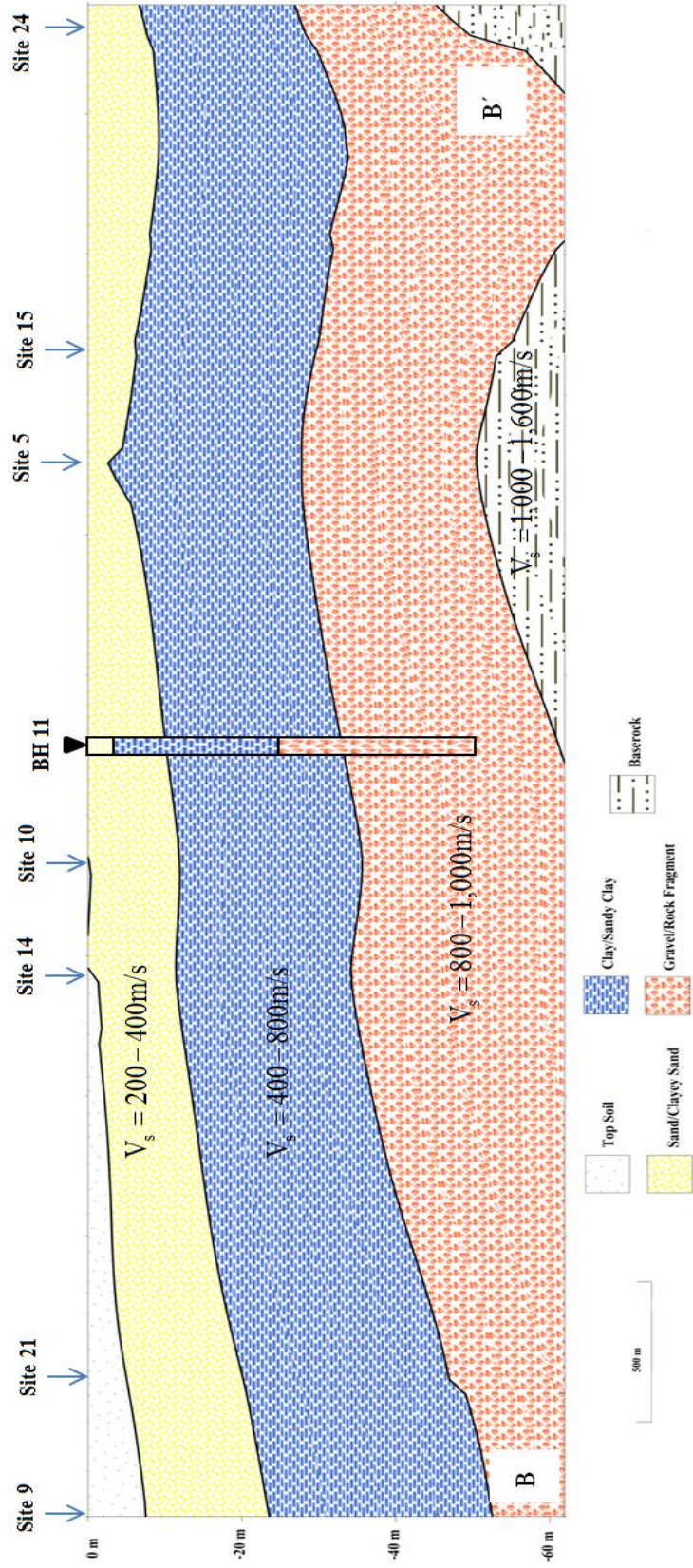


รูปที่ 3.2.3 แผนที่การจัดกลุ่มลักษณะทางธรณีวิทยาโดยใช้อัตราการกัดกร่อนของ NEHRP ในพื้นที่ศึกษา หมายถึง เห็นกับคือแนวตัดขวางลักษณะทางธรณีวิทยา โดย
ใช้ความเร็วคลื่นเฉือน

