

การเปรียบเทียบผลการสำรวจเชิงจิตโพลีติกส์ด้วยการวิเคราะห์คลื่นผิว  
แบบหลายช่องสัญญาณแบบแอกทีฟและแพสซีฟ



นาย เศรษฐี รัตนพร

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5 1 7 0 7 1 0 9 2 1

A COMPARISON OF GEOPHYSICAL SURVEYS BY ACTIVE AND PASSIVE  
MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVE



Mr.Detrit Rattanaporn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเปรียบเทียบผลการสำรวจเชิงจีโอฟิสิกส์ด้วยการ  
วิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณแบบแอดทีฟ  
และแพสซีฟ

โดย

นายเดชฤทธิ์ รัตนพร

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

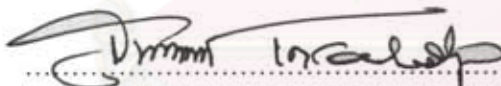
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะรัฐ

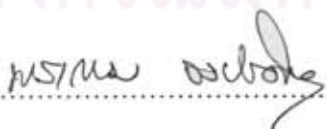
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนिरุวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิรวัตร บุญญะรัฐ)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์)

เดชฤทธิ์ รัตนพร : การเปรียบเทียบผลการสำรวจเชิงจีโอฟิสิกส์ด้วยการวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณแบบแอคทีฟและแพสซีฟ (A COMPARISON OF GEOPHYSICAL SURVEYS BY ACTIVE AND PASSIVE MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.ฐิรวัตถ์ บุญญะฐิ, 91 หน้า

การวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณเป็นเทคนิคที่ใช้ในการสำรวจหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินโดยเริ่มจากการตรวจวัดข้อมูลการสั่นสะเทือนที่ผิวดินแล้วนำมาสร้างโค้งการกระจายเพื่อที่จะนำไปคำนวณหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่แปรผันกับความลึกในระดับต่างๆ

Seng (2551) ได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณด้วยวิธีแอคทีฟกับดินในประเทศไทย 7 แห่งโดยใช้วิธี F-K Transform ในการสร้างโค้งการกระจาย ในการศึกษานี้ผู้ศึกษาได้ทดลองใช้วิธี Phase Shift (Park et al., 1998) และจากการเปรียบเทียบโค้งการกระจายที่ได้จากวิธีทั้งสองพบว่าเส้นโค้งการกระจายที่สร้างด้วยวิธี Phase Shift ให้ผลที่ดีกว่า

เนื่องจากการทดสอบด้วยวิธีแอคทีฟนั้นมีขีดจำกัดในด้านความลึกเนื่องจากจำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดคลื่นสั่นสะเทือนที่มีกำลังสูงขึ้นเมื่อต้องการประเมินค่าความเร็วของชั้นดินที่อยู่ระดับลึกลงไป ดังนั้นในการศึกษานี้ยังได้ทดลองใช้วิธีสำรวจแบบแพสซีฟซึ่งสามารถประเมินค่าความเร็วคลื่นของชั้นดินได้ในระดับที่ลึกกว่า ซึ่งพบว่าสัญญาณจากตัวตรวจวัดในการทดสอบแบบแพสซีฟมีค่าสัญญาณที่เบามาก ทั้งนี้สันนิษฐานว่าการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติมีความถี่ต่ำกว่าช่วงที่ตัวตรวจวัดจะตรวจจับได้ นอกจากนี้ในขณะที่ตรวจวัดไม่มีกิจกรรมหรือการจราจรที่หนาแน่นเพียงพอที่จะทำให้เกิดคลื่นสั่นสะเทือนที่แรงพอสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัด

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....

ปีการศึกษา..... 2553.....

ลายมือชื่อ นิสิต..... 

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... 

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 5170710921: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: EARTHQUAKE / MASW / GEOPHYSICAL EXPLORATION / SHEAR WAVE VELOCITY / ACTIVE / PASSIVE

DETRIT RATTANAPORN : A COMPARISON OF GEOPHYSICAL SURVEYS BY THE ACTIVE AND PASSIVE OF MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVE  
ADVISOR : ASSOC. PROF. TIRAWAT BOONYATEE, Ph.D., 91 pp.

Multichannel analysis of surface wave is a technique for shear wave velocity survey. It uses vibration records of ground surface to construct the dispersion curve which is essential to the inversion for shear wave velocity profile.

Seng (2551) conducted MASW tests in seven sites in Thailand. The F-K transform was used in his work. In this study, a new method called phase shift (Park et al, 1998) was used to construct the dispersion curve. From comparison between both methods, it was founded that the phase shift method yielded better resolution than the F-K transform.

The conventional active MASW has a limitation on the maximum depth of survey which depends on the energy of vibration source. To circumvent the problem, an experimental study on the use of passive MASW was also carried out. However, measured signal were so weak that no meaningful result could be obtained.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department:..... CIVIL ENGINEERING .....

Student's Signature  .....

Field of Study:..... CIVIL ENGINEERING .....

Advisor's Signature  .....

Academic Year:..... 2010 .....



## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สิริวัตร บุญญะสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งช่วยตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล และการให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรเกษม จงประดิษฐ์ คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ที่ช่วยแนะนำ ตรวจสอบ แก้ไขจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้เขียนขอขอบคุณอย่างสุดซึ้งต่อพี่เบ็ด พี่รงค์ น้องเค น้องอุ้ย รุ่นพี่ เพื่อนและรุ่นน้องทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือในการทำงาน และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ท้ายที่สุดนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา พี่น้องทุกคนผู้ซึ่งคอยให้กำลังใจและสนับสนุนการทำงานเป็นอย่างดี ตลอดจนครูปาอาจารย์ทุกท่านที่เคยสั่งสอน อบรม และให้ความรู้ในสาขาวิชาต่างๆ พระคุณของท่านเหล่านี้ ผู้เขียนจะระลึกถึงจนกว่าชีวิตจะหาไม่



ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบการสร้างโค้งการกระจายของวิธี F-K Tranfrom กับวิธี Phase Shift ในการแปลงผลการสร้างโค้งการกระจายใหม่สำหรับการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าความเร็วคลื่นเฉือน .....	2
1.2.2 เพื่อวิเคราะห์หาค่าความเร็วคลื่นเฉือนของการทดสอบ MASW แบบวิธีแอกทีฟกับวิธีแพสซีฟสำหรับชั้นดินต่างๆ.....	2
1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ MASW แบบวิธีแอกทีฟกับวิธีแพสซีฟ .....	2
1.2.4 เปรียบเทียบผลการทดสอบ MASW กับผลการเจาะสำรวจดิน .....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....	2
1.3.1 ทำการทดสอบ MASW แบบแอกทีฟและแพสซีฟสามแห่ง .....	2
1.3.2 ตรวจสอบวัดคลื่นสั้นสะเทือนวิธีแอกทีฟ .....	2
1.3.3 ตรวจสอบวัดคลื่นสั้นสะเทือนวิธีแพสซีฟ .....	2
1.3.4 วิเคราะห์การทดสอบ .....	2

1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
1.4.1	การพัฒนาการทดสอบการวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณให้มี ประสิทธิภาพในการสำรวจชั้นดินดียิ่งขึ้น.....	3
1.4.2	นำการทดสอบการวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณมาใช้ในการสำรวจหา ค่าความเร็วคลื่นเฉือนชั้นดินในประเทศไทย.....	3
บทที่ 2	.....	3
2.1	คลื่นสั่นสะเทือน (Seismic Waves) .....	3
2.2	ชนิดของคลื่น.....	3
2.2.1	คลื่นในตัวกลาง(Body Waves) .....	3
2.2.2	คลื่นพื้นผิว(Surface Waves) .....	5
2.3	ทฤษฎีความยืดหยุ่น (Theory of Elasticity).....	7
2.4	การเคลื่อนที่ของคลื่น (Wave Motion) .....	7
2.5	คำนิยามเกี่ยวกับคลื่น .....	9
2.6	หน้าคลื่นและทางเดินคลื่น (Wavefronts and Raypaths) .....	9
2.7	ความเร็วคลื่นสั่นสะเทือน (Seismic Velocity) .....	10
2.8	การเลือกช่วงการเก็บข้อมูล (Sampling Rate) .....	13
2.9	วิธีการสำรวจเชิงธรณีฟิสิกส์ .....	15
2.10	Steady State Rayleigh Method (SSRM).....	16
2.11	Spectral Analysis of Surface Wave Method (SASWM).....	18
2.11.1	การกำหนดค่าในสนาม .....	18
2.11.2	การสร้างโค้งการกระจายด้วยวิธี F –K Transform .....	20
2.12	การวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณ .....	21
2.12.1	การวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณแบบแอดคทีฟ .....	21



2.12.2	การวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณแบบแพสซีฟ .....	22
1.1.1	รูปแบบและลักษณะข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดและการแสดงผล .....	24
2.13	คุณภาพของข้อมูลที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธี MASW .....	25
2.13.1	ลักษณะของข้อมูลที่มีคุณภาพต่ำของการสำรวจด้วยวิธี MASW แบบแอดทีฟ ....	25
2.13.2	ลักษณะของข้อมูลที่มีคุณภาพต่ำของการสำรวจด้วยวิธี MASW แบบแพสซีฟ ....	26
2.13.3	ลักษณะของข้อมูลที่มีคุณภาพดีของการสำรวจด้วยวิธี MASW แบบแอดทีฟ .....	28
2.13.4	ลักษณะของข้อมูลที่มีคุณภาพดีของการสำรวจด้วยวิธี MASW แบบแพสซีฟ .....	28
2.14	การสำรวจด้วยคลื่นสั้นสะท้อนแบบหักเห (Refraction Seismic Survey) .....	29
2.15	การสำรวจด้วยคลื่นสั้นสะท้อนแบบสะท้อน (Reflection Seismic Survey).....	30
2.16	การสำรวจโดยใช้คลื่นเคลื่อนที่ตามหลุมเจาะสำรวจ (up.hole and down.hole methods) .....	31
2.17	การจำแนกชนิดดิน (Soil classification) โดยวิธี National Earthquake Hazards Reduction Program(NEHRP) .....	32
บทที่ 3	.....	33
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	33
3.1.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิธีการทดสอบแบบแอดทีฟ .....	33
3.1.2	ขั้นตอนการดำเนินงานวิธีการทดสอบแบบแพสซีฟ .....	34
3.1.3	ขั้นตอนการวิเคราะห์ร่วมโดยใช้ผลจากการตรวจวัดทั้งสองวิธี .....	35
3.2	อุปกรณ์ในการทดสอบ .....	35
3.2.1	ส่วนที่กำเนิดคลื่น(Source) .....	35
3.2.2	ส่วนรับคลื่น(Receiver).....	36
3.2.3	ส่วนขยายสัญญาณ.....	37
3.2.4	ส่วนบันทึกสัญญาณ.....	38
3.3	วิธีการทดสอบ .....	38

3.4	การตรวจวัดภาคสนาม.....	38
3.4.1	การตรวจวัดภาคสนามของการวิเคราะห์แบบแอดทีฟ.....	38
3.4.2	การตรวจวัดภาคสนามของการวิเคราะห์แบบแพสซีฟ.....	39
3.5	การประมวลผล .....	41
3.5.1	การประมวลผลการวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณแบบแอดทีฟ .....	41
3.5.2	การประมวลผลการวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณแพสซีฟ .....	41
3.5.3	การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าความเร็วของคลื่นเฉือน .....	42
บทที่ 4	.....	44
4.1	บทนำ .....	44
4.2	ข้อมูลการตรวจวัดในสนาม .....	44
4.2.1	ข้อมูลการตรวจวัดในสนามของวิธีแอดทีฟ.....	44
4.2.2	ข้อมูลการทดสอบแบบแพสซีฟ .....	46
4.3	การวิเคราะห์ผลการทดสอบแบบแอดทีฟ.....	51
4.3.1	การประเมินค่าความเร็วคลื่นเฉือน .....	51
4.3.2	การหาความสัมพันธ์ความถี่กับเลขคลื่น (F – K Transform).....	51
4.3.1	การสร้างโค้งการกระจายโดยวิธี Phase Shift .....	53
4.4	เปรียบเทียบเส้นโค้งการกระจายของวิธี F –K Transform กับ Phase Shift.....	55
4.4.1	การคำนวณย้อนกลับหาค่าความเร็วคลื่นเฉือน .....	59
4.5	การวิเคราะห์ผลการทดสอบแพสซีฟ.....	61
4.6	การคำนวณหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนจากการทดสอบโนฮอลและการเจาะสำรวจดิน.....	66
4.7	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณกับผลการเจาะสำรวจดิน . .....	66

4.8	การจำแนกชนิดดินโดยใช้วิธี National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP).....	69
บทที่ 5	.....	70
5.1	สรุปผลงานวิจัย .....	70
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	71
	เอกสารอ้างอิง.....	72
	ภาคผนวก.....	74
	ประวัติผู้เขียน.....	91



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆของคลื่น .....9

ตารางที่ 4-1 แสดงค่าแตกต่างของช่วงความเร็วเริ่มต้นและความเร็วสุดท้ายโดยเฉลี่ยของโค้งการ  
กระจาย.....57

ตารางที่ 4-2 แสดงการจำแนกชนิดของดินของผลการทดสอบ MASW .....69

ตารางที่ 5-1 ค่าความแตกต่างของโดยเฉลี่ยของ VS จากผลการทดสอบ MASW กับดาวนโฮล .71

ตารางที่ ก - 1 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนจากการสำรวจ MASW แบบแอดทีฟที่จุฬาฯ.....75



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 ลักษณะของคลื่น P .....	4
ภาพที่ 2.2 ลักษณะของคลื่น S .....	5
ภาพที่ 2.3 ลักษณะของคลื่น LOVE .....	6
ภาพที่ 2.4 ลักษณะของRAYLEIGH .....	6
ภาพที่ 2.5 ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นเมื่อโยนก้อนหินลงน้ำบริเวณน้ำนิ่ง .....	8
ภาพที่ 2.6 ลักษณะของคลื่น (ก) ระยะทางของคลื่นกับแอมพลิจูดของคลื่น (ข) ความสัมพันธ์เวลา กับแอมพลิจูดของคลื่น .....	8
ภาพที่ 2.7 แสดงหน้าคลื่นที่เดินทางออกเป็นรูปวงกลมและทางเดินคลื่น (RAYPATH) .....	10
ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความยืดหยุ่นกับค่าความเร็วคลื่นพีและคลื่นเอส (YILMAZ, 2001) .....	12
ภาพที่ 2.8 ช่วงการเก็บข้อมูล(ก) เก็บข้อมูลทุกๆ 0.004 วินาที(ข) เก็บข้อมูลทุกๆ 0.008 วินาที... ..	14
ภาพที่ 2.9 ขั้นตอนในสนามสำหรับวิธี RAYLEIGH STEADY STATE (จาก RIX 1988).....	16
ภาพที่ 2.10 การหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของคลื่น RAYLEIGH โดย SSRM (จาก RICHART ET AL 1970).....	17
ภาพที่ 2.11 การกำหนดค่าในสนามของ SASWM (STOKOE ET AL. , 1994) .....	18
ภาพที่ 2.12 การจัดวางตำแหน่งการตรวจวัดแบบ COMMON RECEIVER MIDPOINT ARRAY WITH SOURCE POSITION REVERSING(FOTI, 2000) .....	19
ภาพที่ 2.13 การจัดวางตำแหน่งการตรวจวัดแบบCOMMON SOURCE ARRAY (FOTI, 2000) .....	19
ภาพที่ 2.14 ลักษณะการทดสอบด้วยวิธีแอกทีฟ .....	21
ภาพที่ 2.15 ลักษณะการทดสอบด้วยวิธีแพสซีฟ(HTTP:WWW.MASW.COM) .....	22
ภาพที่ 2.16 ลักษณะการการจัดวางตำแหน่งของตัวตรวจวัดสัญญาณของ PARK ET AL., (2005) .....	23
ภาพที่ 2.17 โค้งการกระจายที่ได้จากการทดสอบแบบแพสซีฟของ PARK ET AL., (2005).....	23
ภาพที่ 2.18 ความเร็วคลื่นเฉือนที่แปรผันกับความลึกจากการทดสอบแบบแพสซีฟของ PARK ET AL., (2005) .....	24

ภาพที่ 2.19 รูปแบบและลักษณะข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดและการแสดงผล .....	25
ภาพที่ 2.20 ลักษณะของสัญญาณที่มีการปะปนของสัญญาณรบกวนที่มากเกินไป (SEISIMAGER/SW MANUAL (2005)). .....	25
ภาพที่ 2.21 ลักษณะของสัญญาณที่มีตัวตรวจวัดสัญญาณไม่ทำงาน (SEISIMAGER/SW MANUAL (2005)).....	26
ภาพที่ 2.22 ลักษณะของสัญญาณที่มีความแตกต่างของแอมพลิจูดมากเกินไป (SEISIMAGER/SW MANUAL (2005)). .....	27
ภาพที่ 2.23 ลักษณะของสัญญาณที่มีความแตกต่างของแอมพลิจูดมากเกินไป (SEISIMAGER/SW MANUAL (2005)). .....	27
ภาพที่ 2.24 ลักษณะของสัญญาณการตรวจวัดที่มีคุณภาพดีของแบบแอดทีฟ (SEISIMAGER/SW MANUAL (2005)).....	28
ภาพที่ 2.25 ลักษณะของสัญญาณการตรวจวัดที่มีคุณภาพดีของแบบแพสซีฟ (SEISIMAGER/SW MANUAL (2005)).....	29
ภาพที่ 2.26 ลักษณะการเกิดคลื่นสะท้อนและคลื่นหักเห .....	30
ภาพที่ 2.27 กราฟเส้นทางเดินคลื่น (TRAVEL TIME CURVE) .....	31
ภาพที่ 2.28 หลักการสำรวจด้วยวิธีการวัดความเร็วคลื่นตามหลุมเจาะสำรวจ (ก) คลื่นเคลื่อนที่ขึ้น ในแนวตั้งตามหลุมเจาะ (ข) คลื่นเคลื่อนที่ลงในแนวตั้งตามหลุมเจาะ(สุพจน์, 2590) .....	32
ภาพที่ 3.1 FLOW CHART แสดงขั้นตอนวิธีการดำเนินงานของวิธีทดสอบแบบแอดทีฟ .....	33
ภาพที่ 3.2 FLOW CHART แสดงขั้นตอนวิธีการดำเนินงานของวิธีทดสอบแบบแพสซีฟ .....	34
ภาพที่ 3.3 FLOW CHART แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์หรือรวมโดยใช้ผลจากการตรวจวัดทั้งสองวิธี. 35	
ภาพที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดสัญญาณคลื่นสั้นสะท้อน .....	36
ภาพที่ 3.5 อุปกรณ์การตรวจวัดสัญญาณคลื่นสั้นสะท้อน .....	37
ภาพที่ 3.6 อุปกรณ์แปลงสัญญาณคลื่นสั้นสะท้อน(MODULATOR).....	37
ภาพที่ 3.7 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล(COMPUTER).....	38
ภาพที่ 3.8 ลักษณะการทดสอบด้วยวิธีแอดทีฟ .....	39



ภาพที่ 3.9 ลักษณะการทดสอบด้วยวิธีแพสซีฟแบบฉาก .....	40
ภาพที่ 3.10 ลักษณะการทดสอบด้วยวิธีแพสซีฟแบบวงกลม .....	40
ภาพที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า POISSON'S RATIO กับ ความเร็วของ P-WAVE, S-WAVE และ R-WAVE.....	43
ภาพที่ 3.12 การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าความเร็วของคลื่นเฉือน .....	43
ภาพที่ 4.1 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ TIME – SPACE DOMAIN ของการ ตรวจวัดที่จุกฟ้า .....	45
ภาพที่ 4.2 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ TIME – SPACE DOMAIN ของการ ตรวจวัดที่จังหวัดเชียงราย.....	45
ภาพที่ 4.3 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ TIME – SPACE DOMAIN ของการ ตรวจวัดที่จังหวัดเพชรบูรณ์.....	46
ภาพที่ 4.4 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ TIME – SPACE DOMAIN ของการ ตรวจวัดที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยแบบฉาก .....	46
ภาพที่ 4.5 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ TIME – SPACE DOMAIN ของการ ตรวจวัดที่จังหวัดเชียงรายแบบฉาก .....	47
ภาพที่ 4.6 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ TIME – SPACE DOMAIN ของการ ตรวจวัดที่จังหวัดเพชรบูรณ์แบบฉาก .....	47
ภาพที่ 4.7 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ TIME – SPACE DOMAIN ของการ ตรวจวัดที่จุกฟ้าแบบวงกลมรัศมี 4 เมตร .....	48
ภาพที่ 4.8 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ TIME – SPACE DOMAIN ของการ ตรวจวัดที่จุกฟ้าแบบวงกลมรัศมี 5 เมตร .....	48
ภาพที่ 4.9 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ TIME – SPACE DOMAIN ของการ ตรวจวัดที่จุกฟ้าแบบวงกลมรัศมี 8 เมตร .....	49
ภาพที่ 4.10 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ TIME – SPACE DOMAIN ของการ ตรวจวัดที่จุกฟ้าแบบวงกลมรัศมี 10 เมตร .....	49

ภาพที่ 4.11 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ TIME – SPACE DOMAIN ของการตรวจวัดที่จู่ฟ้าแบบวงกลมรัศมี 20 เมตร .....	50
ภาพที่ 4.12 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ TIME – SPACE DOMAIN ของการตรวจวัดที่จู่ฟ้าแบบวงกลมรัศมี 40 เมตร .....	50
ภาพที่ 4.13 การประเมินค่าความเร็วคลื่นเฉือนอย่างคร่าวๆ .....	51
ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของเลขคลื่นความถี่ต่างๆ ของการตรวจวัดที่จู่ฟ้า .....	52
ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆ ของการตรวจวัดที่จังหวัดเชียงราย .....	52
ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆของการตรวจวัดที่จังหวัดเพชรบูรณ์ .....	53
ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆ ของการตรวจวัดที่จู่ฟ้า .....	54
ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆ ของการตรวจวัดที่จังหวัดเชียงราย .....	54
ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆของการตรวจวัดที่จังหวัดเพชรบูรณ์ .....	55
ภาพที่ 4.20เปรียบเทียบโค้งการกระจายของการตรวจวัดที่จู่ฟ้า .....	56
ภาพที่ 4.21 เปรียบเทียบโค้งการกระจายของการตรวจวัดที่จังหวัดเชียงราย .....	56
ภาพที่ 4.22 เปรียบเทียบโค้งการกระจายของการตรวจวัดที่จังหวัดเพชรบูรณ์ .....	57
ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ของการตรวจวัดที่จู่ฟ้า.....	58
ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ของการตรวจวัดที่จังหวัดเชียงราย.....	58
ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ของการตรวจวัดที่จังหวัดเพชรบูรณ์.....	59
ภาพที่ 4.26 ความเร็วคลื่นเฉือน ณ ความถี่ต่างๆ ของการทดสอบแบบแอดทีฟที่จู่ฟ้า.....	59
ภาพที่ 4.27 ความเร็วคลื่นเฉือน ณ ความถี่ต่างๆ ของการทดสอบแบบแอดทีฟที่จังหวัดเชียงราย .....	60
ภาพที่ 4.28 ความเร็วคลื่นเฉือน ณ ความถี่ต่างๆ ของการทดสอบแบบแอดทีฟที่จังหวัดเพชรบูรณ์ .....	60

ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆ ของการตรวจวัดที่จู่ฟ้าแบบฉาก	61
ภาพที่ 4.30 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆ ของการตรวจวัดที่จังหวัดเชียงรายแบบฉาก	62
ภาพที่ 4.31 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆของการตรวจวัดที่จังหวัดเพชรบูรณ์แบบฉาก	62
ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆของการตรวจวัดที่จู่ฟ้าแบบวงกลมรัศมี 4 เมตร	63
ภาพที่ 4.33 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆของการตรวจวัดที่จู่ฟ้าแบบวงกลมรัศมี 5 เมตร	63
ภาพที่ 4.34 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆของการตรวจวัดที่จู่ฟ้าแบบวงกลมรัศมี 8 เมตร	64
ภาพที่ 4.35 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆของการตรวจวัดที่จู่ฟ้าแบบวงกลมรัศมี 10 เมตร	64
ภาพที่ 4.36 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆของการตรวจวัดที่จู่ฟ้าแบบวงกลมรัศมี 20 เมตร	65
ภาพที่ 4.37 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆของการตรวจวัดที่จู่ฟ้าแบบวงกลมรัศมี 40 เมตร	65
ภาพที่ 4.38 การเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นเฉือนระหว่างวิธี MASW แบบแอดทีฟกับผลที่ได้จากการเจาะสำรวจดินที่จู่ฟ้า	67
ภาพที่ 4.39 การเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นเฉือนระหว่างวิธี MASW แบบแอดทีฟกับผลที่ได้จากการทดสอบ ดาวนโฮลที่จังหวัดเชียงราย	68
ภาพที่ 4.40 การเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นเฉือนระหว่างวิธี MASW แบบแอดทีฟกับผลที่ได้จากการทดสอบ ดาวนโฮลที่จังหวัดเพชรบูรณ์	68

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณเป็นวิธีการสำรวจชั้นดินแบบไม่ทำลายซึ่งได้ถูกพัฒนาขึ้นไม่นานมานี้ เริ่มต้นจากการทดสอบกระทำบนผิวดินโดยไม่ต้องเจาะหลุมสำรวจและได้ผลลัพธ์เป็นค่าความเร็วคลื่นเฉือนซึ่งจำเป็นสำหรับการออกแบบเชิงพลวัตการสำรวจด้วยวิธีนี้เป็นการสำรวจเพื่อตรวจสอบลักษณะและโครงสร้างของดินโดยสร้างคลื่นสั้นสะเทือนที่ผิวดินแล้ววัดระยะเวลาที่คลื่นเดินทางผ่านตัวตรวจวัดสัญญาณความเร็ว (geophone) ที่ติดตั้ง ณ ตำแหน่งที่แตกต่างกันหลายๆตำแหน่งเนื่องจากความเร็วคลื่นจะแปรผันตามชนิดของดิน เช่น คลื่นจะเดินทางผ่านชั้นดินที่มีความหนาแน่นต่ำและมีความพรุนมากได้ช้ากว่า (ใช้เวลามากกว่า) ชั้นดินที่มีความหนาแน่นสูง ดังนั้นระยะเวลาที่วัดได้จึงสามารถนำมาใช้ประเมินความหนาและชนิดของชั้นดินได้โดยอ้อม

ปัจจุบันมีวิธีการทดสอบเพื่อที่จะหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนทั้งในสนามและในห้องปฏิบัติการ แต่จะเป็นวิธีที่ยุ่งยากซับซ้อนและอาจจะต้องทำการเจาะหลุมสำรวจดินในการสำรวจหรือเก็บตัวอย่างแต่ละครั้ง ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้นำเอาวิธีการวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณมาประยุกต์ใช้ในการสำรวจเพื่อที่จะหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดิน การวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณเป็นเทคนิคที่ใช้ในการสำรวจหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดิน Seng (2551) ได้ทำการศึกษากการวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณด้วยวิธีแอดที่ฟกับดินในประเทศไทย 7 แห่งโดยใช้วิธี F-K Transform ในการสร้างโค้งการกระจายเพื่อที่จะวิเคราะห์ค่าความเร็วคลื่นเฉือนเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบด้วยวิธีการทดสอบดาวน์ไฮลการเจาะสำรวจดินและการทดสอบด้วยกรวยหยั่งแบบสั้น ซึ่งพบว่าผลการสำรวจการวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณนั้นสอดคล้องกับผลการทดสอบวิธีอื่นๆที่กล่าวมาแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตามการสร้างโค้งการกระจายด้วยวิธี F-K Transform จะมีคุณภาพสูงหรือต่ำนั้นขึ้นอยู่กับวิธีการเลือกใช้จำนวนของตัวตรวจวัดสัญญาณและการวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณ

ด้วยวิธีแอกทีฟนั้น มีขีดจำกัดในด้านความลึก เนื่องจากจำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดคลื่นสั้นสะเทือนที่มีกำลังสูงขึ้นเมื่อต้องการประเมินค่าความเร็วของชั้นดินที่อยู่ระดับลึกลงไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบการสร้างโค้งการกระจายของวิธี F-K Transform กับวิธี Phase Shift ในการแปลงผลการสร้างโค้งการกระจายใหม่สำหรับการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าความเร็วคลื่นเฉือน
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์หาค่าความเร็วคลื่นเฉือนของการทดสอบ MASW แบบวิธีแอกทีฟกับวิธีแพสซีฟสำหรับชั้นดินต่างๆ
- 1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบ MASW แบบวิธีแอกทีฟกับวิธีแพสซีฟ
- 1.2.4 เปรียบเทียบผลการทดสอบ MASW กับผลการเจาะสำรวจดิน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ทำการทดสอบ MASW แบบแอกทีฟและแพสซีฟสามแห่ง
  - 1).สนามฟุตบอลของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
  - 2).จังหวัดเชียงราย
  - 3).จังหวัดเพชรบูรณ์
- 1.3.2 ตรวจวัดคลื่นสั้นสะเทือนวิธีแอกทีฟ  
โดยใช้ Geophone ที่มีความถี่ 4.5 เฮิรตซ์วัดคลื่นสั้นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการใช้ค้อนทุบกับแผ่นเหล็ก
- 1.3.3 ตรวจวัดคลื่นสั้นสะเทือนวิธีแพสซีฟ  
โดยใช้ Geophone ที่มีความถี่ 2 และ 4.5 เฮิรตซ์วัดคลื่นสั้นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากธรรมชาติโดยจัดวางแบบฉากและวงกลมรัศมี 4 5 8 10 20 40 เมตร
- 1.3.4 วิเคราะห์การทดสอบ  
โดยใช้การแปลงด้วยวิธี Phase Shift และคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าความเร็วของคลื่นเฉือนด้วยวิธี  $\lambda/2$

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 การพัฒนาการทดสอบการวิเคราะห์หัตถ์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณให้มีประสิทธิภาพในการสำรวจชั้นดินดียิ่งขึ้น
- 1.4.2 นำการทดสอบการวิเคราะห์หัตถ์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณมาใช้ในการสำรวจหาตำแหน่งความเร็วคลื่นเนื้อดินในประเทศไทย



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 คลื่นสั่นสะเทือน (Seismic Waves)

การจัดแบ่งประเภทของคลื่นหากเราคำนึงถึงคุณสมบัติของตัวกลางที่คลื่นเดินทางผ่านนั้น สามารถแบ่งประเภทของคลื่นออกเป็นสองประเภทใหญ่ๆคือคลื่นที่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่หรือ “คลื่นกล(mechanical wave)” เช่นคลื่นในเส้นเชือกคลื่นน้ำคลื่นเสียงเป็นต้นและคลื่นที่ไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่หรือ “คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave)” เช่นคลื่นแสงคลื่นวิทยุคลื่นโทรศัพท์เป็นต้นดังนั้นคลื่นสั่นสะเทือนจึงจัดเป็นคลื่นที่อาศัยเคลื่อนที่โดยอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่นั่นคือคลื่นสั่นสะเทือนไม่สามารถเดินทางผ่านสุญญากาศได้และถ้าหากพิจารณาเฉพาะคลื่นสั่นสะเทือนโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคของตัวกลางกับทิศทางที่คลื่นเคลื่อนผ่านตัวกลางของคลื่นก็จะสามารถแบ่งคลื่นสั่นสะเทือนออกเป็นสอง 2 แบบคือคลื่นที่เคลื่อนผ่านตัวกลางเรียกว่า “คลื่นตัวกลางหรือ (body waves)” และคลื่นที่เคลื่อนผ่านตัวกลางและขนานไปกับผิวดินเรียกว่า “คลื่นผิวดิน (surface waves)”

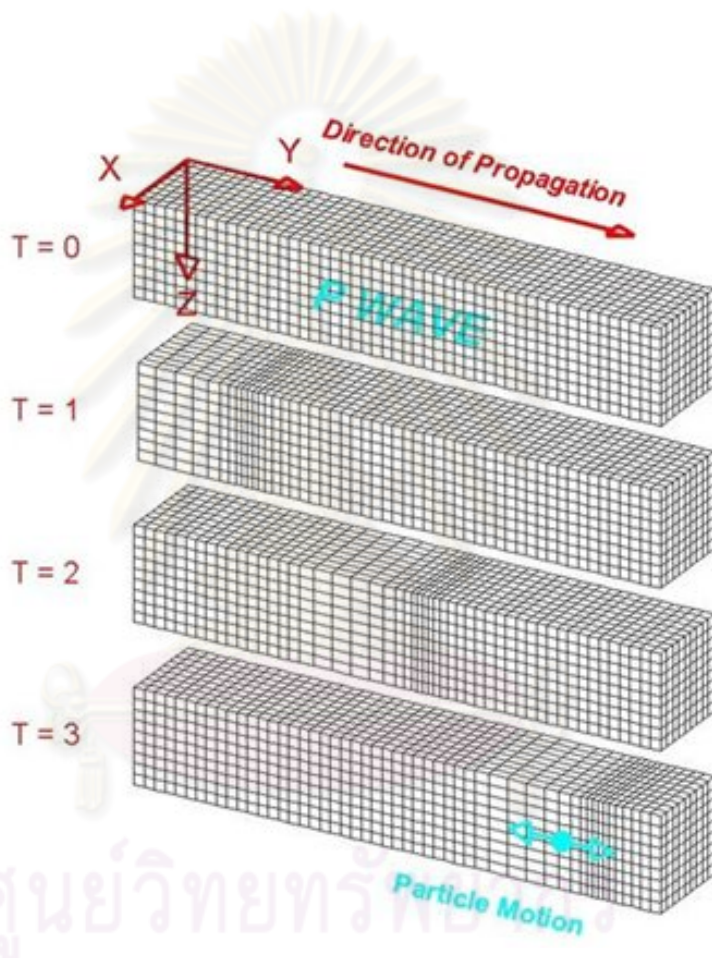
### 2.2 ชนิดของคลื่น

#### 2.2.1 คลื่นในตัวกลาง(Body Waves)

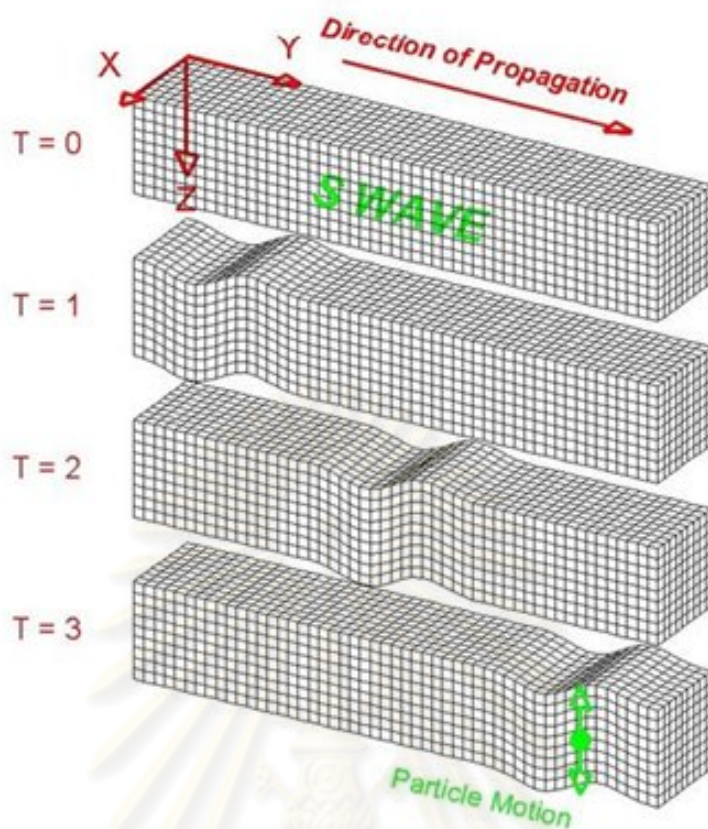
คลื่นในตัวกลาง (body waves) เป็นคลื่นที่เดินทางผ่านเข้าไปภายในตัวกลางคลื่นหลักแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ คลื่นปฐมภูมิหรือคลื่น P (Primary or P-Waves) และคลื่นทุติยภูมิหรือคลื่น S (Secondary or S-Waves)

