

การศึกษาโครงสร้างของหลุมยุบ ณ โรงเรียนบ้านทุ่งวิมาน จังหวัดสตูล
ด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์

A Study of Sinkhole Structure at Ban Thung Wiman School in
Changwat Satun with Geophysical Method



สุรเชษฐ อนุมารต์
Surachate Anumart

เลขหมู่	0 9E505.5 ก 71 1523 ค. 2
Bib Key	204724
	1 2 S.A. 2543

วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
Master of Science Thesis in Physics
Prince of Songkla University

2543

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาโครงสร้างของหลุมยุบ ณ โรงเรียนบ้านทุ่งวิมาน จังหวัดสตูล
ด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์

ผู้เขียน นายสุรเชษฐ อนุมาตร์
สาขาวิชา ฟิสิกส์

คณะกรรมการที่ปรึกษา

คณะกรรมการสอบ

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวุฒิ โลหะวิจารณ์)

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวุฒิ โลหะวิจารณ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไตรภพ ผ่องสุวรรณ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไตรภพ ผ่องสุวรรณ)

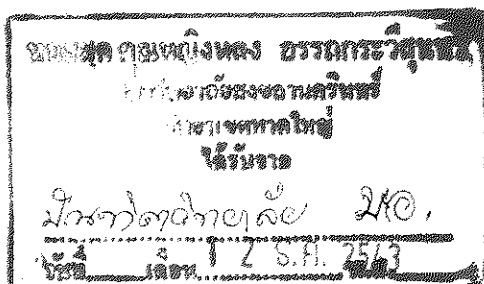
..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.دنุพล ตันนโยภาส)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล อารีย์กุล)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปิติ ทฤษฎีคุณ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย





ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาโครงสร้างของหลุมยุบ ณ โรงเรียนบ้านทุ่งวิมาน จังหวัดสตูล
 ด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์

ผู้เขียน นายสุรเชษฐ อนุมาตร์

สาขาวิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2543

บทคัดย่อ

ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้วิธีธรณีฟิสิกส์ในการกำหนดตำแหน่งและลักษณะของโพรงในหินปูนใต้ดินหรือลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่เหมาะสมต่อการเกิดหลุมยุบ ในบริเวณพื้นที่โรงเรียนบ้านทุ่งวิมาน จังหวัดสตูล ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดเหตุการณ์หลุมยุบเมื่อปลายปี พ.ศ. 2538 ครอบคลุมเนื้อที่ประมาณ 16,800 ตารางเมตร การศึกษาวิจัยประกอบด้วยการวัดคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห การหยั่งลึกด้วยคลื่นเรดาร์ และการวัดความถ่วง ผลจากการศึกษาพบว่า ความลึกถึงชั้นหินปูนสามารถกำหนดได้เป็นอย่างดีโดยวิธีวัดคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห และการวัดค่าความถ่วง โดยผลจากการวัดค่าความถ่วงแสดงการยกตัวของชั้นหินปูนที่บริเวณตะวันออกเฉียงเหนือของพื้นที่ศึกษา โดยแนวระดับของการยกตัวอยู่ในแนวทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ และยังสามารถพบบริเวณที่ค่าความถ่วงมีค่าต่ำปรากฏเป็นแถบกว้างประมาณตอนกลางของพื้นที่ศึกษาใกล้เคียงกับตำแหน่งหลุมยุบในปัจจุบัน นอกจากนี้แล้วตำแหน่งของหลุมยุบในปัจจุบันสามารถกำหนดได้ชัดเจนจากภาพสัญญาณเรดาร์ชนิดปกติรูปไฮเปอร์โบลาว่า

Thesis Title A Study of Sinkhole Structure at Ban Thung Wiman School in
 Changwat Satun with Geophysical Method

Author MR. Surachate Anumart

Major Program Physics

Academic Year 2000

Abstract

Geophysical studies were carried out at Ban Thung Wiman School in Changwat Satun, an area of about 16,800 square meters, where sinkhole collapsed in 1995. The aims of this study are to determine cavity in underlain limestone or suitable geological structures for sinkhole development. Three geophysical methods were conducted in this study, namely; shallow seismic refraction, ground penetrating radar and detailed gravity measurements. Results obtained from this study showed that depth to limestone can be correctly determined by shallow seismic refraction and gravity measurements. In addition, cavity in limestone and buried sinkholes could be clearly located by ground penetrating radar method.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย และภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนทุนวิจัย สถาบัน IPPS มหาวิทยาลัย Uppsala ประเทศสวีเดน สำหรับเครื่องมือวิจัย

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. วรวิทย์ โลหะวิจารณ์ และ ผศ. ไตรภพ ฝ่องสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาชี้แจงการวิจัย ตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับร่าง รวมทั้งคำแนะนำต่าง ๆ ที่นอกเหนือจากการวิจัย เพื่อเป็นประโยชน์แก่การดำเนินชีวิต

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.คณพล ตันนโยภาส และ รศ.ดร.สุรพล อารีย์กุล ที่กรุณาตรวจแก้ ให้คำแนะนำการในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับร่าง

ขอขอบคุณ ครูสมยศ วิชชุวลักษณ์ ที่คอยช่วยเหลืองานในห้องปฏิบัติการด้วยดีมาตลอด คุณเดชา ปัตถวรรณ พนักงานขับรถที่คอยช่วยเหลืองานภาคสนามเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ เพื่อนสวัสดี ช่างหล่อ และ น้องชาญยุทธ ฝ่องสุวรรณ พี่ ๆ น้อง ๆ ที่คอยช่วยเหลือ ทั้งกำลังกาย กำลังใจด้วยดีเสมอ

ท้ายสุดนี้เพื่อ คุณพ่อเสถียร คุณแม่ทองใบ อนุมาตร์

สุรเชษฐ อนุมาตร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	(3)
Abstract.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
รายการตาราง.....	(7)
รายการรูป.....	(8)
บทที่	
1. บทนำ.....	1
บทนำต้นเรื่อง.....	1
การตรวจเอกสาร.....	4
วัตถุประสงค์.....	30
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ.....	31
3. ผลการทดลองและวิจารณ์.....	66
4. สรุป.....	122
เอกสารอ้างอิง.....	125
ประวัติผู้เขียน.....	135

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1. มาตรฐานที่ใช้ในการบอกขนาดของหลุมยุบ.....	15
2. ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลความถ่วงในภาคสนาม.....	38
3. ตัวอย่างผลการบันทึกและการคำนวณค่าระดับ.....	46
4. ความเร็วของคลื่นพี (p-wave) ของวัตถุต่าง ๆ ในโลก.....	47
5. ความเร็วของคลื่นยืดหยุ่นในตัวกลางต่าง ๆ	48
6. ความหนาแน่นของวัตถุต่าง ๆ.....	54
7. ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์และความเร็วในตัวกลางต่าง ๆ.....	63
8. ผลการศึกษาคลื่นไหวสะเทือนแต่ละแนววัด.....	67

รายการรูป

รูปที่	หน้า
1. ตำแหน่งพื้นที่ศึกษาวิจัย.....	3
2. กระบวนการก่อให้เกิดภูมิประเทศศาสตร์.....	6
3. ชนิดของแอ่งหินปูน.....	7
4. การกระจายของภูมิประเทศศาสตร์ในภาคใต้ของประเทศไทย.....	9
5. แสดงการพัฒนาของโพรง.....	10
6. การจำแนกประเภทของหลุมยุบ.....	14
7. ขั้นตอนการเกิดหลุมยุบชนิดที่ 3.....	14
8. ภาคตัดขวางของการใช้เรดาร์ยังลึกด้วยความถี่ 25 เมกะเฮิรตซ์.....	18
9. ภาคตัดขวางของการใช้เรดาร์ยังลึกด้วยความถี่ 50 เมกะเฮิรตซ์.....	19
10. ภาคตัดขวางของการใช้เรดาร์ยังลึกด้วยความถี่ 300 เมกะเฮิรตซ์.....	19
11. ภาคตัดขวางของการใช้เรดาร์ยังลึกด้วยความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์.....	20
12. ภาคตัดขวางของการใช้เรดาร์ยังลึกด้วยความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์.....	20
13. ภาคตัดขวางของการใช้เรดาร์ยังลึกด้วยความถี่ 50 เมกะเฮิรตซ์.....	21
14. ภาคตัดขวางการศึกษาคลื่นไหวสะเทือนชนิดสะท้อนกลับเหนือหลุมยุบ.....	23
15. ภาคตัดขวางการศึกษาคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเหเหนือหลุมยุบ.....	23
16. ค่าความถ่วงผิดปกติเหนือหลุมยุบ.....	25
17. ตำแหน่งของโพรงของโพรงที่ตรวจพบ.....	28
18. ตำแหน่งรอยเลื่อนพาดผ่านเข้าสู่โรงเรียนบ้านทุ่งวิมาน.....	29
19. พื้นที่ที่มีโอกาสจะทรุดตัวยุบตัวลงบนโพรงของหินปูน.....	30
20. เครื่องมือวัดคลื่นไหวสะเทือนยี่ห้อ GEOMETRICS/SmartSeis S-24.....	34
21. เครื่องมือวัดความถ่วงยี่ห้อลาคอสท์และรอมเบิร์ก.....	34
22. เครื่องมือเรดาร์ยังความลึก.....	35
23. เครื่องมือการทำระดับ.....	36
24. แนวการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห.....	41
25. รูปแบบการบันทึกข้อมูลคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห.....	42

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
26. แนวการสำรวจความถ่วง.....	43
27. แนวการสำรวจเรดาร์หึ่งความลึก.....	44
28. การสำรวจด้วยวิธี common offset survey.....	45
29. การสำรวจด้วยวิธี wide angle reflection and refraction survey.....	45
30. ตัวอย่างการทำรังวัดระดับ.....	46
31. แสดงเส้นทางการหักเหและกราฟเวลาการเดินทางของคลื่นหักเห ในชั้นดินที่เรียบ กรณีชั้นดินหลายชั้นและขนานกัน.....	51
32. แสดงเส้นทางการหักเหและกราฟเวลาการเดินทางของคลื่นหักเห ในชั้นดินที่เรียบ กรณีชั้นดิน 2 ชั้นและไม่ขนานกัน.....	51
33. แสดงเส้นทางการหักเหและกราฟเวลาการเดินทางของคลื่นหักเห ในชั้นดินที่ไม่เรียบ.....	52
34. แบบจำลองของค่าความถ่วงผิดปกติเนื่องจากมวลทรงกลม.....	56
35. แบบจำลองของค่าความถ่วงผิดปกติเนื่องจากมวลทรงกระบอกตามแนวนอน.....	56
36. แบบจำลองของค่าความถ่วงผิดปกติเนื่องจากมวลทรงกระบอกตามแนวตั้ง.....	57
37. แบบจำลองของค่าความถ่วงผิดปกติเนื่องจากผนัง.....	57
38. แบบจำลองของค่าความถ่วงผิดปกติเนื่องจากรอยเลื่อน.....	58
39. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเหและแบบจำลองชั้นดินแนววัดที่ 00.....	68
40. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเหและแบบจำลองชั้นดินแนววัดที่ 01.....	69
41. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเหและแบบจำลองชั้นดินแนววัดที่ 02.....	70
42. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเหและแบบจำลองชั้นดินแนววัดที่ 03.....	71
43. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเหและแบบจำลองชั้นดินแนววัดที่ 04.....	72
44. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเหและแบบจำลองชั้นดินแนววัดที่ 05.....	73
45. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเหและแบบจำลองชั้นดินแนววัดที่ 06.....	74
46. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเหและแบบจำลองชั้นดินแนววัดที่ 07.....	75
47. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเหและแบบจำลองชั้นดินแนววัดที่ 08.....	76

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
48. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเหและแบบจำลองชั้นดินแนววัดที่ 09.....	77
49. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเหและแบบจำลองชั้นดินแนววัดที่ 10.....	78
50. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเหและแบบจำลองชั้นดินแนววัดที่ 11.....	79
51. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเหและแบบจำลองชั้นดินแนววัดที่ 12.....	80
52. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเหและแบบจำลองชั้นดินแนววัดที่ 13.....	81
53. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเหและแบบจำลองชั้นดินแนววัดที่ 14.....	82
54. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเหและแบบจำลองชั้นดินแนววัดที่ 15.....	83
55. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเหและแบบจำลองชั้นดินแนววัดที่ 16.....	84
56. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเหและแบบจำลองชั้นดินแนววัดที่ 17.....	85
57. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเหและแบบจำลองชั้นดินแนววัดที่ 18.....	86
58. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเหและแบบจำลองชั้นดินแนววัดที่ 19.....	87
59. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเหและแบบจำลองชั้นดินแนววัดที่ 20.....	88
60. แผนที่แสดงชั้นค่าความลึกของชั้นหินปูน.....	89
61. แสดงภาคตัดขวางของชั้นหินปูน.....	90
62. แผนที่แสดงชั้นค่าความถ่วงผิปกติบูร์แกร์.....	92
63. แผนที่แสดงแนวการสร้างแบบจำลอง.....	93
64. แบบจำลองชั้นดิน แนวที่ 1.....	94
65. แบบจำลองชั้นดินแนวที่ 2.....	94
66. แบบจำลองชั้นดินแนวที่ 3.....	95
67. แบบจำลองชั้นดินแนวที่ 4.....	95
68. แผนที่แสดงตำแหน่งของ pipe model.....	96
69. แผนที่แสดงตำแหน่งของ ribbon model	97
70. แผนที่แสดงตำแหน่งของ sphere model.....	98
71. แผนที่แสดงตำแหน่งของ step model.....	99

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
72. ภาคตัดขวางแนววัดที่ 00.....	105
73. ภาคตัดขวางแนววัดที่ 01.....	105
74. ภาคตัดขวางแนววัดที่ 02.....	106
75. ภาคตัดขวางแนววัดที่ 03.....	107
76. ภาคตัดขวางแนววัดที่ 04.....	107
77. ภาคตัดขวางแนววัดที่ 05.....	108
78. ภาคตัดขวางแนววัดที่ 06.....	109
79. ภาคตัดขวางแนววัดที่ 07.....	109
80. ภาคตัดขวางแนววัดที่ 08.....	110
81. ภาคตัดขวางแนววัดที่ 09.....	110
82. ภาคตัดขวางแนววัดที่ 10.....	111
83. ภาคตัดขวางแนววัดที่ 11.....	111
84. ภาคตัดขวางแนววัดที่ 12.....	112
85. ภาคตัดขวางแนววัดที่ 13.....	112
86. ภาคตัดขวางแนววัดที่ 14.....	113
87. ภาคตัดขวางแนววัดที่ 15.....	113
88. ภาคตัดขวางแนววัดที่ 16.....	114
89. ภาคตัดขวางแนววัดที่ 17.....	115
90. ภาคตัดขวางแนววัดที่ 18.....	116
91. ภาคตัดขวางโดยใช้เทคนิค Wide Angle Reflection And Refraction (WARR)	116
92. ตำแหน่งของโพรงที่สามารถตรวจพบ.....	119
93. แสดงภาคตัดขวางในแนววัดข้างหลังอาคารเรียน 1.....	120
94. แสดงภาคตัดขวางในแนววัดจากประตูโรงเรียน.....	121

บทที่ 1

บทนำ

ปรากฏการณ์ของการพังทลาย (collapse) หรือการทรุดตัว (subsidence) ของหลุมยุบ (sinkholes, sinks) เป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติอย่างหนึ่ง ที่ก่อให้เกิดความเสียหายทั้งชีวิตและทรัพย์สินของมนุษย์ ความรุนแรงและผลที่ตามมาจากปรากฏการณ์ดังกล่าวนับเป็นปัญหาอย่างหนึ่งที่ต้องมีการป้องกันและแก้ไขอย่างรีบด่วน เพื่อมิให้ปรากฏการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นในบริเวณแหล่งชุมชน หรือเส้นทางคมนาคม ซึ่งถ้าหากปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดในบริเวณพื้นที่เหล่านี้ย่อมก่อให้เกิดความเสียหายที่ประเมินค่าไม่ได้

อย่างไรก็ตามการป้องกันอันตรายที่เกิดจากปรากฏการณ์การพังทลายหรือการทรุดตัวของหลุมยุบ มนุษย์สามารถที่จะกระทำได้ เช่น โดยการตรวจสอบพื้นที่เพื่อตรวจหาโพรงที่มีอยู่ในหินชั้นล่าง เนื่องจากบางครั้งการปรากฏขึ้นของโพรงใต้ดินจะมีความสัมพันธ์กับลักษณะภูมิประเทศของชั้นหินใต้ดินในแต่ละท้องถิ่น

วิธีธรณีฟิสิกส์ (geophysical methods) สามารถที่จะประยุกต์ใช้เพื่อกำหนดขอบเขตของพื้นที่ที่เสี่ยงอันตรายจากหลุมยุบ หรือการหาลักษณะโครงสร้างธรณีวิทยาของโพรงได้ การศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ได้เลือกใช้วิธีทางคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห (seismic refraction method) การหาค่าความถ่วงผิดปกติ (gravity anomalies) และเรดาร์หยั่งความลึก (ground penetrating radar) เพื่อตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาของหลุมยุบและหาลักษณะภูมิประเทศของชั้นหินดังกล่าว

บทนำต้นเรื่อง

ลักษณะภูมิประเทศและสภาพภูมิอากาศของจังหวัดสตูล

จังหวัดสตูลเป็นจังหวัดใต้สุดทางด้านชายฝั่งทะเลอันดามันของประเทศไทย ตั้งอยู่ระหว่างละติจูดที่ $6^{\circ} 25' - 7^{\circ} 20'$ เหนือ และ $99^{\circ} 40' - 100^{\circ} - 15'$ ตะวันออก มีเนื้อที่ประมาณ 2,478.977 ตารางกิโลเมตร หรือ 1,549,361 ไร่ อยู่ห่างจากกรุงเทพมหานครประมาณ 973 กิโลเมตร มีอาณาเขต ทิศเหนือติดกับจังหวัดตรังและจังหวัดพัทลุง ทิศใต้ติดกับรัฐเปอร์ลิส ประเทศมาเลเซีย และ ทะเลอันดามัน ทิศตะวันออกติดกับจังหวัดสงขลา และ รัฐเปอร์ลิส

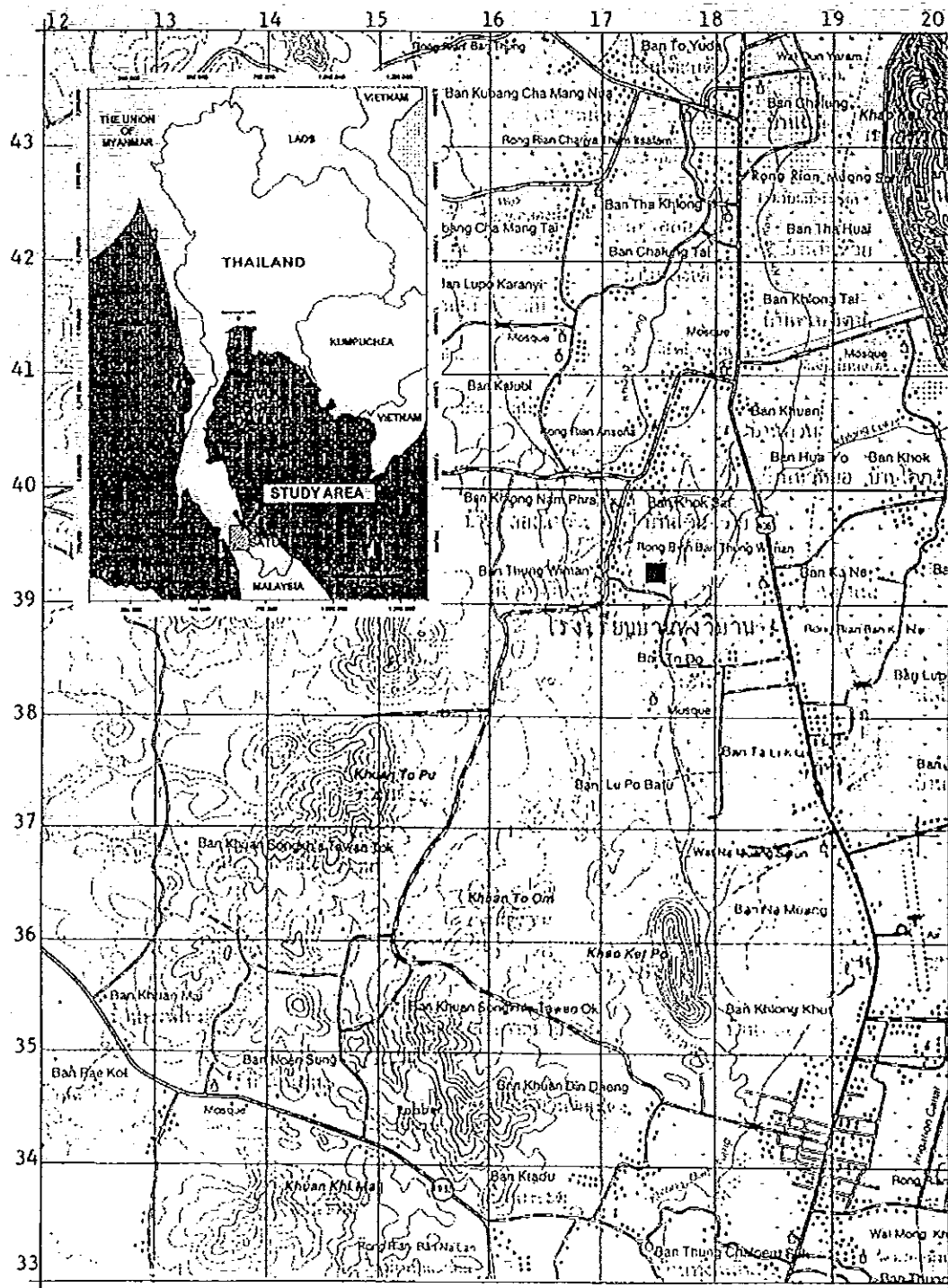
ประเทศมาเลเซีย ทิศตะวันตกติดกับทะเลอันดามัน (มหาสมุทรอินเดีย) โดยที่สภาพภูมิประเทศ ทางด้านทิศเหนือและทิศตะวันออก ประกอบด้วยทิวเขาทอดยาวไปตามแนวเหนือใต้ระหว่างเขต ติดต่อของจังหวัดสตูลกับจังหวัดตรังและจังหวัดสงขลา เทือกเขาที่สำคัญได้แก่ เทือกเขาบรรทัด และเทือกเขาสันกาลาคีรี บริเวณที่ถัดจากภูเขาเหล่านี้ลงมาจะเป็นที่ดอน เป็นบริเวณที่เหลื่อมต ก้างจากการกัดกร่อน มีสภาพภูมิประเทศเป็นแบบลูกคลื่นลอนลาดถึงลูกคลื่นลอนชัน โดยมีภูเขา ปรากฏให้เห็นเป็นแห่ง ๆ สภาพพื้นที่เหล่านี้จะค่อย ๆ ลาดเอียงสู่บริเวณที่เป็นลานตะพักน้ำระดับ ต่ำและที่ราบชายฝั่งทะเลด้านทิศตะวันตกและทิศใต้ พื้นที่ซึ่งเป็นที่ราบจะขนานกันไปตามแนว ตามฝั่งทะเลอันดามัน ส่วนนอกสุดของที่ราบชายฝั่งทะเลจะประกอบไปด้วยที่ราบน้ำทะเลท่วมถึง ซึ่งปกคลุมด้วยป่าชายเลน จังหวัดสตูลมีแม่น้ำสายใหญ่ไหลผ่านน้อย เช่นแม่น้ำละงู ส่วนใหญ่จะ เป็นลำคลองสั้น ๆ ไหลจากเทือกเขาสูงสู่ทะเลอันดามันทางด้านทิศตะวันตกและทิศใต้

สภาพภูมิอากาศ เนื่องจากจังหวัดสตูลเป็นจังหวัดที่อยู่ด้านตะวันตกของภาคใต้ติดต่อกับ ประเทศมาเลเซีย โดยมีเทือกเขาบรรทัดกั้นระหว่างภาคใต้ฝั่งตะวันตกกับภาคใต้ฝั่งตะวันออกซึ่งมี ผลทำให้สภาพภูมิประเทศของชายฝั่งทะเลทางภาคใต้ต่างกันไปด้วย บริเวณจังหวัดสตูลจึงได้ รับอิทธิพลเต็มที่จากมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และมีลักษณะภูมิอากาศเป็นแบบมรสุมเขตร้อน ซึ่ง แบ่งออกได้เป็น 2 ฤดู คือ 1. ฤดูร้อน เริ่มตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนเมษายน 2. ฤดูฝน เริ่มตั้งแต่ เดือนพฤษภาคมถึงเดือนธันวาคม โดยมีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยตลอดปีประมาณ 2204.9 มิลลิเมตร มีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยในรอบปีประมาณร้อยละ 78 และมีอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งปีประมาณ 27.5 องศาเซลเซียส (บริษัทเทสโก้, 2539)

บริเวณที่ทำการศึกษา

สถานที่ตั้งของโรงเรียนบ้านทุ่งวิมานเดิม (ปัจจุบันเป็นพื้นที่สาธารณะ เนื่องจากไม่มีการ เรียนการสอนแล้ว อยู่ห่างจากโรงเรียนบ้านทุ่งวิมานใหม่ประมาณ 2 กิโลเมตร) ตั้งอยู่ห่างจากตัว อำเภอเมืองจังหวัดสตูลไปทางทิศเหนือตามถนนหลวงหมายเลข 406 สาย สตูล - รัตภูมิ ระยะทาง ประมาณ 11 กิโลเมตร แล้วแยกซ้ายไปตามถนนของหมู่บ้าน สายบ้านควน - บ้านควนน้ำพระ ระยะทางประมาณ 1 กิโลเมตร แล้วแยกซ้ายไปตามถนนของหมู่บ้าน สายบ้านโคกทราย - บ้านทุ่ง วิมาน ระยะทางประมาณ 1 กิโลเมตร โดยมีพิกัดอ้างอิงที่กริด 172393 ในแผนที่ภูมิประเทศของ กรมแผนที่ทหาร ระวัง 5022 III (จังหวัดสตูล) (รูปที่ 1)

รูปที่ 1 ตำแหน่งพื้นที่ศึกษาวิจัย



การตรวจเอกสาร

1. ภูมิประเทศศาสตร์ (karst topography)

ธงชัย พึ่งรัมย์ (2531) บรรยายว่าศาสตร์เป็นลักษณะภูมิประเทศที่ไม่สมน้ำเสมอเต็มไปด้วยหลุมยุบ แอ่งหินปูน และขาดธารน้ำบนพื้นผิวเพราะธารน้ำไหลลงสู่ถ้ำใต้ดินซึ่งติดต่อกัน ภูมิประเทศแบบนี้จะพบมากในบริเวณหินปูน หรือหินที่ค่อนข้างจะละลายได้ง่ายซึ่งใกล้ผิวดินหรือโผล่อยู่ ถ้าชั้นของหินปูนวางตัวในแนวราบหรือมีมุมเทน้อยจะเกิดภูมิประเทศที่มีหลุมยุบมากและลุ่มน้ำอันเกิดจากการละลาย รูปทรงการเกิดภูมิประเทศของศาสตร์จะขึ้นอยู่กับ โครงสร้างทางกลศาสตร์และส่วนประกอบทางเคมีของหิน , ภูมิอากาศและอุณหภูมิของท้องถิ่น, ปริมาณของพืชต่าง ๆ, ปริมาณฝนตก, การเคลื่อนตัวขึ้น - ลงของหินรวมทั้งสภาพทางอุทกวิทยา

องค์ประกอบที่ต่างกันเหล่านี้ทำให้เกิดรูปทรงของศาสตร์ต่างกัน(<http://www.bubis.com/showcaves/german/explain/Karst/Karst.html>;http://www.uwsp.edu/acaddept/geog/faculty/lemke/geomorphology/lecture_outlines/06_karst_processes_landforms.htm) เช่น แอ่งหินปูน และหลุมยุบ

Crawford and Associates, Inc. (1999) ได้กล่าวถึงภูมิประเทศศาสตร์ ซึ่งมักจะอ้างถึงภูมิประเทศที่มีรูปทรงอยู่เหนือหินคาร์บอเนต(หินปูน โดโลไมต์และยิปซัม) หรือมักเป็นบริเวณที่มีหินละลายได้ง่าย (Assaad and Jordan,1994; <http://www.lhup.edu/~jway/karst.html>) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีน้ำใต้ดินละลายช่องว่างต่าง ๆ ให้มีขนาดโตขึ้น จนทำให้เกิดเป็นแบบรูปทางน้ำไหลใต้ดิน ซึ่งกระบวนการที่สำคัญอันดับแรกเกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในชั้นบรรยากาศ (<http://www.for.gov.bc.ca/hfp/fordev/karst/how.htm>;http://www.uwsp.edu/acaddept/geog/faculty/lemke/geomorphology/lecture_outlines/06_karst_processes_landforms.htm) (รูปที่ 2) หรือบางบริเวณในชั้นบรรยากาศมีส่วนผสมของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) (Hill,1995) หรือมีส่วนประกอบของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) (Bono,1995) อาจจะถูกน้ำฝน (H₂O) นำชะล้างลงมาด้วย และเมื่อฝนตกถึงพื้นดินก็จะมีคาร์บอนไดออกไซด์ละลายลงสู่ชั้นดินและพร้อมกับนำเอากรดคาร์บอนิกอ่อน ๆ (H₂OCO₃) ไหลลงสู่ชั้นดินกลายเป็นน้ำใต้ดิน ลำดับต่อมาเมื่อน้ำที่มีส่วนประกอบของกรดคาร์บอนิกไหลถึงชั้นหินปูนน้ำ กรดคาร์บอนิกที่ผสมอยู่กับน้ำใต้ดินจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) ซึ่งมีอยู่ในหินปูน ปฏิกิริยาในชั้นนี้จะเกิดช้ามากอย่างน้อยหนึ่งหมื่นถึงหนึ่งล้านปี หลังจากผ่านช่วงเวลาดังกล่าวเส้นทางการไหลของสารละลายต่าง ๆ ก็จะมีขนาดโตขึ้น เกิดการเปลี่ยนแปลงของชั้นหินคาร์บอเนตในบริเวณชั้นหินที่อุ้มน้ำ เนื่องจากการ

เคลื่อนที่ของน้ำที่มีการไหลผ่านเข้าไปยังช่องว่างเล็ก ๆ ที่ชั้นหินอุ้มน้ำนี้ในช่วงแรก ๆ ทางน้ำใต้ดิน จะมีการไหลของน้ำอย่างปั่นป่วน ซึ่งเป็นระบบการพัฒนากการทำให้เกิดกำแพงทางน้ำใต้ดินอย่างหนึ่ง จุดที่ทำให้ปริมาณน้ำลดลงคือจุดที่มีน้ำพุ (spring) ต่าง ๆ เมื่อระดับน้ำลดต่ำลงโดยมีระดับที่ต่ำกว่าระดับธารน้ำที่ผิวดิน ธารน้ำที่ผิวดินนี้ก็จะเริ่มมีน้ำสาบสูญและทำให้มีพัฒนาการของระบบโพรงเกิดขึ้น ถ้าปริมาณน้ำที่ผิวดินมีปริมาณมากพอ น้ำส่วนหนึ่งก็จะมีการไหลลงสู่ระบบน้ำใต้ดิน โดยที่เส้นทางของธารน้ำต่าง ๆ จะสูญหายไปและจะถูกแทนที่ด้วยแอ่งน้ำที่ถูกปิดเรียกว่า หลุมยุบ หลุมยุบต่าง ๆ จะมีหลากหลายรูปทรง เช่น เป็นรูปบ่อทรงกระบอกเล็ก ๆ ไปจนถึงทรงกรวยขนาดใหญ่หรือแอ่งพาราโบลา ซึ่งโดยปกติจะเกิดขึ้นเป็นกลุ่มและสสารละลาย ต่าง ๆ จะไหลออกจากกรวยปล่องเข้าสู่ชั้นหินอุ้มน้ำของคาสต์

Summerfield (1991) ได้จำแนกรูปแบบของการผุพังอยู่กับที่ทำให้เกิดคาสต์ (karst weathering forms) ไว้ 2 แบบด้วยกันคือ

1. รูปแบบย่อย (minor forms) เป็นรูปแบบขนาดเล็กที่เกิดจากสสารละลาย โดยมีการพัฒนาขึ้นในหินปูน เกิดจากปัจจัย 2 อย่าง ปัจจัยแรกที่สำคัญที่สุดคือ การคงอยู่หรือการสูญหายไปของดินหรือพืชต่าง ๆ ซึ่งกระบวนการละลายด้วยน้ำจะเกิดยากมากในบริเวณที่ไม่มีอะไรปกคลุมเลย ปัจจัยต่อมาคือ ลักษณะทางกายภาพของหิน พัฒนาการของหินจะสัมพันธ์กันกับขนาดของก้อนและรูปร่างของก้อนหินแต่ละก้อน และความรุนแรงของการผุพังเชิงกลและสภาพการยอมให้ซึมผ่านได้ของหินปูนระหว่างผิวยรอยต่อของดินและหิน

2. รูปแบบหลัก (major forms) เป็นรูปแบบพื้นผิวดินที่เป็นแอ่งหินปูน (dolines) โดยสามารถแยกแอ่งหินปูนได้เป็น 5 ชนิดด้วยกันคือ

2.1 แอ่งหินปูนที่เกิดจากการพังทลาย (collapse dolines) เป็นแอ่งหินปูนที่เกิดจากการพังทลายของชั้นเพดานของโพรง อันเนื่องมาจากการสูญเสียศักยภาพของผนังด้านบนของโพรง ซึ่งเกิดจากกระบวนการทางกายภาพและกระบวนการผุพังอยู่กับที่ ซึ่งแอ่งหินปูนที่เกิดจากการพังทลายของเพดานโพรงจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ (รูปที่ 3ก)

2.2 แอ่งหินปูนที่เกิดจากสสารละลาย (solution dolines) เป็นรูปแบบที่เกิดขึ้นในบริเวณที่มีความเข้มข้นของสสารละลายสูงและมีรอยแตกตามแนวราบในผิวน้ำของหินดาน พัฒนาการลำดับแรกๆของส่วนที่ยุบตัวลงเกิดในบริเวณน้ำท่วมและมีการขยายเข้าสู่รอยแตกของแอ่งหินปูน แอ่งหินปูนชนิดนี้มักเกิดในหินปูนเนื้ออ่อนมากกว่าชนิดอื่น ๆ (รูปที่ 3ข)

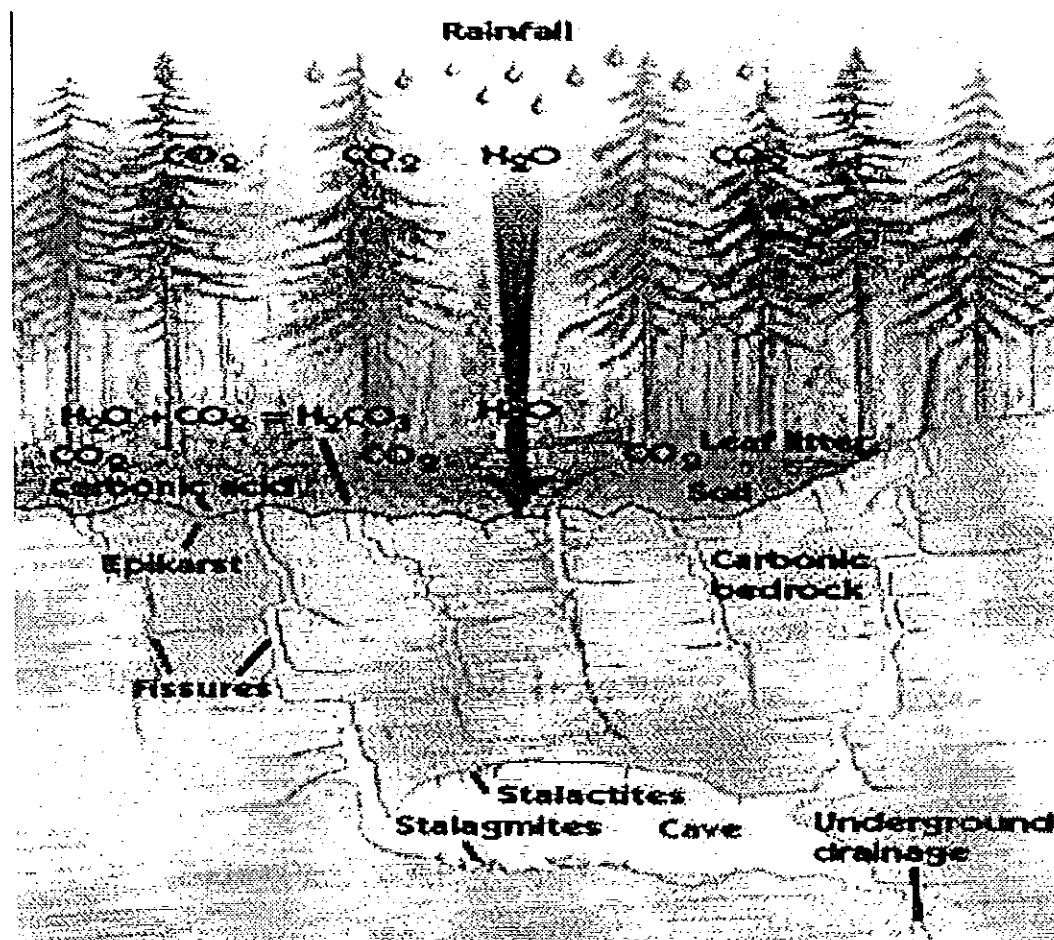
2.3 แอ่งหินปูนที่เกิดจากการทรุดตัว (subsidence dolines) รูปแบบจะคล้ายกับแอ่งหินปูนที่เกิดจากการสลายละลาย แต่แอ่งหินปูนชนิดนี้เกิดจากตะกอนที่ปกคลุมนั้นมีการพังทลายในทันทีทันใดหรือตะกอนเหล่านั้นมีการไหลเข้าไปสู่โพรงที่เกิดจากพัฒนาการในหินปูนด้านล่าง (รูปที่ 3ค)

2.4 แอ่งหินปูนที่เกิดจากการพังทลายของคาสต์ด้านล่าง (subjacent karst collapse dolines) เกิดจากส่วนที่ปกคลุมด้านบนด้วยหินที่ไม่มีเนื้อปูน (non - calcareous) เกิดการพังทลายเข้าไปสู่โพรงในด้านล่างของหินปูน (รูปที่ 3ง)

2.5 แอ่งหินปูนในหลุมยุบที่เกิดจากตะกอนของธารน้ำ (alluvial stream sink dolines) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของการไหลของธารน้ำเข้าไปในแอ่งหินปูน ก่อนที่จะกลับกลายเป็นน้ำใต้ดิน (รูปที่ 3จ)

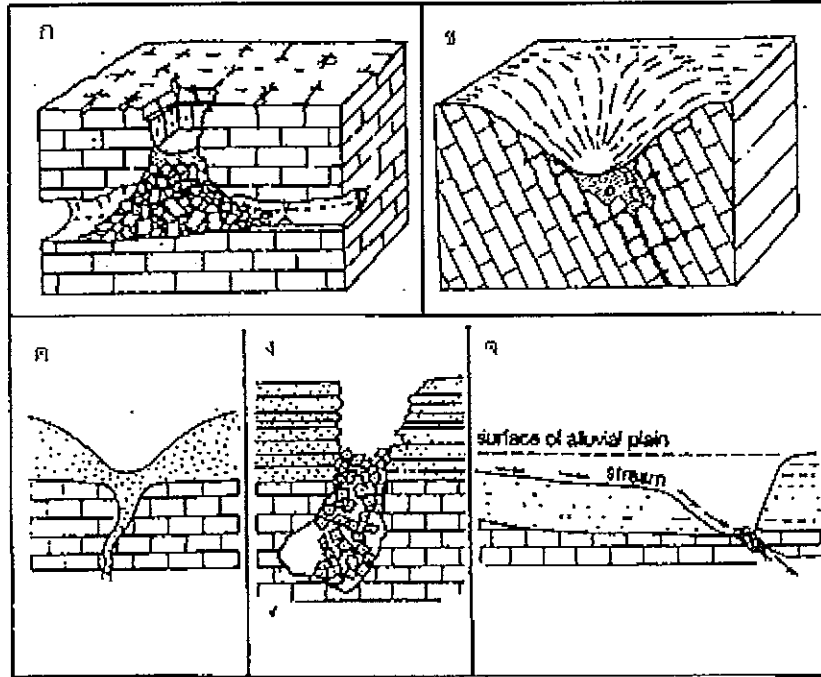
รูปที่ 2 กระบวนการก่อให้เกิดภูมิประเทศคาสต์

(ที่มา : <http://www.for.gov.bc.ca/hfp/fordev/karst/how.htm>, 1999)



รูปที่ 3 ชนิดของแอ่งหินปูน

(ที่มา : ดัดแปลงจาก Summerfeld.,1991)



Crawford and Associates, Inc. (1999) ได้อธิบายถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดในภูมิภาค

ประเทศคาสต์ดังนี้

1. ปัญหาการปนเปื้อนของน้ำใต้ดิน (groundwater contamination) พบมากที่สุดในพื้นที่หินอุ้มน้ำที่อยู่ในระดับตื้น เพราะชั้นหินอุ้มน้ำจะได้รับปริมาณน้ำจากการไหลซึมจากผิวดินและปริมาณความเข้มข้นของน้ำจะสูงขึ้นเนื่องจากการการไหลคืนกลับสู่ผิวดินอีกครั้ง (เช่น การระเหย) ปริมาณน้ำที่เหลือจะไหลเข้าไปตรงชั้นหินอุ้มน้ำที่บ่อน้ำใต้ดิน (ร่องน้ำ) และไหลออกจากหลุมยุบ ปัญหาการปนเปื้อนในพื้นที่คาสต์จะรุนแรงมากขึ้น ถ้าการจัดการกับของเสียที่เป็นดินและของเสียที่เป็นของเหลวเข้าสู่บริเวณหลุมยุบ เพราะของเสียต่าง ๆ ที่โดนชะล้างจะไหลลงเข้าสู่ชั้นหินอุ้มน้ำได้โดยตรง และจะมีการแผ่ขยายออกไปในบริเวณที่กว้างขึ้น
2. ปัญหาน้ำท่วมหลุมยุบ การเกิดน้ำท่วมปอดต่าง ๆ จะเกิดในช่วงเวลาที่ค่อนข้างสั้นเนื่องจากการเกิดฝนตกอย่างหนัก หลังจากนั้นก็จะทำให้เกิดอัตราการรั่วไหลของน้ำลงสู่หลุมยุบมากจนเกินความสามารถที่จะระบายได้ ในเวลาต่อมาขนาดของบ่อน้ำจะขยายขึ้นและน้ำอาจจะถูกเก็บไว้ที่หลุมยุบชั่วคราวซึ่งบ่อเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลของน้ำใต้ดินจากหลุมยุบต่าง ๆ ที่ส่วนบริเวณด้านล่างที่ต่ำกว่าระดับของธารน้ำผิวดินที่อยู่ในช่วงที่เกิดน้ำท่วม

3. ปัญหาการพังทลายของหลุมยุบ ในขณะที่หลุมยุบบางหลุมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ จากสารละลายที่อยู่ด้านล่างของหินคาร์บอนเนต หลุมยุบอื่น ๆ ก็จะมีการพัฒนาทำให้เกิดการพังทลายของผิวดินหรือวัสดุใกล้ผิวดิน โดยมีรูปแบบของหลุมยุบอย่างง่ายอยู่สองประเภท คือแบบแรกการพังทลายของหินฐาน เกิดค่อนข้างยากและโดยทั่วไปแล้วจะเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการขยายตัวของโพรงเข้าไปในหินปูน ส่วนสาเหตุของการขยายตัวของโพรงเนื่องมาจากสวมนบนของเพดานนั้นอ่อนและลำดับต่อมาจึงเกิดการพังทลายซึ่งจะทำให้เกิดหลุมยุบ แบบต่อมาคือการพังทลายของผิวเปลือกโลก (regolith collapses) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นมากที่สุด (มากกว่าการพังทลายของหินฐาน) อันเนื่องมาจากผิวเปลือกโลกทรุดตัวลงเข้าไปในโพรงด้านล่างของหินปูน

Duran (1988, อ้างถึงใน Crawford and Associates, Inc.) ได้จำแนกภัยอันตรายที่เกิดจากโครงสร้างที่เป็นแบบคาสต์ที่แตกต่างกันไว้ 2 ชนิดด้วยกันคือ ชนิดแรกภัยพิบัติทางการรุกรานทางธรณีกลศาสตร์ เช่น การเกิดหลุมยุบ การยุบตัวของดิน การสลายของถ้ำ เป็นต้น ชนิดที่สอง ภัยพิบัติทางอุทกธรณีวิทยา เช่น การเกิดน้ำท่วมในโพรงท่อน้ำในภูมิภาคแบบคาสต์ การเกิดรอยร้าวในอ่างเก็บน้ำ การเกิดมลพิษ เป็นต้น

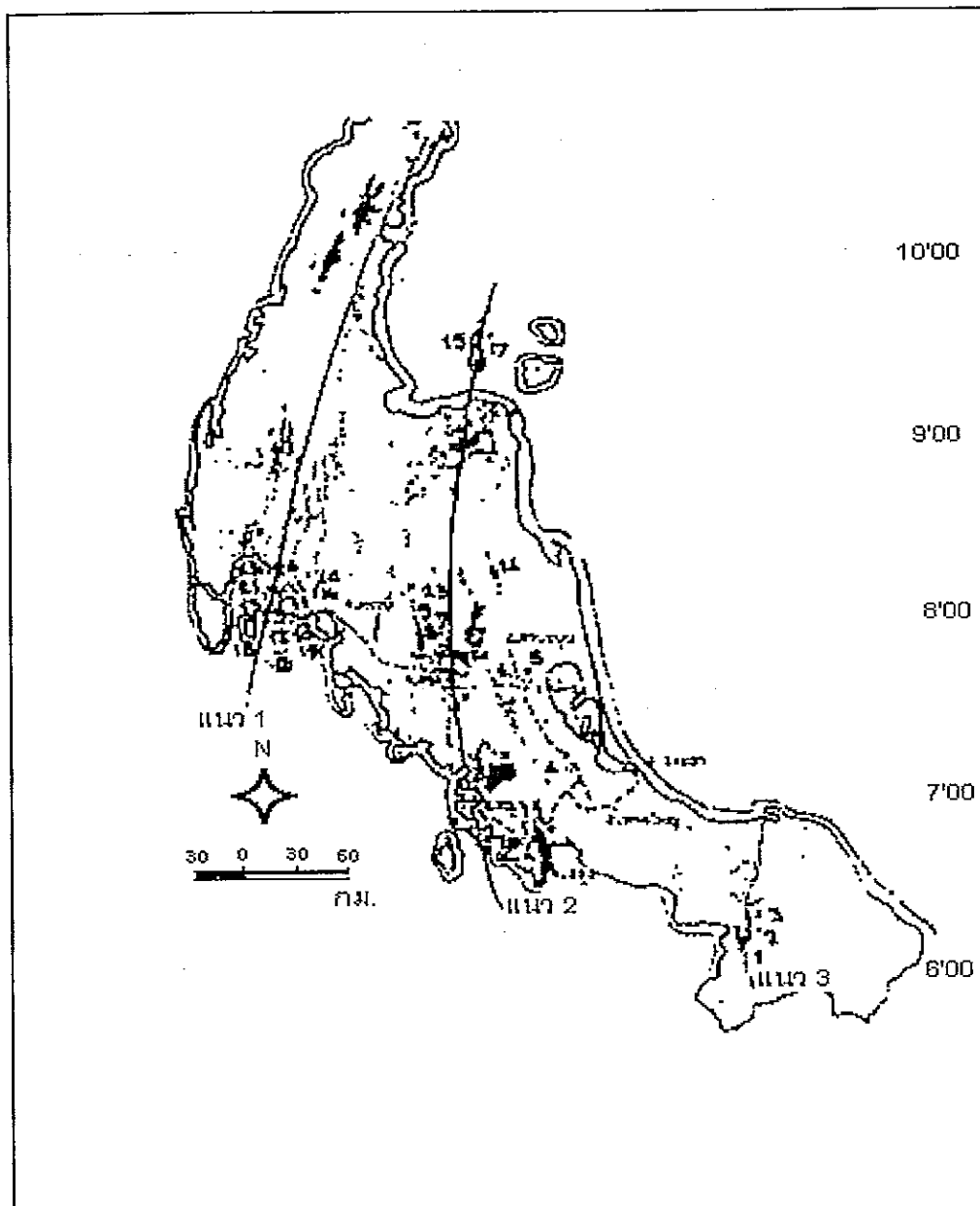
ประมาณ เทพสงเคราะห์ (2540) ได้รายงานถึงคาสต์กับหลุมยุบที่ อำเภอห้วยยอด จังหวัดตรัง และอำเภอเมือง จังหวัดสตูลว่า หลุมยุบเป็นหลุมลึกบนแผ่นดินที่ปากหลุมเกือบกลมเกิดจากน้ำใต้ดินละลายหินปูนที่อยู่ข้างใต้ออกไป ทำให้พื้นดินตอนบนยุบตัวลงเป็นหลุมยุบใหญ่ จนทะลุถึงทางน้ำใต้ดินเกิดเป็นปล่องขึ้นได้ ส่วนการกระจายของคาสต์ในภาคใต้พบว่า ในภาคใต้มีการกระจายอยู่เกือบทุกจังหวัด ยกเว้นจังหวัดภูเก็ต ปัตตานี และ นราธิวาส โดยมีการวางตัวในแนวเหนือใต้ 3 แนวดังนี้ (รูปที่ 4)

แนวที่ 1 แนวเทือกเขาตะวันตก โดยมีการแยกตัวของเทือกเขาภูเก็ตทำให้หินปูนยกเป็นแนวข้างเคียง เป็นหินปูนในยุคเพอร์เมียน (Permian) อายุประมาณ 280 - 230 ล้านปี

แนวที่ 2 แนวเทือกเขาดอนกลาง โดยมีการยกตัวของเทือกเขานครศรีธรรมราช ทำให้หินปูนยกตัวเป็นแนวข้างเคียงทั้ง 2 ฝ่ายของเทือกเขานครศรีธรรมราช ซึ่งฝั่งตะวันตกของเทือกเขานครศรีธรรมราช เป็นหินปูนยุคเพอร์เมียน แต่หินปูนทางฝั่งตะวันออกของเทือกเขานครศรีธรรมราช เป็นหินปูนยุคออร์โดวิเชียน อายุประมาณ 500 - 437 ล้านปี

แนวที่ 3 แนวเทือกเขาดอนล่าง โดยมีการยกตัวของเทือกเขาสันกาลาคีรี ทำให้หินปูนยกตัวอยู่ข้างเคียงด้านบนของเทือกเขา เป็นหินปูนยุคเพอร์เมียน

รูปที่ 4 การกระจายของภูมิประเทศคาสต์ในภาคใต้ของประเทศไทย
(ที่มา : ดัดแปลงจาก ประมาณ เทพสงเคราะห์, 2540)



2. ถ้ำ (caves)

ถ้ำเป็นช่องว่างหรือโพรงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ พบมากในชั้นหินปูนตามเขตที่มีรอยแตก และตามระนาบของหินปูน (<http://www.wiley.com/college/murck/KARST.HTM>) น้ำบาดาล จะละลายหินปูนจนกลายเป็นโพรงซึ่งขึ้นกับปริมาณของน้ำหรือการเพิ่มขึ้นของความเร็วในการไหล

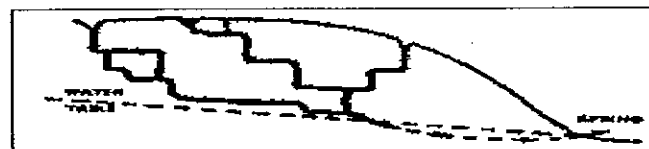
ของน้ำ โดยกระบวนการจะเกิดขึ้นค่อนข้างช้ามาก กล่าวคือจะมีระยะเวลาของกระบวนการเกิดถ้ำ อย่างน้อยหนึ่งหมื่น ถึง หนึ่งล้านปี เมื่อระดับน้ำใต้ดินลดต่ำลงก็ทำให้อัฒิโผล่พ้นน้ำ ถ้ำอาจเกิดใน บริเวณหินทรายและลาวาหลาก นอกจากนั้นบาดาลที่ทำให้เกิดถ้ำแล้ว คลื่นแถบชายฝั่งทะเลที่ซัด เาะไปตามหินผาก็ทำให้เกิดถ้ำได้

Crawford and Associates, Inc. (1999) ได้สรุปเป็น 3 ทฤษฎีของพัฒนาการของโพรงที่ เกิดขึ้นบ่อยที่สุด ดังนี้

1. ทฤษฎีของการเกิดอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน (vadose theory) โดยที่พัฒนาการของถ้ำที่เกิด จากเขตของชั้นดินอยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน จะเกิดขึ้นในบริเวณที่ธารน้ำรวมตัวกันมากพอ เหนือจุด ที่มีหลุมและมีการเคลื่อนย้ายของน้ำเข้าไปสู่ระดับน้ำใต้ดินหรือน้ำพุ (รูปที่ 5ก)
2. ทฤษฎีของการเกิดอยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดินลึก (deep phreatic theory) ถ้ำที่เกิดในเขตบริเวณ ที่ระดับน้ำใต้ดินลึก มีพัฒนาการที่เหมาะสมที่สุดในหินที่มีความลาดเอียงที่ชันเพราะว่าน้ำจะมีการ ไหลตามระนาบฐานไปได้ลึกมาก (รูปที่ 5ข)
3. ทฤษฎีเกิดอยู่ระดับน้ำใต้ดิน (water table theory) ถ้ำที่เกิดจากระดับน้ำใต้ดินนี้จะเกิดมาก ที่ระนาบของหิน เป็นบริเวณที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ในตำแหน่งที่สูงที่สุดเพราะว่า ชั้นหินในชั้นนี้มีการ ดันทานไว้ (รูปที่ 5ค)

รูปที่ 5 แสดงการพัฒนาของโพรง

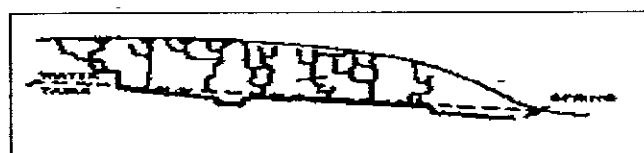
(ที่มา : ดัดแปลงจาก Crawford and Associates, Inc., 1999)



ก - vadose theory



ข - deep phreatic theory



ค - water table theory

3. การทรุดตัว (subsidence)

การทรุดตัว(<http://www.gretchen.geo.rpi.edu/roecker/Geoll/lectures/subsidence.html>) คือการเคลื่อนที่ลงของผิวดิน ซึ่งส่วนมากจะเกิดในพื้นที่ซึ่งมีดินเหนียวอยู่ระหว่าง ดินชั้นบน กับดินชั้นล่าง หรือระหว่างหินดาน (<http://www.scvwd.dst.ca.ud/school/tour/subsid.htm>) จะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณน้ำไหลลงสู่ชั้นหินดานและน้ำจะนำเอาวัตถุต่าง ๆ ลงไปด้วย จึงทำให้เกิดการทรุดตัวลงไปด้วย (<http://www.ga.water.usgs.gov/edu/earthgwlandsubsidence.html>) รูปแบบการทรุดตัวมีอยู่สองสาเหตุคือ

1. การทรุดตัวจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ (<http://www.wiley.com/college/murck/KARST.HTM>) เช่น การสูบน้ำบาดาลมาใช้ การขนทรัพย์ากรรณีจากการทำกิจกรรมเหมืองใต้ดิน
2. การเกิดการทรุดตัวจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น การเกิดรอยเลื่อน การเกิดแผ่นดินไหว ภูเขาไฟระเบิด เกิดการละลายในชั้นหินปูน โดโลไมต์และในยิปซัม (เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นซ้ำมา) (ucaswww.mcm.uc.edu/geology/maynard/INTERNETGUIDE/chap8.htm)

การจำแนกลักษณะของการทรุดตัวสามารถจำแนกได้ 2 ลักษณะ (<http://www.hbcumi.cau.edu/tqp/301/301-16/301-16.html>) คือ

1. การทรุดตัวในระดับลึก เกิดจากการสูบน้ำหรือน้ำมัน หรือของเหลวต่าง ๆ ออกจากพื้นดิน ทำให้ความดันที่ดินมีค่าลดลง จึงทำให้พื้นดินบริเวณนั้นทนแรงกดไม่ไหวจึงทำให้เกิดการทรุดตัวขึ้น ซึ่งการทรุดตัวลักษณะนี้จะกินเนื้อที่ในบริเวณที่กว้างมากและเกิดขึ้นในระดับที่ลึกที่มากกว่า 1 กิโลเมตรขึ้นไป ตัวอย่างในประเทศไทยคือ การทรุดตัวของกรุงเทพฯ ฯ และเขตปริมณฑล (ธงชัย พึ่งรัศมี ,2531; <http://www.gretchen.geo.rpi.edu/roecker/Geoll/lectures/subsidence.html>) ซึ่งผลที่ตามมาจะทำให้พื้นที่ในกรุงเทพฯ ฯ จะโดนน้ำท่วมบ่อย ๆ
2. การทรุดตัวในระดับตื้นจะเกิดขึ้นในระดับลึกที่น้อยกว่า 1 กิโลเมตรขึ้นมา เกิดจากน้ำนำเอาวัตถุต่าง ๆ เช่นดินลงไปด้วย จะเกิดในบริเวณที่แคบกว่าการเกิดในระดับลึก

4. หลุมยุบ (sinkholes)

หลุมยุบคือ หลุมที่ผิวดินที่เกิดจากการยุบตัวของหินหรือดินที่อยู่เหนือถ้ำหรือโพรงอันเกิดจากการละลายหินของน้ำบาดาล (ธงชัย พึ่งรัศมี, 2531) หรืออาจจะเกิดจากการละลายหินบนผิวดินของน้ำที่ซึมผ่านและจะเกิดขึ้นบ่อยมากในบริเวณที่มีการซึมผ่านของน้ำได้ดี(recharge areas) ซึ่งด้านล่างของผิวดินจะเป็นหินจำพวก หินปูน หินคาร์บอเนต เกลือหิน หรือหินที่น้ำสามารถ

ละลายได้ง่าย (<http://www.ga.water.usgs.gov/edu/earthgwsinkholes.html>) โดยที่ชั้นหินต่างๆ เหล่านี้จะไม่ลึกจากชั้นผิวดินมากหลุมยุบมักจะอยู่ที่จุดตัดของรอยแยก (<http://www.coastal.er.usgs.gov/stjohns/HTML/OFR616/INTRO.HTM>; <http://www.ficus.usf.edu/library/fl-water/water4.htm>) รูปร่างของหลุมยุบจะมีลักษณะเป็นแอ่งคล้ายกรวยหรือคล้ายชั้นใสน้ำจากพื้นผิว ค่อนข้างกลมหรืออาจไม่แน่นอน มีขนาดต่าง ๆ อาจมีพื้นที่ถึง 10 ตารางกิโลเมตรหรืออาจมากกว่า บางกรณีธารน้ำบนพื้นดินไหลลงสู่แอ่งยุบแล้วอาจไหลไปตามถ้ำใต้ดินซึ่งติดต่อกัน หากมีหินพังปิดกั้นทางน้ำ ก็จะทำให้หลุมยุบมีสภาพเป็นทะเลสาบ

Newton (1984) และ Bento *et al.* (1995) ได้อธิบายพัฒนาการของหลุมยุบดังนี้ การเกิดหลุมยุบนั้นสามารถที่จะเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและถูกเร่งให้เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ได้ เช่นการเปลี่ยนแปลงของระดับความลาดเอียง (Shaqour, 1994) ของระดับน้ำใต้ดิน เนื่องมาจากการสูบน้ำขึ้นมาใช้ โดยส่วนมากของการเกิดหลุมยุบจะเป็นบริเวณที่มีโพรงเกิดการขยายตัวในบริเวณที่มีตะกอนที่ยังไม่แข็งตัวที่ปกคลุมรอยเปิดในหินคาร์บอเนต ซึ่งระบบของอุทกวิทยาของหลุมยุบโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นบริเวณที่มีชั้นหินคาร์บอเนต โดยอาจจะเป็นบริเวณที่มีธารน้ำขังตลอดปี หรือไม่ก็ได้ น้ำที่อยู่ในชั้นหินจะเคลื่อนที่ผ่านไปตามช่องเปิดของระนาบชั้นหินรอยแยก รอยแตก และรอยเลื่อน บ่อย ๆ เข้าบริเวณดังกล่าวจะมีขนาดโตขึ้นเนื่องจากน้ำสามารถที่จะละลายสิ่งรอบ ๆ ได้ การเคลื่อนที่ของน้ำนี้จะเคลื่อนที่ภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งโดยทั่วไปจะไหลตรงสู่ท้องน้ำลำธารหลังจากนั้นก็เกิดโพรงและเกิดการพังทลายในลำดับต่อมา

หลุมยุบที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้สี่ชนิดดังนี้ (<http://www.coastal.er.usgs.gov/stjohns/HTML/KARST.HTM>)

1. หลุมยุบที่เกิดจากการละลาย (solution sinkhole) (รูปที่ 6ก) เกิดจากการไหลของน้ำบนผิวน้ำของหินปูน ทำให้เกิดเป็นลักษณะแอ่งคล้ายชั้นใสน้ำ
2. หลุมยุบที่เกิดจากการยุบตัว (subsidence sinkhole) (รูปที่ 6ข) เกิดจากตะกอนที่ปกคลุมชั้นหินปูนได้สูญหายไปเนื่องจากกระบวนการกัดกร่อนที่ด้านล่างและทำให้ที่ผิวน้ำดินเกิดการทรุดตัวลง หลุมยุบประเภทนี้เกิดช้ากว่าประเภทอื่น ๆ
3. หลุมยุบที่เกิดจากโพรง (cave sinkhole) (รูปที่ 6ค) เกิดจากสารละลายต่าง ๆ ได้ละลายหินปูนเกิดเป็นช่องว่างใต้ดิน จนที่เพดานของหินปูนบางมากไม่สามารถที่จะทานน้ำหนักที่กดได้จึงเกิดการพังทลายของหลุมยุบในทันที หลุมยุบประเภทนี้อาจจะเรียกว่า หลุมยุบที่เกิดจากการพังทลาย (collapse sinkhole) ก็ได้