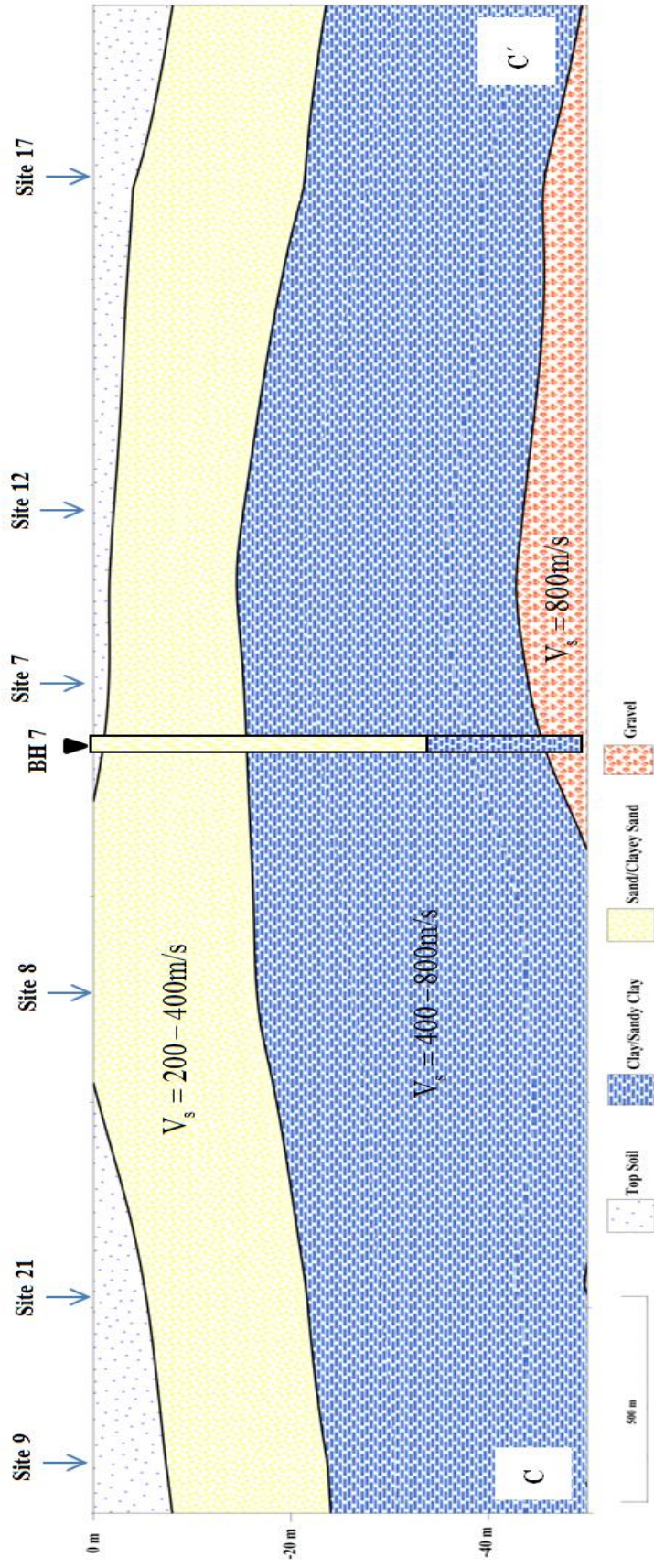
จากข้อมูลค่าความเร็วคลื่นเฉือนและข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลในพื้นที่ศึกษา สามารถนำมาสร้างเป็นภาพตัดขวางลักษณะทางธรณีวิทยาได้ผิวดินตามแนว A-A', B-B', C-C' และ D-D' (รูปที่ 3.23) ภาพตัดขวางทางธรณีวิทยาแนว A-A' (รูปที่ 3.24) ตัดขวางในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ - ตะวันออกเฉียงใต้ และแนว B-B' (รูปที่ 3.25) ตัดขวางในแนวตะวันตก - ตะวันออก เมื่อเปรียบเทียบชั้นดินกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลที่อยู่บนแนวตัดขวางสามารถแบ่งชั้นดินได้ออกเป็น 5 ชั้นหลักๆ คือ ชั้นบนสุดน่าจะเป็นดินชั้นบนซึ่งมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนต่ำ ชั้นที่สองน่าจะเป็นชั้นตะกอนทราย และทรายปนดินเหนียว ซึ่งปรากฏเป็นชั้นหนาในด้านตะวันตกของพื้นที่ศึกษา ชั้นที่สามน่าจะเป็นชั้นดินเหนียวและดินเหนียวปนทราย ซึ่งปรากฏเป็นชั้นหนาทงด้านตะวันตกของพื้นที่ศึกษาเช่นกัน ชั้นที่สี่น่าจะเป็นชั้นกรวด และเศษหินซึ่งเกิดจากการผุพังอยู่กับที่ของหินฐาน ชั้นล่างสุดน่าจะเป็นชั้นของหินฐานซึ่งมีความเร็วคลื่นเฉือนสูง ปรากฏอย่างชัดเจนทางด้านตะวันออกของพื้นที่ศึกษาซึ่งติดกับแนวเขาคอหงส์ ภาพตัดขวางทางธรณีวิทยาแนว C-C' (รูปที่ 3.26) และแนว D-D' (รูปที่ 3.27) ตัดขวางในแนวเหนือ - ใต้ทางด้านตะวันตกและตะวันออกของพื้นที่ศึกษาตามลำดับ แนว C-C' เมื่อเปรียบเทียบชั้นดินกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลที่อยู่บนแนวตัดขวางสามารถแบ่งชั้นดินได้ออกเป็น 4 ชั้นหลักๆ คือ ชั้นบนสุดน่าจะเป็นดินชั้นบน ชั้นที่สองน่าจะเป็นชั้นตะกอนทราย และทรายปนดินเหนียว ชั้นที่สามน่าจะเป็นชั้นดินเหนียวและดินเหนียวปนทราย ชั้นล่างสุดน่าจะเป็นชั้นกรวด และเศษหิน ซึ่งจากภาพตัดขวางแนวนี้อาจปรากฏชั้นของหินฐาน แสดงว่า บริเวณตะวันตกของพื้นที่ศึกษามีความหนาของชั้นตะกอนมาก และชั้นของหินฐานอยู่ลึกมากกว่า 60 เมตร ชั้นตะกอนที่สะสมตัวบริเวณนี้เป็นตะกอนที่ราบน้ำพา ยุคควอเทอร์นารี แนว D-D' อยู่ทางตะวันออกของพื้นที่ศึกษาเมื่อเปรียบเทียบชั้นดินกับข้อมูลหลุมเจาะน้ำบาดาลที่อยู่บนแนวตัดขวางสามารถแบ่งชั้นดินได้ออกเป็น 4 ชั้นหลักๆ คือ ชั้นแรกน่าจะเป็นชั้นตะกอนทราย และทรายปนดินเหนียว ชั้นที่สองน่าจะเป็นชั้นดินเหนียวและดินเหนียวปนทราย ชั้นที่สามน่าจะเป็นชั้นกรวด และเศษหินซึ่งเกิดจากการผุพังอยู่กับที่ของหินฐาน และชั้นล่างสุดน่าจะเป็นชั้นของหินฐาน ซึ่งจากภาพตัดขวางแนวนี้อาจปรากฏชั้นของหินฐานชัดเจนในระดับความลึกประมาณ 38 - 50 เมตร เนื่องจากแนวภาพตัดขวางแนวนี้อยู่ห่างจากแนวเขาคอหงส์ไม่มาก ทำให้ชั้นตะกอนไม่หนา และชั้นของหินฐานอยู่ในระดับที่ตื้นกว่า เมื่อเปรียบเทียบแนวภาพตัดขวาง C-C'



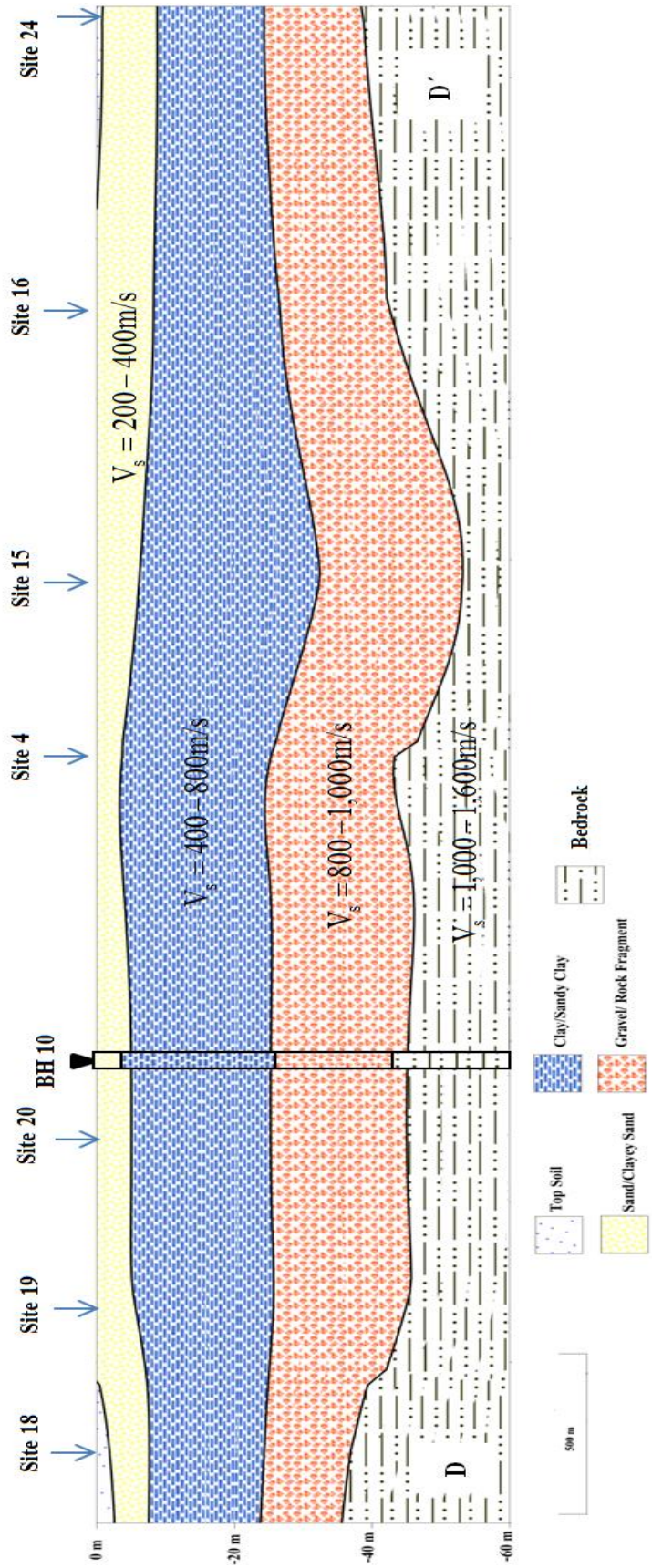
รูปที่ 3.24 ภาพตัดขวางลักษณะทางธรณีวิทยาในแนว A-A'