คลื่นปฐมภูมิ (primary wave) หรือคลื่นพี(P-wave)หรือคลื่นอัด (compressional wave)คือ คลื่นตามยาว (Longitudinal Wave)เป็นคลื่นที่ทำให้อนุภาคของตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนผ่านมีการสั่นแบบอัด (compression) และขยาย (rarefaction) ในทิศทางเดียวกันกับคลื่นเคลื่อนที่ไปดังแสดงในภาพที่ 2.1หรือจากตัวอย่างของคลื่นที่เกิดจากการอัดและขยายของขวดวดสปริง

คลื่นทุติยภูมิ (secondary wave) หรือคลื่นเอส (S-wave) หรือคลื่นเฉือน (shear wave) คือ คลื่นตามขวาง (Transverse Wave) เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางแล้วทำให้อนุภาคของตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านมีการเคลื่อนที่ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางที่การเคลื่อนที่ของคลื่นดังแสดงในภาพที่ 2.2 หรือจากตัวอย่างของคลื่นที่ผิวน้ำคืออนุภาคมีการเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงตั้งฉากกับทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่คลื่นเฉือนยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบคือคลื่นเฉือนแนวตั้ง (SV-component) และคลื่นเฉือนแนวนอน (SH-component)



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของคลื่น P



ภาพที่ 2.2 ลักษณะของคลื่น S

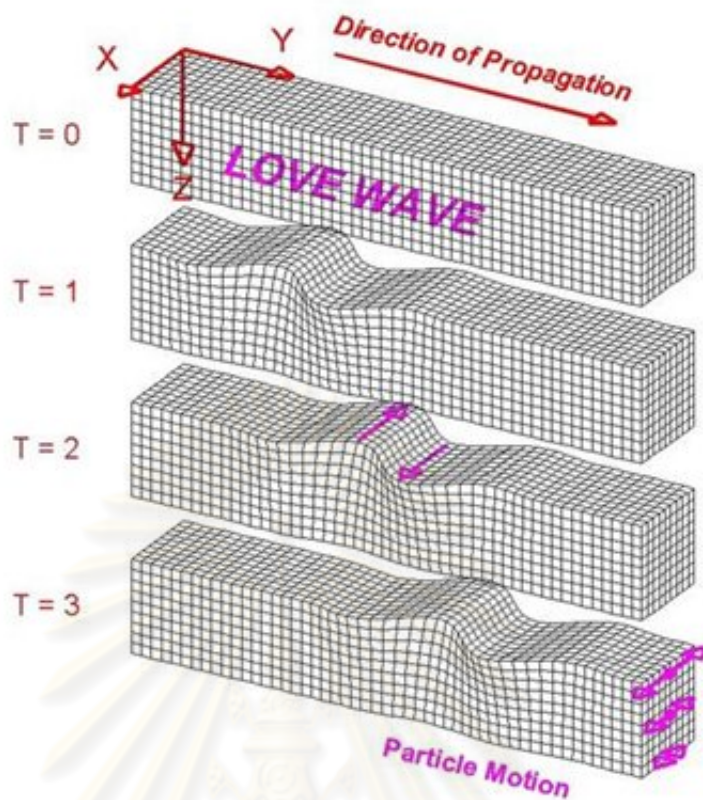
### 2.2.2 คลื่นพื้นผิว (Surface Waves)

คลื่นพื้นผิวเป็นคลื่นที่เดินทางอยู่เฉพาะส่วนของผิวหน้าของตัวกลางคลื่นพื้นผิวสามารถแบ่งออกเป็นสองชนิด คือ คลื่นเลิฟ (Love Waves) และคลื่น Rayleigh (Rayleigh Waves)

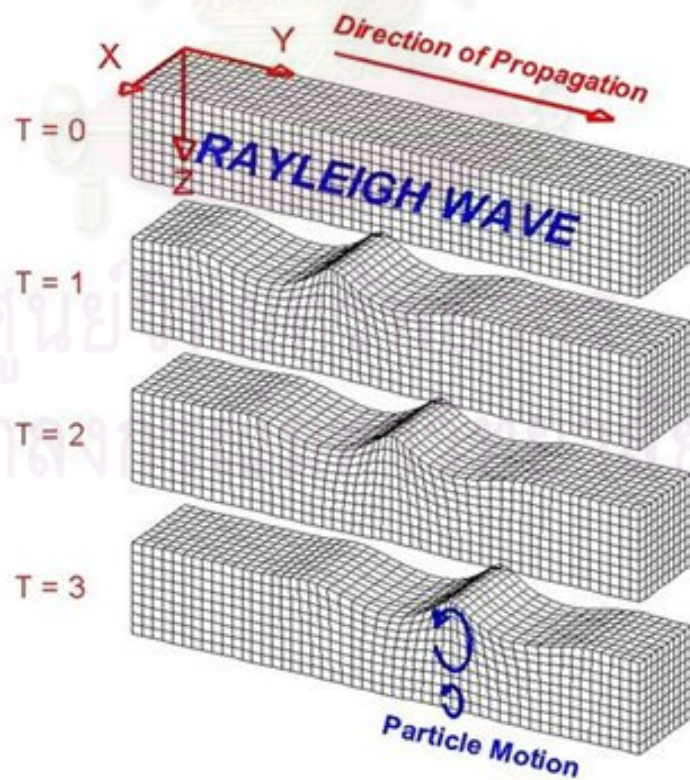
คลื่นเลิฟตั้งชื่อตามนักธรณีฟิสิกส์ A.E.H. Love (1863-1940) คลื่นเลิฟเป็นคลื่นพื้นผิวที่มีความเร็วที่สุดในบรรดาคลื่นพื้นผิว และมีความเร็วเป็นอันดับสามในบรรดาคลื่นทั้งหมด เมื่อคลื่นเลิฟเดินทางผ่านพื้นผิวของตัวกลางจะทำให้อนุภาคของตัวกลางขนานกับผิวหน้าและตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น

คลื่น Rayleigh ตั้งชื่อตามนักฟิสิกส์ J.W.S. Rayleigh (1842-1919) คลื่น Rayleigh เป็นคลื่นที่มีความเร็วต่ำที่สุดในบรรดาคลื่นทั้งหมด เมื่อคลื่น Rayleigh เดินทางไปตามพื้นผิวโลก ทำให้ตัวกลางที่คลื่น Rayleigh เดินทางผ่านม้วนตัวในแนวตั้งคล้ายคลื่นน้ำ ขณะเดียวกันก็กระเพื่อมไปด้านข้างดังแสดงในภาพที่ 2.4 ด้วยเหตุนี้เองเราจึงรู้สึกสั่นสะเทือนจากคลื่นนี้โดดเด่นกว่าคลื่นอื่นๆ ความเสียหายส่วนใหญ่เกิดขึ้นเพราะคลื่น Rayleigh นี้





ภาพที่ 2.3 ลักษณะของคลื่น Love



ภาพที่ 2.4 ลักษณะของ Rayleigh

### 2.3 ทฤษฎีความยืดหยุ่น (Theory of Elasticity)

การสำรวจกรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีการใช้คลื่นสั้นสะเทือนจะอาศัยหลักการการเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางของคลื่น โดยที่ตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านนั้นจะมีคุณสมบัติความยืดหยุ่นซึ่งจะมีผลต่อความเร็วของการเคลื่อนที่ของคลื่นสั้นสะเทือน

ทฤษฎีความยืดหยุ่นกล่าวถึงปริมาณของแรง (force) ภายนอกที่กระทำต่อตัวกลางหรือวัตถุทำให้เกิดการเปลี่ยนลักษณะ (deformation) ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนขนาดรูปร่างหรืออย่างไรอย่างหนึ่งหรือทั้งสองอย่างการเปลี่ยนลักษณะที่ถูกแรงกระทำจะสัมพันธ์กับความเค้น (stress,  $\sigma$ ) และความเครียด (strain,  $\epsilon$ ) คือเมื่อเกิดความเค้นจะเกิดความเครียดการเปลี่ยนลักษณะแบบยืดหยุ่นจะหมายถึงการเปลี่ยนลักษณะที่ไม่เป็นแบบถาวรคือเมื่อความเค้นที่กระทำกับวัตถุหรือตัวกลางหายไปผลของการเปลี่ยนแปลงหรือความเครียดจะหายไปด้วยทั้งนี้วัตถุหรือตัวกลางจะกลับคืนสู่สภาพเดิมและถ้าหากพบว่าวัตถุมีการคืนสภาพเดิมทันทีที่ความเค้นหายไปถือว่าวัตถุนั้นมีคุณสมบัติของความยืดหยุ่นแบบสมบูรณ์ในการสำรวจวัดคลื่นสั้นสะเทือนส่วนใหญ่จะสมมุติให้ชั้นดิน-หินถือว่ามีความยืดหยุ่นแบบสมบูรณ์ในกรณีที่ออกแรงมากๆหรือมีความเค้นมากจนทำให้วัตถุหรือตัวกลางเปลี่ยนสภาพแบบถาวรแสดงว่าแรงที่กระทำนั้นเกินกว่าขอบเขตของค่าความยืดหยุ่นของวัตถุหรือตัวกลางที่จะรับแรงได้ซึ่งไม่เป็นไปตามทฤษฎีความยืดหยุ่น

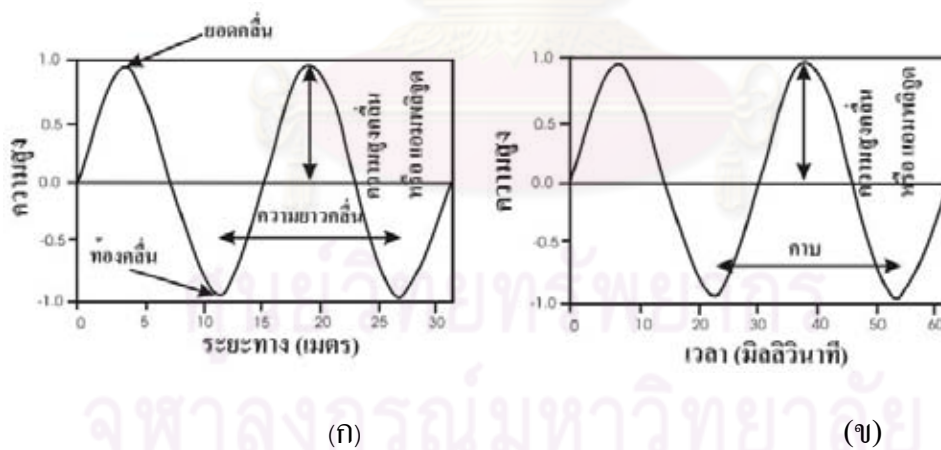
### 2.4 การเคลื่อนที่ของคลื่น (Wave Motion)

คลื่นสั้นสะเทือนเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคถูกรบกวนทำให้อนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่น เช่นเมื่อมีคลื่นกระแทกเกิดขึ้นกับอนุภาคในบริเวณที่ถูกกระแทกหรือถูกรบกวนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแต่อนุภาคไม่ได้เคลื่อนที่ไปกับคลื่นมีเพียงพลังงานที่ถูกถ่ายทอดหรือเคลื่อนที่ออกไป การเปลี่ยนแปลงของอนุภาคสามารถกลับคืนสู่รูปเดิมได้โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงให้เห็นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านไปแล้วตัวอย่างเช่น เมื่อโยนก้อนหินลงไปในน้ำจะเกิดคลื่นโดยที่ก้อนหินที่โยนลงไปจะเป็นตัวกำเนิดคลื่นและเกิดการการเคลื่อนที่ของคลื่นในน้ำบริเวณที่ถูกก้อนหินกระแทกคลื่นเดินทางออกจากจุดกำเนิดคลื่นโดยเริ่มจากการแพร่กระจายออกไปรอบๆลักษณะคลื่นน้ำที่แพร่กระจายออกไปดังภาพที่ 2.5 หรือสามารถอธิบายโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการซายน์ (sine) หรือโคซายน์ (cosine) อธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นได้ดังแสดงในภาพที่ 2.6 (ก) และ (ข) ลักษณะของคลื่นสามารถเทียบได้ในเชิงของระยะทาง (ภาพที่ 2.6 (ก)) หรือเทียบได้เชิงของเวลา

(ภาพที่ 2.6 (ข)) ซึ่งทั้งในเชิงของระยะทางและเวลามีความสัมพันธ์กันนั่นคือความเร็ว (velocity) จากภาพที่ 2.6 (ก) ความสูงของแอมพลิจูด (amplitude) คือระยะครึ่งหนึ่งระหว่างทั้งคลื่นถึงยอดคลื่นส่วนความยาวคลื่น (wave length) คือระยะตั้งแต่ยอดคลื่นแรกทับกับยอดคลื่นตัวถัดมา



ภาพที่ 2.5 ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นเมื่อโยนก้อนหินลงน้ำบริเวณน้ำนิ่ง



ภาพที่ 2.6 ลักษณะของคลื่น (ก) ระยะทางของคลื่นกับแอมพลิจูดของคลื่น (ข) ความสัมพันธ์เวลา กับแอมพลิจูดของคลื่น



## 2.5 คำนิยามเกี่ยวกับคลื่น

- 1) ความถี่ (Frequency) นิยมใช้สัญลักษณ์แทนด้วย “f” หมายถึงจำนวนรอบที่อนุภาคของตัวกลางสั่นกลับไปมาในหนึ่งวินาทีซึ่งมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hertz, Hz) หรือรอบต่อวินาที (ดูตารางที่ 2-1 ประกอบระหว่างความสัมพันธ์ของความถี่กับค่าอื่นๆ)

ตารางที่ 2-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ของคลื่น

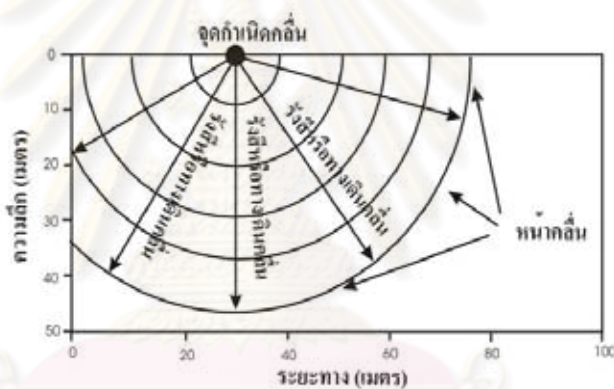
ตัวแปร	ความสัมพันธ์
คาบ, T	$T=1/f=2\pi/\omega$
ความถี่, f	$f=\omega/2\pi=v/\lambda$
ความยาวคลื่น, $\lambda$	$\lambda=v/T=2\pi/k$
จำนวนลูกคลื่น, k	$k=2\pi/\lambda=\omega/v$
ความเร็วคลื่น, v	$v=f\lambda=\omega/k$

- 2) ความเร็วคลื่น (Velocity) นิยมใช้สัญลักษณ์แทนด้วย “v” หมายถึงระยะทางคลื่นเคลื่อนที่ไปได้ใน 1 หน่วยเวลาซึ่งอาจจะมีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาทีหรือกิโลเมตรต่อวินาทีเป็นต้นดังนั้นความเร็วคลื่นเท่ากับค่าความถี่ (f) คูณกับค่าความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) โดยที่  $v = f\lambda$
- 3) เฟส (Phase) เฟสของจุดใดจุดหนึ่งบนคลื่นหมายถึงมุมที่ทำเป็นองศาหรือเรเดียนส์บนแนวกึ่งกลางระหว่างท้องคลื่นกับยอดคลื่น
- 4) อัตราเร็วเชิงมุม (Angular Frequency) คือมุมที่คิดเป็นเรเดียนส์ในการเคลื่อนที่ไปกลับของอนุภาคในเวลาหนึ่งวินาทีที่มีหน่วยเป็นเรเดียนส์ต่อวินาทีใช้สัญลักษณ์ “ $\omega$ ”
- 5) คาบ (Period) คือ เวลาที่อนุภาคของตัวกลางสั่นไปมาครบหนึ่งรอบใช้สัญลักษณ์ “T”

## 2.6 หน้าคลื่นและทางเดินคลื่น (Wavefronts and Raypaths)

ความสัมพันธ์ระหว่างหน้าคลื่น (wavefront) และทางเดินคลื่น (raypath) ซึ่งในบางครั้งทางเดินคลื่นอาจจะใช้คำว่า “รังสีคลื่น” ก็ได้ ซึ่งลักษณะของหน้าคลื่นและทางเดินคลื่นจะมี

ลักษณะดังแสดงในภาพที่ 2.7 จากรูปจะเห็นได้ว่าทางเดินคลื่นจะเป็นเพียงเส้นที่บ่งบอกถึงทิศทาง การเคลื่อนที่ออกไปของคลื่นสำหรับคลื่นใดๆ ทางเดินคลื่นสามารถเกิดขึ้นได้มากมายโดยที่ หลักการของทางเดินคลื่นคือการลากเส้นตรงออกจากแหล่งกำเนิดคลื่นและตั้งฉากกับหน้าคลื่นซึ่ง สามารถลากได้ทุกทิศทุกทางตั้งแต่ 0 - 360 องศาถ้าหากคลื่นเดินทางออกจากจุดกำเนิดเป็น รูปทรงกลม ดังนั้นวิธีการที่จะลากทิศทางของทางเดินคลื่นอย่างไรนั้นจะขึ้นอยู่กับสนใจ ใน ภาพที่ 2.7 แสดงทางเดินคลื่นเพียงบางส่วนเท่านั้น ส่วนหน้าคลื่นคือแนวที่เชื่อมต่อของจุดต่างๆ บนคลื่นที่มีเฟสเท่ากันเช่นแนวของท้องคลื่นหรือยอดคลื่นเป็นต้นหน้าคลื่นจะตั้งฉากกับทางเดิน คลื่นเสมอ ดังนั้นเมื่อทราบหน้าคลื่นก็จะสามารถหาทางเดินคลื่นได้หรือในทางกลับกันเมื่อทราบ ทางเดินคลื่นก็สามารถหาหน้าคลื่นได้ในการสำรวจด้วยคลื่นสั้นสะเทือนเราใช้ทางเดินคลื่นเพื่อ แสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นเพราะจะง่ายกว่าการบ่งบอกโดยใช้หน้าคลื่นเป็นหลักเราสามารถ กำหนดทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่นที่วิ่งลงสู่พื้นดินก่อนที่จะกลับขึ้นมาที่ตัวรับคลื่นได้ง่ายกว่าการ พิจารณาหน้าคลื่นเป็นหลัก



ภาพที่ 2.7 แสดงหน้าคลื่นที่เดินทางออกเป็นรูปวงกลมและทางเดินคลื่น (raypath)

## 2.7 ความเร็วคลื่นสั้นสะเทือน (Seismic Velocity)

ในการสำรวจด้วยคลื่นสั้นสะเทือนส่วนใหญ่เราสนใจคลื่นพี (VP) ส่วนคลื่นเอส (VS) หรือ คลื่นเฉือนปัจจุบันยังอยู่ในขั้นของการวิจัยเพื่อประยุกต์สำรวจบางพื้นที่เท่านั้นยังไม่นิยมทำกัน อย่างความเร็วคลื่นพีและคลื่นเอสจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการยืดหยุ่นดังได้กล่าวมาแล้ว บางส่วนในหัวข้อ 2.3 โดยเราแบ่งวัตถุในโลกออกเป็นสามประเภทใหญ่ๆคือของแข็งของเหลวและ ก๊าซหรืออาจจะแบ่งออกเป็นเพียงสองประเภทคือของแข็งและของไหล (รวมเอาของเหลวและก๊าซ เข้าด้วยกันเรียกว่าของไหล) วัตถุที่เป็นของแข็งจะต้องมีคุณสมบัติยืดหยุ่นโดยที่วัตถุแต่ละชนิดจะ

มีคุณสมบัติของการยืดหยุ่นมากน้อยต่างกัน กฎของฮุค (Hooke's law) อธิบายความสัมพันธ์ของการยืดหยุ่นเชิงปริมาณคลื่นพีและคลื่นเอสมีความสัมพันธ์กับค่าคุณสมบัติความยืดหยุ่นดังสมการแสดงอยู่ในภาพที่ 2.8

โดยที่ค่าคงตัวของคุณสมบัติความยืดหยุ่นประกอบด้วย

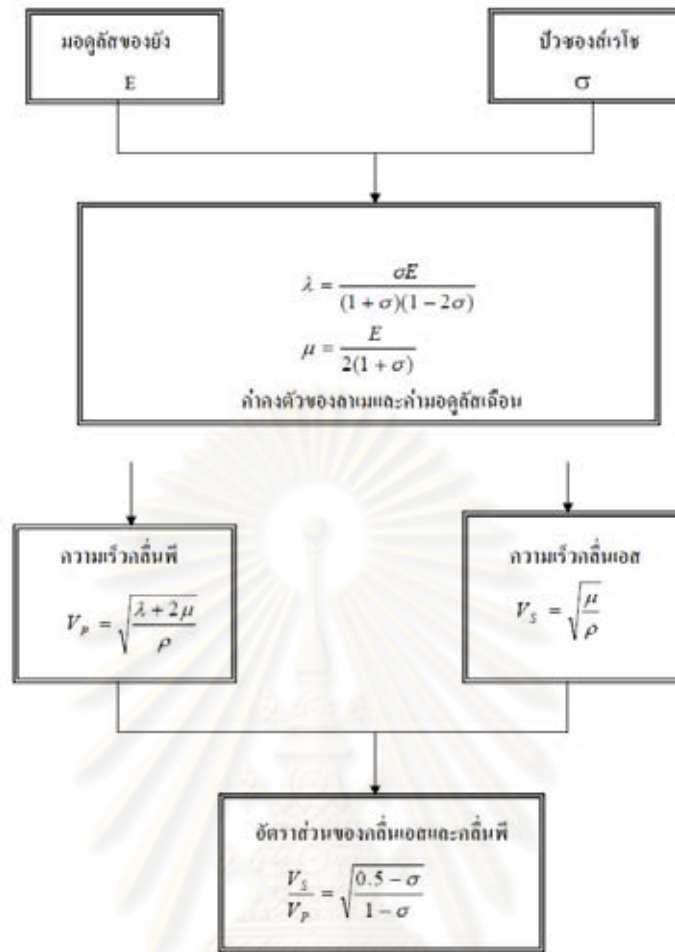
1) มอดูลัสของยัง (Young's Modulus) ใช้สัญลักษณ์ "E" เป็นคุณสมบัติที่เมื่อวัตถุถูกความเค้น ( $\sigma$ ) จะเกิดความเครียด ( $\epsilon$ ) ซึ่งค่าความเค้นและความเครียดแปรผันกับค่าคงตัวของวัตถุที่เรียกว่า "ค่ามอดูลัสของยัง" ดังสมการที่ 2.1

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad 2.1$$

2) อัตราปัวซองส์ (Poisson's Ratio) ในทางธรณีฟิสิกส์นิยมใช้สัญลักษณ์ "ν" ซึ่งจะเข้าคู่กับสัญลักษณ์ความเค้นดังนั้นขอให้พึงระวังไว้ในจุดนี้ส่วนทางวิศวกรรมจะใช้สัญลักษณ์ "ν (นิว)" แทนอัตราปัวซองส์เพื่อป้องกันไม่ให้สับสนกับสัญลักษณ์ของความเค้นอย่างไรก็ตามในหนังสือเล่มนี้ใช้สัญลักษณ์ด้วย σ แทนอัตราปัวซองส์เพราะเป็นที่ยอมรับของนักธรณีฟิสิกส์โดยทั่วไปค่าอัตราปัวซองส์เป็นอัตราส่วนระหว่างความเครียดในแกนขวาง ( $\Delta W$ ) ต่อความเครียดในแกนยาว ( $\Delta L$ ) เมื่อวัตถุยาว L และหนา W ถูกความเค้นกระทำในแกนยาว:ซึ่งหาค่าอัตราปัวซองส์ได้จากสมการที่ 2.2

$$\nu = \frac{\Delta W / W}{-\Delta L / L} \quad 2.2$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติความยืดหยุ่นกับค่าความเร็วคลื่นพีและคลื่นเอส (Yilmaz, 2001)

ค่าของอัตราปัวซองส์มีค่าตั้งแต่ 0-0.5 นี้จะมีค่าอัตราปัวซองส์เท่ากับ 0.5 และปัวซองส์ที่เป็นของแข็งจะประมาณเท่ากับ 0.25

3) บัคส์โมดูลัส (Bulk Modulus, k) ใช้สัญลักษณ์ "k" คือความสามารถคงทนต่อการกดอัดตัวของวัสดุต่างๆ เช่น สมมุติว่าเรามีแท่งหินทรายและแท่งฟองน้ำขนาดเท่ากันถ้าเราออกแรงบีบแท่งหินทรายและแท่งฟองน้ำเราจะพบว่าแท่งฟองน้ำออกแรงบีบเพียงเบาๆ ก็เปลี่ยนแปลงรูปร่างและสังเกตได้ง่ายกว่าแท่งหินทราย ดังนั้นเรากล่าวได้ว่าค่าบัคส์โมดูลัสของแท่งฟองน้ำจะน้อยกว่าค่าบัคส์โมดูลัสของแท่งหินทรายจากตัวอย่างนี้โดยทั่วไปแล้วเราพอที่จะอธิบายได้ว่าค่าบัคส์โมดูลัสของหินแข็งมีค่ามากกว่าดินร่วนเป็นต้นค่าบัคส์โมดูลัสคำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$k = \frac{\Delta P}{\Delta P / V}$$

เมื่อ  $P$  คือค่าความดันที่เปลี่ยนไป  $V$  คือปริมาตรที่เปลี่ยนไปและ  $V$  คือปริมาตรของวัตถุ

4) มอดูลัสเฉือน (Shear Modulus,  $\mu$ ) ใช้สัญลักษณ์ " $\mu$ " มอดูลัสเฉือนบอกถึงความสามารถ

ในการต่อต้านการเปลี่ยนแปลงของวัตถุเมื่อถูกแรงเฉือนมากกระทำซึ่งอากาศกับของเหลวไม่สามารถจะต่อต้านแรงเฉือนได้โดยมอดูลัสค่าเฉือนจึงมีค่าเท่ากับศูนย์คลื่นเฉือนจึงไม่สามารถผ่านอากาศและน้ำได้ค่ามอดูลัสเฉือนคือมอดูลัสเฉือนคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

$$\mu = \frac{\sigma_{shear}}{\epsilon} \quad 2.4$$

5) ค่าคงตัวของลามเม (Lame's Constant) ใช้สัญลักษณ์ " $\lambda$ " เป็นค่าความสัมพันธ์ที่เกิดจากค่าของมอดูลัสของยังและค่าอัตราปัวซองส์ดังสมการที่แสดงอยู่ในภาพที่ 2.8 ที่แสดงความสัมพันธ์กับค่าคงตัวของลามเมสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์กับของค่าบัตล์มอดูลัสได้ใหม่ตามสมการที่ 2.5

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{\frac{3}{4}\mu + k}{\rho}} \quad 2.5$$

จากสมการของ  $V_p$  และ  $V_s$  จะเห็นว่าค่าความเร็วของคลื่นพีและคลื่นเอสจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่น (density,  $\rho$ ) ของวัตถุด้วยเช่นระหว่างดินแห้งกับดินเปียกค่าความหนาแน่นย่อมไม่เท่ากันค่ามอดูลัสของยังและค่าอัตราปัวซองส์ไม่เท่ากันอีกเช่นกันดังนั้นค่าความเร็วคลื่นระหว่างดินแห้งจึงแตกต่างจากดินเปียกหรือระหว่างหินทรายกับหินปูนค่าความหนาแน่นของหินทรายที่มีแร่ควอตซ์เป็นองค์ประกอบกับหินปูนที่มีแร่แคลไซต์เป็นองค์ประกอบแตกต่างกันค่าของมอดูลัสของยังและค่าอัตราปัวซองส์แตกต่างกันดังนั้นค่าความเร็วคลื่นย่อมแตกต่างกันเป็นต้น

## 2.8 การเลือกช่วงการเก็บข้อมูล (Sampling Rate)

การเดินทางของคลื่นตั้งแต่ออกจากตัวกำเนิดคลื่นจะมีการเดินทางในลักษณะแบบต่อเนื่องและเมื่อคลื่นกระทบกับตัวกลางต่างชนิดที่ทำให้เกิดการสะท้อนและหักเหกลับของคลื่นการเดินทางก็ยังคงเป็นแบบต่อเนื่องแต่เครื่องมือที่ต่อเข้ากับตัวรับคลื่นไม่สามารถที่จะทำการบันทึก

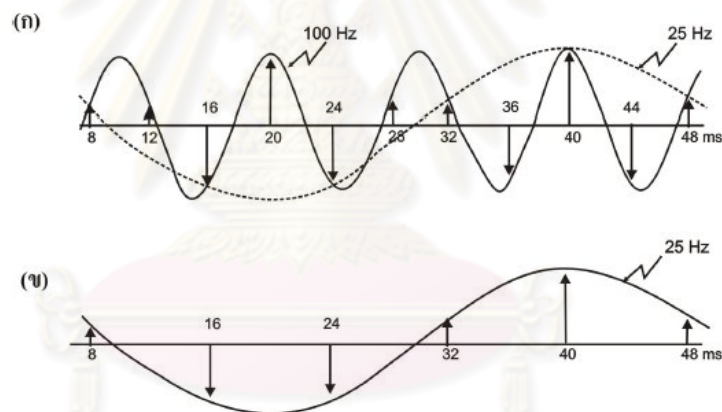
ข้อมูลการเดินทางของคลื่นแบบต่อเนื่องได้เครื่องสามารถบันทึกข้อมูลในลักษณะที่เป็นช่วงของเวลาเช่นเก็บข้อมูลทุกๆช่วง 0.001, 0.002, 0.003, วินาที ( $\Delta t$ ) ดังตัวอย่างแสดงในภาพที่ 2.9 ซึ่งการเก็บข้อมูลเป็นช่วงๆเช่นนี้มีผลต่อค่าความถี่ของคลื่นหากเราทำการเก็บข้อมูลด้วยช่วงวินาทีที่แคบๆเราจะสามารถเก็บข้อมูลของคลื่นที่มีความถี่สูง แต่ถ้าเราเก็บข้อมูลด้วยช่วงวินาทีที่กว้างเราจะได้ข้อมูลของคลื่นที่มีความถี่ต่ำเช่นในกรณีที่เราเก็บข้อมูลด้วยช่วงการเก็บข้อมูลทุกๆ 0.004 วินาที เราสามารถคำนวณความถี่สูงสุดได้จากสมการที่ 2.6

$$F_n = \frac{1}{2\Delta t}$$

2.6

เมื่อ  $F_n$  คือ (Nyquist frequency) มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์

$\Delta t$  คือช่วงการเก็บข้อมูลมีหน่วยเป็นวินาที



ภาพที่ 2.9 ช่วงการเก็บข้อมูล(ก) เก็บข้อมูลทุกๆ 0.004 วินาที(ข) เก็บข้อมูลทุกๆ 0.008 วินาที

ดังนั้นเมื่อแทนค่า 0.004 วินาทีลงในสมการดังกล่าวข้างต้นจะได้ความถี่สูงสุด 125 เฮิรตซ์ ลักษณะช่วงการเก็บข้อมูลแสดงในภาพที่ 2.9(ก) ถ้าเราเปลี่ยนช่วงการเก็บข้อมูลเป็นทุกๆ 0.008 วินาทีเมื่อแทนค่าลงในสมการจะได้ความถี่สูงสุด 62.5 เฮิรตซ์และถ้าคลื่นที่เดินทางเข้ามามีความถี่ 100เฮิรตซ์แต่ช่วงการเก็บข้อมูลเก็บทุก 0.008 วินาทีคลื่นความถี่ 100 เฮิรตซ์จะบันทึกได้เป็นคลื่น 25เฮิรตซ์ดังแสดงในภาพที่ 2.9 (ข)

การเลือกช่วงเก็บข้อมูลเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องพิจารณาโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการสำรวจแบบสะท้อนหากเก็บข้อมูลด้วยช่วงการเก็บข้อมูลแคบๆจำนวนของข้อมูลจะมากย่อมส่งผลทำให้การ



ประมวลผลเสียเวลามากแต่หากเก็บด้วยช่วงกว้างๆ ความถี่ของคลื่นจะน้อยจะมีผลต่อการแปลความหมายในส่วนของการแบ่งแยกชั้นหินหากเก็บที่ช่วงแคบๆ จะได้ความถี่ของคลื่นสูง