4. หลุมยุบที่ถูกกลบไว้ (buried sinkhole) (รูปที่ 6ง) หลุมยุบประเภทนี้เกิดต่อจาก หลุมยุบประเภทที่ 3 เพราะหลังจากมีการพังทลายแล้ว ถ้าหากว่าขนาดของหลุมยุบใหญ่มากแล้วมีน้ำมาท่วมและขังอยู่ จะเรียกบริเวณนี้ว่าทะเลสาบ หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปวัตถุต่าง ๆ ก็จะไปสะสมอยู่ในก้นแอ่ง นานเข้าแอ่งก็จะตื้นเขินในที่สุดก็จะถูกกลบไว้จนไม่เห็นร่องรอยว่าเกิดเป็นหลุมยุบมาก่อน

ขั้นตอนการเกิดหลุมยุบประเภทที่ 3 มีอยู่ 4 ลำดับขั้นตอนด้วยกันคือ (<http://www.hazard.uiuc.edu/isgiroot/servs/pubs/geobits-pub/geobit7/geobit7.html>)

1. ขั้นแรก (รูปที่ 7ก) รูปทรงของหลุมยุบเกิดจากการเคลื่อนย้ายของดินเข้าไปสู่ช่องว่างต่าง ๆ ในชั้นของหินดาน และน้ำใต้ดินจะพัดพาเอาดินเหล่านั้นไปตามช่องว่างต่าง ๆ ในชั้นดิน

2. ขั้นที่สอง (รูปที่ 7ข) มีการเกิดการพังทลายของดินที่ด้านบน เนื่องจากด้านล่างของของชั้นดินมีรอยแตก ช่องว่าง เกิดการขยายตัวของช่องว่างที่ค่อนข้างกลม และจะมีการขยายช่องว่างนั้นขึ้นไปด้านบนของชั้นผิวดิน

3. ขั้นที่สาม (รูปที่ 7ค) หลังจากมีการพังหรือมีการขยายตัวของช่องว่างถึงชั้นเพดานของดิน เมื่อเพดานของชั้นดินมีความหนาเข้าสู่ความหนาวิกฤต (<http://www.geo.wvu.edu/~dgill/dolines.htm>, 1999) ความหนาของชั้นดินก็ไม่สามารถที่จะรองรับน้ำหนักของชั้นดินด้านบนได้ จึงมีการพังทลายของดินหล่นเข้าไปในหลุมที่เกิดจากโพรงใต้ดิน ซึ่งความหนาวิกฤตของชั้นดินหาได้จากสมการที่ (1)

$$t_{crit} = \rho \frac{l^2}{2s} \quad \text{----- (1)}$$

เมื่อ t : ความหนาของเพดาน มีหน่วยเป็น เมตร

ρ : ความหนาแน่นของเพดาน มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

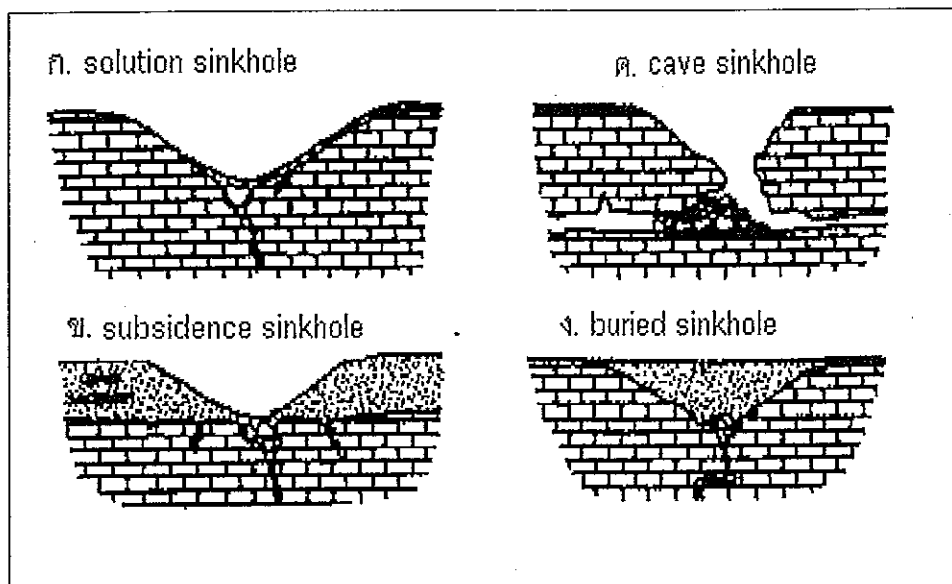
s : ความเค้น มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร

l : ความยาวของเพดาน มีหน่วยเป็น เมตร

4. ขั้นที่สี่ (รูปที่ 7ง) เกิดการกัดกร่อนจากการไหลของน้ำเข้าไปสู่หลุมนั้น ก็จะกลายเป็นหลุมที่ค่อนข้างราบเรียบ นาน ๆ ไปก็จะมีรูปทรงเป็นแอ่งคล้ายกรวยหรือคล้ายขันใส่น้ำ

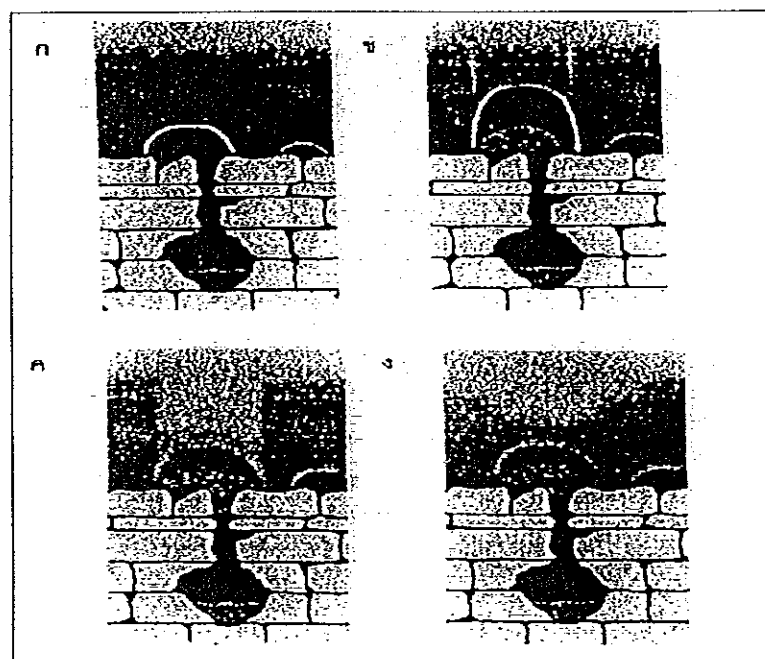
รูปที่ 6 การจำแนกประเภทของหลุมยุบ

(ที่มา : ดัดแปลงจาก <http://coastal.er.usgs.gov/stjohns/HTML/OFR616/KARST.HTM#>, 1999)



รูปที่ 7 ขั้นตอนการเกิดหลุมยุบชนิดที่ 3

(ที่มา : ดัดแปลงจาก <http://www.hazard.uiuc.edu/isgiroot/servs/pubs/geobit7/geobit7.html>, 1999)



Buttrick และ Schalkwyk (1998) ได้ทำการศึกษาและกำหนดมาตราส่วนของขนาดหลุมยุบไว้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 มาตราส่วนที่ใช้ในการบอกขนาดของหลุมยุบ

(ที่มา : ดัดแปลงจาก Buttrick and Schalkwyk., 1998)

เกณฑ์ที่ใช้	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ผิวดิน (เมตร)
หลุมยุบขนาดเล็ก	น้อยกว่า 2
หลุมยุบขนาดกลาง	2 ถึง 5
หลุมยุบขนาดใหญ่	5 ถึง 10
หลุมยุบขนาดใหญ่มาก	มากกว่า 10

5. การใช้ระเบียบวิธีทางธรณีฟิสิกส์สำรวจ

Dutta *et al.* (1970) ได้ตรวจหาช่องว่างในหินปูนโดยระเบียบวิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ในสหรัฐอเมริกา ผลจากการศึกษาพบว่าสามารถที่จะทราบตำแหน่งและรอยแตกของถ้ำในหินปูน ซึ่งจากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้พบค่าที่ผิดปกติ (มีค่าสูง) ในตำแหน่งที่ทราบว่ามีโพรงอยู่แน่นอน ซึ่งมีการเจาะสำรวจมาก่อนที่จะมีการสำรวจด้วยวิธีนี้ จากการวิเคราะห์ข้อมูลของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าช่วยให้ทราบได้ว่าโพรงต่าง ๆ อยู่ในระดับลึกเป็นแนวเส้นตรงในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ - ตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งอาจจะเป็นบริเวณที่ดินอ่อนตัว และคาดว่าน่าจะเป็นรอยเลื่อน โดยส่งผลกระทบต่อให้เกิดโพรงดังกล่าว ซึ่งจากการเจาะสำรวจก็พบว่ามียอยเลื่อนดังกล่าวจริง

Panno *et al.* (1994) ได้ศึกษาการพังทลายของหลุมยุบเนื่องจากการสูบน้ำมาใช้ด้วยการใช้การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ได้ผลค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าผิดปกติที่มีค่าบวก ซึ่งความผิดปกตินี้เป็นเส้นตรง วัดความกว้างของบริเวณนี้ประมาณ 5 และ 10 เมตร แปลความว่า เป็นบริเวณที่เกิดหลุมยุบ หรือมีดินชนิดต่าง ๆ ตกเข้าไปอยู่ในโพรง จึงทำให้ค่าผิดปกติเป็นบวก

Stewart และ Wood (1984) ได้ใช้ระเบียบวิธีการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์เพื่อจำแนกลักษณะทางธรณีฟิสิกส์และทางธรณีวิทยาของรอยแตกในชั้นหิน ในตอนกลางและทางตะวันตกของรัฐฟลอริดา สหรัฐอเมริกา โดยพื้นที่ศึกษามีหินคาร์บอเนตอยู่ด้านล่างที่ระดับความลึกประมาณ 10 - 30 เมตรจากผิวดิน และปกคลุมไปด้วยดินทราย ดินร่วน และดินเหนียว โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟฟ้าแนวราบเพื่อหาภาคตัดขวาง แนวตั้งเพื่อการหยั่งลึก และการวัดความถ่วง

ระดับจุลภาคได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ ผลจากการสำรวจพบข้อแตกต่างของรอยแตกในชั้นหิน ในหินปูนเป็นแอ่งรูปตัววี (v - shape) ที่ระดับความลึกประมาณ 30 เมตร และกว้างประมาณ 60 - 90 เมตร ส่วนอีกบริเวณพบรอยแตกในชั้นหินปูนลึกประมาณ 10 เมตร และกว้างประมาณ 60 เมตร รอยแตกบริเวณแรกคาดว่าน่าจะมีรูปร่างที่เกิดจากการละลายของหินปูนตลอด ส่วนอีกบริเวณหินปูนซึ่งเป็นหินดานมีรอยแตกอยู่ด้านล่างมีค่าสภาพด้านทานไฟฟ้าสูงกว่าหินปูนที่อยู่รอบ ๆ และอาจจะเป็นรอยการประสานของสารละลายหรืออาจจะเป็นการตกผลึกตลอดแนวรอยแตกนั้น

Werner (1984) ได้กล่าวว่า ผลจากการเจาะสำรวจเพื่อหาหลุมยุบนับเป็นวิธีการสามารถที่แยกแยะ หรือเพื่อยืนยันระเบียบวิธีการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ด้วยวิธีต่าง ๆ ได้ดี แต่ทุกระเบียบวิธีย่อมมีข้อเด่นและข้อด้อยที่ต่างกัน ระเบียบวิธีการวัดสภาพด้านทานไฟฟ้า เป็นวิธีที่มีข้อเด่นคือ ราคาต่ำและง่ายต่อการปฏิบัติ แต่ก็มีข้อด้อยคือไม่สามารถที่จะใช้สำรวจได้ในพื้นที่ที่มีการฝังท่อและสายไฟฟ้า หรือพื้นที่สำรวจอยู่ใกล้บริเวณที่มีกระแสไฟฟ้าแรงสูงหรือมีแหล่งกำเนิดศักย์ไฟฟ้าที่สูงได้ ปัญหาของการตรวจหาคักยภาพของหลุมยุบได้ถูกแบ่งออกเป็นลักษณะทั้ง 2 กรณีคือ กรณีแรกเป็นโพรงที่เกิดขึ้นใต้ดิน และอยู่ตรงจุดที่อ่อนตัวของดิน กรณีที่สองคือเป็นรอยแตกที่เกิดในหิน ทั้งสองกรณีนี้จะถูกปกคลุมด้วยวัตถุต่าง ๆ เส้นใยทั้งสองกรณีนี้จึงง่ายต่อการสำรวจด้วยระเบียบวิธีการวัดสภาพด้านทานไฟฟ้า เว้นแต่พื้นที่ที่จะสำรวจจะมีขนาดใหญ่มาก อย่างไรก็ตามการฝังท่อเพิ่มขึ้นตลอดแนวของความอ่อนตัวของดินและการเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดิน เป็นสาเหตุที่ทำให้โพรงที่เกิดขึ้นใต้ดินมีปริมาณของวัตถุต่าง ๆ ของหิน ซึ่งทำให้เกิดค่าสภาพด้านทานไฟฟ้าที่ต่างจากหินท้องถิ่น (country rock) และความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้จึงง่ายต่อการที่จะตรวจพบ

เนื่องจากหลุมยุบ โพรง มักเกิดในพื้นที่ที่เป็นแบบคาสต์ ซึ่งจะมีลักษณะของรอยแตก รอยเลื่อน รอยแยกเกิดในชั้นหิน ดังนั้นการตรวจหาลักษณะดังกล่าวจึงเป็นเป้าหมายอย่างหนึ่งของการสำรวจเพื่อยืนยันการเกิดโพรงในชั้นหินได้ โดยเฉพาะข้อมูลที่ได้จากการสำรวจด้วย GPR สามารถที่จะตรวจหารอยเลื่อนในระดับตื้น โพรง (ทั้งที่เกิดเองตามธรรมชาติ และมนุษย์สร้างขึ้น) การปนเปื้อนของน้ำใต้ดิน คักยภาพของอันตรายที่เกิดจากธรณีวิทยา (Benson, 1995) รอยแตก (Stevens *et al.* 1995; Benson and Yuhr, 1993) ถ้ำขนาดเล็กและรอยแยก (Wyatt and Temples, 1996) ได้เป็นอย่างดี

Carpenter *et al.* (1998) ได้สำรวจหาหลุมยุบด้วยระเบียบวิธี GPR เพื่อจะหาลักษณะเฉพาะของหลุมยุบที่ถูกกลบไว้ในระดับลึก ในภูมิภาคประเทศแบบคาสต์ รอบริมที่ราบของหุบเขา เบียร์ครีค เมืองเอ็นนีส์ซี สหรัฐอเมริกา ปรากฏว่าภาคตัดขวางจากการหยั่งลึกดินด้วยเรดาร์ ซึ่งใช้

ความถี่ช่วงความถี่ 25 ถึง 50 เมกะเฮิรตซ์) (รูปที่ 8 และ 9) ได้แสดงให้เห็นถึงรูปแบบของคลื่นสะท้อนของคลื่นเรดาร์ ซึ่งอาจจะเป็นที่หลุมยุบถูกกลบไว้ โดยมีขนาดกว้างประมาณ 45 เมตร และมีความลึกประมาณ 3.5 ถึง 5 เมตร และผลที่ปรากฏหน้าตัดข้างจากการหยั่งลึกดินด้วยเรดาร์ มีการผันผวนของสัญญาณที่สายอากาศอย่างมากและผลที่ได้ออกมาก็มีทิศทางที่แตกต่างกัน ซึ่งขนาดนี้มีความแตกต่างกับแผนที่ของหลุมยุบที่อื่นๆ ในพื้นที่นี้ รูปแบบการสำรวจด้วยวิธีการหยั่งลึกดินด้วยเรดาร์ ได้ผลสำเร็จเป็นอย่างดีในภูมิภาคนี้

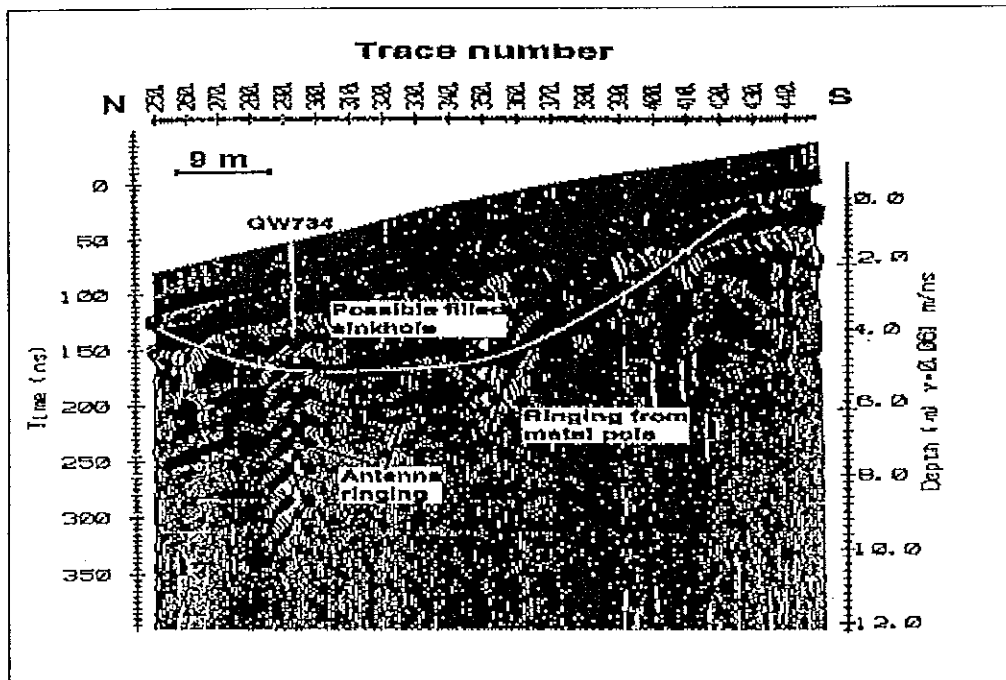
Casas *et al.* (1996) ได้ทำการตรวจหาโพรงในภูมิภาคแบบคาสติโดยการใช้การหยั่งดินด้วยคลื่นเรดาร์ในประเทศสเปน โดยใช้ความถี่ของสัญญาณสายอากาศที่ 100 และ 200 เมกะเฮิรตซ์ และใช้ระยะห่างระหว่างเส้นสัญญาณ (trace) ที่ระยะ 0.1, 0.2 และ 0.25 เมตร การตรวจหาโพรงในหินปูนที่ใช้ได้ดีคือการใช้ความถี่ของสัญญาณสายอากาศที่ 100 เมกะเฮิรตซ์ (รูปที่ 10) แต่ผลที่ดีที่สุดคือการสำรวจที่เมืองซัลลู (Salou) สามารถตรวจพบโพรงอยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 12 เมตร (รูปที่ 11) ส่วนการตรวจหาโพรงในยิปซัมพบว่าโพรงซึ่งเป็นเขตต้นกำเนิดของน้ำคอนซังกลุมจะอยู่ในรอยต่อกับแผ่นของยิปซัม สัญญาณที่ถูกบันทึกไว้แสดงถึงการสะท้อนในแนวระดับเพราะว่าลำดับของชั้นหินขาดหายไป และบางที่แถบการสะท้อนจะไม่สม่ำเสมอ ซึ่งแสดงถึงเป็นส่วนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันด้วยขอบเขตประมาณ 1 - 5 เมตร ความผิดปกติของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มและสภาพมีขั้วอย่างเล็กน้อย ซึ่งได้ถูกอธิบายว่าเป็นโพรงที่มีอากาศอยู่ซึ่งกำลังมีการยุบตัวอยู่ (รูปที่ 12)

Kaspar และ Pecen (1975) ได้ตรวจหาโพรงในพื้นที่คาสติในตะวันออกของประเทศสโลวาเกีย (Slovakia) โดยวิธีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งแบบความถี่ต่ำ (ใช้ความถี่ 0.1 - 30 กิโลเฮิรตซ์) และความถี่สูง (ใช้ความถี่ 1 - 8 เมกะเฮิรตซ์) ผลจากการศึกษาพบว่าพบสัญญาณผิดปกติ หลังจากนั้นจึงมีการเจาะสำรวจพิสูจน์ ปรากฏว่าพบโพรงในบริเวณที่มีสัญญาณผิดปกติในระดับความลึกจากปากบ่อเจาะประมาณ 25 - 27.5 เมตร จริง

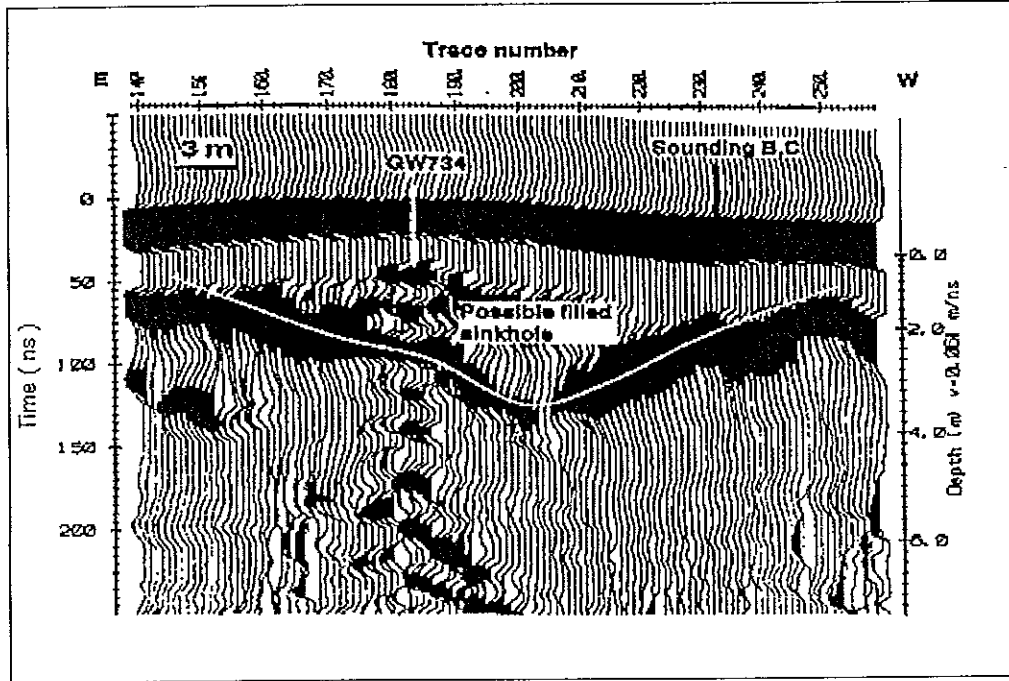
Zolotarev *et al.* (1996) ได้ทำการหยั่งลึกดินด้วยคลื่นเรดาร์ โดยความถี่ของสายสัญญาณที่ใช้ดีที่สุดคือ 30 เมกะเฮิรตซ์ เพื่อตรวจหาโพรงในชั้นหินโคลโลไมต์ ผลจากการศึกษาพบว่า บริเวณแรกของการศึกษาพบหินคาร์บอนเนตเป็นหินดานรองรับในระดับต้นประมาณ 30 - 35 เมตร ส่วนด้านบนสุดของหินคาร์บอนเนตนี้เป็นหินโคลโลไมต์ ซึ่งถูกปกคลุมด้วยตะกอนยุคควอเตอร์นารีซึ่งเป็นดินร่วน (loam) ด้วยความหนา จาก 1 เมตร ถึงระดับ 5 เมตร ซึ่งมีสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ดินร่วนนี้ประมาณ 70 โอห์ม - เมตร ส่วนบริเวณศึกษาที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเลบอลติก ซึ่งมีความแตกต่างของดินทรายชนิดต่าง ๆ ที่ระดับความลึก จาก 5 - 6 เมตร และ 8 - 10 เมตร สำหรับ

การตรวจหาพื้นที่คาสต์ ได้สำรวจเหนือโพรงซึ่งมีความลึกของโพรงนี้เท่า ๆ กับความสูงของคน โดยจุดประสงค์ของการสำรวจนี้เพื่อหาธรรมชาติของจุดเริ่มต้นของถ้ำใต้ดินซึ่งอยู่ลึกกว่าโพรง การหยั่งลึกด้วยเรดาร์ด้วยความถี่ของสัญญาณสายอากาศ 38 150 และ 300 เมกะเฮิรตซ์ ได้ผลตามที่คาดหวังไว้ (รูปที่ 13) โดยผล จากการสังเกตสัญญาณที่ดีที่สุดคือ ใช้ความถี่ของสัญญาณ 300 เมกะเฮิรตซ์ ภาคตัดขวางของเรดาร์แสดงไว้ดังรูปที่ 13 ซึ่งจะเห็นจากพื้นที่ของถ้ำคาสต์อยู่ระหว่างจุดที่ 2 และ 3 ที่ระดับความลึก 1.0 - 1.5 เมตร อย่างไรก็ตามจะสังเกตจากเส้นไฮเพอร์โบลางเส้นจากข้างในของคาสต์ซึ่งจะเป็นหินโดโลไมต์ อยู่ระหว่างจุดที่ 2 และ 3 ที่เวลา 35 นาโนวินาที ที่ความลึกประมาณ 2.0 - 2.5 เมตร

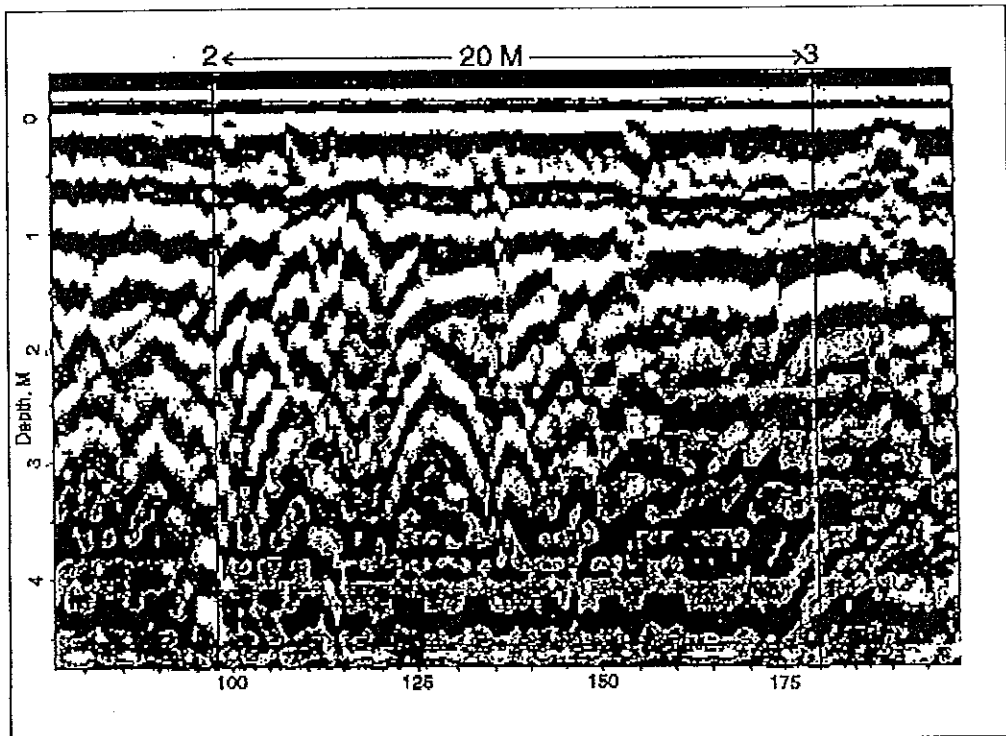
รูปที่ 8 ภาคตัดขวางของการใช้เรดาร์หยั่งลึกด้วยความถี่ 25 เมกะเฮิรตซ์
(ที่มา : Carpenter *et al.*, 1998)



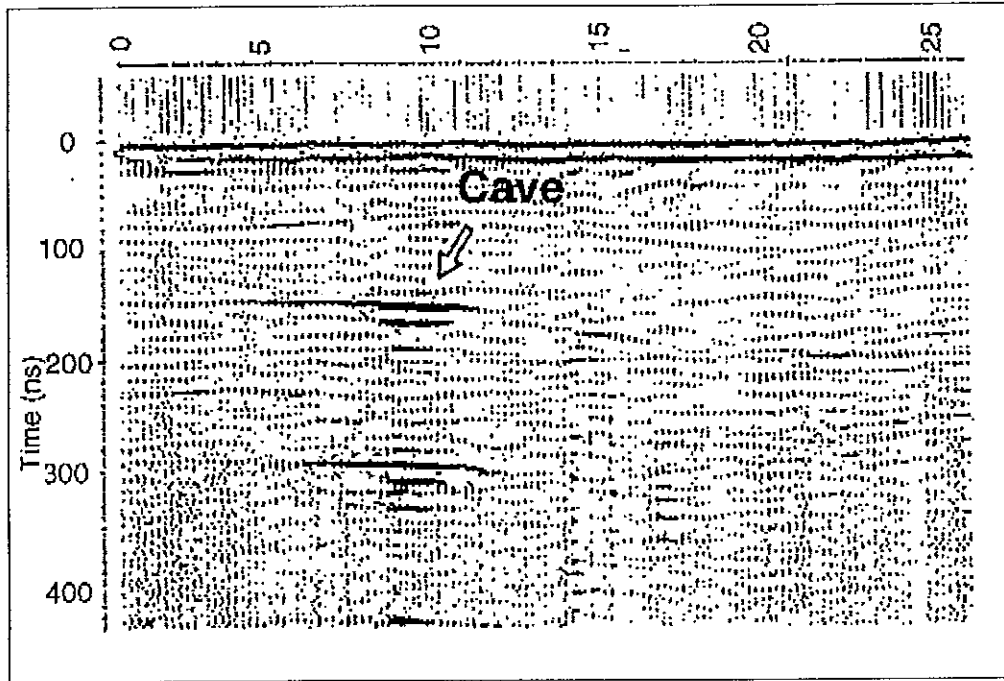
รูปที่ 9 ภาคตัดขวางของการใช้เรดาร์หยั่งลึกด้วยความถี่ 50 เมกะเฮิรตซ์
 (ที่มา : Carpenter *et al.*, 1998)



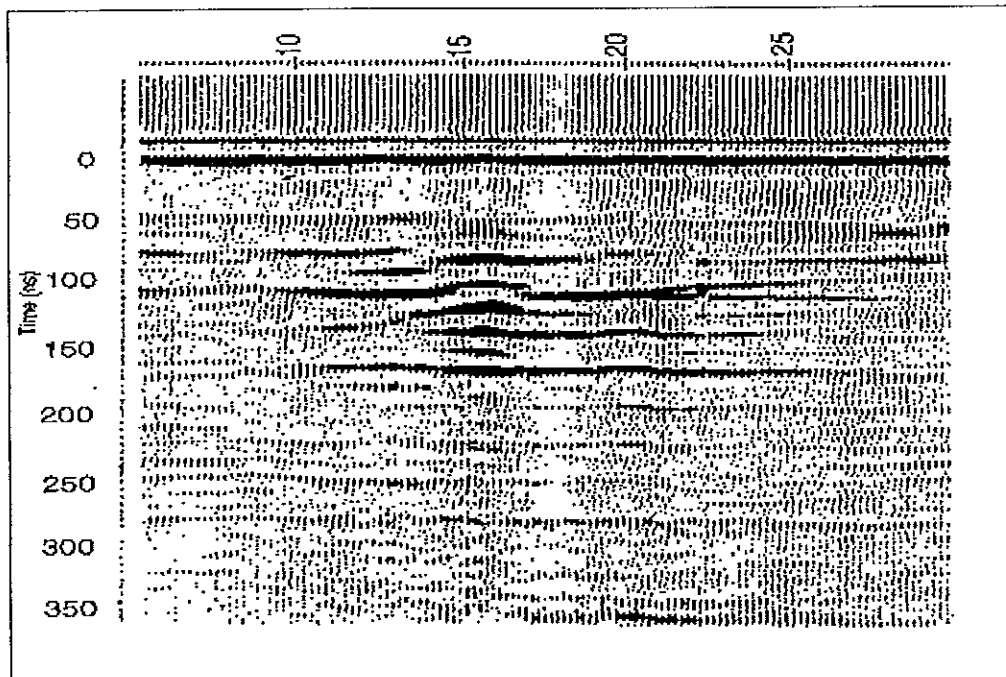
รูปที่ 10 ภาคตัดขวางของการใช้เรดาร์หยั่งลึกด้วยความถี่ 300 เมกะเฮิรตซ์
 (ที่มา : Zolotarev *et al.*, 1996)



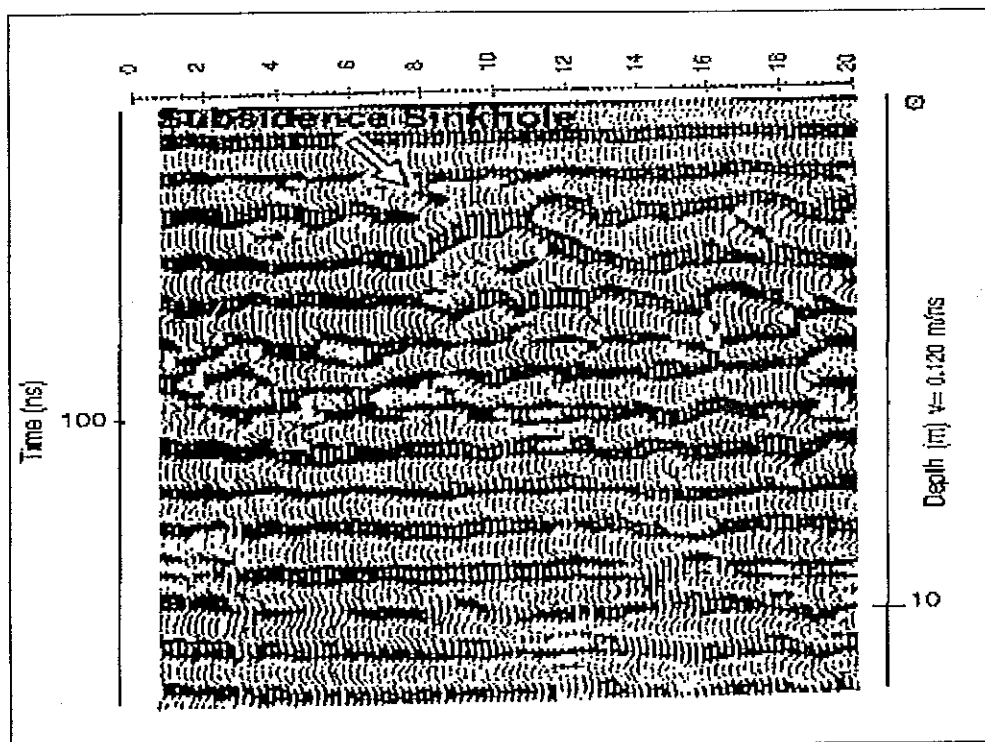
รูปที่ 11 ภาคตัดขวางของการใช้เรดาร์หยั่งลึกด้วยความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์
(ที่มา : Casas et al., 1996)



รูปที่ 12 ภาคตัดขวางของการใช้เรดาร์หยั่งลึกด้วยความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์
(ที่มา : Casas et al., 1996)



รูปที่ 13 ภาคตัดขวางของการใช้เรดาร์หยั่งลึกด้วยความถี่ 50 เมกะเฮิรตซ์
(ที่มา : Casas *et al.*, 1996)



Anderson *et al.* (1998). ได้ศึกษาการทรุดตัวของดินในบริเวณพูกิน เซนเตอร์ (Pukin Center) เมืองรีโน คันที้ (Reno County) รัฐคันซัส (Kansas) สหรัฐอเมริกา ซึ่งพื้นที่ศึกษานี้มีแหล่งน้ำมันที่สูบน้ำเต็มกลับลงไป โดยใช้วิธีคลื่นไหวสะเทือนชนิดสะท้อนกลับด้วยแนววัดยาว 4 กิโลเมตร เพื่อตรวจสอบแบบจำลองของการทรุดตัวที่มนุษย์ได้สร้างไว้ โดยคาดหวังว่าหินเกลือท้องที่จะบางตรงที่มีการทรุดตัวและจะหนาตรงที่บริเวณอื่น แต่ผลจากการสำรวจกลับได้ผลตรงข้ามกับที่คาดไว้กล่าวคือหินเกลือท้องที่มีความหนามาก (20 - 30 เมตร) อยู่ใต้พื้นที่ตรงที่ทำให้เกิดการทรุดตัวในปัจจุบัน

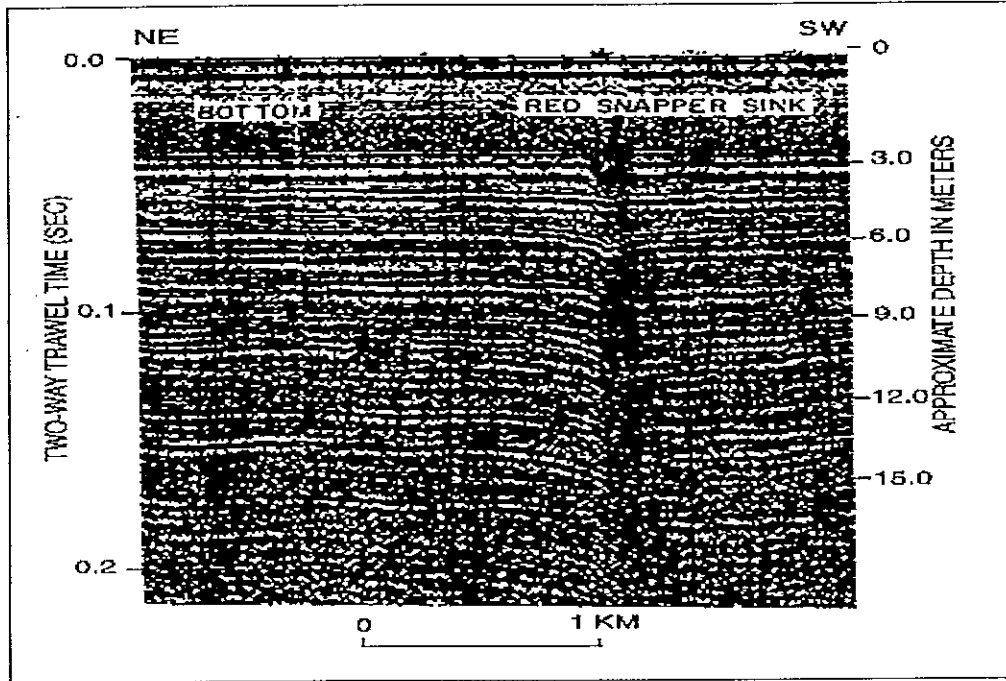
Popenoe *et al.* (1984) ได้ใช้คลื่นไหวสะเทือนแบบสะท้อนกลับศึกษาหลุมยุบและรอยแตกของหินปูน ณ มลรัฐฟลอริดา ปรากฏว่าผลการสำรวจสามารถหาตำแหน่งของหลุมยุบได้ ซึ่งมีชื่อว่าหลุมยุบเร็ดสแนปเปอร์ (Red Snapper Sink) โดยการสังเกตจากสัญญาณที่มีการเลี้ยวเบนคล้ายรูปกรวยปล่อง (รูปที่ 14) และการศึกษาอื่น ๆ ก็ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ คือสามารถที่จะหาชั้นของหินปูนได้ และพบว่าโครงสร้างของการพังทลายเป็นส่วนที่ถูกควบคุมจากรูปแบบของรอยแยก

และรูปแบบของธรณีสัณฐานของหินคาร์บอเนต ซึ่งถ้าหินปูนมีการละลายแล้วอาจก่อให้เกิดการยุบตัวลงได้และจะยุบตัวขยายบริเวณเป็นวงกว้างออกไป

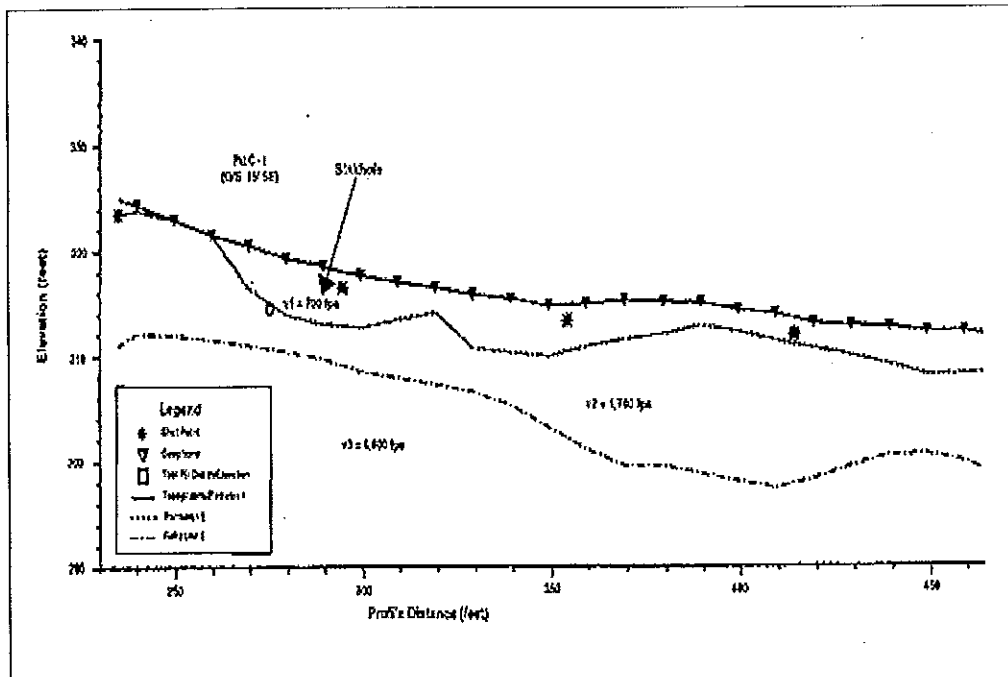
Steeple et al. (1984) ได้ศึกษาหลุมยุบโดยวิธีคลื่นไหวสะเทือนแบบสะท้อนกลับชนิดจุดความลึกทั่วไป (Common - Depth - Point) ที่เมืองคันซัส (Kansas) ประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่าหลุมที่ยุบนั้นมีการละลายของเกลืออยู่ก่อนแล้ว ซึ่งมีมากกว่า 12 หลุม ในตลอดช่วงเวลา 25 ปี ที่ผ่านไป พบว่าได้มีการยุบตัวลงเกือบทั้งหมดโดยใช้เวลายุบตัวแต่ละโพรงมากกว่า 1 ปี ทำให้เกิดความเสียหายจากการพังทลายแต่ละกรณีจะแตกต่างกันแล้วแต่กรณี พวกเขาได้ผลจากการใช้คลื่นสั้นสะท้อนแบบสะท้อนกลับศึกษาสำรวจหลุมยุบครอบคลุมประมาณ 5 - 6 หลุมเป็นอย่างดี โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง ไอ - 70 (I - 70) ซึ่งเป็นหลุมยุบครอฟอร์ด (Crawford Sink) พบหลุมยุบที่ระดับความลึกจากแนวรอยเลื่อนอย่างน้อยที่สุดประมาณ 5 แห่ง โดยการสังเกตจากสัญญาณที่มีการลดต่ำลงในบริเวณที่มีหลุมยุบนั้น ซึ่งระดับความลึกจะไม่เกิน 300 เมตร ดังรูปที่ ส่วนจุดอื่น ๆ ที่ศึกษาพบหลุมยุบเก่าแก่อยู่ 2 หลุม ซึ่งอยู่ใกล้กันกับหลุมที่กำลังมีการยุบตัว หลุมเก่าแก่เหล่านั้นมีตะกอนของแร่ธาตุต่าง ๆ ของยุคไพลสโตซีน (Pleistocene age) และหนึ่งในหลุมยุบนั้นมีอายุทางธรณีวิทยาที่แตกต่างกันอยู่ 2 รุ่น กับหลุมที่กำลังยุบตัว ซึ่งโดยส่วนมากแล้วหลุมยุบที่เกิดขึ้นใหม่ปรากฏว่ามีความสัมพันธ์กับแหล่งน้ำมันที่สูบน้ำใต้ดินกลับลงไป (oil - field brine disposal) หรือการทำเหมืองเกลือด้วยการละลาย (salt - solution mining activities) การตรวจพบหลุมเก่าแก่โดยวิธีคลื่นไหวสะเทือนแบบสะท้อนกลับนี้ ทำให้สามารถเห็นธรรมชาติบางอย่างของหลุมยุบซึ่งมีน้ำเค็มปะปนอยู่ก่อนที่จะมีการลุกลามไปยังส่วนที่เจริญแล้ว

การศึกษาด้านคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห เพื่อหาลักษณะโครงสร้างของหลุมยุบได้มีการศึกษาเพื่อหาความเร็วของชั้นดินแต่ละชั้นมาเป็นตัวมาตรฐานในการการจำแนกชั้นดินและกำหนดชั้นดินบริเวณที่ทำการศึกษาได้ ซึ่งผลจากการศึกษาเมื่อนำวิเคราะห์ความเร็วแล้วก็จะได้ชั้นดิน ดังตัวอย่างภาคตัดขวางของการใช้คลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห ดังรูปที่ 15 (<http://www.wwwww.enviroscan.com/seismic.html>)

รูปที่ 14 ภาคตัดขวางการศึกษาคลื่นไหวสะเทือนชนิดสะท้อนกลับเหนือหลุมยุบ
 (ที่มา : Popenoe et al., 1996)



รูปที่ 15 ภาคตัดขวางการศึกษาคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเหเหนือหลุมยุบ
 (ที่มา : Enviroscan Inc., 1999)



Arzi (1975) ได้ประยุกต์การวัดความถ่วงระดับจุลภาคในงานสำรวจด้านวิศวกรรม เพื่อหาชั้นหินฐานรากของทางใต้ดินอันเนื่องมาจากโรงปฏิกรณ์พลังปรมาณูนิวเคลียร์และเพื่อแยกแยะขอบเขตของโพรงเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้น เพื่อที่จะทำการเทปูนลงไปอุดโพรงเหล่านั้น ผลจากการสำรวจพบค่าความถ่วงผิดปกติมีค่าต่ำตรงบริเวณที่มีโพรงใต้ดิน (ทราบได้หลังจากการเจาะ) ซึ่งโพรงนี้อยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 6.4 เมตร แต่ก็พบสัญญาณรบกวนเนื่องมาจากว่าหินรอบ ๆ เป็นหินแบบไม่เอกพันธ์ (inhomogeneous) เพราะชั้นดินมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่น รวมทั้งตะเข็บรอยต่อมีลักษณะคล้ายคลื่น (อาจจะถูกกระตุ้นจากกระบวนการทางนิวเคลียร์) จึงต้องพยายามตัดอิทธิพลดังกล่าวออกเพื่อหาสัญญาณที่แท้จริง

Bulter (1984) ได้ใช้เทคนิคการสำรวจด้วยการวัดความถ่วงระดับจุลภาคกับการวัดความถ่วงแบบ gradient เพื่อตรวจหาและจำแนก โพรงและถ้ำใต้ดิน โดยการศึกษาแบ่งเป็น 2 กรณีคือ กรณีแรกเป็นกรณีที่ต้องการจำแนกโพรงหรือถ้ำอยู่ในระดับตื้น (ที่ระดับน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 เมตร จากผิวดิน) ซึ่งโพรงลักษณะนี้จะมีอากาศอยู่ด้านบน โดยการให้เทคนิคอนุพันธ์อันดับสองเพื่อทำแผนที่ความถ่วงตกค้าง และใช้เทคนิคอนุพันธ์อันดับหนึ่งเพื่อแยกช่องว่างอากาศหรือส่วนที่ซับซ้อนของลักษณะภูมิประเทศที่ผิวดิน กรณีที่สองเป็นกรณีที่ต้องการจำแนกโพรงหรือถ้ำที่อยู่ในระดับลึก (ที่ระดับความลึกมากกว่า 30 เมตร) ซึ่งโพรงลักษณะนี้จะมีน้ำอยู่ด้านบน ผลจากการศึกษาเมื่อใช้เทคนิคการวัดความถ่วงแบบ vertical gradient ผ่านแนววัด ในกรณีที่สองได้ผลสำเร็จเมื่อผลการสำรวจพบความถ่วงผิดปกติที่ระดับตื้น (6 เมตรจากผิวดิน) จุดที่มีความถ่วงผิดปกตินี้เกิดจากหินปูนหรืออาจจะเป็นดินเหนียว

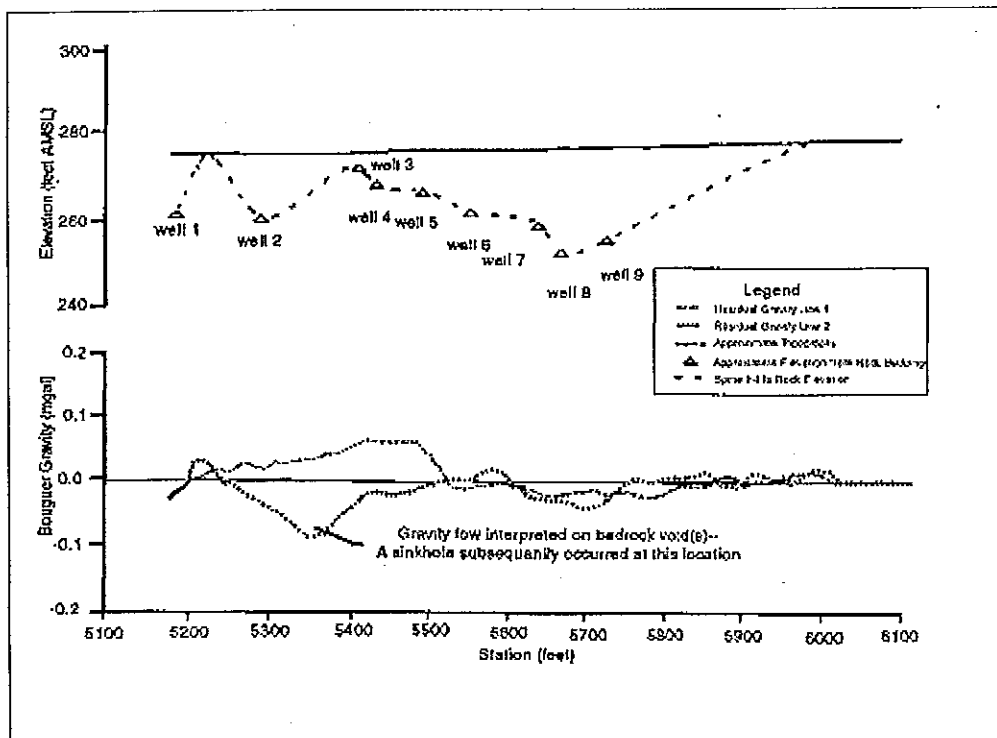
Camacho *et al.* (1994) ได้ใช้เทคนิคการวัดความถ่วงเพื่อตรวจหาโพรงใต้ดิน ในบริเวณพื้นที่แบบคาสต์ ตอนล่างของหุบเขาโลโซยา (Lozoya Valley) ในเมือง Sierra de Gaudarrama, Central Cordillera ประเทศสเปน โดยกำหนดเส้นทางการสำรวจเป็นแบบกริดขนาด 16 x 16 เมตร ระยะห่างของแต่ละสถานีวัดเป็น 10 เมตร และกริดขนาด 10 x 10 เมตร ระยะห่างของแต่ละสถานีวัดเป็น 30 เมตรครอบคลุมพื้นที่ที่ศึกษา 200 ตารางกิโลเมตร หลังจากตัดอิทธิพลจากหินท้องที่โดยการเลือกกราฟโพลีโนเมียลที่เหมาะสม แล้วสร้างแบบจำลองของการตกค้างโดยใช้เทคนิค least - squares prediction ผลที่ได้ปรากฏว่าค่าความถ่วงผิดปกติน่าจะเป็นลักษณะของแบบรูปโพรงและแบบรูปทางน้ำใต้ดิน และเมื่อรวบรวมข้อมูลจากการเจาะและลำดับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นภายหลังปรากฏว่ามีหลุมยุบเกิดขึ้นจากตรงที่ได้ผลสำรวจ

Carpenter *et al.* (1998) ได้ศึกษาหาค่าความถ่วงที่ถนนสการ์โบโร เมืองเอ็นนีส์ ประเทศสหรัฐอเมริกา พบค่าความถ่วงผิดปกติมีค่าความถ่วงน้อยมาก อยู่เหนือหลุมยุบที่ถูกกลบ

ไว้ นั้น โดยมีค่าประมาณ -150 ไมโครแกล เขาได้อธิบายว่าน่าจะเกิดจากสิ่งที่ตกลงสู่หลุมยุบ ส่วนที่ เบียร์ครีกยังได้ค่าความผิดปกติของความถ่วงต่ำมากมีค่าประมาณ -80 ไมโครแกล ซึ่งที่ท่าเลนนี้เขา อธิบายว่าน่าจะเป็นส่วนที่ว่างในหินปูนและมีแนวโน้มต่ำลงในส่วนที่เป็นหินปูนที่ไหลขึ้นมาเล็กน้อย

Crawford and Associates, Inc (1999) ได้กล่าวถึงความถ่วงแบบบูร์เกอร์ สามารถที่จะ พิสูจน์หาตำแหน่งบนพื้นผิวโลกซึ่งมีความสัมพันธ์ว่าจุดไหนที่มีความถ่วงที่สูงหรือต่ำกว่า เนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงด้านข้างของความหนาแน่นที่ผิว เนื่องจากว่าผิวเปลือกโลกมีความหนาแน่นน้อยกว่า หินปูน ดังนั้นความถ่วงแบบบูร์เกอร์จึงสามารถที่จะพิสูจน์หาการเปลี่ยนแปลงในระดับลึกถึงหิน ดาน ค่าความถ่วงผิดปกติที่มีค่าต่ำเป็นตัวบ่งบอกว่ามี โพรงที่หินดาน, ช่องว่างในผิวเปลือกโลก (ในบริเวณที่เป็นส่วนที่โค้งขึ้นของผิวเปลือกโลก) หรือบริเวณที่ความลึกของหินดานหายไปอย่างฉับ พลัน และเมื่อนำผลที่ได้จากการวัดมาประมวลผลแล้วเขียนกราฟก็จะได้จุดที่สังเกตว่าเป็นหลุมยุบ ได้ ดังรูปที่ 16

รูปที่ 16 ค่าความถ่วงผิดปกติเหนือหลุมยุบ
(ที่มา : Enviroscan, Inc, 1999)



Day และ Wagener (1984) ได้ใช้หลาย ๆ เทคนิคเพื่อจำแนกลักษณะของแอ่งหินปูนใน ทวีปแอฟริกาใต้ เทคนิคดังกล่าวประกอบด้วย การรับรู้จากระยะไกล (remote sensing) การวัด

ความถ่วง การใช้คลื่นไหวสะเทือนและการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า แต่ผลปรากฏว่าไม่มีเทคนิคใด เทคนิคใดหนึ่ง ที่จะสามารถจำแนกลักษณะหินท้องที่ที่ทำให้แอ่งหินปูนได้ เนื่องจากว่าพื้นที่ดังกล่าวมีประชากรอาศัยอยู่ค่อนข้างหนาแน่น (อาคารก่อสร้าง มากกว่า 1,000 อาคาร) อาจจะก่อให้เกิดความยากลำบากต่อการสำรวจ เกิดสัญญาณรบกวน ซึ่งอาจจะทำให้การอธิบายผลผิดไป

Fajkiewicz (1976) กล่าวว่า การใช้วิธีการวัดความถ่วงแบบ vertical gradient เพื่อประยุกต์ใช้ในงานทางธรณีวิทยา ปัญหาทางวิศวกรรม หรือปัญหาอย่างอื่น ๆ เพื่อกำหนดโครงสร้างทางธรณีวิทยาการตรวจหาโพรงใต้ดิน และพื้นที่การทำเหมืองเก่า ประสิทธิภาพของการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีนี้ขึ้นอยู่กับความแม่นยำระหว่างการวัดที่ระดับพื้นดินกับที่ระดับสูงที่สถานีวัดเดียวกัน

ตัวอย่างเช่น การสำรวจในบริเวณที่เคยมีการทำเหมืองมาก่อน เพื่อตรวจหาโพรงและเส้นทางการทำเหมืองใต้ดิน เนื่องจากอาจจะเกิดอันตรายจากการทรุดตัวของโพรงได้ ผลจากการนำค่าความถ่วงมาสร้างแบบจำลองเพื่อหาตำแหน่งของโพรงได้ระดับความลึกประมาณ 10 - 15 เมตร โดยที่ค่าความถ่วงมีค่าผิดปกติต่ำ (มีค่าติดลบ) ค่าที่ติดลบแสดงถึงบริเวณนั้นมีการสูญเสียหินไปบางส่วนและดินเหนียวที่ไม่ต่อเนื่องกันทับถมโพรงที่ระดับความลึกประมาณ 10 -12 เมตร ส่วนบริเวณที่เส้นทางการทำเหมืองใต้ดินพบค่าความถ่วง (มีค่าเป็นบวก) ต่ำกว่าที่อื่น เมื่อสร้างแบบจำลองเพื่อหาตำแหน่งก็ปรากฏว่าได้ความลึกที่ระดับ 4.5 เมตร ค่าความถ่วงผิดปกติทั้ง 2 แห่งนี้ได้มีการเจาะสำรวจ ปรากฏว่าได้ผลดังที่สร้างแบบจำลองจริง

Yule *et al.* (1998) ได้ใช้ระเบียบวิธีการการวัดความถ่วงระดับจุลภาคในรัฐอลาบามา สหรัฐอเมริกา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสำรวจหาโพรงใต้ดิน และความผิดปกติจากโครงสร้างธรณีวิทยาได้เชื่อกันที่อาจจะก่อให้เกิดความเสียหายแก่ตัวเขื่อนก่อนจะมีการเจาะสำรวจอีกครั้งหนึ่ง โดยใช้ระยะห่างของสถานีวัดแต่ละสถานีประมาณ 1.5 - 6 เมตร โดยตั้งสมมติฐาน ถ้าผลจากการสำรวจปรากฏว่าพื้นที่ในบริเวณใดที่มีค่าความถ่วงผิดปกติติดลบ (negative gravity anomaly) เชื่อว่าอาจจะมีการก่อตัวของโพรง หรืออาจจะเป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นต่ำ (low - density zones) เริ่มมีการก่อตัวของโพรงเกิดขึ้น การเจาะได้เลือกบริเวณที่มีค่าความผิดปกติทั้งต่ำและสูงเพื่อยืนยันสมมติฐานข้างต้น ผลจากการเจาะสามารถยืนยันได้ว่าตรงที่มีค่าความถ่วงผิดปกติติดลบเป็นดังสมมติฐานจริง

6. งานศึกษาวิจัยที่ผ่านมา

กัมพล มณีประพันธ์ และคณะ (2540) ได้รายงานการสำรวจธรณีฟิสิกส์ในเขตจังหวัดสตูลด้วยการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ปรากฏว่าพื้นที่ส่วนใหญ่รองรับด้วยหินปูนยุคออโรโดวิเซียน โดยวางตัวอยู่ในแนวระดับลึกตั้งแต่ 0.5 เมตร จนถึงระดับความลึกมากกว่า 35 เมตร แต่ส่วนใหญ่อยู่ในความลึกไม่เกิน 20 เมตรจากผิวดิน พบโพรงในชั้นหินปูนทั้งสิ้น 34 โพรงซึ่งอยู่ในระดับความลึกประมาณ 10 - 50 เมตรจากผิวดิน โดยมีเพดานโพรงหนาประมาณ 3.5 - 23.5 เมตร ความหนาของโพรงประมาณ 2.8 - 12.4 เมตร