รูปที่ 3.25 ภาพตัดขวางลักษณะทางธรณีวิทยาในแนว B-B'



รูปที่ 3.2.6 ภาพตัดขวางลักษณะทางธรณีวิทยาในแนว C-C'



รูปที่ 3.27 ภาพตัดขวางลักษณะทางธรณีวิทยาในแนว D-D'

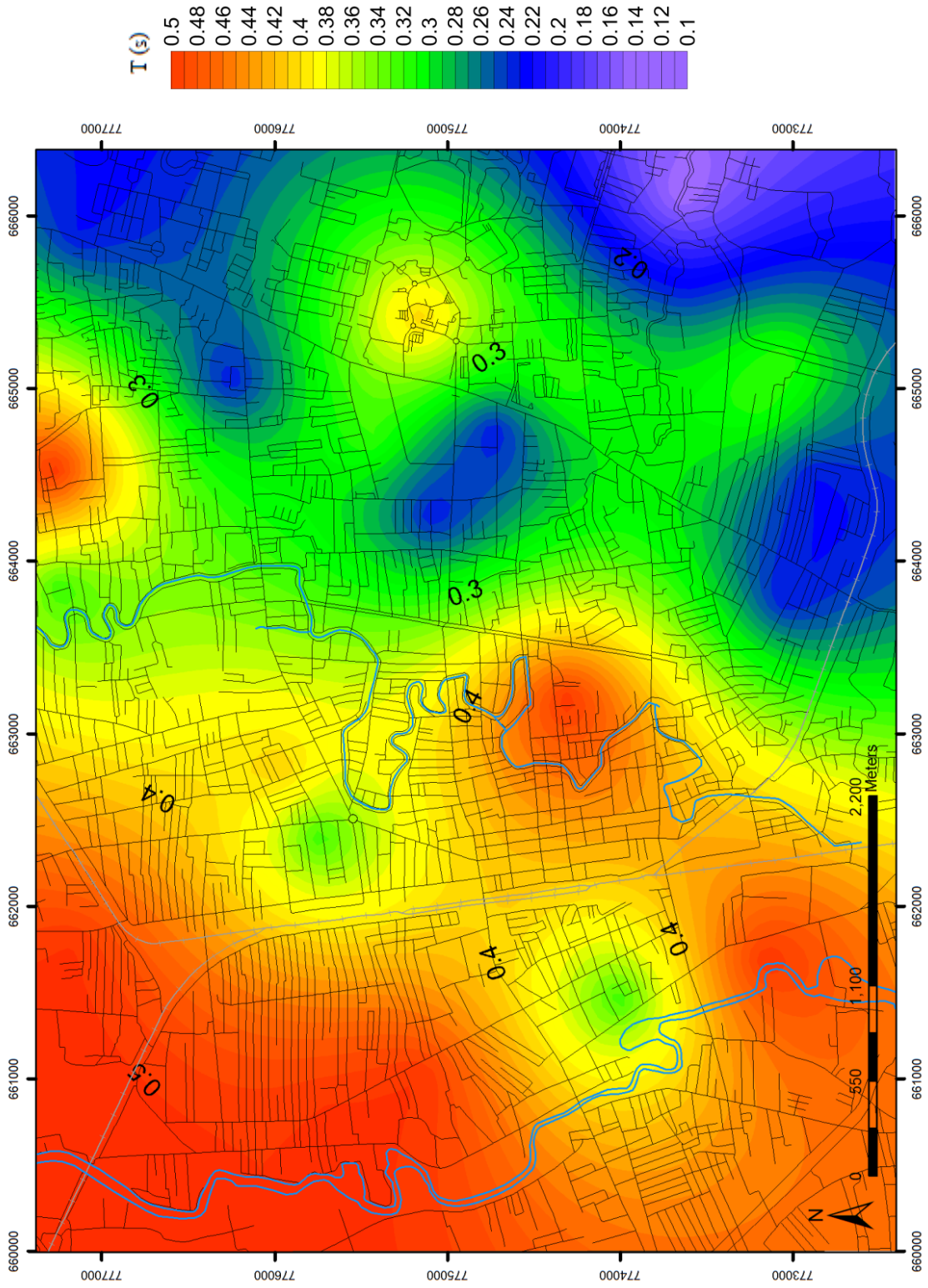
3.4 แผนทีคาบอิทธิพลหลักของพื้นที่ศึกษา

แผนทีคาบอิทธิพลหลักของพื้นที่ศึกษา (รูปที่ 3.28) คำนวณจากสมการที่ 1.26 แต่ใช้ข้อมูลความหนาของชั้นดินและค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนที่ระดับความลึก 30 เมตรจากจุดสำรวจด้วยวิธี MASW ทั้ง 25 จุด จากรูปที่ 3.28 พบว่าคาบอิทธิพลหลักของพื้นที่ศึกษาอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.5 s (ความถี่ธรรมชาติ 2 ถึง 10 Hz) บริเวณทางด้านตะวันตกของพื้นที่ศึกษามีค่าคาบอิทธิพลหลักค่อนข้างต่ำประมาณ 0.1 ถึง 0.3 s (ความถี่ธรรมชาติ 3.33 ถึง 10 Hz) เนื่องมาจากพื้นที่ในบริเวณนี้ติดกับแนวเขาคอหงส์ ทำให้ชั้นตะกอนค่อนข้างบางและมีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนค่อนข้างสูง ในบริเวณตอนกลางและด้านตะวันตกของพื้นที่ศึกษามีค่าคาบอิทธิพลหลักค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับด้านตะวันออก คือมีค่าประมาณ 0.4 ถึง 0.5 s (ความถี่ธรรมชาติ 2 ถึง 2.5 Hz) เนื่องจากชั้นตะกอนในบริเวณนี้ค่อนข้างหนา โดยเฉพาะทางด้านตะวันตกของพื้นที่ศึกษาซึ่งมีชั้นตะกอนที่หนาและค่าความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่าบริเวณอื่นในพื้นที่ศึกษา ทำให้ค่าคาบอิทธิพลหลักมีค่าสูงคือประมาณ 0.5 s นอกจากนี้โดยทั่วไปแล้ว พลศาสตร์ของตัวอาคารและสิ่งก่อสร้างนั้นยังมีอิทธิพลต่อระดับความรุนแรงของการสั่นสะเทือนเมื่อเกิดแผ่นดินไหวเช่นกัน เนื่องจากถ้าคาบธรรมชาติของตัวอาคารมีค่าเท่ากับคาบอิทธิพลหลักของชั้นดินจะเกิดการกำทอนและเพิ่มระดับความเสียหายของตัวอาคาร โดยคาบธรรมชาติของตัวอาคารสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1.27 ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 คาบธรรมชาติ (คาบอิทธิพลหลัก) ของแต่ละโครงสร้างอาคาร (Di Julio, 2001)