เมื่อเก็บข้อมูลด้วยความช่วงการเก็บใดๆ แล้วหากจะนำมากำหนดช่วงการเก็บใหม่ให้ละเอียดขึ้นเช่นเก็บข้อมูลจากสนามทุกๆ 0.002 วินาทีต่อมานำข้อมูลมาแปลงเป็นช่วง 0.001 วินาทีเป็นสิ่งที่ไม่ควรทำเพราะไม่ทำให้เกิดประโยชน์ต่อคุณภาพของข้อมูลแต่หากจะแปลงให้หายบางสามารถทำได้ข้อดีคือจำนวนข้อมูลลดน้อยลงส่วนคุณภาพของข้อมูลลดลงตามไปด้วย

## 2.9 วิธีการสำรวจเชิงธรณีฟิสิกส์

วิธีการสำรวจเชิงธรณีฟิสิกส์ได้นำมาใช้ในงานวิศวกรรมทางธรณีวิทยาและด้านสิ่งแวดล้อมสำหรับในแต่ละจุดมุ่งหมายโดยเฉพาะการวิจัยในการทดสอบการสั่นสะเทือนในสนามได้เน้นวิธีคลื่นผิวโครงสร้างพื้นฐานของคลื่นผิวได้เริ่มจากการใช้วิธีการทดสอบความถี่ของวัสดุที่เป็นคอนกรีต Viktorov, (1967) จากนั้นแนวคิดนี้ได้รับการขยายไปสู่การตรวจสอบโครงสร้างโลกโดยผู้เชี่ยวชาญด้านแผ่นดินไหว

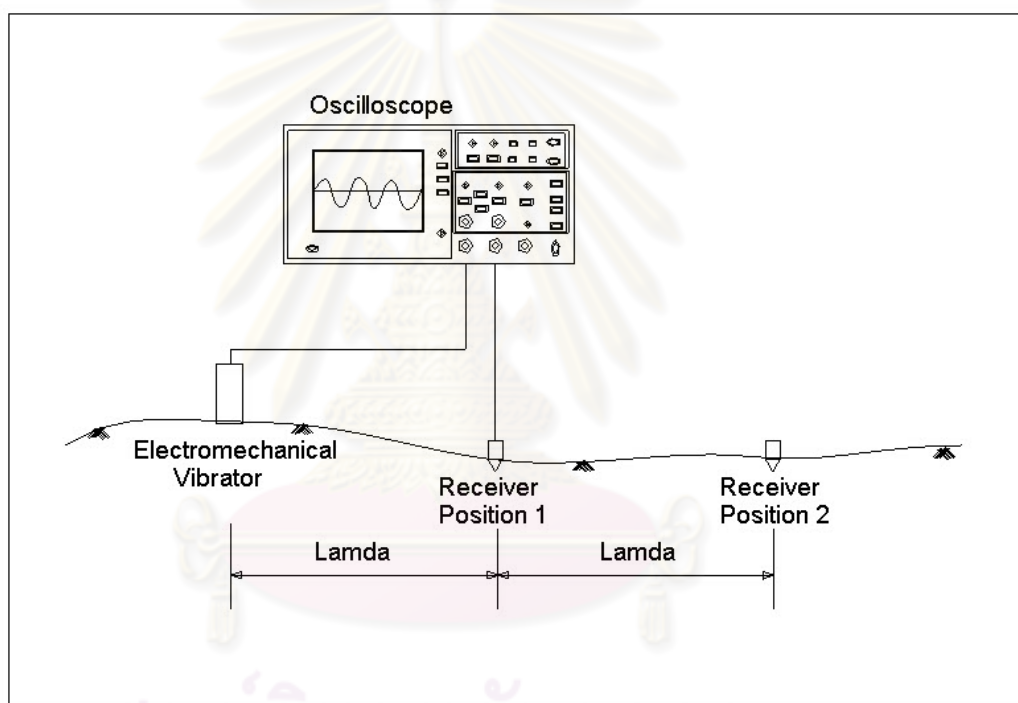
Jones, (1958, 1962) และ Ballard (1964) ได้มีการดัดแปลงแนวคิดดังกล่าวเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานด้านวิศวกรรมโยธาก็คือวิธี Steady State Rayleigh Method (SSRM) ซึ่งใช้เครื่องสั่นเชิงกลเพื่อสร้างคลื่น Rayleigh และมีตัวรับรับสัญญาณหนึ่งตัวเพื่อตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนของคลื่น Rayleigh

Stokoe et al, (1988, 1994) ได้นำความสำเร็จของวิธี SSRM ไปสู่การขยายแนวทางการวิเคราะห์สเปกตรัมของวิธีคลื่นผิว, SASWM โดยใช้ตัวรับสัญญาณสองตัวแทนวิธีนี้เป็นพื้นฐานตามหลักการของ SSRM แต่อย่างไรก็ตามการวัดในสนามเป็นไปได้ไปอย่างง่ายแต่ข้อบกพร่องของการตรวจวัดข้อมูลที่ได้มา ยังมีสัญญาณรบกวนของคลื่นสั่นสะเทือนที่เกิดจากการจราจร, งานก่อสร้าง, ปัจจัยอื่นๆ เป็นต้น ดังนั้นวิธีที่ดีกว่าที่จะกำจัดจุดอ่อนเหล่านั้นคือใช้จำนวนตัวรับในการรับสัญญาณของคลื่นที่เกิดจากแหล่งที่มาให้มากขึ้น

Park et al, (1999); Xia et al, (1999); Foti, (2000) ได้เสนอการวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณ MASWM การเชื่อมโยงกันของคลื่นที่เดินทางจากแหล่งกำเนิดไปยังตัวรับสัญญาณแต่ละตัวช่วยให้เราสามารถแบ่งแยกสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นได้

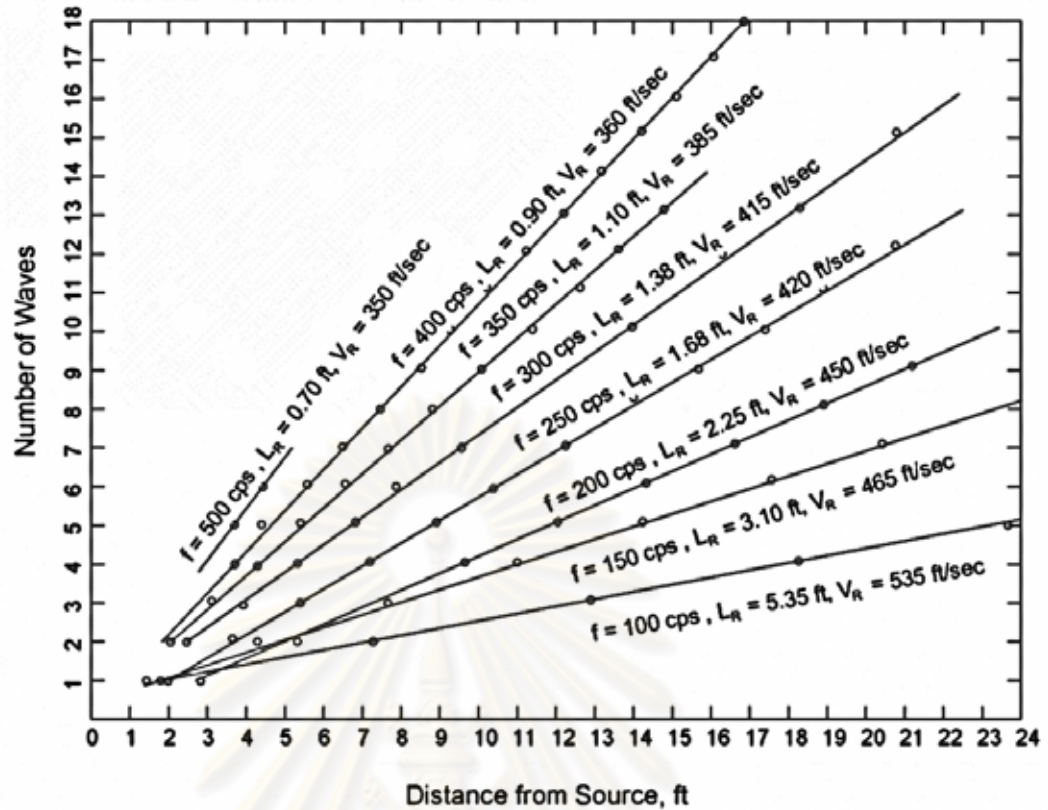
## 2.10 Steady State Rayleigh Method (SSRM)

แนวคิดพื้นฐานของวิธีนี้คือการหาความยาวคลื่นที่ตรงกับความถี่ที่แตกต่างจากแหล่งที่มา ซึ่งจะช่วยให้เราสามารถคำนวณเฟสความเร็วของคลื่น Rayleigh หรือคลื่น Love ที่สามารถใช้เพื่อสร้างโค้งการกระจายจากการวัดในสนามเครื่องส่งมีการวางแนวตั้งฉากเพื่อให้พลังงานที่ส่งจากแหล่งกำเนิดคลื่น Rayleigh และคลื่น Love พร้อมจะทำให้สัญญาณในแนวนอนและเครื่องรับจะตรวจรับได้โดยตรงสัญญาณทั่วไปที่ใช้ในการทดสอบเป็นคลื่น Rayleigh ชั้นตอนของ SSRM แสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ชั้นตอนในสนามสำหรับวิธี Rayleigh Steady State (จาก Rix 1988)

สัญญาณกับความถี่ ( $f$ ) จากเครื่องออสซิลโลสโคปแนวตั้งเป็นการบันทึกโดยเครื่องรับที่วางบนพื้นผิวดินเครื่องรับถูกย้ายไปจากแหล่งที่เป็นเส้นตรงเพื่อวัดความยาวคลื่นที่ความถี่ที่กำหนดสามารถมีได้หลายตำแหน่งของเครื่องรับว่าการเคลื่อนไหวของอนุภาคคือเฟสกับแหล่งกำเนิดที่ตั้งเครื่องรับเราจะได้รับจำนวนคลื่นในรูปของเฟสและระยะทางเพื่อให้สามารถวางแผนในแผนภาพที่เสนอ Richart et al (1970) ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 การหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่นของคลื่น Rayleigh โดย SSRM (จาก Richart et al 1970)

โดยเชื่อมต่อกันที่เราได้รับเส้นเอียงซึ่งความเอียงเป็นตัวแทนความผกผันของความยาวคลื่นความถี่ปัจจุบันตัวอย่างเช่นบรรทัดต่ำสุดในภาพที่ 2.11 เป็นการประกอบด้วยห้าตำแหน่งที่ต่างกันของเครื่องรับที่ซึ่งสัญญาณจะอยู่ในเฟสกับข้อมูลความถี่ 100 cps จากแหล่งที่มาตั้งนั้นความชันของเส้นหรือความยาวคลื่นผกผันเท่ากับ 5.35ft แล้วจากความยาวคลื่น  $\lambda_R$  และความถี่  $f$ , ความเร็วเฟสของคลื่น Rayleigh  $V_R$  ถูกกำหนดโดย :สมการที่ 2.7

$$v_R = f \lambda_R \quad 2.7$$

เมื่อ  $V_R$  และ  $\lambda_R$  เป็นค่าที่ถูกกำหนดขึ้น

โค้งการกระจายลักษณะ ( $V_R$  กับ  $\lambda_R$ ) สามารถสร้างโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่และกำหนด  $\lambda_R$  ในลักษณะเดียวกัน

การหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนและความลึกจะใช้การแปลงโดยตรงจาก  $V_R$  กับ  $\lambda_R$  ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8 และ 2.9

$$v_f \approx 1.1v_R \quad 2.8$$

$$Z \approx \frac{\lambda}{2} \text{ or } \frac{\lambda}{3} \quad 2.9$$

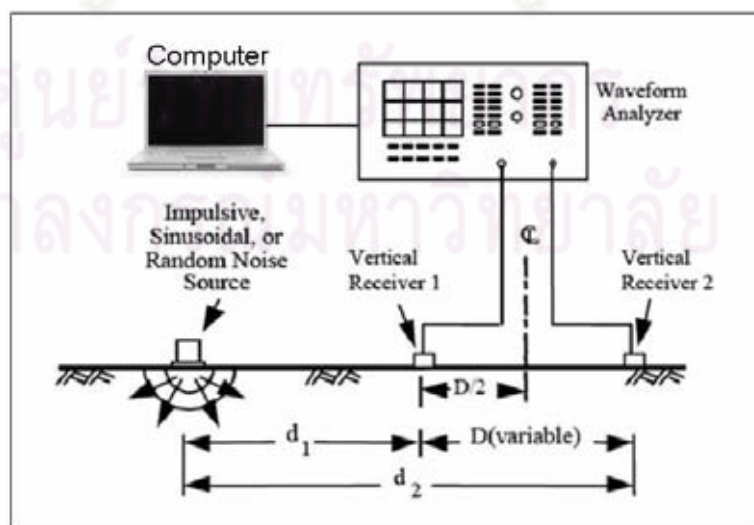
## 2.11 Spectral Analysis of Surface Wave Method (SASWM)

แนวคิดของ SSRM ได้ขยายการวิเคราะห์คลื่นผิวโดยวิธีสเปกตรัม(SASWM) โดย Heisey et al, (1982), Nazarian และ Stokoe, (1984), และ Stokoe et al, (1988) การทดสอบเพื่อให้บรรลุผลมากขึ้นการพัฒนาเป็นไปได้เนื่องจากการปรับปรุงในอุปกรณ์เช่นอุปกรณ์ดิจิทัลแบบพกพาและเครื่องมือสำหรับการคำนวณการทดสอบในสนามรวดเร็วและมีความน่าเชื่อถือคือ SASWM มีสามขั้นตอนในการทดสอบและประมวลผลคือการได้ข้อมูลในสนาม การสร้างโค้งการกระจาย และการคำนวณย้อนกลับ

### 2.11.1 การกำหนดค่าในสนาม

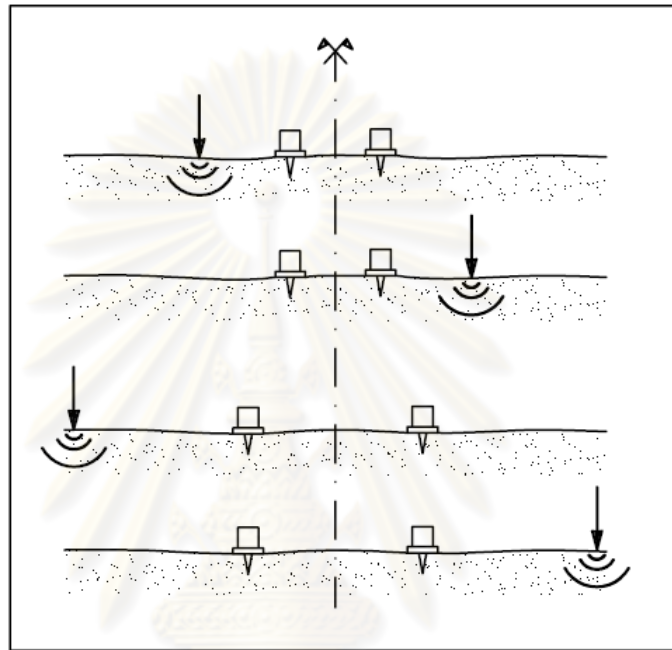
เปลี่ยนจากการใช้เครื่องรับตัวเดียวที่ใช้ใน SSRM เป็นเครื่องรับสองตัวใช้ใน SASWM เครื่องรับจะย้ายตามเส้นตรงบนพื้นดินห่างจากแหล่งกำเนิดดังแสดงในภาพที่ 2.12 แหล่งที่สร้างคลื่น Rayleigh เกิดขึ้นกับช่วงความถี่ที่ตรวจพบโดยเครื่องรับและบันทึกลงในเครื่องวัดเพื่อวิเคราะห์เพิ่มเติมโดยไม่โครคอมพิวเตอร์ระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดและเครื่องรับตัวแรกจะเท่ากับระยะทางเครื่องรับตามแบบจำลองเชิงตัวเลขที่นำเสนอโดย Salinero, (1987)

การทดสอบซ้ำหลายครั้งโดยการปรับตำแหน่งระหว่างแหล่งกำเนิดถึงเครื่องรับและเครื่องรับถึงเครื่องรับเพื่อให้ได้ช่วงกว้างความยาวคลื่นและความถี่

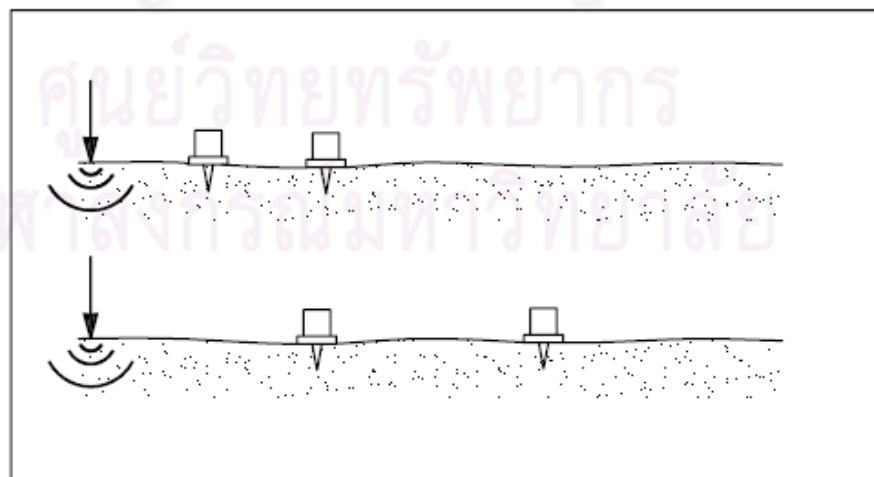


ภาพที่ 2.12 การกำหนดค่าในสนามของ SASWM (Stokoe et al. , 1994)

ความยาวที่อยู่ถัดไปคือการกำหนดค่าตามแหล่งพลังงานและการลดทอนของสัญญาณทั้งทางเรขาคณิตและวัสดุแหล่งกำเนิดที่มีแรงกระตุ้นน้อยเช่นขนาดค้อนที่เล็กสร้างความถี่สูง (ความยาวคลื่นสั้น) ที่เหมาะกับกับระยะห่างของเครื่องรับที่สั้น (0.5 m) แหล่งกำเนิดที่มีแรงกระตุ้นมากจะสร้างความถี่ต่ำ (ความยาวคลื่นยาว) ตรงกับระยะห่างของเครื่องรับที่ยาว (ถึง 60m) ปกติจะมีสองวิธีในการจัดวางเครื่องรับดังแสดงในภาพที่ 2.13 และ ภาพที่ 2.14 ตามลำดับ



ภาพที่ 2.13 การจัดวางตำแหน่งการตรวจวัดแบบ Common Receiver midpoint array with source position reversing (Foti, 2000)



ภาพที่ 2.14 การจัดวางตำแหน่งการตรวจวัดแบบ Common Source array (Foti, 2000)

การตัดสินใจเลือกการจัดวางตำแหน่งขึ้นอยู่กับน้ำหนักของอุปกรณ์ที่ใช้และเงื่อนไขงานในการปฏิบัติจริง, The common receiver midpoint array เป็นที่ต้องการเนื่องจากสามารถดำเนินการตรวจสอบข้อมูลได้โดยการสลับตำแหน่งแหล่งกำเนิดที่สมมาตรกับตำแหน่งของจุดกึ่งกลาง geophone

### 2.11.2 การสร้างโคงการกระจายด้วยวิธี F –K Transform

F – K Transform จะสร้างจากการทำ Two Dimensional Fast Fourier Transform(2DFFT) ซึ่งเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่อยู่ในรูปของ Time – Space Domain เป็น Frequency – Wavenumber Domain โดยใช้สมการที่ 2.10

$$P(f, k) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x, t) e^{-i2\pi(ft+kx)} dx dt \quad 2.10$$

เมื่อ  $p(x, t)$  คือฟังก์ชันของคลื่นที่ตรวจวัดที่อยู่ในรูปของ Time Domain ( $x, t$ )

จากสมการที่ 2.10 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับเลขคลื่นซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นกับเลขคลื่นได้จากสมการที่ 2.12

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad 2.11$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad 2.12$$

แทนค่าสมการที่ 2.12 ใน 2.11 จะสามารถที่จะคำนวณความเร็วคลื่นได้จากความสัมพันธ์ของความถี่กับเลขคลื่นได้จากสมการที่ 2.13

$$V = \frac{2\pi f}{k} \quad 2.13$$

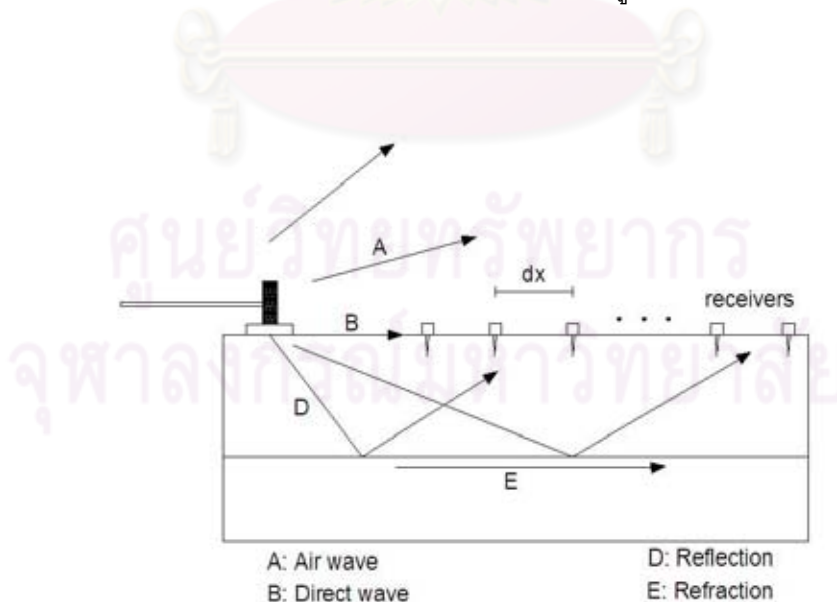


## 2.12 การวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณ

การวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณแบ่งออกเป็นสองวิธีคือ การทดสอบแบบแอกทีฟและแพสซีฟ ซึ่งมีรายละเอียดแตกต่างกันดังนี้

### 2.12.1 การวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณแบบแอกทีฟ

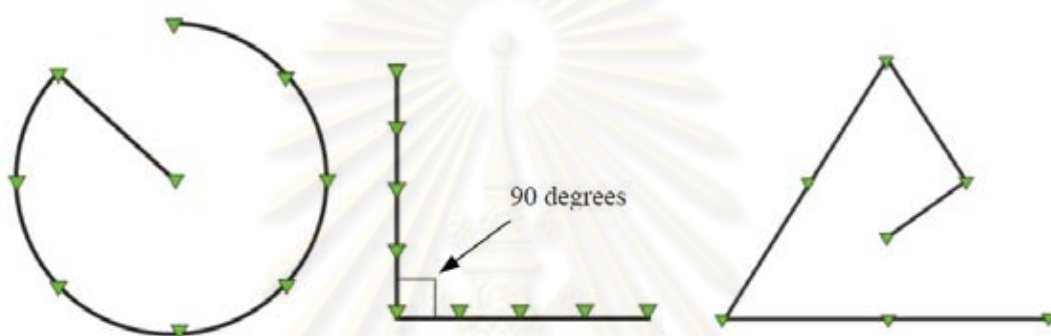
การวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณแบบแอกทีฟที่ถูกเสนอโดย Park et al.(1992) และเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดสำหรับการวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณ การสำรวจทำโดยใช้ค้อนทุบกับแผ่นเหล็กให้เกิดการสั่นสะเทือนผ่านลงไปยังพื้นดินในลักษณะของคลื่นซึ่งมีความถี่อยู่ระหว่าง 10 – 50 เฮิรตซ์ แล้ววัดค่าการสั่นสะเทือนบนผิวดินที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time domain) ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวเส้นตรงที่ลากออกจากแหล่งกำเนิดดังแสดงในภาพที่ 2.15 ผลการวิเคราะห์จะจัดทำเป็นภาพตัดของความถี่คลื่นเชื่อมตามความลึกของตำแหน่งๆ หนึ่ง หรือ เป็นภาพตัดสองมิติตามแนวการทดสอบ การทดสอบแบบแอกทีฟมีขีดจำกัดในด้านความลึกของการทดสอบ เนื่องจากพลังงานที่ได้จากการทุบค้อนจะถูกดูดซับไปขณะที่คลื่นเดินทางผ่านชั้นดิน แม้จะใช้ค้อนปอนด์ที่มีน้ำหนักมากก็ยังมีพลังงานไม่มากพอที่จะใช้สำหรับการสำรวจที่มีความลึกมากกว่า 30 เมตรได้ หากต้องการสำรวจถึงความลึกที่มากขึ้นจะต้องใช้แหล่งกำเนิดชนิดอื่นที่มีพลังงานมากกว่าเช่น การตอกเสาเข็ม รถบด หรือ เครื่องสั่นที่ถูกรอกแบบเป็นการเฉพาะ



ภาพที่ 2.15 ลักษณะการทดสอบด้วยวิธีแอกทีฟ

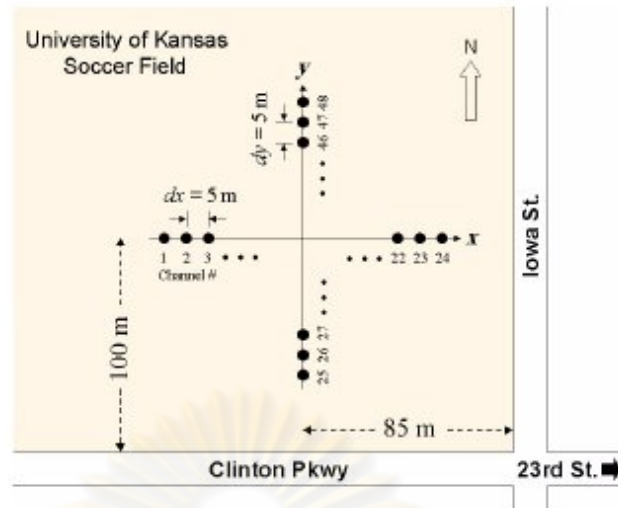
### 2.12.2 การวิเคราะห์ห้คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณแบบแพสซีฟ

เนื่องจากข้อจำกัดของพลังงานของคลื่นที่ต้องใช้ในการทดสอบแบบแอคทีฟ จึงได้มีการพัฒนาวิธีทดสอบที่อาศัยคลื่นจากแหล่งกำเนิดตามธรรมชาติซึ่งโดยทั่วไปจะมีความถี่ต่ำและมีความเข้มของสัญญาณน้อยแต่เป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นสูงและเดินทางผ่านชั้นดินระดับลึกมาใช้ในการวิเคราะห์แทน การวัดค่าการสั่นสะเทือนบนผิวดินตามวิธีนี้จะต้องทำตำแหน่งต่างๆ ที่ไม่อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันทั้งหมด เช่น วัดโดยจัดให้ตัวรับคลื่นติดตั้งเป็นวงกลมรูปสามเหลี่ยมหรือเป็นแนวฉาก ดังแสดงในภาพที่ 2.15



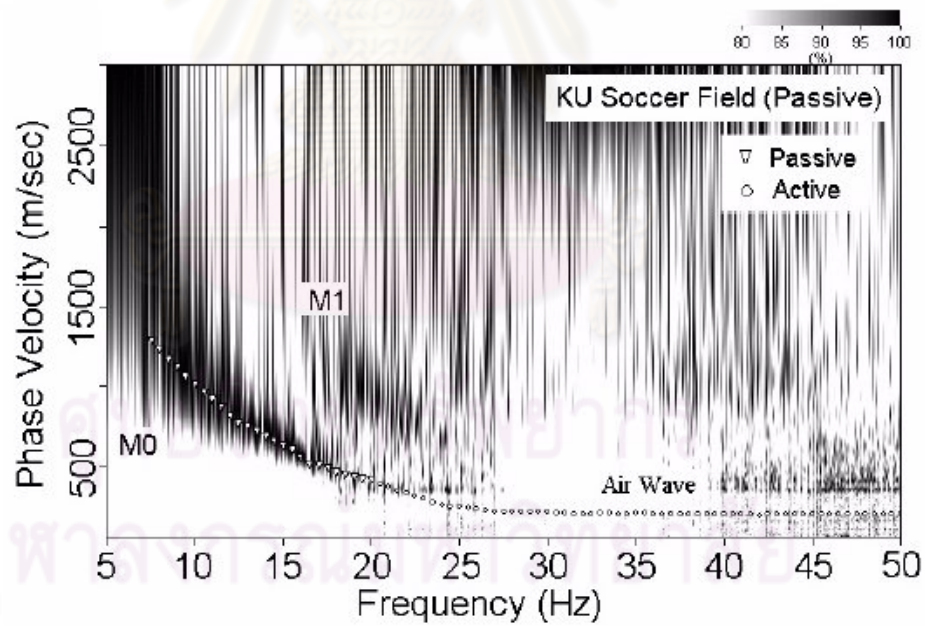
ภาพที่ 2.16 ลักษณะการทดสอบด้วยวิธีแพสซีฟ(<http://www.masw.com>)

Park et al., (2005) ได้ทำการศึกษาการทดสอบ MASW ด้วยวิธีการตรวจวัดแบบแพสซีฟ โดยใช้ตัวตรวจวัดสัญญาณที่มีความถี่ 4.5 เฮิรตซ์ 48 ตัววางเรียงกันในลักษณะตัดกันเป็นเครื่องหมายบวกโดยมีระยะห่างของตัวตรวจวัดสัญญาณแต่ละตัวทุกๆ 5 เมตรและทำการตรวจวัดสัญญาณที่ Kansas University (KU) โดยห่างจากถนน Iowa ประมาณ 25 เมตรและทำการบันทึกข้อมูลทีละ 20 วินาทีจำนวน 10 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Vertical Stacking ในระหว่างที่ทำการสำรวจมีสภาพการจราจรที่หนาแน่นพอสมควรและมีรถบรรทุกวิ่งผ่านเป็นครั้งคราวดังแสดงในภาพที่ 2.17

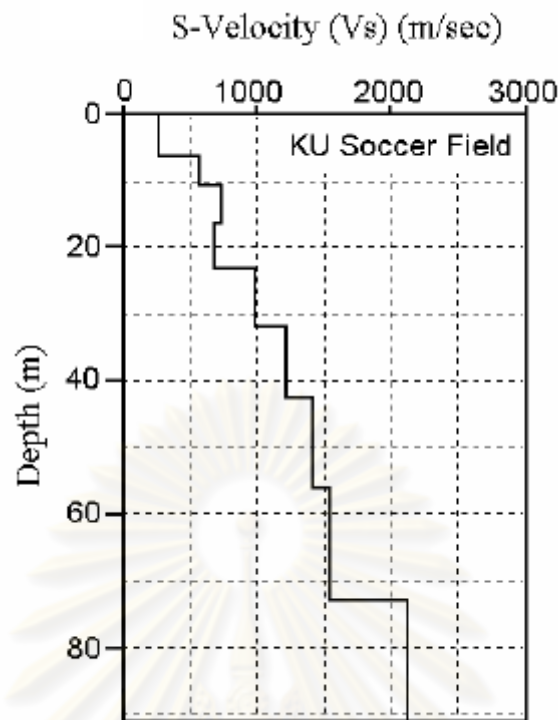


ภาพที่ 2.17 ลักษณะการการจัดวางตำแหน่งของตัวตรวจวัดสัญญาณของ Park et al., (2005)

ซึ่งจากการทดสอบพบว่าการสำรวจด้วยวิธีแพสซีฟสามารถให้โค้งการกระจายที่มีความถี่ที่อยู่ในช่วง 8 – 20 เฮิร์ตซ์ดังแสดงในภาพที่ 2.18 และสามารถที่จะหาค่าความเร็วที่แปรผันกับความถี่ได้ถึง 80 เมตรดังแสดงในภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.18 โค้งการกระจายที่ได้จากการทดสอบแบบแพสซีฟของ Park et al., (2005)

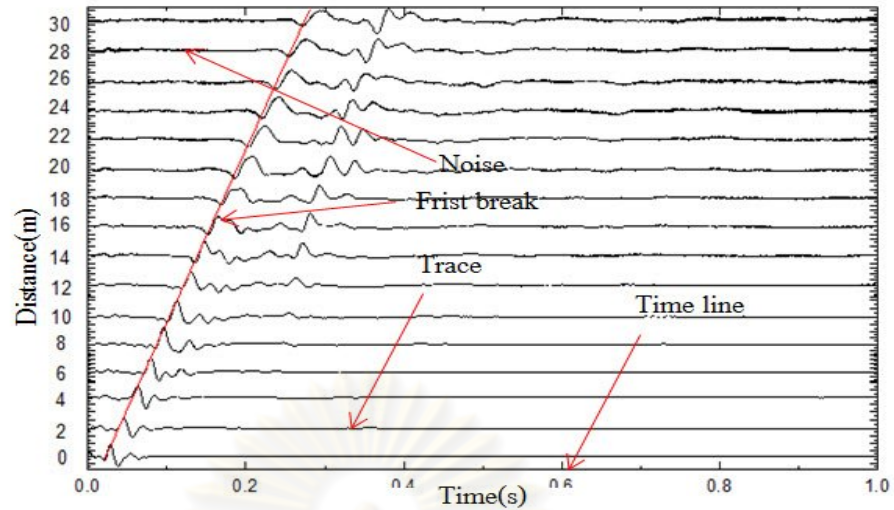


ภาพที่ 2.19 ความเร็วคลื่นเฉือนที่แปรผันกับความลึกจากการทดสอบแบบพัลส์ซีฟของ Park et al., (2005)

#### 1.1.1 รูปแบบและลักษณะข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดและการแสดงผล

เพื่อที่จะสามารถศึกษาและแปลความหมายงานทางด้าน seismic survey จำเป็นที่จะต้องรู้จักลักษณะและรูปแบบของข้อมูล จากสัญญาณคลื่นที่ถูกบันทึกและแสดงผลออกมา

- 1) Trace คือ สัญญาณคลื่นในแต่ละช่องของเครื่องรับ แสดงข้อมูลเป็น amplitude หรือ ความเข้มของสัญญาณ ตามเวลาที่คลื่นใช้เดินทางมาถึงเครื่องรับสัญญาณ
- 2) Time line คือ เส้น constant time scale ที่ตั้งฉากกับทุก Trace ใช้อ่านค่าเวลาที่คลื่นเดินทางมาถึง
- 3) First break หรือ First time arrival คือ เวลาที่ P.wave คลื่นแรกเดินทางมาถึง
- 4) Noise คือ ลักษณะที่มีสัญญาณคลื่นอื่นที่เราไม่ต้องการเข้ามาปะปนกับสัญญาณที่พิจารณา อาจพบได้หลายลักษณะ

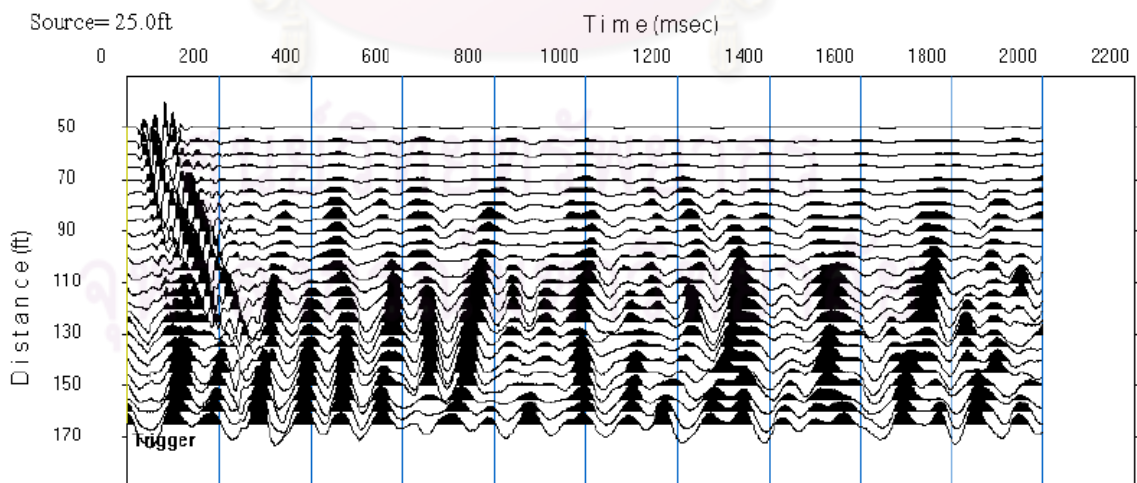


ภาพที่ 2.20 รูปแบบและลักษณะข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดและการแสดงผล

## 2.13 คุณภาพของข้อมูลที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธี MASW

### 2.13.1 ลักษณะของข้อมูลที่มีคุณภาพต่ำของการสำรวจด้วยวิธี MASW แบบแอกทีฟ

ลักษณะของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ในภาพที่ 2.21 จะเป็นลักษณะของข้อมูลที่มีคุณภาพต่ำ ในลักษณะที่ไม่มีการเชื่อมโยงของสัญญาณจากตัวตรวจสัญญาณที่ใกล้กับแหล่งกำเนิดสัญญาณ ไปยังตัวที่ไกลออกไปโดยเฉพาะในช่วงระหว่าง 70 ถึง 170 ฟุต และจะมีการปะปนของสัญญาณรบกวน

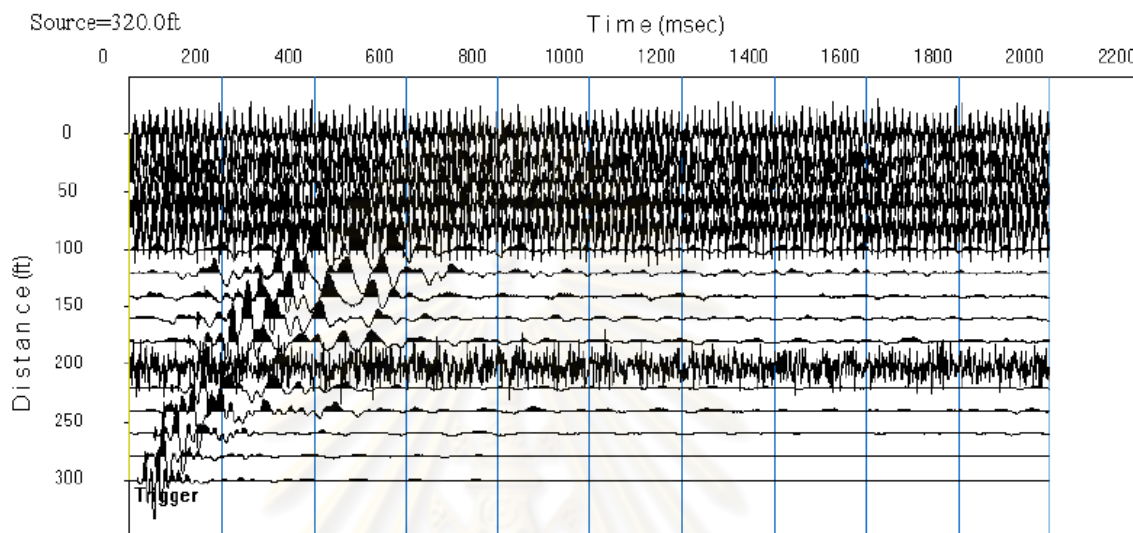


ภาพที่ 2.21 ลักษณะของสัญญาณที่มีการปะปนของสัญญาณรบกวนที่มากเกินไป

(SeisImager/SW Manual (2005).



ลักษณะของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ในภาพที่ 2.22 จะเป็นการตรวจวัดสัญญาณที่มีตัวตรวจวัดบางตัวไม่ทำงานหรือไม่ได้มีการต่อช่องสัญญาณการตรวจวัดซึ่งในภาพที่ 2.22 จะมีตัวตรวจวัดสัญญาณที่ไม่ได้ต่อกับช่องสัญญาณการตรวจวัดคือ ตัวตรวจวัดสัญญาณที่อยู่ในช่วง 0 ถึง 100 ฟุต และ 200 ฟุต



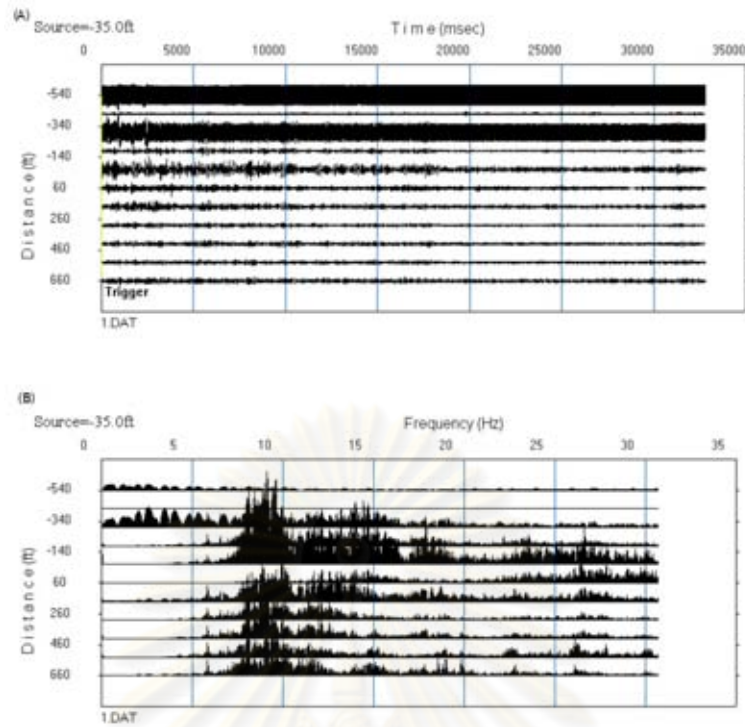
ภาพที่ 2.22 ลักษณะของสัญญาณที่มีตัวตรวจวัดสัญญาณไม่ทำงาน  
(SeisImager/SW Manual (2005)).

### 2.13.2 ลักษณะของข้อมูลที่มีคุณภาพต่ำของการสำรวจด้วยวิธี MASW แบบเฟสซีฟ

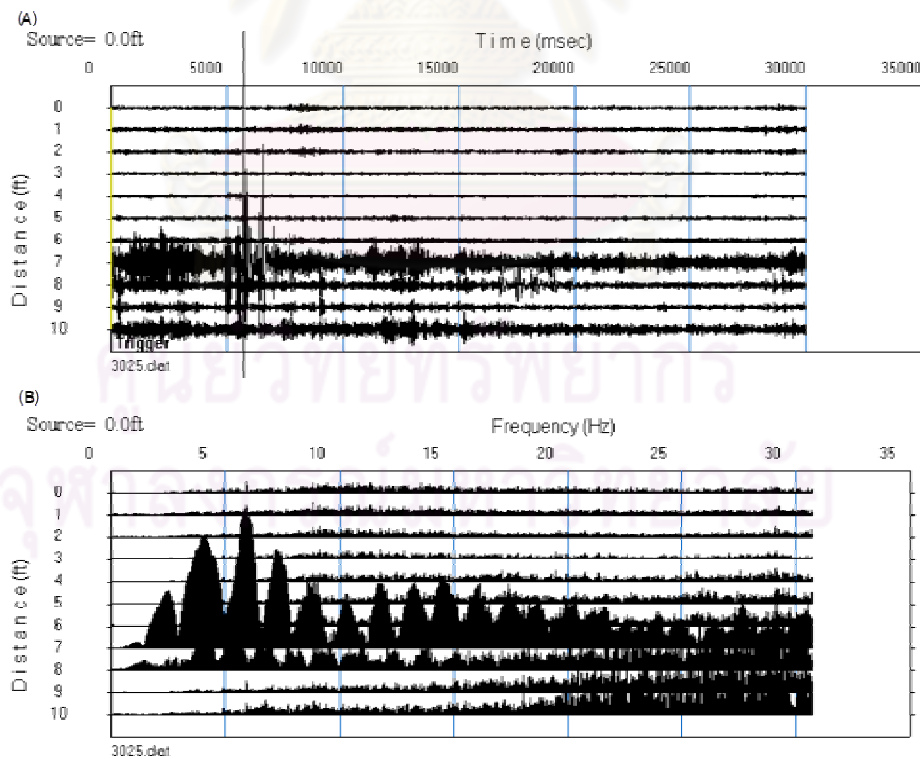
จากภาพที่ 2.23 และภาพที่ 2.24 แสดงถึงลักษณะของสัญญาณมีความแตกต่างกันของแอมพลิจูดในแต่ละช่องสัญญาณที่มีความแตกต่างกันมากเกินไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





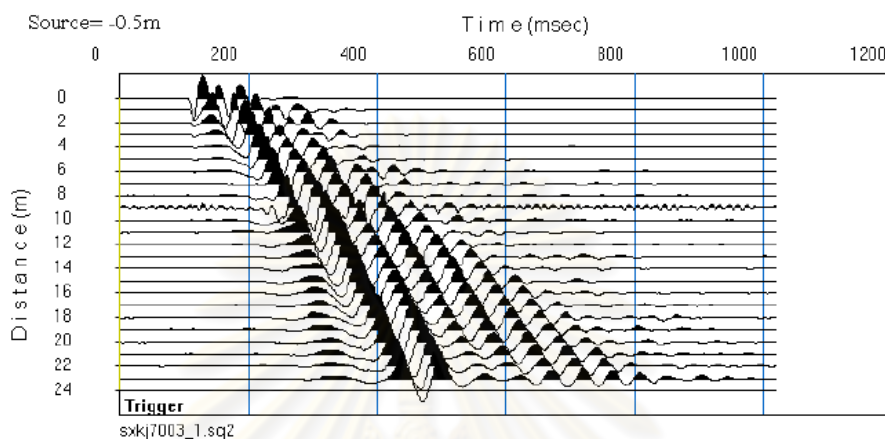
ภาพที่ 2.23 ลักษณะของสัญญาณที่มีความแตกต่างของแอมพลิจูดมากเกินไป  
(SeisImager/SW Manual (2005)).



ภาพที่ 2.24 ลักษณะของสัญญาณที่มีความแตกต่างของแอมพลิจูดมากเกินไป  
(SeisImager/SW Manual (2005)).

### 2.13.3 ลักษณะของข้อมูลที่มีคุณภาพดีของการสำรวจด้วยวิธี MASW แบบแอกทีฟ

คุณสมบัติของลักษณะสัญญาณที่มีคุณภาพดีของการสำรวจแบบแอกทีฟนั้นจะต้องมีการเชื่อมโยงที่ดีของสัญญาณจากตัวตรวจวัดสัญญาณตัวที่ใกล้ไปยังตัวที่ไกลจากแหล่งกำเนิดสัญญาณและจะต้องมีการปะปนของสัญญาณรบกวนที่น้อยที่สุดดังแสดงในภาพที่ 2.25

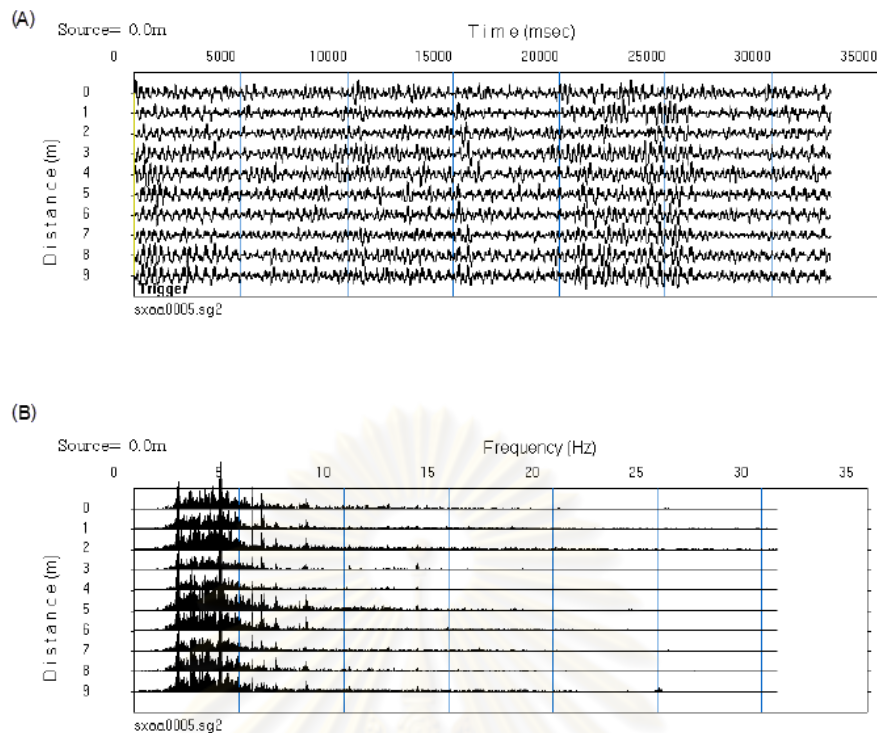


ภาพที่ 2.25 ลักษณะของสัญญาณการตรวจวัดที่มีคุณภาพดีของแบบแอกทีฟ (SeisImager/SW Manual (2005)).

### 2.13.4 ลักษณะของข้อมูลที่มีคุณภาพดีของการสำรวจด้วยวิธี MASW แบบพาสซีฟ

ลักษณะที่ดีของสัญญาณการตรวจวัดแบบแอกทีฟจะต้องมีความสม่ำเสมอของแอมพลิจูดหรือไม่แตกต่างกันมากในแต่ละช่องสัญญาณดังแสดงในภาพที่ 2.26

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.26 ลักษณะของสัญญาณการตรวจวัดที่มีคุณภาพดีของแบบแพสซีฟ  
(SeisImager/SW Manual (2005).

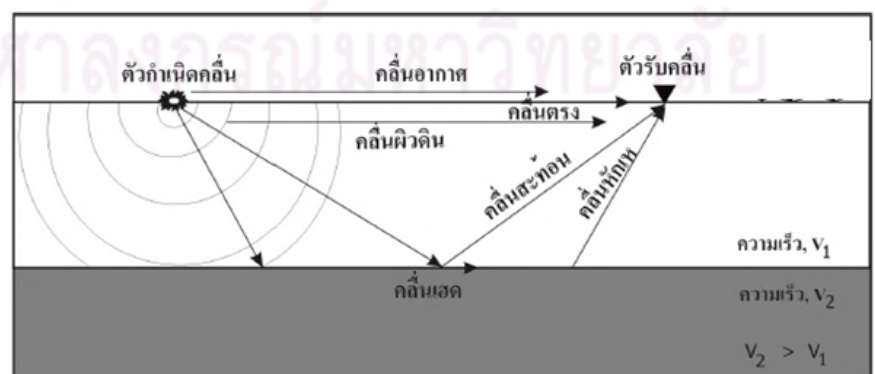
## 2.14 การสำรวจด้วยคลื่นสั้นสะท้อนแบบหักเห (Refraction Seismic Survey)

การสำรวจด้วยคลื่นสั้นสะท้อนแบบหักเห (ภาพที่ 2.27 และภาพที่ 2.28) เป็นการสำรวจลักษณะสภาพทางธรณีวิทยาใต้ผิวดินโดยอาศัยคุณสมบัติการหักเหของคลื่นเมื่อเคลื่อนผ่านผิวยรอยต่อของตัวกลางต่างชนิดกัน นั่นคือ ตัวกลางที่หนึ่งและตัวกลางที่สอง โดยที่เมื่อคลื่นเคลื่อนผ่านตัวกลางหนึ่งเข้าไปยังตัวกลางที่สอง และตัวกลางที่สองมีความเร็วคลื่นสูงกว่าตัวกลางที่หนึ่ง คลื่นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเดินคลื่นเมื่อเคลื่อนเข้าสู่ตัวกลางที่สอง ซึ่งเราเรียกการเปลี่ยนทางเดินของคลื่นว่า "การหักเห" คลื่นจากการหักเหชนิดที่ทำมุมตั้งฉากกับเส้นสมมุติแนวฉากกับระนาบรอยต่อระหว่างตัวกลางที่หนึ่งและตัวกลางที่สอง เรียกว่า "คลื่นเฮด (head wave)" และมุมที่คลื่นตกกระทบทำให้เกิดคลื่นหักเหทำมุมตั้งฉากกับเส้นสมมุติแนวฉากกับระนาบรอยต่อ เรียกว่า "มุมวิกฤติ (critical angle)" คลื่นเฮดจะเคลื่อนขนานไปกับระนาบรอยต่อด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วคลื่นของตัวกลางที่สองพร้อมๆ กับเดินทางกลับสู่ตัวกลางที่หนึ่ง (ยกเว้นถ้าทิศทางของ

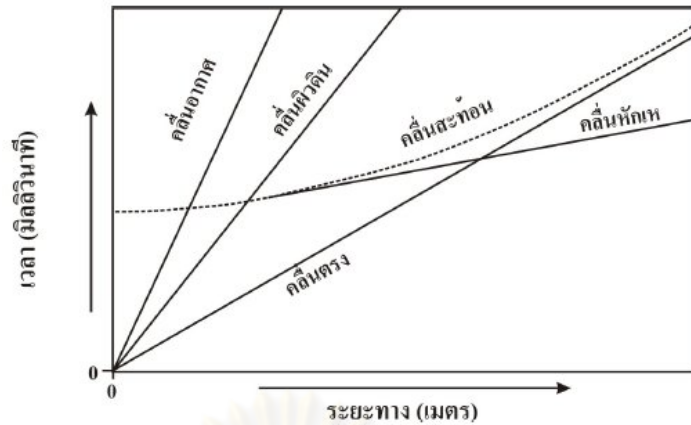
คลื่นตกกระทบตั้งฉากกับรอยต่อระหว่างตัวกลางทิศทางของคลื่นในตัวกลางที่สองจะไม่มี การเปลี่ยนแปลง การหักเหจะไม่เกิดขึ้น) ดังนั้นในการสำรวจด้วยคลื่นสั้นสะท้อนแบบหักเห จะสร้าง คลื่นสั้นสะท้อนด้วยตัวกำเนิดคลื่น และคลื่นที่เคลื่อนออกจากตัวกำเนิดคลื่น เรียกว่า “คลื่นสัญญาณ (seismic signal)” เมื่อคลื่นเคลื่อนผ่านรอยต่อระหว่างสองตัวกลาง นั่นคือ ชั้นหิน ต่างชนิดกัน หากทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่น จะเปลี่ยนแปลงทิศทางเมื่อคลื่นเข้าสู่ตัวกลาง ที่สอง แสดงว่าเกิดการหักเหที่จะต้องมีการหักเหกลับสู่ผิวดิน จากปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้สามารถ นำมาหาความสัมพันธ์เทียบกับเวลา และระยะทางหลังจากปล่อยคลื่นออกจากตัวกำเนิดคลื่นลงสู่ ตัวกลางใต้ผิวดิน และจับเวลาตั้งแต่ปล่อยคลื่นสัญญาณจนกระทั่งปรากฏของคลื่นหักเหกลับ ขึ้นมาสู่ผิวดินมาที่ตัวรับคลื่น จากการทราบระยะทางและเวลาของคลื่น สามารถนำมาคำนวณหา ความลึกของรอยต่อที่ทำให้คลื่นหักเหและแปลความหมายหาชั้นดิน.หิน

## 2.15 การสำรวจด้วยคลื่นสั้นสะท้อนแบบสะท้อน (Reflection Seismic Survey)

การสำรวจด้วยคลื่นสั้นสะท้อนแบบสะท้อน (ภาพที่ 2.27 และภาพที่ 2.28) เป็นการสำรวจ ลักษณะสภาพธรณีวิทยาใต้ผิวดินโดยอาศัยคุณสมบัติการสะท้อนของคลื่นเมื่อคลื่นถูกปล่อย ออกไปกระทบกับรอยต่อของตัวกลางสองตัวกลางที่มีค่าอคูสติกส์อิมพีแดนซ์ (acoustic impedance) แตกต่างกัน (ค่าอคูสติกส์อิมพีแดนซ์คือค่าผลคูณของค่าความเร็วคลื่นและค่าความหนาแน่นของตัวกลาง) คลื่นจะสะท้อนกลับขึ้นมาสู่ผิวดินหลังจากที่คลื่นสัญญาณถูกปล่อยจากตัว กำเนิดคลื่นจากนั้นทำการบันทึกค่าของเวลาและแอมพลิจูด (amplitude) ของคลื่นที่สะท้อนกลับ ขึ้นมาด้วยตัวรับคลื่นที่อยู่บนพื้นดินจากค่าความแตกต่างของเวลาและแอมพลิจูดสามารถแปล ความหมายหาความลึกของชั้นดิน.หินจากผลการสะท้อนกลับของคลื่น



ภาพที่ 2.27 ลักษณะการเกิดคลื่นสะท้อนและคลื่นหักเห

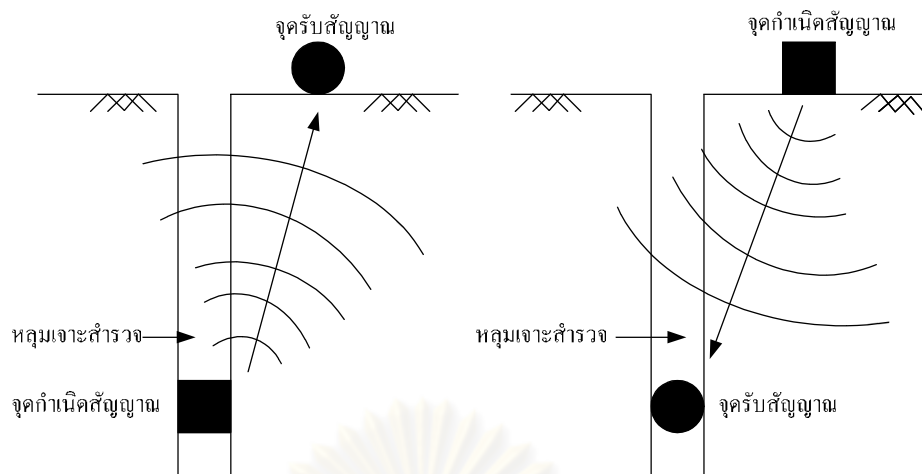


ภาพที่ 2.28 กราฟเส้นทางเดินคลื่น (travel time curve)

## 2.16 การสำรวจโดยใช้คลื่นเคลื่อนที่ตามหลุมเจาะสำรวจ (up.hole and down.hole methods)

การสำรวจโดยวิธีนี้ เป็นการตรวจวัดความเร็วของคลื่นการสั่นสะเทือนในแนวตั้งตามความลึกของหลุมเจาะสำรวจ ทั้งนี้โดยทั่วไปมักสมมติให้คลื่นเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (มุมตกกระทบมีค่าเป็น 0 องศา) ทั้งนี้ในการสำรวจสามารถทำได้ทั้งแบบ Up.hole คือการให้คลื่นเคลื่อนที่ขึ้นจากหลุมสำรวจมายังจุดรับสัญญาณที่อยู่ระดับพื้นผิวดิน และแบบ Down.hole ได้แก่การให้คลื่นเคลื่อนที่ลงจากแหล่งกำเนิดคลื่นที่อยู่บนพื้นผิวดินไปสู่ตัวรับสัญญาณที่อยู่ในหลุมเจาะสำรวจที่ระดับความลึกต่างๆกันดังแสดงในภาพที่ 2.29(ก) ทั้งนี้วิธีการทดสอบแบบ Down.hole method ได้รับความนิยมมากกว่าเพราะสามารถทำงานได้ง่ายกว่าวิธี Up.hole method มากคลื่นที่ส่งออกจากจุดกำเนิดคลื่นสามารถเป็นได้ทั้ง p.wave และ s.wave ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการกระตุ้นที่แหล่งกำเนิดดังแสดงในภาพที่ 2.29 (ข) ในการทดสอบจะทำการวัดระยะเวลาที่คลื่นเดินทางมาถึงจุดตรวจวัดแล้วคำนวณความเร็วของคลื่นตามตำแหน่งของจุดกำเนิดและจุดรับสัญญาณในการวิเคราะห์ห้มักจะสมมติให้คลื่นเคลื่อนที่ตามแนวตั้งดังนั้นระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่จึงเท่ากับระยะทางที่ตามความลึกของหลุมเจาะสำรวจอย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์อย่างละเอียดจำเป็นต้องพิจารณาระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางโดยละเอียด ทั้งนี้เพราะว่าเมื่อคลื่นไม่ได้เคลื่อนที่ในแนวตั้งแล้ว จำเป็นต้องพิจารณามุมตกกระทบ และมุมหักเหที่เกิดขึ้น





ภาพที่ 2.29 หลักการสำรวจด้วยวิธีการวัดความเร็วคลื่นตามหลุมเจาะสำรวจ (ก) คลื่นเคลื่อนที่ขึ้นในแนวตั้งตามหลุมเจาะ (ข) คลื่นเคลื่อนที่ลงในแนวตั้งตามหลุมเจาะ (สุพจน์, 2590)

## 2.17 การจำแนกชนิดดิน (Soil classification) โดยวิธี National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP)

Soil Type	General Description	Vs(m/s)
A	Hard rock	$V_s > 1500$
B	Rock	$760 < V_s < 1500$
C	Hard/stiff/very stiff soils; most gravel	$360 < V_s < 760$
D	Sand silts or stiff/very stiff clays, some gravels Having average blow counts of $15 \leq N \leq 50$ or average Shear strength of $50 \text{ kPa} \leq S \leq 1000 \text{ kPa}$	$180 < V_s < 360$
E	Having thickness lower than 3 meters and $PI > 20$ , $w \geq 40\%$ and $S_u < 25 \text{ kPa}$ soft clay	$V_s < 180$
F	Need specific calculations	-



### บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

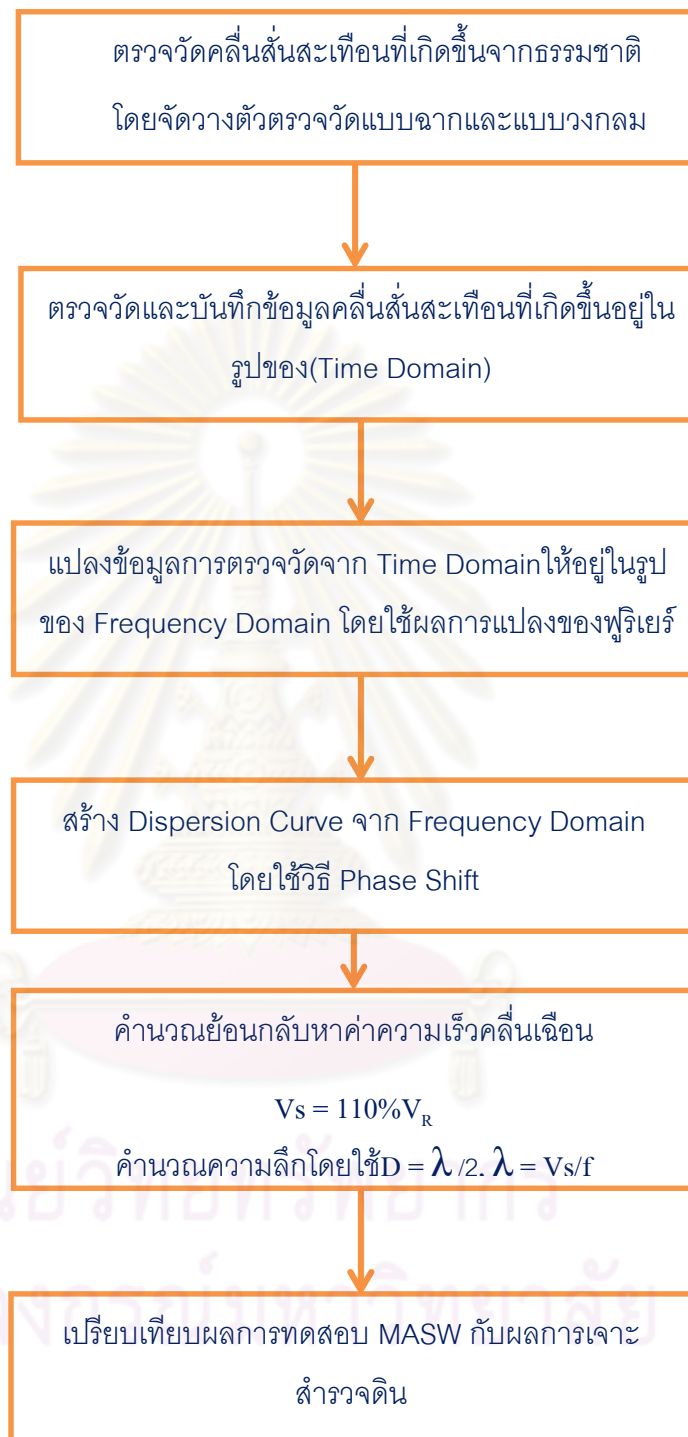
#### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิธีการทดสอบแบบแอกทีฟ



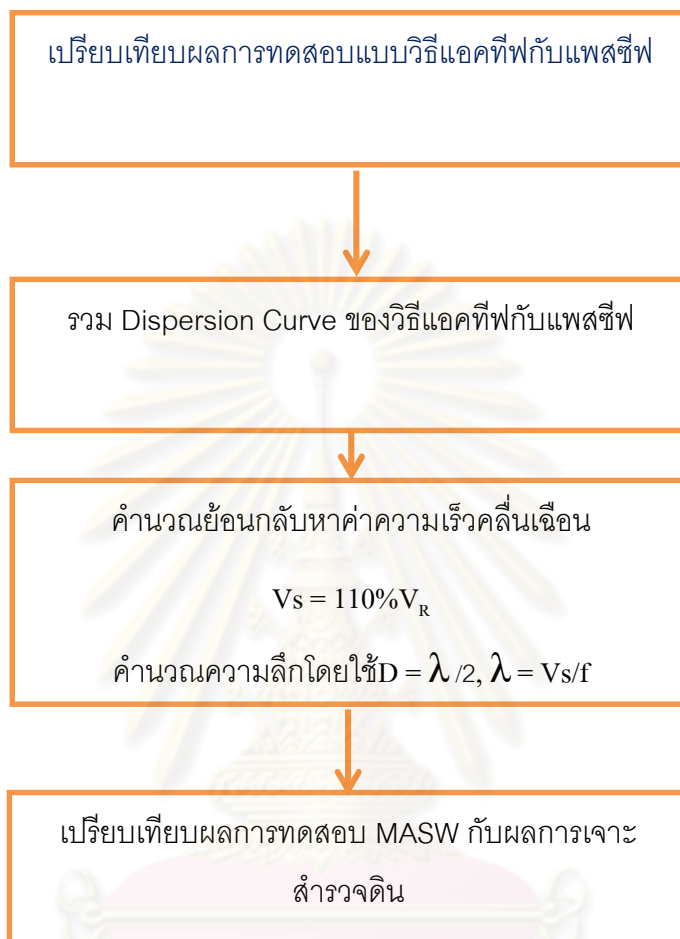
ภาพที่ 3.1 Flow chart แสดงขั้นตอนวิธีการดำเนินงานของวิธีทดสอบแบบแอกทีฟ

### 3.1.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิธีการทดสอบแบบแพสซีฟ



ภาพที่ 3.2 Flow chart แสดงขั้นตอนวิธีการดำเนินงานของวิธีทดสอบแบบแพสซีฟ

### 3.1.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์ร่วมโดยใช้ผลจากการตรวจวัดทั้งสองวิธี



ภาพที่ 3.3 Flow chart แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ร่วมโดยใช้ผลจากการตรวจวัดทั้งสองวิธี

## 3.2 อุปกรณ์ในการทดสอบ

การทดสอบการวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณสามารถแบ่งอุปกรณ์การทดสอบออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

### 3.2.1 ส่วนที่กำเนิดคลื่น(Source)

มีหลายชนิดเลือกใช้ตามสัญญาณภาพของงานและพลังงานที่ต้องการ ในงาน land survey นิยมใช้ค้อน ลูกตุ้มเหล็ก ปืนลูกซอง และ Dynamite ใน marinesurvey ที่นิยมใช้ airgun , water gun ตัวเลือกอื่นมักใช้กับการศึกษาเฉพาะทาง

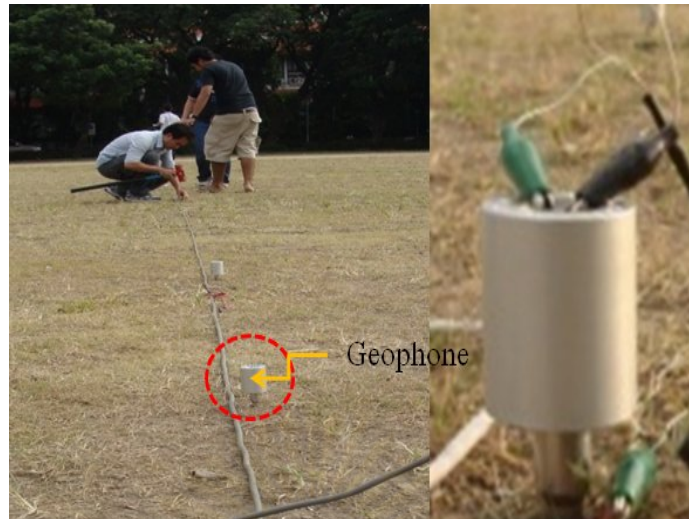


ภาพที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดสัญญาณคลื่นสั่นสะเทือน