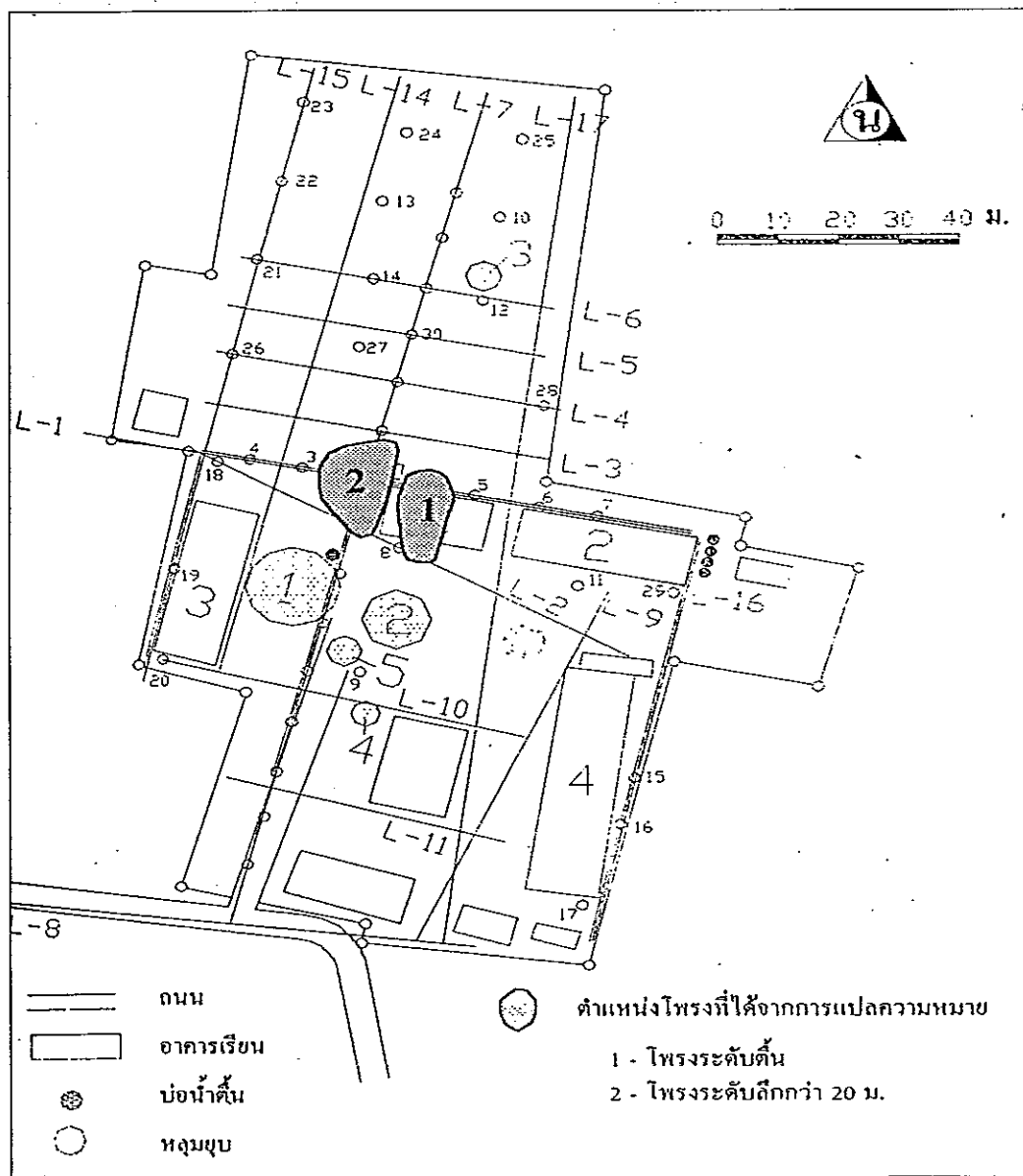
ดีเซลล์ สวนบุรี (2538) ; Laochu และ Suanburi (1996) ได้สำรวจแผ่นดินยุบ ด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์ บริเวณบ้านทุ่งวิมาน ตำบลบ้านควน อำเภอเมือง จังหวัดสตูล โดยวิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า 3 วิธี คือ การสำรวจด้วยการวางขั้วไฟฟ้าแบบเวนเนอร์เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าในแนวราบ (trenching technique) การสำรวจด้วยการวางขั้วไฟฟ้าแบบซลัมเบอร์เจอร์ เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้าในแนวตั้ง (sounding technique) และการสำรวจด้วยการวางขั้วไฟฟ้าแบบไดโพล-ไดโพล เพื่อแสดงผลการสำรวจเป็นแบบภาคตัดขวางเสมือน ผลการสำรวจพบว่าพบโพรงที่ปรากฏในหินปูนยุคออโรโดวิเซียน ซึ่งเป็นสาเหตุที่เกิดแผ่นดินยุบนั้น ไม่มีความต่อเนื่องกันระหว่าง 5 บริเวณที่เกิดการยุบตัว ตำแหน่งของโพรงที่ตรวจพบ (รูปที่ 17) อยู่นอกอาคารเรียนหลังที่ 1 ส่วนพื้นที่อื่น ๆ ในพื้นที่ที่ทำการศึกษามิพบโพรงในหินปูนที่ระดับความลึกน้อยกว่า 20 เมตร ดังนั้นบริเวณโรงเรียนบ้านทุ่งวิมาน (ยกเว้นอาคารเรียน 1) และบริเวณหมู่บ้านทุ่งวิมานจึงไม่น่าจะเป็นบริเวณที่เสี่ยงต่อการเกิดหลุมยุบ

สุวิทย์ ไคสุวรรณ (2538) ได้รายงานเกี่ยวกับสภาพธรณีทั่วไป ณ โรงเรียนบ้านทุ่งวิมานว่า ตั้งอยู่บนเนินยาวในแนวเกือบเหนือ - ใต้ กว้าง 200 - 300 เมตร จัดเป็นเนินของตะกอนทางน้ำยุคควอเทอร์นารี (Quaternary) ซึ่งประกอบด้วยชั้นของดินเหนียวปนทราย ชั้นทรายขนาดปานกลาง (medium sand) โดยมีชั้นบาง ๆ ของทรายหยาบและก้อนกรวดขนาดเล็กแทรกอยู่ช่วงบนความหนาของชั้นทรายเป็นรวมประมาณ 7.5 เมตร ชั้นตะกอนนี้วางตัวอยู่บนหินปูนยุคออโรโดวิเซียน (Ordovician หรือ อายุประมาณ 450 ล้านปี) ซึ่งประกอบด้วยหินปูนสีเทาถึงสีดำ เป็นชั้นบางถึงชั้นหนา มีชั้นหินปูนเนื้อปนดินแทรกสลับในส่วนล่าง จากแผนที่ธรณีวิทยาพบว่าหินปูนยุคออโรโดวิเซียนในบริเวณจังหวัดสตูลมีลักษณะของหลุมยุบ และโพรง ปรากฏอยู่ทั่วไป และจากแผนที่ธรณีวิทยา (วีระพงษ์ ตันสุวรรณ และคณะ, 2522, อ้างถึงใน สุวิทย์ ไคสุวรรณ, 2538) ยังพบว่ามียอยเลื่อนใหญ่ (fault) ในแนว NNE - SSW พาดผ่านเป็นแนวยาวมากกว่า 40 กิโลเมตรเข้ามาในพื้นที่บ้านทุ่งวิมาน (รูปที่ 18) แนวรอยเลื่อนนี้คาดว่าจะเป็นหินปูนแตกหัก ซึ่งง่ายต่อการกัดเซาะ

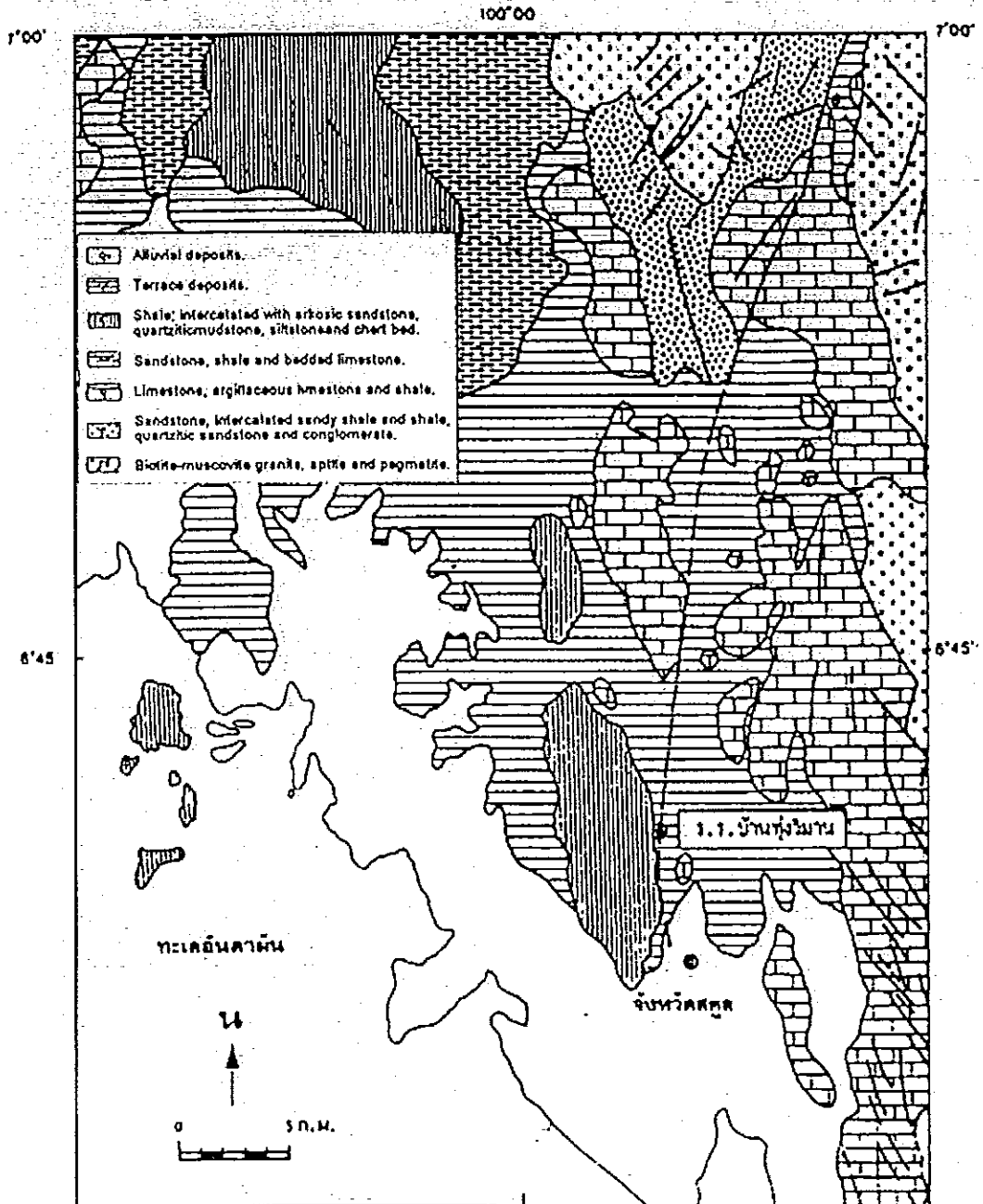
ของทางน้ำจนทำให้เกิดเป็นโพรงซึ่งอาจเป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดการทรุดตัวของแผ่นดินได้ โดยที่พื้นที่ที่มีโอกาสจะทรุดตัวยุบตัวลงบนโพรงของหินปูนนี้ (karst collapse potential zone) อาจจะถูกกำหนดได้ว่ามีแนวประมาณทิศ 30 องศาจากทิศเหนือ โดยมีความยาวประมาณ 100 เมตร กว้าง 30 เมตร (รูปที่ 19) พาดผ่านอาคารเรียนหลังที่ 1 และหลังที่ 3 ซึ่งอาคารเรียนทั้งสองมีแนวโน้มที่จะยุบพังทลายลงในโพรงนี้ได้

รูปที่ 17 ตำแหน่งของโพรงของโพรงที่ตรวจพบ

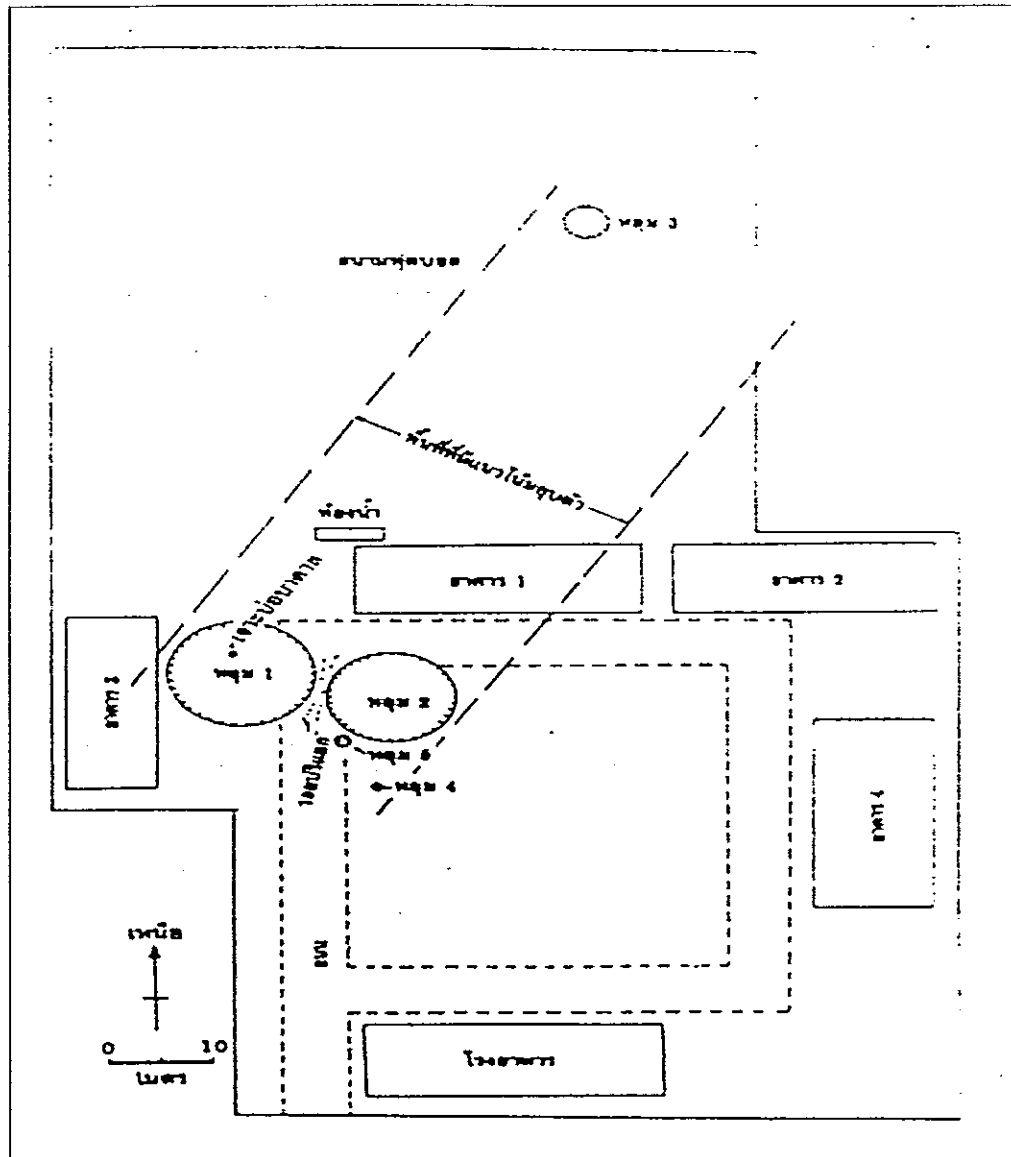
(ที่มา ดีเซลล์ สนวนบุรี 2538)



รูปที่ 18 ตำแหน่งรอยเลื่อนพาดผ่านเข้าสู่โรงเรียนบ้านทุ่งวิมาน
 (ที่มา : ดัดแปลงจาก Laochu and Suanburi.,1996)



รูปที่ 19 พื้นที่ที่มีโอกาสจะทรุดตัวยุบตัวลงบนโครงของหินปูน
(ที่มา : ดัดแปลงจาก สุวิทย์ โคสุวรรณ 2538)



วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นดินและชั้นหินที่อาจจะก่อให้เกิดหลุมยุบโดยวิธีธรณีฟิสิกส์
2. เพื่อเป็นข้อมูลในการหาวิธีป้องกันอันตรายที่เกิดจากหลุมยุบ

บทที่ 2

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการ

วิธีการวิจัยเพื่อศึกษาโครงสร้างของหลุมยุบ ณ โรงเรียนบ้านทุ่งวิมาน อำเภอเมือง จังหวัดสตูล โดยวิธีธรณีฟิสิกส์ ต้องใช้วัสดุ อุปกรณ์และวิธีดำเนินการ ตามรายละเอียดดังนี้

วัสดุ

วัสดุที่ต้องใช้ในการศึกษาค้างนี้ซึ่งอาจจะต้องใช้ร่วมกัน

1. ตะปูขนาด 3 นิ้ว ใช้สำหรับทำเครื่องหมายแสดงตำแหน่งจีไอโฟน จุดทำระดับ และจุดวัดความถ่วง
2. ฝาขวดน้ำอัดลม ใช้สำหรับรองหัวตะปูแสดงตำแหน่งจีไอโฟน จุดทำระดับ และจุดวัดความถ่วง
3. ฆ้อนตีตะปู
4. แผ่นบันทึกข้อมูล
5. สมุดบันทึก
6. ปากกา ดินสอ ยางลบ

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ได้แบ่งอุปกรณ์ตามประเภทของวิธีการวิจัยดังแสดงตามหัวข้อต่อไปนี้

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการวัดคลื่นไหวสะเทือน ประกอบด้วย
 - 1.1 เครื่องวัดความไหวสะเทือน ยี่ห้อ GEOMETRICS/Smart Seis S-24 (รูปที่ 20)
 - 1.2 จีไอโฟน 12 ตัวสำหรับรับสัญญาณพื้นผิว
 - 1.3 สายไฟรับสัญญาณระหว่างจีไอโฟนกับเครื่องวัดความไหวสะเทือน (geophone cable)
 - 1.4 สายไฟรับสัญญาณระหว่างเครื่องส่งสัญญาณกับเครื่องวัดความไหวสะเทือน (trigger cable)
 - 1.5 เครื่องส่งสัญญาณ 1 ตัว สำหรับให้สัญญาณการส่งสัญญาณที่ฆ้อน (hammer switch)
 - 1.6 ฆ้อนทุบ สำหรับทุบลงบนแผ่นเหล็ก
 - 1.7 แผ่นเหล็กขนาด 5 x 5 x 1 ลูกบาศก์นิ้ว

- 1.8 แบตเตอรี่ ขนาด 12 โวลต์
2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการวัดความถ่วง
 - 2.1 เครื่องวัดความถ่วง (gravity meter) แบบไม่เสถียรยี่ห้อลาคอสท์และรอมเบิร์ก (Lacost & Romberg) รุ่น 0 G-565 (รูปที่ 21) ที่มีความแม่นยำถึง 0.01 มิลลิแกลด์ เพื่อใช้วัดความถ่วงสัมพันธ์ระหว่างจุดวัด
 - 2.2 จานรอง เพื่อปรับให้เครื่องวัดความถ่วงอยู่ในแนวระดับอย่างหยาบ
 - 2.3 นาฬิกา เพื่อบันทึกเวลาในขณะที่ทำการวัดแต่ละจุดวัด
 - 2.4 ตลับเมตร เพื่อวัดความสูงจากจานรองพื้นถึงขอบบนของเครื่องวัดความถ่วง
 3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาเรดาร์ห้วยังความลึก
 - 3.1 เครื่องเรดาร์ห้วยังความลึก ยี่ห้อ RAMAC/GPR (รูปที่ 22)
 - 3.2 สายอากาศส่งสัญญาณ (transmitter) ประกอบด้วยตัวส่งสัญญาณความถี่ 50,100, 200, และ 400 เมกะเฮิรตซ์ เพื่อส่งสัญญาณผ่านพื้นดิน
 - 3.3 สายอากาศรับสัญญาณ (receiver) ประกอบด้วยตัวรับสัญญาณความถี่ 50,100, 200, และ 400 เมกะเฮิรตซ์ เพื่อรับสัญญาณสะท้อนกลับจากตัวกลางที่คลื่นส่งผ่าน
 - 3.4 หน่วยควบคุม (control unit) สำหรับควบคุมการส่ง/รับสัญญาณ และส่งข้อมูลไปเก็บไว้ที่คอมพิวเตอร์พกพา
 - 3.5 คอมพิวเตอร์พกพา (notebook computer) ใช้สำหรับป้อนคำสั่ง แสดงผลการส่ง/รับสัญญาณ ตลอดจนประมวลผล และเก็บข้อมูล
 - 3.6 เครื่องให้สัญญาณ (trigger) ใช้สำหรับกดเพื่อให้เครื่องรับสัญญาณทำการรับสัญญาณจากเครื่องส่งสัญญาณ
 - 3.7 เส้นใยนำแสง (optical fibers) สำหรับส่ง/รับสัญญาณ จากหน่วยควบคุมมายังสายอากาศส่งสัญญาณ สายอากาศรับสัญญาณ
 - 3.8 ไม้ถือสายอากาศ (antenna handles) สำหรับกำหนดระยะห่างระหว่างตัวรับสัญญาณกับตัวส่งสัญญาณ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ ใช้ระยะห่าง 0.6 เมตร
 - 3.9 แบตเตอรี่ชนิดแอลคาไล (นิกเกิล - แคดเมียม) ขนาด 7.2 โวลต์ จำนวน 3 ก้อน

4. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำระดับ (รูปที่ 23)

4.1 ไม้สตาฟ ยี่ห้อ Nedo ความยาว 4 เมตร ที่มีขนาดช่องสเกลเล็กสุด 0.1 เมตร

4.2 กล้องวัดระดับ ยี่ห้อ Pentax รุ่น AUTO-LEVEL AL-3 ที่มีขนาดกำลังขยายของกล้องโทรทรรศน์ 22x

5. อุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ร่วมกัน

5.1 โปรแกรม Winsurf Version 5.0 สำหรับทำแผนที่คอนทัวร์ของความถ่วง

5.2 โปรแกรม Microsoft Excel 5.0 สำหรับการคำนวณความสูงของจุดวัด การปรับแก้ข้อมูลความถ่วง

5.3 โปรแกรม Grapher Version 1.22 สำหรับเขียนกราฟ ทำภาพตัดขวาง

5.4 โปรแกรม Gradix Version 1.00 สำหรับประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านเรดาร์หยั่งความลึก

5.5 โปรแกรม SIPIK Version 4.1 สำหรับประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านคลื่นไหวสะเทือน

5.6 สายวัดสำหรับกำหนดตำแหน่งของจุดวัด และทำแผนที่

วิธีการวิจัยประกอบด้วย

1. การเก็บข้อมูลคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห
2. การเก็บข้อมูลความถ่วง
3. การเก็บข้อมูลเรดาร์หยั่งความลึก
4. การทำระดับ

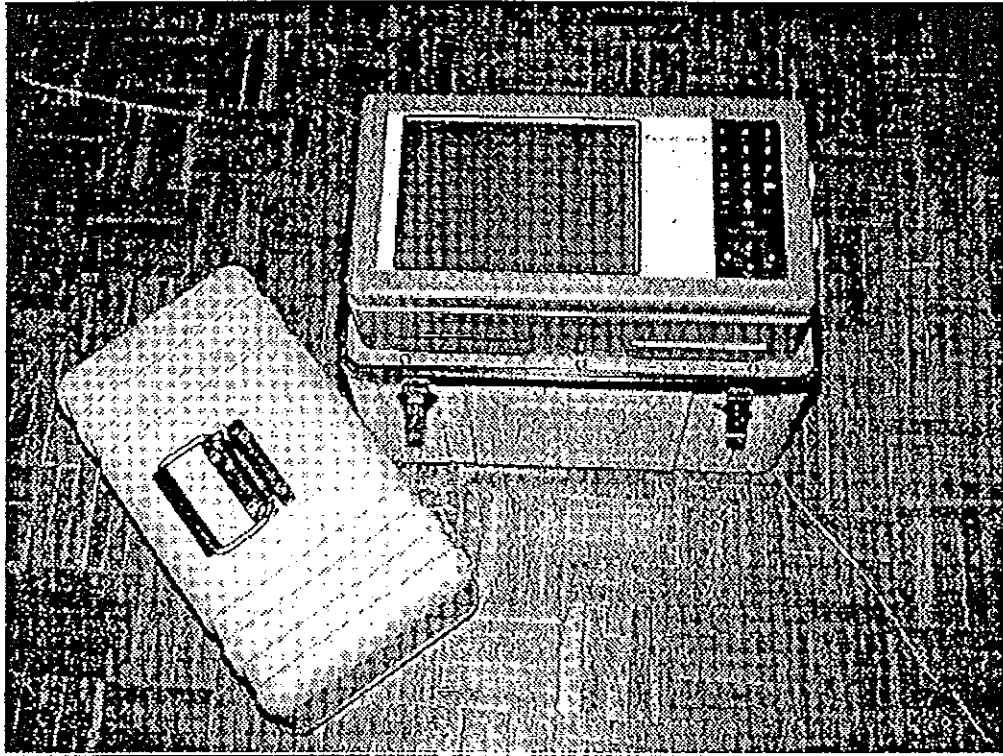
วิธีดำเนินการ

สำหรับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ได้แบ่งวิธีการดำเนินการออกเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

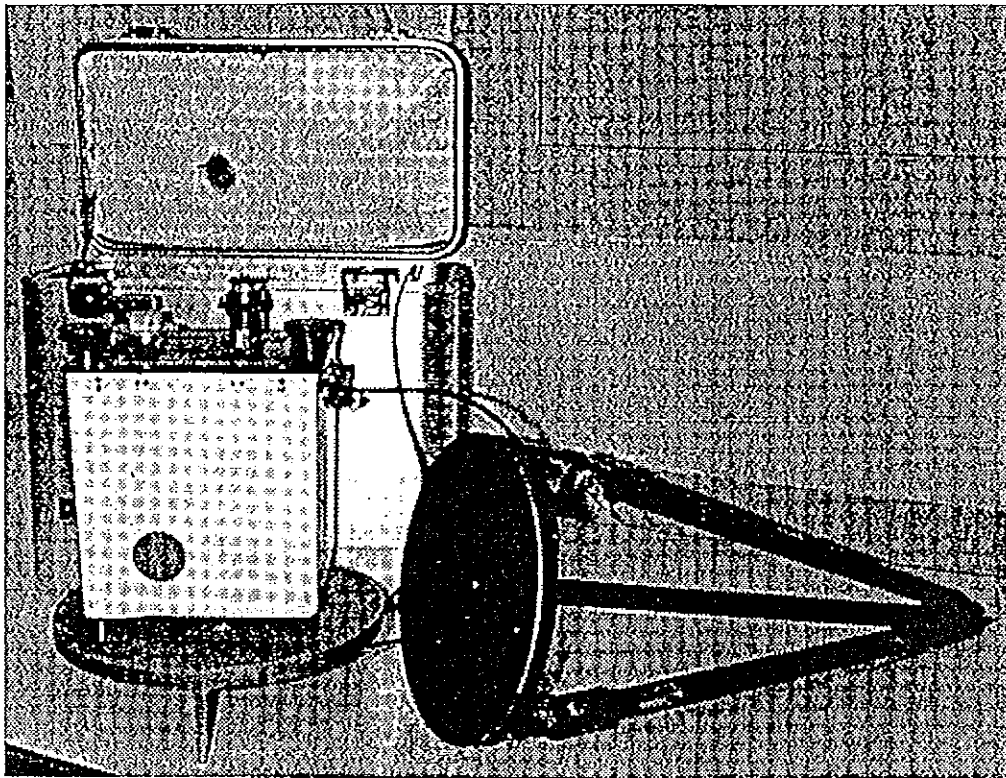
ตอนที่ 1 การศึกษาภาคสนาม

ตอนที่ 2 การวิเคราะห์ข้อมูลในห้องปฏิบัติการ

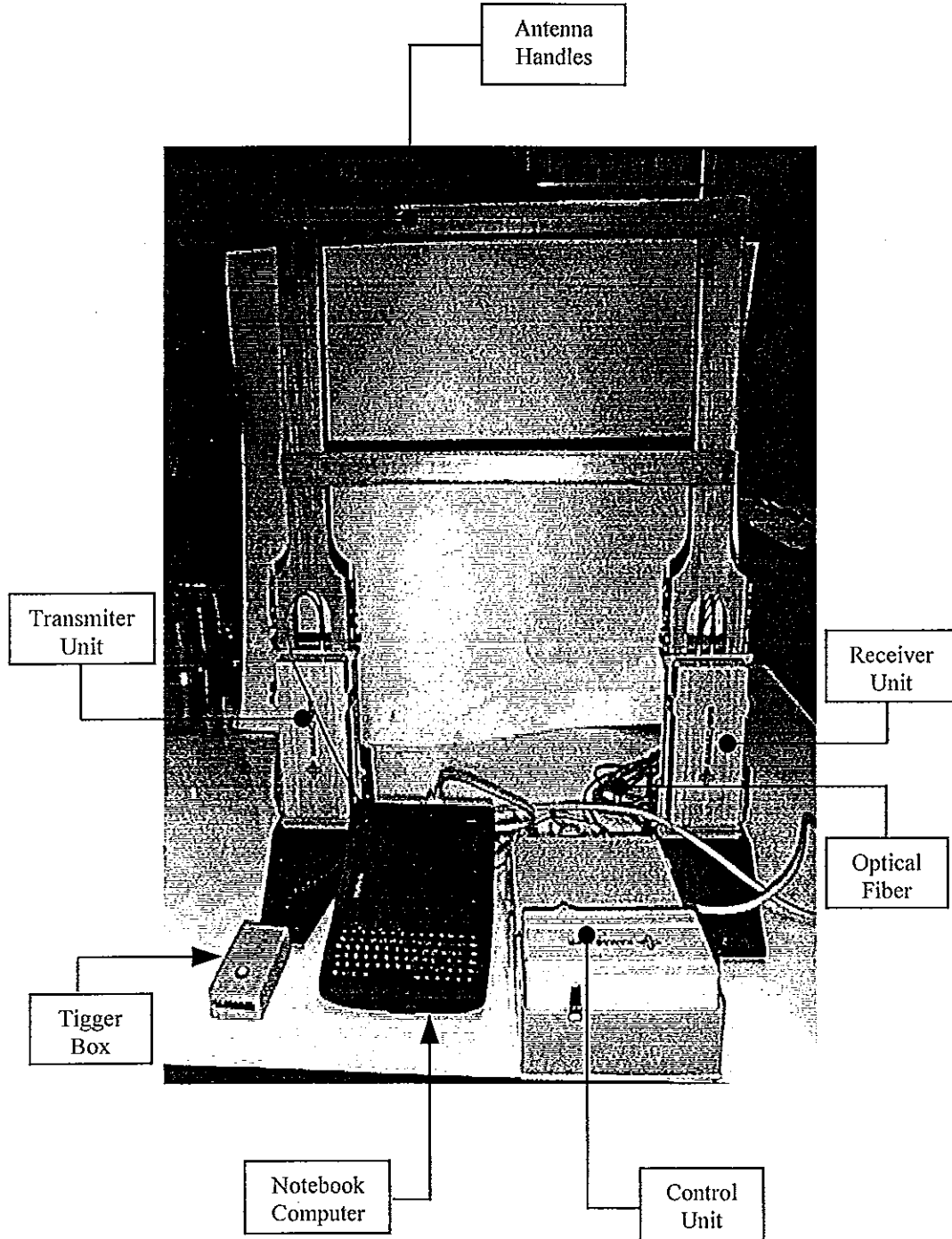
รูปที่ 20 เครื่องมือวัดคลื่นไหวสะเทือนยี่ห้อ GEOMETRICS/SmartSeis S-24



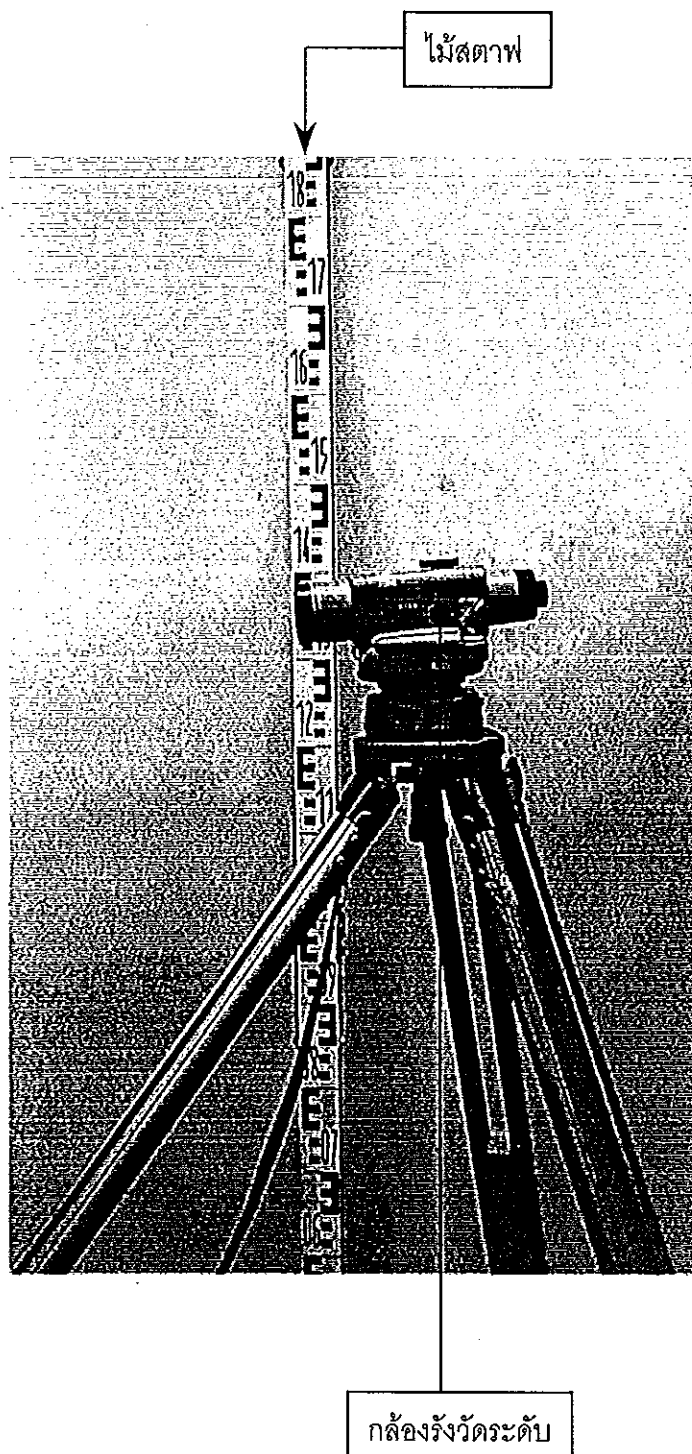
รูปที่ 21 เครื่องมือวัดความต้วงยี่ห้อลาคอสท์และรอมเบิร์ก



รูปที่ 22 เครื่องมือเรดาร์ห้วงความลึก



รูปที่ 23 เครื่องมือการทำระดับ



ตอนที่ 1 การศึกษาภาคสนาม

การดำเนินการวิจัยในภาคสนามมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. การวัดคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห

1.1 กำหนดแนววัด (Line) ได้ทั้งหมด 21 แนววัด (แนววัดที่ 00 - 20) โดยแนว วัดห่างกัน ประมาณ 6-15 เมตร แต่ละแนววัดแบ่งออกเป็นช่วงวัด (Spread) ช่วงวัดละ 24 เมตร ซึ่งแต่ละแนววัดอาจจะจำนวนช่วงวัดไม่เท่ากัน (รูปที่ 24)

1.2 วางสายวัดตามแนววัดแต่ละแนววัด

1.3 ปักจีไอโฟนทั้ง 12 ตัว โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้ระยะห่างของจีไอโฟนเท่ากับ 2 เมตร

1.4 กำหนดจุดทุบเพื่อให้ง่ายแก่การเคลื่อนที่ โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้ระยะห่างของแต่ละจุดเท่ากับ 12 เมตร ในแต่ละช่วงวัดมีจุดทุบทั้งหมด 7 จุด ประกอบด้วยจุดทุบจุดแรก (S_1) ห่างจากจีไอโฟนตัวที่ 1 เท่ากับ 25 เมตร จุดทุบจุดที่ 2 (S_2) ห่างจากจีไอโฟนตัวที่ 1 เท่ากับ 13 เมตร จุดทุบจุดที่ 3 (S_3) ห่างจากจีไอโฟนตัวที่ 1 เท่ากับ 1 เมตร (เรียกจุดทั้ง 3 จุดนี้ว่า near spread shot-points location) จุดทุบจุดที่ 4 (S_4) อยู่กึ่งกลางระหว่างจีไอโฟนตัวที่ 6 กับตัวที่ 7 (เรียกจุดนี้ว่า mid spread shot-points location) จุดทุบจุดที่ 5 (S_5) ห่างจากจีไอโฟนตัวที่ 12 เท่ากับ 1 เมตร จุดทุบ จุดที่ 6 (S_6) ห่างจากจีไอโฟนตัวที่ 12 เท่ากับ 13 เมตร จุดทุบจุดที่ 7 (S_7) ห่างจากจีไอโฟนตัวที่ 12 เท่ากับ 25 เมตร (เรียกจุดทั้ง 3 จุดนี้ว่า far spread shot-points location) (รูปที่ 25)

1.5 บันทึกสัญญาณคลื่นไหวสะเทือนเดินทางมาถึง จีไอโฟนทั้ง 12 ตัว

2. การวัดความถ่วง

2.1 กำหนดแนววัด (รูปที่ 26)

2.2 วางสายวัด เพื่อกำหนดจุดวัด ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้ จุดวัดห่างกันเท่ากับ 1 เมตร และ 2.5 เมตร และกำหนดจุดวัดอ้างอิงที่สนามบาทเกตบอล

2.3 วางจานรักษาระดับคร่อมจุดวัด ปรับลูกน้ำให้อยู่ตรงกลางนำเครื่องวัดความถ่วงมาวางบนจานรอง ปรับให้เครื่องมืออยู่ในแนวระดับ หลังจากนั้นจึงเปิดสวิตช์ไฟและคลายปุ่มล็อกมวล (un-clamp) ปรับสเกลให้ตรงตำแหน่งเส้นอ่าน (reading line) แล้วล็อกปุ่มล็อกมวล (clamp) หลังจากนั้นจึงทำการบันทึกตำแหน่งจุดวัด เวลาขณะทำการวัด ค่าที่อ่านได้บนเครื่องวัดความถ่วง วัดความสูงจากจานรองถึงขอบบนของเครื่องวัดความถ่วง

2.4 หมุนสเกลไปด้านใดด้านหนึ่ง ประมาณ 1/4 รอบ แล้วคลายปุ่มล็อกมวลอ่านค่าอีกครั้ง บันทึกค่าที่อ่านได้เป็นครั้งที่สอง

2.5 วัดจุดอื่น ๆ ตามข้อ 2.3. และ 2.4. และต้องกลับมาวัดที่จุดหมุดฐานประมาณ ทุก ๆ 1 ชั่วโมง
ดังตารางที่ 2 การบันทึกข้อมูล

ตารางที่ 2 ตัวอย่างการบันทึกข้อมูลความถี่ในภาคสนาม

จุดวัด	เวลา (ชม:นาที)	ความสูง* (เซนติเมตร)	ค่าที่อ่านได้ครั้งที่ 1	ค่าที่อ่านได้ครั้งที่ 2
Base	9:46	28.50	1660.241	1660.239
0	9:50	24.70	1659.758	1659.760
1	10:02	28.00	1659.675	1659.668
2	10:14	23.50	1659.764	1659.754
3	10:25	24.00	1659.820	1659.810
4	10:30	25.00	1659.901	1659.899
5	10:35	24.50	1660.042	1660.028
BASE	10:39	28.50	1660.038	1660.039

ความสูง* = ความสูงของเครื่องมือวัดเหนือผิวดิน

3. การใช้เรดาร์หยั่งความลึก

3.1 การสำรวจด้วยวิธี common offset survey เป็นวิธีการสำรวจเพื่อหาสัญญาณผิดปกติ โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.1.1 กำหนดแนววัดตามลักษณะภูมิประเทศ (รูปที่ 27)

3.1.2 วางสายวัดตามแนวที่กำหนดโดยจะบันทึกข้อมูลทุกๆ 0.20 เมตร

3.1.3 การวางสายอากาศ ใช้ระยะห่างระหว่างสายส่ง/รับสัญญาณ เท่ากับ 0.60 เมตร โดยที่จัดวางให้สายอากาศทั้งสองตั้งฉากกับแนววัด (รูปที่ 28)

3.1.4 เปิดเครื่องสัญญาณ เครื่องรับสัญญาณ หน่วยควบคุม และคอมพิวเตอร์พกพา ใส่พารามิเตอร์ในคอมพิวเตอร์พกพา

3.1.5 บันทึกข้อมูล

3.2 การสำรวจด้วยวิธี wide angle reflection and refraction (WARR) เป็นวิธีที่ต้องการวิเคราะห์หาความเร็วของชั้นดินอย่างง่าย โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.2.1 กำหนดแนววัด

3.2.2 ทำตามข้อ 3.1.4

3.2.3 ให้ตัวรับสัญญาณอยู่กับที่แล้วเลื่อนตัวส่งสัญญาณออกจากตัวรับสัญญาณจนกว่าสัญญาณจะอ่อนมากจนแอมพลิจูดของสัญญาณเป็นศูนย์ (โดยประมาณ) โดยทุกครั้งที่เลื่อนตัวส่งสัญญาณต้องทำการบันทึกสัญญาณทุกครั้ง (รูปที่ 29)

4. การทำระดับ

4.1 ตั้งกล้องวัดระดับให้อยู่ในแนวระดับ โดยการปรับลูกน้ำที่กล้องให้อยู่ตรงกลาง ให้ระยะห่างระหว่างกล้องกับจุดวัดควรอยู่ระหว่าง 25 -70 เมตรและความสูงของขาตั้งกล้องประมาณ ระดับสายตาของผู้บันทึก

4.2 กำหนดจุดอ้างอิงหรือหมุดฐาน (ใช้ขอบสนามบาสเกตบอล) เพื่อไว้ปรับเทียบซึ่งกำหนดความสูงเป็น 10.00 เมตร

4.3 ตั้งไม้สตาฟที่จุดอ้างอิง อ่านค่าบนไม้สตาฟผ่านกล้องระดับ บันทึกเป็นค่าอ่านย้อนกลับ

4.4 ตั้งไม้สตาฟตามจุดต่าง ๆ แล้วทำตามข้อ 4.3 บันทึกเป็นค่าอ่านไปด้านหน้า

4.5 กรณีที่ไม่สามารถอ่านได้ เนื่องจากมีต้นไม้บังหรือระยะห่างของจุดวัดกับกล้อง มากกว่า 100 เมตร ให้เลื่อนกล้องอ่านระดับไปจุดใหม่ แล้วทำตามข้อ 4.1

4.6 ตั้งไม้สตาฟจุดใหม่ แต่ต้องเป็นจุดที่เคยวัดมาแล้ว อ่านค่าบนไม้สตาฟผ่านกล้องระดับ บันทึกเป็นค่าอ่านย้อนกลับ หลังจากนั้นก็ทำตามข้อ 4.4 ไปเรื่อย ๆ จนครบทุกจุดวัด

ตอนที่ 2 การวิเคราะห์ข้อมูลในห้องปฏิบัติการ

การวิเคราะห์ข้อมูลในห้องปฏิบัติการประกอบด้วย

1. การวัดคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห
2. การวัดความถี่
3. การใช้เรดาร์หยังความลึก

1. การวัดคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห

ทฤษฎี

สุรพล อารีย์กุล (2523) ได้อธิบายถึงระเบียบวิธีการวัดคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเหว่า เป็นวิธีที่ส่งคลื่นยืดหยุ่น (elastic wave) ลงไปในพื้นโลก และเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปถึงระนาบรอยต่อ

(boundary plane) จะเกิดการหักเหของคลื่นตามกฎของสเนลล์ (สมการที่ 2) ซึ่งถ้ามุมตกกระทบของคลื่นเท่ากับมุมวิกฤต คลื่นก็จะสามารถเดินทางมาถึงตัวรับสัญญาณได้ตามหลักของฮอยเกนส์ โดยระยะเวลาของคลื่นที่เดินทางมาถึงจีไอโฟนจะใช้เวลาที่ต่างกันเนื่องจากสมบัติความยืดหยุ่นของชั้นหินที่แตกต่างกัน (กิตติชัย, 2526) ทำให้ความเร็วของคลื่นยืดหยุ่นต่างกัน (ตารางที่ 4) อาศัยทฤษฎีการยืดหยุ่นสามารถพิสูจน์ได้ว่า ความเร็วของคลื่นมีค่าสัมพันธ์กันกับค่าคงตัวของการยืดหยุ่น ดังสมการที่ (3) และ (4)

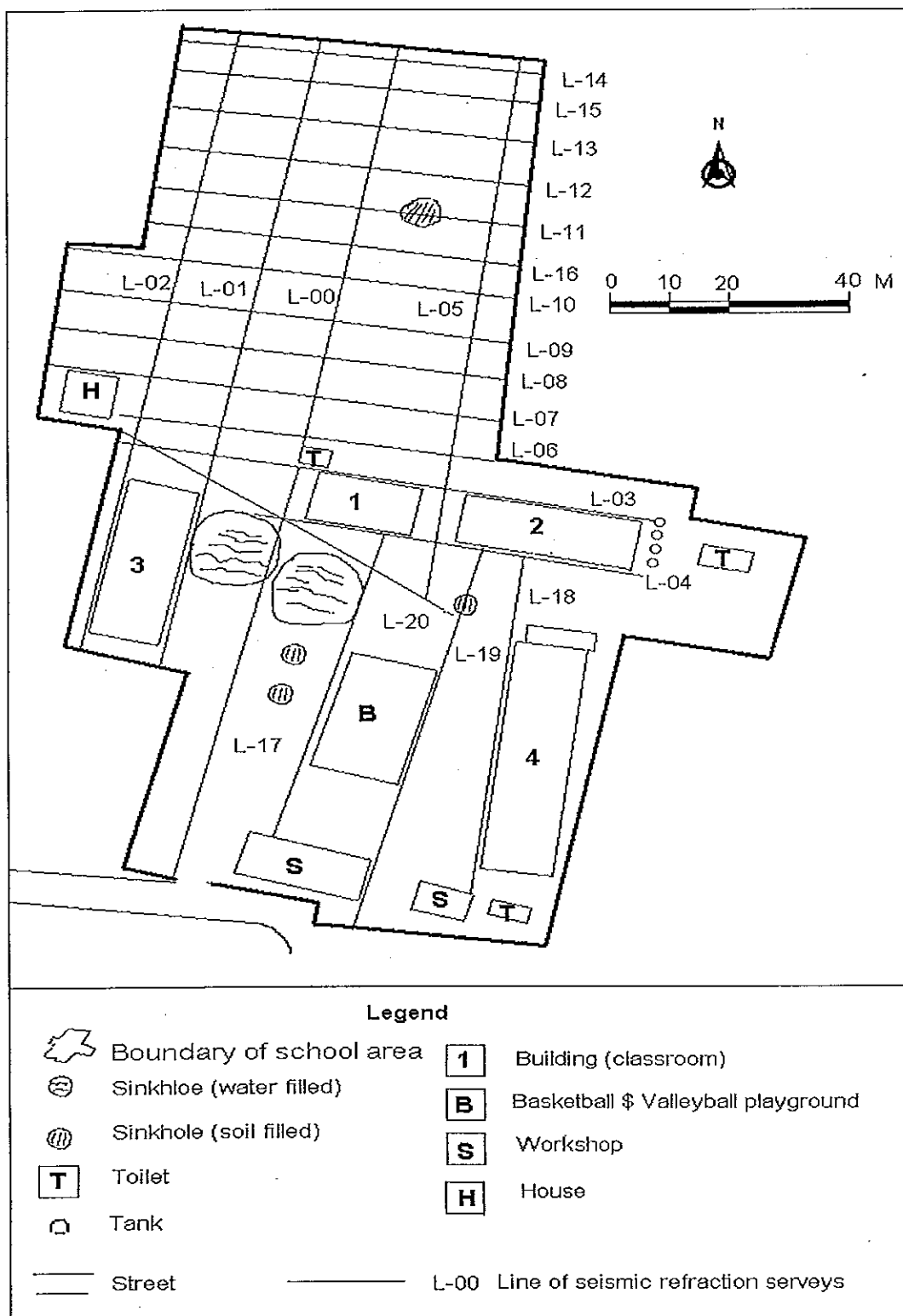
$$\frac{\sin \theta_1}{V_1} = \frac{\sin \theta_2}{V_2} = \frac{\sin \theta_3}{V_3} = \dots = \frac{\sin \theta_n}{V_n} \quad \text{-----}(2)$$

$$v_p = \sqrt{\frac{\left(\frac{4}{3}\mu + k\right)}{\rho}} \quad \text{-----}(3)$$

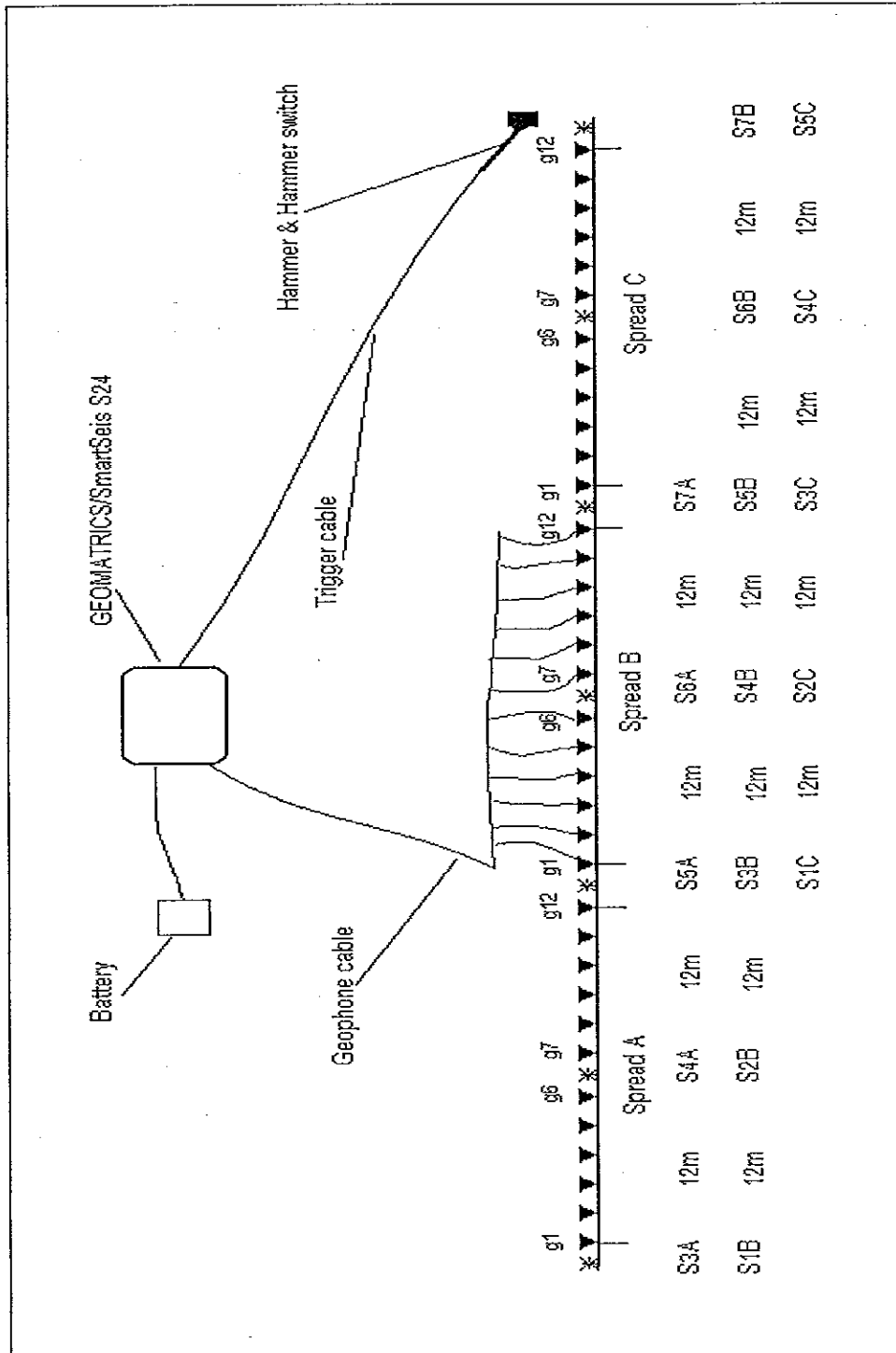
$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad \text{-----}(4)$$

- เมื่อ v_p : อัตราเร็วของคลื่นปฐมภูมิหรือคลื่นอัด (คลื่นพี) (primary or compressional wave (p - wave) speed) มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที
- v_s : อัตราเร็วของคลื่นทุติยภูมิหรือคลื่นเฉือน (คลื่นเอส) (secondary or shear wave (s - wave) speed มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที
- k : โมดูลัสเชิงปริมาตร (bulk modulus) มีหน่วยเป็น นิวตัน/เมตร²
- μ : โมดูลัสเฉือน (shear modulus) มีหน่วยเป็น นิวตัน/เมตร²
- ρ : ความหนาแน่น (density) มีหน่วยเป็น กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

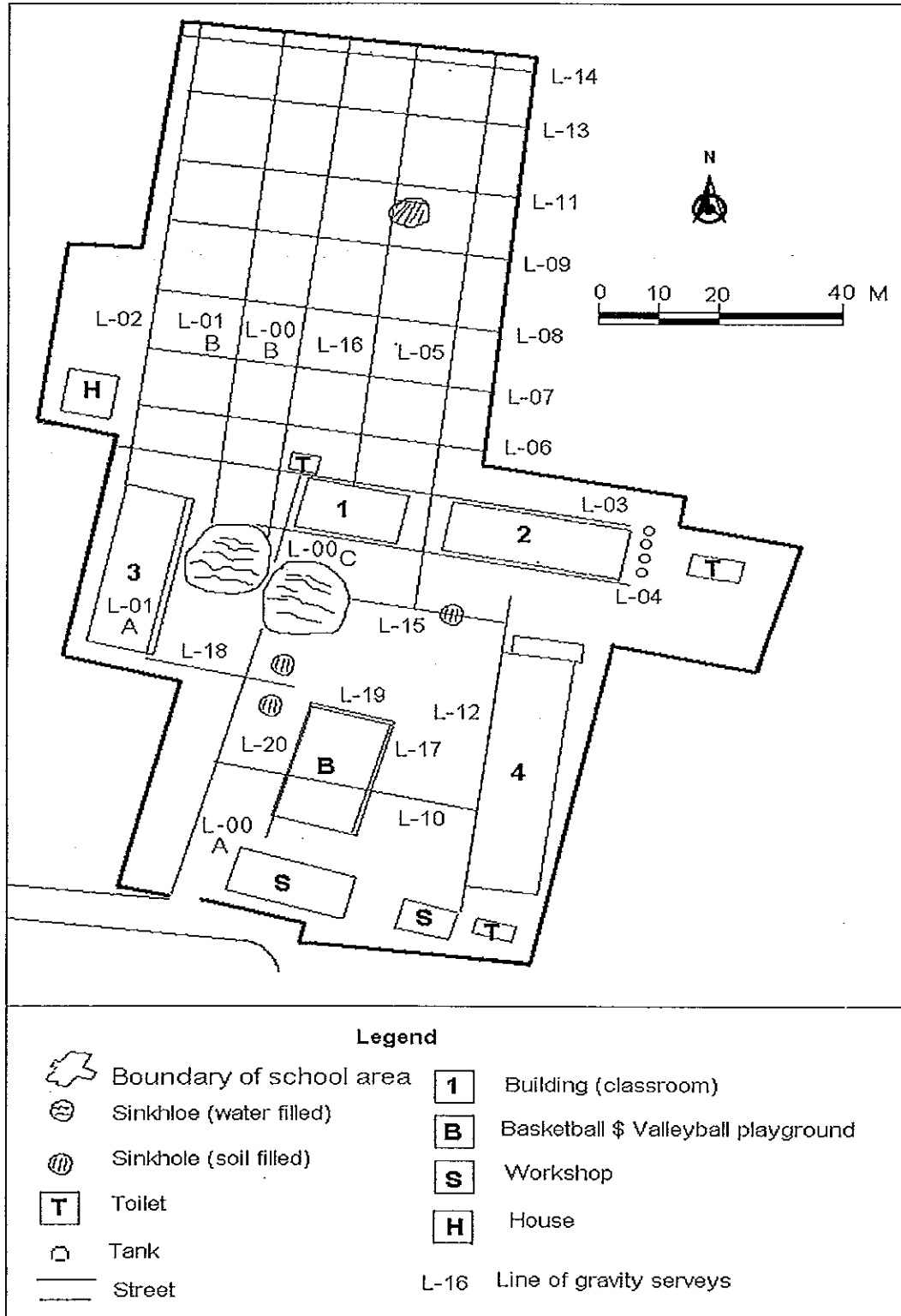
รูปที่ 24 แนวการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห



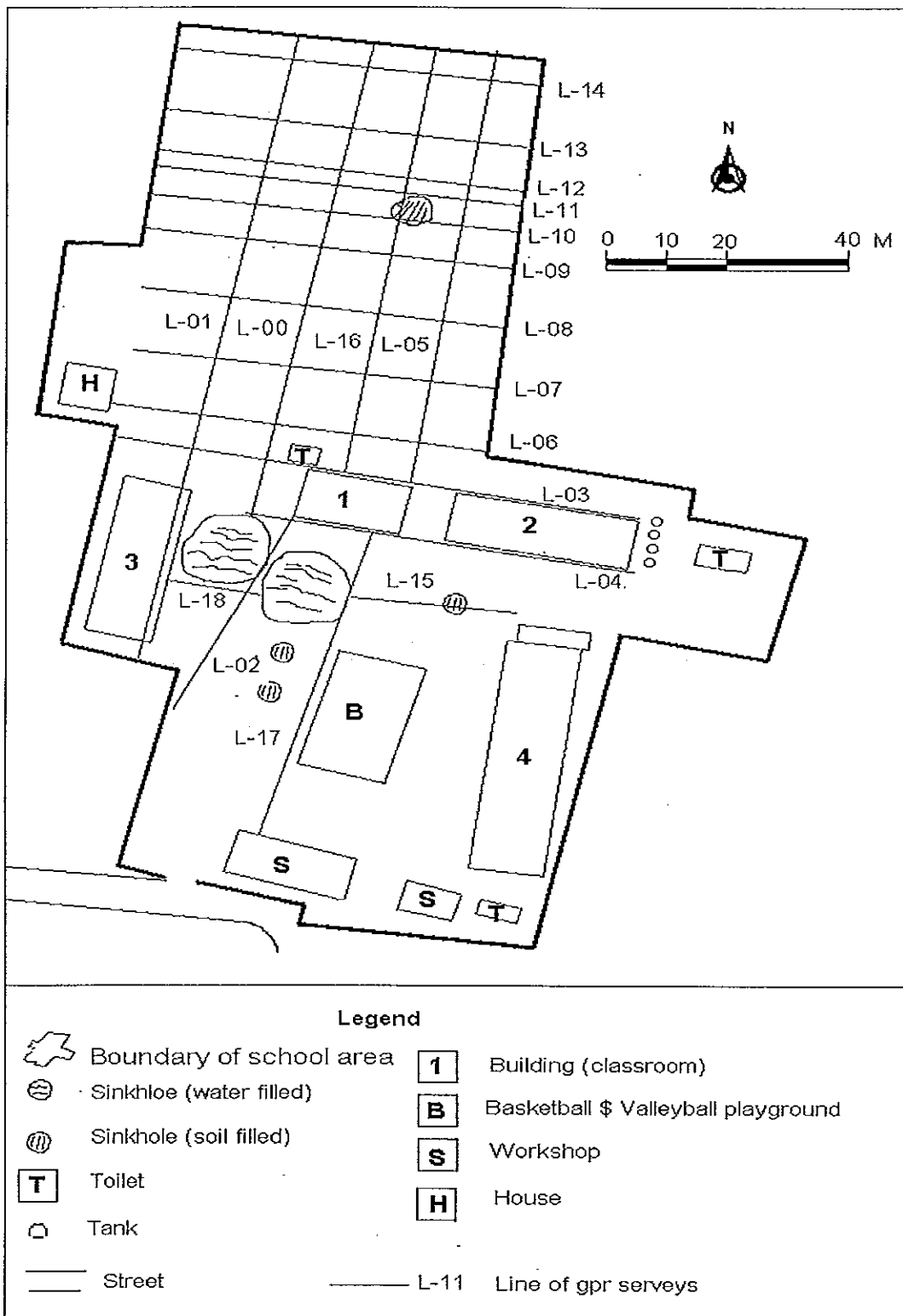
รูปที่ 25 รูปแบบการบันทึกข้อมูลคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห













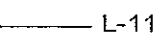
รูปที่ 26 แนวการสำรวจความถ่วง



รูปที่ 27 แนวการสำรวจเรดาร์หยั่งความลึก

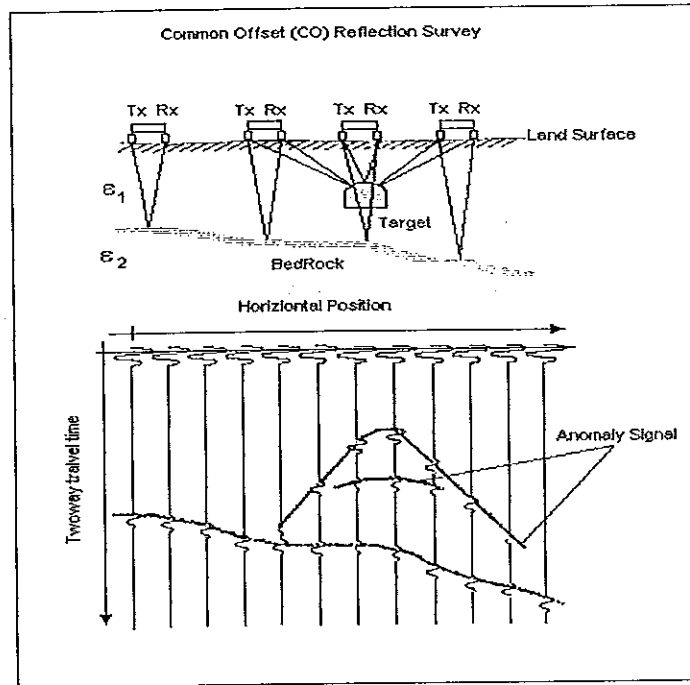


Legend

-  Boundary of school area
-  Sinkhole (water filled)
-  Sinkhole (soil filled)
-  Toilet
-  Tank
-  Street
-  Building (classroom)
-  Basketball & Valleyball playground
-  Workshop
-  House
-  L-11 Line of gpr surveys