ประเภทของอาคาร	คาบธรรมชาติ (s)
1 ชั้น	0.1
2 ชั้น	0.2
3-4 ชั้น	0.3-0.4
5 ชั้น	0.5
10 ชั้น	1.0

ดังนั้นจากรูปที่ 3.28 และตารางที่ 3.3 แสดงว่าในบริเวณด้านตะวันออกของพื้นที่ศึกษาโครงสร้างอาคารที่มีความสูง 1-3 ชั้น มีความเสี่ยงจะเกิดการกำทอนระหว่างชั้นดินและโครงสร้างอาคาร บริเวณตอนกลางของพื้นที่ศึกษาโครงสร้างอาคารที่มีความสูง 3 ชั้นมีความเสี่ยงจะเกิดการกำทอนระหว่างชั้นดินและโครงสร้างอาคาร บริเวณด้านตะวันตกโครงสร้างอาคารที่มีความสูง 4-5 ชั้นมีความเสี่ยงจะเกิดการกำทอนระหว่างชั้นดินและโครงสร้างอาคาร



รูปที่ 3.28 แผนที่ค่าสถิติพลศาสตร์ของพื้นที่ศึกษา

บทที่ 4

สรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผล

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาโครงสร้างใต้ผิวดินและหาความเร็วคลื่นเฉือนจากการวิเคราะห์ข้อมูลและสำรวจด้วยวิธีการ MASW ทั้งหมด 25 จุดสำรวจในพื้นที่ตัวเมืองหาดใหญ่ เพื่อจำแนกลักษณะทางธรณีวิทยาที่ตอบสนองทางด้านแผ่นดินไหวจากค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร

ผลการศึกษาความเร็วคลื่นเฉือน ในพื้นที่ศึกษา พบว่า เมื่อนำค่าความเร็วคลื่นเฉือนและความหนาของชั้นดินแต่ละชั้น มาคำนวณค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร สร้างเป็นแผนที่เส้นชั้น (contour map) ของค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตร และแผนที่การจัดกลุ่มลักษณะทางธรณีวิทยาโดยใช้ข้อกำหนดของ NEHRP สรุปได้ว่าบริเวณทางตอนกลางและด้านตะวันออกของพื้นที่ศึกษาซึ่งติดกับแนวเขาคอหงส์มีตะกอนสะสมตัวตามเชิงเขาชุกควอเตอร์นารีปกคลุมอยู่ชั้นบนและชั้นหินฐานอยู่ค่อนข้างตื้นทำให้มีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตรค่อนข้างสูงประมาณ 363 - 592 เมตร/วินาที จัดกลุ่มลักษณะทางธรณีวิทยาอยู่ในกลุ่ม C หรือดินที่อัดตัวกันแน่นมาก (very dense soil) ตามข้อกำหนดของ NEHRP ส่วนบริเวณด้านบนและด้านตะวันตกของพื้นที่ศึกษา ซึ่งมีตะกอนสะสมตัวตามที่ราบตะกอนน้ำพาปกคลุมอยู่ด้านบนและค่อนข้างหนา ทำให้ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตรค่อนข้างต่ำประมาณ 253 - 337 เมตร/วินาที จัดกลุ่มลักษณะทางธรณีวิทยาอยู่ในกลุ่ม D หรือดินที่ค่อนข้างแข็ง (stiff soil) ตามข้อกำหนดของ NEHRP

นอกจากนี้ในการศึกษาด้านธรณีพิบัติภัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มระดับความรุนแรง (Amplification) ของคลื่นแผ่นดินไหว สรุปได้ว่า จากแผนที่เส้นชั้นคาบอิทธิพลหลักและแผนที่ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึก 30 เมตรพบว่า บริเวณด้านตะวันออกของพื้นที่ศึกษาซึ่งมีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนค่อนข้างสูงและมีค่าคาบอิทธิพลหลักค่อนข้างต่ำ ประมาณ 0.1 - 0.3 วินาที ส่วนบริเวณด้านตะวันตกของพื้นที่ศึกษาซึ่งมีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนค่อนข้างต่ำและมีค่าคาบอิทธิพลหลักค่อนข้างสูง ประมาณ 0.4 - 0.5 วินาที ทำให้เกิดการกำทอนและเพิ่มระดับความ

รุนแรงกับคลื่นแผ่นดินไหวที่มีคาบตรงกับค่าคาบอิทธิพลหลัก โดยทั่วไปแผ่นดินไหวระยะใกล้จะมีคาบของคลื่นแผ่นดินไหวสั้นกว่าแผ่นดินไหวระยะไกล

พื้นที่ตัวเมืองหาดใหญ่ซึ่งเป็นพื้นที่ศึกษา ส่วนใหญ่จะได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหวระยะไกล ดังนั้นบริเวณตอนบนและด้านตะวันตกของพื้นที่ศึกษามีโอกาสเสี่ยงที่จะเกิดการเพิ่มระดับความรุนแรง (Amplification) ของคลื่นแผ่นดินไหวเมื่อเกิดแผ่นดินไหว เนื่องจากพื้นที่ในบริเวณนี้มีความหนาของชั้นตะกอนค่อนข้างหนา ทำให้มีค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นเฉือนค่อนข้างต่ำ อีกทั้งยังมีค่าคาบอิทธิพลหลักค่อนข้างสูง ซึ่งสามารถกำทอนกับคลื่นแผ่นดินไหวระยะไกลและเพิ่มความรุนแรงของการสั่นสะเทือน

4.2 ข้อเสนอแนะ

1. การสำรวจด้วยวิธีคลื่นไหวสะเทือน จำเป็นต้องใช้พื้นที่ในการสำรวจค่อนข้างมาก แต่บริเวณพื้นที่ศึกษามีลักษณะเป็นชุมชนเมืองผู้คนอยู่กันหนาแน่น ทำให้ค่อนข้างยากในการหาจุดเพื่อทำการสำรวจ อีกทั้งยังทำให้ข้อมูลคลื่นไหวสะเทือนมีคุณภาพไม่ดีเนื่องจากมีสัญญาณรบกวนมาก ดังนั้นควรที่จะเพิ่มจุดสำรวจ ซึ่งยังจุดสำรวจมีมาก ยิ่งทำให้ข้อมูลแผนที่เส้นชั้น (contour map) มีความน่าเชื่อถือและแม่นยำยิ่งขึ้น

2. อุปกรณ์ตัวรับสัญญาณ (geophone) ในงานวิจัยนี้มีความถี่ธรรมชาติ 14 Hz ซึ่งจะรับสัญญาณคลื่นพื้นผิวที่มีความถี่ต่ำได้ไม่ดี ทำให้ได้ข้อมูลความเร็วคลื่นเฉือนในระดับความลึกที่ไม่สูงนัก ดังนั้นถ้าใช้ตัวรับสัญญาณที่มีความถี่ธรรมชาติต่ำๆ ก็จะสามารถสำรวจความเร็วคลื่นเฉือนในระดับลึกได้อย่างถูกต้องและมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น อีกทั้งการสำรวจด้วยวิธี Active MASW จะสามารถสำรวจได้ความเร็วคลื่นเฉือนในระดับตื้นเท่านั้น ซึ่งข้อมูลในระดับลึกจำเป็นต้องสำรวจด้วยวิธี Passive MASW ร่วมด้วย