### 3.2.2 ส่วนรับคลื่น(Receiver)

ตัวรับคลื่น (Receiver) จะต้องมีความไวสูงมากในการที่จะรับพลังงานที่เคลื่อนกลับขึ้นมาสู่ผิวดินเพราะการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่นที่เกิดจากคลื่นสั่นสะเทือนจะมีการเปลี่ยนแปลงประมาณ  $10^{-8} \cdot 10^{-11}$  (Dobrin and Savit, 1988) ของอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงจึงมองไม่เห็นด้วยตาเปล่าตัวรับคลื่นที่เรียกว่า “จีโอโฟน (geophone)” มีหลักการง่าย ๆ คือตัวรับคลื่นจะประกอบด้วยขดลวดและแม่เหล็กโดยอาศัยหลักการของการเคลื่อนขดลวดผ่านสนามแม่เหล็กเมื่อมีการสั่นของอนุภาคใต้ผิวดินขดลวดหรือแม่เหล็กอันใดอันหนึ่งเท่านั้นที่จะต้องมีความไวสูงต่อการสั่นและเมื่อสั่นเนื่องจากพลังงานถูกถ่ายทอดออกมาตามการเคลื่อนของคลื่นทำให้ขดลวดและสนามแม่เหล็กเกิดการเคลื่อนที่ตัดกันจะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นซึ่งสามารถวัดกระแสไฟฟ้าและแปลงกลับมาสู่การสั่นสะเทือนซึ่งจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับการสั่นแบบอัดและขยายของอนุภาคนั่นเอง

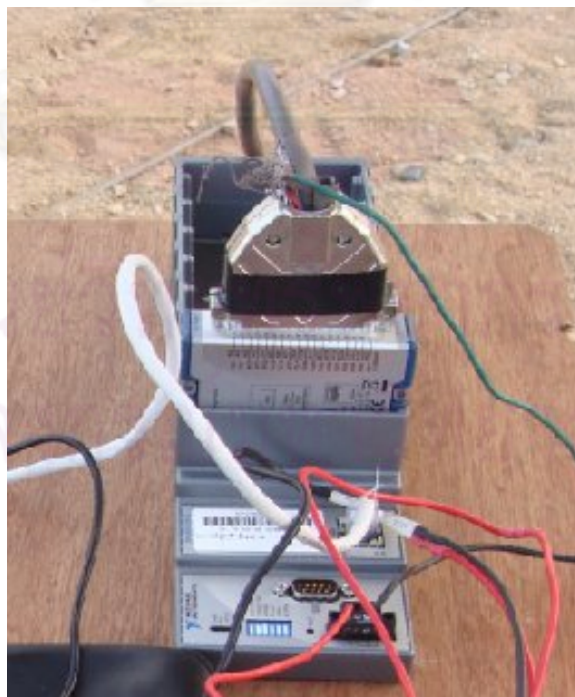
สัญญาณสำหรับ land survey ใช้ geophone ซึ่งภายในมีแม่เหล็กและขดลวดทองแดงวางบนสปริง เมื่อสัญญาณการสั่นสะเทือนขดลวดจะเคลื่อนที่ตัดกับแม่เหล็กเกิดสนามไฟฟ้าส่งสัญญาณไปยังเครื่องรับ



ภาพที่ 3.5 อุปกรณ์การตรวจวัดสัญญาณคลื่นสั่นสะเทือน

### 3.2.3 ส่วนขยายสัญญาณ

สัญญาณจาก geophone จะถูกส่งมาในรูปแบบ analog signal เมื่อมาถึงเครื่องรับจะขยายสัญญาณขึ้นและตัดความถี่ที่เกินกำลังเครื่องออกแล้วอ่านข้อมูลและแบ่ง Trace โดยตัว Modulator ทำการแปลงสัญญาณจาก Analog เป็น Digital



ภาพที่ 3.6 อุปกรณ์แปลงสัญญาณคลื่นสั่นสะเทือน(Modulator)



### 3.2.4 ส่วนบันทึกสัญญาณ

เมื่อ Modulator ทำการแปลงสัญญาณจาก Analog เป็น Digital ก็จะทำให้การส่งข้อมูลไปบันทึกที่คอมพิวเตอร์เพื่อจะนำไปทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 3.7 อุปกรณ์บันทึกข้อมูล(Computer)

## 3.3 วิธีการทดสอบ

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ดำเนินการทดสอบสามที่ได้แก่

- 1). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขั้นตอนตามลำดับดังนี้
- 2).จังหวัดเชียงราย
- 3).จังหวัดเพชรบูรณ์

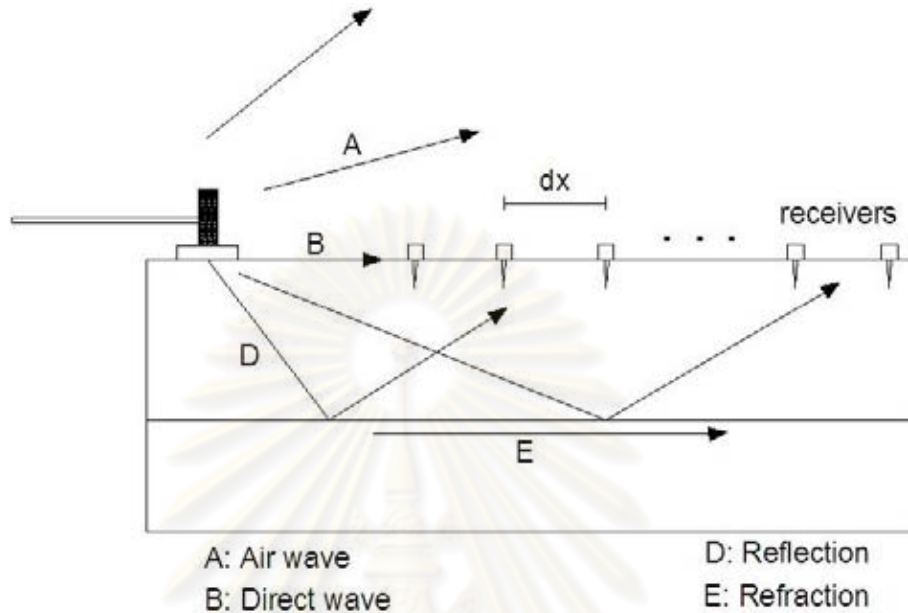
## 3.4 การตรวจวัดภาคสนาม

### 3.4.1 การตรวจวัดภาคสนามของการวิเคราะห์แบบแอกทีฟ

สำหรับการเก็บข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์แบบแอกทีฟใช้ตัวตรวจวัดสัญญาณความเร็วที่มีความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 4.5 เฮิรตซ์จำนวน 16 ตัววางห่างกันทุกๆ 2 เมตรในแนวเส้นตรง และให้ตัว



ตรวจวัดสัญญาณความเร็วอันแรกอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นสั้นสะเทือนเป็นระยะทาง 5 เมตรในการศึกษานี้ใช้ค้อนเหล็กที่มีน้ำหนัก 15 กิโลกรัมทุบลงบนแผ่นเหล็กดังแสดงในภาพที่ 3.8

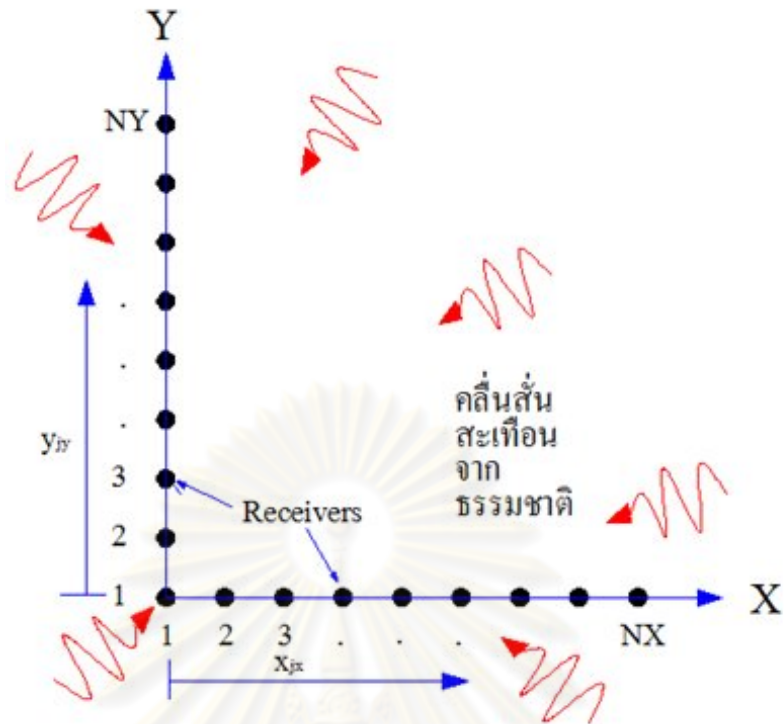


ภาพที่ 3.8 ลักษณะการทดสอบด้วยวิธีแอกทีฟ

#### 3.4.2 การตรวจวัดภาคสนามของการวิเคราะห์แบบแพสซีฟ

สำหรับการเก็บข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์แบบแพสซีฟใช้ตัวตรวจวัดสัญญาณความเร็วที่มีความถี่ธรรมชาติ 2 เฮิรตซ์จำนวน 16 ตัววางเรียงเป็นรูปมุมฉากดังภาพที่ 3.9 โดยวางห่างกันทุกๆ 2 เมตรและตัวตรวจวัดสัญญาณที่มีความถี่ 4.5 เฮิรตซ์จำนวน 27 ตัววางเป็นรูปวงกลมรัศมี 4 5 8 10 20 40 เมตรดังแสดงในภาพที่ 3.10 เพื่อวัดการสั้นสะเทือนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 3.9 ลักษณะการทดสอบด้วยวิธีแพสซีฟแบบฉาก



ภาพที่ 3.10 ลักษณะการทดสอบด้วยวิธีแพสซีฟแบบวงกลม

### 3.5 การประมวลผล

#### 3.5.1 การประมวลผลการวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณแบบแอดทีฟ

เมื่อตรวจวัดข้อมูลการสั่นสะเทือนแล้วได้นำผลดังกล่าวมาประมวลผลสำหรับการวิเคราะห์แบบแอดทีฟตามวิธีที่เสนอโดย Park et al.(1998) โดยใช้การแปลงเรดอน (Radon transform) กระทำกับข้อมูลที่แปลงให้อยู่ในปริภูมิความถี่ (frequency domain) ดังแสดงในสมการที่ 3.1 ซึ่งเป็นการรวมพลังงานของคลื่นฮาร์มอนิก (harmonic) ณ ความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) ต่างๆ ที่วัดได้จากตัวตรวจวัดสัญญาณความเร็วทั้งหมดเข้าด้วยกันโดยคำนึงถึงความต่างเฟส ( $\Delta\phi$ ) ที่เกิดขึ้นจากตำแหน่งติดตั้ง สำหรับความต่างเฟสของตัวตรวจวัดสัญญาณความเร็วต่างๆ คำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$E(\omega, \nu) = \left| \sum_{j=1}^N A(\omega)_j e^{i(\phi(\omega)_j + \Delta\phi(\omega)_j)} \right| \quad 3.1$$

$$\Delta\phi(\omega)_j = \omega x_j / \nu \quad 3.2$$

โดยที่

$A$  คือ แอมพลิจูดที่ได้จากการแปลงฟูริเยร์

$\phi$  คือ เฟสที่ได้จากการแปลงฟูริเยร์

$i$  คือ เลขจินตภาพ

$X$  คือ ตำแหน่งของตัวตรวจวัดสัญญาณความเร็วเทียบกับจุดอ้างอิงใดๆ

$V$  คือ ความเร็วเชิงเฟสของคลื่นฮาร์มอนิก

#### 3.5.2 การประมวลผลการวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณแพสซีฟ

สำหรับการประมวลผลเพื่อการวิเคราะห์แบบแพสซีฟได้ใช้วิธีการเช่นเดียวกันกับวิธีแอดทีฟ แต่สมมุติให้คลื่นสั่นสะเทือนเกิดขึ้นในทิศทาง ( $\theta$ ) ต่างๆ รอบตำแหน่งตรวจวัด แล้วรวมพลังงานของคลื่นจากทิศทางต่างๆ เข้าด้วยกันดังสมการที่ 3.3

$$E(\omega, v, \theta) = \sum_{jx=1}^{NX} A(\omega)_{jx} e^{i(\phi(\omega)_{jx} + \Delta\phi(\omega)_{jx})} + \sum_{jy=1}^{NY} A(\omega)_{jy} e^{i(\phi(\omega)_{jy} + \Delta\phi(\omega)_{jy})} \quad 3.3$$

$$\Delta\phi(\omega)_{jx} = \omega x_{jx} \cos \theta / v \quad 3.4$$

$$\Delta\phi(\omega)_{jy} = \omega x_{jy} \sin \theta / v \quad 3.5$$

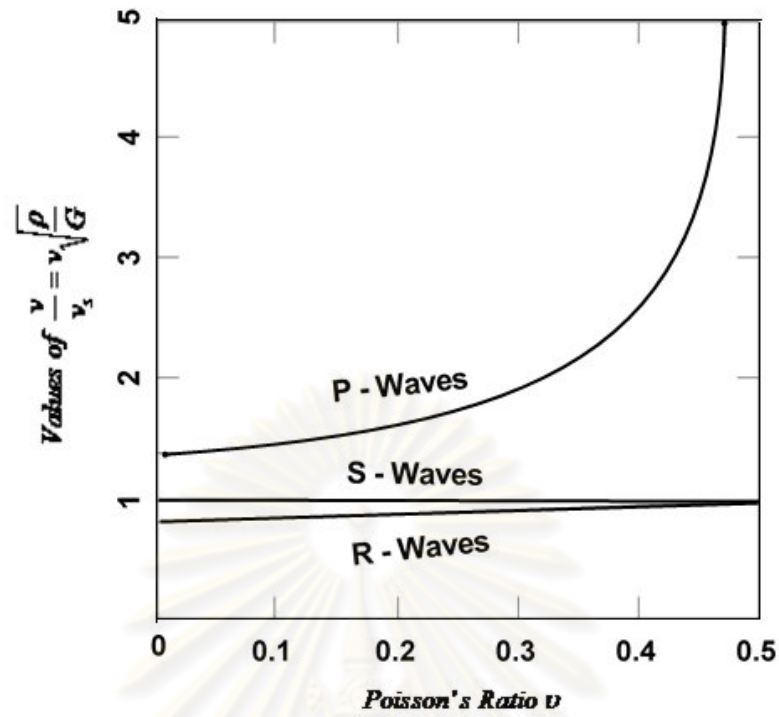
$$E(\omega, v) = \sum_{\theta=0}^{360^\circ} E(\omega, v, \theta) \quad 3.6$$

โดยที่  $X_{jx}$  และ  $X_{jy}$  คือตำแหน่งของตัวตรวจวัดสัญญาณความเร็วในแนวแกน X และในแนวแกน Y เทียบกับจุดอ้างอิงใดๆ\*

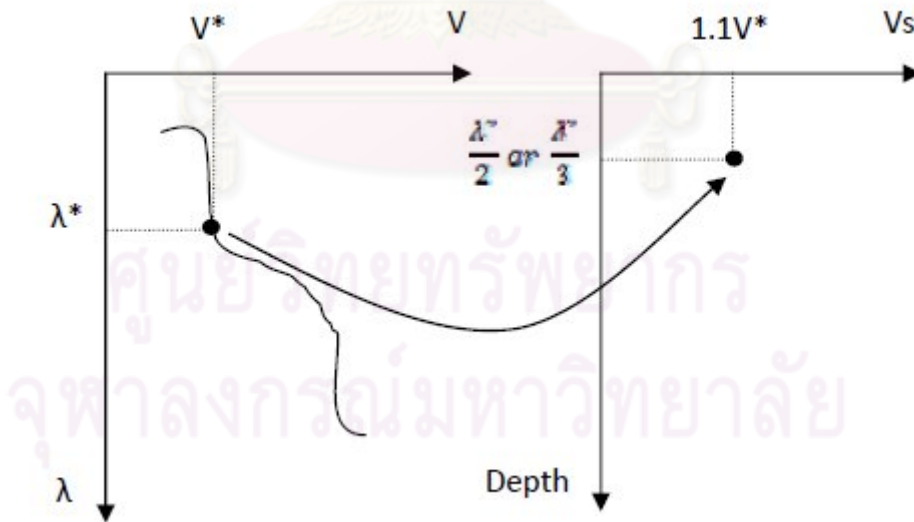
### 3.5.3 การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าความเร็วของคลื่นเฉือน

การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาภาพตัดของความเร็วคลื่นเฉือนจากโค้งการกระจายโดยใช้สมมุติฐานว่าถ้าค่า Poisson's Ratio มีค่าประมาณ 0.3 ส่งผลให้ความเร็วคลื่นเฉือนมีค่าประมาณ 110% ของความเร็วคลื่นผิวดังแสดงในภาพที่ 3.11 และความเร็วที่แสดงในตำแหน่งต่างๆ ของโค้งการกระจายเป็นตัวแทนความเร็วของชั้นดินที่ระดับความลึกเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) ที่ความถี่นั้นๆ ภาพที่ 3.12 และสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.7

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad 3.7$$



ภาพที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Poisson's Ratio กับ ความเร็วของ P-wave, S-wave และ R-wave



ภาพที่ 3.12 การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าความเร็วของคลื่นเฉือน

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ผลการทดสอบและผลการทดสอบ

#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดและวิธีการวิเคราะห์ผลการตรวจวัดที่ได้มา โดยจะใช้หลักการและทฤษฎีที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 และ 3 เพื่อที่จะวิเคราะห์หาโค้งการกระจาย และค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่แปรผันตามความลึกต่างๆ

ผลการตรวจวัดจะถูกบันทึกไว้ในคอมพิวเตอร์และจะนำมาวิเคราะห์หาโค้งการกระจาย เพื่อเปรียบเทียบกับระหว่างวิธี F – K Transfer กับวิธี Phase Shift และเลือกโค้งการกระจายของ วิธีที่ดีกว่ามาคำนวณหาความเร็วคลื่นเฉือนที่ความลึกต่างๆ

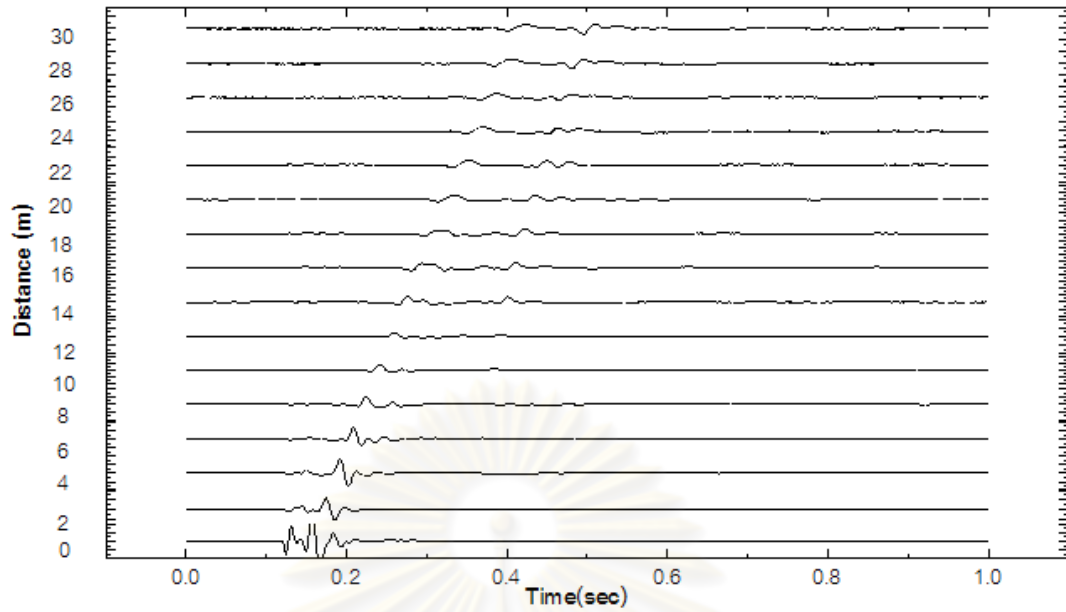
#### 4.2 ข้อมูลการตรวจวัดในสนาม

##### 4.2.1 ข้อมูลการตรวจวัดในสนามของวิธีแอกทีฟ

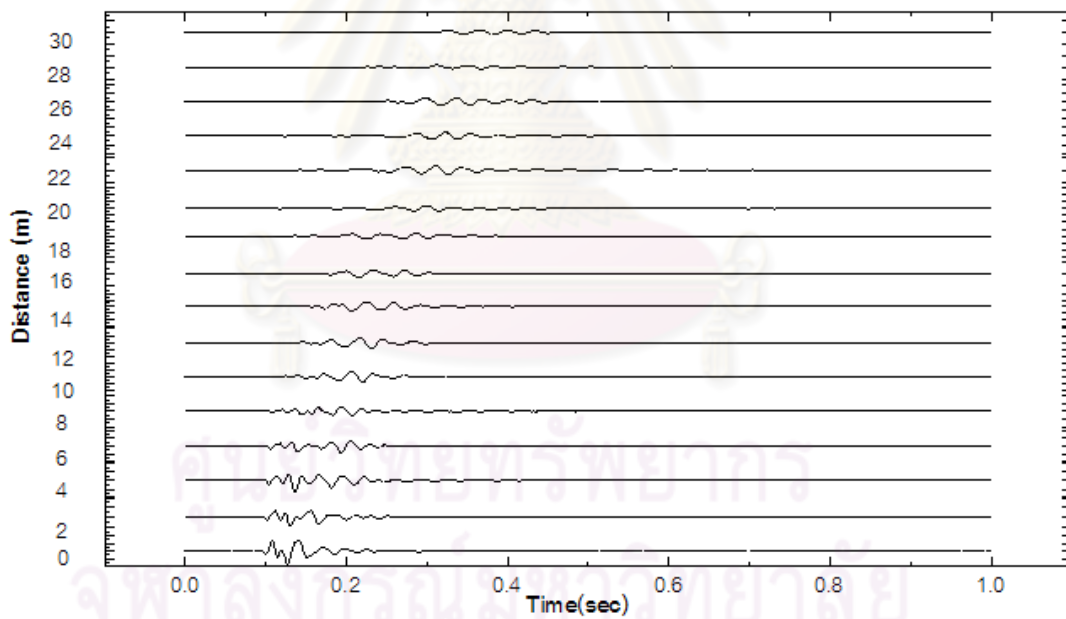
การตรวจวัดสัญญาณวิธีแอกทีฟเป็นการตรวจวัดคลื่นสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจาก แหล่งกำเนิดที่เรากระทำขึ้นโดยใช้ค้อนหนัก 12 ปอนด์ทุบกับแผ่นเหล็กเพื่อให้เกิดคลื่น สั่นสะเทือนที่ผิวดินแล้วใช้ตัวตรวจวัดสัญญาณ (Geophone) ที่มีความถี่ 4.5 เฮิรตซ์วางห่าง กันทุกๆ 2 เมตรในแนวเส้นตรงและให้ตัววัดสัญญาณตัวแรกห่างแหล่งกำเนิดสัญญาณ 5 เมตรทำการตรวจวัดสัญญาณในช่วงการเก็บข้อมูล (Sampling rate) 2000 เฮิรตซ์ นาน 1 นาที

ข้อมูลการตรวจวัดในสนามของแบบวิธีแอกทีฟที่ได้มานั้นจะมีสัญญาณรบกวนที่ ปะปนมากับสัญญาณที่ต้องการดังนั้นเพื่อที่จะกำจัดสัญญาณรบกวนจึงต้องทำการตรวจวัด ข้อมูลซ้ำหลายๆครั้งแล้วใช้วิธีที่เรียกว่า Stacking เพื่อที่จะกำจัดสัญญาณรบกวนซึ่งจะได้ ลักษณะสัญญาณดัง ภาพที่ 4.1 ถึง ภาพที่ 4.3แล้วนำไปทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

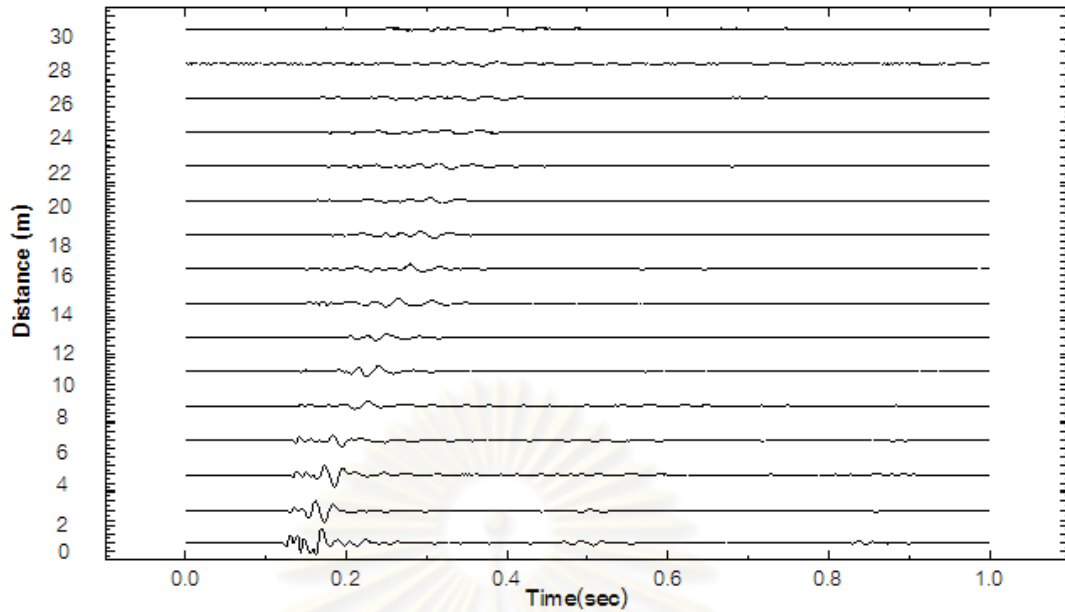




ภาพที่ 4.1 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ Time - Space Domain ของการตรวจวัดที่जूषा



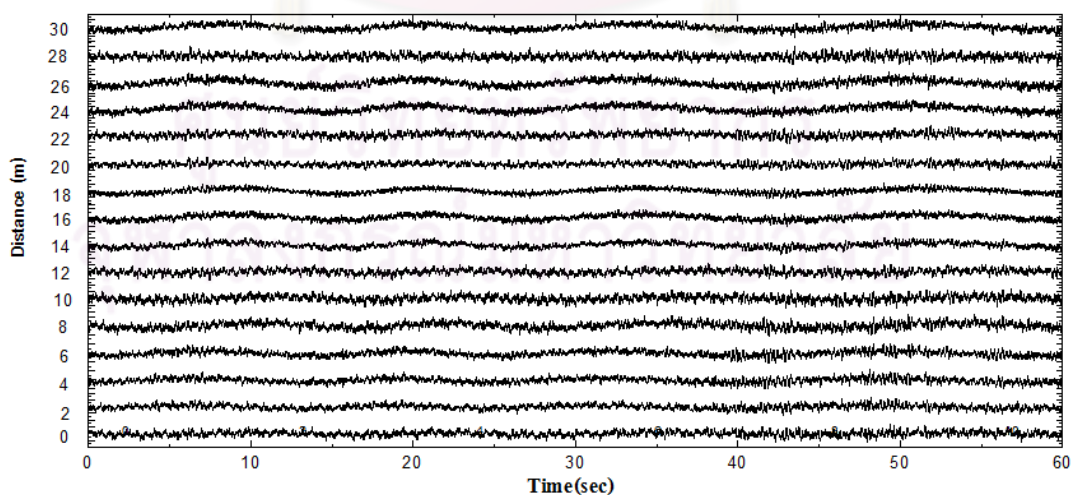
ภาพที่ 4.2 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ Time - Space Domain ของการตรวจวัดที่จังหวัดเชียงใหม่



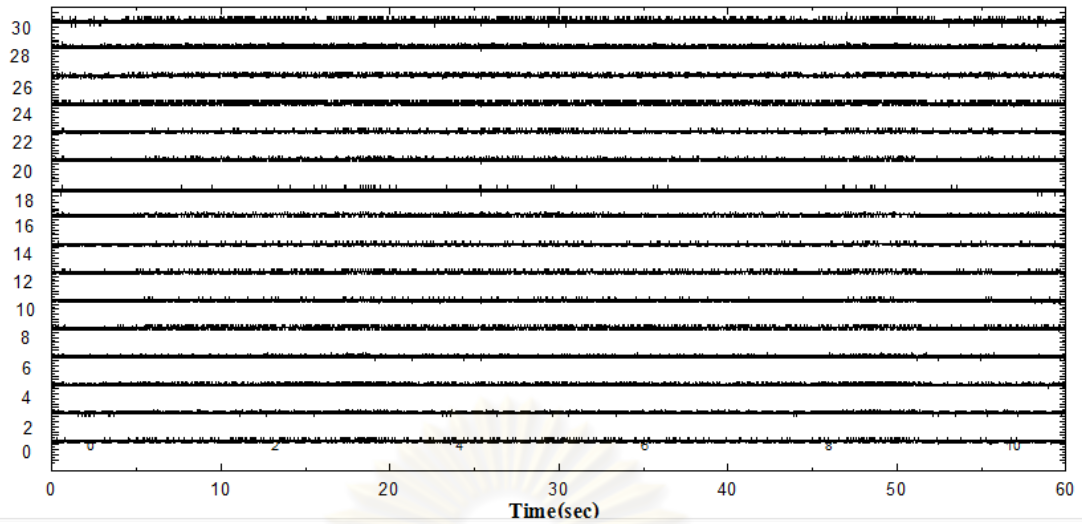
ภาพที่ 4.3 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ Time - Space Domain ของการตรวจวัดที่จังหวัดเพชรบูรณ์

#### 4.2.2 ข้อมูลการทดสอบแบบแพสซีฟ

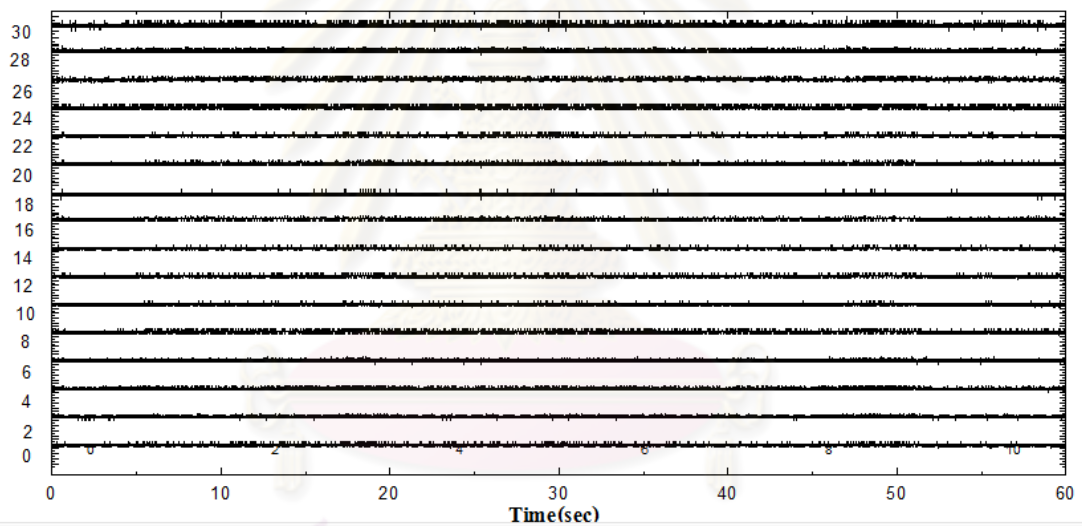
การตรวจวัดสัญญาณของวิธีแพสซีฟเป็นการตรวจวัดสัญญาณที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติโดยใช้ตัวตรวจวัดสัญญาณ (Geophone) ที่มีความถี่ 2 เฮิรตซ์วางห่างกันทุกๆ 2 เมตรในแนวตั้งฉากทำการตรวจวัดสัญญาณในช่วงการเก็บข้อมูล (Sampling rate) 500 เฮิรตซ์ นาน 1 นาทีซึ่งจะได้ลักษณะสัญญาณดัง ภาพที่ 4.4 ถึง ภาพที่ 4.6



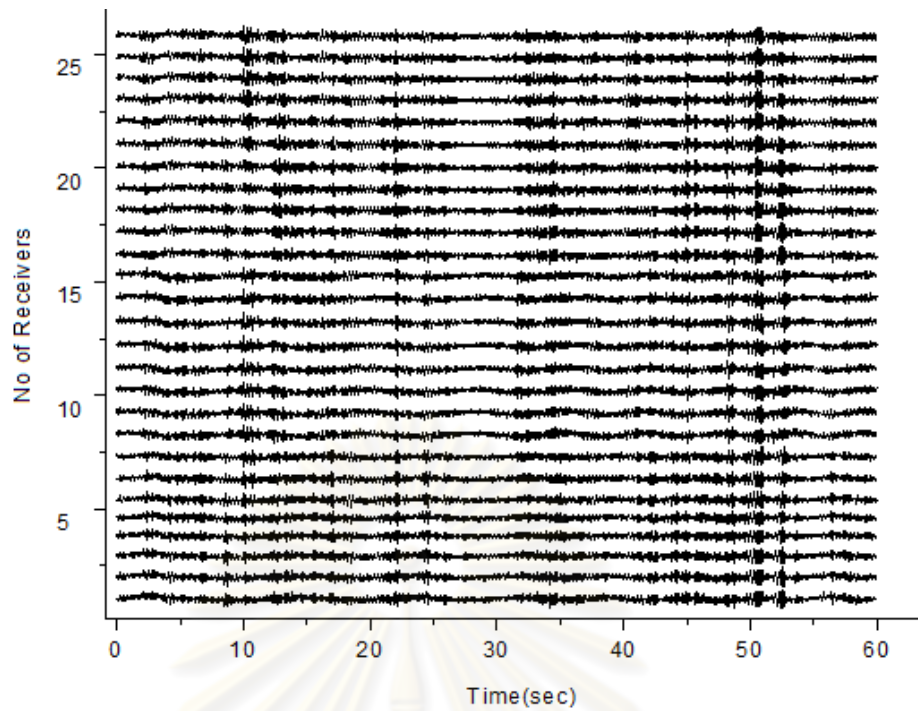
ภาพที่ 4.4 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ Time - Space Domain ของการตรวจวัดที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยแบบฉาก



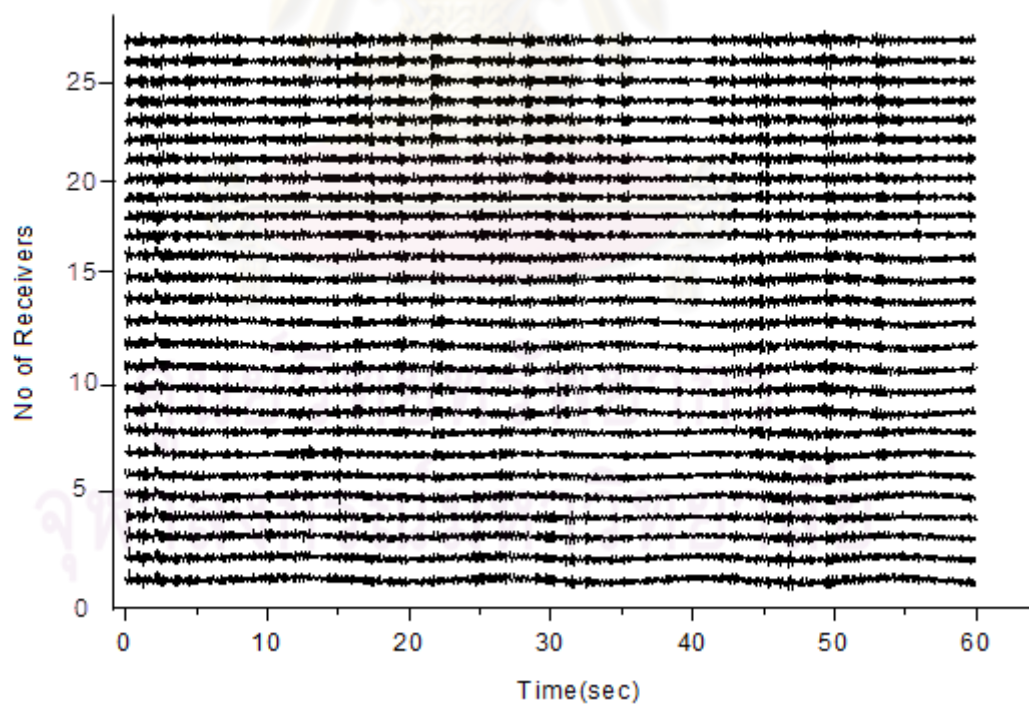
ภาพที่ 4.5 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ Time – Space Domain ของการตรวจวัดที่จังหวัดเชียงรายแบบฉาก



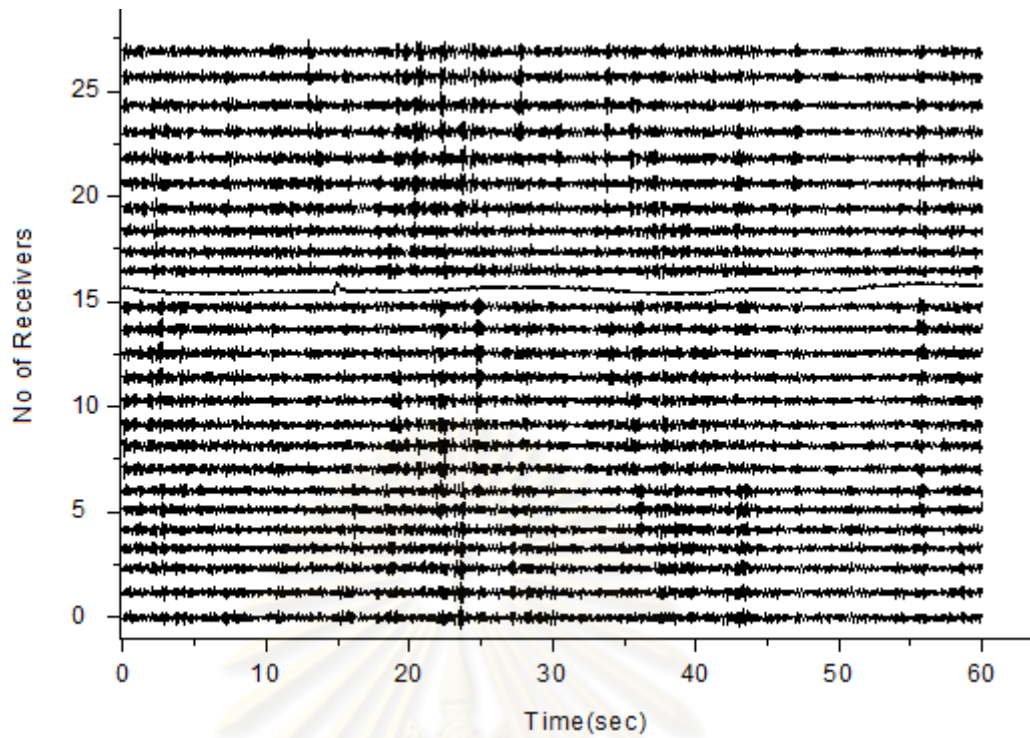
ภาพที่ 4.6 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ Time – Space Domain ของการตรวจวัดที่จังหวัดเพชรบูรณ์แบบฉาก



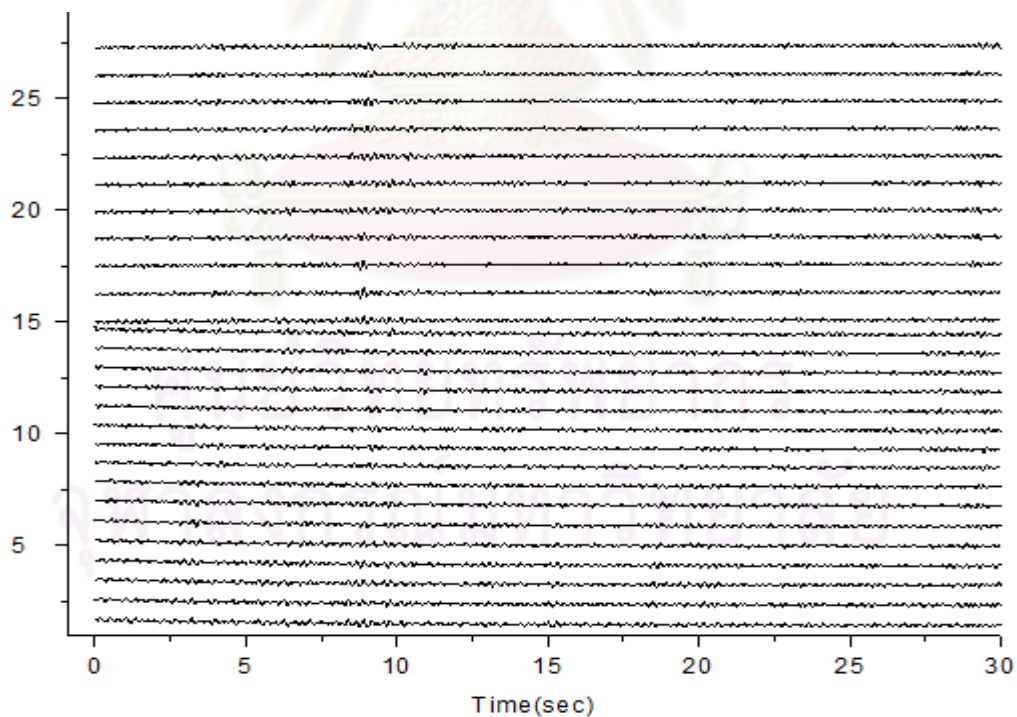
ภาพที่ 4.7 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ Time – Space Domain ของการตรวจวัดที่จู่ฟ้าแบบวงกลมรัศมี 4 เมตร



ภาพที่ 4.8 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ Time – Space Domain ของการตรวจวัดที่จู่ฟ้าแบบวงกลมรัศมี 5 เมตร

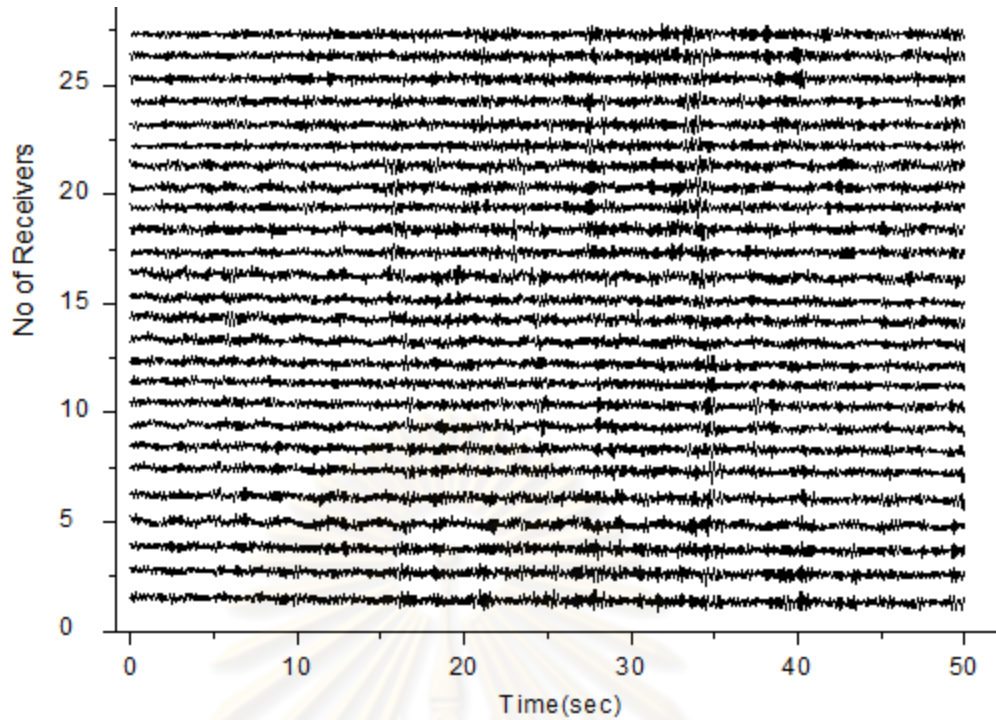


ภาพที่ 4.9 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ Time - Space Domain ของการตรวจวัดที่จู่ฟ้าแบบวงกลมรัศมี 8 เมตร

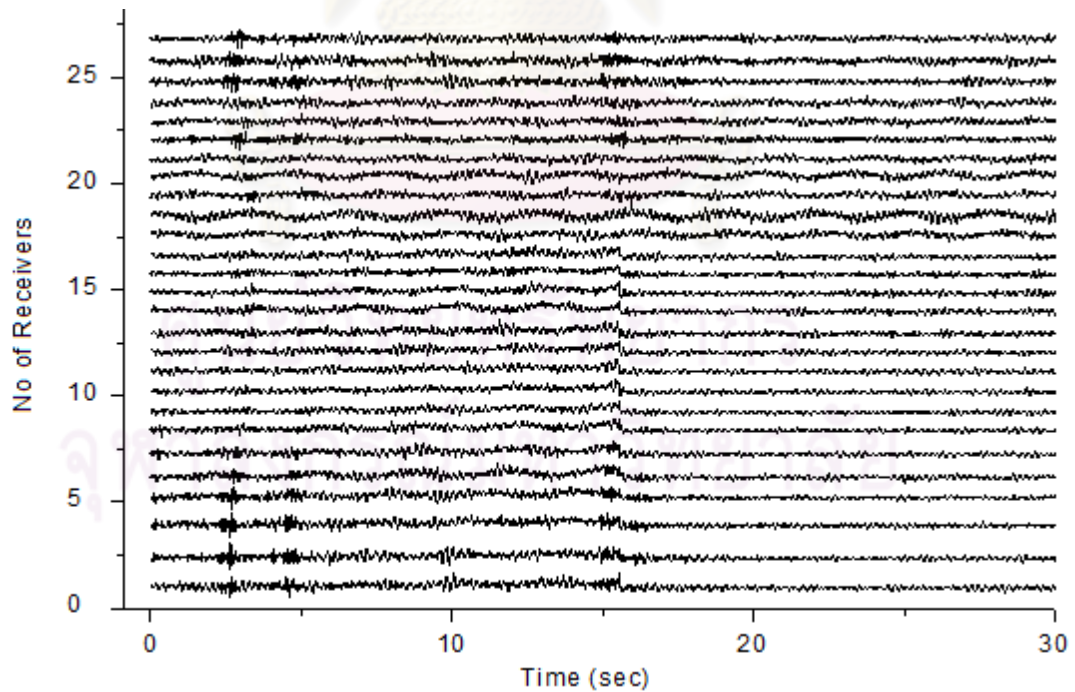


ภาพที่ 4.10 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ Time - Space Domain ของการตรวจวัดที่จู่ฟ้าแบบวงกลมรัศมี 10 เมตร





ภาพที่ 4.11 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ Time – Space Domain ของการตรวจวัดที่จุดฟ้าแบบวงกลมรัศมี 20 เมตร



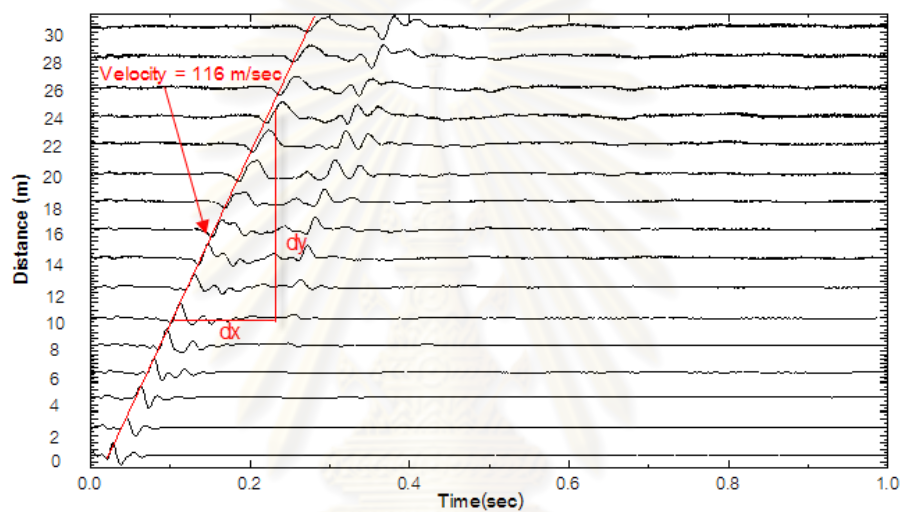
ภาพที่ 4.12 ลักษณะสัญญาณการตรวจวัดที่อยู่ในรูปแบบ Time – Space Domain ของการตรวจวัดที่จุดฟ้าแบบวงกลมรัศมี 40 เมตร



### 4.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบแบบแอคทีฟ

#### 4.3.1 การประเมินค่าความเร็วคลื่นเฉือน

การวิเคราะห์แบบแอคทีฟสามารถที่จะประเมินค่าความเร็วคลื่นเฉือนโดยประมาณล่วงหน้าก่อนได้ดังแสดงในภาพที่ 4.13 ซึ่งสังเกตได้ว่าคลื่นจะวิ่งจากจุดกำเนิดถึงตัวตรวจวัดสัญญาณความเร็วแต่ละตัวไม่พร้อมกัน และเมื่อลากเส้นจากตำแหน่งหน้าคลื่นที่วัดได้จากตัวตรวจวัดสัญญาณตัวแรกไปจนถึงตำแหน่งหน้าคลื่นที่วัดได้จากตัวตรวจวัดสัญญาณตัวสุดท้ายจะได้เส้นตรงที่มีความชันซึ่งแสดงถึงค่าความเร็วคลื่นเฉือนโดยประมาณ

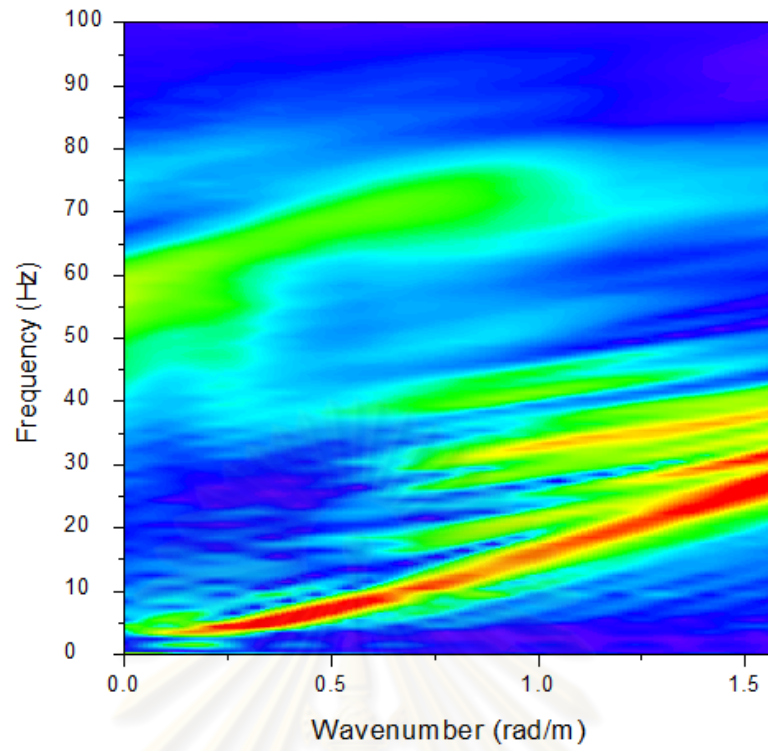


ภาพที่ 4.13 การประเมินค่าความเร็วคลื่นเฉือนอย่างคร่าวๆ

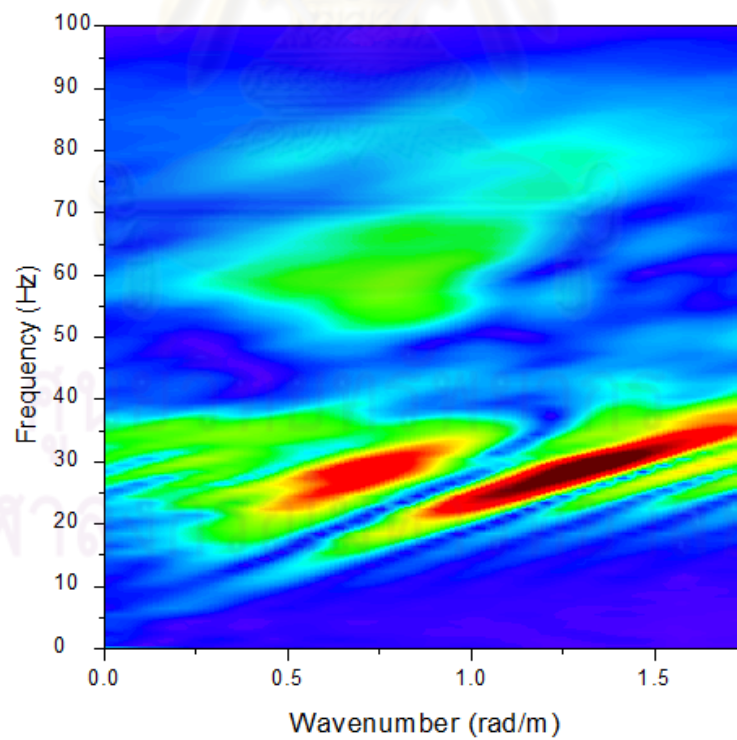
#### 4.3.2 การหาความสัมพันธ์ความถี่กับเลขคลื่น (F – K Transform)

การประมวลผลของการหาความสัมพันธ์ของความถี่กับเลขคลื่นได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.11.2 และจากข้อมูลการทดสอบสามารถหาความสัมพันธ์ของความถี่กับเลขคลื่นดังแสดงในภาพที่ 4.14 ถึง 4.16

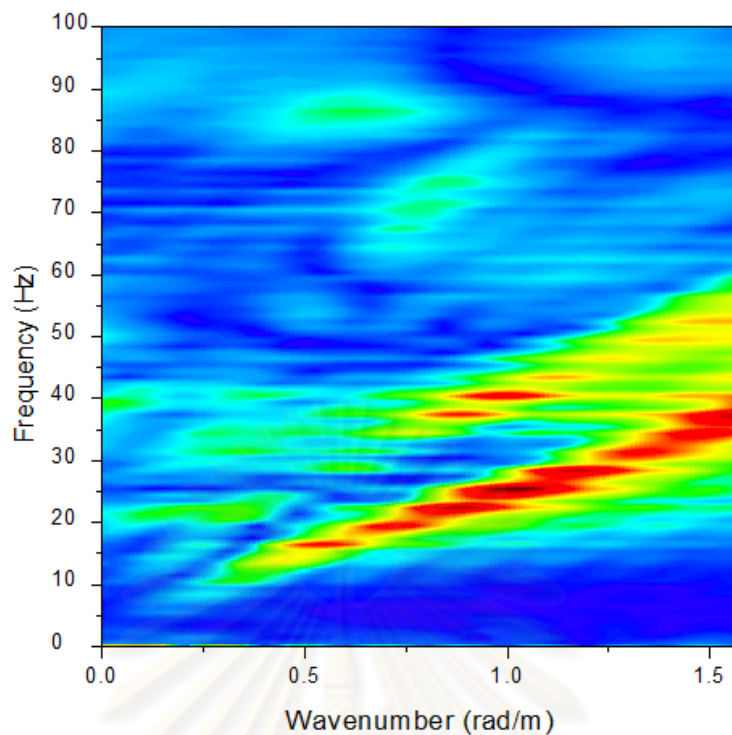
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่4.14 ความสัมพันธ์ของเลขคลื่นความถี่ต่างๆ ของการตรวจวัดที่จังหวัดจุกฟ้า



ภาพที่4.15 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆ ของการตรวจวัดที่จังหวัดเชียงใหม่

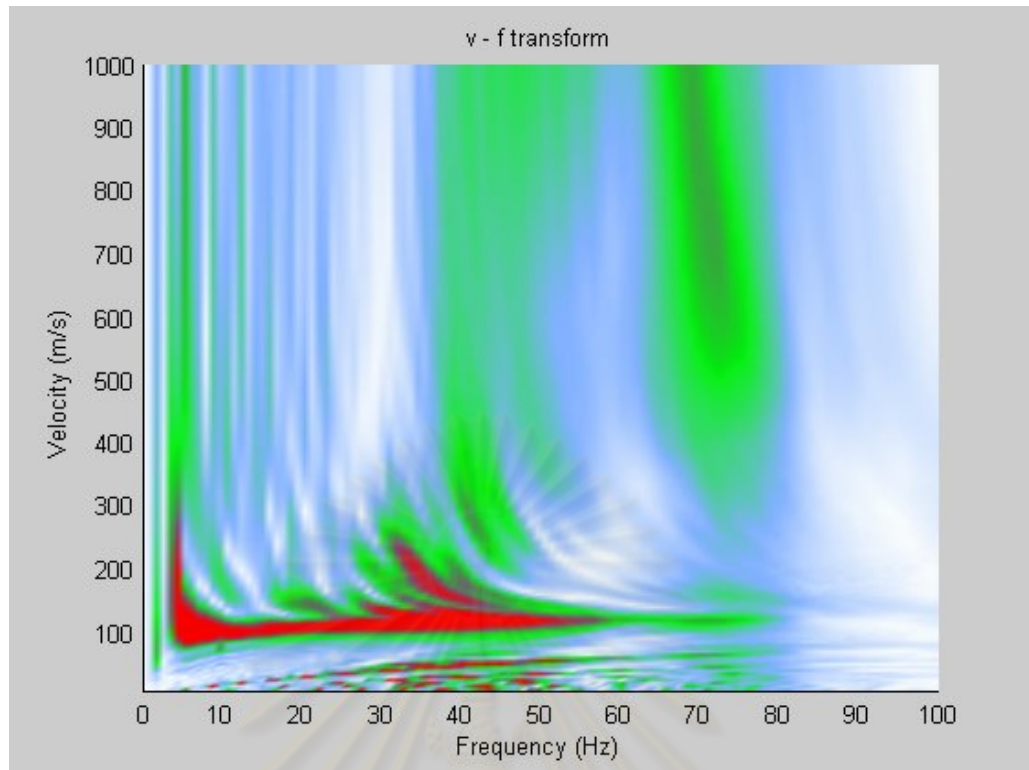


ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆของการตรวจวัดที่จังหวัดเพชรบูรณ์

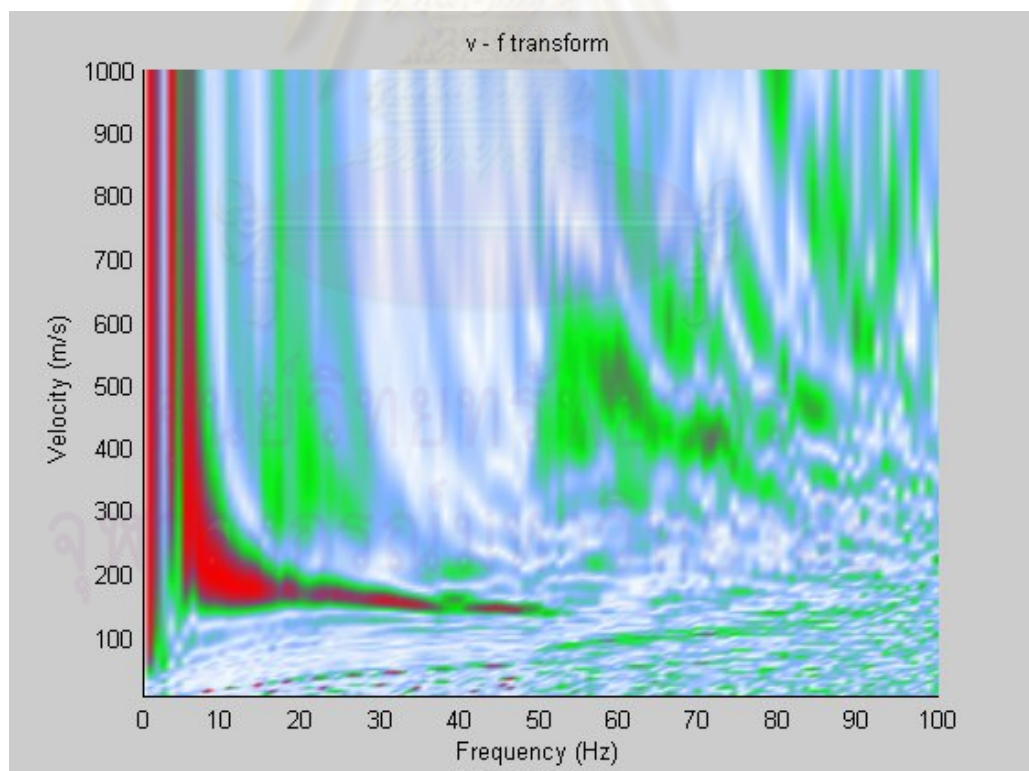
#### 4.3.1 การสร้างโค้งการกระจายโดยวิธี Phase Shift

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดมาประมวลผลตามกระบวนการที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.5.1 เพื่อที่จะสร้างโค้งการกระจายหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ให้อยู่ในรูปแบบของความเข้มของพลังงาน ดังแสดงในภาพที่ 4.17 ถึง ภาพที่ 4.19 โดยความเข้มของสีแสดงถึงความเข้มของพลังงานที่ตรวจวัดได้

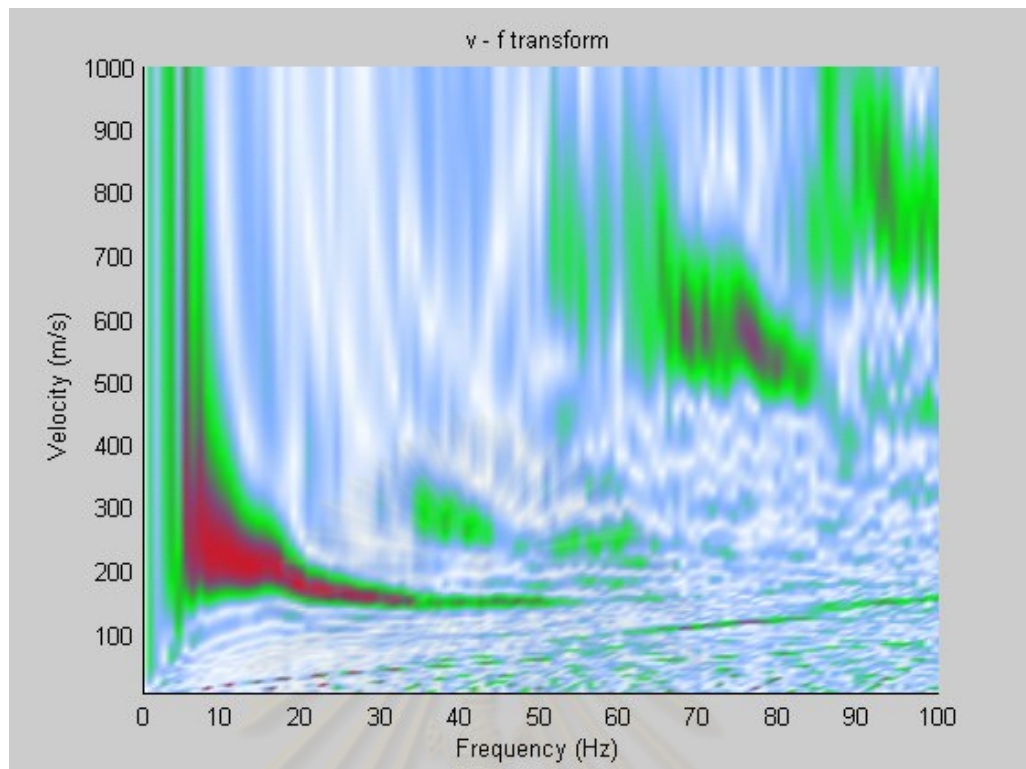
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆ ของการตรวจวัดที่จุฬาฯ



ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆ ของการตรวจวัดที่จังหวัดเชียงใหม่

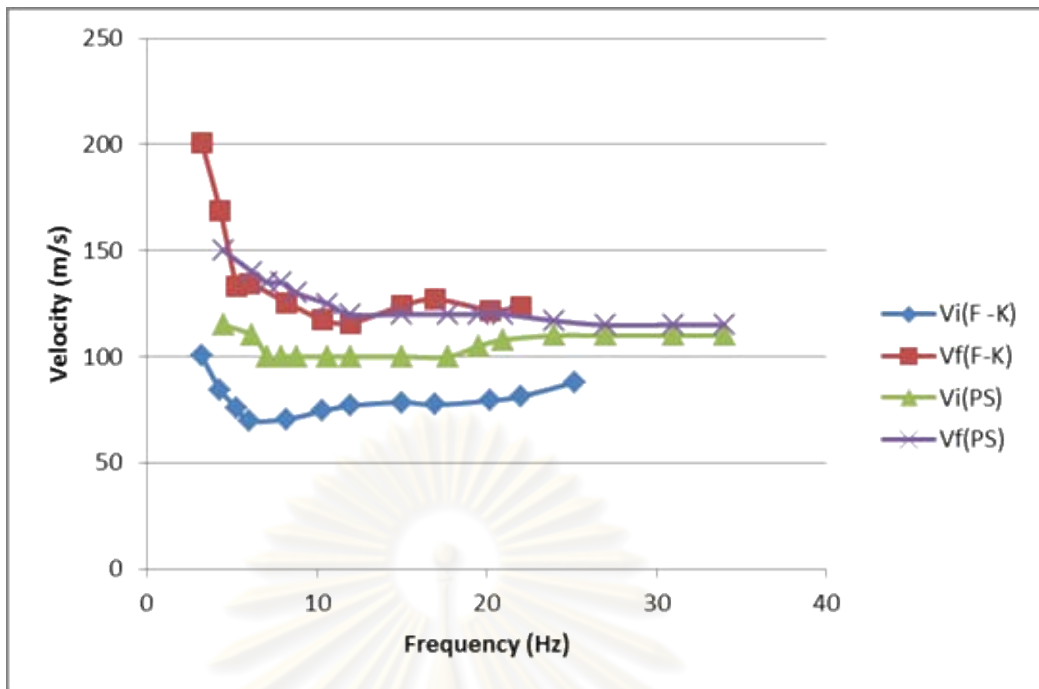


ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆของการตรวจวัดที่จังหวัด เพชรบูรณ์

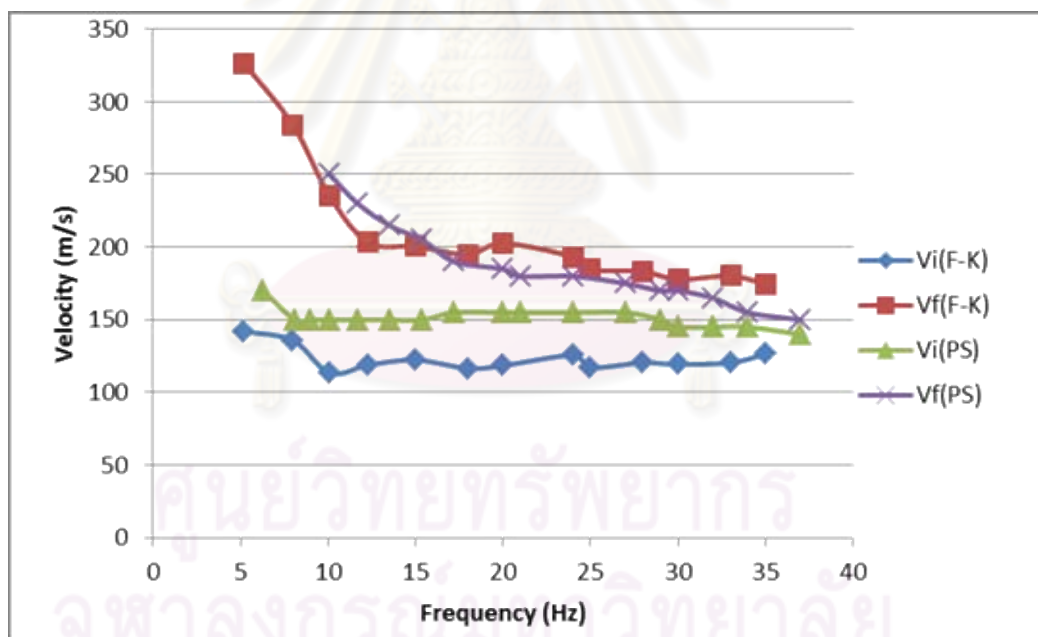
#### 4.4 เปรียบเทียบเส้นโค้งการกระจายของวิธี F –K Transform กับ Phase Shift