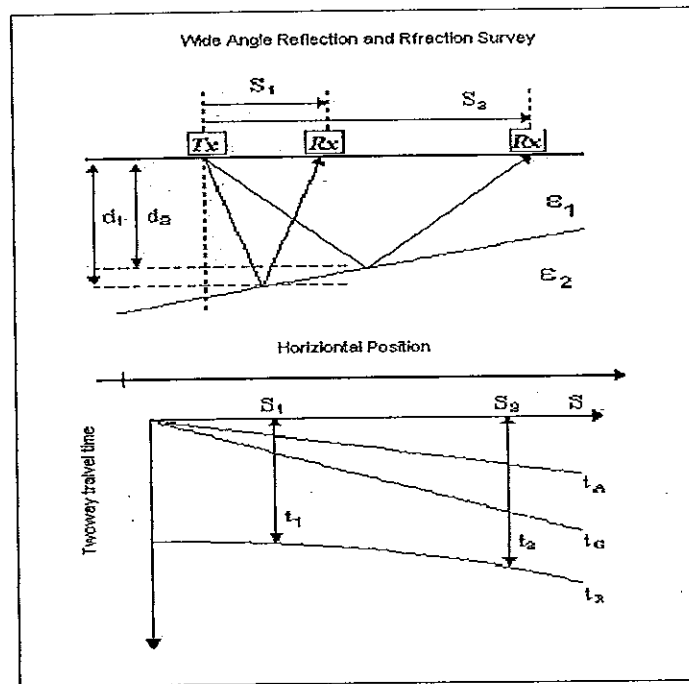
รูปที่ 28 การสำรวจด้วยวิธี common offset reflection survey

(ที่มา : <http://www.malages.se/ramac/radar.shtml>,1999)

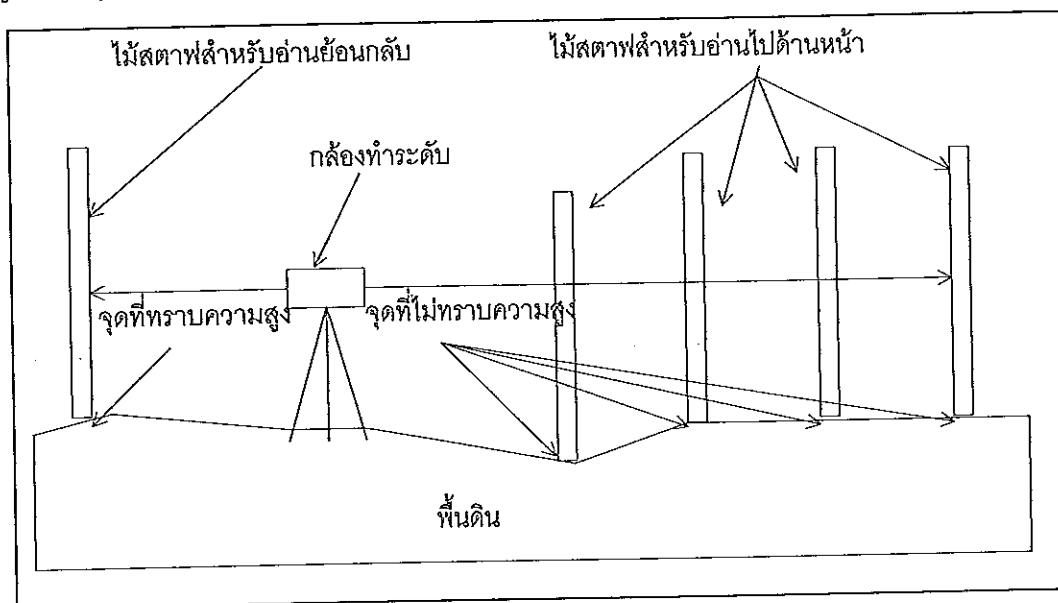


รูปที่ 29 การสำรวจด้วยวิธี wide angle reflection and refraction survey

(ที่มา : Gruber and Ludwig,1999)



รูปที่ 30 รูปแบบการทำรังวัดระดับ



ตารางที่ 3 ตัวอย่างผลการบันทึกและการคำนวณค่าระดับ

จุดวัด	ค่าอ่านย้อนกลับ (เมตร)	ค่าอ่านไปด้านหน้า (เมตร)	ค่าความแตกต่าง* (เมตร)	ความสูงสัมพันธ์กับจุด อ้างอิง** (เมตร)
BASE	1.300			10.000***
1		1.390	-0.090	09.910
2		1.282	0.018	10.018
3		1.360	-0.060	09.940
4		1.400	-0.100	09.900
5		1.410	-0.110	09.890
6		1.362	-0.062	09.938
7		1.390	-0.090	09.910

หมายเหตุ

ค่าความแตกต่าง* = ค่าอ่านย้อนกลับ - ค่าอ่านไปด้านหน้า

ความสูงสัมพันธ์กับจุดอ้างอิง** = ความสูงที่จุดอ้างอิง + ค่าความแตกต่าง*

10.000*** = ความสูงที่ทราบค่า (บริเวณพื้นที่ศึกษาโดยเฉลี่ยมีความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 10 เมตร)

มานพ รักษาสกุลวงศ์ (2530) กล่าวว่า การสำรวจคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเหกลับต้องมี แหล่งกำเนิดพลังงานให้แก่พื้นโลก และกล่าวไว้อีกว่าในการสำรวจแบบนี้จะมีการศึกษาเฉพาะ คลื่นแบบ P - wave เท่านั้นเนื่องจากคลื่นแบบนี้เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในทะเลวัตถุได้เร็วที่สุด และเป็นคลื่นชุดแรกที่ตัวรับสัญญาณสามารถตรวจวัดได้ให้ปรากฏในเครื่องบันทึกคลื่น

สำหรับการวิเคราะห์หาความเร็ว ความลึก และความหนาของชั้นดินแต่ละชั้นสามารถแบ่ง ออกได้เป็น 2 กรณีคือ

1. ชั้นรอยต่อของชั้นดินเรียบ

1.1 รอยต่อของชั้นดินขนานกันสมมุติชั้นดินมีโครงสร้างอยู่ n ชั้น และมีความหนาและความเร็ว ของชั้นดินชั้นที่ $1, 2, 3, \dots, n$ เป็น Z_1, Z_2, \dots, Z_{n-1} และ $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$ ตามลำดับ (รูปที่ 31) คำนวณ หาเวลาตัดแกน (intercept time) ได้จากสมการที่ (5) (Telford *et al.* 1993) หรือสมการ (6) (กิตติชัย วัฒนานิก, 2526) ส่วนความหนาหาได้จากสมการที่ (7) (Edwin and Canhit, 1984) หรือสมการ (8) (Nettleton, 1940) ด้านล่าง

ตารางที่ 4 ความเร็วของคลื่นที่ (P - wave) ของวัตถุต่าง ๆ ในโลก

(ที่มา : ดัดแปลงจาก Kearey and Brooks., 1991)

Compressional Wave Velocities in Earth Materials v_p (km.s^{-1})	
Sand (dry)	0.2 - 1.0
Sand (water saturated)	1.5 - 2.0
Clay	1.0 - 2.5
Sandstones	2.0 - 6.0
Limestone	2.0 - 6.0
Dolomites	2.5 - 6.5
Salt	4.5 - 5.0
Air	0.3
Water	1.4 - 1.5
Concrete	3.6

ตารางที่ 5 ความเร็วของคลื่นยืดหยุ่นในตัวกลางต่าง ๆ

(ที่มา : ดัดแปลงจาก Parasnis, 1997)

Material	V_p (m/s)	V_s (m/s)
Air	330	
Sand	300 - 800	100 - 500
Water	1450	
Limestone and dolomites	3500 - 6500	1800 - 3800
Rock salt	4000 - 5500	2000 - 3200

$$t_n = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{2Z_i}{V_i} \cos \theta_i \quad \text{----- (5)}$$

$$t_n = \frac{2}{V_n} \sum_{k=1}^{k-1} Z_k \sqrt{\left(\frac{V_n}{V_k}\right)^2 - 1} \quad \text{----- (6)}$$

$$Z_{n-1} = \left[\frac{t_n}{2} - \sum_{k=1}^{n-1} \frac{Z_k}{V_k} \cos i \right] \frac{V_n}{\cos i} \quad \text{----- (7)}$$

$$Z_{n-1} = \frac{V_{n-1}V_n}{\sqrt{V_n^2 - V_{n-1}^2}} \left(\frac{t_n}{2} - \frac{Z_1\sqrt{V_n^2 - V_1^2}}{V_1V_n} - \frac{Z_2\sqrt{V_n^2 - V_2^2}}{V_2V_n} \right. \\ \left. \dots - \frac{Z_{n-2}\sqrt{V_n^2 - V_{n-2}^2}}{V_{n-2}V_n} \right) \quad \text{----- (8)}$$

1.2 ชั้นรอยต่อของดินไม่ขนานกันเกิดเป็นมุมเอียงเกิดขึ้น โดยถ้ามุมเอียงไม่เกิน 10 องศา จะทำให้การคำนวณค่าต่างๆ ผิดไปไม่เกิน ร้อยละ 1.5 (Nettleton, 1940) และถ้ามุมเอียงไม่ เกิน 20 องศา จะทำให้การคำนวณค่าต่าง ๆ ผิดไปไม่เกิน ร้อยละ 5 (Parasnis, 1997) โดยการกำหนดให้ชั้นดินมี 2 ชั้น (รูปที่ 32) (กรณีมากกว่า 2 ชั้นอ่านเพิ่มเติมได้ใน Mooney, 1980; Johnson., 1976) และแบ่งเป็น 2 กรณีคือ

ก. down - dip direction สามารถคำนวณหาเวลาตัดแกนและความหนาของชั้นดินได้ดังสมการที่ (9) (Telford *et al.* 1993) และสมการที่ (10) (Edwin and Canhit, 1984) ตามลำดับ

$$t_A = \frac{2Z_A}{V_1} \cos \theta_c \quad \text{----- (9)}$$

$$h_d = \frac{Z_A}{\cos \zeta} \quad \text{----- (10)}$$

ข. up - dip direction สามารถคำนวณหาเวลาตัดแกน และความหนาของชั้นดินได้ดังสมการที่ (11) (Telford *et al.* 1997 และ สมการ (12) (Edwin and Canhit, 1984) ตามลำดับ

$$t_B = \frac{2Z_B}{V_1} \cos \theta_c \quad \text{----- (11)}$$

$$h_u = \frac{Z_B}{\cos \zeta} \quad \text{----- (12)}$$

2. ชั้นรอยต่อของชั้นดินไม่เรียบ (รูปที่ 33)

โดยทั่วไปรอยต่อของแต่ละชั้นของพื้นดินอาจจะมี ความขรุขระ ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงวิธีการสำรวจและแปลความหมายเพื่อให้สามารถคำนวณหาความหนาของชั้นดิน ณ ตำแหน่งจีไอโฟนทุกตัว (กิตติชัย, 2526) โดยใช้แนวความคิดเกี่ยวกับดีเลย์ไทม์ (delay time) (Hagedoorn, 1959; Hawkins, 1961; Pakiser and Black, 1957; Telford *et al.*, 1993) ซึ่งเป็นวิธีการที่หาดีเลย์ไทม์จากจุดกำเนิดคลื่นไปยังจีไอโฟนแต่ละตัว วิธีนี้จึงสามารถคำนวณหาความหนาของชั้นดิน ณ ตำแหน่งจีไอโฟน ดีเลย์ไทม์ของจีไอโฟนที่ตำแหน่งใด ๆ หาได้จากสมการ (13) (กิตติชัย วัฒนานิก, 2526) และสมการทั่วไปของความหนาของชั้นดิน ณ จีไอโฟนใด ๆ หาได้จากสมการ (14) (กิตติชัย วัฒนานิก, 2526)

$$t_{DIG} = \frac{1}{2} [t_{s1G} + t_{s2G} - t_{s1s2}] \quad \text{----- (13)}$$

$$Z_{n-1}G = \left[t_{DnG} - \sum_{a=1}^{n-1} \frac{Z_{aG} \sqrt{V_n^2 - V_a^2}}{V_a V_n} \right] \frac{V_{n-1} V_n}{\sqrt{V_n^2 - V_{n-1}^2}}$$

----- (14)

การวิเคราะห์และคำนวณโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

การวัดคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเหของชั้นดินซึ่งได้เก็บข้อมูลไว้ในเครื่องวัดคลื่นไหวสะเทือนสามารถที่จะนำออกมาถ่ายโอนข้อมูลแล้วนำมาวิเคราะห์ในเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม SIPIK Version 4.1(อ่านรายละเอียดใน Rimrock geophysics Inc., 1995) โดยมีขั้นตอนดังนี้

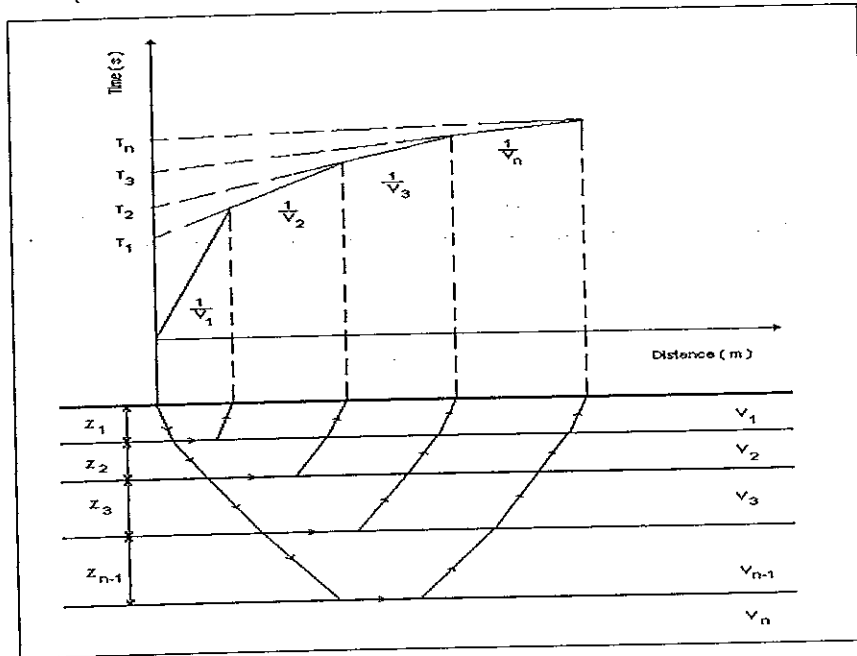
1. ขั้นตอนการเลือกเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่มาถึงครั้งแรก (picks firstbreaks or picks first arrival time) โดยการเลือกเวลาที่คลื่นเดินทางมาถึงตัวรับสัญญาณ
2. ขั้นตอนการใส่ค่าองค์ประกอบต่าง ๆ เช่น ระยะห่างจุดหุบ ระยะห่างจีไอโฟน ระดับความสูงของจุดหุบและของจีไอโฟนแต่ละตัว การรวมช่วงวัดเป็นช่วงเดียวกัน การระบุลำดับชั้นดิน
3. ขั้นตอนการประมวลผลหาความเร็ว โดยการหาความเร็วแบ่งเป็น 2 กรณีคือ
 - 3.1 ความเร็วของชั้นแรกหาจาก หาความเร็วเฉลี่ยจากการเคลื่อนที่ของคลื่นตรง
 - 3.2 ความเร็วชั้นถัดจากชั้นแรกหาจาก
 - ก. ส่วนกลับของความชันหลังจากการใช้เทคนิค least-square fit of a straight line
 - ข. Hobson-Overton velocities ดังสมการ (15) (Scott, 1973)

$$= \frac{\sum \Delta x_i^2 - (\sum \Delta x_i)^2 / n}{\sum \Delta x_i \Delta t_i - (\sum \Delta x_i)(\sum \Delta t_i) / n} \quad \text{----- (15)}$$

4. การสร้างแบบจำลองของชั้นดิน โดยการใช้สมการ (14)

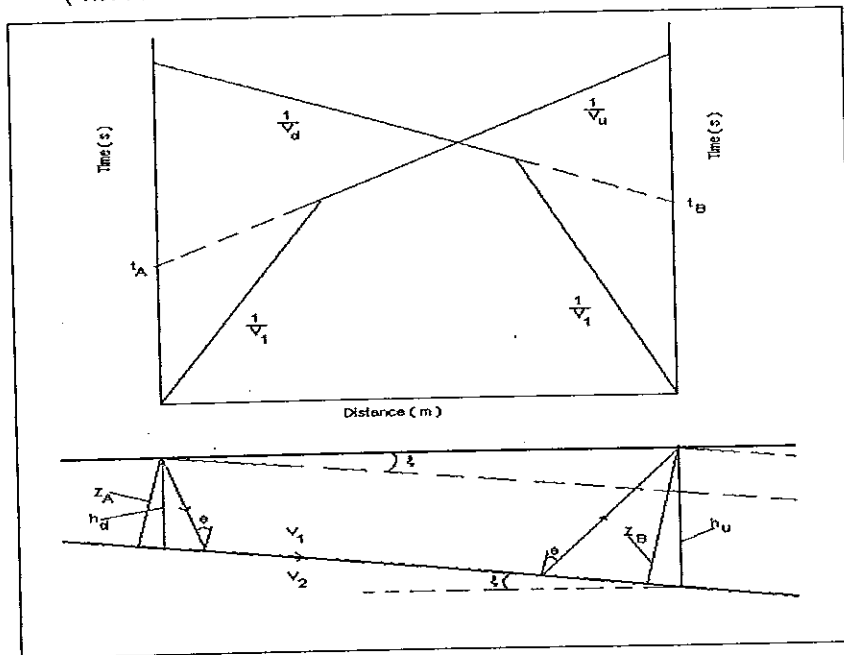
รูปที่ 31 แสดงเส้นทางการหักเหและกราฟเวลาการเดินทางของคลื่นหักเหในชั้นดินที่เรียบ
กรณีชั้นดินหลายชั้นและขนานกัน

(ที่มา : ดัดแปลงจาก Nettleton, 1940)



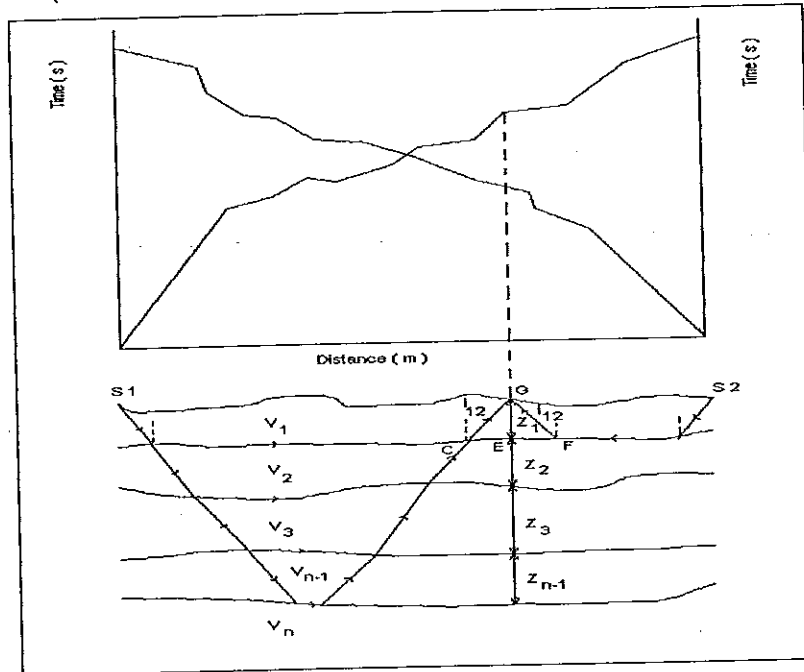
รูปที่ 32 แสดงเส้นทางการหักเหและกราฟเวลาการเดินทางของคลื่นหักเห
ในชั้นดินที่เรียบ กรณีชั้นดิน 2 ชั้นและไม่ขนานกัน

(ที่มา : ดัดแปลงจาก Telford et al., 1993)



รูปที่ 33 แสดงเส้นทางการหักเหและกราฟเวลาการเดินทางของคลื่นหักเห ในชั้นดินที่ไม่เรียบ

(ที่มา : ดัดแปลงจาก Telford et al., 1993)



2. การวัดค่าความถ่วง

ทฤษฎี

การวัดค่าความถ่วงเป็นการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงสนามโน้มถ่วงของโลก ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของดิน ของหินหรือโครงสร้างต่างๆ ของผิวโลกและโดยทั่วไปแล้วจะไม่สามารถวัดแรงของความโน้มถ่วง (gravitational force) ได้ แต่จะสามารถวัดความเร่งของความโน้มถ่วง (gravitational acceleration, g) ได้ ซึ่งความเร่งของความโน้มถ่วงคือ อัตราของเวลาที่ให้เปลี่ยนความเร็วของวัตถุภายใต้แรงของความโน้มถ่วง ซึ่งความเร่งของความโน้มถ่วงนี้ (เรียกลสั้นๆว่าความถ่วง) สามารถหาได้จากสมการ(16) (กิตติชัย วัฒนานิกกร, 2526; http://www.mines.edu/fs_home/tboyd/GP311/MODLES/GRAV/NOTES/gravacc.html)

$$g_r = \frac{Gm_1}{r^2} \text{----- (16)}$$

- เมื่อ g : ความถ่วง มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที²
 G : ค่าคงตัวของการโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ 6.67×10^{-11}
 มีหน่วยเป็น นิวตัน²/กิโลกรัม²
 m_1 : มวลของวัตถุ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม
 r : ระยะห่างของวัตถุกับจุดวัด มีหน่วยเป็น เมตร

เนื่องจากดินและหินแต่ละชนิดมีความหนาแน่นแตกต่างกัน ดังตารางที่ 6 ดังนั้นจึงก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความถ่วงบนผิวดิน ค่าความถ่วงที่ผิดปกติไปนี้เรียกว่า ค่าความถ่วงผิดปกติ (gravity anomaly) หาได้จากสมการที่ (17)

$$\Delta g_z = \frac{G\Delta\rho V}{r^2} \cos\theta \quad \text{----- (17)}$$

สมการที่ (17) เป็นสมการพื้นฐานที่นำไปสร้างแบบจำลองของโครงสร้างชั้นดิน ซึ่งโครงสร้างแบบจำลองของชั้นดินอย่างง่าย ๆ มีอยู่ 4 แบบจำลองดังนี้

1. ความถ่วงผิดปกติของมวลทรงกลม (sphere) หาได้จากสมการที่ (18) (Parasnis,1997) และความลึกโดยประมาณหาได้จากสมการ(19) (กิตติชัย วัฒนานิกร,2526; Telford et al.,1993) (รูปที่ 34)

$$\Delta g = \frac{4\pi}{3} R^3 G\delta \frac{\cos\theta}{r^2} \quad \text{----- (18)}$$

$$Z = 1.305 X_{\frac{1}{2}} \quad \text{----- (19)}$$

2. ความถ่วงผิดปกติของมวลทรงกระบอกตามแนวนอน (horizontal rod) หาได้จากสมการที่ (20) (กิตติชัย วัฒนานิกร,2526 และ Telford et al.,1993) และความลึกโดยประมาณหาได้จากสมการ (21) (กิตติชัย วัฒนานิกร, 2526; Telford et al.,1993) (รูปที่ 35)

$$\Delta g = \frac{2\pi GR^2\delta}{Z(1+X^2/Z^2)} \quad \text{----- (20)}$$

$$Z = X_{1/2} \quad \text{----- (21)}$$

ตารางที่ 6 ความหนาแน่นของวัตถุต่าง ๆ
(ที่มา : ดัดแปลงจาก Parasnis, 1997.)

Material	Densities (kg.m ⁻³)	Material	Densities (kg.m ⁻³)
Water	1000	Basalt	2700-3300
Sand (wet)	1950-2050	Gabbro	2700-3500
Sand (dry)	1400-1650	Chromite	4500-4800
Coal	1200-1500	Pyrrhotite	4600
Sandstone	1800-2700	Pyrite	5000
Rock salt	2100-2400	Hematite	5100
Limestone (compact)	2600-2700	Galena	7500
Quartzite	2600-2700	Anhydrite	2960

3. ความถ่วงผิดปกติของมวลทรงกระบอกตามแนวตั้ง (vertical cylinder) หาได้จากสมการ (22) (Parasnis, 1997; Telford *et al.*, 1993) (รูปที่ 36)

$$\Delta g = 2\pi G\delta \left[L + (Z^2 + R^2)^{1/2} - \left\{ (Z+L)^2 + R^2 \right\}^{1/2} \right] \quad \text{----- (22)}$$

3.1 กรณี $R \rightarrow \infty$ ค่าความถ่วงผิดปกติหาได้จากสมการ (22) (Telford *et al.*, 1993)

$$\Delta g = 2\pi G\delta L \quad \text{----- (23)}$$

3.2 กรณี $L \rightarrow \infty$ ค่าความถ่วงผิดปกติหาได้จากสมการ (24) (Telford *et al.*, 1993; Parasnis, 1997)

$$\Delta g = 2\pi G\delta \left\{ (Z^2 + R^2)^{1/2} - Z \right\} \quad \text{----- (24)}$$

ความลึกโดยประมาณหาได้จากสมการ (25) (กิตติชัย วัฒนานิกร, 2526)

$$Z = 0.577 X_{1/2} \quad \text{----- (25)}$$

ในกรณีนี้ ถ้า $Z = 0$ ค่าความถ่วงผิดปกติได้จากสมการ (26) (Telford *et al.*, 1993; Parasnis, 1997)

$$\Delta g = 2\pi G\delta R \quad \text{----- (26)}$$

3.3 กรณี $Z = 0$ ค่าความถ่วงผิดปกติได้จากสมการ (27) (Telford *et al.*, 1993)

$$\Delta g = 2\pi G\delta \left\{ L + R - (L^2 + R^2)^{1/2} \right\} \quad \text{----- (27)}$$

4. ความถ่วงผิดปกติของแผ่นมวลแบบสี่เหลี่ยม

4.1 ความถ่วงผิดปกติของผนัง (dike) หาได้จากสมการ (28) (Telford *et al.*, 1993) (รูปที่ 37)

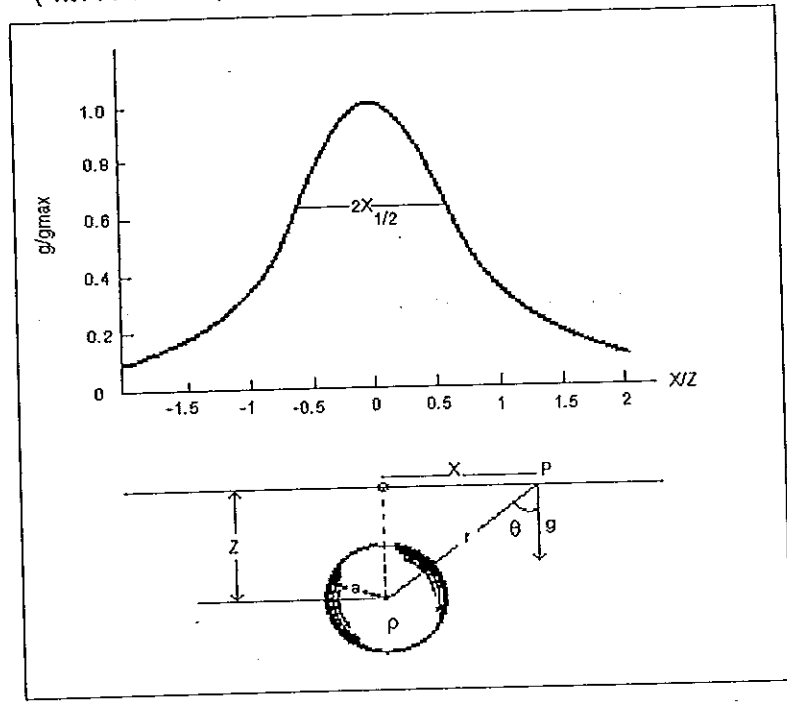
$$\Delta g = 2G\delta \cos^2 \beta \{ x(F_2 - F_1) - (x - b)(F_4 - F_3) \} \quad \text{----- (28)}$$

4.2 ความถ่วงผิดปกติของรอยเลื่อน (fault) หาได้จากสมการ (29) (Telford *et al.*, 1993) (รูปที่ 38)

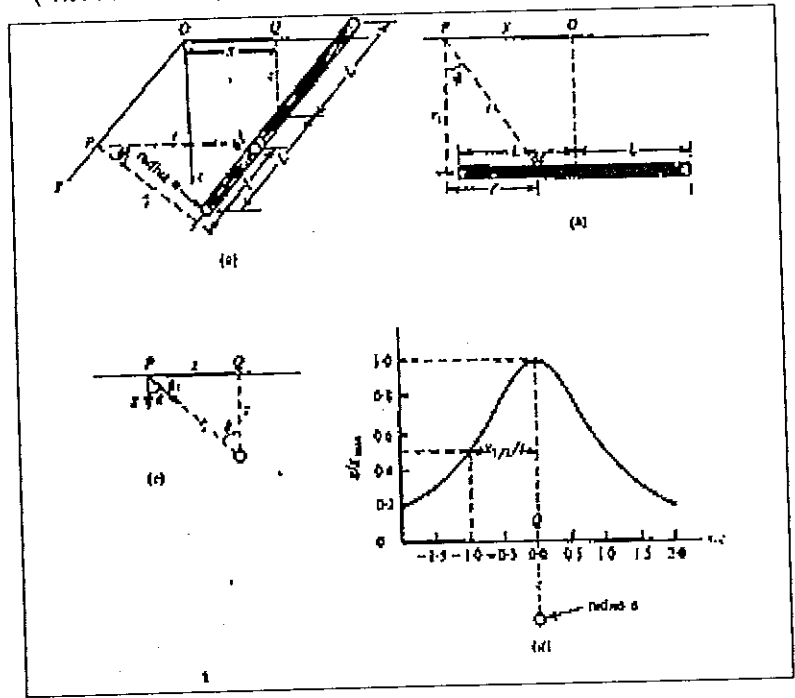
$$\Delta g = 2G\delta \left[\pi + x \cos^2 \beta \{ (F_2 - F_1) - (F_4 - F_3) \} \right] \quad \text{----- (29)}$$

$$\begin{aligned} F_i &= \psi_i \cot \psi_i - \ln(\sin \psi_i) \\ \text{เมื่อ } \psi_i &= \theta_i - \beta_i \\ i &= \tan^{-1} \left\{ (x/Z_i) + \tan \beta \right\} \end{aligned}$$

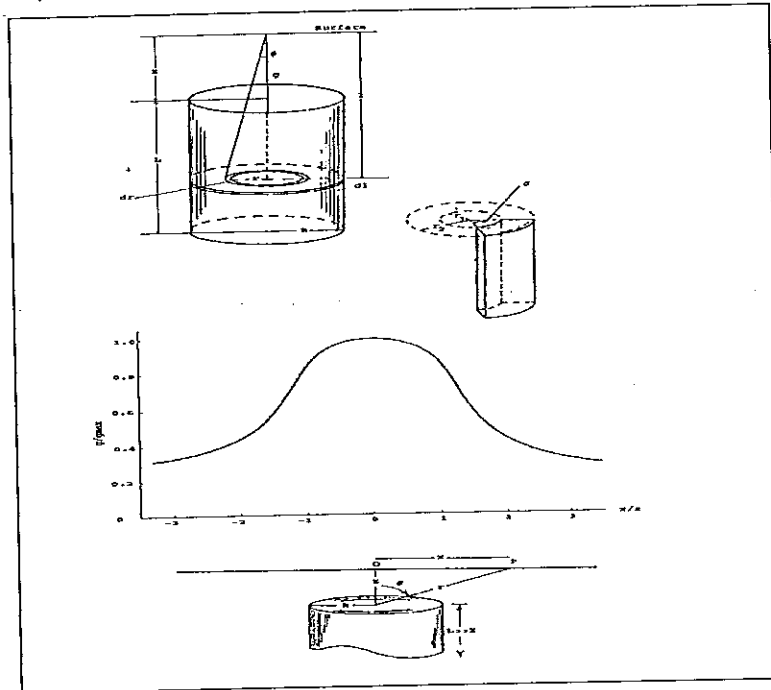
รูปที่ 34 แบบจำลองของค่าความถี่ผิดปกติเนื่องจากมวลทรงกลม
(ที่มา : Telford, et al., 1993)



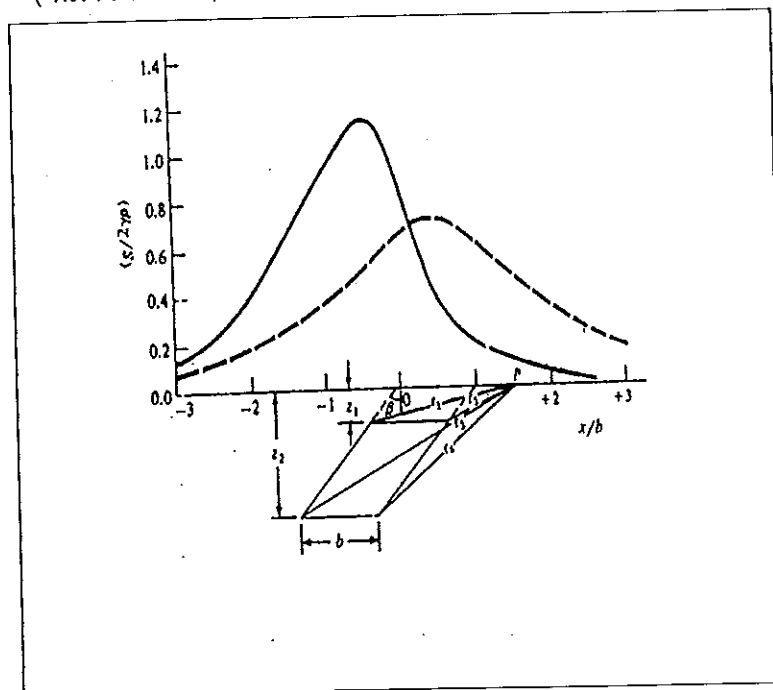
รูปที่ 35 แบบจำลองของค่าความถี่ผิดปกติเนื่องจากมวลทรงกระบอกตามแนวนอน
(ที่มา : Telford, et al., 1993)



รูปที่ 36 แบบจำลองของค่าความถี่ผิดปกติเนื่องจากมวลทรงกระบอกตามแนวตั้ง
(ที่มา : Telford, *et al.*, 1993)

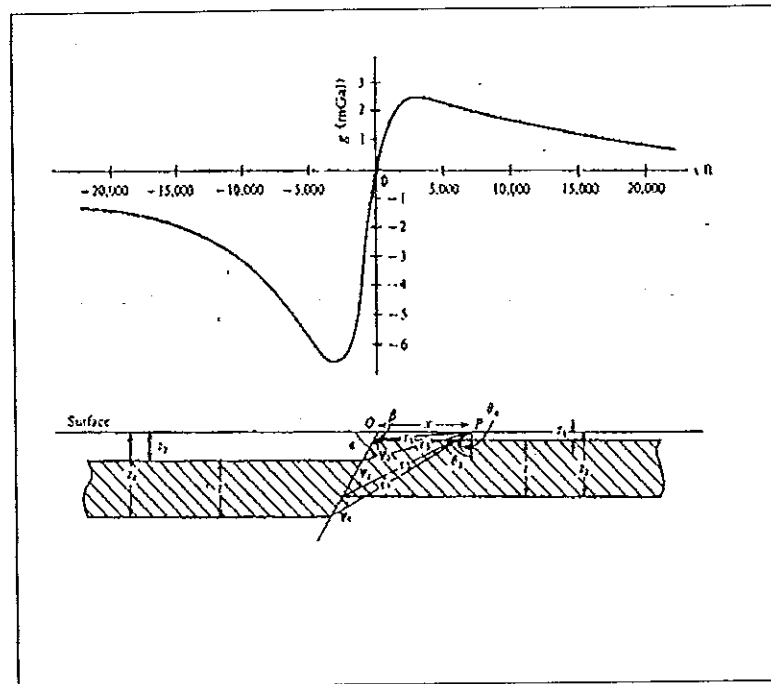


รูปที่ 37 แบบจำลองของค่าความถี่ผิดปกติเนื่องจากผนัง
(ที่มา : Telford, *et al.*, 1993)



รูปที่ 38 แบบจำลองของค่าความถ่วงผิดปกติเนื่องจากรอยเลื่อน

(ที่มา : Telford, et al., 1993)



การคำนวณหาค่าความถ่วงผิดปกติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

ก่อนที่จะมีการคำนวณหาค่าความถ่วงผิดปกติต้องมีการปรับแก้ข้อมูลต่างๆเพื่อให้มีความสัมพันธ์กัน เช่นการปรับแก้ดริฟท์ (drift correction) การปรับแก้ละติจูด (latitude correction) การปรับแก้ฟรี-แอร์ (free - air correction) การปรับแก้บูเงอร์ (bouger correction) และการปรับแก้เนื่องจากลักษณะภูมิประเทศ (terrain correction) โดยการปรับแก้ค่าต่างๆ ดังกล่าวมีขั้นตอนดังนี้

1. เปลี่ยนเวลาที่อ่านค่าให้อยู่ในชั่วโมง
2. นำค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดความถ่วงในภาคสนามนำมาปรับเป็นค่าความถ่วงให้เป็นหน่วยมิลลิแกลดังสมการที่ (30)

$$g_n = \{ (\text{Reading} - 1600) \times 1.0186 \} + 1629. \quad \text{----- (30)}$$

- เมื่อ g_n : ค่าความถ่วงในหน่วยมิลลิแกล ($10^{-5} m/s^2$)
 Reading : ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดความถ่วง
 1600 : ค่าคงตัวในช่วงการอ่านของเครื่องวัดความถ่วงแบบลาคอสท์และรอมเบิร์ก หมายเลข G-565
 1629.1 : ค่าคงตัวซึ่งต้องปรับตามค่า reading
 1.0186 : ตัวประกอบปรับเทียบ (calibration factor) ต้องปรับตามค่า reading

3. การปรับแก้ดริฟท์ เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติของเครื่องมือ เมื่ออุณหภูมิไม่คงตัวและอาจเกิดจากการคืบตัวของสปริง (กิตติชัย วัฒนานิกกร, 2526) โดยการหาสมการที่ (31)

$$Drift = \frac{(g_f - g_i) + \Delta}{T_f - T_i} \quad \text{----- (31)}$$

- เมื่อ g_f : ค่าความถ่วงของจุดวัดจุดเริ่มต้น ที่เวลา T_f มีหน่วยเป็น มิลลิแกล
 g_i : ค่าความถ่วงของจุดวัดจุดเริ่มต้น ที่เวลา T_i มีหน่วยเป็น มิลลิแกล
 T_f, T_i : เวลาของการวัดความถ่วงของจุดอ้างอิงที่จุดเริ่มต้นและจุดอ้างอิงสุดท้ายของการวัดครบรอบ มีเวลาเป็นชั่วโมง
 Δ : ค่าความแตกต่างของความถ่วงสัมบูรณ์ของจุดอ้างอิงที่เริ่มต้นกับจุดอ้างอิงสุดท้ายของการวัดครบรอบ มีหน่วยเป็นมิลลิแกล

4. นำค่าดริฟท์ที่คำนวณได้ไปหักลบค่าความถ่วงของจุดวัดใด ๆ ในแต่ละวงรอบเพื่อให้ค่าความถ่วงเป็นค่าที่เวลาเดียวกันดังสมการที่ (32)

$$g_{ncorr} = g_n + Drift \times (T_i - T_n) \quad \text{----- (32)}$$

- เมื่อ n : จำนวนเต็ม 1,2,3.....
 g_{ncorr} : ค่าความถ่วงใด ๆ ที่ปรับแก้ดริฟท์แล้ว มีหน่วยเป็น มิลลิแกล
 g_n : ค่าความถ่วงจุดใด ๆ มีหน่วยเป็น มิลลิแกล

T_p, T_n : เวลาของจุดวัดใด ๆ และจุดวัดเริ่มต้นของวงรอบแต่ละวงตามลำดับมี
หน่วยเป็น ชั่วโมง

5. การปรับแก้ละติจูด ความถ่วงจะมีการเปลี่ยนแปลงตามเส้นละติจูดเนื่องจากโลกมีรูปทรงที่กลมแบนขั้วและเนื่องจากความเร็วเชิงมุมของจุดบนผิวโลกมีค่าต่ำลงเรื่อย ๆ จนถึงขั้วโลก ความเร่งสู่ศูนย์กลางซึ่งเกิดจากการหมุนนี้มีองค์ประกอบในแนวรัศมีที่เป็นลบ ทำให้ค่าความถ่วงมีค่าต่ำลงจากขั้วโลกมายังเส้นศูนย์สูตร (วรวุฒิ โลหะวิจารณ์, 2537) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับแก้อิทธิพลดังกล่าวโดยใช้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (33) (Telford *et al.*, 1993)

$$g_\phi = 978,031.846 \times (1 + 0.005278895(\sin^2 \phi) + 0.000023462(\sin^4 \phi)) \quad \text{----- (33)}$$

เมื่อ g_ϕ : ค่าความถ่วงที่ละติจูด ϕ ที่ระดับน้ำทะเลปานกลาง มีหน่วยเป็น gu :
1 gu = $\mu\text{m/s}^2$
 ϕ : ค่าละติจูดของจุดวัด

เนื่องจากพื้นที่ที่ศึกษาวิจัยมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับพิสัยของเส้นละติจูดจึงใช้สมการที่ (34) ในการปรับแก้ (Yule *et al.*, 1998)

$$\Delta g_\phi = \pm 0.811 \sin(2\phi) \times \Delta s \quad \text{----- (34)}$$

เมื่อ Δs : ระยะทางตามแนวเหนือ - ใต้ระหว่างสถานีวัดใดๆ กับสถานีอ้างอิงหลัก
 Δg_ϕ : มีค่าเพิ่มขึ้น (+) เมื่อสถานีวัดอยู่ทางทิศใต้ของสถานีอ้างอิงหลัก และจะมีค่าลดลง (-) เมื่อสถานีวัดอยู่ทางทิศเหนือของสถานีอ้างอิงหลัก

6. การปรับแก้ฟรี-แอร์ เป็นการปรับแก้การลดลงของค่าความถ่วงกับความสูงในอากาศอิสระ ซึ่งเป็นผลมาจากระดับความสูงของแต่ละสถานีวัดไม่เท่ากัน ทั้งนี้เพื่อปรับค่าความถ่วงผิดปกติให้อยู่ในระดับเดียวกัน ซึ่งเรียกว่าระดับมูลฐาน (กิตติชัย วัฒนานิก, 2526) ซึ่งหาได้จากสมการที่ (35) (Yule *et al.*, 1998)

$$\Delta g_{FA} = \pm 0.3086 \times \Delta h \quad \text{-----} \quad (35)$$

เมื่อ Δg_{FA} : ค่าปรับแก้ฟรี-แอร์ จะมีค่าเพิ่มขึ้น (+) เมื่อสถานีวัดอยู่สูงกว่าสถานีอ้างอิงหลัก และจะมีค่าลดลง (-) เมื่อสถานีวัดอยู่ทางทิศเหนือของสถานีอ้างอิงหลัก

Δh : ค่าความสูงที่แตกต่างระหว่างสถานีวัดใดๆกับสถานีอ้างอิงหลัก

7. การปรับแก้บูร์เกอร์ เป็นการปรับแก้เนื่องจากอิทธิพลความโน้มถ่วงเนื่องจากความหนาแน่น (ρ) ระหว่างชั้นหินมีลักษณะเป็นแผ่นมวลขนาดใหญ่วางอยู่ในแนวนอนด้วยความหนา h ซึ่งสามารถปรับแก้ได้ตามสมการที่ (36) (Yule *et al.*, 1998)

$$\Delta g_B = \pm 0.04192 \rho \times \Delta h \quad \text{-----} \quad (36)$$

เมื่อ Δg_B : ค่าปรับแก้บูร์เกอร์ จะมีค่าลดลง (-) เมื่อสถานีวัดอยู่สูงกว่าสถานีอ้างอิงหลัก และจะมีค่าเพิ่มขึ้น (+) เมื่อสถานีวัดอยู่ทางทิศเหนือของสถานีอ้างอิงหลัก

ρ : ค่าความหนาแน่นของหินใต้จุดวัด มีหน่วยเป็น กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

Δh : ค่าความสูงที่แตกต่างระหว่างสถานีวัดใดๆกับสถานีอ้างอิงหลัก

8. ค่าความถ่วงบูร์เกอร์ เป็นการนำเอาค่าความถ่วงที่ปรับแก้ทุกด้านแล้วมารวมกันซึ่งหาได้จากสมการที่ (37) (Yule *et al.*, 1998)

$$g_B = g_{obs} \pm \Delta g_L \pm \Delta g_{FA} \pm \Delta g_B \quad \text{-----} \quad (37)$$

9. ค่าความถ่วงผิดปกติบูร์เกอร์ คือผลต่างของค่าโน้มถ่วงบูร์เกอร์ของสถานีวัดใด ๆ กับสถานีอ้างอิงหลัก หาได้จากสมการ (38) (Yule *et al.*, 1998)

$$\Delta g_B = g_B - g_{base} \quad \text{-----} \quad (38)$$

10. นำค่าผิวดินรูปกรวยและตำแหน่งของสถานีวัดมาทำแผนที่คอนทัวร์โดยใช้โปรแกรม Winsurf Version 5

11. นำค่าที่ได้จากข้อ 2.2.8 มาสร้างแบบจำลองภาคตัดขวาง ด้วยโปรแกรม Geo Vista AB-GMM, Version 1.31

12. นำค่าที่ได้จากข้อ 2.2.8 มาตรวจสอบแบบจำลองด้วยโปรแกรม Geosolf

3. การใช้เรดาร์ห้วยความลึก

ทฤษฎี

การใช้เรดาร์ห้วยความลึกอาศัยการตอบสนองของสัญญาณเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางไฟฟ้าของชั้นดินหรือชั้นหิน ดังนั้นเมื่อส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลงไปในชั้นดินโดยถือว่าการตกกระทบระหว่างรอยต่อของตัวกลางเป็นแบบตกกระทบตั้งฉาก(normal incident) ซึ่งมีสมการการเดินทางของคลื่นเป็นดังสมการ (39) (Bergstrom, 1998) ด้วยความเร็วของคลื่นในชั้นดินดังสมการ (40) (Reppert et al., 2000) สัญญาณส่วนหนึ่งจะมีการสะท้อนเข้าสู่เครื่องรับสัญญาณ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของชั้นดินหาได้จากสมการ (41)

$$E = E_0 e^{-\beta z} \cos(\omega(t - \frac{z}{v})) \quad \text{----- (39)}$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad \text{----- (40)}$$

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad \text{----- (41)}$$

เมื่อ v : ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางใด ๆ มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที

- c : ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศ เท่ากับ 3×10^8 เมตร/วินาที
- ϵ_r : ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์
- μ_r : ความซึมผ่านได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์
- σ : สภาพนำ มีหน่วยเป็น โหมห์/เมตร
- ϵ : สภาพยอม มีหน่วย เป็น As/Vm
- R : สัมประสิทธิ์การสะท้อนระหว่างตัวกลางที่ 1 กับตัวกลางที่ 2
- $\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}$: สภาพยอมสัมพัทธ์ (permittivity) ของตัวกลางที่ 1 และ 2 ตามลำดับมีหน่วยเป็น As/Vm

โดยที่ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและค่าคงตัวสภาพยอมสัมพัทธ์ในตัวกลางต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ และความเร็วในตัวกลางต่าง ๆ

(ที่มา : ดัดแปลงจาก Mala Geoscience, 1997.)

Medium	ϵ_r	Velocity (m/ μ s)
Air	1	300
Limestone	7-16	75-113
Granite	5-7	113-134
Schist	5-15	77-134
Concrete	4-10	95-150
Clay	4-16	74-150
Silt	9-23	63-100
Sand	4-23	55-150
Ice	3-4	150-173

จากข้อสมมุติข้อที่ 5 ของ Fruhwirth *et al.* (1996) และ Bergstrom (1998) ความซึมผ่านได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์มีค่าเข้าใกล้ 1 ดังนั้นความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในชั้นดินหาได้จากสมการที่ (42) (Fruhwirth *et al.*, 1996) และ (Bergstrom, 1998)

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{----- (42)}$$

กรณีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางทำให้แอมพลิจูดของคลื่นลดลงตามระยะทาง เมื่อขนาดของแอมพลิจูดลดลงเป็นร้อยละ 37 ของแอมพลิจูดเดิมระยะที่ทำให้คลื่นแม่เหล็กเดินทางได้นี้เรียกว่าความลึกผิว (skin depth,) หาได้จากสมการที่ (43) (Stevens *et al.*,1995)

$$\frac{1}{\delta} = \omega \left\{ \mu \epsilon / 2 \left[\left(1 + \sigma^2 / \omega^2 \epsilon^2 \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad \text{----- (43)}$$

- เมื่อ : ความลึกผิว มีหน่วยเป็น เมตร
 : ความถี่เชิงมุม (= $2\pi f$)
 : ความนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น ซีเมนต์ต่อเมตร

ในกรณีที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยความถี่ช่วงเมกะเฮิรตซ์ความลึกผิวจากสมการที่ (43) จึงลดรูปเป็นสมการที่ (44) (Stevens *et al.*, 1995; Bergstrom, 1998)

$$= (2/\sigma)(\epsilon/\mu)^{1/2} \quad \text{----- (44)}$$

การคำนวณหาความลึกของสัญญาณจากการหยั่งลึก หาได้จากสมการที่ (45) (Parasnis, 1997 ; Bergstrom, 1998)

$$h = \frac{\{(vt)^2 - x^2\}^{1/2}}{2} \quad \text{----- (45)}$$

- เมื่อ h : ความลึกของวัตถุ มีหน่วยเป็น เมตร
 v : ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางมีหน่วยเป็น เมตร/วินาที
 t : เวลาที่เดินทางไปกลับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีหน่วยเป็น วินาที
 x : ระยะห่างระหว่างตัวส่งสัญญาณกับตัวรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีหน่วยเป็น เมตร

เนื่องจากการสำรวจมีการตั้งระยะระหว่างสายส่งสัญญาณกับสายรับสัญญาณ (common offset survey) จึงทำให้ระยะนี้คงตัว และหรือสมมติว่าเกิด normal incident ($x = 0$) ความลึกของระนาบรอยต่อของรอยต่อหรือสัญญาณผิดปกติหาได้จากสมการที่ (46) (Davis and Annan, 1989)

$$h = \frac{tc}{2\sqrt{\epsilon_r}} \text{----- (46)}$$

การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

โปรแกรม Gradix v1 เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถช่วยการแปลความจากการสำรวจได้อย่างรวดเร็ว ทั้งการหาค่าความเร็วของชั้นดิน ค่าความลึกของวัตถุหรือชั้นดินแต่ละชั้น และจากสัญญาณที่ผิดปกติ ซึ่งมีรายละเอียดมากเกินกว่าที่จะอธิบายไว้ ณ ที่นี้

บทที่ 3

ผลการทดลองและวิจารณ์

สำหรับบทนี้ได้แสดงผลการศึกษาวิจัยและวิจารณ์โดยเสนอการศึกษาตามลำดับดังนี้

ผลการศึกษา

1. ผลการศึกษาด้านคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห
2. ผลการศึกษาด้านความถ่วง
3. ผลการศึกษาด้านเรดาร์หยั่งความลึก

วิจารณ์ผลการศึกษา

1. วิจารณ์ผลการศึกษาด้านคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห
2. วิจารณ์ผลการศึกษาด้านความถ่วง
3. วิจารณ์ผลการศึกษาด้านเรดาร์หยั่งความลึก

ผลการศึกษา

1. ผลการศึกษาด้านคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห

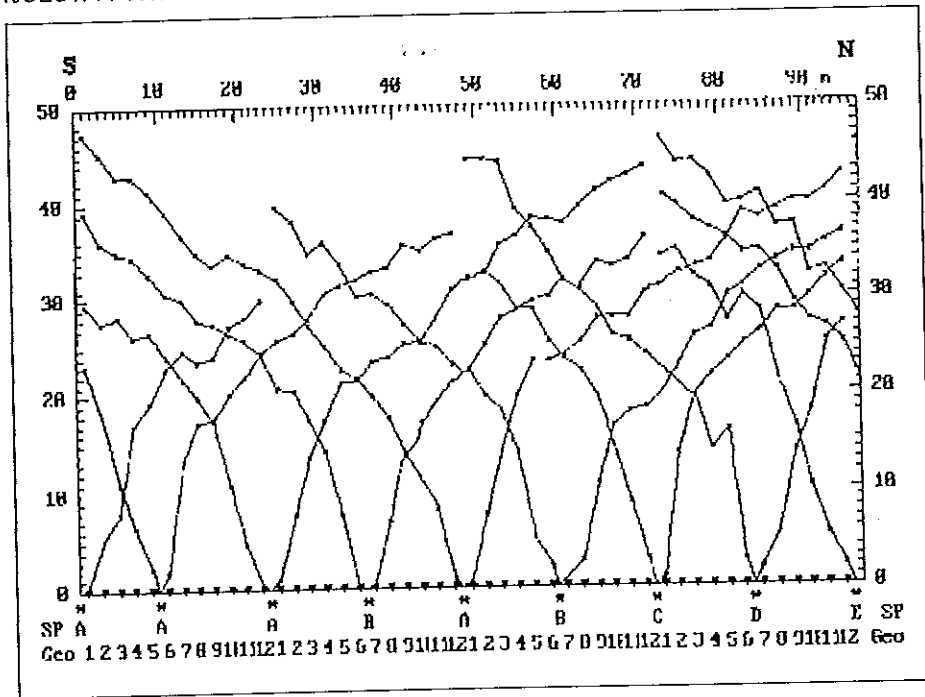
การศึกษาด้านคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห มีจุดประสงค์เพื่อกำหนดโครงสร้างของชั้นดิน และหาชั้นหินปูนในบริเวณโรงเรียนบ้านทุ่งวิมาน ซึ่งได้ทำการวางแผนสำรวจทั้งหมด 21 แนววัด ครอบคลุมพื้นที่ที่ทำการศึกษา ซึ่งตำแหน่งของแนววัดแต่ละแนวแสดงดังรูปที่ 24 ผลจากการวิเคราะห์ความเร็วที่ได้แต่แนววัด และอาศัยการเปรียบเทียบกับตารางที่ 4 และ 5 ผลปรากฏว่า ความเร็วของคลื่นยืดหยุ่นมืออยู่ 3 ช่วงด้วยกันคือ ช่วงแรกมีความเร็วจาก 328 ถึง 800 เมตรต่อวินาที คาดว่าน่าจะเป็นชั้นดินทรายแห้ง ช่วงที่ 2 มีความเร็วจาก 1,284 ถึง 1,867 คาดว่าน่าจะเป็นชั้นดินเหนียว และช่วงที่ 3 มีความเร็วจาก 2,268 ถึง 4,766 เมตรต่อวินาที คาดว่าน่าจะเป็นชั้นของหินปูน และเมื่อนำผลที่ได้มาสร้างแบบจำลองได้ชั้นดินทั้งหมด 3 ชั้น ชั้นแรกมีความหนาประมาณ 5 เมตร ชั้นที่ 2 มีความหนาประมาณ 6 เมตร ผลการศึกษาด้านคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเหในแต่ละแนววัด แสดงดังตารางที่ 8 และแบบจำลองของชั้นดินแต่ละแนววัดแสดงดังรูปที่ 39 - 59

ตารางที่ 8 ผลการศึกษาคลื่นไหวสะเทือนแต่ละแนววัด

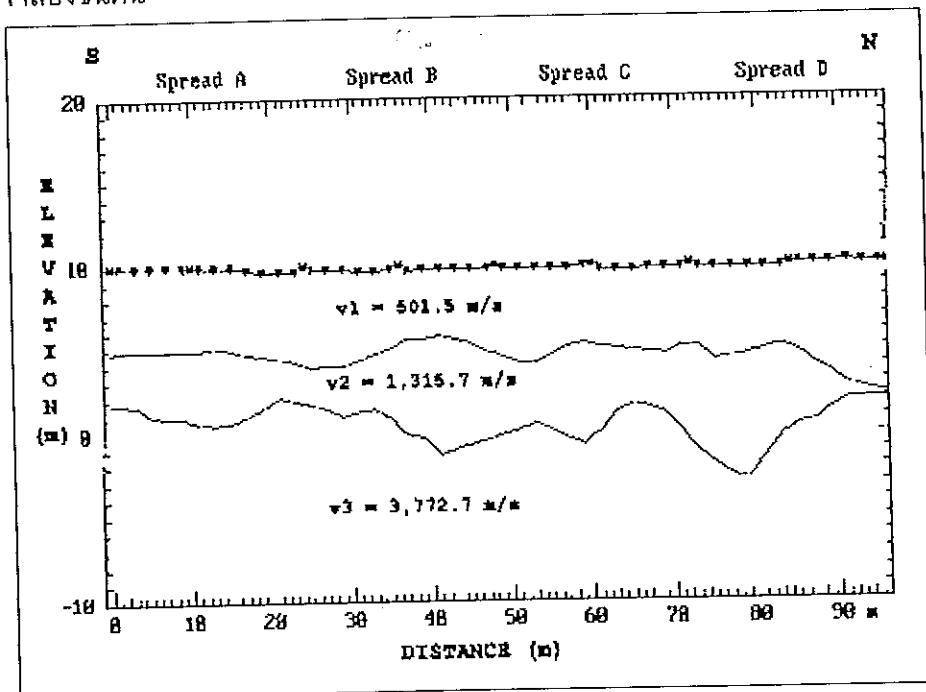
แนววัดที่	ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)			ความหนา (เมตร)			รูปที่
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3	
00	501	1,315	3,773	2-4	2-4		39
01	469	1,330	3,234	2-3	5-6		40
02	526	1,341	3,132	2-3	6-8		41
03	415	1,868	3,366	2-4	7-10		42
04	575	1,467	4,766	3-5	8-9		43
05	475	1,519	3,012	2-6	8-9		44
06	333	1,284	3,660	2-4	6-10		45
07	470	1,360	3,611	2-4	11-12		46
08	372	1,360	3,504	2-3	6-8		47
09	429	1,455	3,399	2-4	11-12		48
10	337	1,447	4,280	1-2	6-8		49
11	388	1,326	2,688	2-3	5-6		50
12	460	1,474	3,277	2-4	6-7		51
13	426	1,307	3,029	2-3	6-8		52
14	800	1,445	2,268	2-4	6-8		53
15	376	1,443	3,127	2-3	5-6		54
16	472	1,473	2,695	2-3	5-7		55
17	472	1,348	4,713	2-6	6-7		56
18	625	1,441	2,630	1-2	6-10		57
19	587	1,597	3,367	3-5	5-6		58
20	373	1,480	3,993	2-4	5-6		59

รูปที่ 39 แนววัดที่ 00

ก. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเห

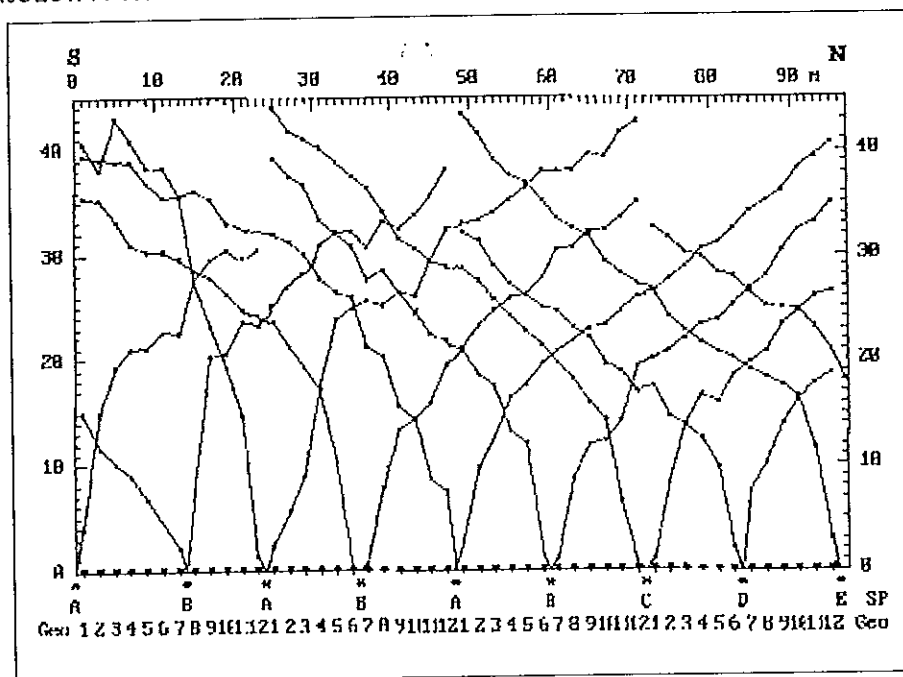


ข. แบบจำลองชั้นดิน

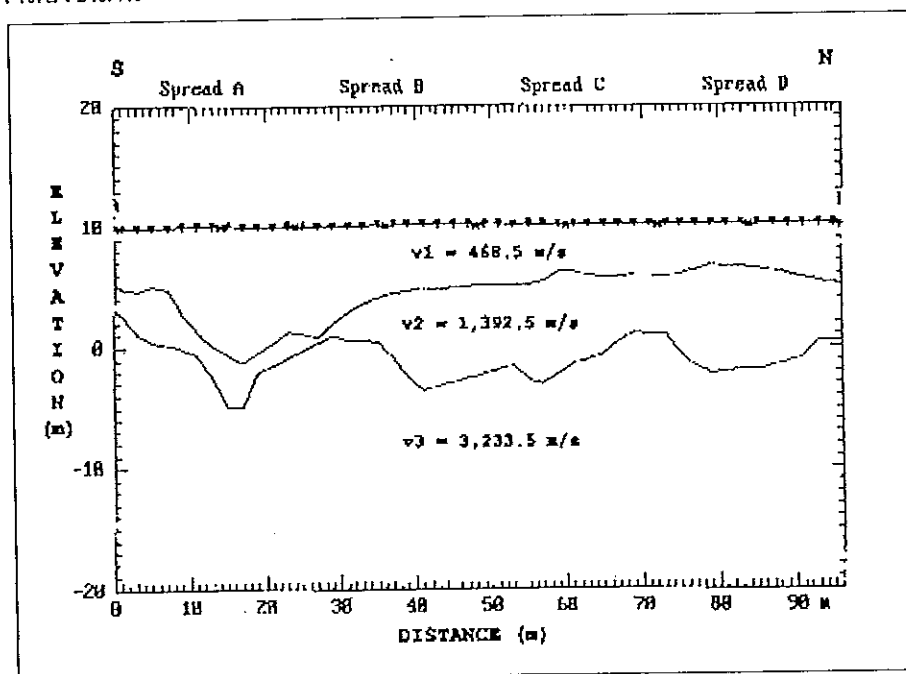


รูปที่ 40 แนววัดที่ 01

ก. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเห

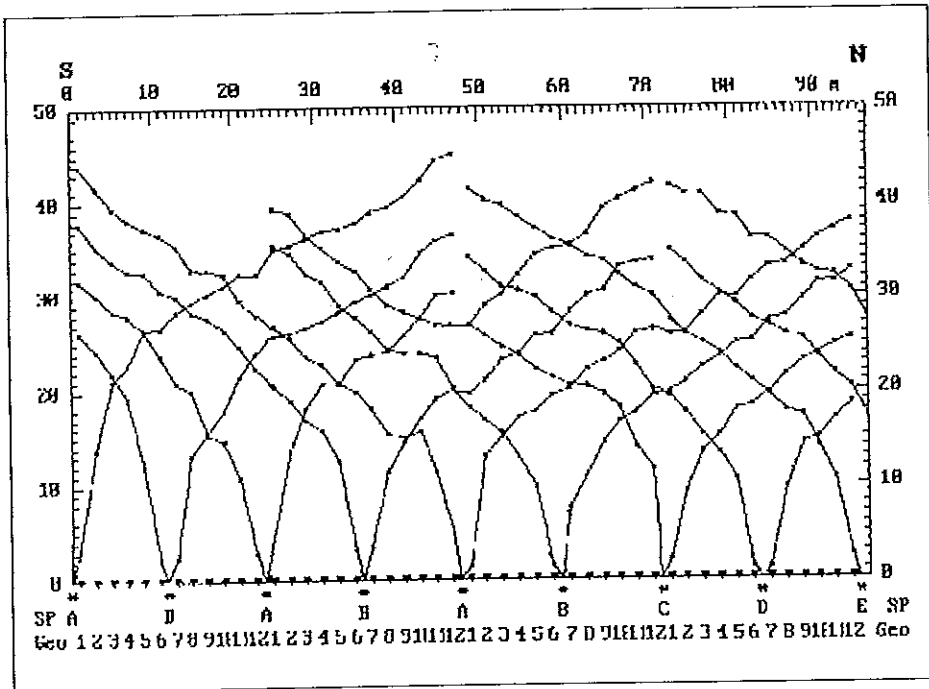


ข. แบบจำลองชั้นดิน

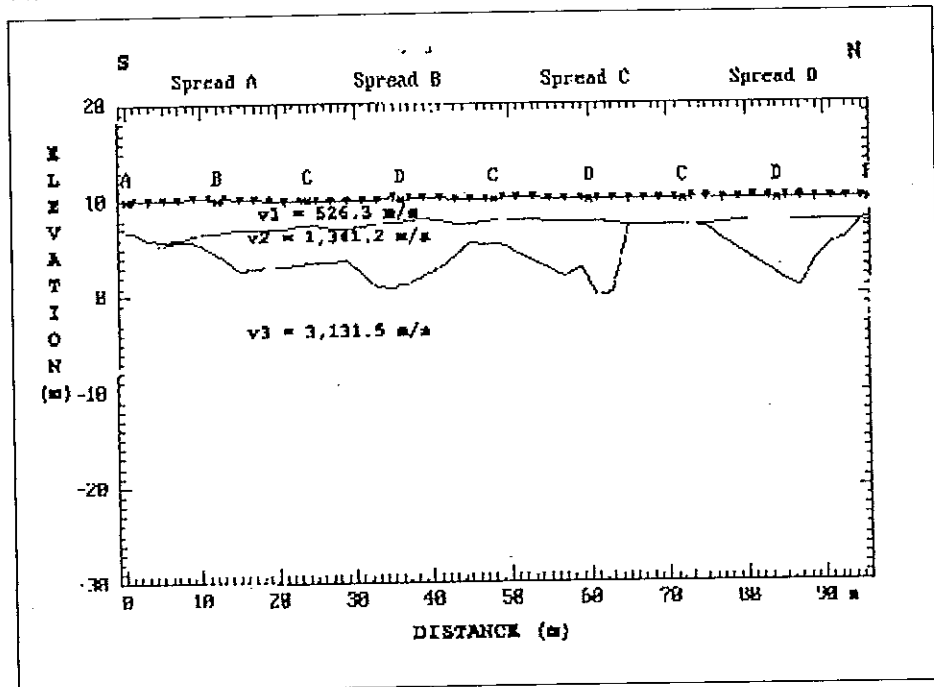


รูปที่ 41 แนววัดที่ 02

ก. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเห

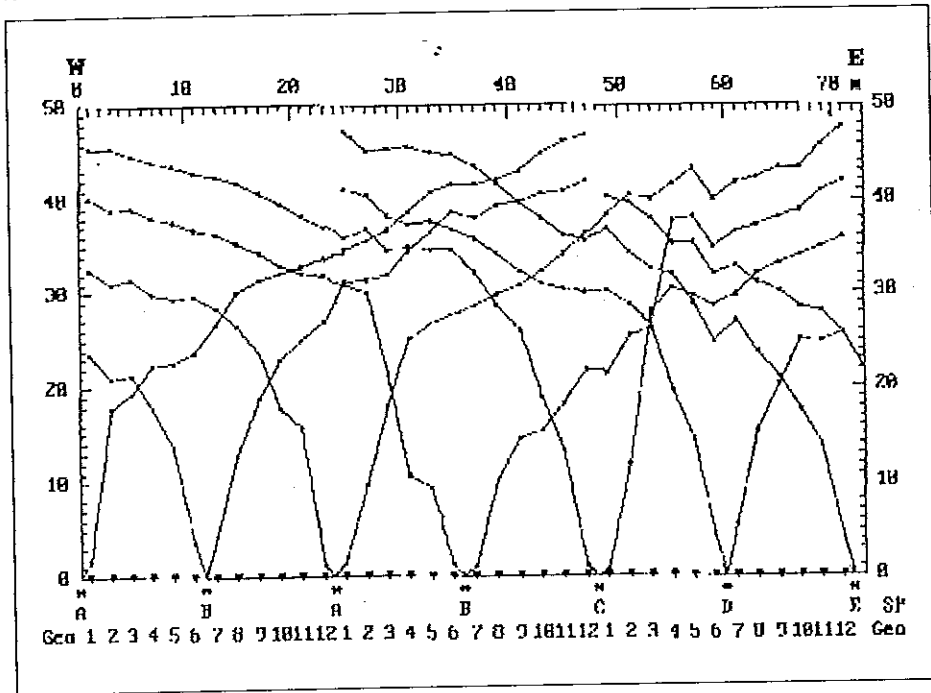


ข. แบบจำลองชั้นดิน

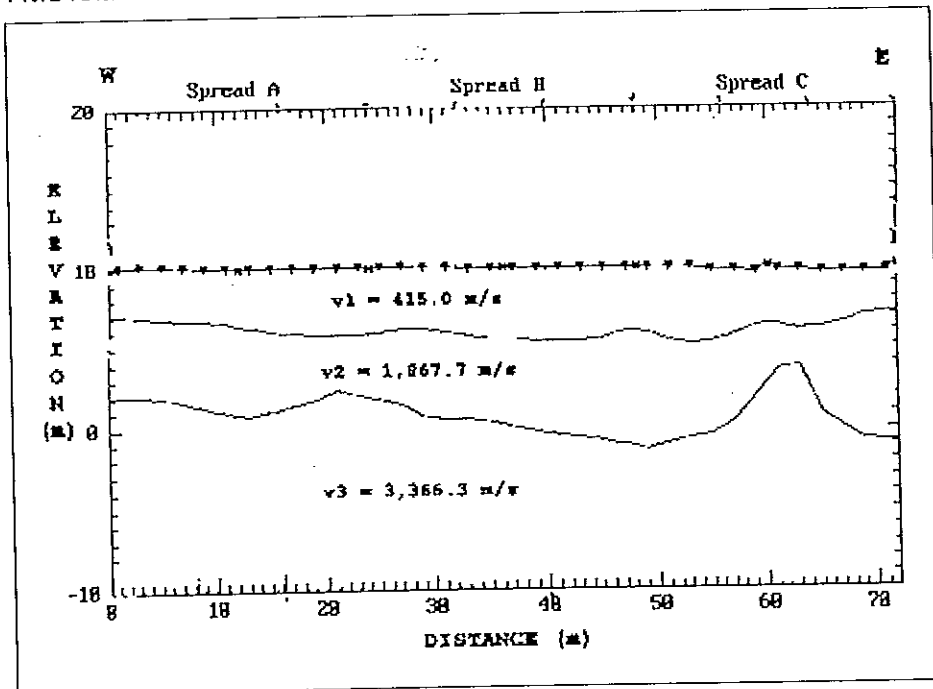


รูปที่ 42 แนววัดที่ 03

ก. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเห

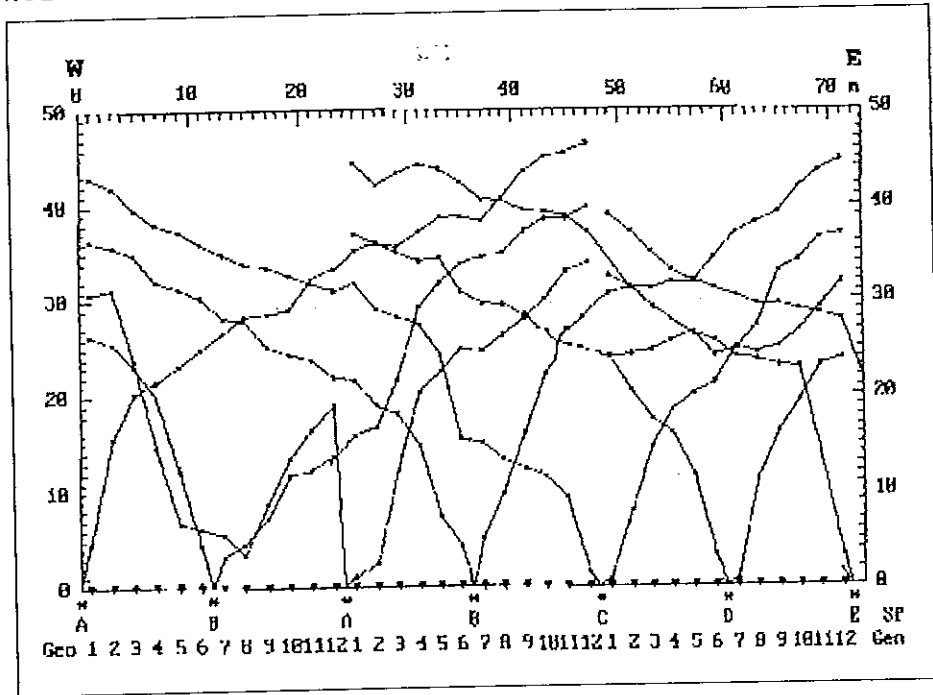


ข. แบบจำลองชั้นดิน

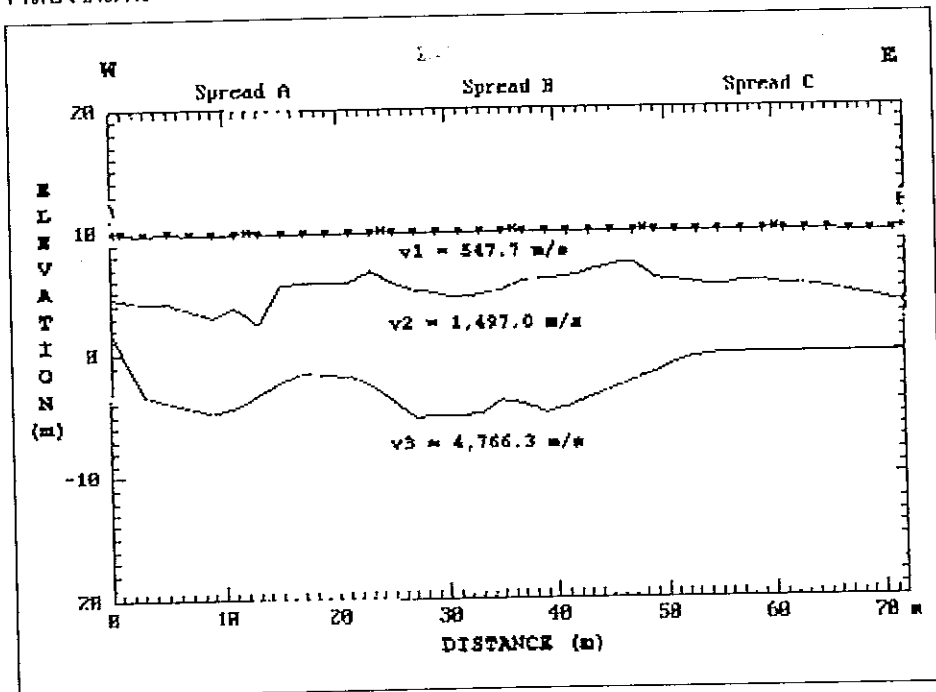


รูปที่ 43 แนววัดที่ 04

ก. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเห

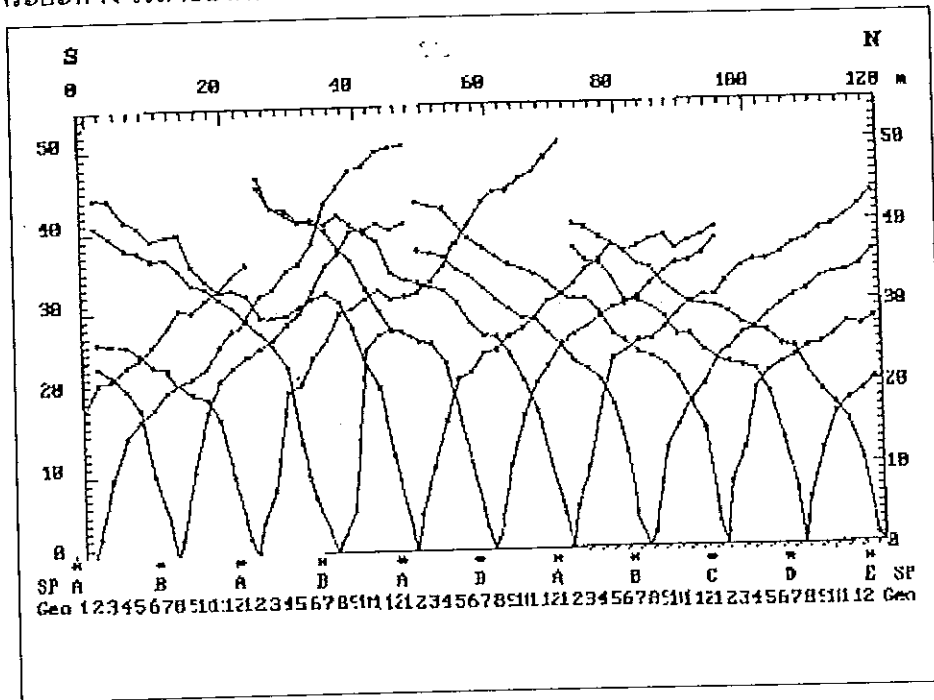


ข. แบบจำลองชั้นดิน

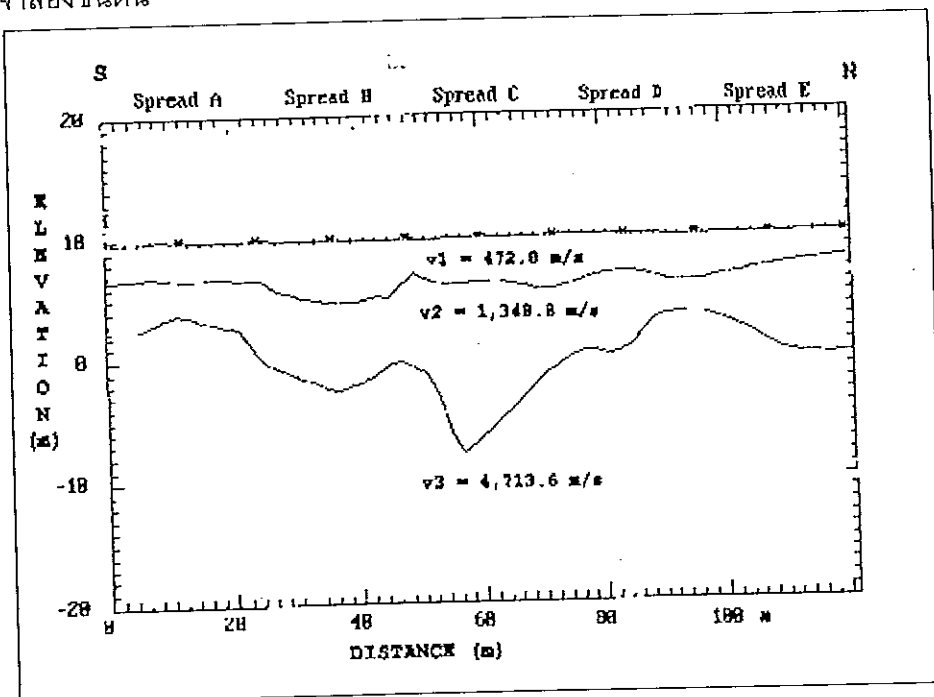


รูปที่ 44 แนววัดที่ 05

ก. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเห

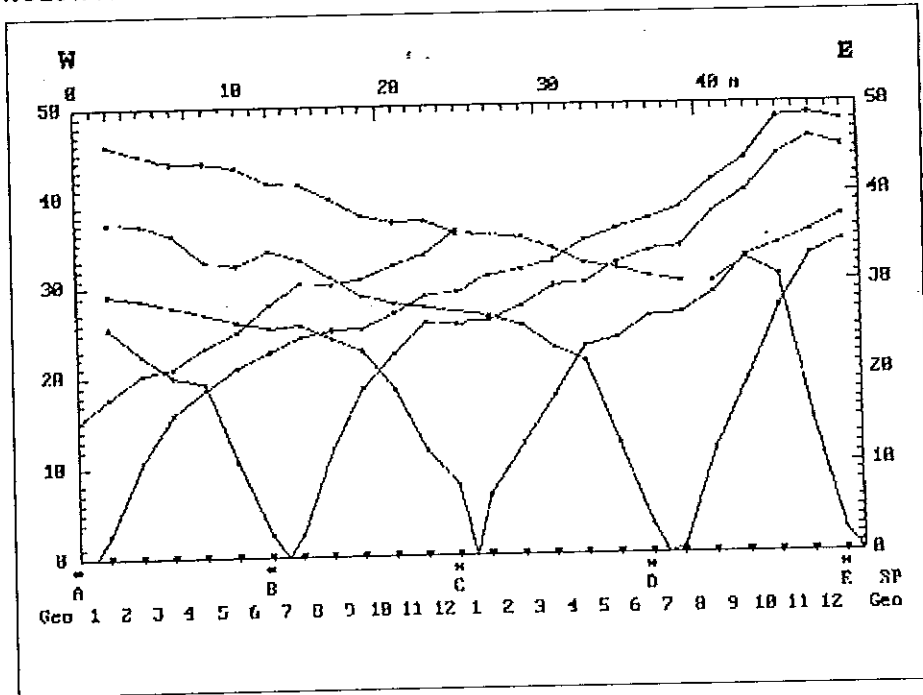


ข. แบบจำลองชั้นดิน

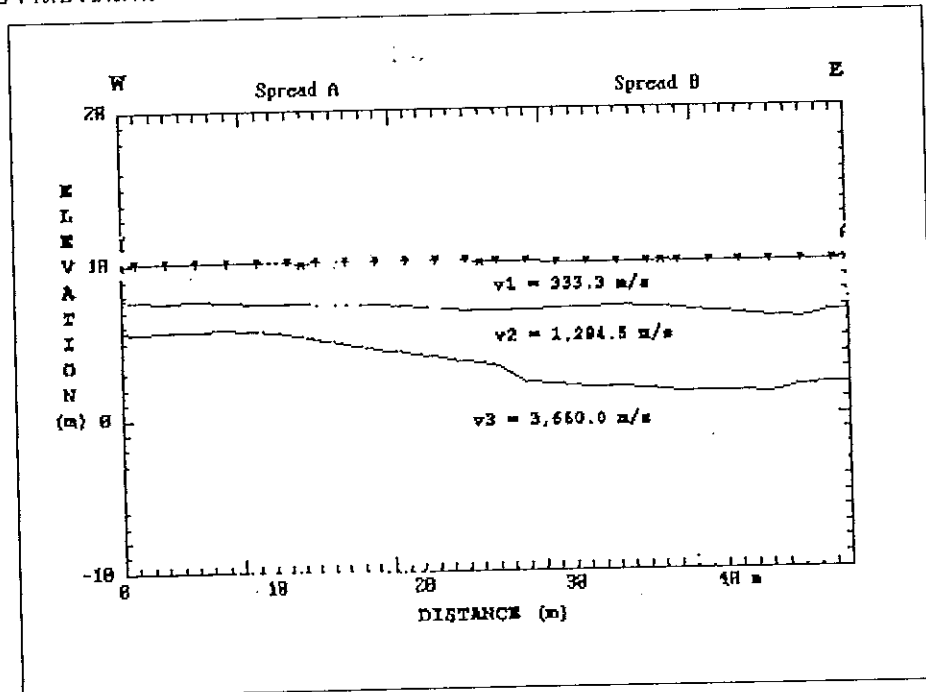


รูปที่ 45 แนววัดที่ 06

ก. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเห

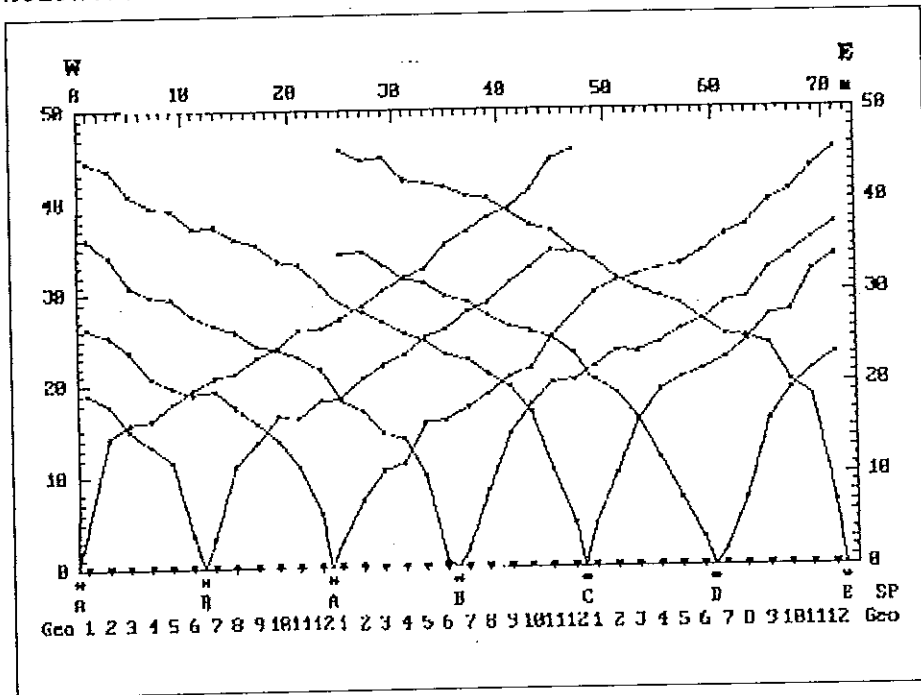


ข. แบบจำลองชั้นดิน

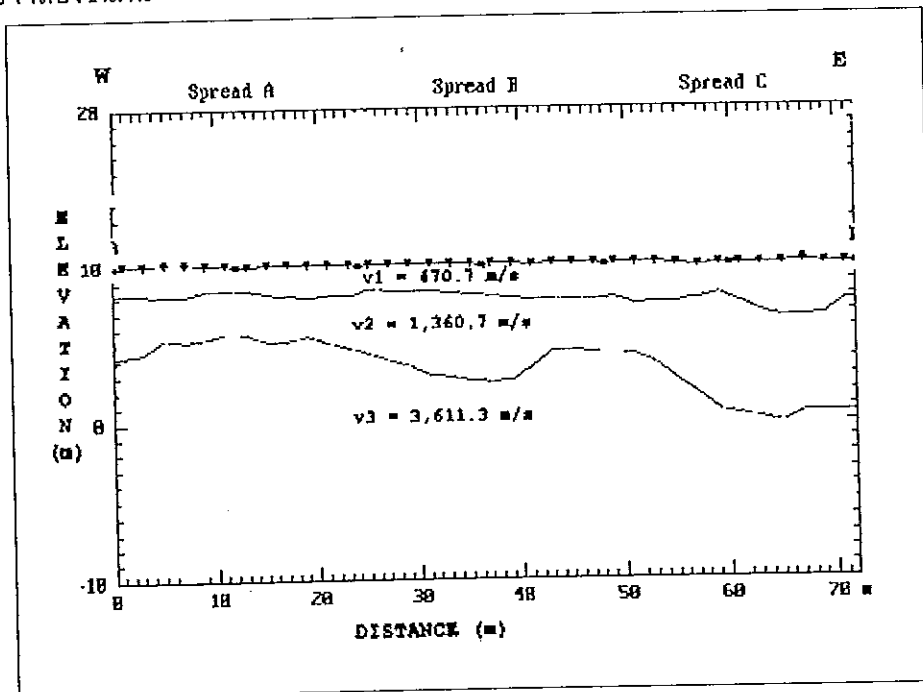


รูปที่ 46 แนววัดที่ 07

ก. ภาพระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเห

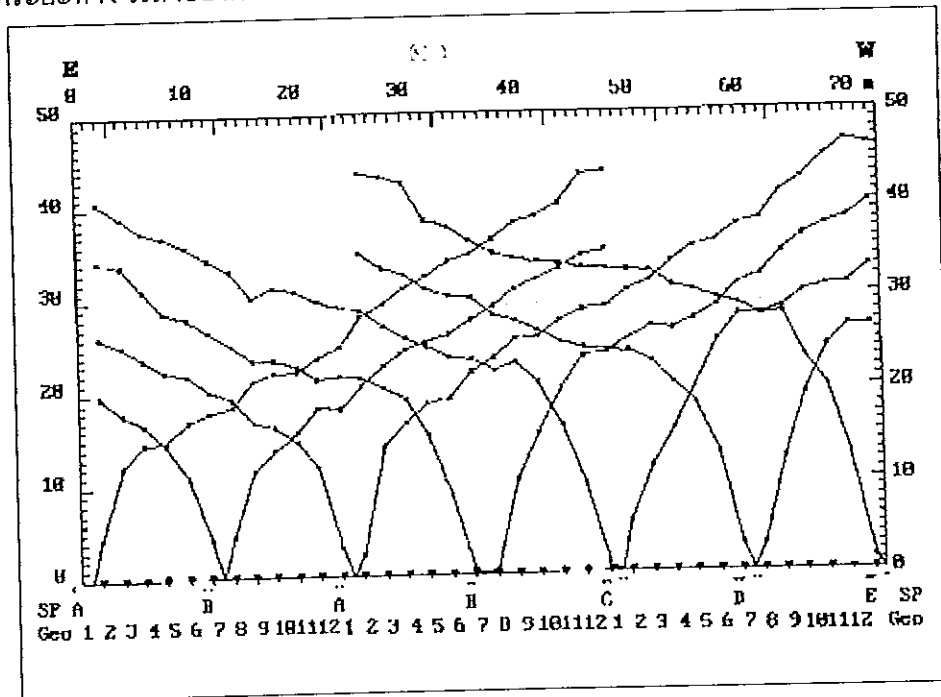


ข. แบบจำลองชั้นดิน

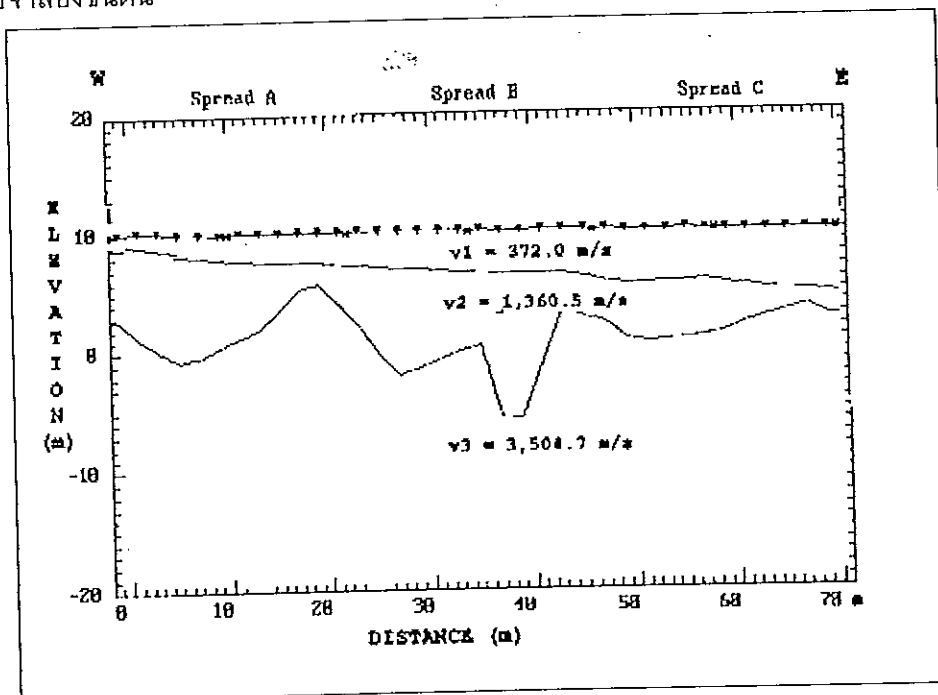


รูปที่ 47 แนววัดที่ 08

ก. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเห

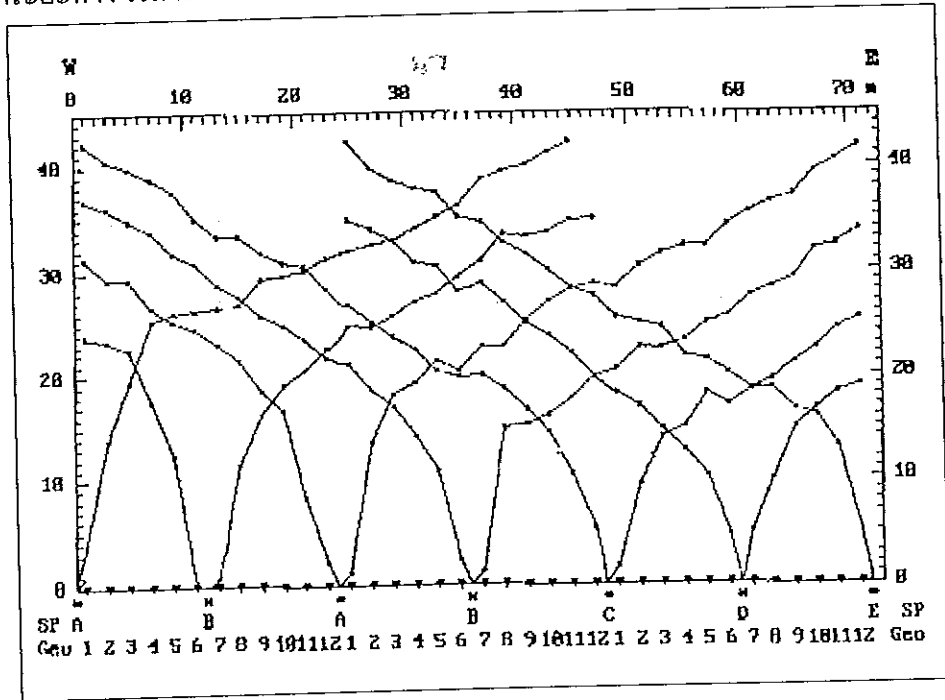


ข. แบบจำลองชั้นดิน

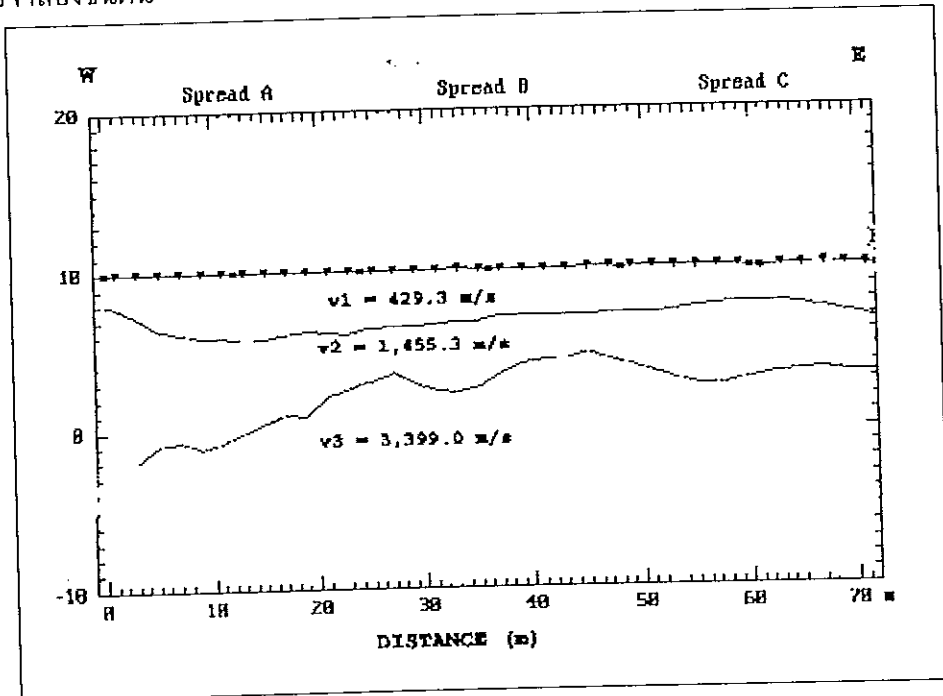


รูปที่ 48 แนววัดที่ 09

ก. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเห

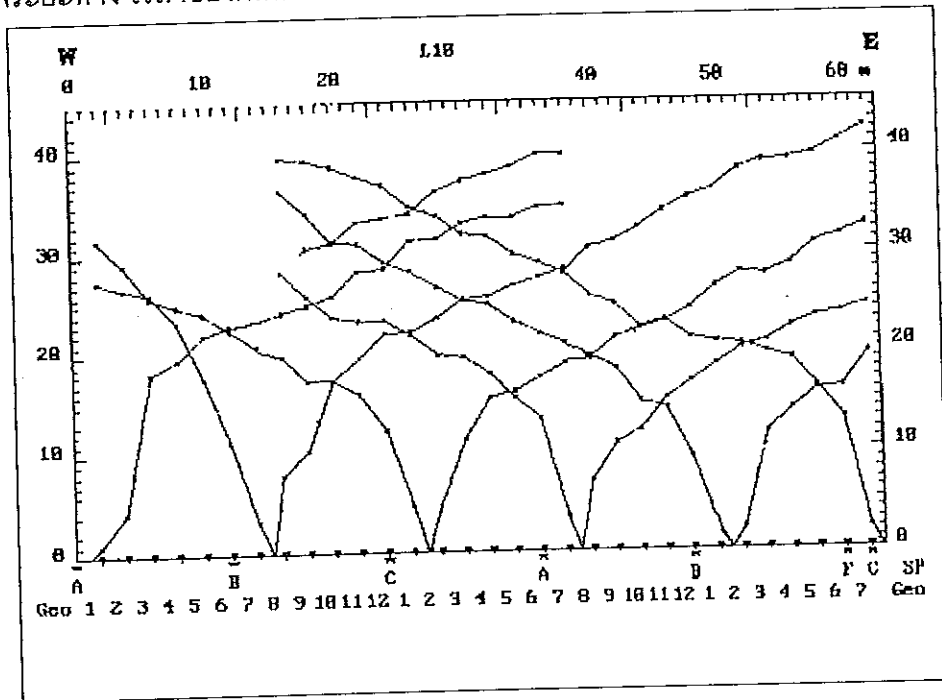


ข. แบบจำลองชั้นดิน

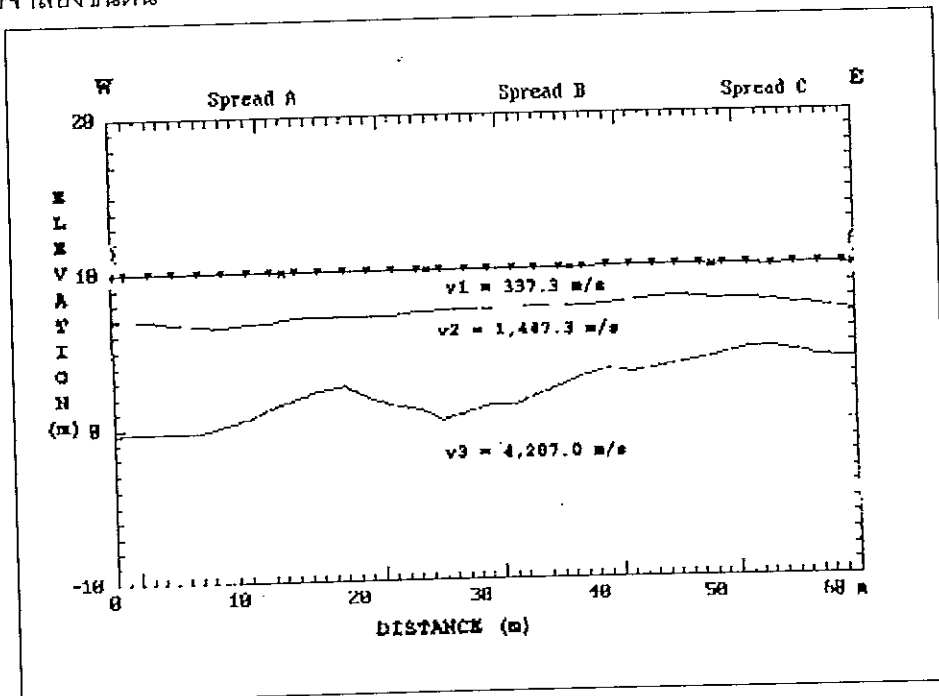


รูปที่ 49 แนววัดที่ 10

ก. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเห

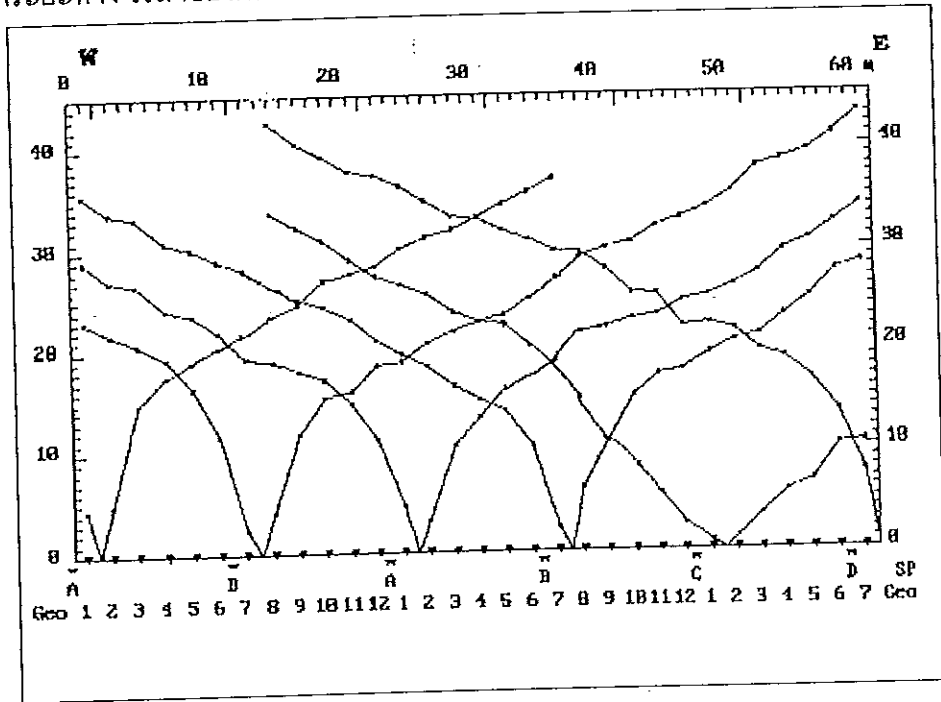


ข. แบบจำลองชั้นดิน

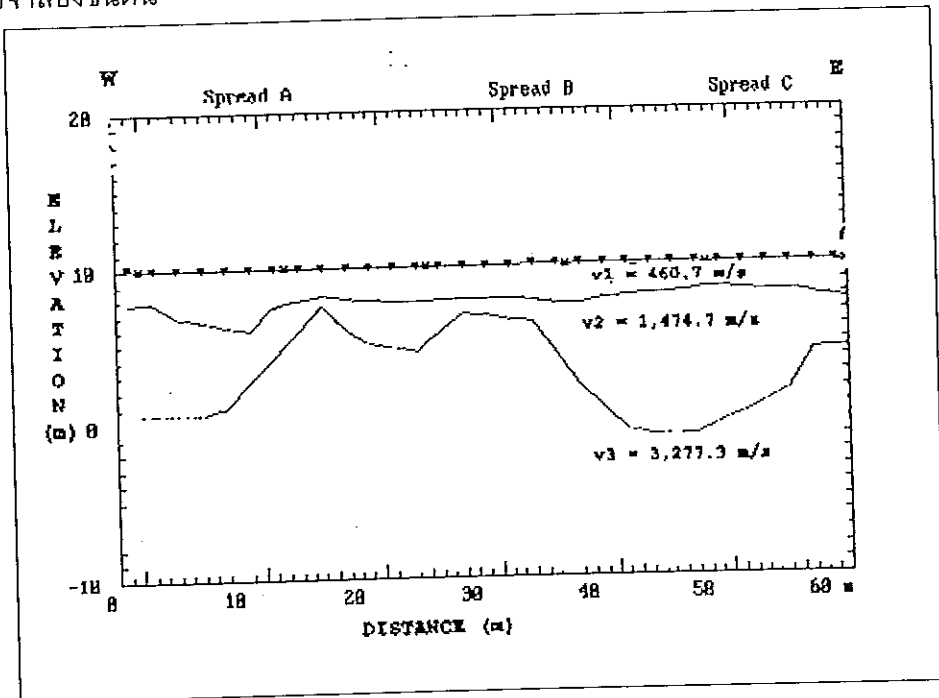


รูปที่ 50 แนววัดที่ 11

ก. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเห

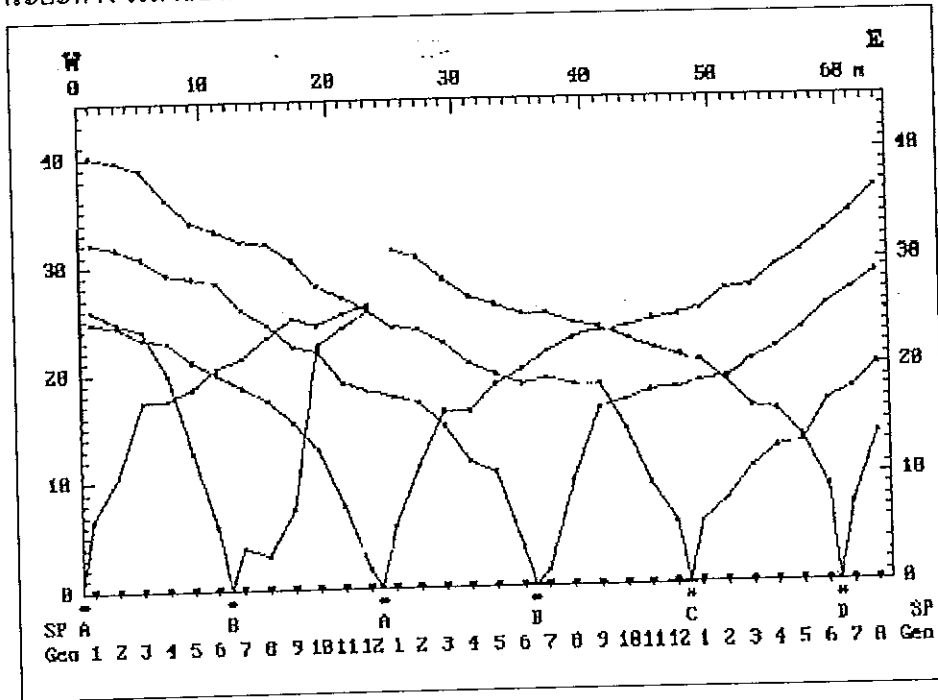


ข. แบบจำลองชั้นดิน

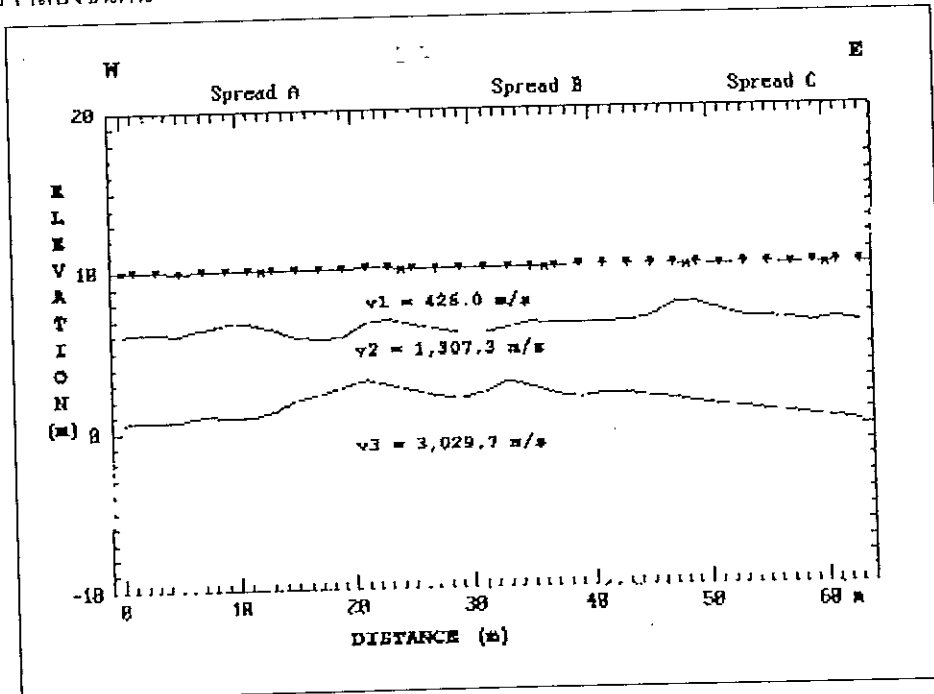


รูปที่ 51 แนววัดที่ 12

ก. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเห

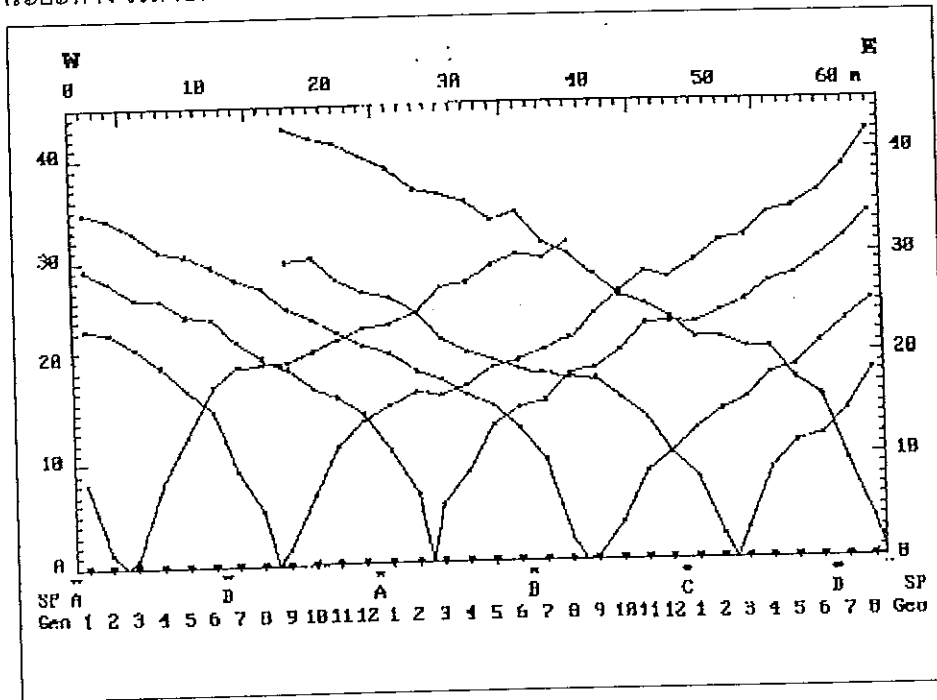


ข. แบบจำลองชั้นดิน

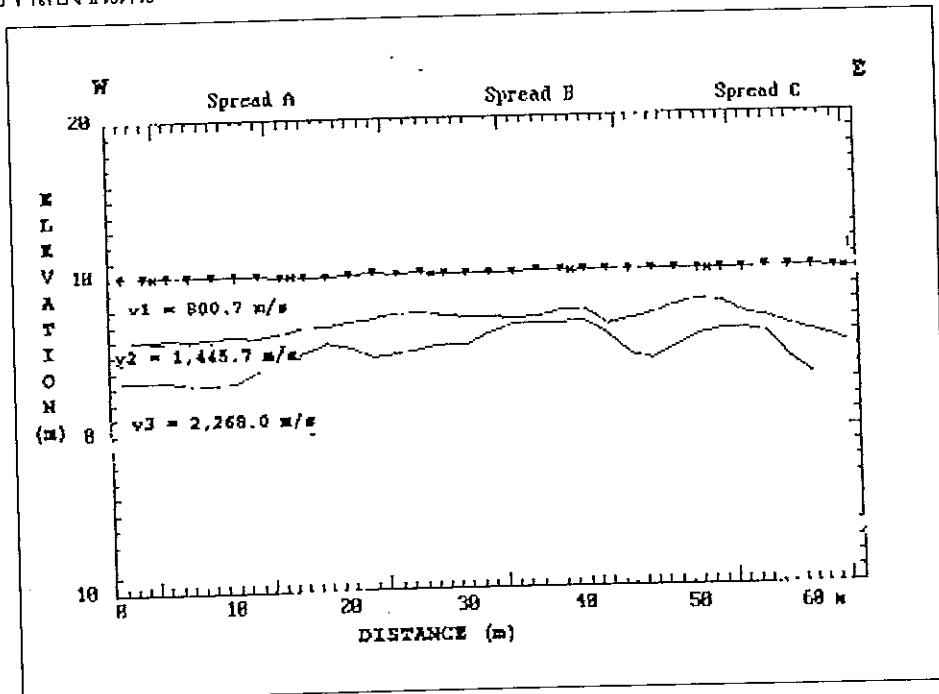


รูปที่ 52 แนววัดที่ 13

ก. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเห

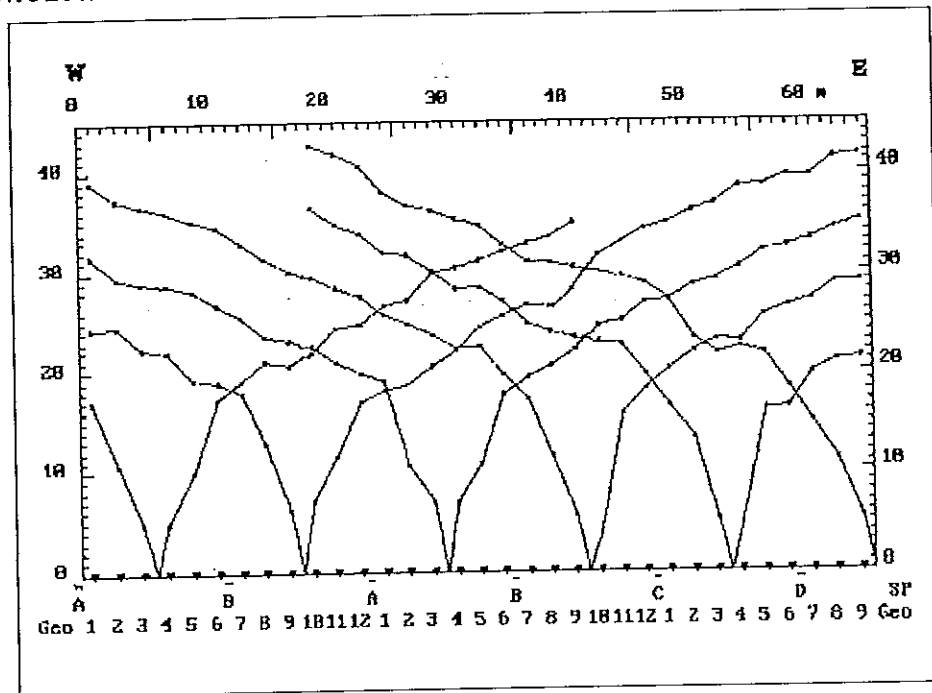


ข. แบบจำลองชั้นดิน

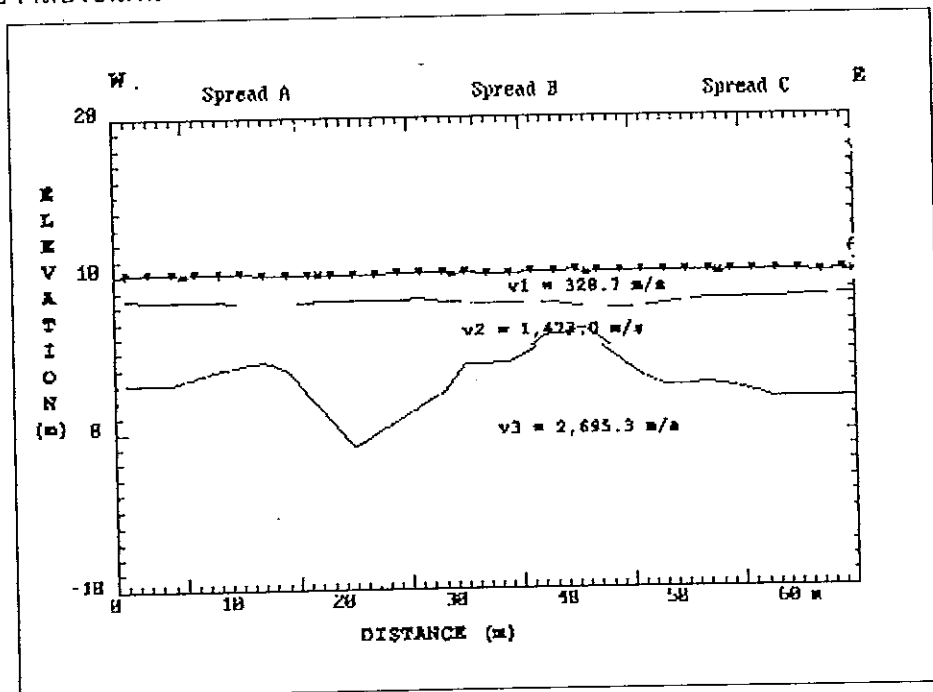


รูปที่ 53 แนววัดที่ 14

ก. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเห

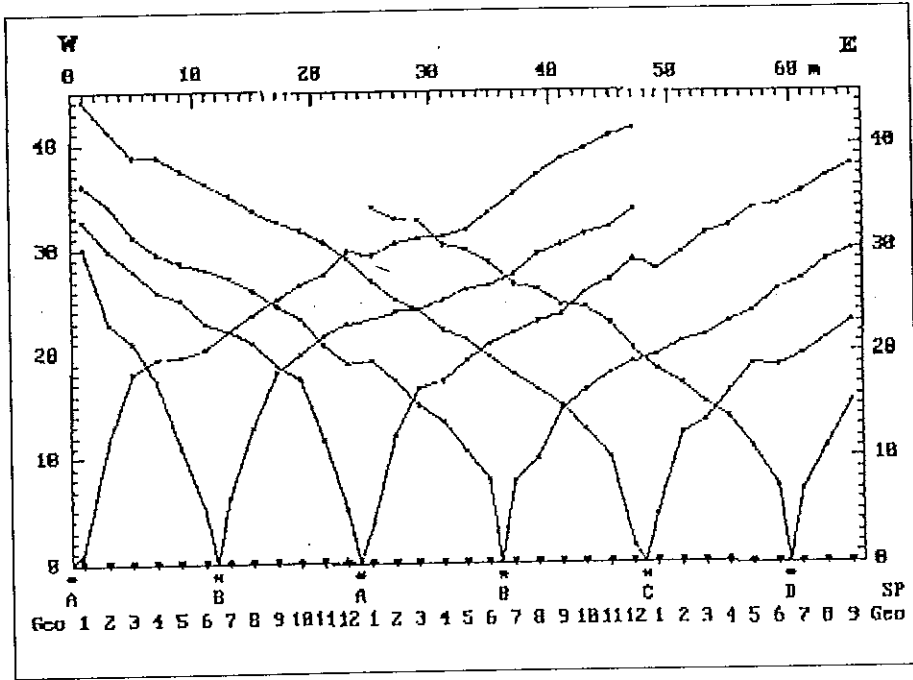


ข. แบบจำลองชั้นดิน

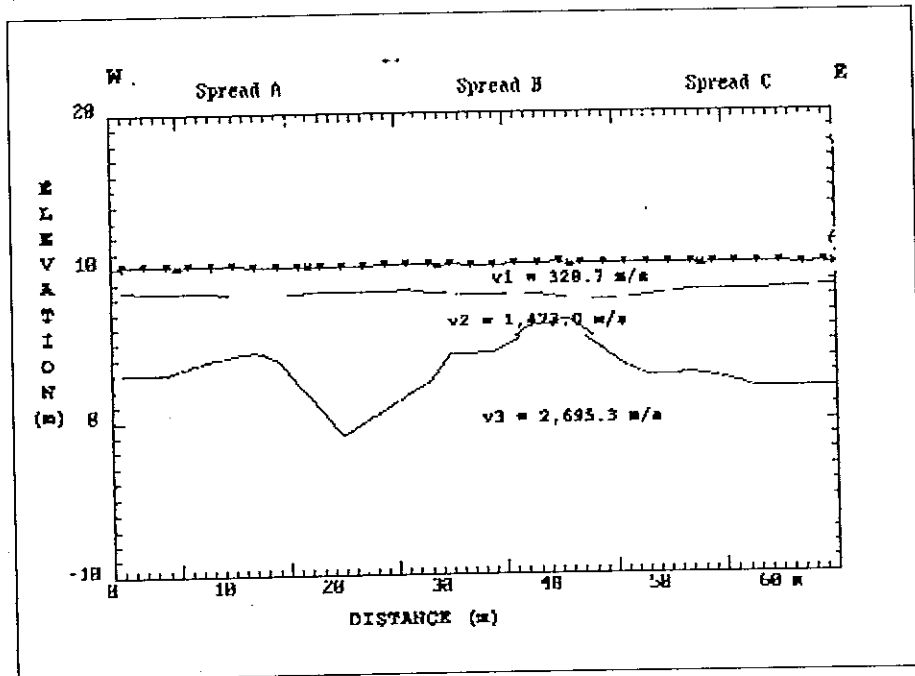


รูปที่ 54 แนววัดที่ 15

ก. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเห

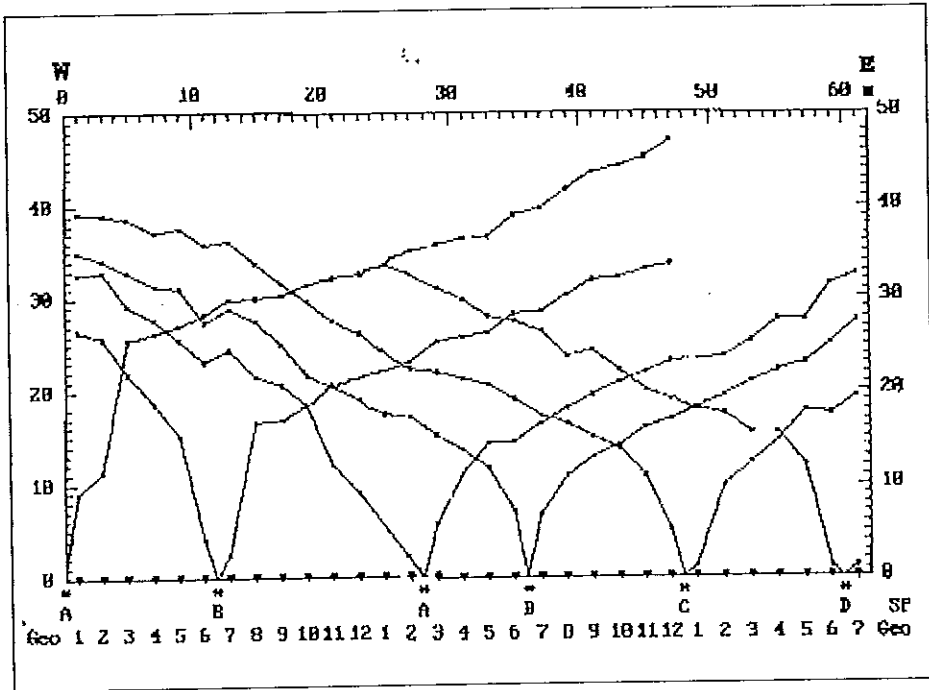


ข. แบบจำลองชั้นดิน

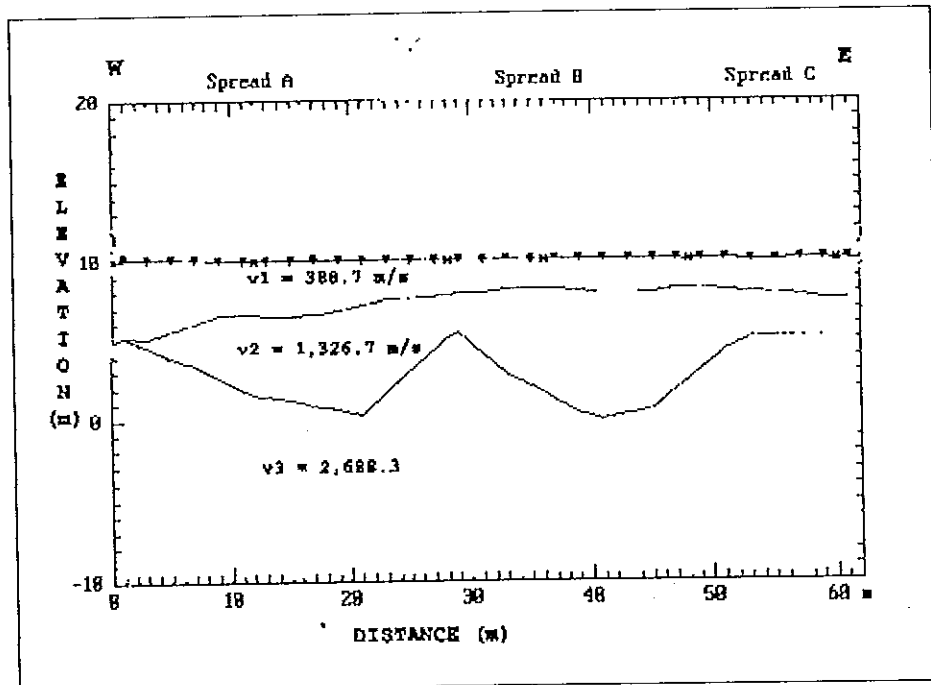


รูปที่ 55 แนววัดที่ 16

ก. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเห

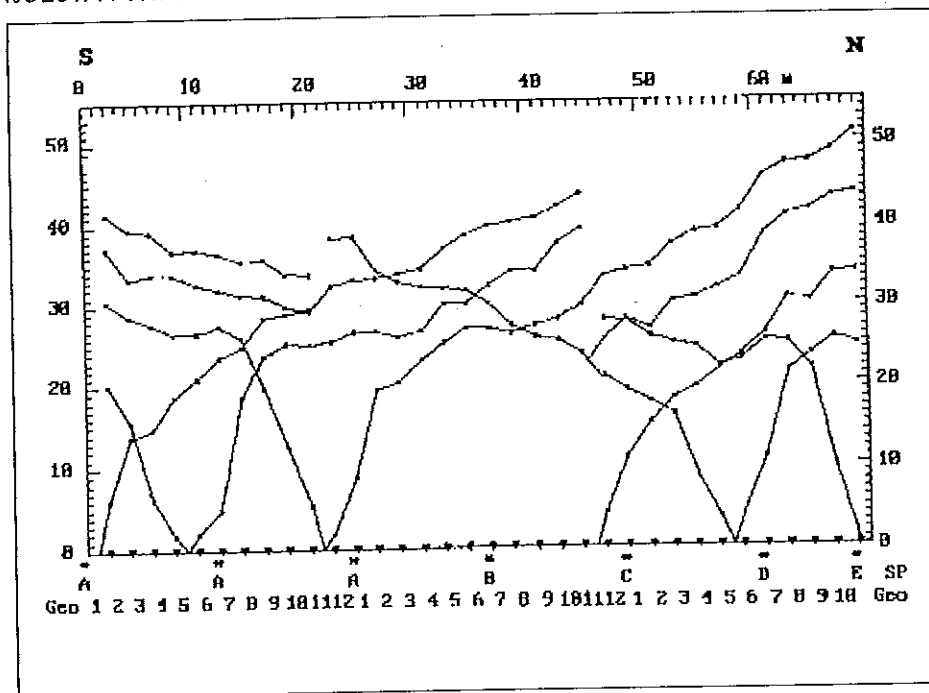


ข. แบบจำลองชั้นดิน

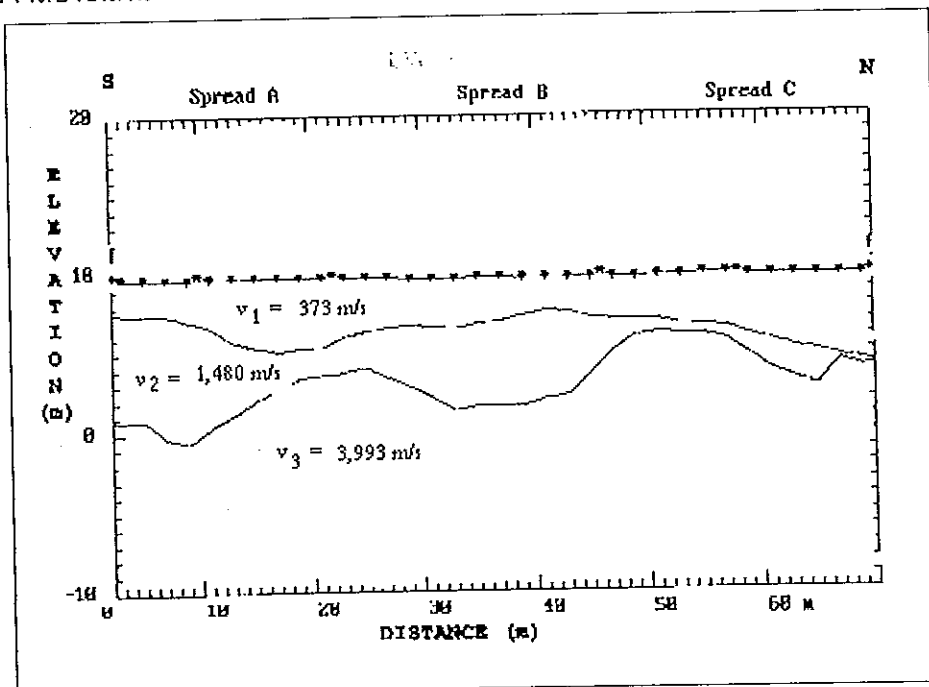


รูปที่ 56 แนววัดที่ 17

ก. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเห

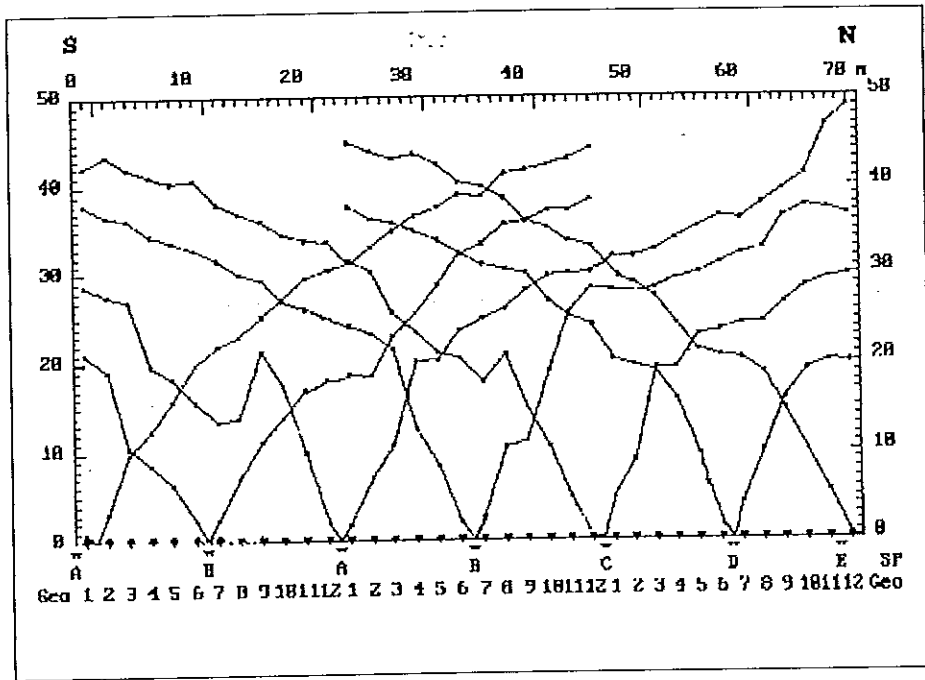


ข. แบบจำลองชั้นดิน

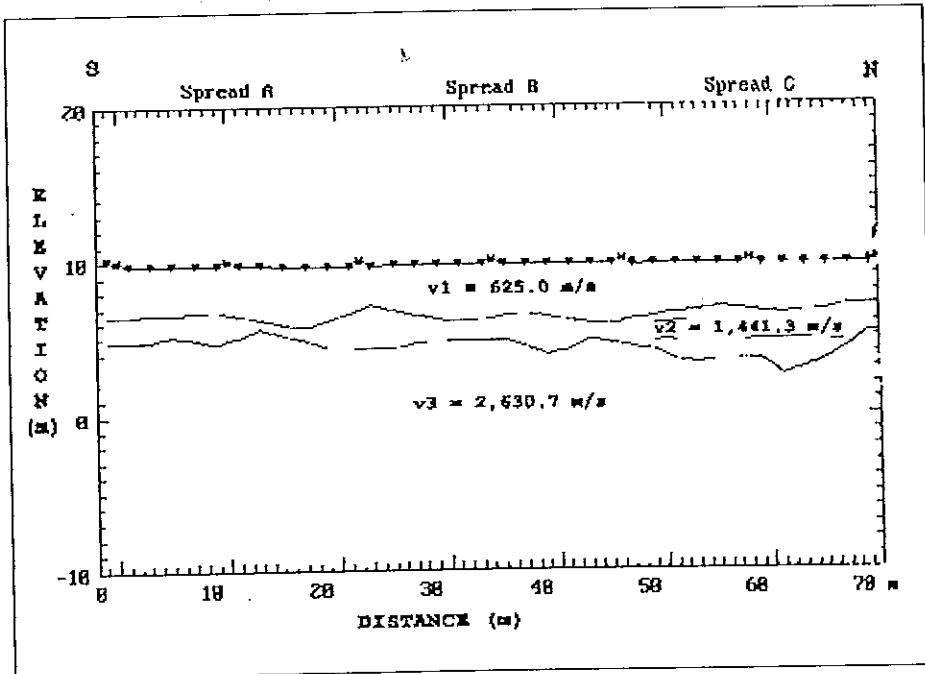


รูปที่ 57 แนววัดที่ 18

ก. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเห

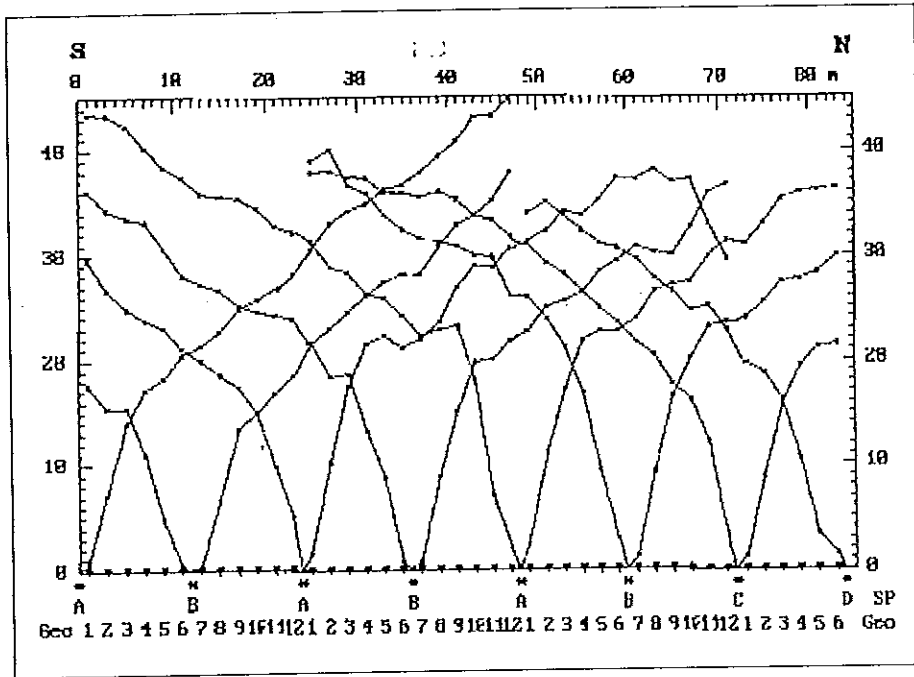


ข. แบบจำลองชั้นดิน

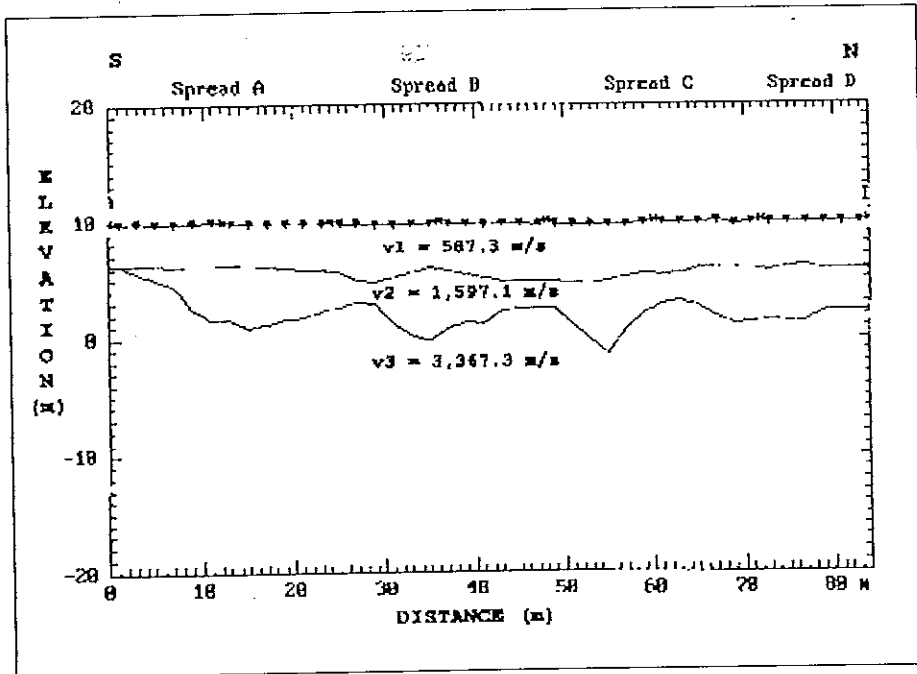


รูปที่ 58 แนววัดที่ 19

ก. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเห

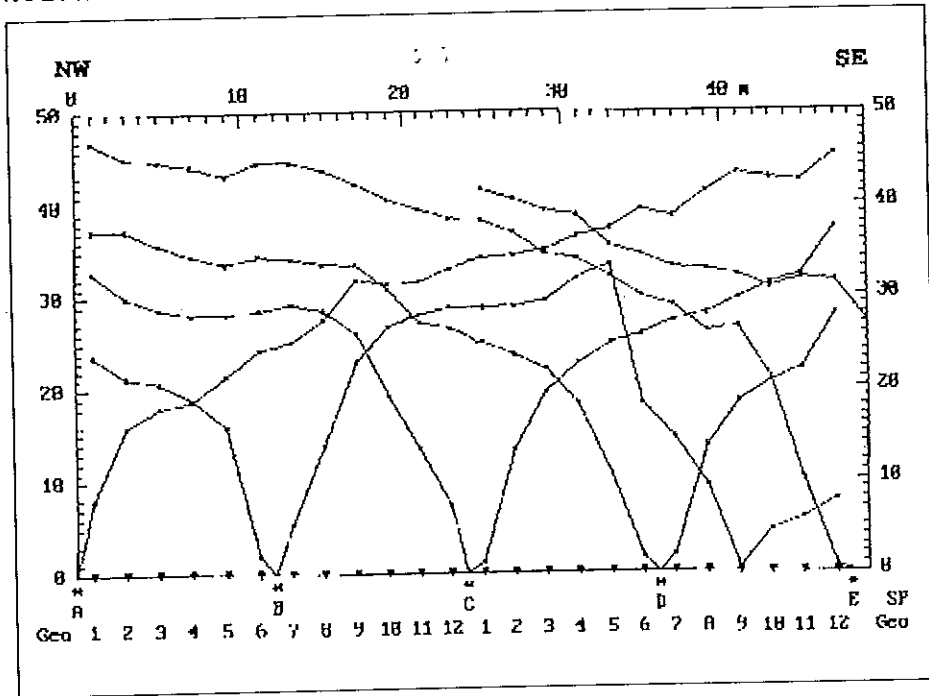


ข. แบบจำลองชั้นดิน

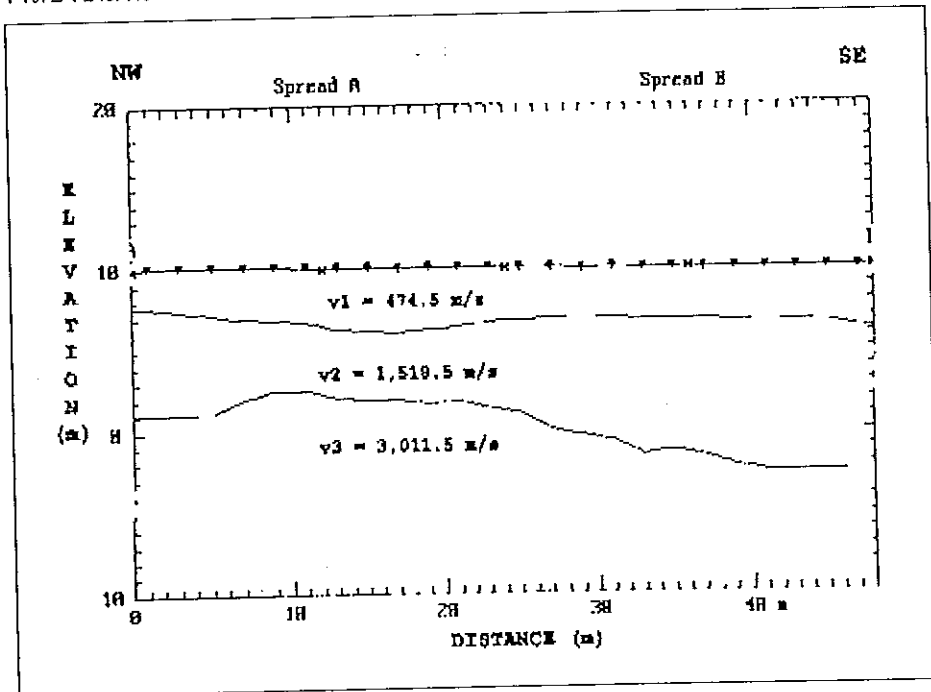


รูปที่ 59 แนววัดที่ 20

ก. กราฟระยะทาง-เวลาของคลื่นหักเห

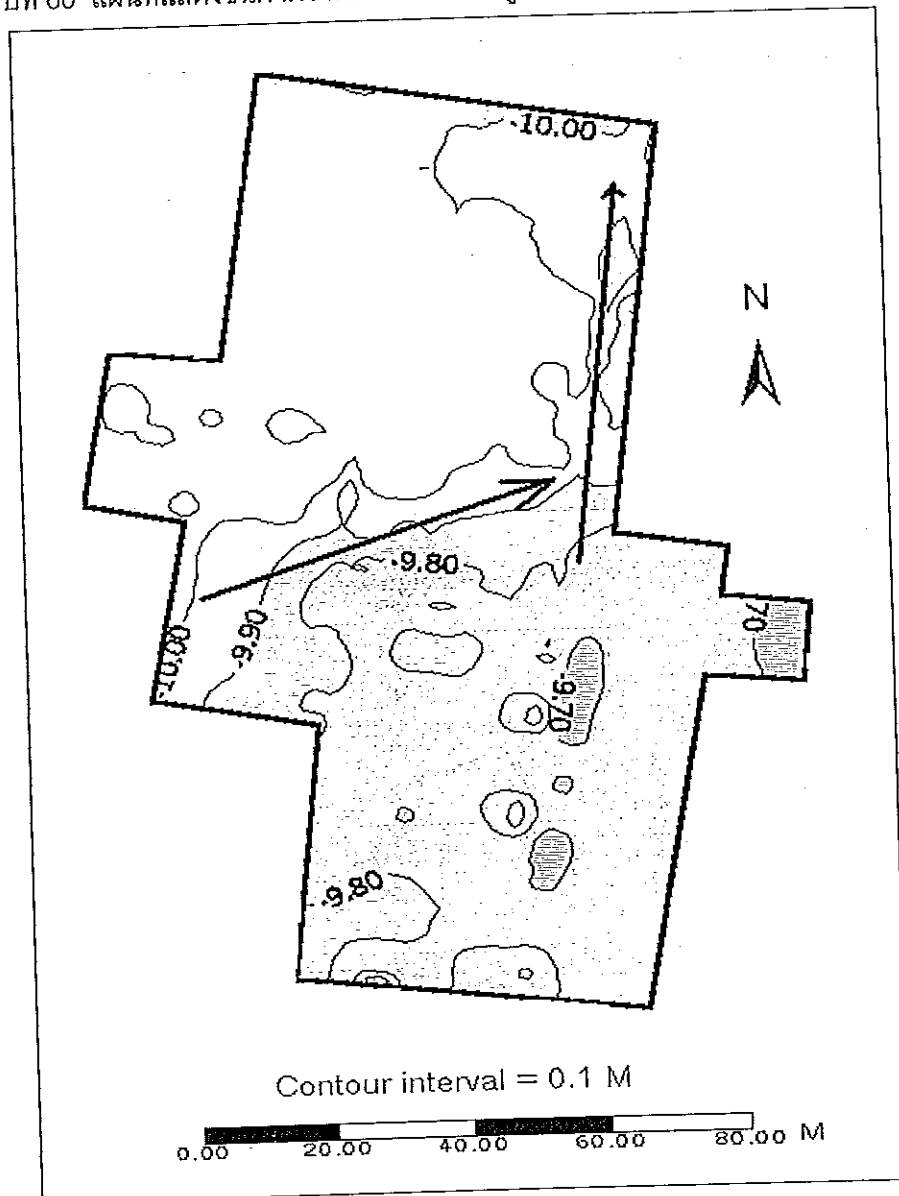


ข. แบบจำลองชั้นดิน

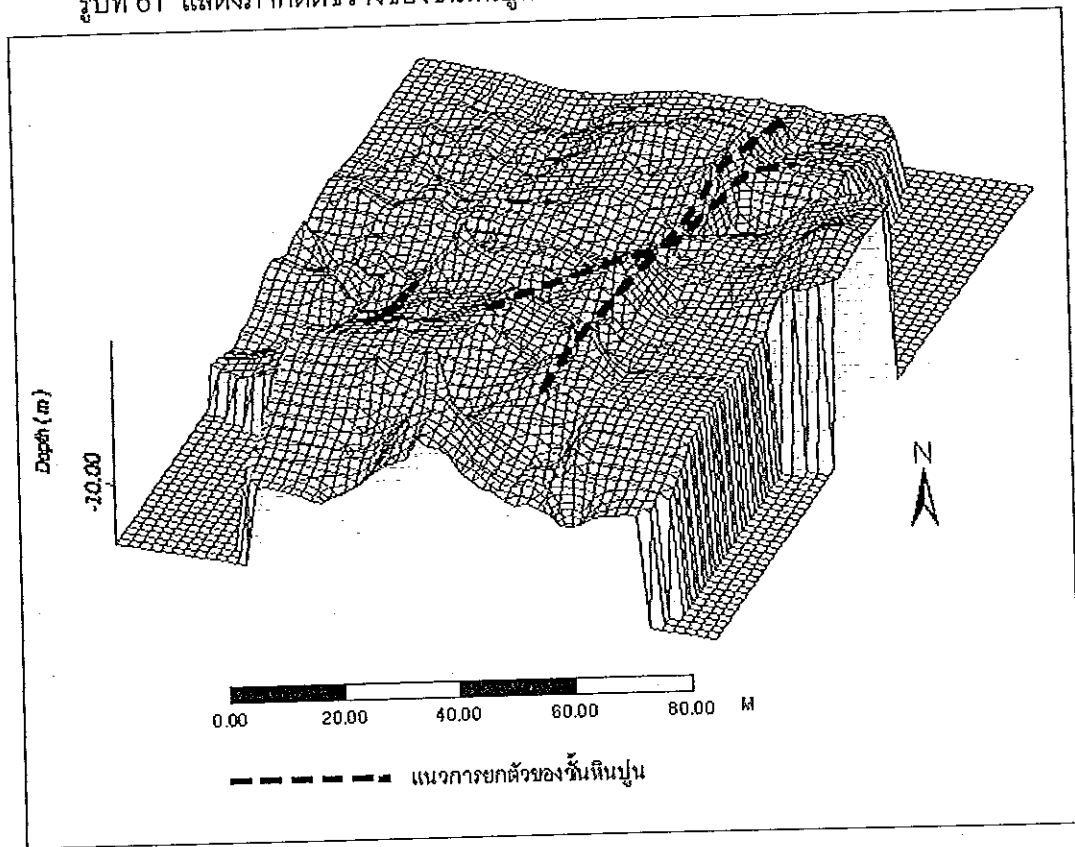


จากแผนที่แสดงชั้นค่าความลึกของชั้นหินปูน (รูปที่ 60) จะสังเกตการยกตัวของชั้นหินปูน
 ทำมุมประมาณ 30 องศา ในแนวตะวันตกเฉียงใต้-ตะวันออกเฉียงเหนือ และแนวเหนือ-ใต้ และเมื่อ
 นำเอาระดับความลึกของชั้นหินปูนมาเขียนภาพภาคตัดขวาง (รูปที่ 61) จะเห็นการยกตัวของหิน
 ปูนในบริเวณที่มีหลุมยุบเกิดขึ้น

รูปที่ 60 แผนที่แสดงชั้นค่าความลึกของชั้นหินปูน



รูปที่ 61 แสดงภาคตัดขวางของชั้นหินปูน



2. ผลการศึกษาด้านความถ่วง

การศึกษาด้านความถ่วง มีจุดประสงค์เพื่อจะกำหนดโครงสร้างของชั้นดิน และตรวจหาโพรงใต้ดิน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดการพังทลายของหลุมยุบ ผลการศึกษาพบว่าค่าความถ่วงผิดปกติในพื้นที่ศึกษาวิจัยมีค่าอยู่ระหว่าง -5.6 ถึง 7.7 gu. โดยแผนที่คอนทัวร์ค่าความถ่วงผิดปกติ (รูปที่ 62) แสดงว่าค่าความถ่วงผิดปกติมีค่าต่ำประมาณ -3.0 gu ในพื้นที่ด้านตะวันตกเฉียงใต้ และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 7.7 gu ในพื้นที่ด้านตะวันออกเฉียงเหนือของพื้นที่ศึกษา นอกจากนี้ยังตรวจพบคอนทัวร์ค่าความถ่วงผิดปกติต่ำปรากฏเป็นรูปวงกลมในบริเวณตะวันออกเฉียงเหนือ เป็นแถบยาวในแนวตะวันออกตะวันตกพาดผ่านบริเวณตอนกลางของพื้นที่ศึกษา การเพิ่มขึ้นของค่าความถ่วงผิดปกติจากด้านตะวันตกเฉียงใต้ไปยังตะวันออกเฉียงเหนือสามารถอธิบายได้ โดยการยกตัวของชั้นหินปูนเนื่องจากอิทธิพลของรอยเลื่อนโดยมีแนวระดับ (strike) ของรอยเลื่อนอยู่ในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งแบบจำลองภาพตัดขวางของชั้นดินซึ่งได้จากการวิเคราะห์ค่าความถ่วงผิดปกติ (รูปที่ 63) แสดงการยกตัวของชั้นหินปูนที่บริเวณตะวันออกเฉียง

เฉียงเหนือของพื้นที่ศึกษา ทั้งนี้โดยการกำหนดให้หินปูนมีความหนาแน่น 2,750 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และดินตะกอนชั้นบนซึ่งปกคลุมหินปูนมีความหนาแน่นประมาณ 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

คอนทัวร์ค่าความถ่วงผิปกติซึ่งมีค่าต่ำซึ่งปรากฏเป็นรูปวงกลมบริเวณตะวันออกเฉียงเหนือ และปรากฏเป็นแถบยาวพาดผ่านจากตะวันตกไปตะวันออกอาจเป็นอิทธิพลของหลุมยุบหรือโพรงในชั้นหินปูน ซึ่งแบบจำลองของวัตถุผิปกติ (หลุมยุบ หรือ โพรงใต้ดิน) ที่ก่อให้เกิดค่าผิปกติต่ำนี้อาจจะเป็นรูปทรงขั้นบันได (step / fault) รูปทรงแผ่นม้วน (ribbon) รูปทรงกระบอกในแนวตั้ง (pipe) และรูปทรงกลม (sphere) ในการสังเคราะห์รูปทรงของวัตถุผิปกติจากแผนที่คอนทัวร์ค่าความถ่วงผิปกติโดยใช้โปรแกรม Geosoft Griddepth และกำหนดความผิดพลาดของตำแหน่งของวัตถุผิปกติไม่เกินร้อยละ 20 ได้ผลดังนี้

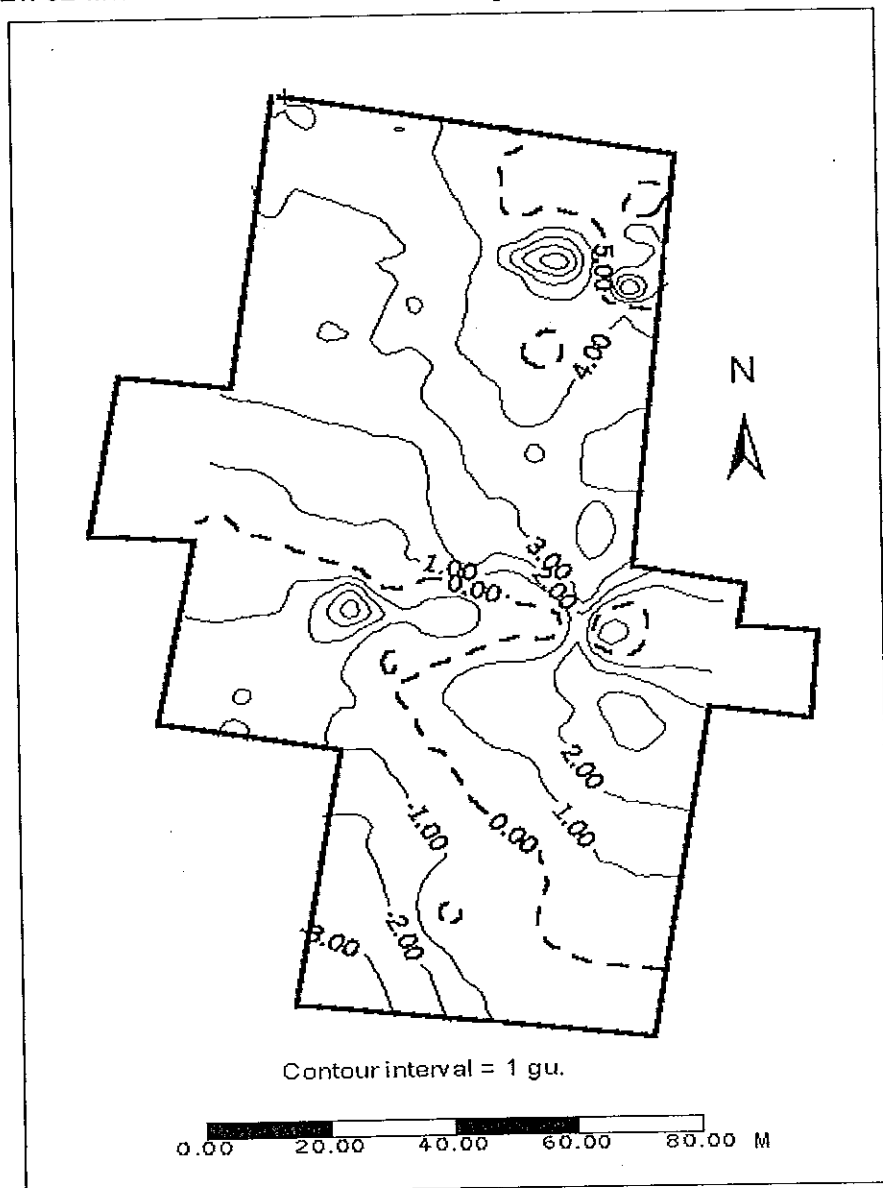
ในกรณีของวัตถุผิปกติรูปทรงกระบอกในแนวตั้ง ความลึกเฉลี่ยถึงส่วนบนของรูปทรงกระบอกในแนวตั้งประมาณ 11.4 เมตร ตำแหน่งของทรงกระบอกแทนด้วยวงกลม (รูปที่ 68) ซึ่งวงกลมที่แสดงตำแหน่งของทรงกระบอกในแนวตั้งจะเกาะกลุ่มหนาแน่นในบริเวณใกล้เคียงกับหลุมยุบปัจจุบัน นอกจากนี้เรายังสังเกตเห็นการเกาะกลุ่มในตำแหน่ง A B และ C ซึ่งไม่ใช่บริเวณของหลุมยุบในปัจจุบัน

ในกรณีของวัตถุผิปกติรูปทรงแผ่นม้วน ความลึกเฉลี่ยถึงขอบบนของแผ่นม้วนมีค่าประมาณ 12.3 เมตร ตำแหน่งของแผ่นม้วนเขียนแทนด้วยวงกลม (รูปที่ 69) ซึ่งจะสังเกตเห็นการเกาะกลุ่มเป็นแนวยาวในทิศตะวันออก-ตะวันตก และแนวเหนือ-ใต้ บริเวณตอนกลางของพื้นที่ศึกษา

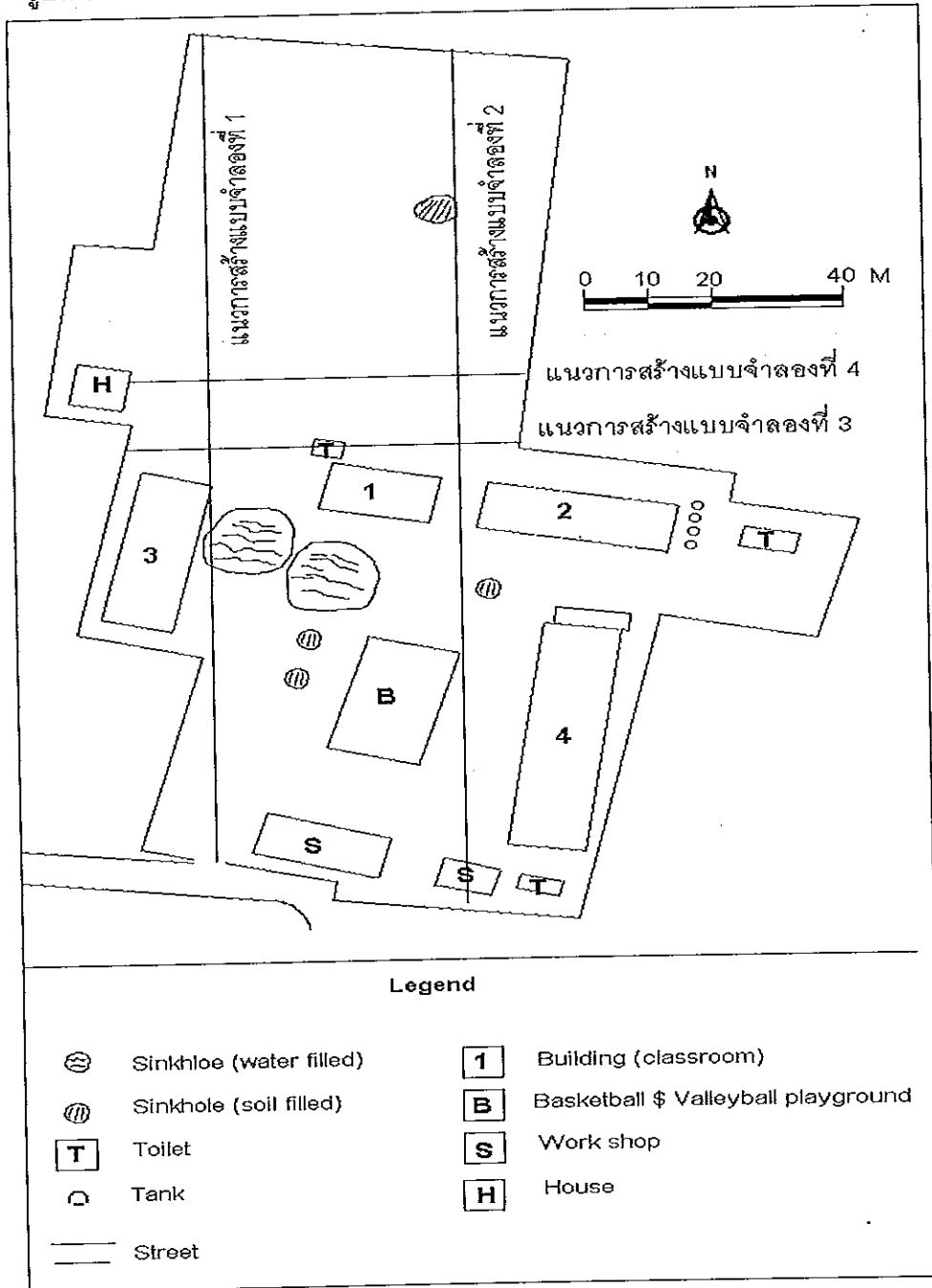
ในกรณีของวัตถุผิปกติรูปทรงกลม ศูนย์กลางของทรงกลมประมาณ 11.0 เมตร ตำแหน่งของทรงกลมเขียนแทนด้วยวงกลม (รูปที่ 70) ซึ่งจะสังเกตเห็นการเกาะกลุ่ม ในบริเวณใกล้เคียงกับตำแหน่งของหลุมยุบในปัจจุบัน และบริเวณอื่น ๆ เช่นบริเวณ A B C และ D

ในกรณีของวัตถุผิปกติรูปทรงขั้นบันได หรือรอยเลื่อน ความลึกเฉลี่ยถึงขอบบนมีค่าประมาณ 13.3 เมตร ตำแหน่งของรูปทรงขั้นบันไดเขียนแทนด้วยวงกลม (รูปที่ 71) ซึ่งจะสังเกตเห็นลักษณะการต่อกันเป็นแนวสั้น ๆ

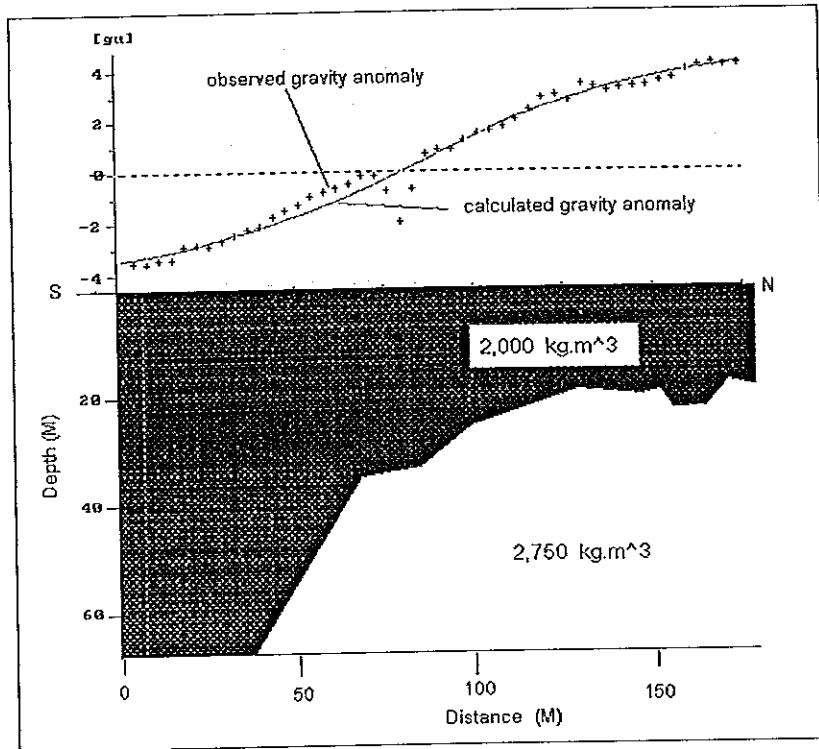
รูปที่ 62 แผนที่แสดงชั้นค่าความถ่วงผิดปกติบูร์เกอร์



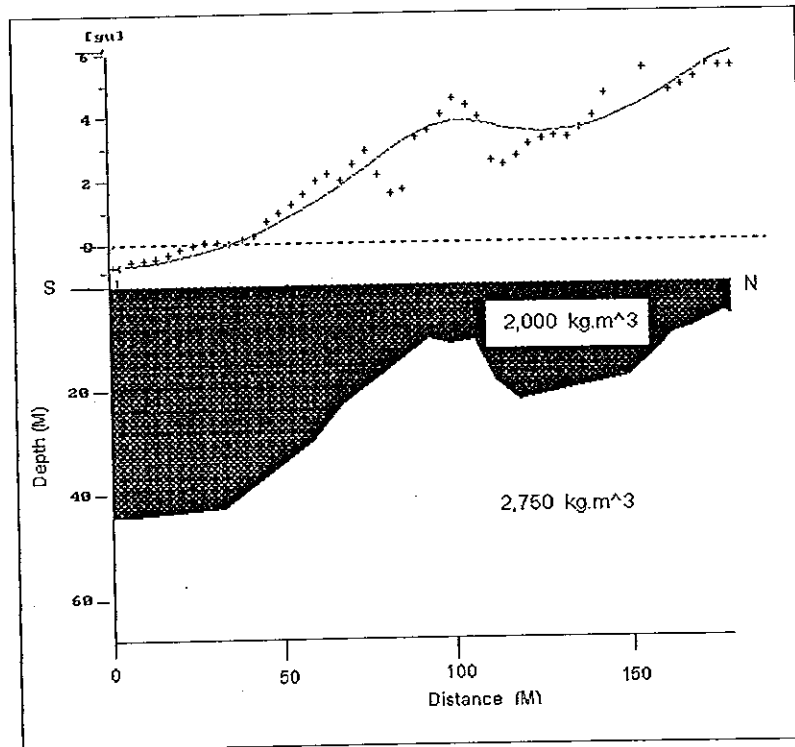
รูปที่ 63 แผนที่แสดงแนวการสร้างแบบจำลอง



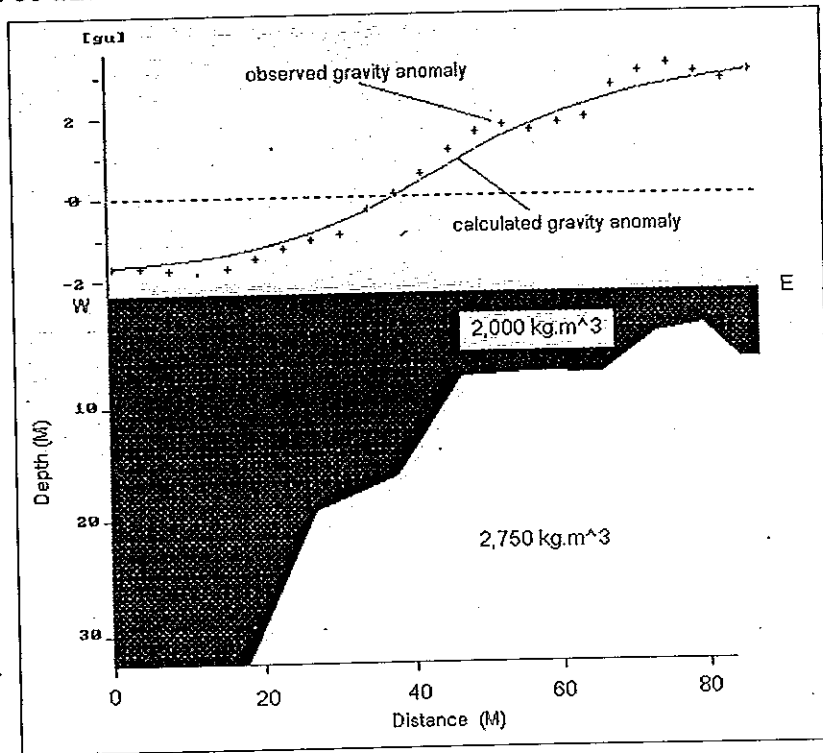
รูปที่ 64 แบบจำลองชั้นดินในแนวที่ 1



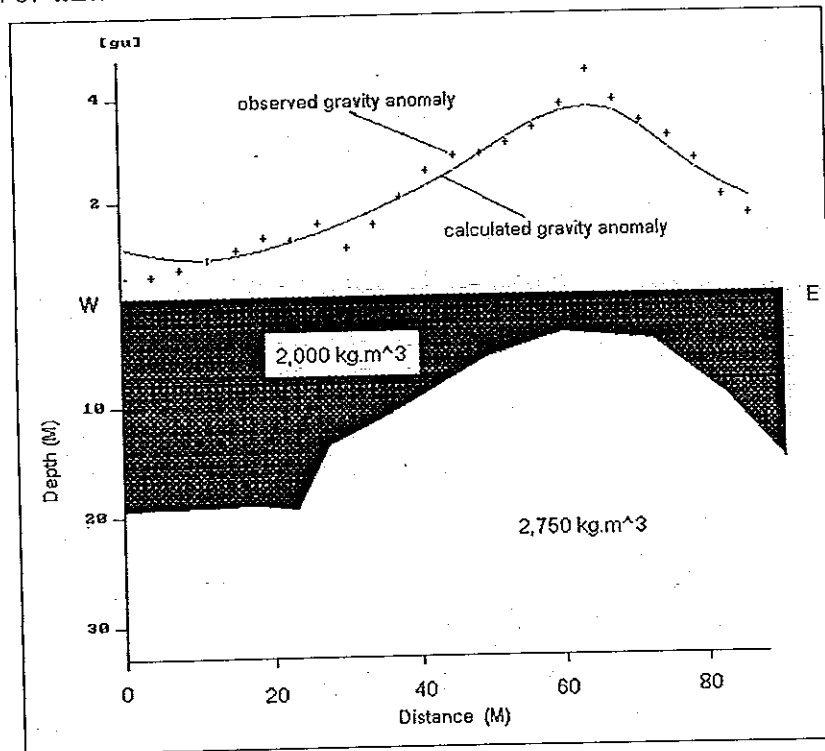
รูปที่ 65 แบบจำลองชั้นดินในแนวที่ 2



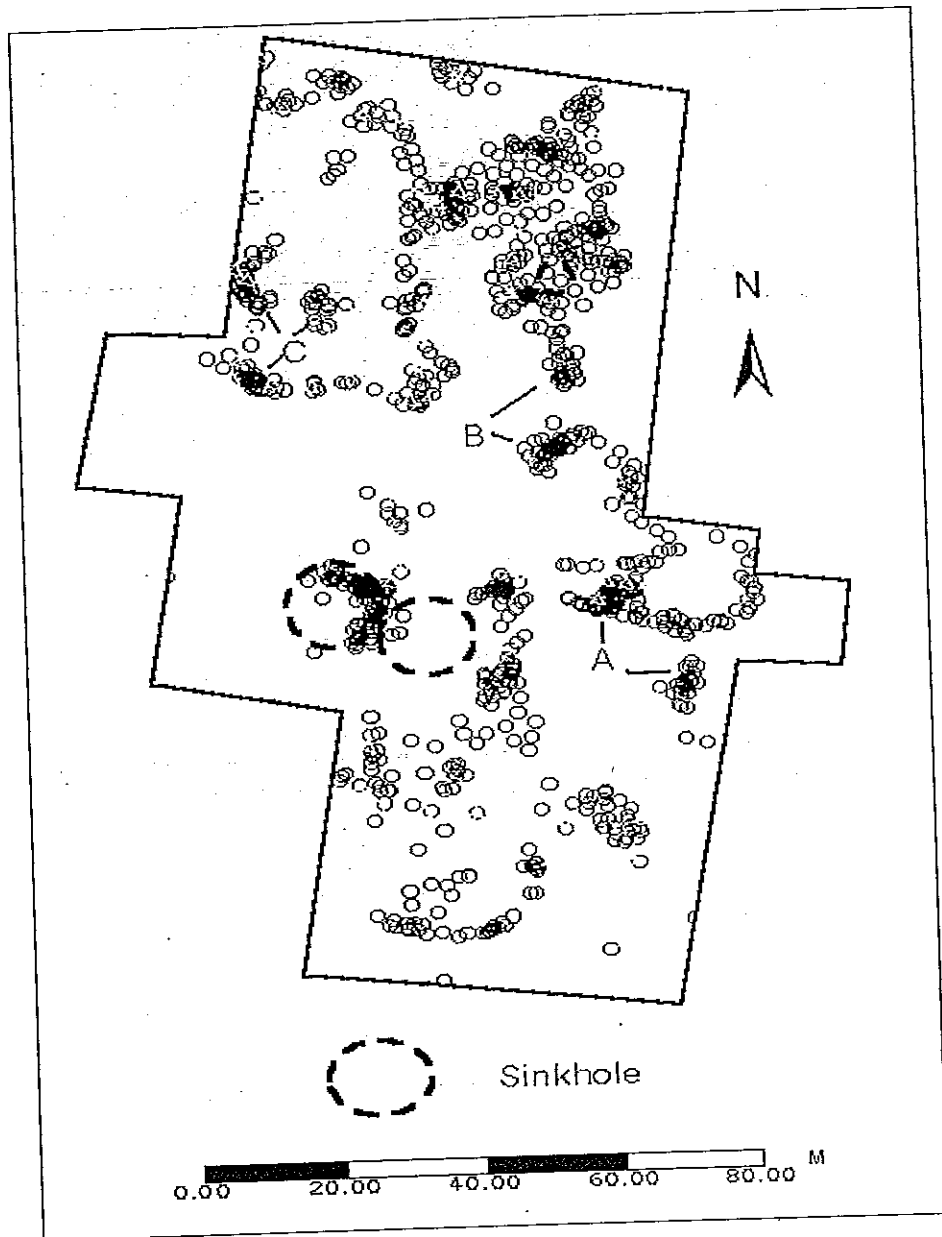
รูปที่ 66 แบบจำลองชั้นดินในแนวที่ 3



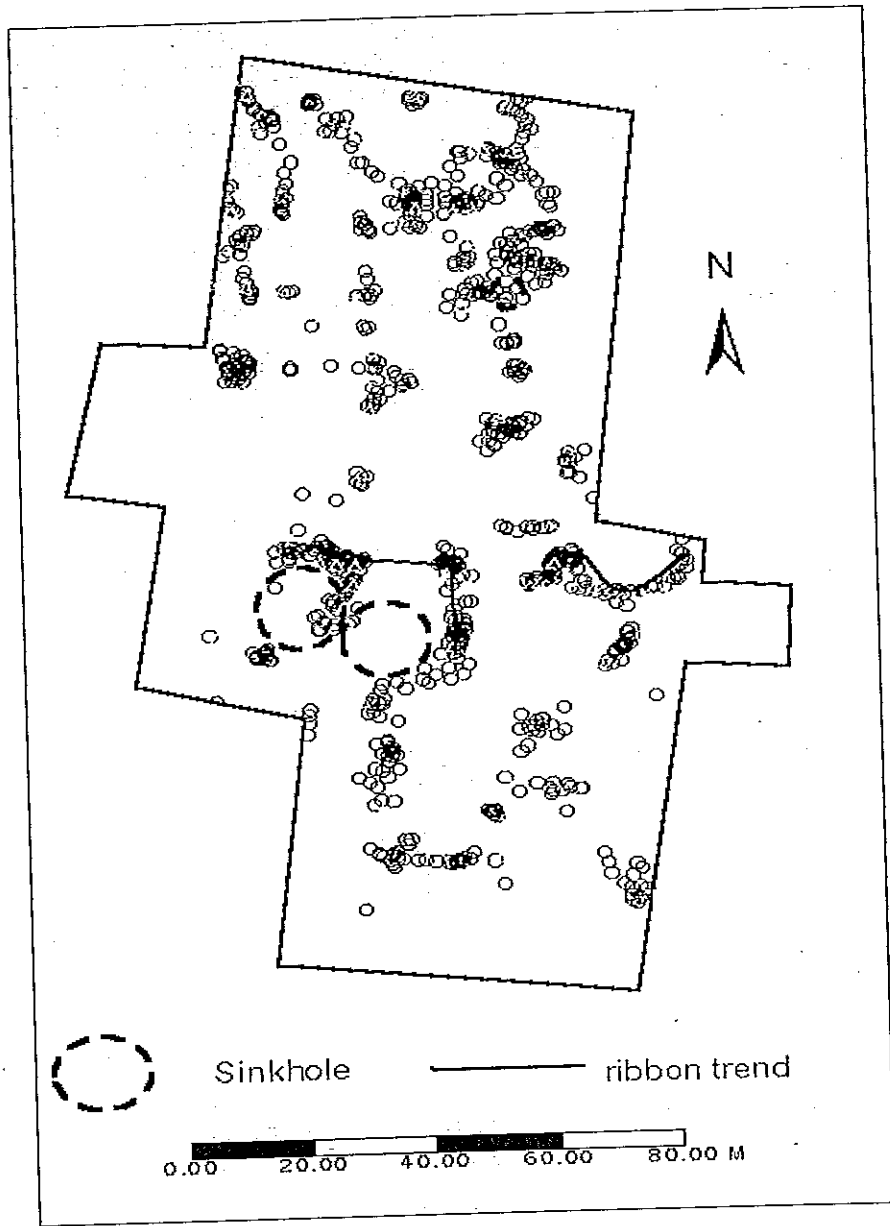
รูปที่ 67 แบบจำลองชั้นดินในแนวที่ 4



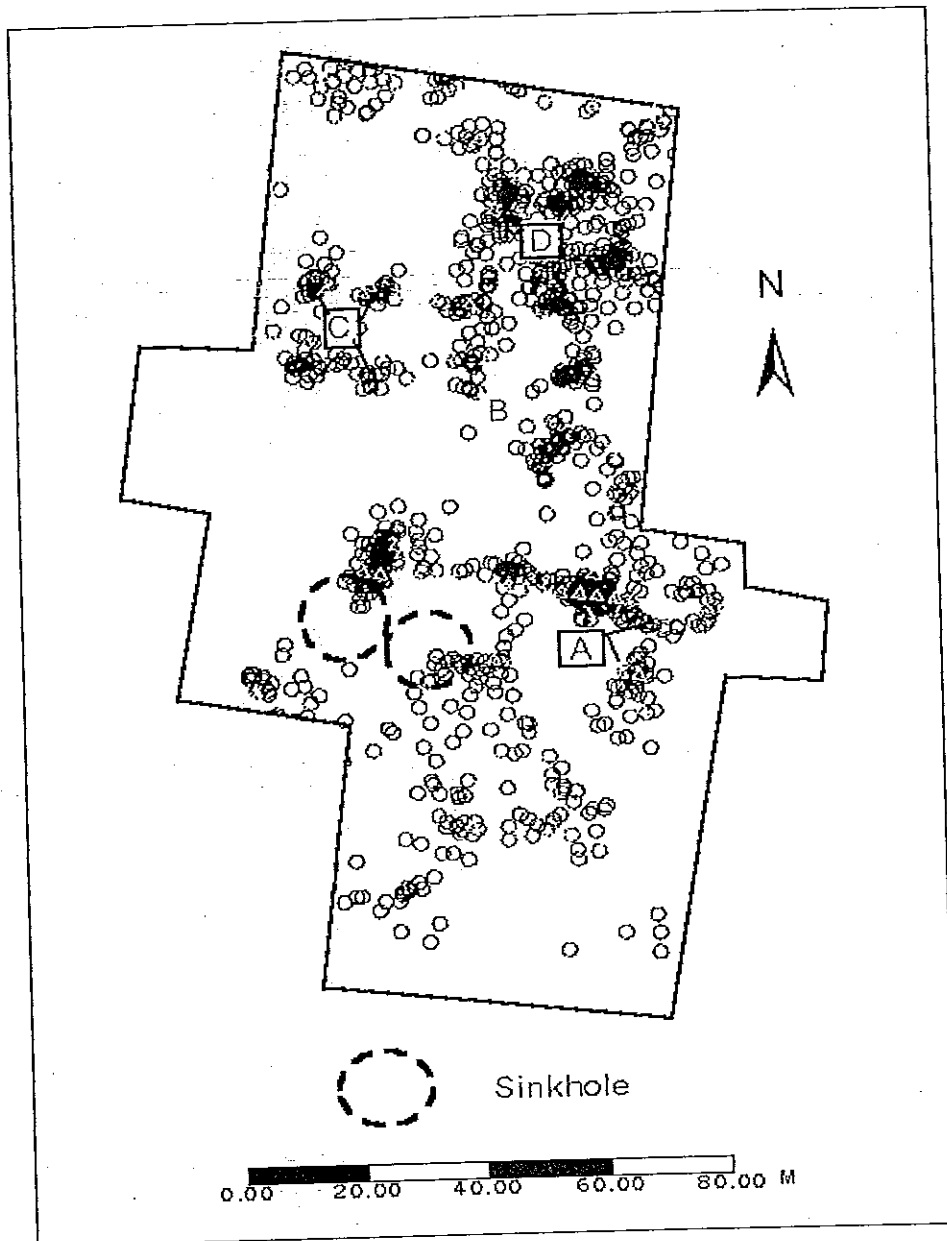
รูปที่ 68 แผนที่แสดงตำแหน่งของ pipe model



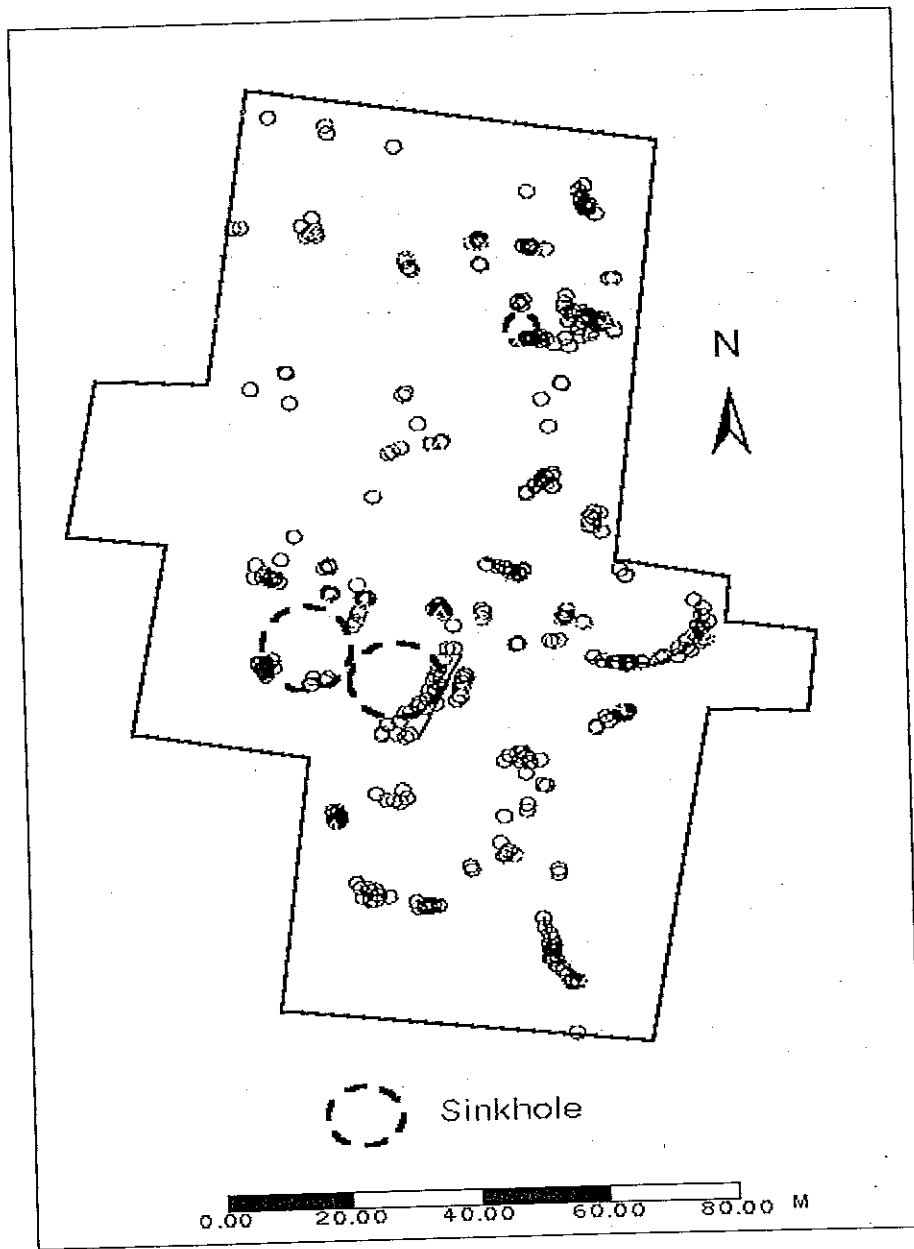
รูปที่ 69 แผนที่แสดงตำแหน่งของ ribbon model



รูปที่ 70 แผนที่แสดงตำแหน่งของ sphere model



รูปที่ 71 แผนที่แสดงตำแหน่งของ step model



3. ผลการศึกษาด้านเรดาร์หยั่งความลึก

การศึกษาด้านเรดาร์หยั่งความลึก มีจุดประสงค์เพื่อที่จะกำหนดโครงสร้างของชั้นดินโดยเฉพาะชั้นหินปูน ตรวจสอบโพรงใต้ดิน และตรวจสอบหลุมยุบ โดยทำการสำรวจทั้งหมด 19 แนววัดครอบคลุมพื้นที่ที่ทำการศึกษา ผลการศึกษาพบว่า การใช้เทคนิคเรดาร์หยั่งลึก สามารถตรวจสอบโพรง ตรวจสอบหลุมยุบที่ถูกกลบไว้ และสามารถตรวจสอบ ชั้นหินปูนได้

อาศัยการเดินทางสำรวจและสังเกตจากหลุมยุบในช่วงที่มีน้ำแห้งและการใช้การสำรวจที่ใกล้หลุมยุบโดยเฉพาะแนววัดที่ L - 18 เป็นตัวเปรียบเทียบสัญญาณคลื่นเรดาร์ทุกแนววัด จึงได้พบเส้นสัญญาณ (trace) ที่ส่งผ่านโดยตรงจากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณเรียกสัญญาณชนิดนี้ว่าคลื่นอากาศหรือคลื่นตรง (air wave or direct wave) ซึ่งจะพบทุกแนววัด ณ เวลาเท่ากับศูนย์ เส้นสัญญาณที่ต่อจากคลื่นอากาศเกิดจากการสะท้อนในตัวกลางโดยส่วนมาก แล้วจะมีการสะท้อนที่เกิดจาก ชั้นผิวดิน (top soil layer) ชั้นดินทราย (sand layer) ชั้นดินเหนียว (clay layer) ชั้นหินปูน (limestone layer) และสุดท้ายคาดว่าน่าจะมีการสะท้อนจากอากาศที่อยู่ในช่องว่าง (conduit) ของหินปูน? ส่วนสัญญาณผิดปกติดินนอกเหนือจากการสะท้อนดังกล่าวของแต่ละแนววัดได้ผลดังนี้

แนววัดที่ 00 (รูปที่ 72)

ใช้สายอากาศความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์ ปรากฏว่าไม่พบสัญญาณผิดปกติดินนอกเหนือจากที่แปลความไว้แล้ว

แนววัดที่ 01 (รูปที่ 73)

ใช้สายอากาศความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์ ปรากฏว่าไม่พบสัญญาณผิดปกติดินนอกเหนือจากที่แปลความไว้แล้ว

แนววัดที่ 02 (รูปที่ 74)

ก. ใช้สายอากาศความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์

พบสัญญาณที่ผิดปกติ 2 ช่วง ช่วงแรกอยู่ที่เส้นสัญญาณ 95 - 105 และช่วงที่ 2 อยู่ที่เส้นสัญญาณที่ 135 - 170 ทั้ง 2 ช่วงนี้คาดว่าเป็นสัญญาณที่มีการสะท้อนกลับไปกลับมาจากจากน้ำขังอยู่ที่หลุมยุบ

ข. ใช้สายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรตซ์

ไม่สามารถที่จะแปลความได้

แนววัดที่ 03 (รูปที่ 75)

ใช้สายอากาศความถี่ 200 เมกะเฮิรตซ์ พบสัญญาณที่ผิดปกติ 2 ช่วง ช่วงแรกประกอบด้วย 7 จุด แต่ละจุดอยู่ที่เส้นสัญญาณที่ 77.5,92.5,107.5,122.5,137.5,152.5 และ 167.5 เมตร สัญญาณนี้จะเกิดอยู่บริเวณที่มีเสาของอาคารเรียน(หลังอาคารเรียน 1) แต่พอเข้าสู่หลังอาคารเรียน 2 สัญญาณจะไม่ค่อยชัดเหมือนอยู่ด้านหน้าอาคาร แต่ก็พอจะสามารถมองเห็นการสะท้อนกลับไปกลับมาของสัญญาณได้ การที่บริเวณหลังอาคารเรียน 2 การสะท้อนกลับไปกลับมาไม่เด่นชัดเนื่องจาก มีน้ำซึ่งเป็นตัวนำดังนั้นจึงมีการสะท้อนกลับไปกลับมาจากสองแหล่งจึงทำให้สัญญาณลบล้างกันเอง

แนววัดที่ 04 (รูปที่ 76)

ก. ใช้สายอากาศความถี่ 50 เมกะเฮิรตซ์

พบสัญญาณที่ผิดปกติ 2 ช่วง ช่วงแรกประกอบด้วย 7 จุด แต่ละจุดอยู่ที่เส้นสัญญาณที่ 48.5,63.5,78.5,93.5,108.5,123.5 และ 138.5 สัญญาณนี้จะเกิดอยู่บริเวณที่มีเสาของอาคารเรียน (หน้าอาคารเรียน 1) และจะพบสัญญาณช่วงที่สองอีก 9 จุด ในลักษณะเดียวกัน แต่ละจุดอยู่ที่เส้นสัญญาณ 168,183,198,213,228,243,258,263 และ 278 (หน้าอาคารเรียน 2) การที่มีสัญญาณผิดปกติที่ชัดเจน คาดว่าเกิดจากภายในเสาอาคารมีเส้นลวดตัวนำจึงทำให้มีการสะท้อนของสัญญาณกลับไปกลับมา (ringing) ของคลื่นได้ดีกว่าที่อื่น

ข. ใช้สายอากาศความถี่ 200 เมกะเฮิรตซ์

พบสัญญาณลักษณะเดียวกันกับกรณีใช้สายอากาศความถี่ 50 เมกะเฮิรตซ์

แนววัดที่ 05 (รูปที่ 77)

ใช้สายอากาศความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์ ปรากฏว่าไม่พบสัญญาณผิดปกตินอกเหนือจากที่แปลความไว้แล้ว

แนววัดที่ 06 (รูปที่ 78)

ใช้สายอากาศความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์ พบสัญญาณผิดปกติอย่างชัดเจนที่

ตำแหน่งของเส้นสัญญาณที่ 75-180 มีการสะท้อนกลับไปกลับมาในบริเวณดังกล่าว เป็นรูปไฮเพอร์โบลาคว่ำ ลักษณะดังกล่าวคาดว่าจะเกิดจากโพรงในหินปูน ซึ่งอยู่ในระดับความลึกประมาณ 3-6 เมตร กว้างประมาณ 21 เมตร ในแนวตะวันออก-ตะวันตก

แนววัดที่ 07 (รูปที่ 79)

ใช้สายอากาศความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์ พบสัญญาณผิดปกติอย่างชัดเจนที่ตำแหน่งของเส้นสัญญาณที่ 80-100 มีการสะท้อนกลับไปกลับมาในบริเวณดังกล่าว เป็นรูปไฮเพอร์โบลาคว่ำ ลักษณะดังกล่าวคาดว่าจะเกิดจากโพรงในหินปูน ซึ่งอยู่ในระดับความลึกประมาณ 4.5-5.5 เมตร กว้างประมาณ 4 เมตร ในแนวตะวันออก-ตะวันตก

แนววัดที่ 08 (รูปที่ 80)

ใช้สายอากาศความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์ ปรากฏว่าไม่พบสัญญาณผิดปกตินอกเหนือจากที่แปลความไว้แล้ว

แนววัดที่ 09 (รูปที่ 81)

ใช้สายอากาศความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์ ปรากฏว่าไม่พบสัญญาณผิดปกตินอกเหนือจากที่แปลความไว้แล้ว

แนววัดที่ 10 (รูปที่ 82)

ใช้สายอากาศความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์ ปรากฏว่าไม่พบสัญญาณผิดปกตินอกเหนือจากที่แปลความไว้แล้ว

แนววัดที่ 11 (รูปที่ 83)

ใช้สายอากาศความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์ ปรากฏว่าไม่พบสัญญาณผิดปกตินอกเหนือจากที่แปลความไว้แล้ว

แนววัดที่ 12 (รูปที่ 84)

ใช้สายอากาศความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์ พบสัญญาณผิดปกติอย่างชัดเจนที่ตำแหน่งของเส้นสัญญาณที่ 140-180 มีการสะท้อนกลับไปกลับมาในบริเวณดังกล่าว

เป็นรูปไฮเพอร์โบล่าหงาย ลักษณะดังกล่าวคาดว่าจะเกิดจากหลุมยุบที่ถูกกลบไว้ ซึ่งอยู่ในระดับความลึกประมาณ 2 - 3 เมตร กว้างประมาณ 8 เมตร ในแนวตะวันออก - ตะวันตก

แนววัดที่ 13 (รูปที่ 85)

ใช้สายอากาศความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์ ปรากฏว่าไม่พบสัญญาณผิดปกตินอกเหนือจากที่แปลความไว้แล้ว

แนววัดที่ 14 (รูปที่ 86)

ใช้สายอากาศความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์ ปรากฏว่าไม่พบสัญญาณผิดปกตินอกเหนือจากที่แปลความไว้แล้ว

แนววัดที่ 15 (รูปที่ 87)

ก. ใช้สายอากาศความถี่ 50 เมกะเฮิรตซ์

ไม่พบสัญญาณผิดปกติ

ข. ใช้สายอากาศความถี่ 200 เมกะเฮิรตซ์

ตรวจพบสัญญาณที่ผิดปกติ 2 ตำแหน่งคือ ตำแหน่งแรกที่ระยะ 16.7 - 18.5 (ระหว่างเส้นสัญญาณ 87 - 97) เป็นตำแหน่งที่เกิดหลุมยุบและมีเศษวัสดุและดินทับถมในหลุมยุบ และตำแหน่งที่สองสัญญาณผิดปกติเป็นแบบไฮเพอร์โบล่าคว่ำ ประมาณเส้นสัญญาณที่ 100 - 135 ณ เวลาประมาณ 30 นาโนวินาที ความผิดปกติของสัญญาณคาดว่าจะจะเป็นโพรงหินปูน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 1 - 2 เมตร

แนววัดที่ 16 (รูปที่ 88)

พบสัญญาณผิดปกติที่ตำแหน่งของเส้นสัญญาณที่ 35 - 90 เป็นลักษณะรูปไฮเพอร์โบล่าคว่ำ (รูปที่ 95ก) ลักษณะดังกล่าวคาดว่าจะเป็นการสะท้อนจากโพรงในชั้นหินปูน ในระดับความประมาณลึก 2.5 - 6 เมตร

แนววัดที่ 17 (รูปที่ 89)

ใช้สายอากาศความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์ พบสัญญาณผิดปกติไม่เป็นชั้นที่แน่นอน เหมือนกับแนววัดอื่น เนื่องจากแนววัดนี้อยู่ใกล้ต้นไม้และมีต้นไม้หลายต้น ความไม่เป็นต่อเนื่องของสัญญาณ คาดว่าน่าจะมาจากรากไม้เป็นตัวสะท้อนของสัญญาณ

แนววัดที่ 18 (รูปที่ 90)

ใช้สายอากาศความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์ ปรากฏว่าไม่พบสัญญาณผิดปกตินอกเหนือจากที่แปลความไว้แล้ว

การวิเคราะห์ความเร็ว (รูปที่ 91)

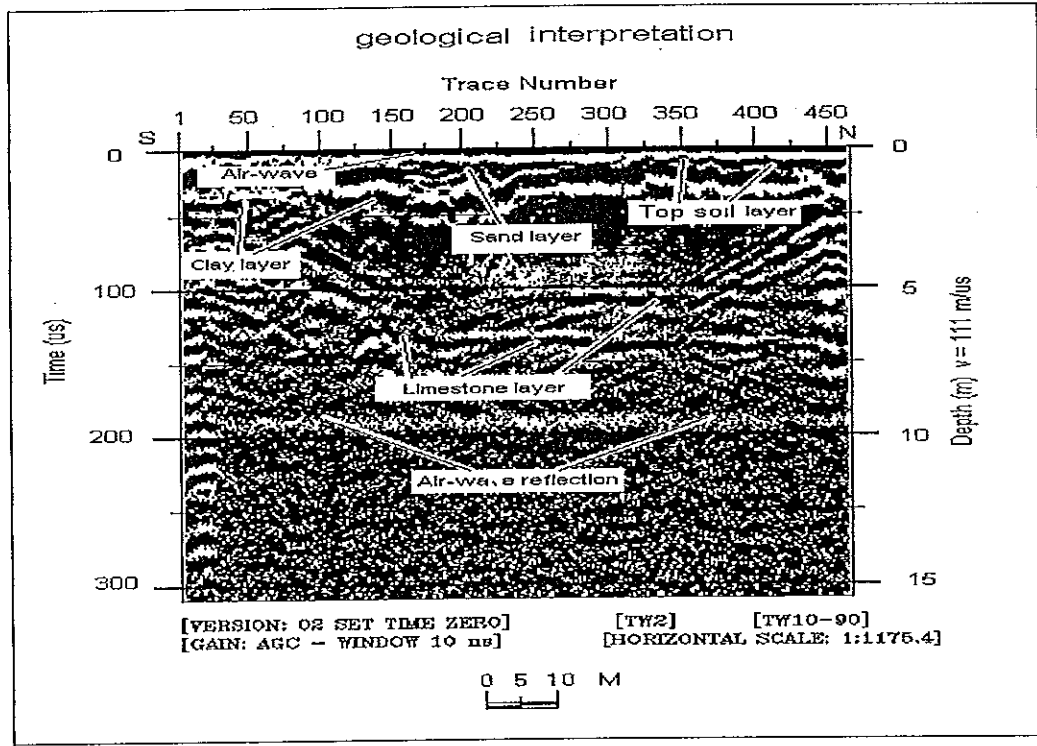
ได้ทำการทำการวิเคราะห์ความเร็วของชั้นดินโดยใช้เทคนิค Wide Angle Reflection And Refraction (WARR) เพื่อคำนวณหาความเร็วในชั้นดินโดยใช้สายอากาศสัญญาณ 100 และ 200 เมกะเฮิรตซ์ ได้ความเร็วดังนี้

สายอากาศสัญญาณ 100 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยแนวเส้นตรงได้ความเร็ว 101.25 เมตรต่อไมโครวินาที และถ้าทำการวิเคราะห์ด้วยรูปไฮเปอร์โบล่าจะได้ความเร็ว 107.41 เมตรต่อไมโครวินาที ซึ่งความเร็วช่วงนี้น่าจะเป็นความเร็วของหินปูน

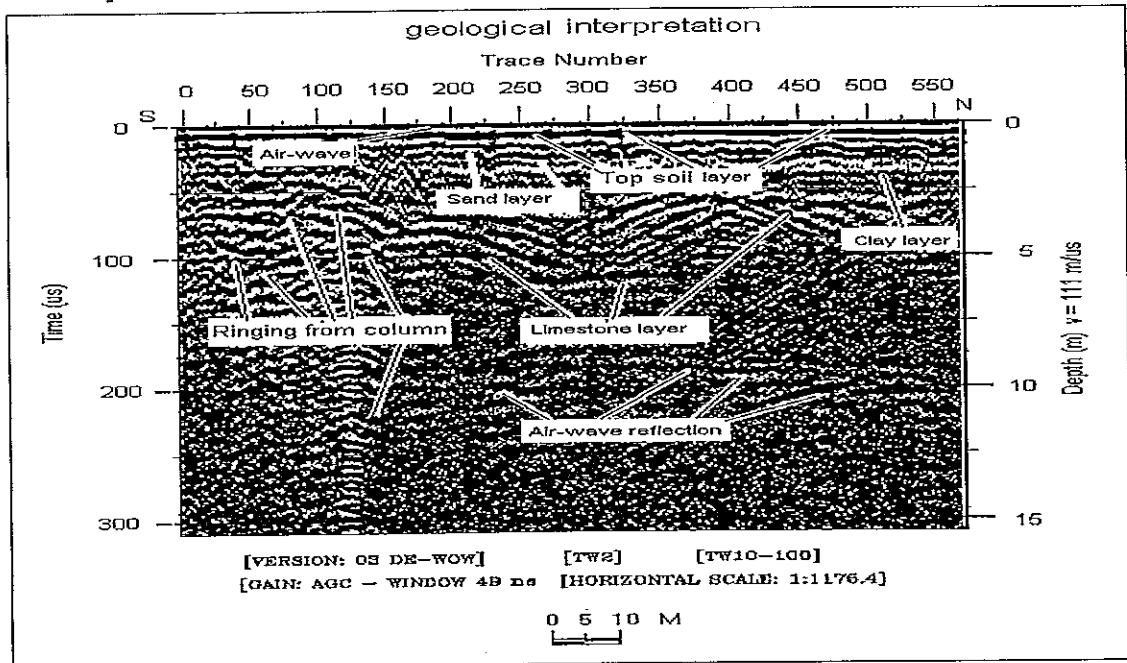
ส่วนสายอากาศสัญญาณ 200 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยแนวเส้นตรงได้ความเร็ว 115.23 เมตรต่อไมโครวินาที และถ้าทำการวิเคราะห์ด้วยรูปไฮเปอร์โบล่าจะได้ความเร็ว 120.56 เมตรต่อไมโครวินาที ซึ่งความเร็วช่วงนี้น่าจะเป็นความเร็วของหินปูน

เมื่อนำความเร็วมาเฉลี่ยจะได้ความเร็วโดยประมาณ 111 เมตรต่อไมโครวินาที ซึ่งทุกแนววัดของงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ความเร็วนี้ทำการคำนวณหาความลึก หรือวิเคราะห์หาค่าต่าง ๆ

รูปที่ 72 ภาคตัดขวางในแนววัดที่ 00

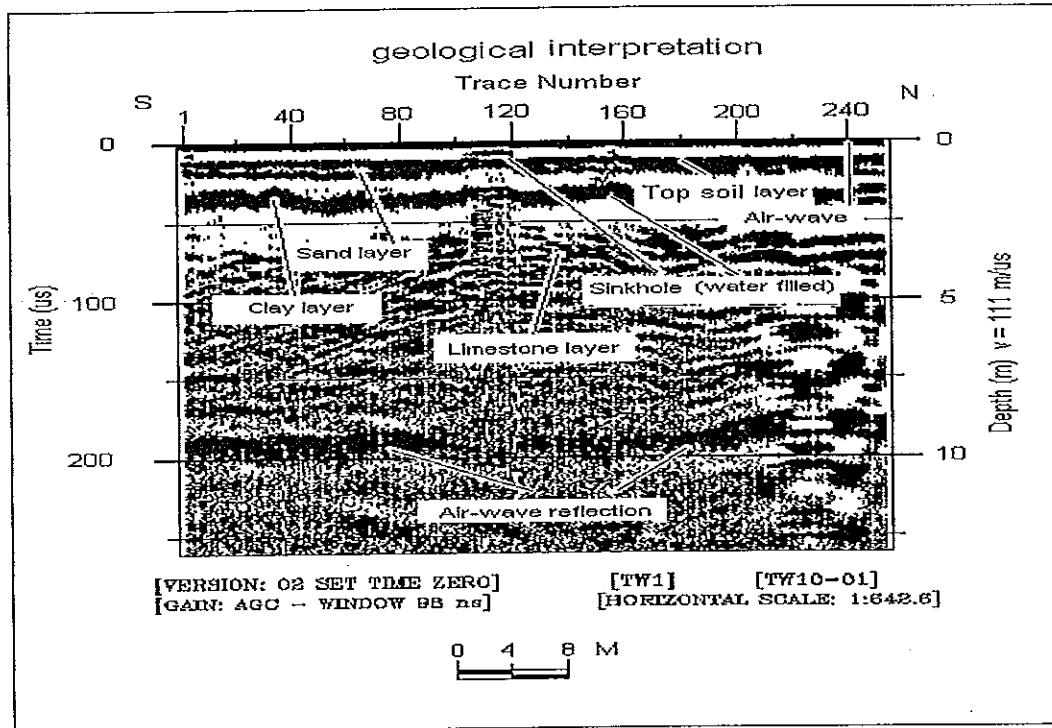


รูปที่ 73 ภาคตัดขวางในแนววัดที่ L-01

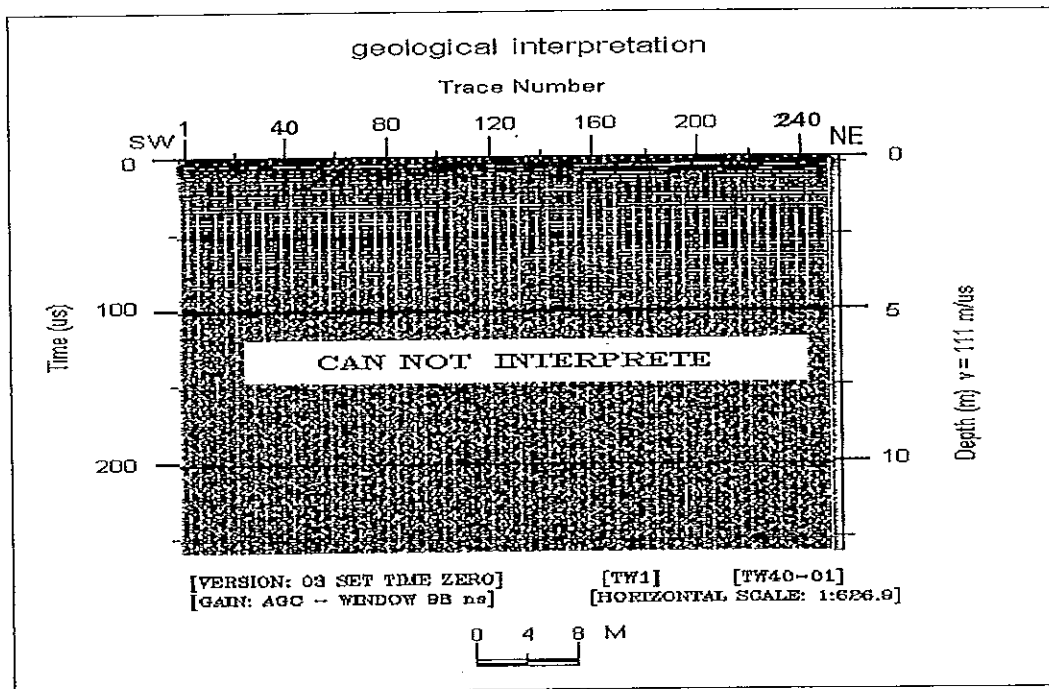


รูปที่ 74 ภาคตัดขวางในแนววัดที่ L-02

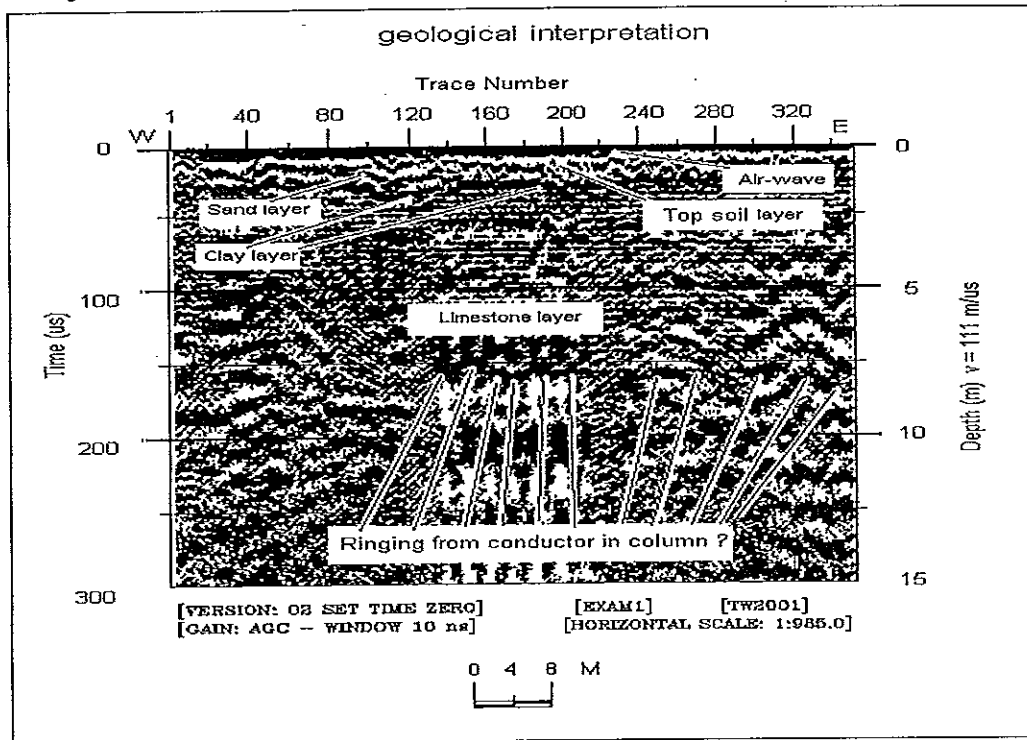
ก. ความถี่ของสายอากาศ 200 เมกะเฮิรตซ์



ข. ความถี่ของสายอากาศ 400 เมกะเฮิรตซ์

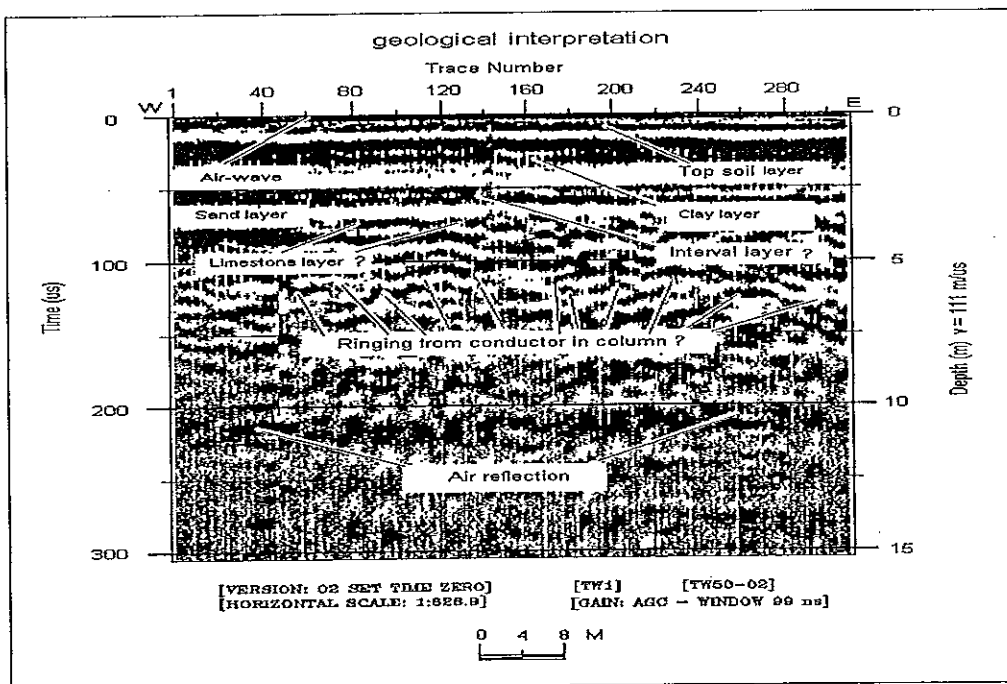


รูปที่ 75 ภาคตัดขวางในแนววัดที่ L-03

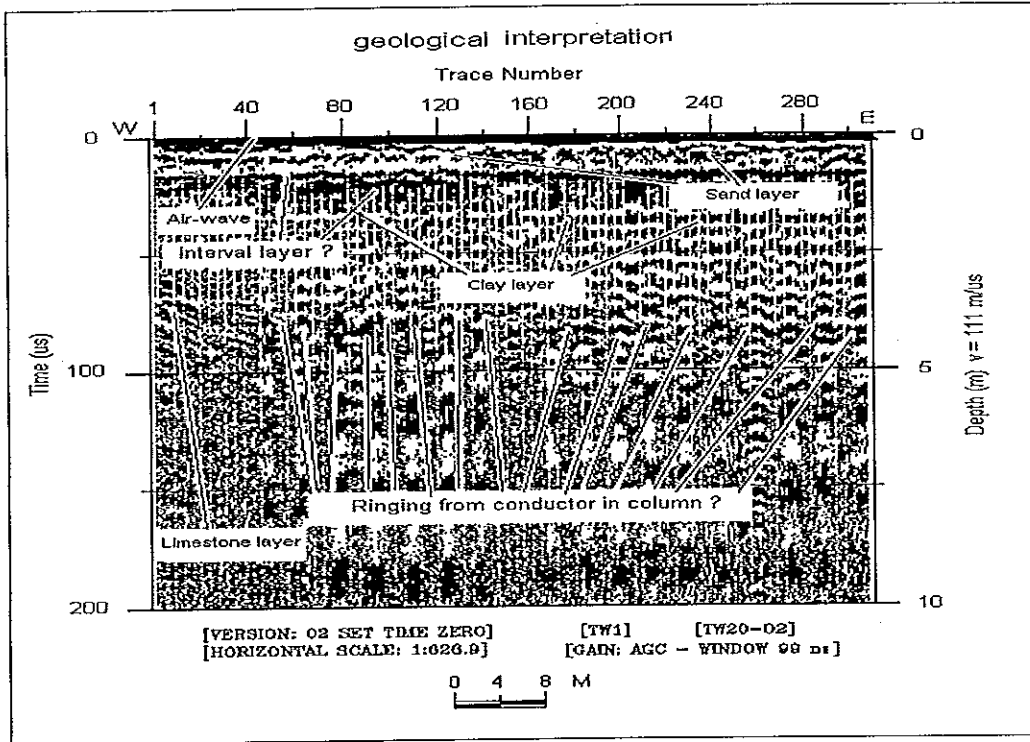


รูปที่ 76 ภาคตัดขวางในแนววัดที่ L-04

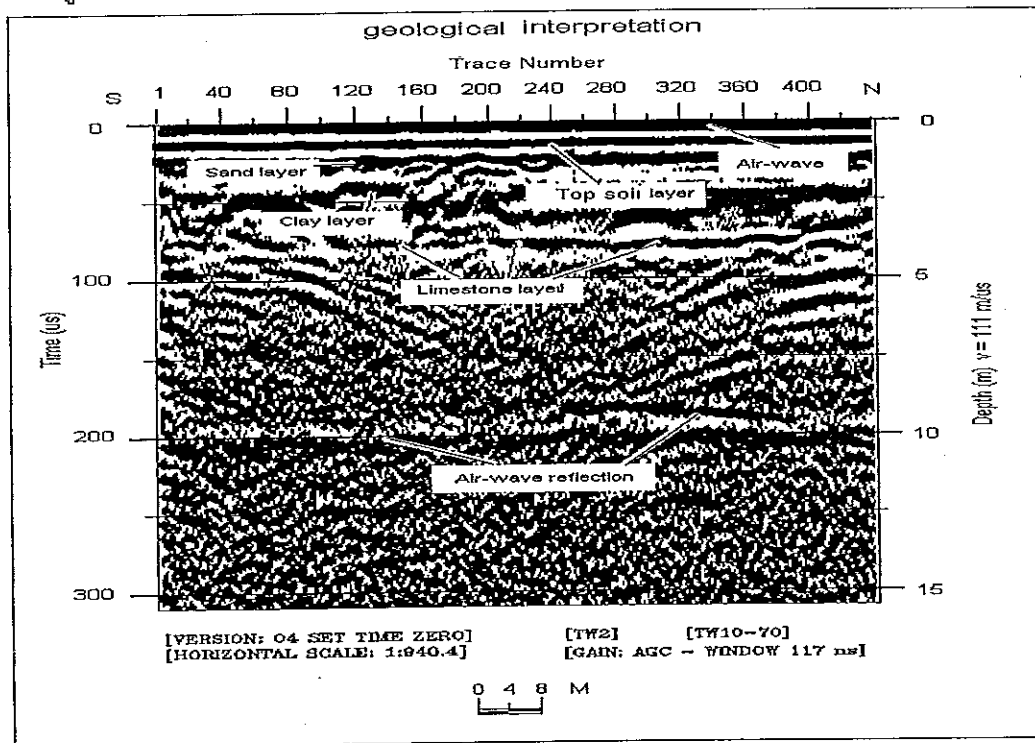
ก. ความถี่ของสายอากาศ 50 เมกะเฮิรตซ์



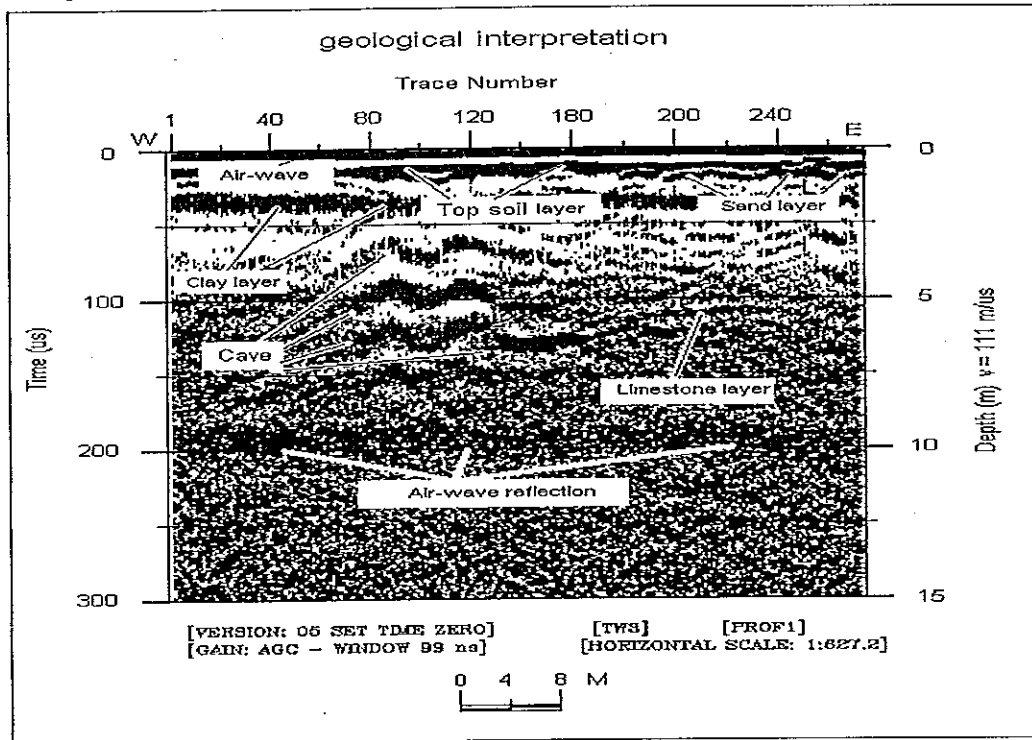
ข. ความถี่ของสายอากาศ 200 เมกะเฮิรตซ์



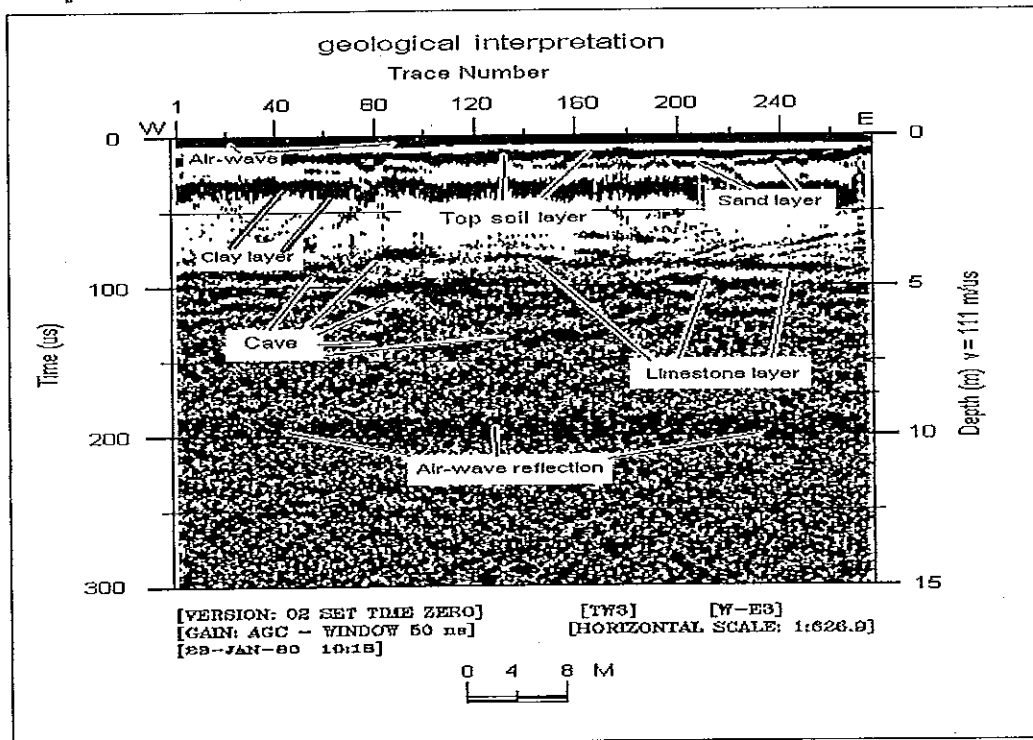
รูปที่ 77 ภาคตัดขวางในแนววัดที่ L-05



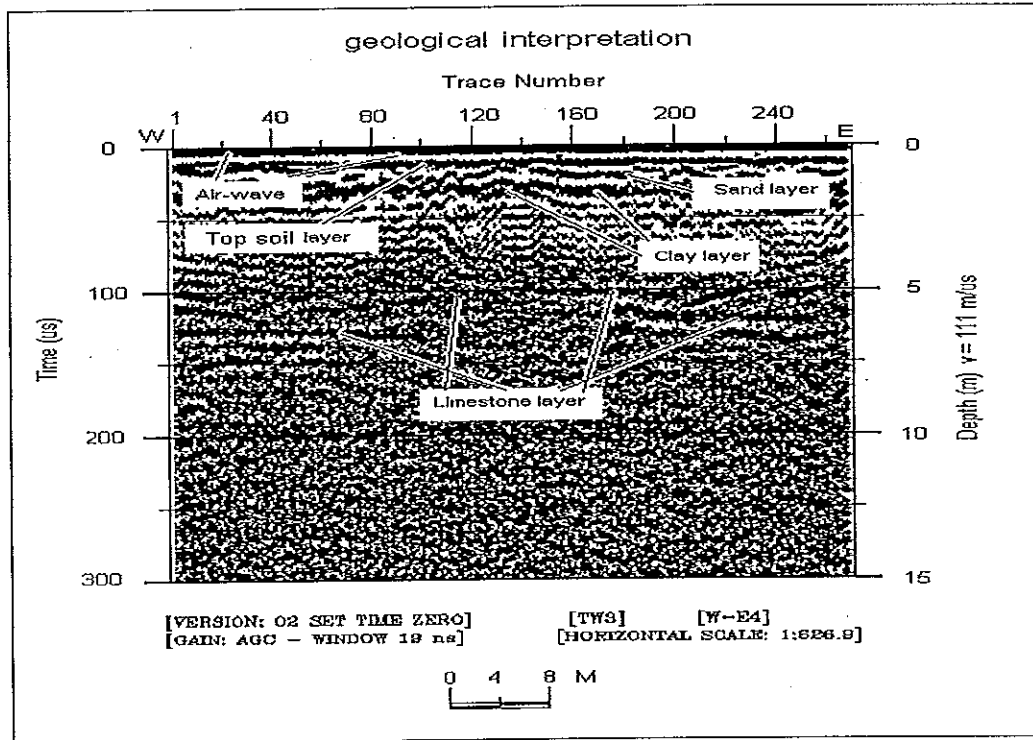
รูปที่ 78 ภาคตัดขวางในแนววัดที่ L-06



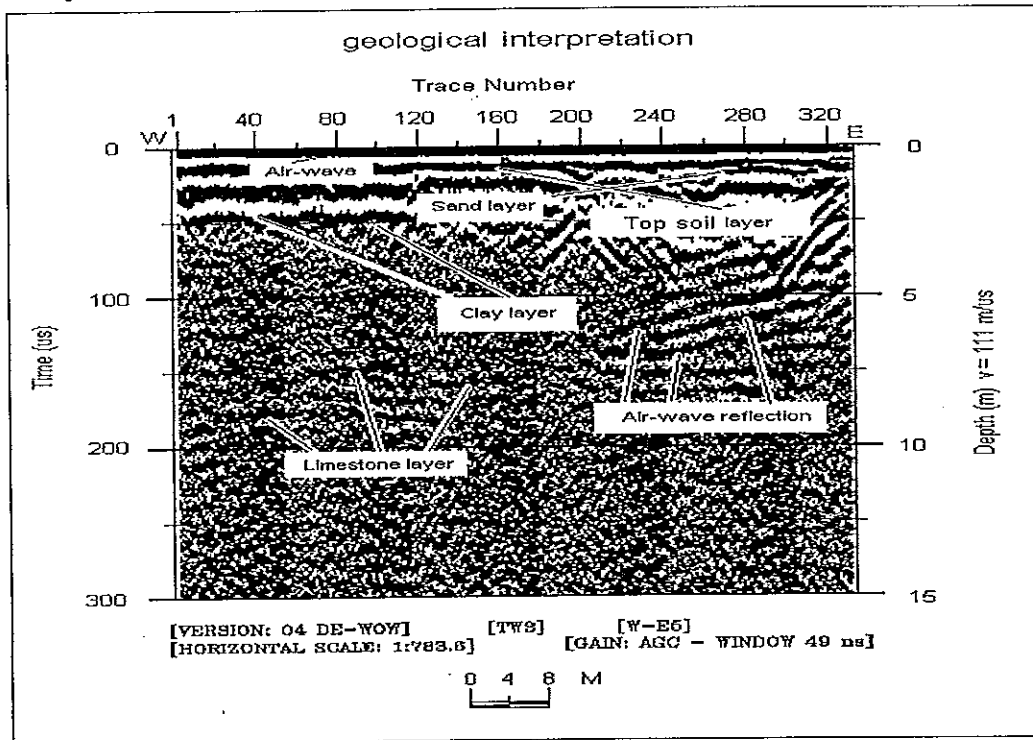
รูปที่ 79 ภาคตัดขวางในแนววัดที่ L-07



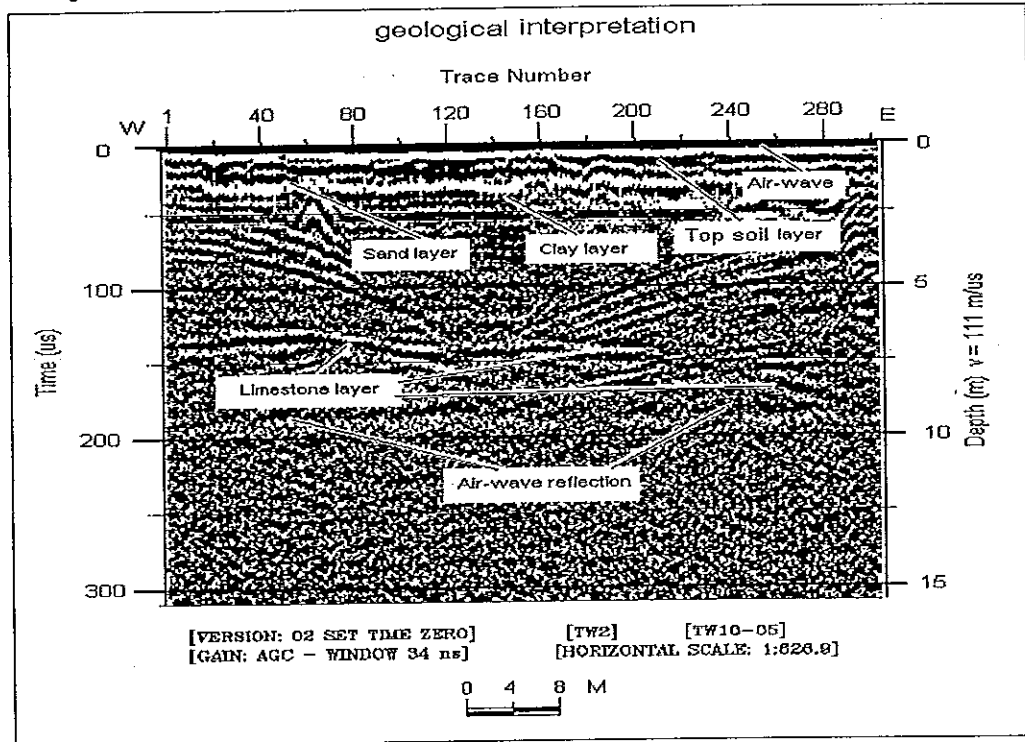
รูปที่ 80 ภาคตัดขวางในแนววัดที่ L- 08



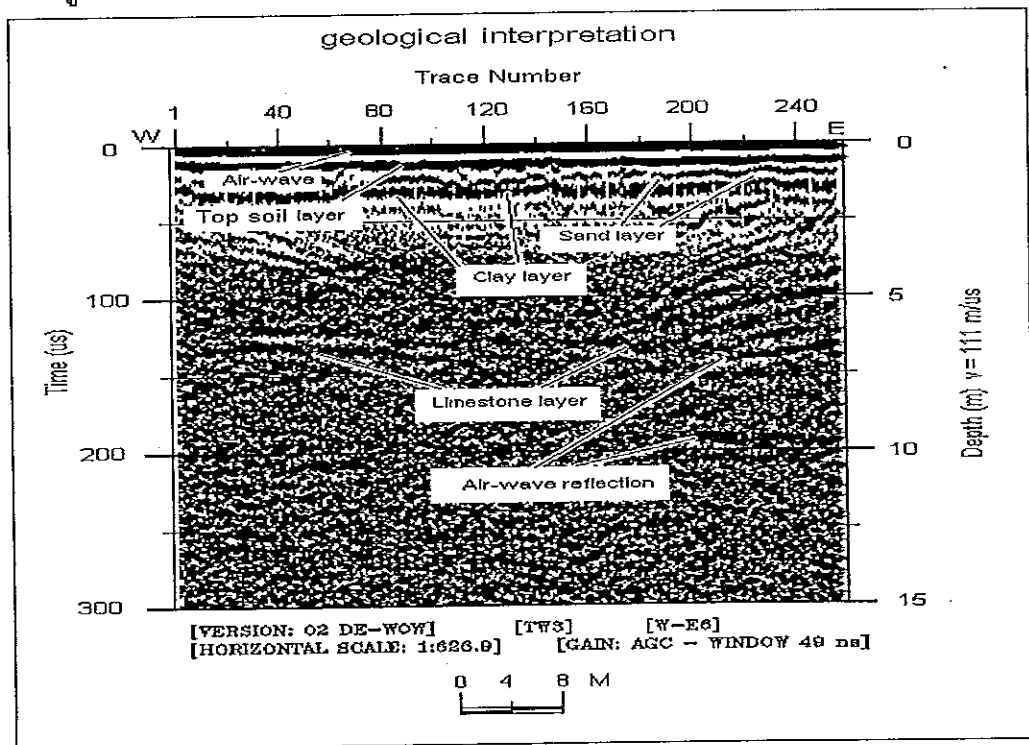
รูปที่ 81 ภาคตัดขวางในแนววัดที่ L- 09



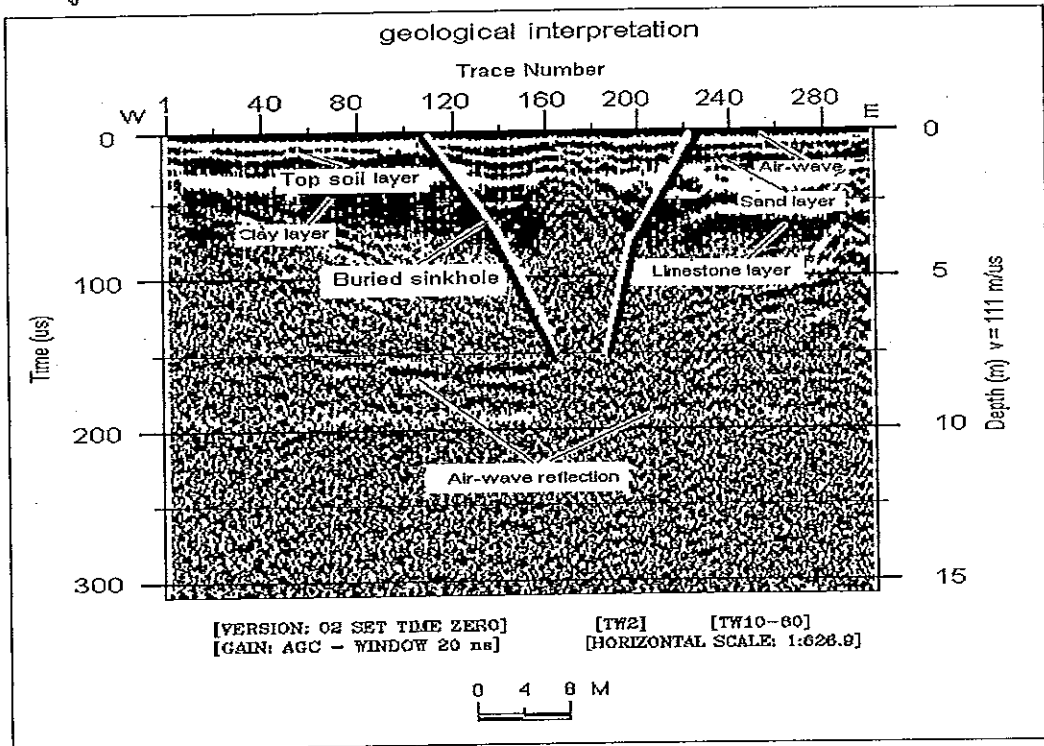
รูปที่ 82 ภาคตัดขวางในแนววัดที่ L-10



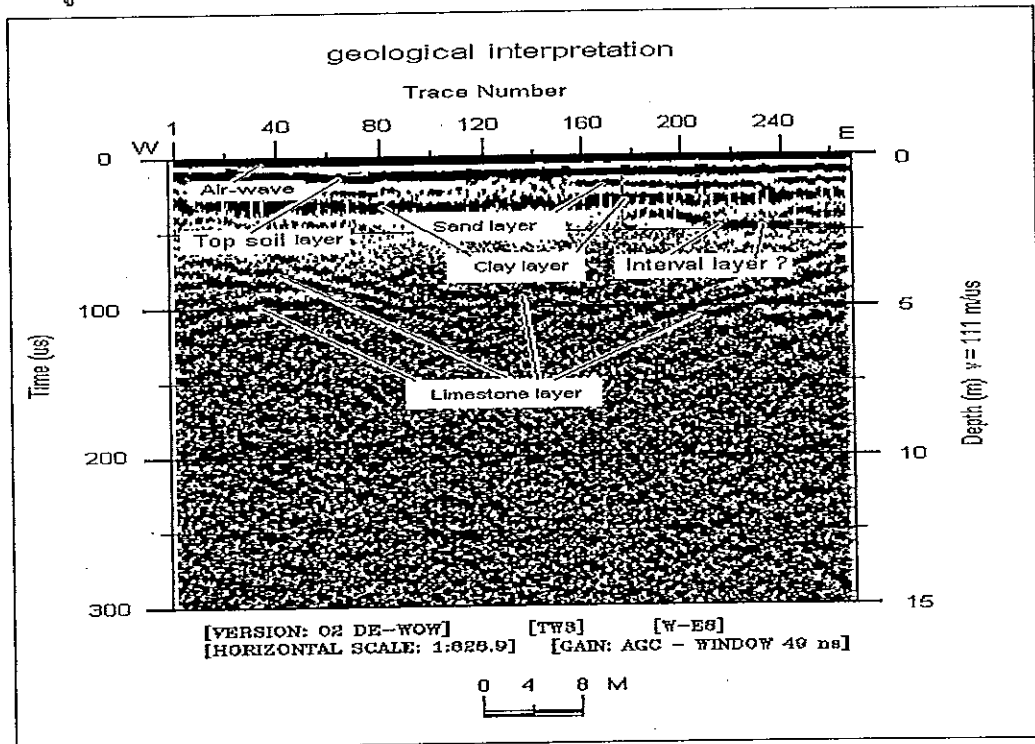
รูปที่ 83 ภาคตัดขวางในแนววัดที่ L-11



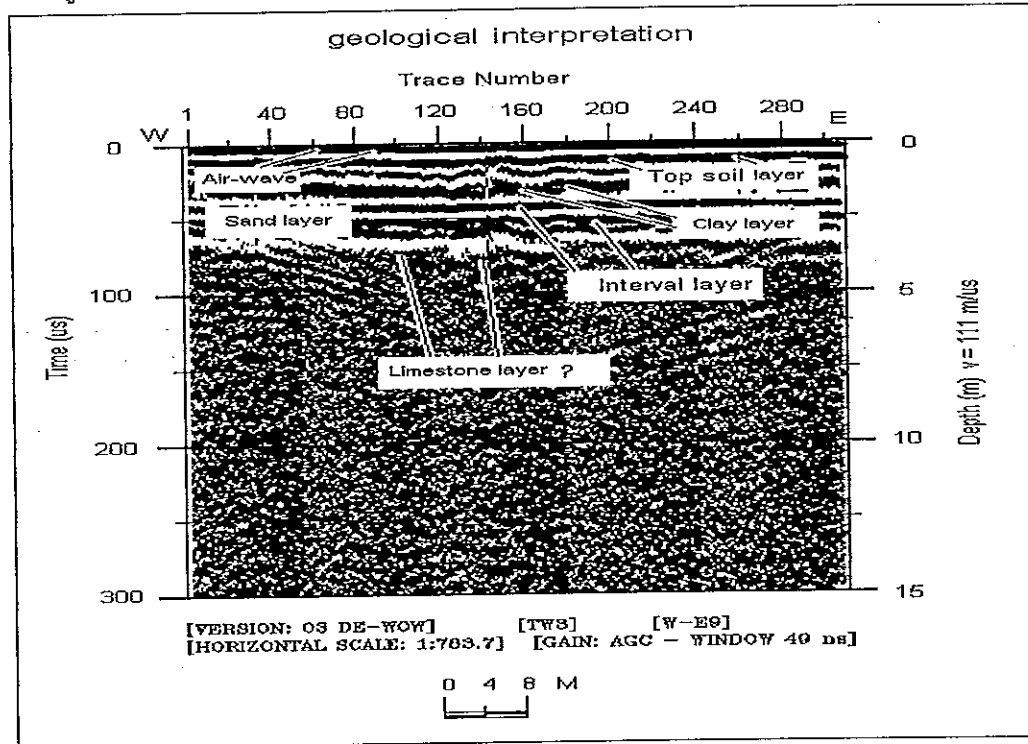
รูปที่ 84 ภาคตัดขวางในแนววัดที่ L-12



รูปที่ 85 ภาคตัดขวางในแนววัดที่ L-13

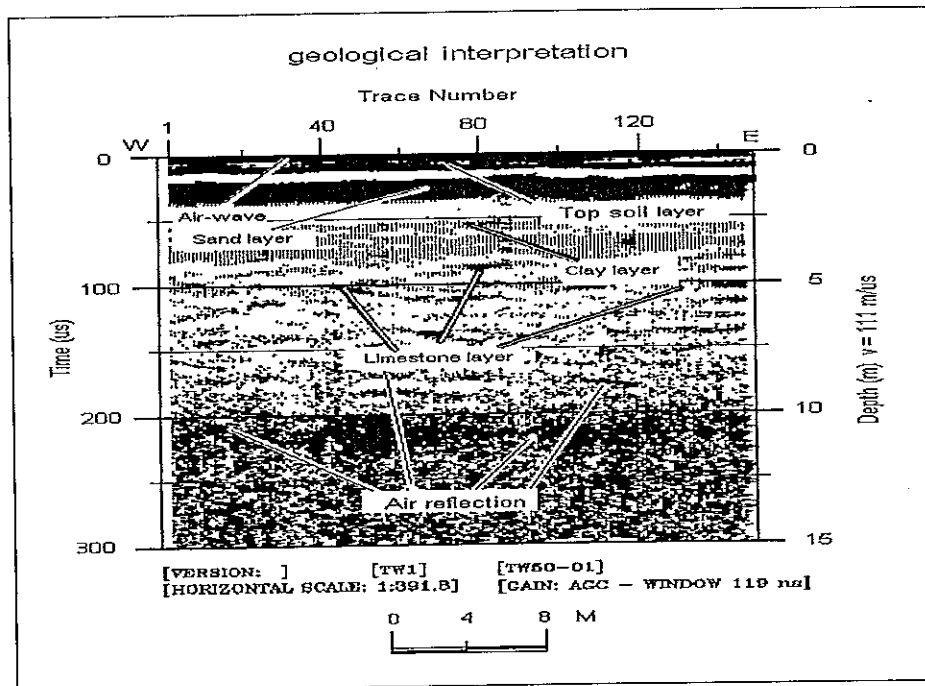


รูปที่ 86 ภาคตัดขวางในแนววัดที่ L-14

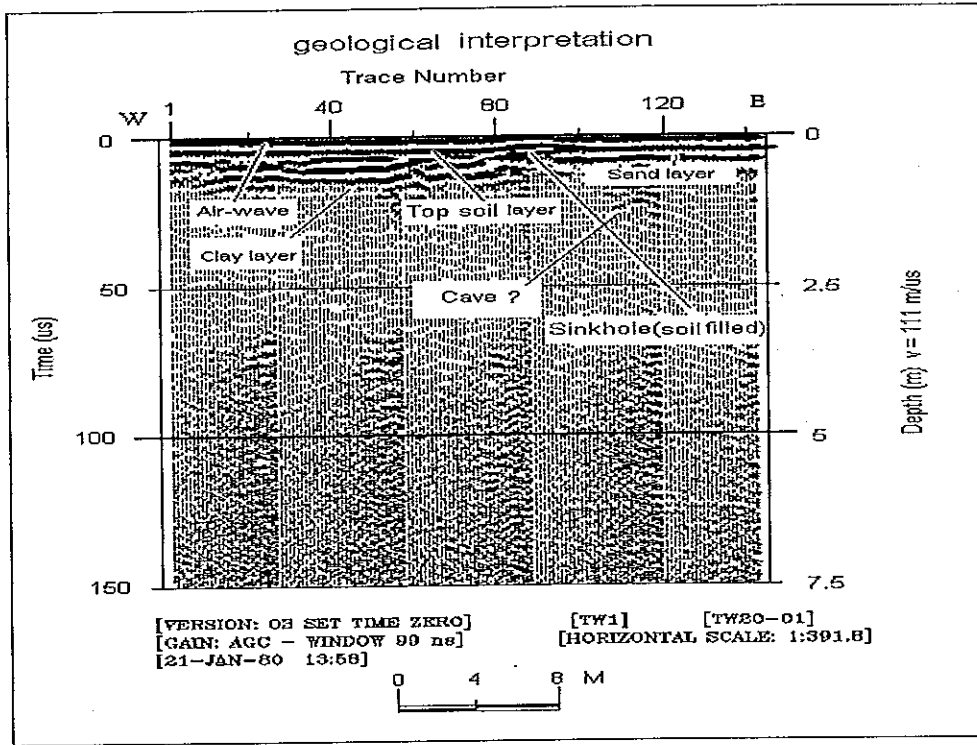


รูปที่ 87 ภาคตัดขวางในแนววัดที่ L-15

ก. ความถี่ของสายอากาศ 50 เมกะเฮิรตซ์

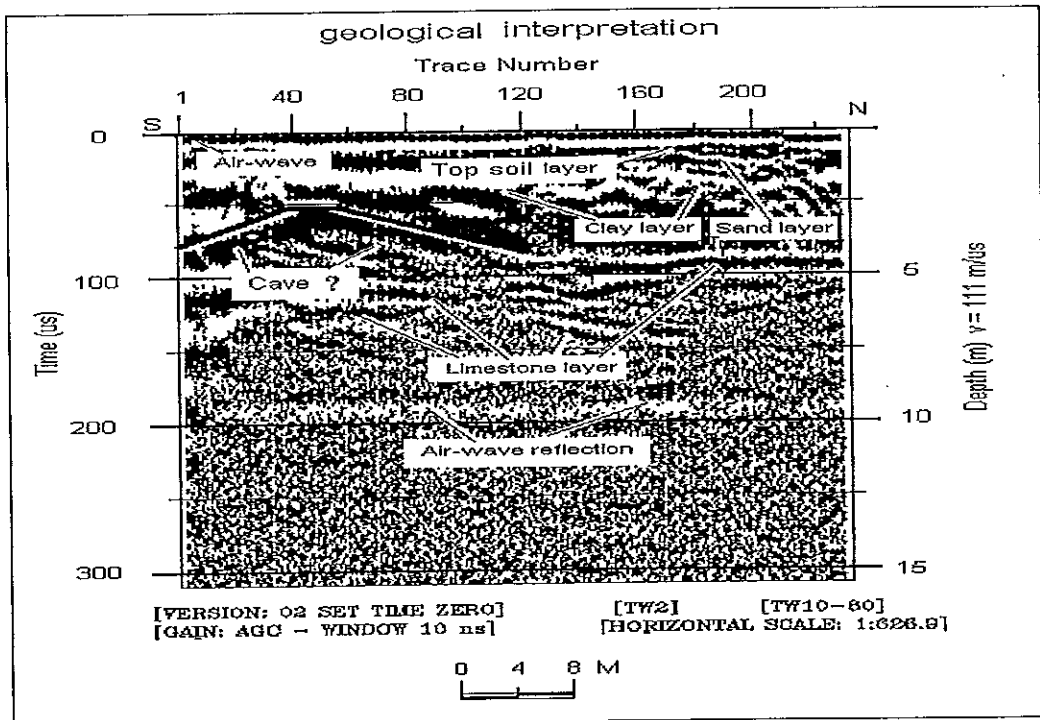


ข. ความถี่ของสายอากาศ 200 เมกะเฮิร์ตซ์

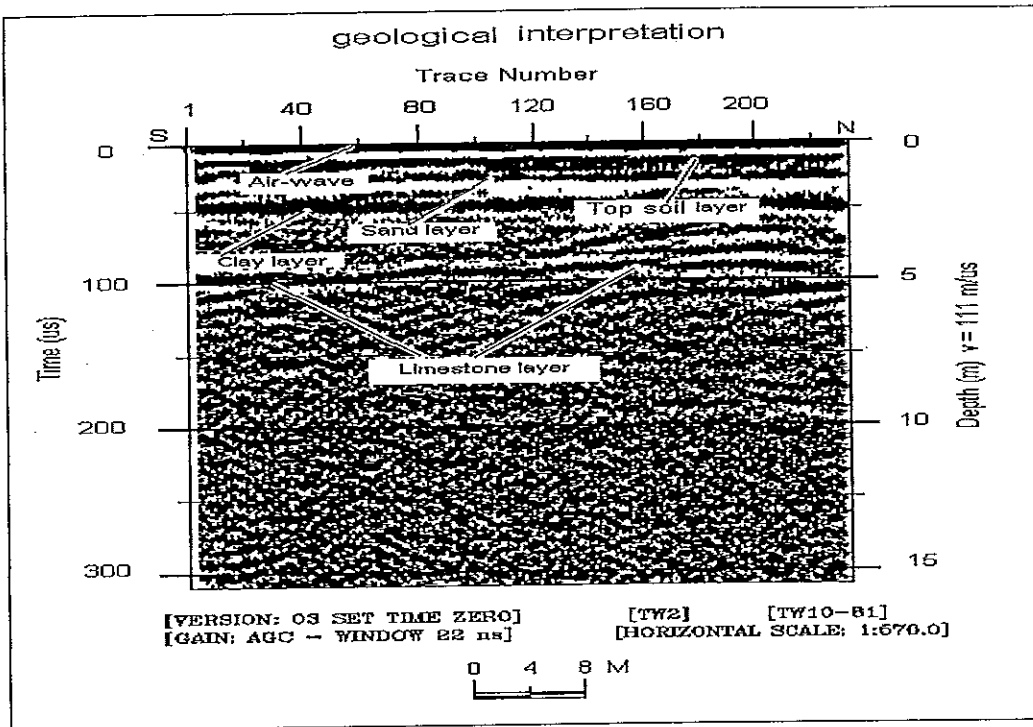


รูปที่ 88 ภาคตัดขวางในแนววัดที่ L-16

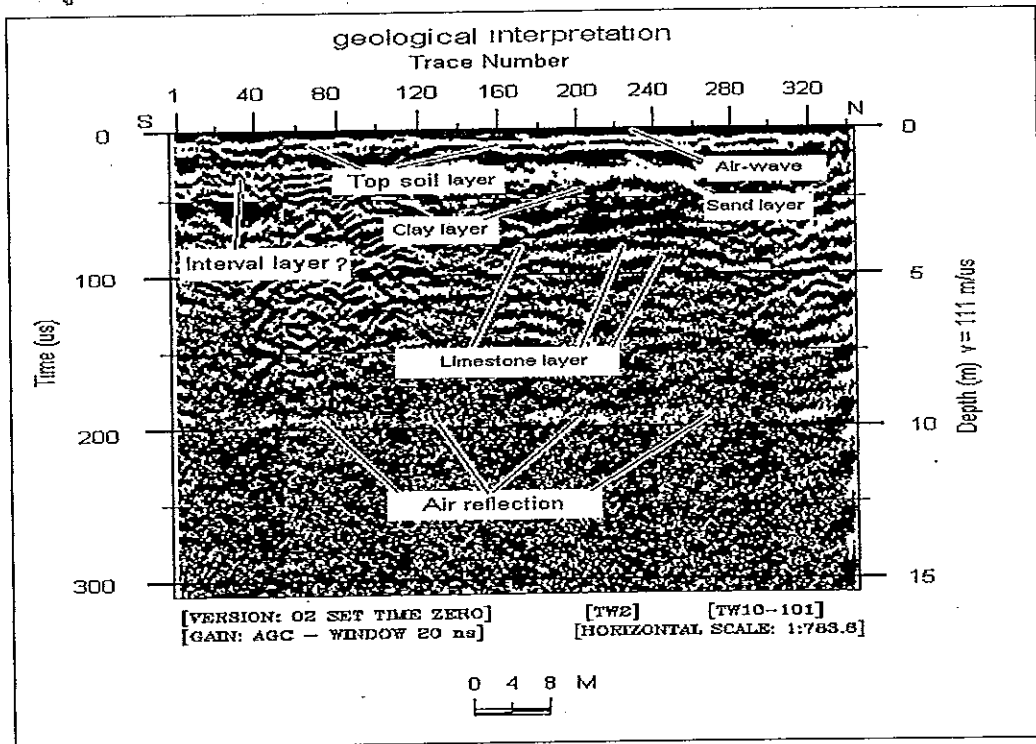
ก. ช่วงแรก



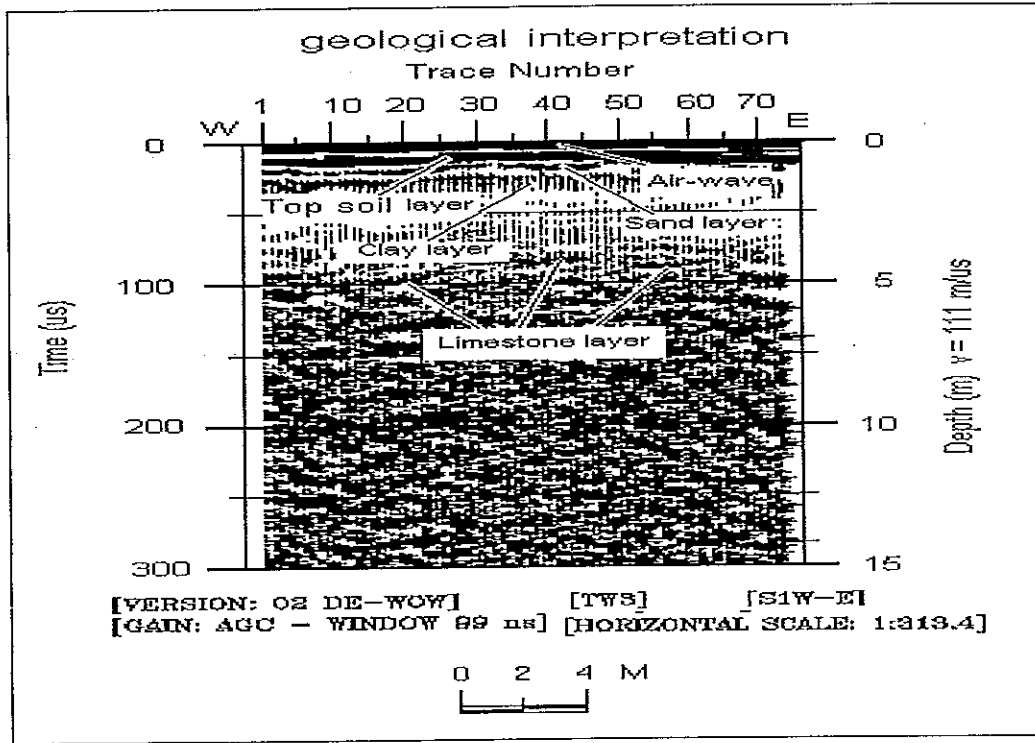
ข. ช่วงที่ 2



รูปที่ 89 ภาคตัดขวางในแนววัดที่ L-17

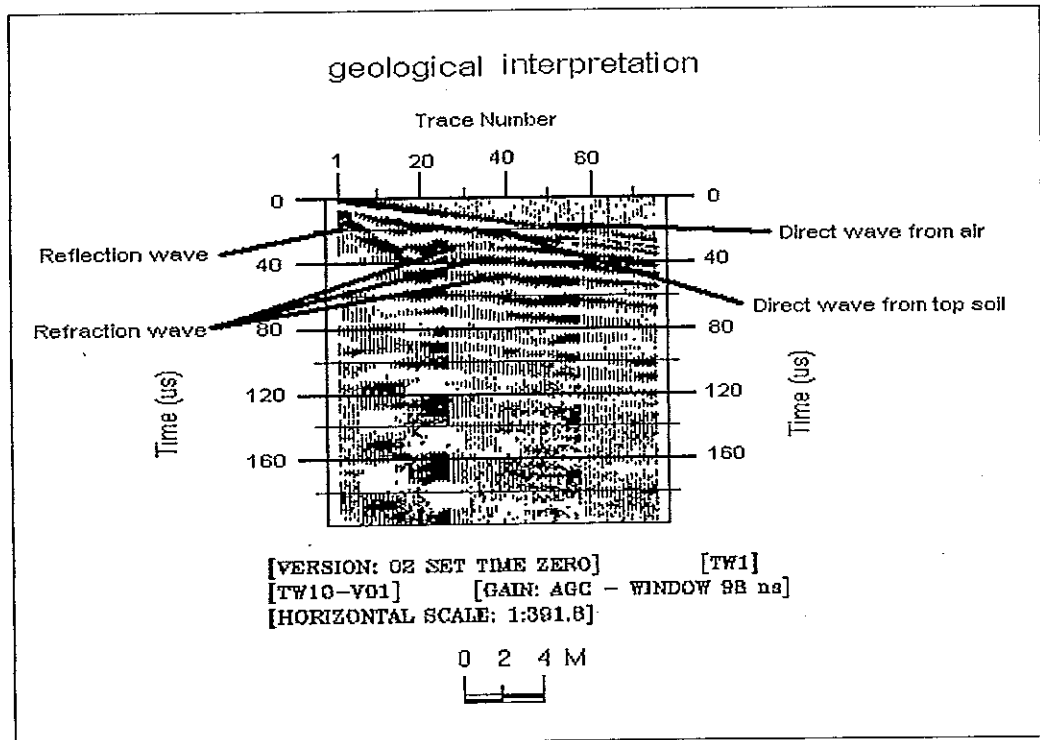


รูปที่ 90 ภาคตัดขวางในแนววัดที่ L-18

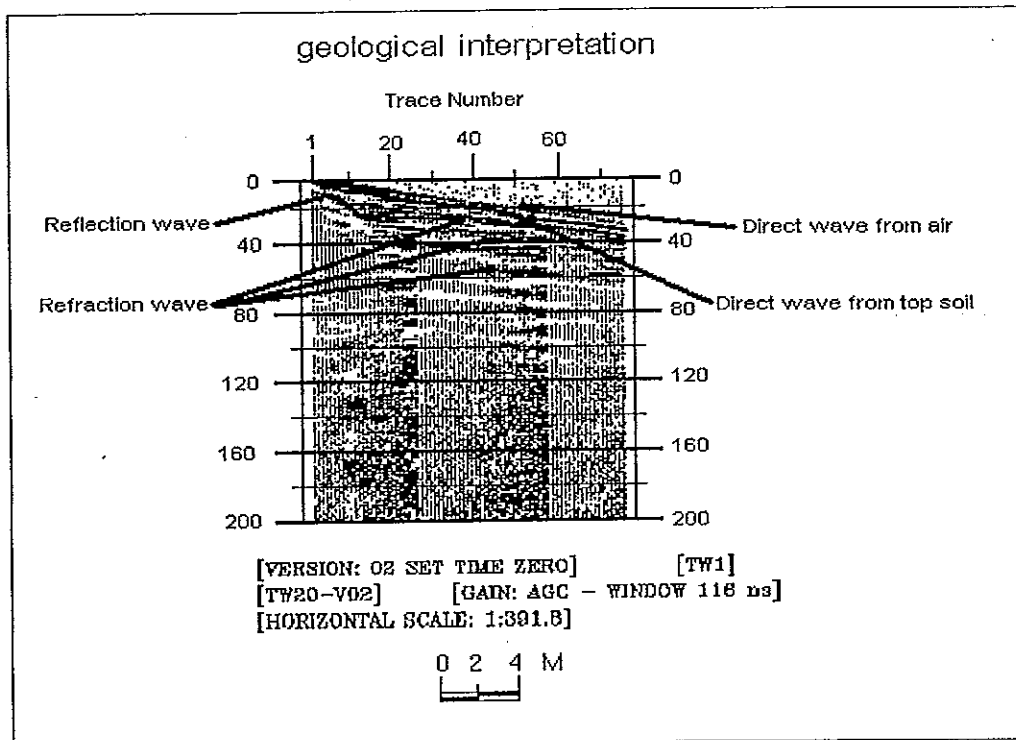


รูปที่ 91 ภาคตัดขวางจากการทำ WARR

ก. ความถี่ของสายอากาศ 100 เมกะเฮิรตซ์



ข. ความถี่ของสายอากาศ 200 เมกะเฮิรตซ์



วิจารณ์ผลการศึกษา

1. วิจารณ์ผลการศึกษาคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห

ผลจากการประยุกต์ใช้เทคนิคการวัดคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเหในพื้นที่ที่ศึกษา พบว่าสามารถที่กำหนดโครงสร้างทางธรณีวิทยา สามารถที่จะแสดงลักษณะความสูงต่ำของชั้นดินทั้ง 3 ชั้นได้ดี ทั้งชั้นของผิวดิน ดินเหนียว และหินปูน เนื่องจากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของชั้นดินทั้ง 3 ชั้นนี้มีความแตกต่างกันของความเร็วของคลื่นยืดหยุ่นมาก ดังนั้นการศึกษาด้านคลื่นไหวสะเทือนจึงเด่นในด้านการกำหนดโครงสร้างของชั้นดิน เนื่องจากข้อด้อยบางประการของการศึกษาด้วยวิธีคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห จึงไม่ประสบผลสำเร็จในการตรวจพบโพรงในหินปูน เพราะที่คลื่นยืดหยุ่นที่ผ่านเข้าสู่ชั้นหินปูนแล้วหักเหผ่านเข้าสู่โพรงที่มีอากาศหรือน้ำเป็นส่วนประกอบ คลื่นยืดหยุ่นนั้นไม่สามารถที่จะหักเหกลับมายังตัวรับสัญญาณหรือจีไอโฟนได้เนื่องจาก ความเร็วของคลื่นยืดหยุ่นในหินปูนมากกว่าความเร็วของคลื่นยืดหยุ่นในโพรง

อีกหนึ่งช่วงทำการสำรวจเป็นช่วงที่ไม่ค่อยต่อเนื่อง เพราะสภาพดินฟ้าอากาศไม่เอื้ออำนวยเนื่องจากฝนตกตลอดปี ดังนั้นการเก็บข้อมูลจึงล่าช้า บางช่วงในการสำรวจเป็นช่วงที่ฝนตก แต่บาง

ช่วงครึ่งฝนไม่ตก นับว่าเป็นปัญหาต่อการศึกษาวิจัยอย่างมาก เพราะนอกจากจะมีผลกระทบต่อเครื่องมือหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ แล้ว ยังมีผลต่อการแปลความที่ได้จากการสำรวจ เนื่องจากว่า ปริมาณน้ำในชั้นดินที่เพิ่มขึ้นภายหลังจากฝนตกจะส่งผลต่อค่าความเร็วของคลื่นยืดหยุ่นในชั้นดิน หรือชั้นหินได้โดยตรง ดังนั้นการวิเคราะห์ หาค่าความเร็ว ความหนา และความลึกของแต่ละชั้น อาจจะมีค่าแตกต่างกันถึงแม้ว่าจะเป็นจุดสำรวจเดียวกันก็ตาม เพื่อเป็นการป้องกันปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าวควรที่จะสำรวจในช่วงที่ไม่มีปริมาณการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำใต้ดิน

2. วิจารณ์ผลการศึกษาความถ่วง

ผลจากการประยุกต์ใช้เทคนิคการวัดความถ่วงในพื้นที่ที่ศึกษาพบว่าค่าความถ่วงผิดปกติแบบบัวร์เกอร์มีค่าต่ำตรงที่เกิดหลุมยุบปัจจุบันจริง แต่ไม่ประสบผลสำเร็จในการตรวจหาโพรงในหินปูนได้ อาจจะเนื่องมาจากขนาดของโพรงไม่ได้มีขนาดที่โตพอที่จะส่งผลการเปลี่ยนแปลงค่าความถ่วงได้ แต่เมื่อใช้เทคนิคการหารูปทรงที่อาจจะก่อให้เกิดค่าความถ่วงผิดปกติทั้ง วัตถุ 4 รูปทรง พบว่าตำแหน่งของรูปทรงที่น่าจะส่งผลทำให้เกิดค่าความถ่วงผิดปกติในบริเวณพื้นที่ศึกษา คือ วัตถุรูปทรงกลม วัตถุรูปทรงกระบอกในแนวตั้ง วัตถุรูปทรงแผ่นมวล และวัตถุรูปทรงชั้นบันไดตามลำดับ

3. วิจารณ์ผลการศึกษาเรดาร์หยั่งความลึก

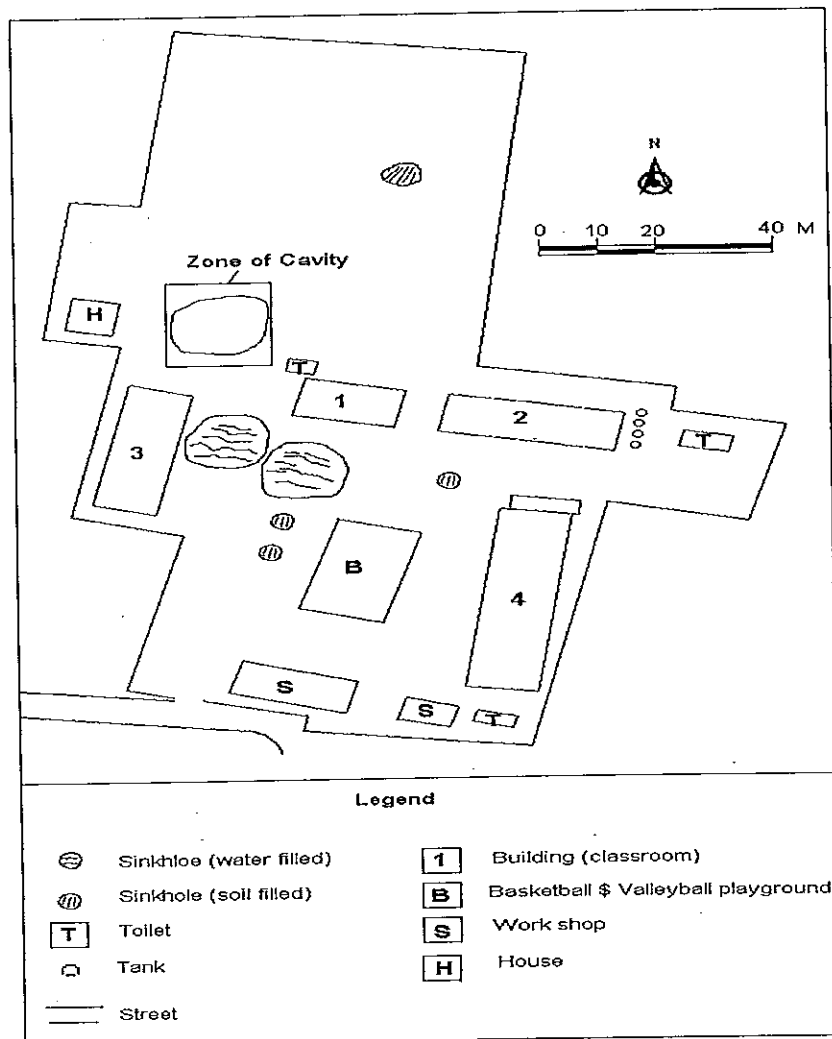
การประยุกต์ใช้เรดาร์หยั่งความลึกในพื้นที่ที่ศึกษา นับเป็นวิธีที่เหมาะสมในการศึกษาในบริเวณโรงเรียนบ้านทุ่งวิมาน ซึ่งมีลักษณะพื้นที่เป็นแบบคาสต์ ผลจากการศึกษาพบว่าสามารถตรวจพบสัญญาณผิดปกติที่คาดว่าน่าจะเกิดจากการสะท้อนของโพรงในหินปูน สามารถกำหนดตำแหน่งของหลุมยุบ สามารถตรวจหาหลุมยุบที่ฝังกลบ ปัญหาและอุปสรรคในการสำรวจด้วยวิธีนี้คือ สภาพดินฟ้าอากาศที่มีฝนตกทำให้ยากต่อการสำรวจ และอีกประการคือควรที่จะนำวัตถุ วัตถุใด ๆ ที่เป็นตัวนำไฟฟ้า เช่นสายไฟฟ้า ลวดหนาม เส้นเหล็ก ออกห่างในขณะที่ทำการสำรวจ เพราะวัตถุเหล่านั้นเป็นตัวสะท้อนได้ดี จึงทำให้เกิดการรบกวนของสัญญาณ แม้จะใช้วิธีการของสัญญาณแล้วก็ตาม

4. เปรียบเทียบผลกับงานวิจัยที่ผ่านมา

ผลจากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้พบผลข้อแตกต่างกับผลการศึกษาวิจัยด้วยการวัดสภาพด้านทานไฟฟ้าของ ดีเซลล์ สวนบุรี (2538); Laochu และ Suanburi (1996) 2 ประการ คือ

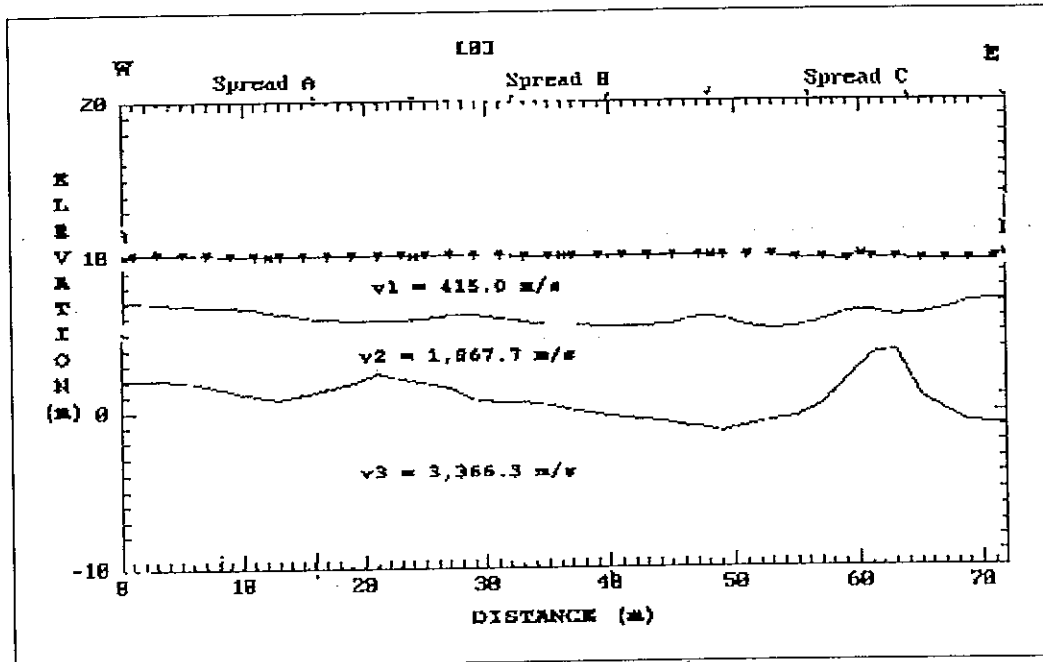
ประการแรกคือตำแหน่งของโพรงในชั้นหินปูนที่ได้จากการศึกษาวิจัยครั้งนี้อยู่ในบริเวณตอนกลางของพื้นที่ศึกษาห่างจากอาคาร 1 ไปทางด้านตะวันตกเฉียงเหนือประมาณ 20 เมตร (รูปที่ 92) ส่วนผลการศึกษาจากการวัดสภาพด้านทานไฟฟ้าพบโพรงในชั้นหินปูน จำนวน 2 โพรง อยู่ใต้อาคารเรียน 1 และประการสุดท้ายระดับความลึกถึงชั้นหินปูนในแนววัดที่อยู่หลังอาคารเรียน 1 จากการศึกษาด้วยคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเหพบว่าชั้นหินปูนอยู่ในระดับความลึกไม่เกิน 10 เมตร และความสูงต่ำของชั้นหินปูนค่อนข้างสม่ำเสมอ (รูปที่ 93ก) แต่ผลจากการวัดค่าสภาพด้านทานไฟฟ้า พบชั้นหินปูนอยู่ในระดับความลึกตั้งแต่ 5 - 25 เมตร (รูปที่ 93ข) และแนววัดที่วัดจากประตูโรงเรียน จากการศึกษาด้วยคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเหพบว่าชั้นหินปูนอยู่ในระดับความลึกไม่เกิน 12 เมตร โดยความสูงต่ำของชั้นหินปูนค่อนข้างสม่ำเสมอ (รูปที่ 94ก) แต่ผลจากการวัดค่าสภาพด้านทานไฟฟ้า พบชั้นหินปูนอยู่ในระดับความลึกตั้งแต่ 5 - 35 เมตร (รูปที่ 94ข)

รูปที่ 92 ตำแหน่งของโพรงที่สามารถตรวจพบ

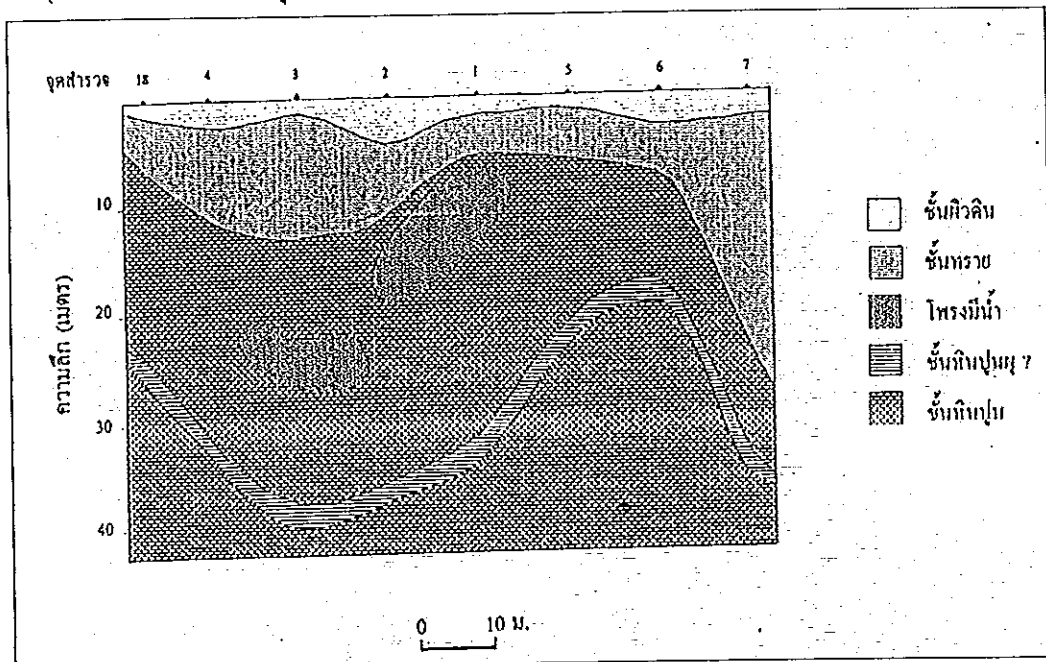


รูปที่ 93 แสดงภาคตัดขวางในแนววัดข้างหลังอาคารเรียน 1

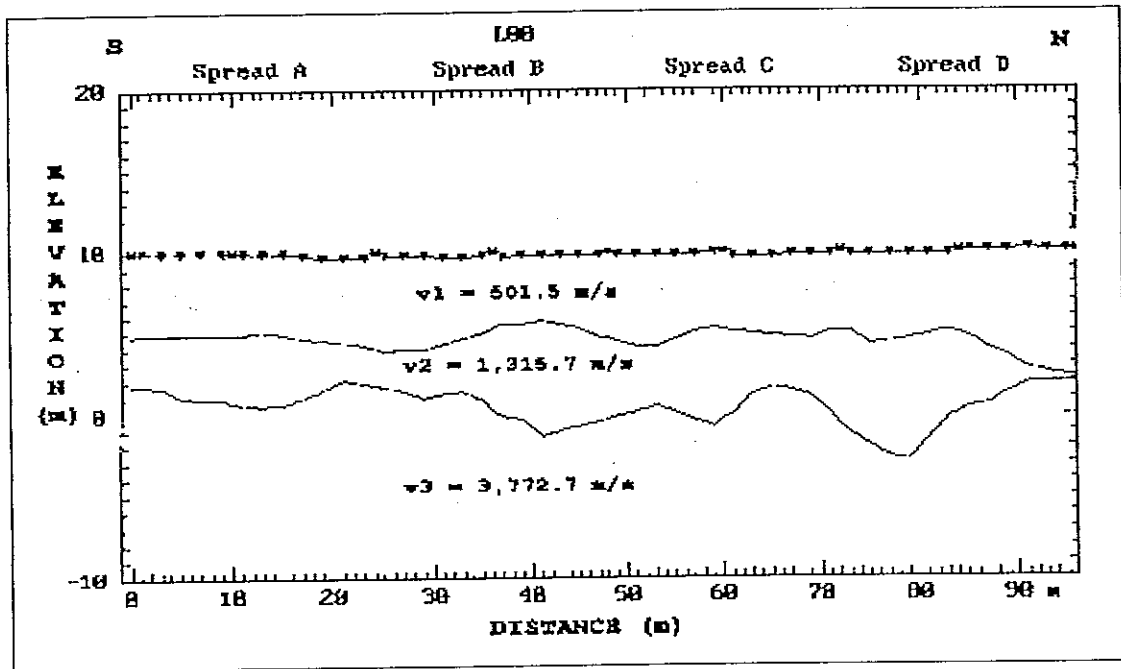
ก. ภาคตัดขวางจากการวัดคลื่นไหวสะเทือน



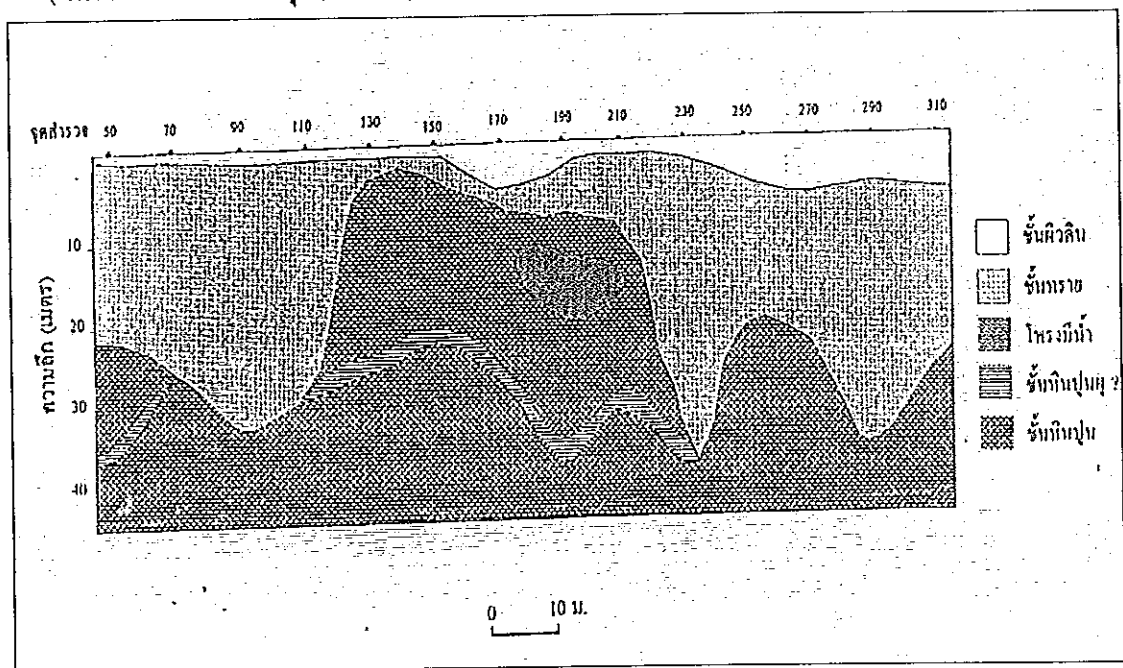
ข. ภาคตัดขวางจากการวัดสภาพด้านทานไฟฟ้าในแนววัดที่ 1
(ที่มา : ดีเซลล์ สวานบุรี., 2538)



รูปที่ 94 แสดงภาคตัดขวางในแนววัดจากประตูโรงเรียน
ภาคตัดขวางจากการวัดคลื่นไหวสะเทือน



ข. ภาคตัดขวางของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า
(ที่มา : ดีเซลส์ สวามบุรี., 2538)



บทที่ 4

สรุป

จากการศึกษาวิจัยเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในใช้ระเบียบวิธีธรณีฟิสิกส์ ซึ่งประกอบด้วย การศึกษาโดยวิธีคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห การหยังลึกด้วยเรดาร์ และการวัดค่าความถ่วง ในการกำหนดลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาของชั้นดินที่อาจมีอิทธิพลในการก่อให้เกิดหลุมยุบในพื้นที่ของโรงเรียนบ้านทุ่งวิมาน อำเภอเมือง จังหวัดสตูล และการกำหนดตำแหน่งและความลึกถึงโพรงในชั้นหินปูนที่อาจทำให้เกิดการพังทลายของโพรงเป็นหลุมยุบในอนาคต ผลจากการศึกษาวิจัยพบว่า ในบริเวณพื้นที่ศึกษาวิธีคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเหสามารถกำหนดชั้นตัวกลางจำนวน 3 ชั้นซึ่งวางขนานกัน โดยความลึกถึงตัวกลางที่สามไม่เกิน 10 เมตร ในขณะที่ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลความถ่วงพบว่าการยกตัวของดินชั้นล่างที่มีความหนาแน่นมากกว่าในพื้นที่บริเวณ ตะวันออกเฉียงเหนือของพื้นที่ที่ทำการศึกษา โดยแนวระดับของการยกตัวอยู่ในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ และหลุมยุบซึ่งปัจจุบันมีอยู่ในพื้นที่ศึกษาแสดงภาพสัญญาณเรดาร์เป็นรูปแบบไฮเปอร์โบลาค่า และจากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ตรวจพบรูปแบบของสัญญาณเรดาร์ ลักษณะเดียวกันเพิ่มเติมอีก 1 ตำแหน่งที่บริเวณตอนกลางของพื้นที่ศึกษาห่างจากอาคาร 1 ไปทาง ด้านตะวันตกเฉียงเหนือประมาณ 20 เมตร ส่วนสรุปผลในการศึกษาวิจัยแต่ละวิธีมีรายละเอียดต่อไป

1. การศึกษาโดยคลื่นไหวสะเทือนชนิดหักเห

การศึกษาประกอบด้วยแนววัดทั้งหมดจำนวน 21 แนววัด (แนววัด 00 – 20) รวมความยาวประมาณ 2,400 เมตร โดยกำหนดใช้ระยะห่างของจีโอโฟน 2 เมตร ผลจากการศึกษาได้ตรวจพบชั้นตัวกลางจำนวน 3 ชั้นวางขนานกัน โดยตัวกลางที่ 1 มีพิสัยของความเร็ว 328 - 800 เมตรต่อวินาที มีความหนาประมาณ 5 เมตร ตัวกลางที่สองมีพิสัยของความเร็ว 1,284 - 1,867 เมตรต่อวินาที และมีความหนาประมาณ 6 เมตร และตัวกลางที่สามมีพิสัยของความเร็ว 2,268 - 4,766 เมตรต่อวินาที จากผลการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้สังเกตว่าหลุมยุบปัจจุบันจะปรากฏในตำแหน่งตัวกลางที่สามอยู่ที่ระดับความลึกประมาณ 9 เมตร

2. การศึกษาโดยการหยั่งลึกด้วยเรดาร์

การศึกษาด้วยวิธีหยั่งลึกด้วยเรดาร์ประกอบขึ้นด้วยแนววัดรวม 19 แนววัด (แนววัด 00 – 18) โดยใช้ระยะห่างของจุดวัดแต่ละจุด 20 เซนติเมตร ใช้ความถี่ของสายอากาศที่เหมาะสม 100 เมกะเฮิรตซ์ ผลจากการศึกษาพบว่าโครงสร้างทางธรณีวิทยาใต้ดินในระดับตื้นประกอบด้วยชั้นตัวกลางที่วางขนานกัน นอกจากนี้ยังสังเกตพบสัญญาณเรดาร์ผิดปกติรูปไฮเปอร์โบล่าคว่ำในบริเวณของหลุมยุบปัจจุบัน และยังสามารถตรวจพบสัญญาณผิดปกติรูปไฮเปอร์โบล่าคว่ำที่บริเวณตอนกลางของพื้นที่ศึกษาห่างจากอาคาร 1 ไปทางด้านตะวันตกเฉียงเหนือประมาณ 20 เมตร ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากการสะท้อนของสัญญาณเรดาร์ในโพรงใต้ดินในชั้นหินปูน

3. การศึกษาโดยการวัดค่าความถ่วง

การศึกษาโดยการวัดค่าความถ่วงประกอบด้วยแนววัดทั้งหมดรวม 19 แนววัด (00 – 18) จำนวน 703 สถานีวัด ผลการศึกษาพบว่าค่าความถ่วงผิดปกติที่มีค่าต่ำจะอยู่บริเวณที่มีหลุมยุบทั้งบริเวณหลุมยุบด้านทิศใต้ และหลุมยุบที่มีการฝังกลบด้านทิศเหนือ ส่วนค่าความถ่วงผิดปกติมีแนวโน้มที่สูงขึ้นจากทางด้านตะวันตกเฉียงใต้ไปยังด้านตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งจากผลการสร้างแบบจำลองโครงสร้างชั้นตัวกลางได้ชี้ให้เห็นการยกตัวของชั้นตัวกลางที่มีค่าความหนาแน่นสูง (ชั้นหินปูน?) ในบริเวณด้านตะวันออกเฉียงเหนือของพื้นที่ศึกษาวิจัย นอกจากนี้จากการสังเคราะห์รูปทรงของวัตถุผิดปกติที่ก่อให้เกิดค่าความถ่วงผิดปกติพบว่ารูปทรงแบบขั้นบันได (step model) สามารถใช้อธิบายการยกตัวของดินชั้นล่างได้ดี ในขณะที่รูปทรงกระบอกในแนวตั้ง (pipe model) และรูปทรงกลม (sphere) สามารถใช้อธิบายหลุมยุบหรือโพรงในชั้นหินปูน และรูปทรงแผ่นม้วน (ribbon model) ใช้อธิบายรอยเลื่อนที่พาดผ่านเข้ามาในบริเวณโรงเรียนบ้านทุ่งวิมานได้ดี

4. ข้อเสนอแนะ

ปัญหาหลักที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการศึกษาวิจัย ณ โรงเรียนบ้านทุ่งวิมานในครั้งนี้ คือ สภาพดินฟ้าอากาศในบริเวณพื้นที่ศึกษาจะมีฝนตกเกือบตลอดทั้งปี จึงทำให้เป็นอุปสรรคต่อการดำเนินการศึกษาวิจัย ทั้งคณะผู้ทำการวิจัย เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ และประการสำคัญคือส่งผลต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน ซึ่งอาจทำให้การแปลความอาจจะได้ผลไม่เหมือนกัน ดังนั้นเพื่อไม่ให้มีผลต่อการแปลความจากการศึกษาวิจัย ควรที่จะดำเนินการเก็บข้อมูลในภาคสนามในช่วงที่มีการ

เปลี่ยนสภาพดินฟ้าอากาศน้อย หรือปฏิบัติให้เสร็จสิ้นทีละวิธี ในแต่ละช่วง

การระมัดระวัง ในการใช้เครื่องมือแต่ละชนิดในการเก็บข้อมูลภาคสนามเป็นสิ่งที่ควรจะต้องปฏิบัติอย่างยิ่ง เช่น ตำแหน่งการปักจีไอโฟน ตำแหน่งแนววัดแต่ละแนว ควรหลีกเลี่ยงสิ่งรบกวนที่อาจจะส่งผลต่อการเก็บข้อมูล เช่น สายไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า หรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวกับตัวนำไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของยานพาหนะ

เนื่องจากผลของการศึกษาวิจัยในบริเวณโรงเรียนบ้านทุ่งวิมานในครั้งนี้ ไม่ได้สอดคล้องกันกับตำแหน่งของโพรงในชั้นหินปูนที่ได้จากการศึกษาด้วยการวัดสภาพด้านทานไฟฟ้าที่ผ่านมา (ดีเซลล์ สวนบุรี, 2538; Laochu and Suanburi, 1996) ดังนั้นควรที่จะมีการประยุกต์ใช้วิธีธรณีฟิสิกส์อื่น ๆ เช่น การสำรวจด้วยวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าธรรมชาติ (self - potential) การสำรวจด้วยวิธีการเหนี่ยวนำโพลาไรเซชัน (induced polarization) การวัดความถ่วงแบบ vertical gradient และการสำรวจด้วยวิธีแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic) เพื่อหาตำแหน่งตำแหน่งของโพรงในชั้นหินปูน ในลำดับต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- กองเศรษฐศาสตร์วิทยา. 2516. "การสำรวจธรณีฟิสิกส์เบื้องต้นกับการหาโครงสร้างธรณีวิทยาและแหล่งแร่", ข่าวสารการธรณี. ปี 18. หน้า 15 - 20.
- กัมพล มณีประพันธ์, สมชัย ชัยเสน และ นิคม สุขขวัญ. 2540. "โครงการสำรวจและแก้ไขปัญหาหลุมยุบ บริเวณ อำเภอเมือง อำเภอควนโดน อำเภอกาหลง และอำเภอทุ่งหว้า จังหวัดสตูล", ในรายงานการสำรวจธรณีฟิสิกส์ : รายงานสำนักงานทรัพยากรธรณีเขต 1 สงขลา สิงหาคม 2540. กรมทรัพยากรธรณี, กระทรวงอุตสาหกรรม.
- กิตติชัย วัฒนานิก. 2526. การสำรวจสำหรับนักธรณีวิทยาและวิศวกร. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : มิตรนราการพิมพ์.
- คณะกรรมการจัดทำพจนานุกรมธรณีวิทยา. 2530. พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา อังกฤษ-ไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1.
- ดีเซลล์ สนวนบุรี. 2538. "การสำรวจแผ่นดินยุบ ด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์ บริเวณบ้านทุ่งวิมาน ตำบลบ้านควน อำเภอเมือง จังหวัดสตูล", ใน รายงานวิชาการฉบับที่กศ. กองเศรษฐศาสตร์วิทยา, กรมทรัพยากรธรณี.
- เทสไค้, บริษัท. 2539. "โครงการจัดหาและพัฒนาแหล่งหินปูนเพื่ออุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ในภาคใต้", ใน รายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมเบื้องต้น. ฉบับ สมบูรณ์. หน้า 3-3 - 3-9. กรุงเทพฯ : บริษัทเทสไค้.
- ธงชัย พึ่งรัศมี. 2531. ธรณีวิทยาทั่วไป. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โอ.เอส.พรินติ้งเฮาส์.
- ประมาณ เทพสงเคราะห์. 2540. "ภูมิเนเวศน์ภูมิประเทศศาสตร์จากภาคสนามภาคใต้", วารสารภูมิศาสตร์. ปีที่ 3. หน้า 11 - 24.
- มานพ รัชชาสกุลวงศ์. 2530. "การสำรวจธรณีวิทยาโครงสร้างด้วยวิธีคลื่นสะท้อนแบบหักเหกลับ", ข่าวสารการธรณี. ปีที่ 22. หน้า 28 - 36.
- วรวิทย์ โฉมะวิจารณ์. 2537. "การสำรวจแกรวิตี". สงขลา : ห้องปฏิบัติการธรณีฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. (สำเนา).
- สุวิทย์ โคสุวรรณ. 2538. "การสำรวจแผ่นดินยุบที่โรงเรียนบ้านทุ่งวิมาน หมู่ที่ 2 ตำบลบ้านควน อำเภอเมือง จังหวัดสตูล", ใน การประชุมผลงานทางวิชาการกองธรณีวิทยา ประจำปี 2538. หน้า 49 - 51. กรมทรัพยากรธรณี.

สุรพล อารีย์กุล. 2523. *การสำรวจแหล่งแร่. ภาควิชาเหมืองแร่และโลหะวิทยา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.*

สุวิทย์ เพชรห้วยลึก. 2539. "การศึกษาโครงสร้างทางธรณีวิทยาเชิงภูมิภาคในจังหวัดสงขลา พัทลุงและตรัง ด้วยวิธีธรณีฟิสิกส์ (A Regional Study of Geological Structure in Changwat Songkhla, Changwat Phatthalung and Changwat Trang with Geophysical Method)", *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขา ฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. (สำเนา).*

อภิชาติ พัฒนวิริยะพิศาล. 2542. "การศึกษาโครงสร้างทางโบราณคดีด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง (A Study of Archaeology Morphology with High Frequency Electromagnetic Wave)", *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. (สำเนา).*

_____. "An introduction to refraction seismology". *refraction seismology*.<http://www-geology.ucdavis.edu/~GEL161/refraction.html>. (2 February 2000).

_____. "Geo II/planet earth II lecture notes for 7 October subsidence and collapse sometimes geology can be depressing".*classification of succidence*. <http://gretchen.geo.rpi.edu/roecker/GeoII/lectures/subsidence.html>. (25 June 1999).

_____. "Ground penetrating radar". <http://www.geosphereinc.com/gpr.htm>. (28 July.1999).

_____. "Ground penetrating radar surveys". <http://www.groundpenetrating radar.com/>. (25 June 1999).

_____. "Introduction to applied geophysics". <http://www.st-andrews .ac.uk/%7Eww-sgg/personal/crblink/GEOPHY/index.htm>. (25 January 2000).

_____. "Karst In British Columbia".*How Karst is formed*. <http://www.for.gov.bc.ca/hfp/fo rdev/karst/contents.htm>. (25 June 1999).

_____. "Missouri caves, karst, and spring". <http://www.umst.edu/~joellaws/ozarkcav- ing/springs/sprkarst.htm>. (28 August 1999).

- _____. "Sink Holes". <http://www.soil.umn.edu/acedemics/classes/soil3125/doc/1-sinkle.htm>. (28 July 1999).
- _____. "Sinkhole and kilns". <http://emerald.ucsc.edu/~es10/fieldtripUCSC/sinkhole.html>.(28 July 1999).
- Ackermann, H. D., Pankratz, L. W. and Dansereau, D. 1986. "Resolution of ambiguities of seismic refraction travelttime curves", Geophysics. v. 2 pp. 223 - 235.
- Ager, C. A. and Liard, J. O. 1982. "Vertical gravity gradient surveys: Field results and interpretations in British, Canada", Geophysics. v.47. pp. 919 - 925.
- Al-Nuainmy, W. 2000. "Automatic detection of buried utilities and solid objects with GPR using neural network and pattern recognition",Journal of applied geophysics. v. 43. pp. 157 -165.
- Anderson, N. L., Martinez, A., Hopkins, J. F. and Carr, T. R. 1998. " Case history; Salt dissolution and surface subsidence in Central Kansas: A seismic investigation of the anthropogenic and natural origin models", Geophysics. v. 63. pp. 366 - 378.
- Arzi, A. A. 1975. "Microgravimeter for engineering application", Geophysical prospecting. v. 23. pp. 408 - 425.
- Assaad, F. A. and Jordan , H. 1994. "Karst terranes and enviromental aspects", Enviromental geology. v.23. pp. 228 - 237.
- Banerjee, B. and Gupta, S. K. 1975. "Hidden layer problem in seismic refraction work", Geophysical prospecting. v. 23. pp. 642 - 652.
- Barry, K. M. 1967. "Delay time its application to refraction profile interpretation", in society of exploration geophysicst : seismic refraction prospecting, pp. 348 - 361. Musgrave, A. W. ed. Wisconsin : Georg Banta Company, Inc.
- Barthelmes, A. J. 1946. "Application of continuous profiling to refraction shooting", Geophysics. v. 2. pp. 24 - 42.
- Benito, G., Campo, P. P., Gutierrez-Eloza, M. and Sancho, C. 1995. "Natural and human-induced sinkholes in gypsum terrain and associated enviromental problems in NE Spain", Enviromental geology. v. 25. pp. 156 -164.

- Benson, A. 1995. "Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: examples of groundwater contamination, fault, cavities", Journal of applied geophysics. v. 33. pp. 177 - 193.
- Benson, R. C. and Yuhr, L. 1993. "Spatial sampling considerations and their applications to characterizing fractured rock and karst systems", Environmental geology. v. 22. pp. 296 - 307.
- Bergstrom, J. 1998. "Geophysical methods for investigating and monitoring the integrity of sealing layer on mining waste deposit", Division of applied geophysics, Lulea university of technology. Lulea : Sweden.
- Bono, P. 1995. "The sinkhole of Doganella (Pontina Plain, central Italy)", Environmental geology. v. 26. pp. 48 - 52.
- Boyd, T.M. "Introduction to geophysics exploration". *Refr.seismic*. http://www.mines.edu/fs_home/tboyd/GP311/introgp.shtml. (16 May 1999).
- Boyd, T.M. "Introduction to geophysical exploration". *Gravity*. http://www.mines.edu/fs_home/tboyd/GP311/introgp.shtml. (16 May 1999).
- Butler, D. K. 1984. "Microgravimetric and gravity gradient techniques for detection of subsurface cavities", Geophysics. v. 49. pp. 1084 - 1096.
- Buttrick, D. and Schalkwyk, A.V. 1998. "Hazard and risk assessment for sinkhole formation on dolomite land in South Africa", Environmental geology. v. 36. pp. 170 - 178.
- Camacho, A. G., Vieira, R., Montesinos, F.G. and Cuellar, V. 1994. "A Gravimetric 3D global inversion for cavity detection", Geophysical prospecting. v. 42. pp. 113 - 130.
- Carpenter, P.J., Doll, W.E. and Kaufmann, R.D. 1998. "Geophysical character of buried sinkholes on the Oak Ridge Reservation, Tennessee", Journal of environmental & engineering geophysics. v. 3. pp. 133 - 145.
- Crawford and Associates. Inc. "The karst page". <http://www.dyetracing.com/karst/karst.html>. (30 June 1999).

- Crawford, N. C. and Ulmer, C. S. 1994. "Hydrogeologic investigation of contaminant movement in karst aquifers in the vicinity of a train derailment near Lewisburg, Tennessee", Environmental geology. v. 23. pp. 41 - 52.
- Currens, J. C. and Graham, C.D.R. 1993. "Flooding of sinking creek, garretts spring karst drainage basin, jessamine and counties, Kentucky, USA", Environmental geology. v. 22. pp. 337 - 344.
- Davis, J. L. and Annan, A. P. 1989. "Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy", Geophysical prospecting. v. 37. pp. 531 - 551.
- Day, P. W. and Wagener, F. V. M. 1984. "Investigation techniques on dolomites in South Africa", in Sinkholes: Their geology, engineering and environmental impact, pp. 153 - 158. Beck, B.F. ed. Boston : Balkema.
- Dobrin, M. B. 1976. Introduction to geophysical prospecting. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, Inc.
- Dufour, J. and Foltinek, D. S. "The plus - minus analysis method". <http://geo.polymtl.ca/crews/html/refrac-manual/refrac.html>. (7 February 2000).
- Dutta, N. P., Bose, R. N. and Saikia, B. C. 1970. "Detection of solution channels in limestone by electrical resistivity method", Geophysical prospecting. v. 18. pp. 405 - 414.
- Enviroscan., Inc. <http://www.enviroscan.com/seismic.htm>. (29 July 1999).
- Fajkiewicz, Z. J. 1976. "Gravity vertical gradient measurements for the detection of small geologic and anthropogenic forms", Geophysics. v. 41. pp. 1016 - 1030.
- Florida internet center for understanding sustainability. "Ficus: Floridar's water" *recharge areas*. <http://www.ficus.ust.edu/library/fl-water/water4.htm>. (29 July 1999).
- Fruhworth, R. K., Schmoller, R. and Oberaigner, E. R. 1996. "Some aspects on the estimation of electromagnetic wave velocities", in Proceedings of the 6th international conference on ground penetrating radar, pp. 135 - 138. Sendai : Department of geoscience & technology Tohoku University.

- Gardner, L. W. 1967. "Refraction seismograph profile interpretation", in Society of exploration geophysicst : seismic refraction prospecting, pp. 338 - 347. Musgrave, A. W. ed. Wisconsin : Georg Banta Company, Inc.
- GeoModel, Inc. "Sinkhole detection", *Sinkhole detection example*. <http://www.gemodel.com/sinkholedetection/>. (30 June 1998).
- Gill, R. "Dolines". *collapse sinkholes*. <http://www.geowvu.edu/~dgrill/dolnes.htm>. (5 april 1999).
- Grimes, K. G. 1994. "The south-east province of South Australia", Enviromental geology. v. 23. pp. 134 - 148.
- Gruber, S. and Ludwig, F. "Application of ground penetrating radar in glaciology and permafrost prospecting". <http://www.uni-giessen.de/~gg102/pap-rad.htm>. (26 January 2000).
- Haeni, F. P. 1986. "Application of seismic refraction methods in ground water modelling studies in New England", Geophysics. v. 51. pp. 236 - 249.
- Hall, D. H. and Hajnal, Z. 1962. "The gravimeter in studies of buried valleys", Geophysics. v, 27. pp. 939 - 951.
- Hall, R.D. "Principle of geomorphology". *Karst*. <http://www.cees.iupi.edu/classes/G415/Geomorphology.htm>. (5 april 1999).
- Hill, C. 1995. "Sulfur redox reactions: Hydrocarbons, native sulfur, Mississippi Valley - type deposits, and sulfuric acid karst in the delawaer Basin, New Mexico and Texas", Enviromental geology. v. 25. pp. 16 - 23.
- Illinois Stae Geological Survey., "Karst Landscapes of Illinolis". <http://www.hazard.uiuc.edu/isgsroot/servs/pubs/geobits-pub/geobit7/geobit7.html>. (21 August 1999).
- James, J. M. 1993. "Burail and infilling of karst in Papua New Guinea by road erosion sediments", Enviromental geology. v. 21. pp. 144 - 151.
- Jancin, M. and Clark, D. D. 1993. "Subsidence-sinkhole development in light of mud infiltrate structures winthin interstratal karst of the Coastal Plain, south United States", Enviromental geology. v. 22. pp. 330 - 336.

- Jin, D. J. 1974. "Two dimensional mass distributions from gravity anomalies: A computer method", Geophysical prospecting. v. 22. pp. 761 - 764.
- Johansson, E. M. and Mast, J. E. "Three-dimensional ground penetrating radar Imaging using synthetic aperture time-domain focusing". <http://canopus.llnl.gov/documents/imaging/emjspie94.html>. (24 January 2000).
- Johansson, E. M. and Mast, J. E. "Three-dimensional ground penetrating radar imaging using multi-frequency diffraction tomography". <http://www-dsed.llnl.gov/documents/imaging/jemspie94.html>. (24 January 2000).
- Johnson, S. H. 1976. "Interpretation of split-spread refraction data in terms of plane dipping Layers", Geophysics. v. 41. pp. 418 - 424.
- Jones, G. M. and Jovanovich, D. B. 1985. "A ray inversion method for refraction analysis", Geophysics. v. 50. pp. 1701 - 1720.
- Kaila, K. L., Tewari, H. C. and Krishna, V. G. 1981. "An indirect seismic method for determining the thickness of a low - velocity layer underlying a high - velocity layer", Geophysics. v. 46. pp. 1003 - 1008.
- Kaspar, M. and Pecen, J. 1975. "Detection of caves in a karst formation by means of electromagnetic waves", Geophysics prospecting. v. 23. pp. 611 - 621.
- Kearey, P. and Brooks, D. 1991. An introduction to geophysical exploration. 2nd ed. William Clowes : Beccles and London.
- Laochu, P. and Suanburi, D. 1996. "Geophysical investigation of subsurface cavities at Ban Thung Wiman School, Satun province", in geology and environment, pp. 69 – 76. Patanastein, B., and Reib, S. L. ed. Chaing Mai University : Chaing Mai.
- Lemke, K.A. "Karst processes and landforms". http://www.uwsp.edu/acaddept/geog/facluty/lemke/ge.../06_karst_processes_landforms.ht. (22 April 1999).
- Littlefield, J. R. 1984. "Relationship of modern sinkhole development to large scale-photolinear features", in sinkholes: their geology, engineering and environmental impact, pp. 189 - 195. Beck, B.F. ed. Boston : Balkema.
- Loulizi, A. "Ground penetrating radar". http://www.sv.vt.edu/classes/EMS4714/Student_Proj/class96/loulizi/loulizi.html. (24 January 2000).

- MALA Geoscience. "How does radar work". <http://www.malags.se/ramac/radar.shtml>.
(24 January 2000).
- Nettleton, L. L. 1940. Geophysical prospecting for oil. New York and London :McGraw-Hill book company,Inc.
- Pakiser, I. C. and Black, R. A. 1957. "Exploring for ancient channels with the refraction seismograph", Geophysics. v. 22. pp. 32 - 47.
- Panno, S. V., Wiebel, C. P., Heigold, P.C. and Reed, P. C. 1994. "Formation of regolith-collapse sinkhole in southern Illinois: Interpretation and identification of associated buried cavities", Environmental Geology. v. 23. pp. 214 - 220.
- Parasnis, D.S. 1997. Principles of Applied Geophysics. 5 th ed. Bristol : J.W. Arrowsmith Ltd.
- Popenoe, P.P., Kout, F.A. and Manheim, F.T. 1984. "Seismic reflection studies of sinkholes and limestone dissolution features on the northeastern floridashelf ", in sinkholes:their geology, engineering and environmental impact, pp. 43 - 58.
Beck,B.F. ed. Boston : Balkema.
- Quresh, I. R. and Mula, H. G. 1971. "Two-dimensional mass distributions from gravity anomalies: A computer method", Geophysical propecting. v. 19. pp. 180 - 191.
- Rippert, P. M., Morgan, F. D. and Tooksoz, M. N. 2000. "Dielectric constant determinant using ground-penetrating radar reflection coefficients", Journal of applied geophysics. v. 43. pp. 189 -197.
- Rimrock Geophysics, Inc. 1995. Personal computer program. Lakewood : Rimrock Geophysics Inc.
- Robinson, B. " Brian robinson freeware: seismic refraction plus-minus interpretation".
<http://www.es.lancs.ac.uk/es/people/teach/br/progs/SeiSheet/PlusMin.htm>. (7 February 2000).
- Robinson, E. and Coruh, C. 1988. Basic exploration geophysics. John Wiley & Jons, Inc : New York.

- Sauro, U. 1993. "Human impact on the karst of the Venetian Fore-Alps, Italy", Environmental geology. v. 21. pp. 115 - 121.
- Schoolmeester, J. W. "Basic electromanetic theory". <http://www.tg.mp.tudelft.nl/%7Ejws/riode3.html>. (24 January 2000).
- Scott, J. H. 1973. "Seismic refraction modeling by computer", Geophysics. v. 38. pp. 271 - 284.
- Shaqour, F. 1994. "Hydrogeologic role in sinkhole development in the desert of Kuwait", Environmental geology. v. 23. pp. 201 - 208.
- Sigurdsson, T. and Overgaard, T. 1996. "Application of gpr3-d visualization of geological and structural variation in a limestone formation", in proceedings of the 6th international conference on ground penetrating radar, pp. 39 - 44. Sendai : Department of geoscience & technology Tohoku University.
- Steeple, D.W., Knapp, R.W. and McElwee, C.D. 1986. "Seismic reflection investigations of sinkholes beneath interstate highway 70 in Kansas", Geophysics. v. 2. pp. 295-301.
- Stevens, K.M., Lodha, G.S., Holloway, A. L. and Soonawala, N.M. 1995. "The application of ground penetrating radar for mapping fractures in plutonic within the whiteshell research area, Pinawa. Manitoba, Canada", Journal of applied geophysics. v. 33. pp. 125 - 141.
- Stewart, M. and Wood, J. 1984. "Geophysical characteristics of fracture traces in the carbonate floridan aquifer", in sinkholes: their geology, engineering and environmental impact, pp. 225 - 229. Beck, B.F. ed. Boston : Balkema.
- Summerfield, M. A. 1991. Global geomorphology. John Wiley & Sons, Inc : New York. pp 149 - 151.
- Taner, M. T., Cook, E. E. and Neidell, N. S. 1970. "Limitations of the reflection seismic method; lessons from computer simulations", Geophysics. v. 35. pp. 551 - 573.
- Telford, W. M., Geldart, L. P. and Sheriff, R. E. 1993. Applied geophysics. 2nd ed. Cambridge University : New York.

- Tillard, S. and Dubios, J.C. 1995. "Analysis of GPR data : wave propagation velocity determination", Journal of applied geophysics. v. 33. pp. 77 - 91.
- Tsokas, G. N. 1995. "The detection of monumental tombs buried in tumuli by seismic refraction", Geophysics. v. 60. pp. 1735 - 1742.
- Urich, P. B. 1993. "Stress on tropical karst cultivated with wet rice:Bohol, Phillippines", Enviromental geology. v. 21. pp. 129 - 136.
- Versteeg, R. 1996. "Optimization of gpr acquisition and noise elimination parameters ", in proceedings of the 6th international conference on ground penetrating radar, pp. 289 - 293. Sendai : Departmentof geosceince & technology Tohoku university.
- Wegrzyn, M., Soto, A. E. and Perez, J. A. 1984. "Sinkhole development in Nort - Central Puerto Rico", in sinkholes:their geology, engineering and environmental impact, pp. 137 - 142. Beck,B.F. ed. Boston : Balkema.
- Werner, E. 1984. "Sinkhole prediction - review of electrical resistivity methods", in sinkholes:their geology, engineering and environmental Impact, pp. 231 - 234. Beck,B.F. ed. Boston : Balkema.
- Wyatt, D. E. and Temples, T. J. 1996. "Ground-penetrating radar detection of small-scale channels, joints and faults in the unconsolidated sediments of the Atlantic Coastal Plain", Enviromental geology. v. 27. pp. 219 - 225.
- Yacoub, N. K., Scott, J. H. and Mckeown, F. A. 1970. "Computer ray tracing through complex geological models for ground motion studies", Geophysics. v. 35. pp. 586 - 602.
- Yule, D. E., Sharp, M. K. and Bulter, D. K. 1998. "Microgravity investigations of foundation conditions",Geophysics. v. 63. pp. 95 - 103.
- Zolotarev, V. P., Grigorieff,K.N. and Glotov, V. P. 1996. "Detection of cavities in domite and profiling of alluvial deposit using GPR in Lithuania", in proceedings of the 6th international conference on ground penetrating radar, pp. 445 - 460. Sendai : Departmentof geosceince & technology Tohoku university.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายสุรเชษฐ อนุมาตร์

วัน เดือน ปีเกิด 07 เมษายน 2515

วุฒิการศึกษา

วุฒิ

ชื่อสถาบัน

ปีที่สำเร็จการศึกษา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ศึกษาศาสตร์)

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

2538

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับระหว่างการศึกษา)

ไม่มี

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

อาจารย์ 1 ระดับ 3 โรงเรียนสตึก ตำบลนิคม อำเภอสตึก จังหวัดบุรีรัมย์