3. ในการศึกษาค่าคาบอิทธิพลหลักซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกค่าหนึ่งในการศึกษาการเพิ่มระดับความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหว จำเป็นต้องใช้ข้อมูลชั้นดินและความเร็วคลื่นเฉือนจนถึงชั้นหินฐาน แต่ในบริเวณพื้นที่ศึกษาทางด้านตะวันตกมีชั้นตะกอนที่หนามากทำให้ไม่สามารถคำนวณค่าคาบอิทธิพลหลักที่แท้จริงได้ แต่ผู้ศึกษาได้ทดลองคำนวณเพียงคาบอิทธิพลหลักโดยใช้ค่าความเร็วคลื่นเฉือนและความหนาของชั้นดิน ในระดับความลึก 30 เมตร ดังนั้นในการศึกษาค่าคาบอิทธิพลหลักที่แท้จริงจำเป็นต้องมีข้อมูลความหนาของชั้นดินและความเร็วคลื่นเฉือนจนถึงชั้นหินฐาน หรือไม่ก็สามารถคำนวณโดยใช้วิธีการอื่นๆ เช่น วิธี H/V spectral ratio เป็นต้น

บรรณานุกรม

- กรมทรัพยากรธรณี. 2550. แผนที่ธรณีวิทยาจังหวัดสงขลา. กรุงเทพมหานคร: กรมทรัพยากรธรณี ประเทศไทย.
- กุลนันท์ สุริโย. 2549. การลึกลงของน้ำเค็มในบริเวณแอ่งหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา. กรุงเทพมหานคร: คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิรันดร์ ชัยมณี, สุวัฒน์ ดิยะไพรัช. 2526. รายงานธรณีวิทยาควอเตอร์นารีระวางจังหวัดสงขลา: กองธรณีวิทยา กรมทรัพยากรธรณี 67 หน้า.
- ประภาพร จันทะมาศ. 2550. การเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินกรุงเทพมหานคร ที่ได้จากการวิเคราะห์คลื่นผิวดินแบบหลายช่องทางรับสัญญาณกับวิธีจากหลุมเจาะ. กรุงเทพมหานคร: คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เพ็ญตา สาดทรัพย์. 2544. การสำรวจใต้ผิวดินด้วยคลื่นไหวสะเทือน. ขอนแก่น: ภาควิชาเทคโนโลยี ธรณี คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- วรวุฒิ โลหะวิจารณ์. 2548. Potential ground water resources of Hat Yai Basin in Peninsular Thailand by gravity study. Songklanakarin J. Sci. Technol. 27(3). pp.633-647.
- สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย. 2552. รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการจัดทำแผนแม่บทป้องกันและบรรเทาภัยจากแผ่นดินไหวและอาคารถล่ม (ระยะที่1). กรุงเทพมหานคร: กรมป้องกันภัยและบรรเทาสาธารณภัย.
- สุพจน์ เตชวรสินสกุล, รัตนมณี นันทสาร. 2548. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์โครงการการศึกษาการเพิ่มความรุนแรงของแผ่นดินไหวเนื่องมาจากสภาพดิน (Site Amplification) ในบริเวณกรุงเทพมหานครและจังหวัดเชียงราย. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.). 173 หน้า.

สำนักเฝ้าระวังแผ่นดินไหว กรมอุตุนิยมวิทยา. 2557. สถิติข้อมูลแผ่นดินไหวที่มีผลกระทบต่อประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร.

<http://www.seismology.tmd.go.th/earthquakestat.html>(accessed 5 June,2014)

อรุณ ลูกจันทร์, ธนิต เฉลิมยานนท์และ สุรพล อารีชัยกุล. 2552. แบบจำลอง 3 มิติ การรูกล้าของน้ำเค็มในแอ่งหาคใหญ่. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14 : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี . 13-15 พฤษภาคม. หน้า 1,253-1,259.

Anbazhagan, P., Sitharam, T.G., Vipin, K.S., 2008. Site classification and estimation of surface level seismic hazard using geophysical data and probabilistic approach, Civil Engineering Department,, India. Journal of Applied Geophysics 68: pp.219–230.

Borcherdt, R.D., Wentworth, C.M., Janssen, A., Fumal, T.E., Gibbs, J.1991. Methodology for predictive GIS mapping of special study zones for strong ground motion in the San Francisco Bay region, CA. In:Proceedings of the Fourth International Conference on Seismic Zonation, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, pp. 545–552.

Building Seismic Safety Council (BSSC), 2001. NEHRP recommended provision for seismic regulations for new buildings and other structure, 2000 edition, part 1 provision, prepared by the Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency. Report FEMA 368, Washington, DC.

Chalermyanont, T. 1995: Engineering properties of Hatyai subsoils. A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of engineering, Bangkok, Asian institute of technology school of civil engineering. 144 p.

Daniele Boiero. 2009: Surface wave analysis for building shear wave velocity models. A Thesis of ph.D in water and territory management engineering , Politecnico di Torino. 244 p.

- Di Julio, R.M. 2001. Linear static seismic lateral force procedures. In: Naeim, F. (Ed.), The Seismic Design Handbook, 2nd ed. Kluwer Academic Publishers, Boston, pp. 247–274.
- Dulaijan, K.A. 2008: Near-surface Characterization Using Seismic Refraction and Surface-wave Methods. A Thesis Submitted to the faculty of graduate studies in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, Calgary Alberta, department of geoscience, university of Calgary. 154 p.
- Joyner, W. B. and D. M. Boore. 1988. Measurement characterization and prediction of strong ground motion. Proc. of Earthquake Engineering & Soil Dynamics II, GT Div/ASCE, Park City, Utah, June 27-30, pp.43-102,
- Kearey, P., and Brooks, M. 1991. An Introduction to Geophysical Exploration. Blackwell Scientific Publications.
- Kramer, S.L. 1996. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Mahajan, A.K. 2009. NEHRP soil classification and estimation of 1-D site effect of Dehradun fan deposits using shear wave velocity, Wadia Institute of Himalayan Geology, India. Engineering Geology 104: pp.232–240.
- Maheswari, R.U. , Boominathan, A., Dodagoudar, G.R. 2010. Seismic site classification and site period mapping of Chennai City using geophysical and geotechnical data, Civil Engineering Department,, India. Journal of Applied Geophysics 72: pp.152–168.
- McMechan, G. A., and Yedlin, M. J. 1981. Analysis of dispersive waves by wave field transformation: Geophysics, **46**: pp.869–874.