การเปรียบเทียบโค้งการกระจายวิธี Phase Shift สามารถที่จะทำได้โดยการเลือกค่าความเร็วเริ่มต้น ( $V_i$ ) และความเร็วสุดท้าย ( $V_f$ ) ของความถี่ต่างๆแล้วนำมาสร้างเส้นโค้งการกระจายเพื่อหาช่วงความเร็วที่จะเป็นไปได้ของแต่ละความถี่ส่วนการสร้างเส้นโค้งการกระจายของวิธี F – K Transform จะเป็นการเลือกค่าเลขคลื่น (Wave number) เริ่มต้นและค่าสุดท้ายแล้วนำไปคำนวณหาค่าความเร็วก่อนแล้วนำมาสร้างเส้นโค้งการกระจายเพื่อที่จะนำมาเปรียบเทียบกันดังแสดงในภาพที่ 4.20 ถึง ภาพที่ 4.22



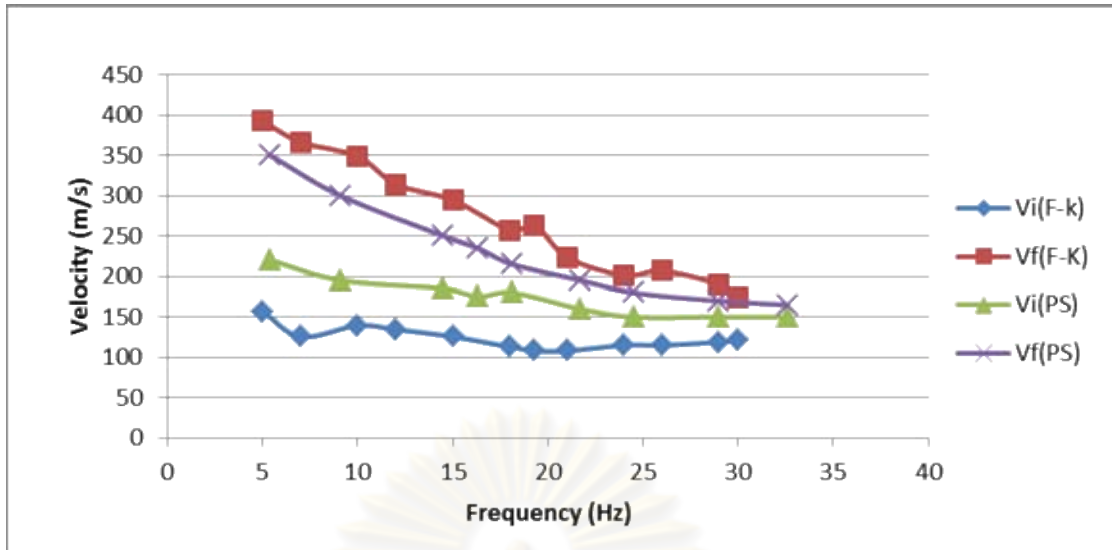


ภาพที่ 4.20 เปรียบเทียบโค้งการกระจายของการตรวจวัดที่जूฟ้าฯ



ภาพที่ 4.21 เปรียบเทียบโค้งการกระจายของการตรวจวัดที่จังหวัดเชียงราย





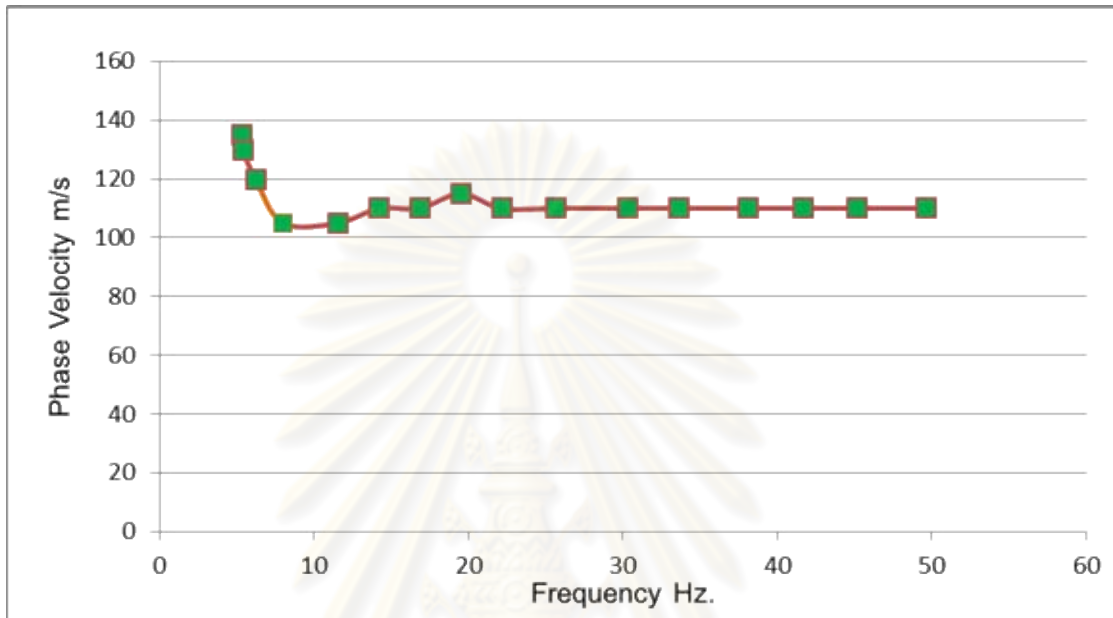
ภาพที่4.22 เปรียบเทียบโค้งการกระจายของการตรวจวัดที่จังหวัดเพชรบูรณ์

จากภาพที่4.20 ถึง ภาพที่4.22 จะเห็นได้ว่าช่วงความเร็วของโค้งการกระจายที่สร้างด้วยวิธี F – K Transform จะมีช่วงความเร็วโดยเฉลี่ยแล้วกว้างกว่าวิธี Phase Shift ดังแสดงในตารางที่ 4-1 และสามารถที่จะสรุปได้ว่าการสร้างเส้นโค้งการกระจายแบบวิธี F – K Transform สามารถที่จะเลือกค่าความเร็วผิดพลาดได้มากกว่าวิธี Phase Shift และยังมีขั้นตอนในการคำนวณที่มากกว่าอีกด้วย

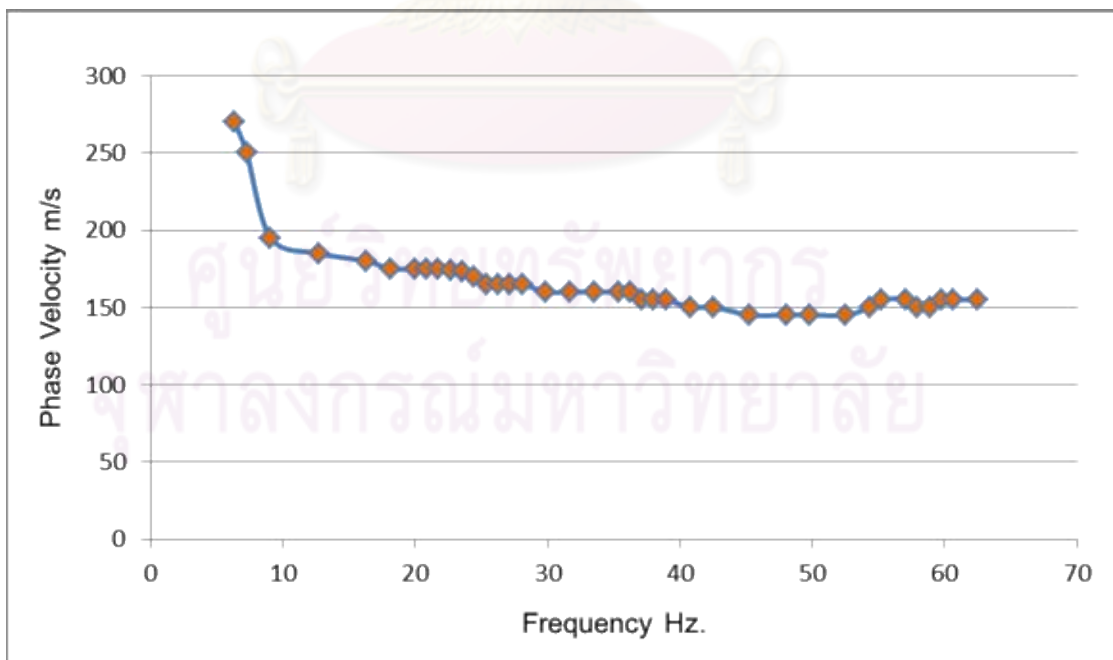
ตารางที่ 4-1 แสดงค่าแตกต่างของช่วงความเร็วเริ่มต้นและความเร็วสุดท้ายโดยเฉลี่ยของโค้งการกระจาย

สถานที่	ช่วงความเร็วที่แตกต่างโดยเฉลี่ย(%)	
	F -K transform	Phase Shift
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	71%	19%
จังหวัดเชียงราย	87%	25%
จังหวัดเพชรบูรณ์	116%	30%

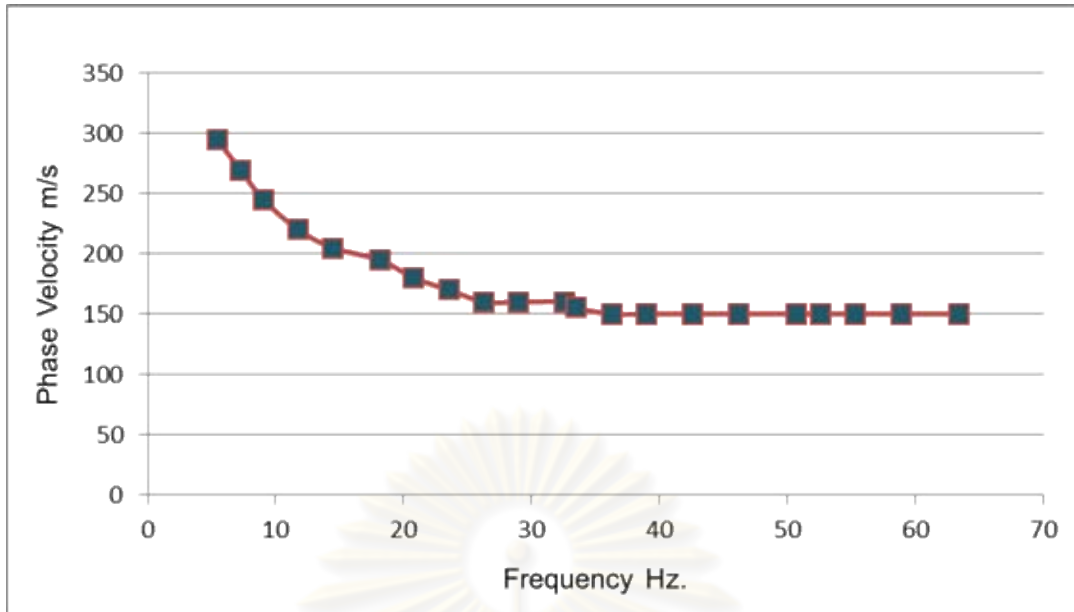
จากหัวข้อ 4.4 แสดงให้เห็นแล้วว่าการสร้างโค้งการกระจายด้วยวิธี Phase Shift เป็นวิธีที่ดี และมีคุณภาพมากกว่าดังนั้นภาพที่ 4.17 ถึง ภาพที่ 4.19 จะถูกนำมาสร้างเส้นโค้งการกระจายใหม่ โดยเลือกข้อมูลความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ตรงที่มีความเข้มของพลังงานที่สูงๆ มาเขียนกราฟเส้นโค้งการกระจายใหม่ดังภาพที่ 4.23 ถึง ภาพที่ 4.25



ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ของการตรวจวัดที่จุฬาฯ



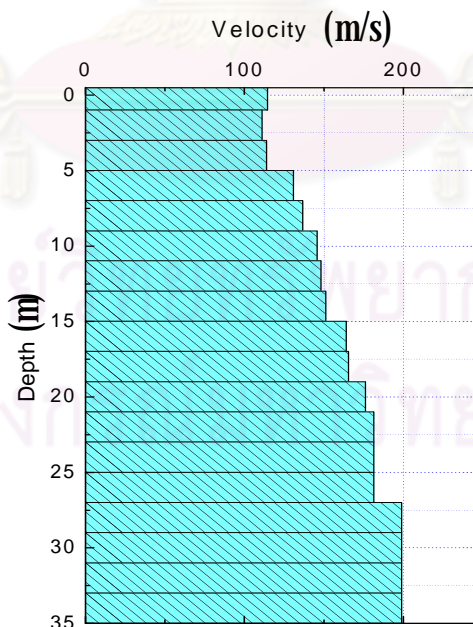
ภาพที่ 4.24 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ของการตรวจวัดที่จังหวัดเชียงราย



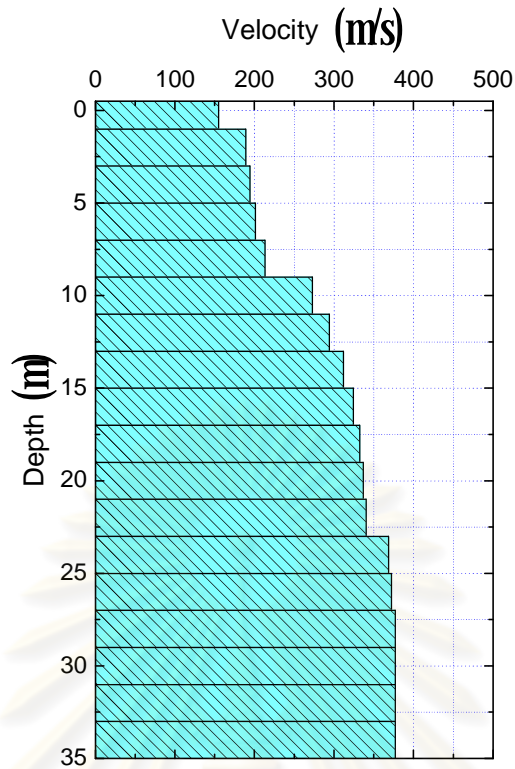
ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ของการตรวจวัดที่จังหวัดเพชรบูรณ์

#### 4.4.1 การคำนวณย้อนกลับหาค่าความเร็วคลื่นเฉือน

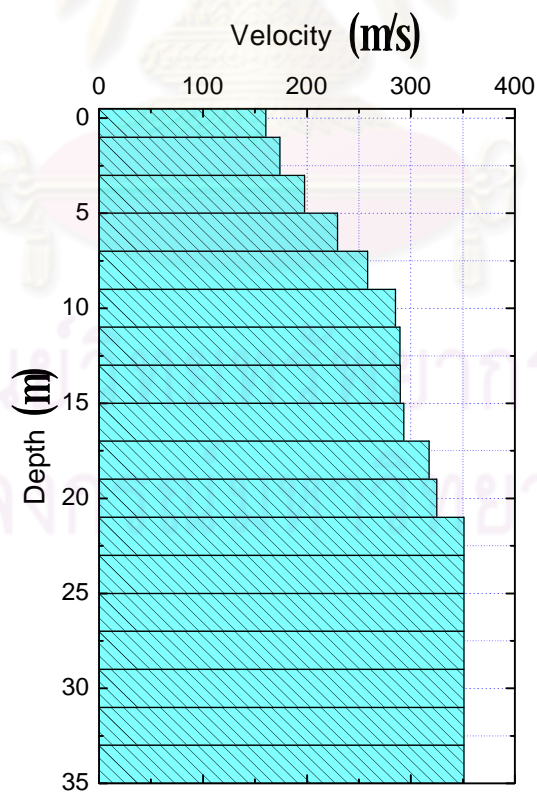
การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ระดับความลึกต่างๆ ของชั้นดินได้ใช้หลักการและทฤษฎีต่างๆ ดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 3.5.3 และได้ค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่แปรผันตามความลึกต่างดังแสดงใน



ภาพที่ 4.26 ความเร็วคลื่นเฉือน ณ ความลึกต่างๆ ของการทดสอบแบบแอกซีทีพีที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



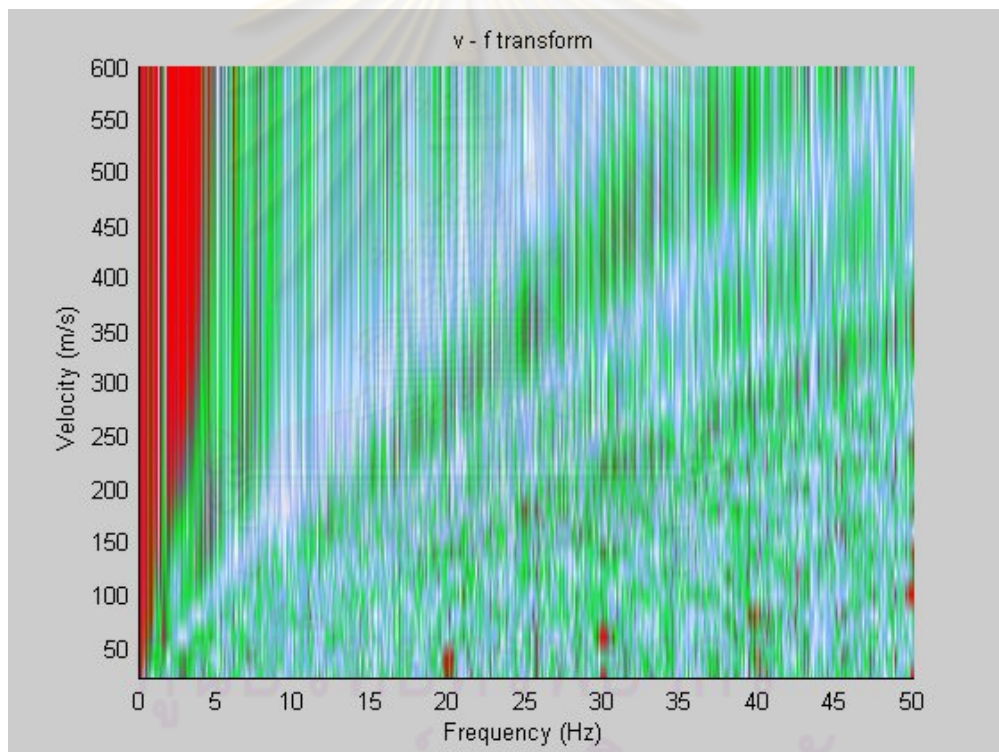
ภาพที่ 4.27 ความเร็วคลื่นเฉือน ณ ความลึกต่างๆ ของการทดสอบแบบแอคทีฟที่จังหวัดเชียงราย



ภาพที่ 4.28 ความเร็วคลื่นเฉือน ณ ความลึกต่างๆ ของการทดสอบแบบแอคทีฟที่จังหวัดเพชรบูรณ์

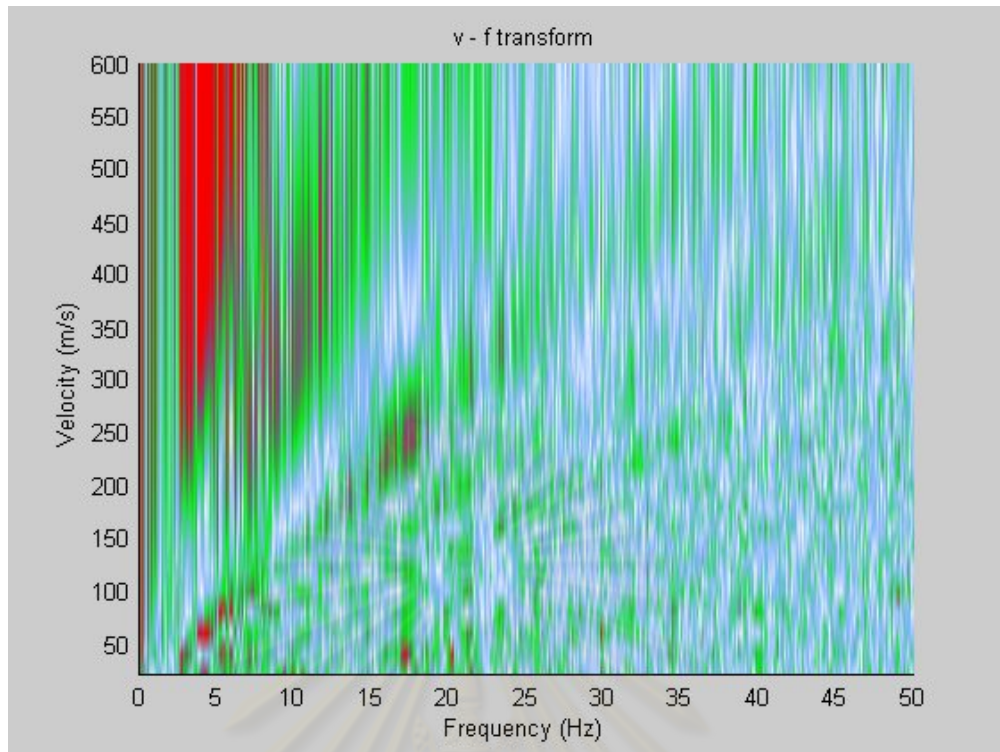
#### 4.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบแพสซีฟ

จากผลการทดสอบของวิธีแอดคทีฟได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการสร้างโค้งการกระจายด้วยวิธี Phase Shift นั้นให้ผลที่ดีกว่าทางด้านความคมชัด และความต่อเนื่องของโค้งการกระจาย เนื่องจากการใช้วิธี F -K Transform จะมีคุณภาพสูงหรือต่ำนั้นขึ้นอยู่กับ การเลือกใช้จำนวนของตัวตรวจวัดสัญญาณด้วย ดังนั้นจึงได้นำเอาวิธีดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการตรวจวัดของวิธีแพสซีฟเพื่อที่จะสร้างโค้งการกระจายหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ให้อยู่ในรูปแบบของความเข้มของพลังงาน ดังแสดงในภาพที่ 4.29 ถึง ภาพที่ 4.31 ความเข้มของสีแสดงถึงความเข้มของพลังงานที่ตรวจวัดได้

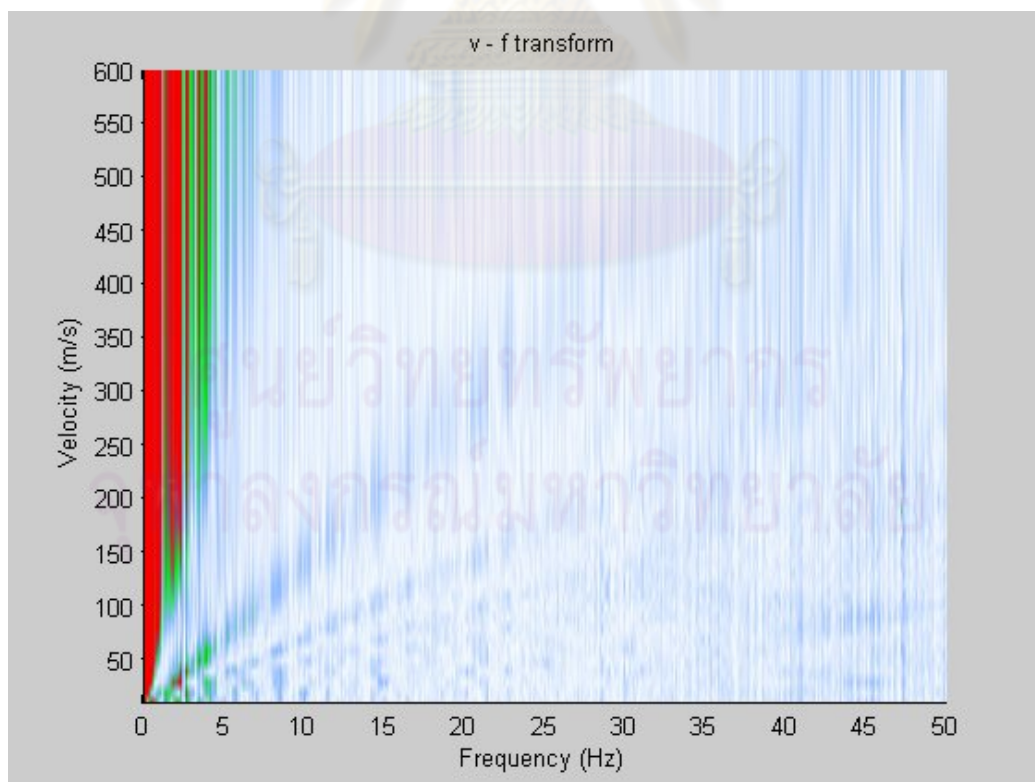


ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆ ของการตรวจวัดที่จุฬาฯ แบบฉาก



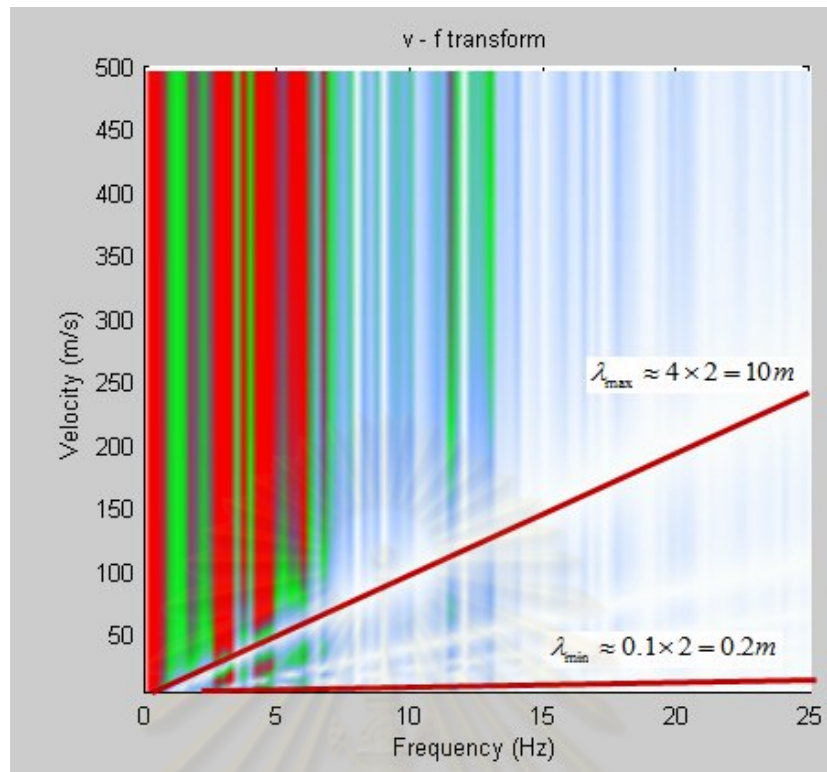


ภาพที่4.30 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆ ของการตรวจวัดที่จังหวัดเชียงราย แบบฉาก

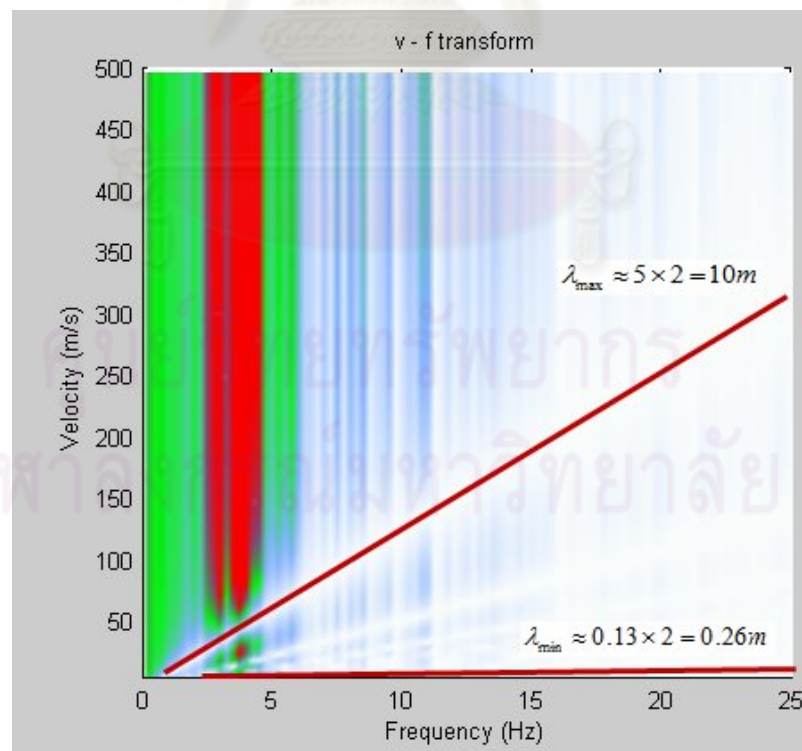


ภาพที่4.31 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆของการตรวจวัดที่จังหวัดเพชรบูรณ์แบบฉาก

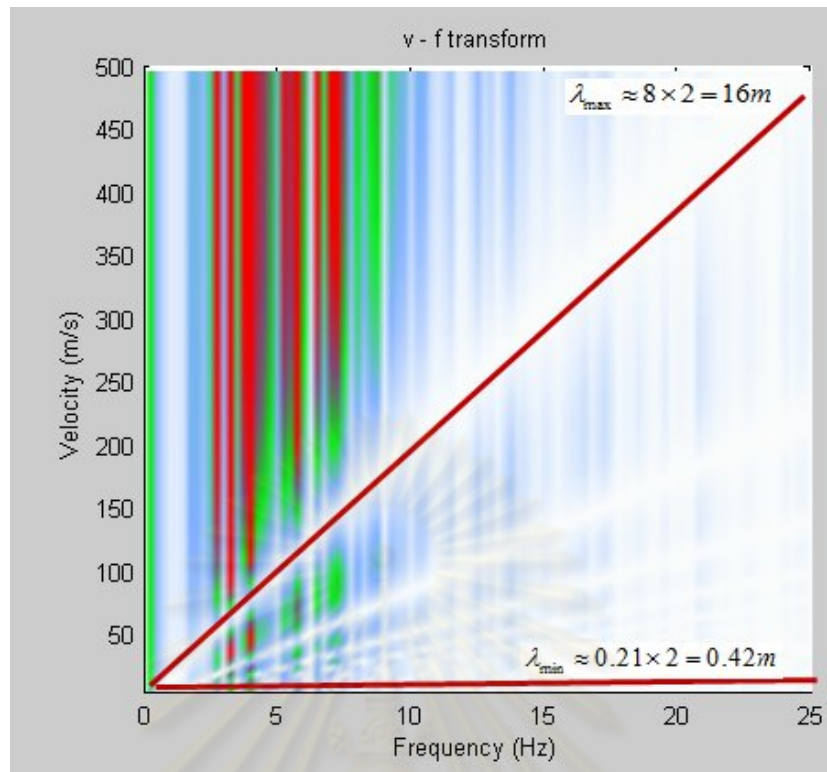




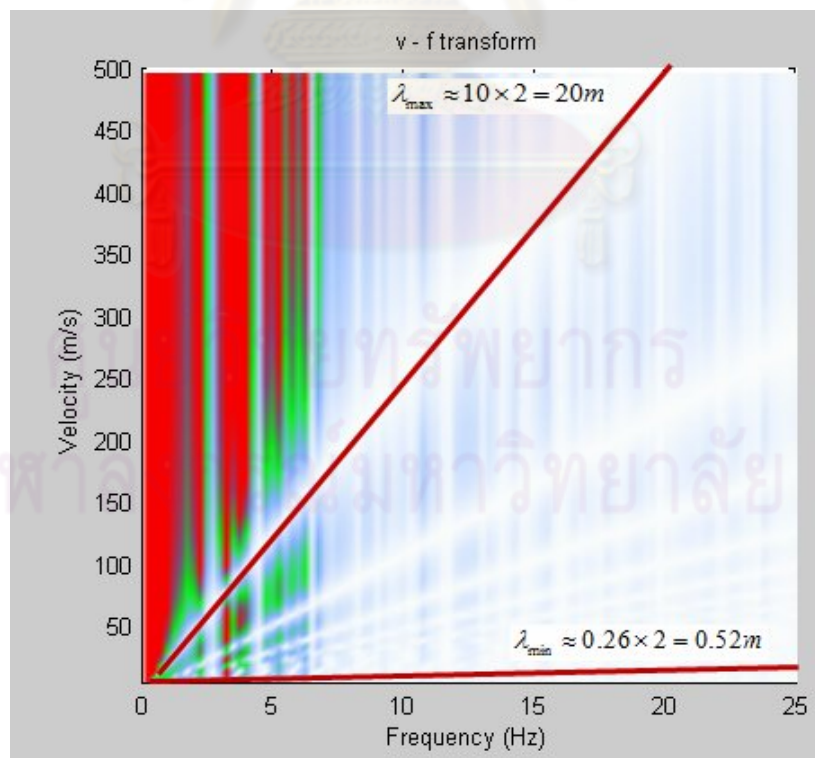
ภาพที่4.32 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆของการตรวจวัดที่จุดฟ้าแบบวงกลมรัศมี 4 เมตร