- Park, C. B., Millar, R. D., and Xia, J. 1998, Imaging dispersion curves of surface waves, Presented at the 68th Ann. Mtg of SEG, New Orleans, Expanded Abstract: pp.1377-1380.
- Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J. 1999. Multi-channel analysis of surface waves. *Geophysics* 64 (3):pp. 800–808.
- Park, C.B. 2014. Type of multi-channel analysis of surface waves. Kansas Geological Survey. <http://www.masw.com/index.html>.(accessed 5 June,2014)
- Park, C.B. 2014. Data acquisition . Kansas Geological Survey. <http://www.masw.com/index.html>.(accessed 5 June,2014)
- Ramnarong, V., Wongsawat, S., Sakulkao, S., Phanjasutarot, S. 1984. Hydrogeologic map of Hatyai basin, Songkhla, scale 1: 50,000, Groundwater Div., Dept. of Mineral Resource, Thailand
- Richart, F. E. Hall, J. R. and Woods, R. D. 1970. *Vibrations of soils and foundations*: Prentice-Hall, Inc.
- Rix, G.J., Stokoe II. K. H. and Roesset, J.M. 1991. Experimental study of factors affecting the Spectral Analysis of Surface Waves method, Research report 1123-5: Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.
- Sawata, H., Wongsomsak, S., Tanchotikul, A., Dansawasdi, R., Maneeprapun, K. and Muenlek, S. 1983. A hypothetical idea on the formation of HatYai basin and the Songkhla lagoon. Proceeding of the Annual Technical Meeting 1982, Department of Geological Sciences, Chiang Mai University: pp.109-120.

- Shafiee, A. , Azadi, A. 2007. Shear-wave velocity characteristics of geological units throughout Tehran City, Iran, Geotechnical Department,, India. Journal of Asian Earth Sciences 29: pp.105–115.
- Sheriff, R. E. and Geldart, L. P. 1995. Exploration Seismology second edition. Cambridge University.
- Shibuya and Tamrakar . 2003, Engineering properties of Bangkok clay, Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils – Tan et al. (eds.), ISBN 90 5809 537 1: pp 662-665.
- .
- Stein, s., and Wysession, M. 2003, An Introduction to Seismology Earthquakes and Earth Structure. Blackwell Scientific Publications.
- Tachavichitpaisarn, S. 1990: Analysis of the geotechnical land use of the Songkhla area. A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of engineering, Bangkok, Asian institute of technology school of civil engineering.
- Telford, W. M., Geldart, L. P. and Sheriff, R. E. 1990. Applied Geophysics 2nd ed. Cambridge University.
- Tuladhar,R., Yamazaki,F., Wanitchai,P, and Saita,J. 2004. Seismic microzonation of greater Bangkok using microtremor observation, Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 33: pp211-225
- Wills, C.J., Petersen, M., Bryant, W.A., Reichle, M., Saucedo, G.J., Tan,S., Taylor, G., Treiman, J. 2000. A site-conditions map for California based on geology and shear-wave velocity. Bulletin of Seismological Society of America 90: pp. 187–208.

Xia, J, Miller, R.D., Park, C.B. 1999. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves *Geophysics* 64 (3):pp. 691–700.

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์

Proceedings of The 39th Congress on Science and Technology of Thailand

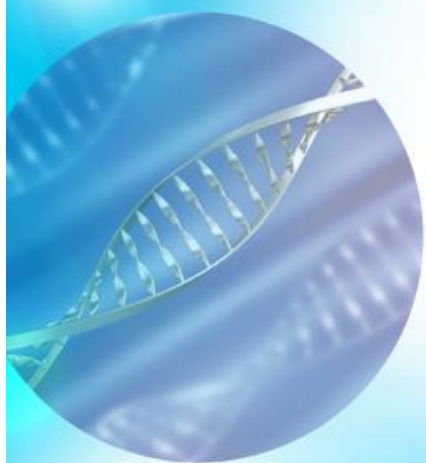
การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์
และ เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย



ครั้งที่
39



Innovative Science for a Better Life
นวัตกรรมวิทยาศาสตร์เพื่อชีวิตที่ดีขึ้น



FSCI
คณะวิทยาศาสตร์

KMUTT มจร.



J_J0007: SHEAR WAVE VELOCITY CHARACTERISTICS OF GEOLOGICAL UNITS IN HATYAI CITY, SONGKHLA PROVINCE

Chedtaporn Sujitapan,¹ Sawasdee Yordkayhun^{1,2,*}

¹Department of Physics, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Songkhla 90112, Thailand

²Geophysics Research Center, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Songkhla 90112, Thailand

*e-mail: sawasdee.y@psu.ac.th

Abstract: In seismic hazard assessment, shear wave velocity (V_s) of the soil layer play an important role in evaluating the amplification behavior of the site during an earthquake. To classify the sites for earthquake resistant design of structures, the average shear wave velocity over 30 m depth of the soil ($V_{s(30)}$) is commonly used. In this study, the $V_{s(30)}$ values were calculated by using the V_s derived from multichannel analysis of surface wave (MASW). The MASW data were acquired at 23 preselected sites in Hatyai city, southern Thailand to create a soil classification map based on the NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program) standard. It is found that the NEHRP site classification map and the geologic map of Hatyai city are in good agreement. Sites near the U-Tha Pao channel which are characterized by alluvial plain located west of Hatyai city have the $V_{s(30)}$ ranging from 254 to 357 m/s, corresponding to NEHRP soil class D. Sites in eastern Hatyai city are characterized by colluviums and valley filled soils, and have $V_{s(30)}$ values ranging from 373 to 544 m/s, corresponding to NEHRP soil class C. Although the western Hatyai city is subjected to larger ground motion amplification, the deeper sediment, the bedrock interface and dynamic site period information would improve the reliability of the ground motion assessment.

Introduction: A major influence on ground shaking due to an earthquake is the elastic properties of geological materials beneath a site. Unconsolidated materials can significantly amplify earthquake ground motions, affecting the stability of structures far from the epicenter of the earthquake. Studies of ground-motion properties elsewhere indicate that when seismic waves transmitting through the soils, the amplitude, frequency content, and waveform can be modified.¹ Generally, shear wave velocity (V_s) depends on physical properties of the materials, including fabric, aging, and cementation of the soil.² In this regard, the V_s is important parameter in site response analyses. For example, estimation of the site dependent seismic amplification factor and earthquake hazard mapping. Moreover, the weighted average shear-wave velocity till 30 m depth ($V_{s(30)}$) has been used for the soil classification system adopted by NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program) for building-code provisions.⁴ Several geophysical and geotechnical methods have been available for determining the V_s . In this study, we used the multichannel analysis of surface wave (MASW) method that was recently developed to determine the V_s of soils beneath Hatyai city.³

The study area, Hatyai city is located in southern Thailand (Figure 1). The city has rapidly developed as well as experienced growth in the tourism industry. High-rise buildings such as condominium, department store, and hotel are built. It is situated in the Hatyai basin where can have a major impact on ground shaking. Although the city is in the low seismicity area, people living in the high-rise building had been experienced the ground vibration due to earthquake events from Andaman-Sumatra region. Therefore, the objective of this study was to use the V_s derived from the MASW data to generate the NEHRP site classification map of Hatyai city area. The results will help the city to assess its earthquake shaking vulnerability and mitigation.

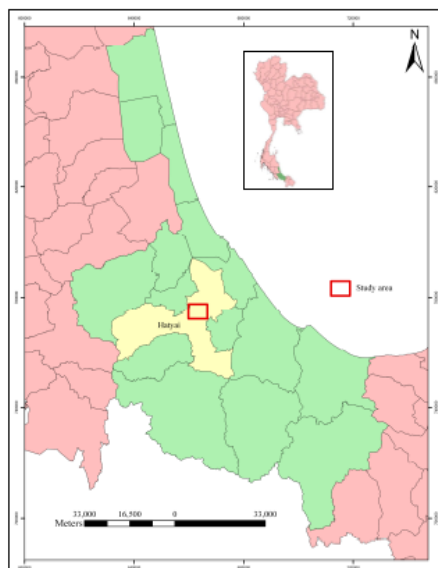


Figure 1. Location of Hatyai city, Southern Thailand

Geologically, Haiyai city is situated on the flood plain of the area between the two north-south trending mountains, Khohong and Wang Pha mountain. The flood plain is covered by Quaternary deposit, consisting of shale, mudstone and sandstone. Quaternary deposit of the city is alluvial and marine deposit which extends to depth of 230 meters from ground surface. The deposits found in the study area can be divided into 2 units as shown in Figure 2. The alluvial (Qa) unit is located mainly west part of the area. It is flood plain of U-Tha Pao channel with ranging from 0.5 km to 3 km. The colluvium (Qc) unit is found at the east part of the area. This unit consists of mostly gravel sand and can be found at the foot hill of the area.

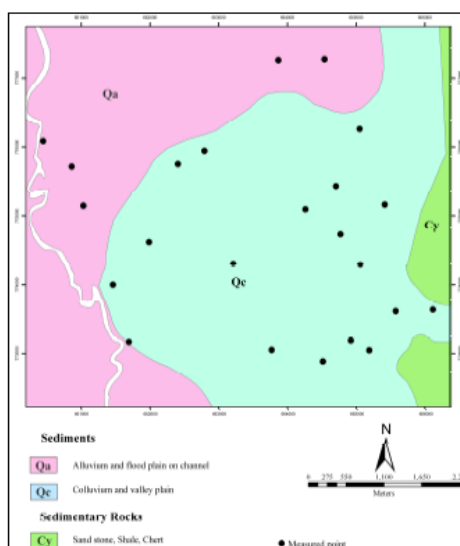


Figure 2. The geological map of the study area and the MASW test sites (black dots)

Methodology: The details of the MASW method have been given by Park et al.³ This seismic method generates a V_s profile by analyzing the dispersion characteristics of Rayleigh surface wave on multi-channel record. Generally, the Rayleigh surface wave has been viewed as noise in conventional seismic surveys. It propagates along or near the ground surface and are typically characterized by a low velocity, low frequency and high amplitude.⁵ The acquisition of the 1-D MASW data is shown in Figure 3. Series of vertical-component geophones, placed at dx intervals, are centered on the survey line. When an impact sources, placing at X_1 is activated seismic waves are generated. The signal will be detected by the geophones and sent to seismograph for recording and display.

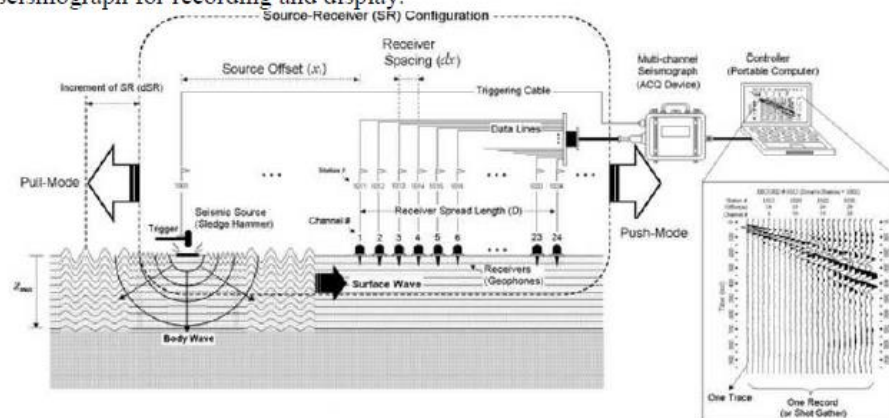


Figure 3. MASW data acquisition field setup³

In this study, the MASW data were collected at 23 sites throughout the study area (Figure 2). The data were recorded with 24-channel Geometric SmartSeis seismic recorder. Twenty-four vertical component geophones were used and placed with spacing of 2 m. The 10-lbs sledge hammer was used as a source and was placed at 25 m away from the first geophone. The data were processed using the Kansas Geological survey software package SURFSEIS. The processing steps of MASW data are shown in Figure 4. Each shot record was transformed from the time domain into the frequency domain using Fourier Transform technique to generate site-specific dispersion curves (phase velocity versus frequency) for each site. The dispersion curves were then transformed into vertical 1-D shear-wave velocity profiles through an inversion method.

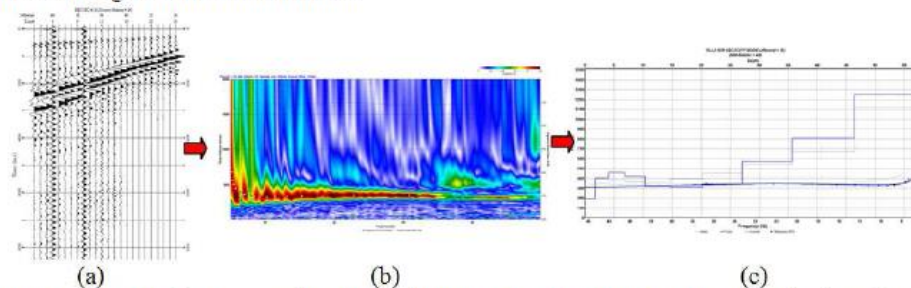


Figure 4. MASW data processing steps (a) acquiring multichannel field records in time domain, (b) transformed from the time domain into the frequency domain and generating site-specific dispersion curves, and (c) creating the shear wave velocity profile by inversion method

For the purpose of site classification, according to NEHRP standard (Table1), the measured V_s of the subsurface over a depth of 30 m are required. The average shear-wave velocity of upper 30 m ($V_{s(30)}$) is calculated by the following expression:

$$V_{s(30)} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{s_i}}} \tag{1}$$

Where d_i and V_{s_i} denote the thickness (in meters) and V_s of the i^{th} formation or layer, in a total of n layers existing upper 30 m depth.

Table 1. Soil profile of NEHRP site classes in terms of $V_{s(30)}$ ⁴

Site class	General description	Average shear wave velocity to 30 m (m/s)
A	Hard rock	$V_{s(30)} > 1,500$
B	Rock	$760 < V_{s(30)} \leq 1,500$
C	Very dese soil and soft rock	$360 < V_{s(30)} \leq 760$
D	Stiff soil	$180 \leq V_{s(30)} \leq 360$
E	Soil or any profile with more than 3 m of soft clay	$V_{s(30)} \leq 180$
F	Soils requiring site-specific evaluations	

Results, Discussion and Conclusion: Based on V_s profiles from 23 MASW test sites, the $V_{s(30)}$ of each site was calculated by using equation 1. It is found that the colluviums unit (Qc) has the highest mean $V_{s(30)}$ of about 438 m/s and can be classified as soil class C from NEHRP standard (Table 2). This unit is found near the foot hills in the study area. The alluvium and flood plain on channel unit (Qa) have the mean $V_{s(30)}$ of about 287 m/s and can be classified as soil class D. The $V_{s(30)}$ distribution map of the study area is generated and shown in Figure 5. The map shows the general trend of increasing $V_{s(30)}$ values from western to eastern part of the city. The high $V_{s(30)}$ observed in the eastern part of the city is likely due to the soil in this area consists of coarse-grained sediments of colluvium unit near the foot hills and the thickness of sediments in this area may be shallow. Whereas the flood plain and alluvium unit observed in the western part is mostly fine-grain sediments of U-Tha Pao channel and generally characterized by low $V_{s(30)}$ values.

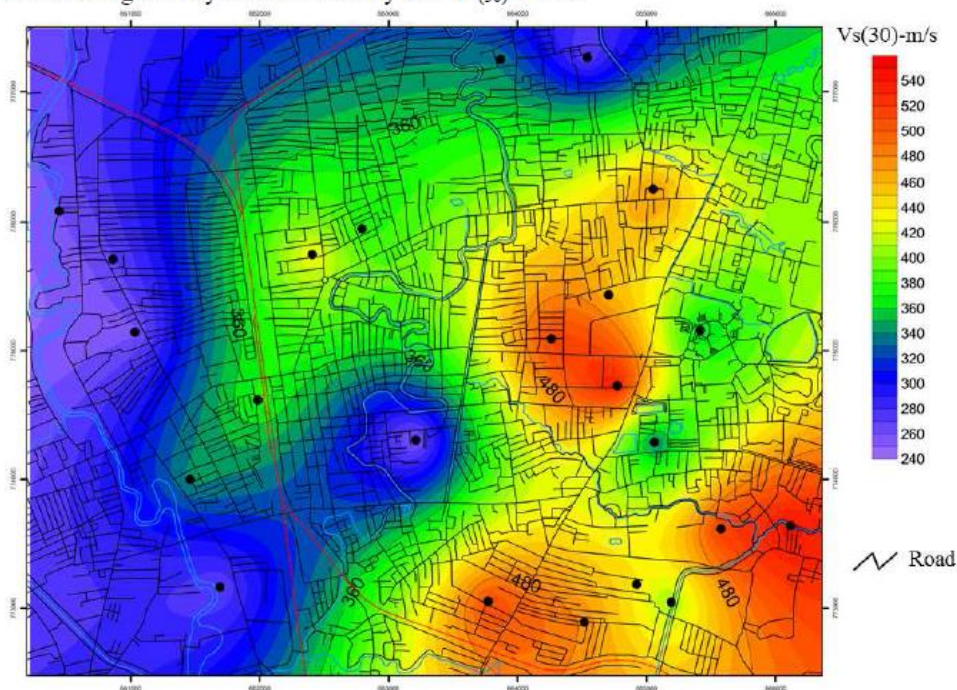


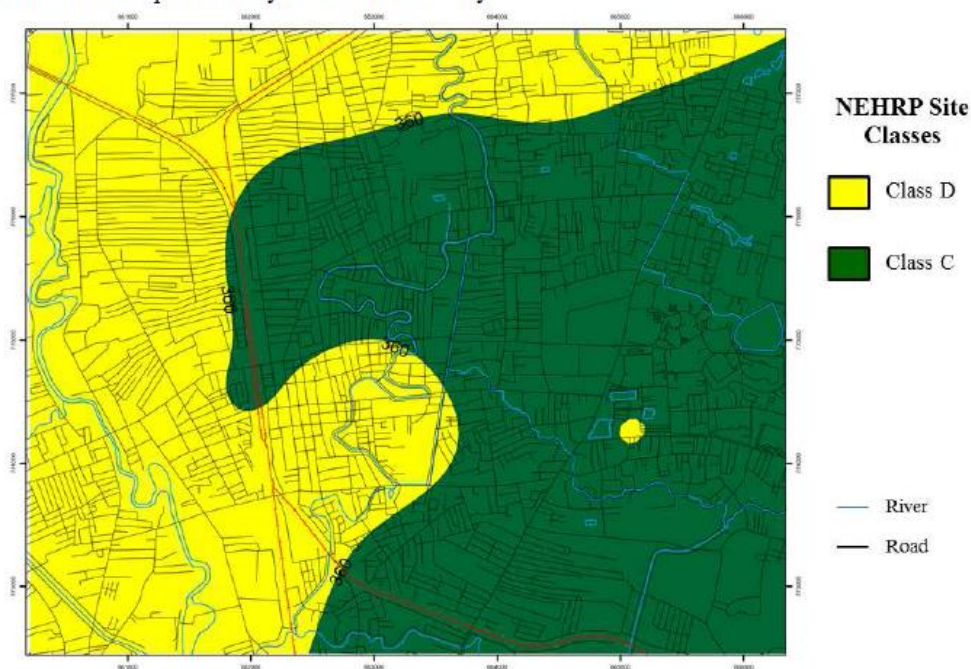
Figure 5. $V_{s(30)}$ distribution map of the study area

Table 2. NEHRP site classification of soil units for Hatyai city

Soil units	Mean $V_{s(30)}$ (m/s)	NEHRP site class
Qa (Alluvium and flood plain)	287	D
Qc (Colluvium)	438	C

To create the NEHRP site classification map of Hatyai city, the $V_{s(30)}$ distribution map is adopted based on NEHRP standard as shown in Table 1. There are only two classes in the study area which are site class C and D as shown in Figure 6. The test sites on the alluvium units correspond to soil class D. The test sites on the colluviums and valley plain units are mostly class C. From NEHRP recommendation, the soils with the lower $V_{s(30)}$, or soft soils, will experience more earthquake ground motion than bedrocks due to the wave-amplifying properties of the soil. This means the western part of Hatyai city tend to experience soil amplification from earthquake ground motion. Therefore, construction of high-rise structures should be avoided in this area.

Although the NEHRP site classification map provides the preliminary information on the soil conditions and can be used for city planning and seismic hazard study, the map still has some limitations. The MASW test sites could not distributed uniformly throughout the study area, because the difficulty of acquiring data in the highly population area. Therefore, a detailed site response analysis is still necessary

**Figure 6.** The NEHRP site classification map of Hatyai city

References:

1. Borchardt RD. *Earthquake Spectra* 1994;10:617-653.
2. Shafiee A, Azadi A. *Journal of Asian Earth Science* 2007;29:105-115.
3. Park CB, Miller RD, Xia J. *Geophysics* 1999;64:800-808.
4. Thitimakorn T, Channoo S. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 2012;17:2891-2904
5. Anbazhagan P, Sitharam TG, Vipin KS. *Journal of Applied Geophysics* 2009;68:219-230.

Acknowledgements: The first author is grateful to the Graduate School at the Prince of Songkla University for grant support and thanks the Department of Physics, Geophysics Research Center, Faculty of Science, for equipment support and other necessary facilities.

Keywords: shear wave velocity, surface wave, MASW, NEHRP site classification, Hatyai

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายเชษฐพร สุจิตะพันธ์		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5410220015		
วุฒิการศึกษา			
	วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2553

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนอุดหนุนเพื่อวิทยานิพนธ์บัณฑิตวิทยาลัย ประจำปีงบประมาณ 2555 และทุนโครงการพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พสวท.)

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Sujitapan, C.,Yordkayhun, S., 2010.Shear-wave Velocity Characteristics of Geological Units in Hatyai City, Songkhla Province, Proceeding of the 39th Conference on Science and Technology of Thailand (October 21-23, 2013), pp. 1061-1066.