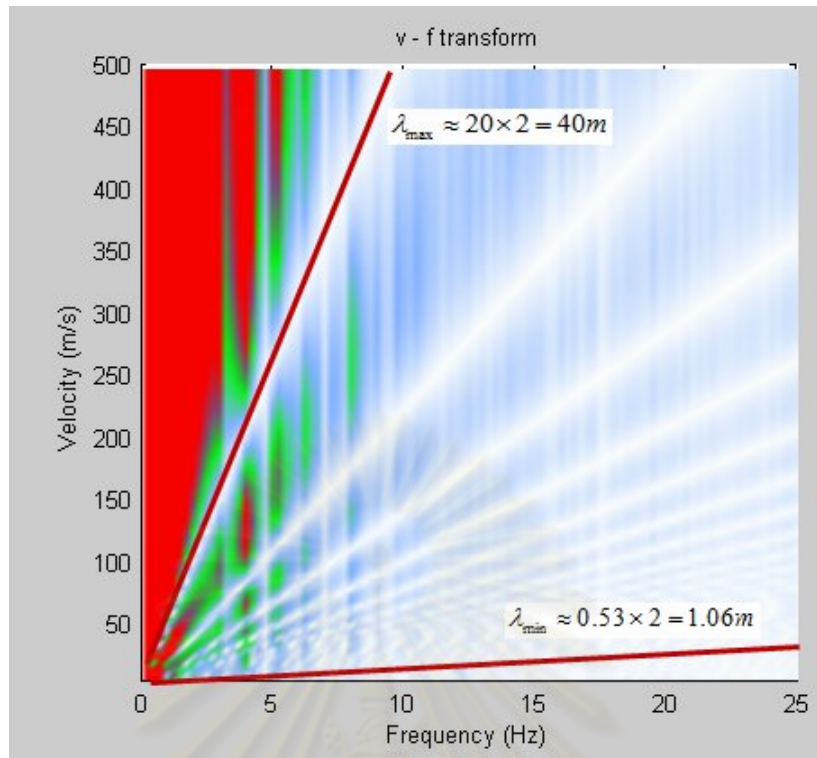
ภาพที่4.33 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆของการตรวจวัดที่จุดฟ้าแบบวงกลมรัศมี 5 เมตร



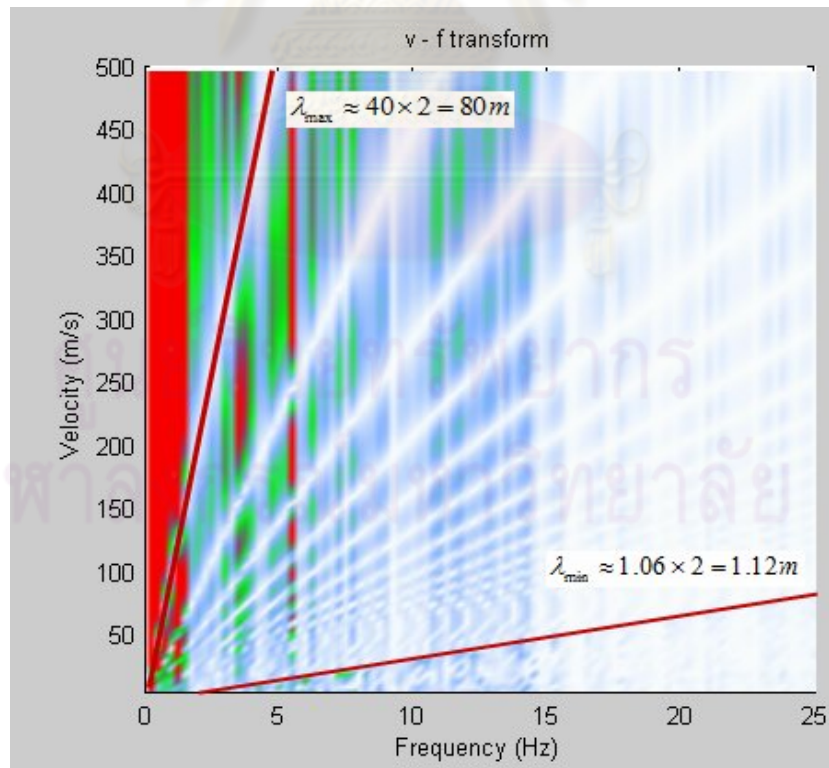
ภาพที่ 4.34 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆของการตรวจวัดที่จู่ฟ้าแบบวงกลมรัศมี 8 เมตร



ภาพที่ 4.35 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆของการตรวจวัดที่จู่ฟ้าแบบวงกลมรัศมี 10 เมตร



ภาพที่ 4.36 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆของการตรวจวัดที่จู่ฟ้าแบบวงกลมรัศมี 20 เมตร



ภาพที่ 4.37 ความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเฟสกับความถี่ต่างๆของการตรวจวัดที่จู่ฟ้าแบบวงกลมรัศมี 40 เมตร

จากการวิเคราะห์ภาพที่ 4.29 ถึงภาพที่ 4.37 ไม่สามารถที่จะนำมาสร้างโค้งการกระจายได้ เนื่องจากความค่าแอมพลิจูดของสัญญาณการตรวจวัดต่ำนั้นคือในขณะที่ตรวจวัดสัญญาณมีสภาพการจราจรที่เบาบางและไม่มีรถบรรทุกวิ่งผ่านจึงทำให้ได้สัญญาณการตรวจวัดที่เบาซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ไม่สามารถให้รายละเอียดที่ชัดเจนของโค้งการกระจายได้

#### 4.6 การคำนวณค่าความเร็วคลื่นเฉือนจากการทดสอบไฮลและการเจาะสำรวจดิน

การคำนวณค่าความเร็วคลื่นเฉือนจากการทดสอบไฮลและผลเจาะสำรวจดินสามารถที่จะคำนวณได้จากสมการที่ 4.1 และ 4.4 ซึ่งได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข ตารางที่ ข - 1 ถึง ข - 2

Ashford et al., (1997)

$$V_s = 68.7S_u^{0.475} \quad 4.1$$

Imai and Toniuchi., (1982)

$$V_s = 96.926N^{0.314} \quad 4.2$$

เมื่อ

$V_s$  คือ ค่าความเร็วคลื่นเฉือน (m/s)

$S_u$  คือ ค่ากำลังรบบแรงเฉือนของดิน ( $t/m^2$ )

$N$  คือ ค่าการทดสอบการต้านทานการทะลุของแบบมาตรฐาน (Blow/ft)

RabinTuladhar, Fumio Yamazaki, Pennung Warnitchai, and Jun Saita., (2003)

$$V_s = \sqrt{\frac{G_{\max}}{\rho}} \quad 4.3$$

$$G_{\max} = 2200S_u \quad 4.4$$

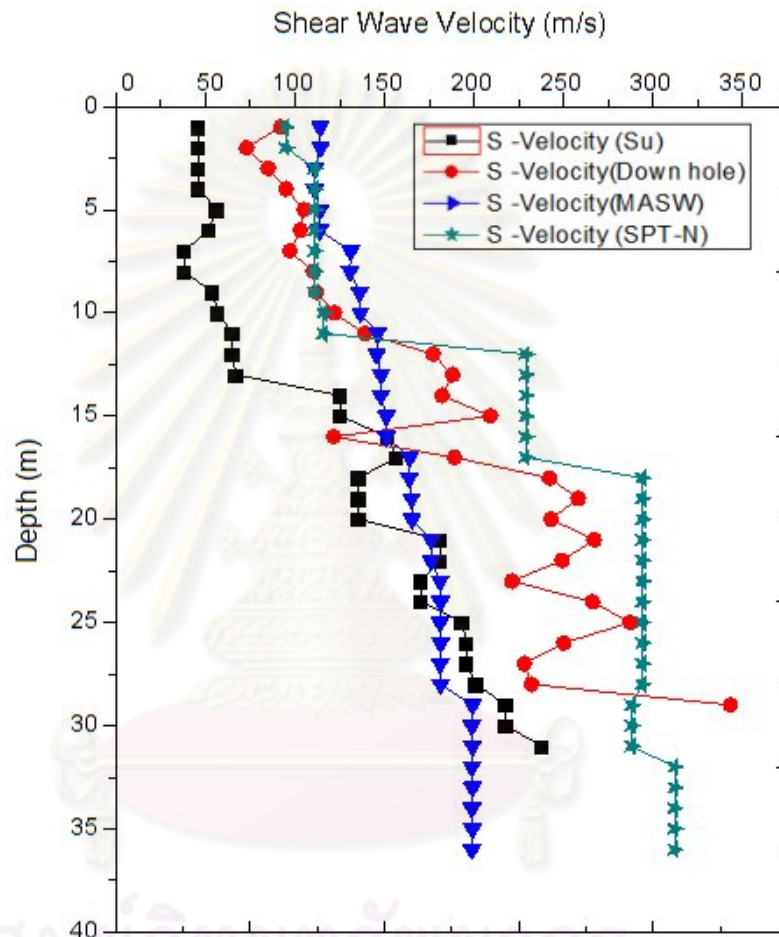
เมื่อ

$G_{\max}$  คือ Shear modulus ( $t/m^2$ ) from the undrained shear strength ( $S_u$ ):

$S_u$  คือ undrained shear strength ( $t/m^2$ )

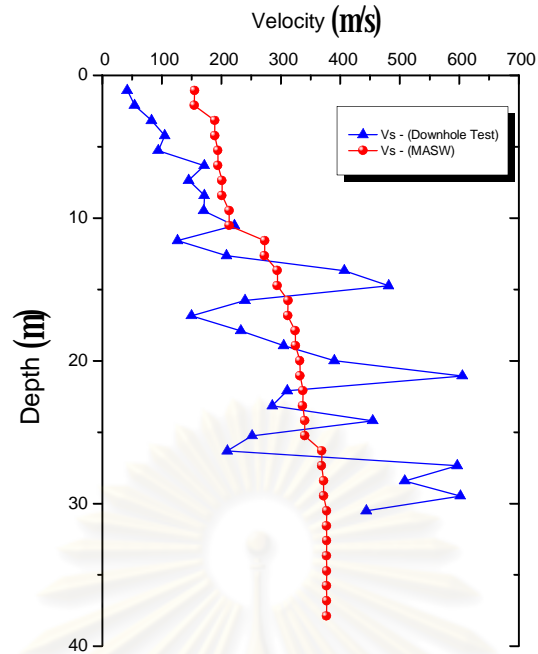
#### 4.7 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์คลื่นผิวแบบหลายช่องสัญญาณกับผลการเจาะสำรวจดิน

จากการประมวลผลในข้างต้นได้แสดงค่าความเร็วคลื่นเฉือนของการทดสอบ MASW ด้วยวิธีแบบแอดทีฟไว้ในภาคผนวก ก ตารางที่ ก - 1 ถึง ก - 3 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากการทดสอบดาวน์โฮลได้แสดงไว้ใน ตารางที่ ข - 1 ถึง ข - 3 และเมื่อนำค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากสองวิธีมาเขียนกราฟเปรียบเทียบกันก็จะได้ดังภาพที่ 4.38 ถึง

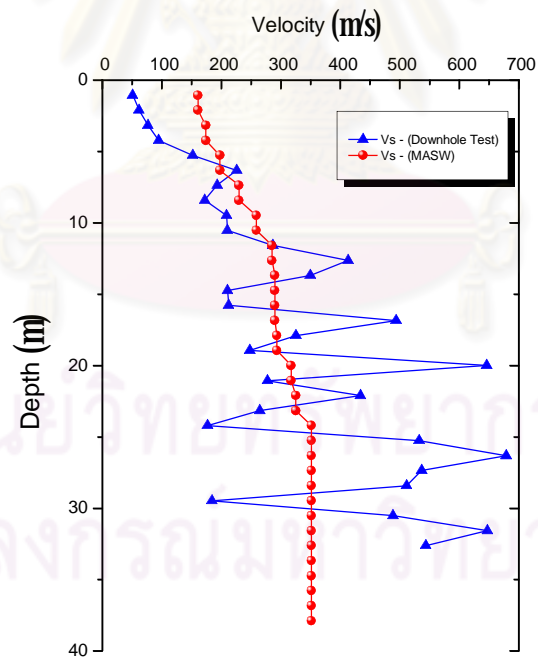


ภาพที่ 4.38 การเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นเฉือนระหว่างวิธี MASW แบบแอดทีฟกับผลที่ได้จากการเจาะสำรวจดินที่จุฬาฯ





ภาพที่ 4.39 การเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นเฉือนระหว่างวิธี MASW แบบแอดทีฟกับผลที่ได้จากการทดสอบ ดาวน์โฮลที่จังหวัดเชียงราย



ภาพที่ 4.40 การเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นเฉือนระหว่างวิธี MASW แบบแอดทีฟกับผลที่ได้จากการทดสอบ ดาวน์โฮลที่จังหวัดเพชรบูรณ์



#### 4.8 การจำแนกชนิดดินโดยใช้วิธี National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP)

จากผลการทดสอบสามารถนำค่าความเร็วคลื่นเฉือนมาจำแนกชนิดของดินตามวิธี (NEHRP) ได้จากหัวข้อที่ 2.17 ได้ตามตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 แสดงการจำแนกชนิดของดินของผลการทดสอบ MASW

สถานที่	ความลึก(m)	Vs (m/s)	Soil Type
จุฬาลงกรณ์	0 - 20	<180	E
	20 - 35	200	D
จังหวัด เชียงใหม่	0 - 5	<180	E
	25-35	180 <Vs < 360	D
จังหวัด เพชรบูรณ์	0 - 3	<180	E
	20 - 35	200	D

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

1).จากการศึกษาการเปรียบเทียบการสร้างโค้งการกระจายของการทดสอบ MASW แบบวิธี แอคทีฟโดยใช้วิธีการสร้างโค้งการกระจายด้วยวิธี F – K Transform และ Phase Shift และพบว่า โค้งการกระจายที่สร้างด้วยวิธี F – K Transform จะมีช่วงความเร็วโดยเฉลี่ยแล้วกว้างกว่าวิธี Phase Shift ดังแสดงในตารางที่ 4-1 ดังนั้นจึงสามารถที่จะสรุปได้ว่าการสร้างเส้นโค้งการกระจาย แบบวิธี F – K Transform สามารถที่จะเลือกค่าความเร็วผิดพลาดได้มากกว่าวิธี Phase Shift และ ยังมีขั้นตอนในการคำนวณที่มากกว่าอีกด้วย

2). การศึกษาการทดสอบ MASW แบบวิธีแพสซีฟพบว่าสัญญาณจากตัวตรวจวัดในการ ทดสอบแบบแพสซีฟมีค่าสัญญาณที่เบามาก ทั้งนี้สันนิษฐานว่าการสั่นสะเทือนตามธรรมชาติมี ความถี่ต่ำกว่าช่วงที่ตัวตรวจวัดจะตรวจจับได้ นอกจากนี้ในขณะที่ตรวจวัดไม่มีกิจกรรมหรือ การจราจรที่หนาแน่นเพียงพอที่จะทำให้เกิดคลื่นสั่นสะเทือนที่แรงพอสำหรับอุปกรณ์ตรวจวัด

3).การเปรียบเทียบผลการทดสอบ MASW กับการทดสอบดาวนโฮลพบมีลักษณะหรือ แนวโน้มของค่าความเร็วคลื่นเฉือนไปในทิศทางเดียวกันและมีความแตกต่างกันดังตารางที่ 5-1 ส่วนค่าการเปรียบเทียบผลการทดสอบ ณ ที่ความลึกต่างๆนั้นได้แสดงในตารางที่ ค - 1 ถึง ตาราง ที่ ค - 2 ในภาคผนวก ค

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5-1 ค่าความแตกต่างของโดยเฉลี่ยของ Vs จากผลการทดสอบ MASW กับ ดาวันน์

ไฮล

สถานที่	ความแตกต่าง Vs (%)
จุฬา	7%
เชียงใหม่	-36%
เพชรบูรณ์	-19%

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1). การทดสอบแบบวิธีแอดคทีฟจะสามารถทำการสำรวจได้ดีในระยะเวลาที่มีความลึกไม่เกิน 30 เมตร ในขณะที่การทดสอบแบบวิธีแพสซีฟนั้นสามารถที่จะทำการสำรวจได้ลึกมากกว่า
- 2). หากต้องการตรวจวัดแบบวิธีแพสซีฟจะต้องจะตั้งทำการตรวจวัดในขณะที่มีการจราจรหนาแน่นและควรใช้ตัวตรวจวัดสัญญาณที่มีความถี่ธรรมชาติที่ต่ำๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## เอกสารอ้างอิง

- Ballard, R.F., (1964). Determination of soil shear moduli at depth by in situ vibratory techniques. Waterways Experiment Station, Miscellaneous paper No. 4.691, December
- Choon, B., Park, Richard D., Miller, J.X., and Julian.,(2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW) active and passive methods .Kansas Geological Survey, No. 1: pp60 . 64.
- Choon, B., Park., and Richard, D. Miller.,(2005). Multichannel Analysis of Passive Surface Waves Modeling and Processing Schemes, The University of Kansas.
- Foti, S., (2000). Multi-Station Methods for Geotechnical Characterisation Using Surface Waves. PhD Diss., Politecnico di Torino, 229 pp
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., (1999). Multichannel analysis of surface waves (MASW); Geophysics, 64 800/808.
- Park, C.B., Xia, J., and Miller, R.D., (1998). Imaging dispersion curves of surface waves on multi.channel record; SEG Expanded Abstracts, 1377.1380.
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., (2001) Offset and resolution of dispersion curve in multichannel analysis of surface waves (MASW): Proceedings of the SAGEEP 2001, Denver, Colorado, SSM4
- SeisImager/SW Manual., (2005). Windows Software for Analysis of Surface Waves. OYO Operation.
- Seng.S., (2009). Application of Multichannel Analysis of Surface Wave To Shallow Site Investigation for Subsoil in Thailand. Master Thesis. Chulalongkorn University
- Stokoes, K.H. II., Nazarian, S., Rix, G.J., Sanchez.Saliner, I., Sheu, J., and Mok, Y., (1988). In situ seismic testing of hard.to.sample soils by surface wave method. Earthquake Engineering and Soil Dynamics II. Recent advances in ground.motion evaluation.Park city, ASCE, 264.277.

Stokoe, K.H., Wright, S.G., Bay, J., and Roesset, J.M., (1994). Characterization of geotechnical sites by SASW method, in Geophysical characterization of sites. (ISSMFE TC#10) by R.D. Woods (ed), Oxford& IBH Publ., 15.25

Viktorov, I.A., (1967). Rayleigh and Lamb Waves: physical theory and applications. New York: Plenum Press



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### ภาคผนวก ก

ค่าความเร็วคลื่นเฉือนจากการสำรวจ MASW

ตารางที่ ก - 1 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนจากการสำรวจ MASW แบบแอกทีฟที่จุฬาฯ

Depth (m)	S-wave velocity(m/s)
0	114
2	111
4	114
6	131
8	136
10	146
12	148
14	151
16	164
18	165
20	176
22	181
24	181
26	181
28	199
30	199
32	199
34	199
36	199

ตารางที่ ก - 2 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนจากการสำรวจ MASW แบบแอดทีฟที่จังหวัดเชียงราย

Depth (m)	S-wave velocity(m/s)
0	155
2	189
4	194
6	201
8	213
10	273
12	294
14	312
16	324
18	332
20	337
22	340
24	369
26	372
28	377
30	377
32	377
34	377
36	377

ตารางที่ ก - 3 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนจากการสำรวจ MASW แบบแอดทีฟที่จังหวัด  
เพชรบูรณ์

Depth (m)	S-wave velocity(m/s)
0	160.40
2	173.98
4	197.63
6	229.51
8	258.54
10	285.05
12	289.60
14	289.67
16	293.06
18	317.27
20	324.98
22	351.18
24	351.18
26	351.18
28	351.18
30	351.18
32	351.18
34	351.18
36	351.18

## ภาคผนวก ข

ค่าความเร็วคลื่นเฉือนจากการเจาะสำรวจดิน

ตารางที่ ข- 1 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนจากการทดสอบดาวนีโอลที่จุฬาฯ

Depth (m)	Shear wave velocity (m/s)	Depth (m)	Shear wave velocity (m/s)
1	92	16	121.5
2	73	17	189
3	85	18	242
4	95	19	258
5	105	20	243
6	103	21	267
7	97	22	249
8	110	23	221
9	112	24	266
10	122	25	287
11	139	26	250
12	177	27	228
13	188	28	232
14	182	29	343
15	209		

ตารางที่ ๗- 2 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนจากการทดสอบดาวนีโอสลจังหวัดเชียงราย

Depth (m)	Shear wave velocity (m/s)	Depth (m)	Shear wave velocity (m/s)
1	41.6	16	121.5
2	47.1	17	125
3	55	18	129.2
4	62.4	19	134
5	66.9	20	139.4
6	74.5	21	143.1
7	80.1	22	146.5
8	85.8	23	150.9
9	90.8	24	153.5
10	96.5	25	155.1
11	98.6	26	159.7
12	103.2	27	164.8
13	109.4	28	168.2
14	115.8	29	172.9
15	120		

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๓- 3 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนจากการทดสอบดาวนิโสดที่จังหวัดเพชรบูรณ์

Depth (m)	Shear wave velocity (m/s)	Depth (m)	Shear wave velocity (m/s)
1	48.2	17	128.3
2	53.4	18	132.3
3	61.2	19	136.6
4	69.4	20	138.8
5	71.9	21	143.4
6	79.1	22	147.2
7	82.6	23	150.7
8	90.6	24	151.9
9	94.7	25	155.5
10	102.8	26	160.1
11	110.6	27	164
12	111.3	28	167
13	115.6	29	169.8
14	117.1	30	169.5
15	121.4	31	172.4
16	125.3	32	176.2

ตารางที่ ๓- 4 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่คำนวณจากค่า Su ของการทดสอบที่จุฬา

Depth (m)	S -Velocity (Su) (m/sec)	Depth (m)	S -Velocity (Su) (m/sec)
1	46.29892	16	151.66271
2	46.29892	17	156.80528
3	46.29892	18	135.49683
4	46.29892	19	135.49683



5	56.385	20	135.49683
6	51.95562	21	181.36678
7	38.0443	22	181.36678
8	38.0443	23	170.49644
9	53.99688	24	170.49644
10	57.04768	25	193.60722
11	65.08895	26	195.57283
12	65.08895	27	195.57283
13	67.07366	28	201.35455
14	125.2232	29	217.78068
15	125.2232	30	217.78068

ตารางที่ ๕-5 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่คำนวณจากค่า SPT ของการทดสอบที่จู่ฟ้า

Depth (m)	S -Velocity (SPT- N) (m/sec)	Depth (m)	S -Velocity (SPT- N) (m/sec)
1	95	19	294
2	95	20	294
3	111	21	294
4	111	22	294
5	111	23	294
6	111	24	294
7	111	25	294
8	111	26	294
9	111	27	294
10	116	28	294
11	116	29	288
12	229	30	288

13	229	31	288
14	229	32	312
15	229	33	312
16	229	34	312
17	229	35	312
18	294	36	312



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

เปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นเฉือนระหว่างการทดสอบ MASW กับ การทดสอบดาวน์โฮล

ตารางที่ ค – 1 เปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นเฉือนของการทดสอบที่จู่ฟ้าที่จู่ฟ้า

Depth (m)	S-wave velocity(m/s)	Vs (Dowohole) m/s	Comparison (%)
0	114	92	-24%
1	114.32	73	-57%
2	111	85	-31%
3	111.03	95	-17%
4	114	105	-8%
5	113.67	103	-10%
6	131	97	-35%
7	130.69	110	-19%
8	136	112	-22%
9	136.49	122	-12%
10	146	139	-5%
11	145.53	177	18%
12	148	188	21%
13	147.90	182	19%
14	151	209	28%
15	150.91	121.5	-24%
16	164	189	13%
17	163.83	242	32%
18	165	258	36%
19	165.34	243	32%

20	176	267	34%
21	175.89	249	29%
22	181	221	18%
23	181.27	266	32%
24	181	287	37%
25	181.27	250	27%
26	181	228	20%
27	181.27	232	22%
28	199	343	42%

ตารางที่ ค - 2 เปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นเฉือนของการทดสอบที่จุฬาที่จังหวัดเชียงราย

Depth (m)	S-wave velocity(m/s)	Vs (Dowohole) (m/s)	Comparison (%)
0	155	42	-271%
1	154.53	54.23	-185%
2	189	83	-128%
3	189.03	105.14	-80%
4	194	94	-106%
5	194.09	171.29	-13%
6	201	145	-39%
7	201.02	171.27	-17%
8	213	170	-25%
9	213.13	222.25	4%
10	273	127	-115%
11	272.67	208.62	-31%
12	294	407	28%
13	293.82	481.21	39%

14	312	240	-30%
15	311.73	149.68	-108%
16	324	233	-39%
17	324.48	304.86	-6%
18	332	390	15%
19	332.37	605.36	45%
20	337	311	-8%
21	336.57	285.77	-18%
22	340	455	25%
23	340.08	251.63	-35%
24	369	210	-75%
25	368.62	596.73	38%
26	372	509	27%
27	372.01	601.89	38%
28	377	444	15%

ตารางที่ ค - 3 เปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นเฉือนของการทดสอบที่จุดฟ้าที่จังหวัดเชียงราย

Depth (m)	Vs (MASW) (m/s)	Vs (Dowohole) (m/s)	Comparison (%)
0	160.40	50.60	-217%
1	160.40	61.72	-160%
2	173.98	76.55	-127%
3	173.98	94.83	-83%
4	197.63	151.99	-30%
5	197.63	226.06	13%
6	229.51	193.17	-19%
7	229.51	172.19	-33%

8	258.54	208.96	-24%
9	258.54	210.12	-23%
10	285.05	286.81	1%
11	285.05	413.37	31%
12	289.60	349.55	17%
13	289.60	210.54	-38%
14	289.67	212.32	-36%
15	289.67	493.91	41%
16	293.06	325.48	10%
17	293.06	247.89	-18%
18	317.27	646.29	51%
19	317.27	277.48	-14%
20	324.98	433.93	25%
21	324.98	264.68	-23%
22	351.18	176.87	-99%
23	351.18	532.32	34%
24	351.18	678.95	48%
25	351.18	536.92	35%
26	351.18	511.36	31%
27	351.18	184.15	-91%
28	351.18	488.68	28%
29	351.18	647.40	46%
30	351.18	543.69	35%



## ภาคผนวก จ

## ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจดิน

ภาพที่ จ-1 ข้อมูลหลุมเจาะสำรวจดินที่จุฬาฯ

BOREHOLE # BH-1						Page 1 of 2								
Project No: 8116-4 Project: งานศึกษาการขุดเจาะดิน Site Location: กรุงเทพมหานคร			Ground Elev.(m): G.W.L (m): 0.70 Total Depth (m): 50.0		Date Started: 7 October 2008 Date Finished: 10 October 2008 Co-ordinate(N): Co-ordinate(E):									
Depth (m)	Sample Type	Symbols Number	SOIL DESCRIPTION	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Water Contents (%)			Suc (kN/m <sup>2</sup> )						
					PL	Wn	LL	15	30	45	60	75		
				20	20	60	100	SPT (N)						
								20	40	60	80			
0			Ground Surface											
0			Very soft to medium stiff CLAY, grey, high plasticity (CH)											
1	ST	1												
2	ST	2												
3	ST	3												
4	ST	4												
5	ST	5												
6	ST	6												
7	ST	7												
8	ST	8												
9	ST	9												
10	ST	10												
11	ST	11												
12	ST	12												
13	ST	13												
13			Stiff to hard CLAY, grey to greyish brown, high plasticity (CH)											
14	SS	1										29		
15	SS	2										31		
16	SS	3										24		
17	SS	4										24		
18	SS	5										24		
19	SS	6										24		
20	SS	7										43		
21	SS	8										38		
22	SS	9										49		
23	SS	10										37		
24	SS	11												
25	SS	12												
26	SS	13												
26														

■ Thin Wall Tube (ST)  
 ▨ Split Spoon (SS)  
 ▩ Rock Core (RC)  
 ▨ Wash (WO)  
 ▨ Auger (HA)

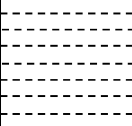
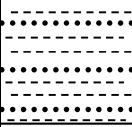
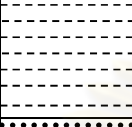

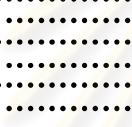
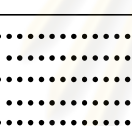
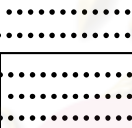
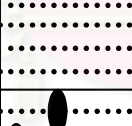

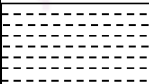
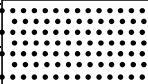
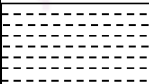
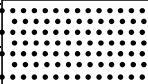
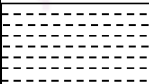
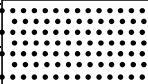
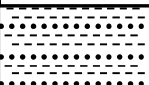
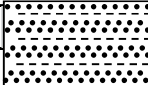
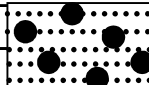
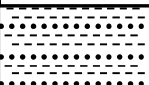
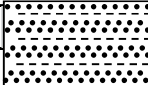
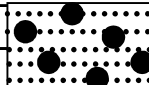
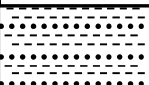
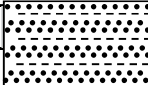
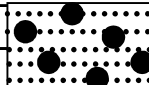
Suc = Undrained Shear Strength  
 SPT = Standard Penetration Test  
 PL = Plastic Limit  
 Wn = Water Content  
 LL = Liquid Limit

ภาพที่ ๑-2 ข้อมูลหลุมเจาะการสำรวจดินที่จุฬายัต

BOREHOLE # BH-1						Page 2 of 2									
Project No: 8116-4															
Project: การศึกษาการขุดค้ำของแท่งเข็ม															
Depth (m)	Sample Type	Symbols Type	Number	SOIL DESCRIPTION	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	LL W LL		Suc (kN/m <sup>2</sup> )							
						Water Contents (%)		SPT (N)							
					20	20	40	60	80	15	30	45	60	75	
27	SS	SS	10	Medium dense to very dense silty SAND, grey, very fine to medium grained (SM)										70	
28	SS	SS	11												13
29	SS	SS	12												19
30	SS	SS	13												55
31	SS	SS	14												64
32	SS	SS	15											30	
33	SS	SS	16	Hard CLAY, brown to greyish brown and reddish grey, high plasticity (CH)	35.50										36
34	SS	SS	17												47
35	SS	SS	18												46
36	SS	SS	19												68
37	SS	SS	20												41
38	SS	SS	21												53
39	SS	SS	22												51
40	SS	SS	23												51
41	SS	SS	24												59
42	SS	SS	25												68
43				End of Borehole	50.00										

<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Thin Wall Tube (ST)</li> <li>▨ Split Spoon (SS)</li> <li>▧ Rock Core (RC)</li> <li>▩ Wash (WO)</li> <li>▬ Auger (HA)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Suc = Undrained Shear Strength</li> <li>SPT = Standard Penetration Test</li> <li>PL = Plastic Limit</li> <li>Wn = Water Content</li> <li>LL = Liquid Limit</li> </ul>
--	--

ภาพที่ ๑-3 ข้อมูลหลุมการเจาะสำรวจดินที่จังหวัดเชียงราย

2.00		clay, greyish brown, orange mottle, soft, rare qtz. gravel and plant remain,						
6.00		slightly sandy clay, brownish yellow, orange mottle, stiff clay, rare gravel, qtz. Max. 1.0 cm.						
7.00		clay, brownish green, orange mottle, soft clay, rare gravel, qtz. Max. 0.2 cm.						
9.00		slightly clayey sand, yellowish brown, medium to coarse sand, poor sorted, sub-angular to sub-rounded, mostly qtz. rare black and brown shale						
16.00		sand, coarse to very coarse sand, light brown, moderate sorted, sub-angular to sub-rounded, qtz and rare black and brown shale rare gravel: qtz and rare black and brown shale, max. 1.0 cm.						
18.00		sand, coarse to very coarse sand, light brown, moderate sorted, sub-angular to sub-rounded, qtz. and rare black shale rare gravel: qtz and rare black shale, max. 1.0 cm.						
24.00		sand, coarse to very coarse sand, light grey, moderate sorted, sub-angular to sub-rounded, qtz and rare black shale rare gravel: qtz. and rare black shale, max. 1.0 cm.						
27.00		gravelly sand, light grey, moderate sorting, sand: very coarse sand size, sub-rounded to rounded, qtz. And rare shale, gravel: qtz. and rare black shale, max. 1.0 cm.						
32.00		sand, light grey, poorly sorted, angular to sub-angular,						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%;"></td> <td style="width: 25%;">clay</td> <td style="width: 25%;"></td> <td style="width: 25%;">sand</td> </tr> </table>				clay		sand		
	clay		sand					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%;"></td> <td style="width: 25%;">sandy clay</td> <td style="width: 25%;"></td> <td style="width: 25%;">clayey sand</td> <td style="width: 25%;"></td> <td style="width: 25%;">gravelly sand</td> </tr> </table>				sandy clay		clayey sand		gravelly sand
	sandy clay		clayey sand		gravelly sand			

ภาพที่ ๑-4 ข้อมูลหลุมการเจาะสำรวจดินที่จังหวัดเพชรบูรณ์

1.00		gravelly clay; soft, dark brown and abundant yellowish brown mottel gravel ; mostly qtz, rara red sandstone and gypsum (?) fragments, subangular - subrounded, Max 2 cm.
3.50		slightly gravelly clay; soft, reddish brown and moderate light gray mottel ; gravel ; rare gypsum fragments, angular - subangular.
5.5		clay; yellowish brown, firm, abundant reddish brown mottel.
7.5		clay ; yellowish brown, soft, rare light gray mottel. rarely gravel; rock fragment (sandstone, gypsum), Qtz, Max 0.5 cm.
8.5		clay ; light gray ,stiff, abundant brown mottel .
9.50		clay; yellowish brown, soft, abundant light gray, yellow mottel. rarely gravel; mostly qtz. Rare sandstone, gypsum fragments, Max 0.5 cm.
16.50		clay; light brownish gray, soft-firm, abundant yellow mottel. rarely gravel; mostly qtz, rare sandstone fragments ,gypsum?; subangular-subround. average size 0.5 cm.
17.50		clay; dark brown, firm, abundant yellowish gray mottel. rarely gravel; mostly qtz, rare laterite, gypsum? , sandstone fragments, subangular, Max size 0.5 cm.
19.00		gravelly clay; dark brown, firm, abundant yellowish brown mottel. rarely gravel; rock fragment (sandstone), average size 0.5 cm.
25.50		clay; grayey green, soft-firm, rare reddish brown and yellow mottel. rarely gravel; mostly qtz, sandstone, gypsum? fragments, subangular, average size 0.5 cm.
26.50		clay; light yellowish brown, firm, moderate red and gray mottel. rarely gravel; mostly qtz, rare gypsum?, Max size 2.0 cm.
33.00		clay; grayey green, firm, rare reddish brown and yellow mottel. rarely gravel; mostly qtz, rare gypsum?, subangular.

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเดชฤทธิ์ รัตนพรเกิดวันที่ 20 ตุลาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดมหาสารคาม สำเร็จการศึกษา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ปีการศึกษา 2551  
และเข้าศึกษาต่อในสาขาวิชาวิศวกรรมธรณีเทคนิค ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาการศึกษาด้าน ปีการศึกษา 2552



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย