

รายงานการสำรวจด้านธรณีฟิสิกส์

บริเวณ

ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่แฮ
ตำบลแม่นาจร อำเภอแม่แจ่ม จังหวัดเชียงใหม่

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฟองสวาท สุวคนธ์ สิงห์ราชวรพันธ์

อาจารย์ ดร. พิณณุ วงศ์พรชัย

นายเอกจำเริญ จันทร์ดี

ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สิงหาคม 2545

สารบัญ

หน้า

1. การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ	1
1.1 ทฤษฎีการสำรวจ	
1.2 การสำรวจในภาคสนาม	
1.3 การแปลความหมายข้อมูล	
2. การสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห	19
2.1 ทฤษฎีการสำรวจ	
2.2 การสำรวจในภาคสนาม	
2.3 การแปลความหมายข้อมูล	
3. สรุปผลการสำรวจ	61



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของชั้นดินชั้นหิน	3
2 รูปแบบการวางขั้วของการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ	3
3 แผนที่แสดงตำแหน่งการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ	6
4 แสดงการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะในภาคสนาม	8
5 ผลการแปลความหมายข้อมูลการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ โดยใช้โปรแกรม Resist 87®	10
6 แสดงชนิดของคลื่นไหวสะเทือน (1) คลื่นวิ่งตรง (2) คลื่นสะท้อน (3) คลื่นหักเห	21
7 แสดงการหักเหของคลื่นหักเห	21
8 แสดงวิธีการสำรวจแบบไป-ย้อนกลับ (Forward-Reverse Shooting)	24
9 แผนที่แสดงตำแหน่งที่ทำการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห	25
10 แสดงการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเหในภาคสนาม	28
11 แสดงลักษณะของ t-x graph	44
12 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห	46

โครงการหลวง

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของน้ำชนิดต่าง ๆ	4
2 ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของหินและตะกอนชนิดต่าง ๆ	4
3 รายละเอียดของการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ	7
4 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ	9
5 ผลการแปลความหมายของการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ	16
6 ความเร็วของคลื่นไหวสะเทือนในดินและหิน	23
7 รายละเอียดของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห	26
8 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห	29
9 ผลการแปลความหมายของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห	58

โครงการหลวง

การสำรวจด้านธรณีฟิสิกส์

การสำรวจธรณีฟิสิกส์ เป็นการสำรวจที่อาศัยปัจจัยพื้นฐานคือ สมบัติทางกายภาพของชั้นดินชั้นหินที่อยู่ลึกลงไปภายใต้ผิวดิน ทั้งนี้การสำรวจธรณีวิทยาโดยการเดินสำรวจและเก็บตัวอย่างในภาคสนาม จะเป็นการสำรวจที่ให้ข้อมูลบริเวณผิวดินเท่านั้น แต่ข้อมูลในส่วนที่อยู่ลึกลงไปจากผิวดิน จำเป็นต้องใช้การสำรวจธรณีฟิสิกส์เข้ามาช่วย ข้อมูลธรณีวิทยาภายใต้พื้นผิว ซึ่งได้จากการสำรวจธรณีฟิสิกส์ มีประโยชน์ในแง่ของการช่วยอธิบายลักษณะการเกิดของน้ำใต้ดิน ความสามารถในการกักเก็บน้ำ เพื่อประเมินความเหมาะสมของแหล่งน้ำในการผลิตน้ำแร่เชิงพาณิชย์

การสำรวจธรณีฟิสิกส์ ในพื้นที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่แฮ ได้เลือกใช้วิธีการ 2 แบบ คือ

1. การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Resistivity Method)
2. การสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (Seismic Refraction Method)

1. การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

1.1 ทฤษฎีการสำรวจ

การสำรวจโดยวิธีวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Resistivity Method) เป็นวิธีการหนึ่งในการสำรวจด้านไฟฟ้า (Electrical methods) ซึ่งเป็นวิธีการสำรวจธรณีฟิสิกส์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน สำหรับการสำรวจสภาพธรณีวิทยาที่อยู่ใต้ผิวดินลงไปในระดับลึกไม่มากนัก อาทิ การสำรวจน้ำบาดาลและงานด้านวิศวกรรมธรณี การสำรวจด้วยวิธีนี้อาศัยคุณสมบัติในการเป็นตัวนำของวัตถุตัวกลางเป็นสำคัญ โดยจะวัดออกมาเป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะปรากฏ (Apparent resistivity) ในภาคสนาม แล้วนำไปคำนวณหาเป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะจริง (True resistivity) จากนั้นจึงแปลความหมายออกมาในลักษณะของชั้นดินและหินในบริเวณที่ทำการสำรวจ

1.1.1 ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ หรือความต้านทานจำเพาะ (Electrical resistivity หรือ Resistivity) ของวัตถุใด ๆ หมายถึง ความต้านทาน (resistance) ของวัตถุนั้น ๆ โดยคิดเป็นโอห์ม (ohm, Ω) ต่อหนึ่งหน่วยความยาว เมื่อวัตถุนั้นมีพื้นที่หน้าตัด 1 ตารางหน่วย และกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวัตถุนั้นตามความยาว

ดังนั้น ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะจะหาได้จากสมการ

$$\rho = RA/L$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะมีหน่วยเป็นโอห์ม-เมตร โอห์ม-เซนติเมตร หรือ โอห์ม-ฟุต

R คือ ความต้านทานมีหน่วยเป็นโอห์ม

A คือ พื้นที่หน้าตัดมีหน่วยเป็นตารางเมตร ตารางเซนติเมตร หรือตารางฟุต

ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ เป็นสัดส่วนผกผันกับค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะ (Conductivity)

1.1.2 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

โดยทั่วไปแร่ที่ประกอบเป็นหินมักจะไม่นำไฟฟ้า หรือเป็นฉนวนอันน่าจะทำให้หินมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะสูง แต่เนื่องจากหินมีช่องว่างหรือรูพรุน ซึ่งเกิดจากการผุพัง แล้วมีสารละลายหรือน้ำเข้าไปแทรกอยู่ตามช่องว่าง ทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านชั้นหินต่าง ๆ ได้ โดยการนำไฟฟ้าของหินก็ก่อกำเนิดน้ำจะเป็นการนำแบบอิเล็กโทรไลต์ คือ กระแสไฟฟ้าจะไหลโดยการนำของไอออน ซึ่งเกิดจากโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนมากกว่าปกติ หรือมีอิเล็กตรอนไม่ครบ ดังนั้น ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะจึงขึ้นอยู่กับ การเคลื่อนไหว ความเข้มข้น และระดับการแยกตัวของไอออน กล่าวโดยสรุป ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของหินกักเก็บน้ำ (Water-bearing formation) มีดังนี้

- ปริมาณของน้ำในชั้นหิน ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของชั้นหิน จะแปรผกผันกับความพรุน หรืออีกนัยหนึ่งคือ ปริมาณน้ำในชั้นหินนั่นเอง

- ระดับของการอิ่มตัว ในพื้นที่บางแห่งระดับน้ำในรูพรุนหรือช่องว่างภายในหิน มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและสภาพภูมิประเทศ ซึ่งระดับของการอิ่มตัวดังกล่าว เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจะยังผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของหินกักเก็บน้ำเปลี่ยนแปลงไปด้วย

- ลักษณะเนื้อของหิน เนื้อของหินประกอบด้วยเม็ดแร่หลายชนิดและขนาดต่าง ๆ กัน การเกาะกันของเม็ดแร่ ทำให้เนื้อหินมีลักษณะแตกต่างกันออกไป เช่น มีเนื้อแน่น หรือเนื้อมีรูพรุน เป็นต้น

- ปริมาณของเกลือแร่ที่ละลายอยู่ในน้ำ น้ำที่แทรกอยู่ในรูพรุนของหิน พบว่ามีเกลือแร่หลายชนิดละลายอยู่ ซึ่งความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของน้ำจะมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของเกลือแร่ที่ละลายอยู่

จากปัจจัยต่าง ๆ ดังกล่าว ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของน้ำ หรือดิน หรือหินชนิดต่าง ๆ ไม่สามารถกำหนดเป็นค่าที่แน่นอนได้ แต่จะกำหนดเป็นช่วง ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2

1.1.3 วิธีการสำรวจ

การสำรวจโดยวิธีวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (รูปที่ 1) กระทำโดยปล่อยกระแสไฟฟ้า กระแสตรงลงไปบนชั้นดิน โดยใช้ขั้วกระแสคู่หนึ่ง (2 current electrodes) และมีขั้วศักย์อีกหนึ่งคู่ (2 potential electrodes) วัดค่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น เมื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าที่ปล่อยไปกับค่าความต่างศักย์มาคำนวณจะได้ค่าความต้านทานไฟฟ้า หรือ $R = V/I$ จากนั้นคำนวณหาความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะจากสูตร

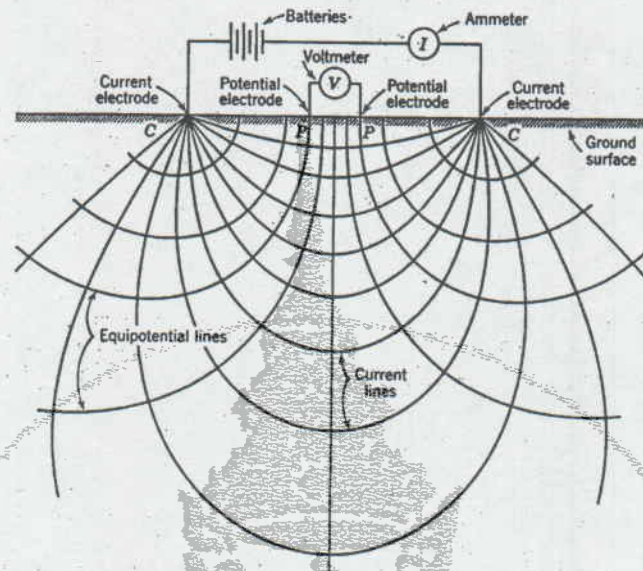
$$\rho = KR$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

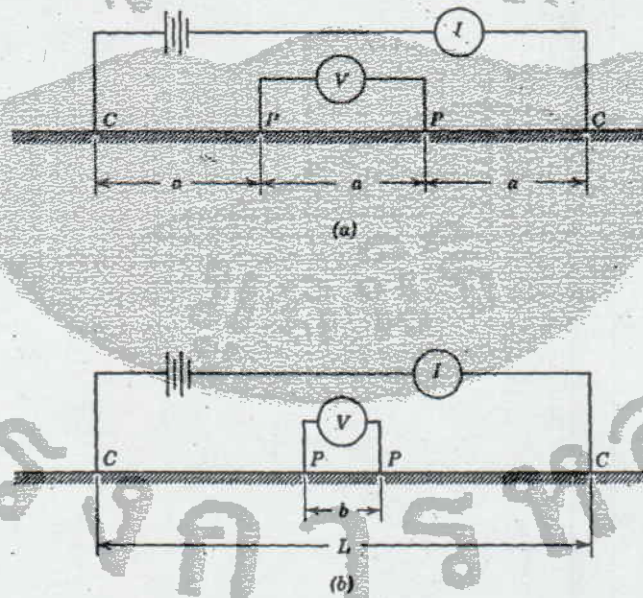
R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าซึ่งมีค่าเท่ากับ V/I

K คือ ค่าคงที่ เรียกว่า Geometric factor ซึ่งคำนวณได้จากระยะห่างของการจัดวางขั้วกระแสและขั้วศักย์ ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับรูปแบบการจัดขั้วด้วย

การจัดวางขั้ว (Electrode array) ที่นิยมใช้กันมากในการสำรวจ อาทิ การจัดวางขั้วแบบชลัมเบอร์เจอร์ (Schlumberger array) การจัดขั้วแบบเวนเนอร์ (Wenner array) เป็นต้น (รูปที่ 2)



รูปที่ 1 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของชั้นดินชั้นหิน (คัดลอกจาก Todd, 1980)



รูปที่ 2 รูปแบบการวางขั้วของการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

(a) การวางขั้วแบบ Wenner

(b) การวางขั้วแบบ Schlumberger

(คัดลอกจาก Todd, 1980)

ตารางที่ 1 ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของน้ำชนิดต่าง ๆ (คัดแปลงจาก Telford *et al.*, 1990)

ชนิดของน้ำ	ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (โอห์ม-เมตร)	
	ช่วงระหว่าง	เฉลี่ย
น้ำในบรรยากาศ	30 - 103	-
น้ำผิวดิน (บริเวณหินอัคนี)	$0.1 - 3 \times 10^3$	-
น้ำผิวดิน (บริเวณตะกอน)	10 - 100	-
น้ำทะเล	-	0.2
น้ำเกลือ 3%	-	0.15
น้ำเกลือ 20%	-	0.05

ตารางที่ 2 ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของหินและตะกอนชนิดต่าง ๆ (คัดแปลงจาก Telford *et al.*, 1990)

ชนิดของหินและตะกอน	ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (โอห์ม - เมตร)
หินดินดาน	$20 - 2 \times 10^3$
หินกรวดมน	$2 \times 10^3 - 10^4$
หินทราย	$1 - 6.4 \times 10^8$
หินปูน	$50 - 10^7$
ดินเหนียว	1 - 100
ตะกอนทราย	10 - 800
หินแกรนิต	4.5×10^3 (มีน้ำ) - 1.3×10^6 (แห้ง)
หินอ่อน/หินแคลสซิลิกัด	$1 \times 10^2 - 2.5 \times 10^8$ (แห้ง)
หินชีสต์	$20 - 10^4$

1.2 การสำรวจในภาคสนาม

การสำรวจธรณีฟิสิกส์ โดยวิธีวัดความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ ในบริเวณพื้นที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่แฮ มีขั้นตอนดังนี้

1.2.1 การสำรวจข้อมูลเบื้องต้น รวบรวมข้อมูลทางธรณีวิทยา อุทกธรณีวิทยา ของพื้นที่สำรวจ ซึ่งอาศัยข้อมูลจากแผนที่ธรณีวิทยา แผนที่อุทกธรณีวิทยา และแผนที่ภูมิประเทศ จากนั้นทำการสำรวจในพื้นที่สำรวจและบริเวณใกล้เคียง เพื่อหาข้อมูลรายละเอียดช่วยในการวางแผนสำรวจขั้นต่อไป

1.2.2 การสำรวจในภาคสนาม โดยใช้เครื่องมือสำรวจบนผิวดินชนิด ABEM Terrameter ใช้การสำรวจแบบ Vertical Electrical-Resistivity Sounding (VES) ซึ่งเป็นการสำรวจเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะในแนวตั้งลึกลงไปจากผิวดิน (vertical-geophysical variation) โดยใช้การจัดขั้วแบบชลัมเบอร์เจ

ในบริเวณพื้นที่สำรวจซึ่งครอบคลุมพื้นที่ 12 ตารางกิโลเมตร ได้ทำการสำรวจทั้งหมด 11 ตำแหน่ง เฉพาะพื้นที่ซึ่งมีความเหมาะสมที่จะสำรวจได้ โดยต้องเป็นพื้นที่ที่สามารถจะตั้งลากสายสำหรับแนวการสำรวจได้ระยะทางประมาณ 100 เมตร และต้องไม่มีความลาดชันมากจนเกินไป ตำแหน่งที่ทำการสำรวจแสดงในรูปที่ 3 และมีรายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 3

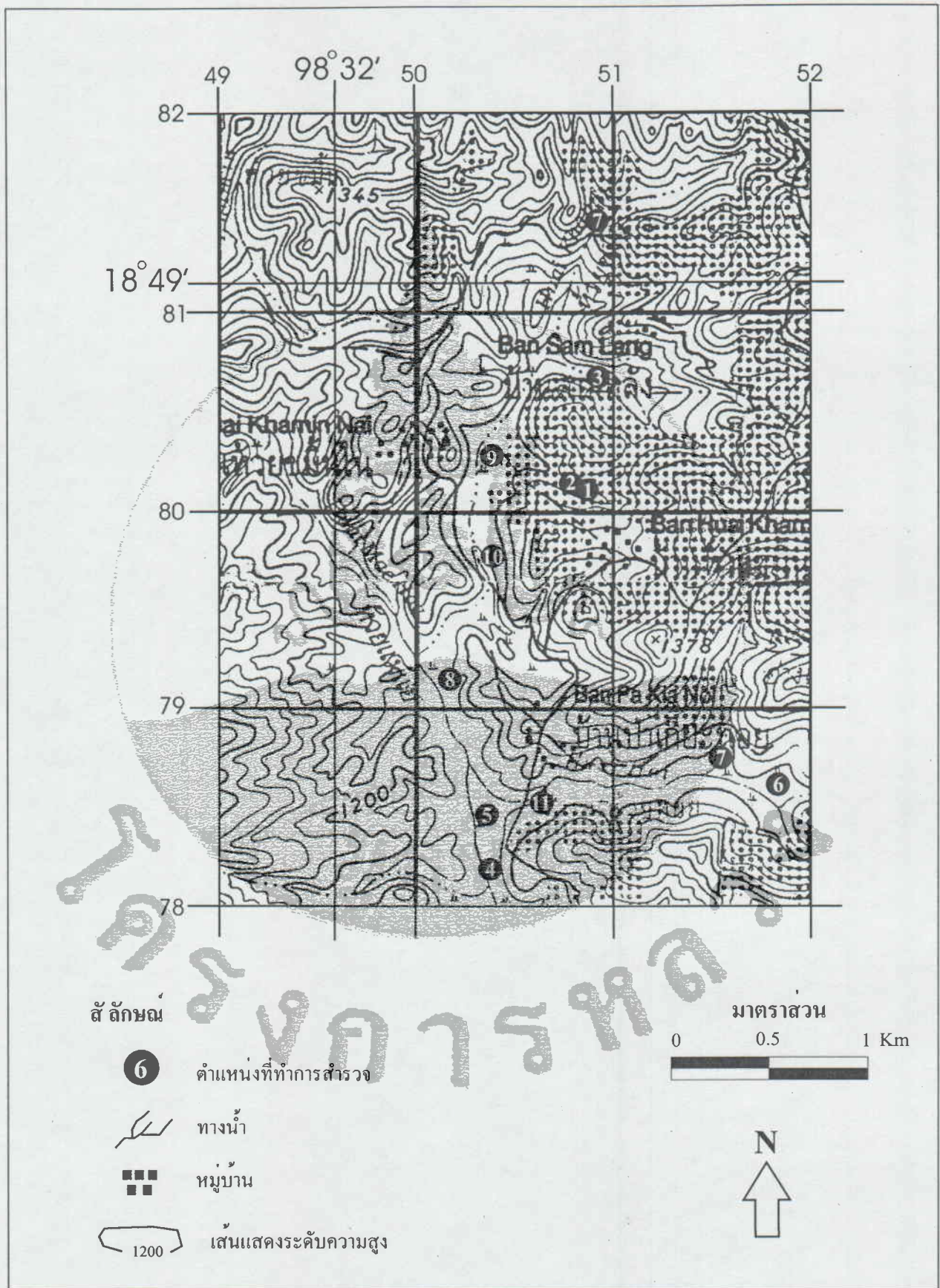
การสำรวจภาคสนามดำเนินการในระหว่างวันที่ 22-23 ธันวาคม 2545 และวันที่ 12-13 มกราคม 2546 (ดูรูปที่ 4)

ข้อมูลการสำรวจภาคสนามแสดงไว้ในตารางที่ 4

1.3 การแปลความหมายข้อมูล

การแปลความหมายข้อมูล ใช้วิธีการประมวลผลข้อมูลโดยโปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ Resist87® ซึ่งเมื่อนำข้อมูลจากการสำรวจภาคสนามไปคำนวณโดยโปรแกรมสำเร็จรูปแล้ว จะให้ผลออกมาในลักษณะของจำนวนชั้นดินชั้นหิน ค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของแต่ละชั้น (Resistivity เป็นโอห์ม-เมตร) ความหนาของแต่ละชั้น (Thickness เป็นเมตร) และค่าความคลาดเคลื่อน (RMS-error เป็น %) ซึ่งโดยทั่วไปค่าความคลาดเคลื่อนจะใช้เป็นตัวบ่งบอกความถูกต้องของการแปลความหมาย โดยที่หากค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 5 % ถือว่าการแปลความหมายมีความน่าเชื่อถือ

ผลการแปลความหมายแสดงไว้ในรูปที่ 5 และตารางที่ 5

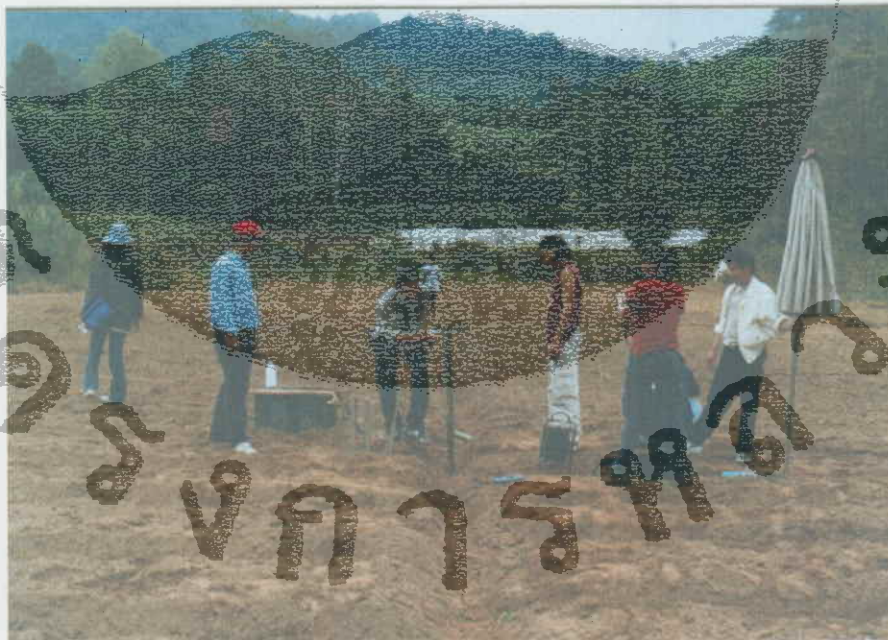


รูปที่ 3 แผนที่แสดงตำแหน่งการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

ตารางที่ 3 รายละเอียดของการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

ตำแหน่ง ที่	พิกัด	ความสูงจากระดับน้ำทะเล (เมตร)	แนวการ สำรวจ	ความยาวของแนวการสำรวจ (เมตร)
1	508801	1202	N17E	30
2	507801	1192	N75W	100
3	509806	1166	N65W	100
4	503782	1143	N20W	200
5	503785	1155	N40W	100
6	517785	1187	N80W	200
7	514787	1164	N30E	70
8	501791	1150	NS	150
9	503803	1178	N12E	150
10	503797	1150	N10W	150
11	506785	1148	N65E	150

โครงการหลวง

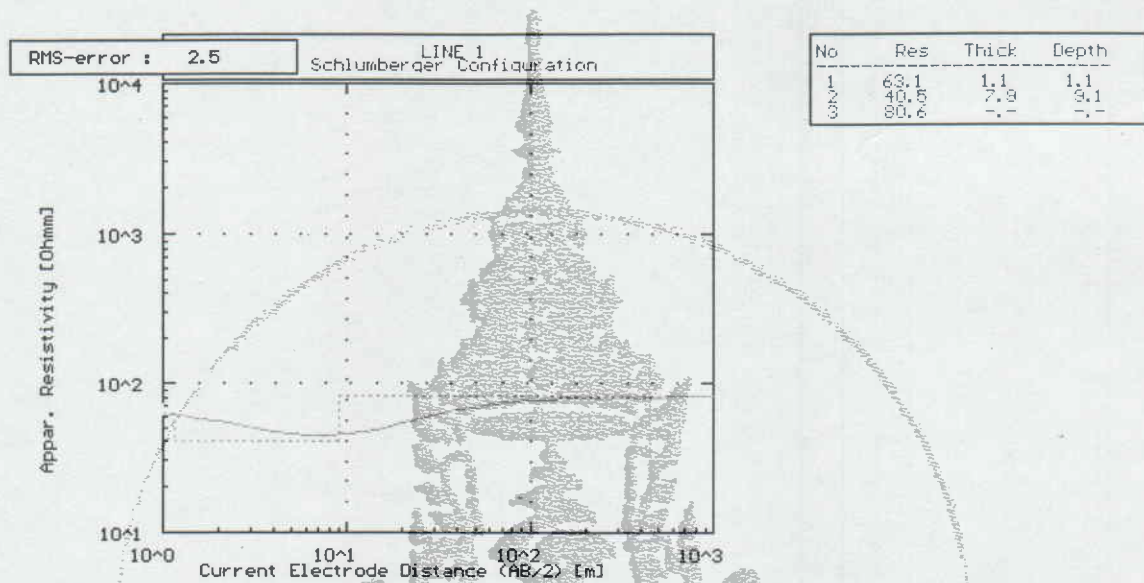


รูปที่ 4 แสดงการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะในภาคสนาม

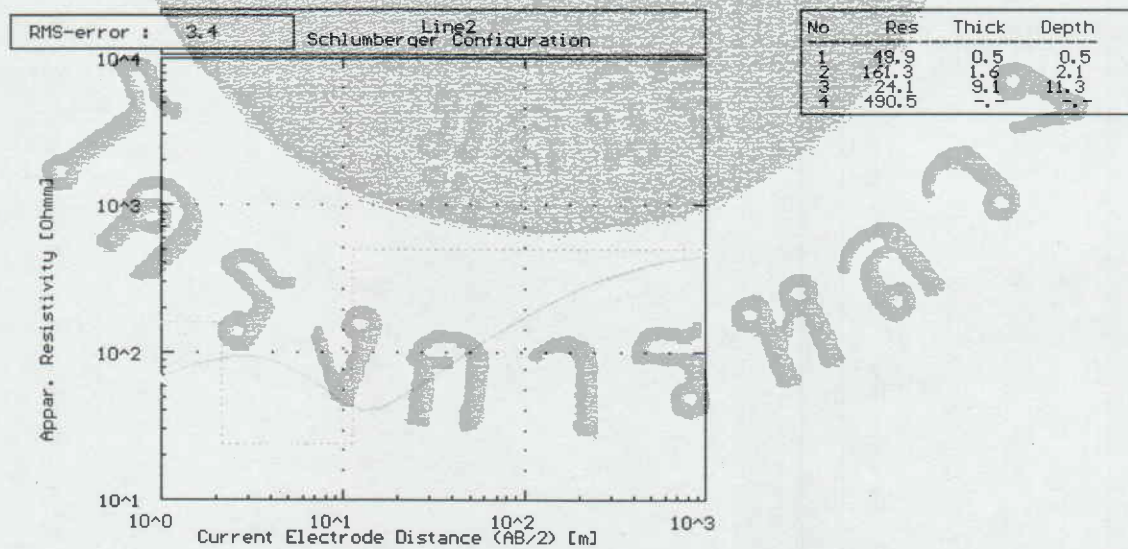
ตารางที่ 4 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

$\rho(\Omega\text{-m})$ L(m)	ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4	ตำแหน่งที่ 5	ตำแหน่งที่ 6	ตำแหน่งที่ 7	ตำแหน่งที่ 8	ตำแหน่งที่ 9	ตำแหน่งที่ 10	ตำแหน่งที่ 11
1	68.74	67.17	246.47	98.24	35.18	34.81	40.12	79.36	277.3	43.07	36.76
1.5	57.54	82.2	308.59	106.18	39.05	41.1	31.51	108.57	260.3	53.84	47.2
2	51.87	91.27	350.74	121.03	44.46	44.46	32.73	126.46	232.18	58.42	51.62
3	46.08	101.16	422.91	144.72	50.58	50.58	37.94	147.81	157.36	69.41	49.48
3	47.44	79.63	284.45	127.58	41.27	42.84	34.65	153.66	117.94	55.82	50.34
4.5	47.11	78.52	261.23	157.8	46.06	48.32	37.75	178.63	86.52	62.51	55.27
7	46.48	59.94	173.99	158.34	60.32	52.78	47.13	186.99	66.73	69.75	62.66
10	48.21	49.76	117.79	132.18	77.75	54.43	50.54	191.27	69.98	74.95	69.28
10	46.5	47.71	106.61	141.36	64.79	47.12	41.23	186.42	117.21	63.61	59.78
15	48.3	39.85	62.93	123.66	82.44	48.09	48.09	212.97	62.52	67.33	73.37
20	51.58	43.91	54.92	117.52	98.96	60.85	38.97	247.4	70.51	72.74	82.38
30	61.78	64.58	52.93	112.32	101.09	59.14	37.91	322.92	84.24	74.41	104.18
45	-	113.52	60.88	126.84	139.52	93.1	41.22	412.23	114.16	134.45	148.4
45	-	74.54	51.41	290.3	127.01	73.15	35.53	405.22	113.4	139.86	143.19
70	-	122.15	69.93	103.68	173.42	108.86	47.13	437.32	162.11	260.13	205.47
100	-	34.21	83.98	132.18	233.27	149.38	-	466.53	217.71	441.65	278.36
150	-	-	-	167.13	-	246.3	-	492.6	256.86	740.67	388.81
150	-	-	-	98.48	-	235.71	-	779.67	218.31	662.72	-
200	-	-	-	180.96	-	349.21	-	-	-	-	-

ตำแหน่งที่ 1

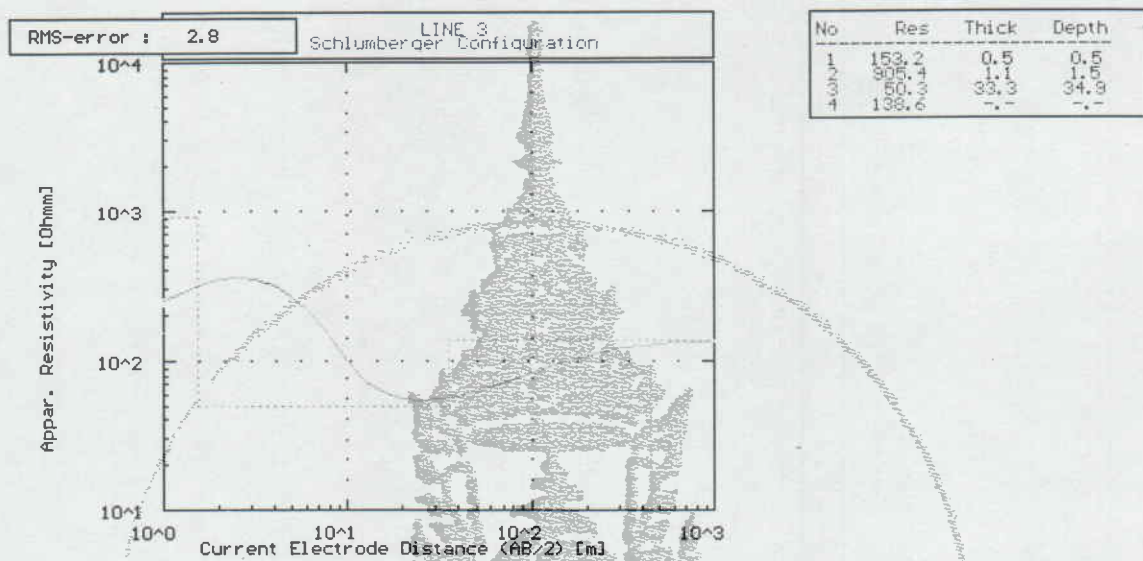


ตำแหน่งที่ 2

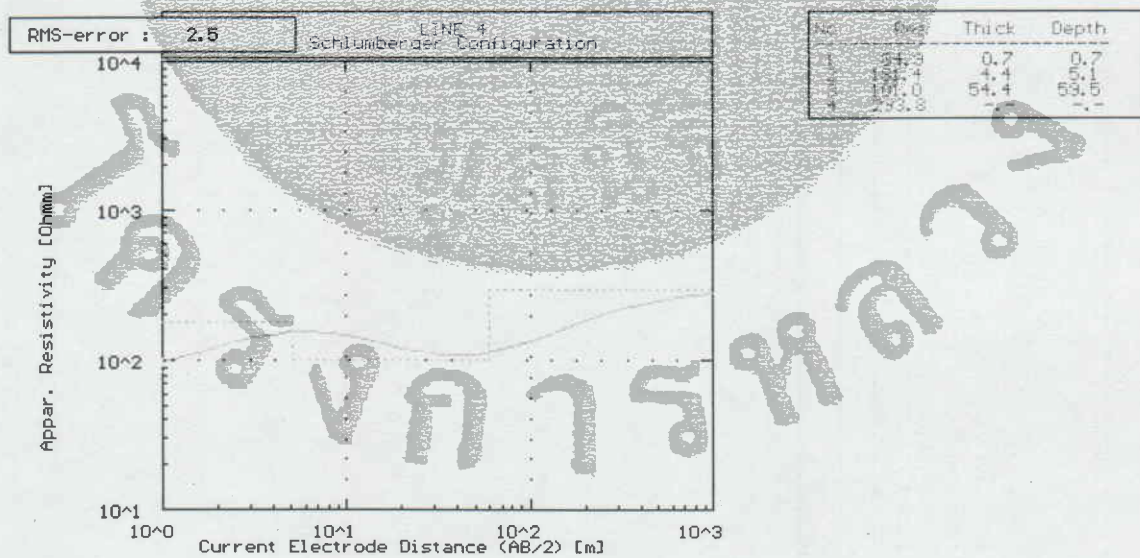


รูปที่ 5 ผลการแปลความหมายข้อมูลการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะโดยใช้โปรแกรม Resist 87®

ตำแหน่งที่ 3

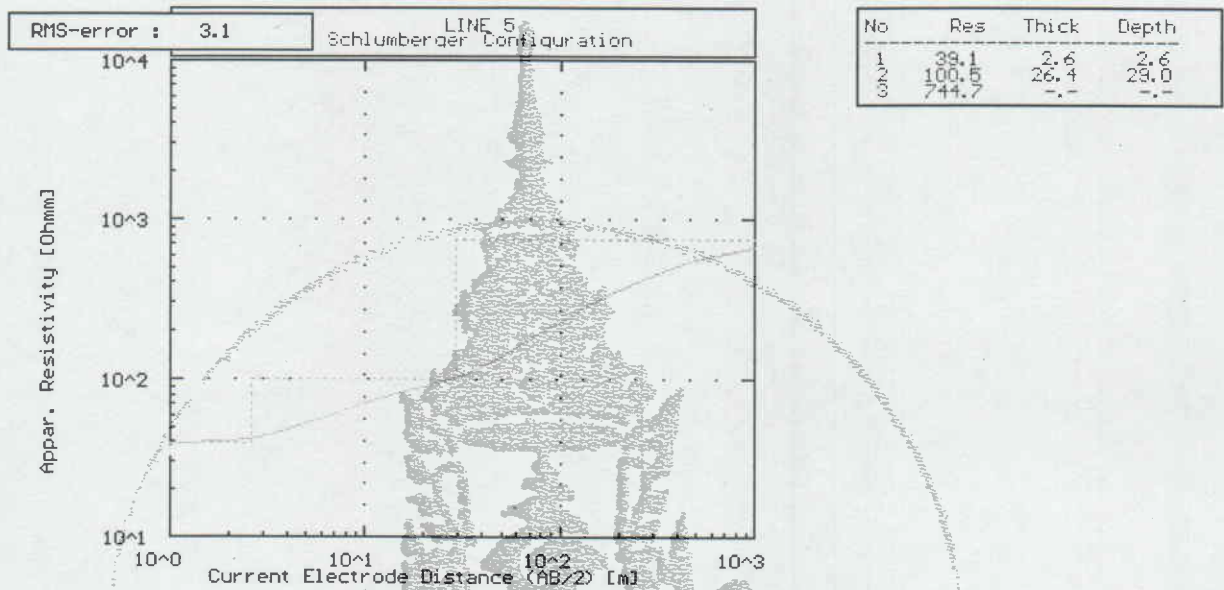


ตำแหน่งที่ 4

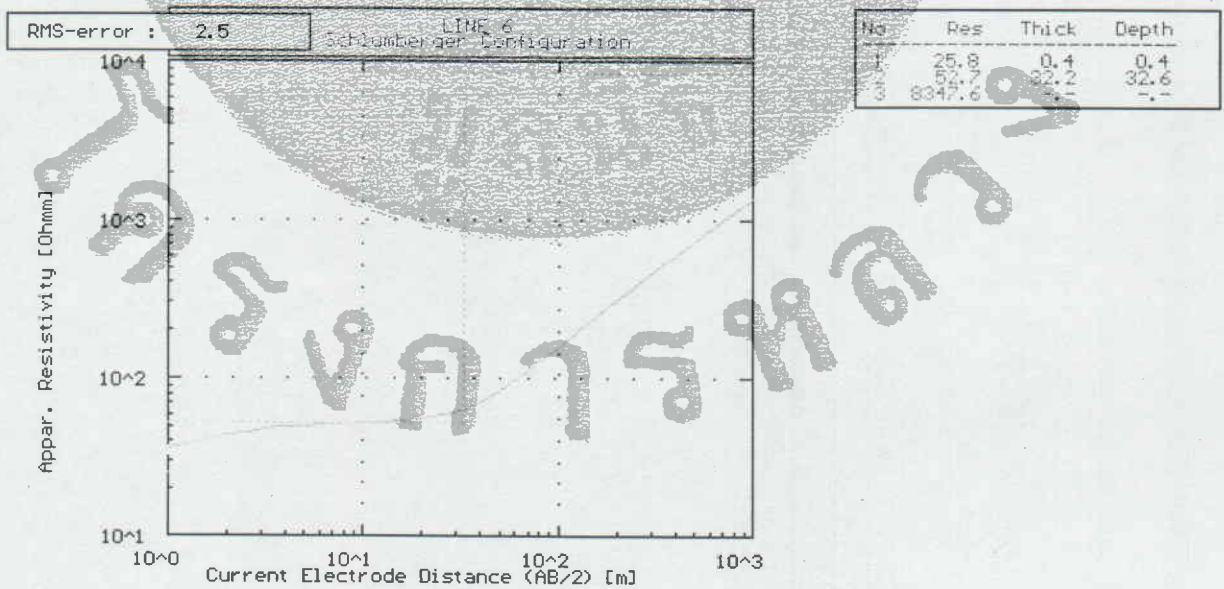


รูปที่ 5 ผลการแปลความหมายข้อมูลการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะโดยใช้โปรแกรม Resist 87® (ต่อ)

ตำแหน่งที่ 5

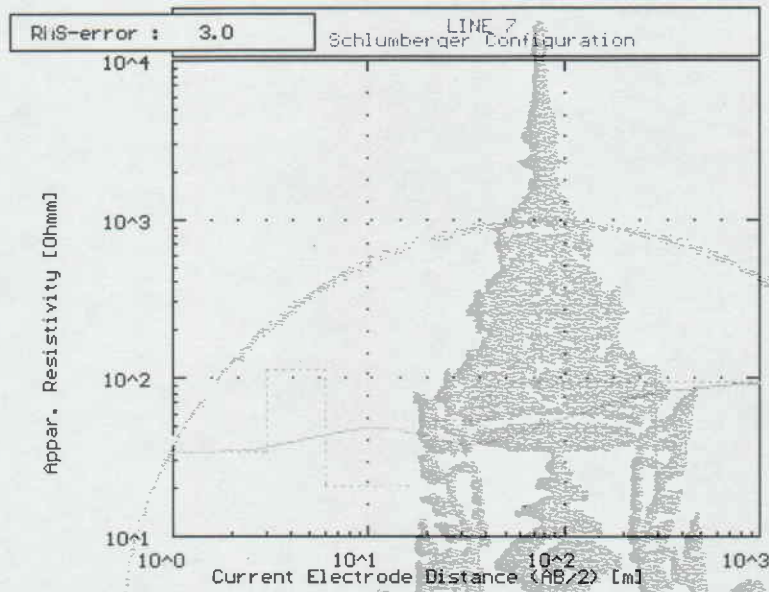


ตำแหน่งที่ 6



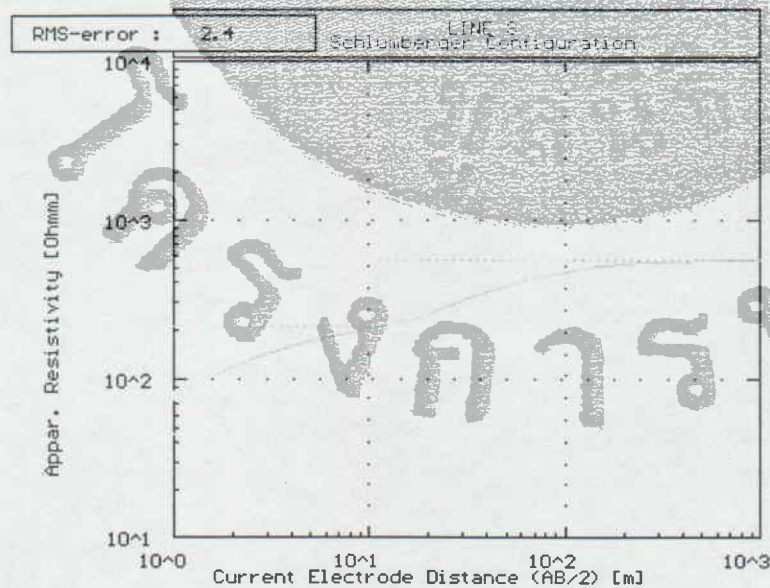
รูปที่ 5 ผลการแปลความหมายข้อมูลการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะโดยใช้โปรแกรม Resist 87® (ต่อ)

ตำแหน่งที่ 7



No	Res	Thick	Depth
1	33.7	3.0	3.0
2	111.0	3.0	6.0
3	20.7	10.7	16.7
4	54.4	25.1	41.8
5	99.3	-	-

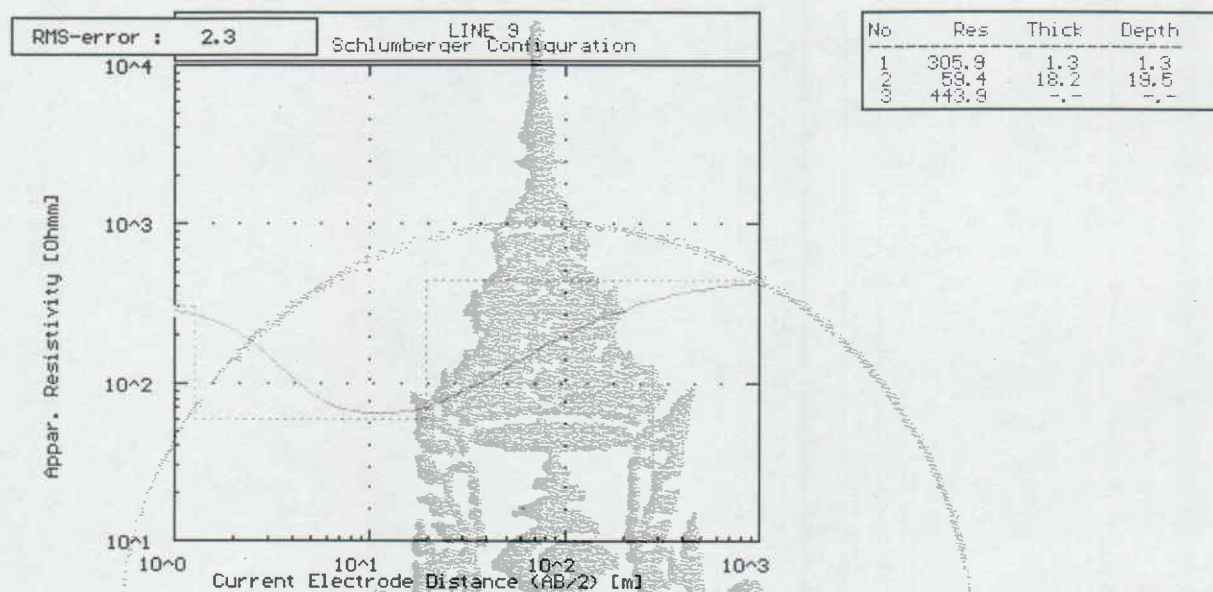
ตำแหน่งที่ 8



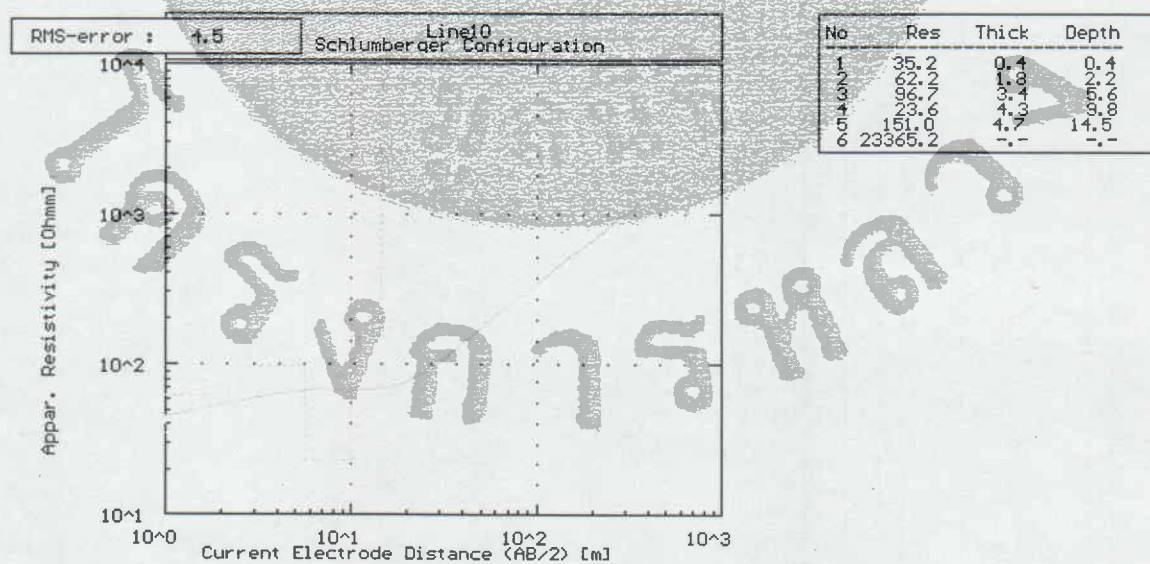
No	Res	Thick	Depth
1	45.5	0.4	0.4
2	211.6	10.8	11.2
3	558.2	-	-

รูปที่ 5 ผลการแปลความหมายข้อมูลการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะโดยใช้โปรแกรม Resist 87® (ต่อ)

ตำแหน่งที่ 9

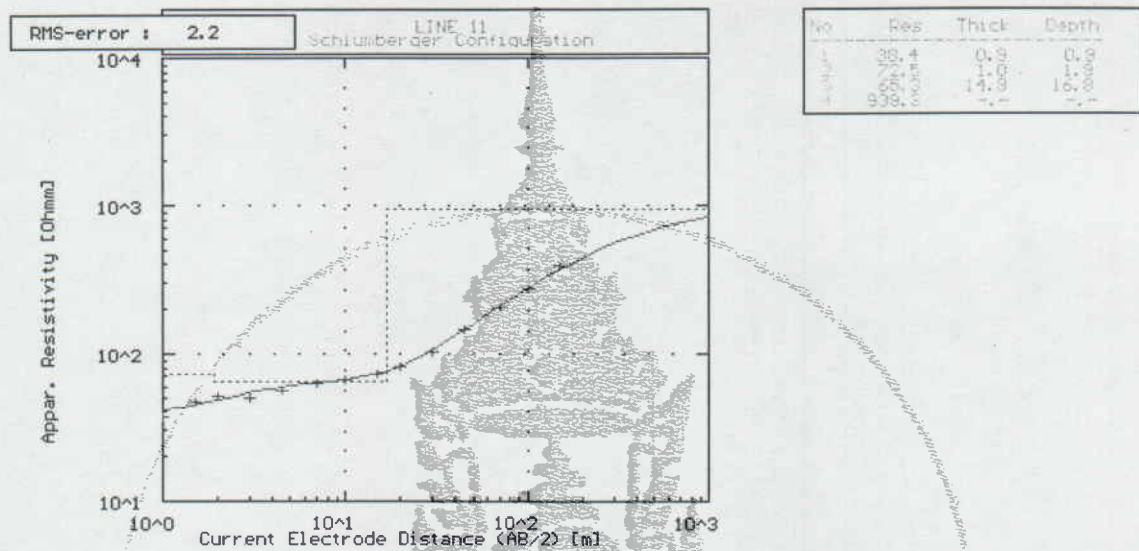


ตำแหน่งที่ 10



รูปที่ 5 ผลการแปลความหมายข้อมูลการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะโดยใช้โปรแกรม Resist 87® (ต่อ)

ตำแหน่งที่ 11



รูปที่ 5 ผลการแปลความหมายข้อมูลการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะโดยใช้โปรแกรม Resist 87® (ต่อ)

โครงการหลวง

ตารางที่ 5 ผลการแปลความหมายของการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

ตำแหน่ง ที่	ชั้นที่	ค่าความต้านทานไฟฟ้า จำเพาะ (โอห์ม-เมตร)	ความหนา (เมตร)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ชนิดของดิน/หิน
1	1	63.1	1.1	2.5	ดินเหนียวปนทราย ดินเหนียวปนทราย หินแกรนิต
	2	40.5	7.9		
	3	80.6	-		
2	1	49.9	0.5	3.4	ชั้นหน้าดิน ทรายปนดินเหนียว ดินเหนียว หินแกรนิต
	2	161.3	1.6		
	3	24.1	9.1		
	4	490.5	-		
3	1	153.2	0.5	2.8	ทรายปนดินเหนียว ก้อนหินแกรนิต หินแกรนิต หินแกรนิต
	2	905.4	1.1		
	3	50.3	33.3		
	4	138.6	-		
4	1	84.9	0.7	2.5	ชั้นหน้าดิน ทรายปนดินเหนียว หินแกรนิต หินแกรนิต
	2	181.4	4.4		
	3	101	54.4		
	4	293.8	-		
5	1	39.1	2.6	2.6	ดินเหนียว หินแกรนิต หินแกรนิต
	2	100.5	26.4		
	3	744.7	-		

ตารางที่ 5 ผลการแปลความหมายของการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (ต่อ)

ตำแหน่ง ที่	ชั้นที่	ค่าความต้านทานไฟฟ้า จำเพาะ (โอห์ม-เมตร)	ความหนา (เมตร)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ชนิดของดิน/หิน
6	1	25.8	0.4	2.5	ดินเหนียว หินแกรนิตผุ หินแกรนิต
	2	52.7	32.2		
	3	8347.6	-		
7	1	33.7	3	3.0	ดินเหนียว กรวด (อิมตัวด้วยน้ำ) ดินเหนียว หินแกรนิตผุ หินแกรนิต
	2	111	3		
	3	20.7	10.7		
	4	54.4	25.1		
	5	93.3	-		
8	1	45.5	0.4	2.4	ดินเหนียว ทรายปนดินเหนียว หินแกรนิตผุ
	2	211.6	10.8		
	3	558.2	-		
9	1	305.9	1.3	2.3	ทรายปนดินเหนียว หินแกรนิตผุ หินแกรนิต
	2	59.4	18.2		
	3	443.9	-		
10	1	35.2	0.4	4.5	ดินเหนียว ทราย กรวด (อิมตัวด้วยน้ำ) ดินเหนียว หินแกรนิตผุ หินแกรนิต
	2	62.2	1.8		
	3	96.7	3.4		
	4	23.6	4.3		
	5	151	4.7		
	6	23365.2	-		

ตารางที่ 5 ผลการแปลความหมายของการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (ต่อ)

ตำแหน่ง ที่	ชั้นที่	ค่าความต้านทานไฟฟ้า จำเพาะ (โอห์ม-เมตร)	ความหนา (เมตร)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ชนิดของดิน/หิน
11				2.2	
	1	38.4	0.9		ดินเหนียว
	2	72.5	1		ทราย
	3	65.3	14.9		หินแกรนิตผุ
	4	939.3	-		หินแกรนิต

โครงการหลวง

2. การสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห

2.1 ทฤษฎีการสำรวจ

การสำรวจด้านคลื่นไหวสะเทือน เป็นวิธีการทางธรณีฟิสิกส์ที่สำคัญมากที่สุด เพราะมีข้อได้เปรียบวิธีการสำรวจธรณีฟิสิกส์อย่างอื่นหลายอย่าง ที่สำคัญคือ มีความถูกต้องแม่นยำมากกว่า และสำรวจได้ทีความลึกมากกว่า โดยทั่วไปการสำรวจด้านคลื่นไหวสะเทือนนิยมใช้มากสำหรับการสำรวจคำหาปิโตรเลียม นอกจากนั้นอาจใช้ในการหาน้ำบาดาล และใช้งานทางด้านวิศวกรรมโยธา การสำรวจด้านคลื่นไหวสะเทือนแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีใหญ่ ๆ คือ การสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (Seismic Refraction Method) ใช้มากในงานด้านวิศวกรรม เช่น การศึกษาสภาพฐานราก (foundation) การเสาะหาแหล่งวัสดุก่อสร้าง และการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบสะท้อน (Seismic Reflection Method) มีทั้งการสำรวจระดับตื้นและระดับลึก การสำรวจระดับลึกใช้มากในการหาแหล่งน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติ การสำรวจระดับตื้นยังใช้จำกัด เพราะผลตอบแทนจากข้อมูลมีได้มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ

สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

1. แหล่งกำเนิดคลื่น หรือ Source การก่อให้เกิดคลื่นไหวสะเทือนอาจทำได้โดย

- ใช้ก้อนทุบลงบนแผ่นเหล็กที่วางอยู่ที่ผิวดิน
- ปลดปล่อยค้อนน้ำหนักให้ลงมากระทบผิวดิน
- ใช้วัตถุระเบิด

2. ตัวรับคลื่น ได้แก่ Seismometer ซึ่งถ้าใช้ในการสำรวจบนพื้นดิน เรียกว่า จีโอโฟน (Geophone) ถ้าใช้ในการสำรวจใต้น้ำ เรียกว่า ไฮโดรโฟน (Hydrophone)

3. ชุดเครื่องมือบันทึกสัญญาณ เมื่อจีโอโฟน (Geophone) รับสัญญาณคลื่นได้แล้ว จะส่งเข้าเครื่องขยายสัญญาณ (Amplifier) แล้วส่งต่อไปยังเครื่องกรองสัญญาณ (Filter) เพื่อกรองคลื่นรบกวน หรือ Noise ออก ซึ่งคลื่นรบกวนนี้คือ คลื่นที่มีความถี่สูงหรือต่ำกว่าความถี่ของคลื่นสัญญาณจากแหล่งกำเนิด จากนั้นสัญญาณจะถูกบันทึกเก็บไว้ ซึ่งอาจจะทำได้ใน 2 ลักษณะคือ บันทึกลงบนกระดาษถ่ายรูป (Seismogram) หรือบันทึกลงในเทปแม่เหล็ก (Magnetic Tape)

2.1.1 ชนิดของคลื่นไหวสะเทือน

ผลจากการทำให้เกิดคลื่นไหวสะเทือน ไม่ว่าจะโดยวิธีใดก็ตาม จะสามารถแบ่งชนิดของคลื่นออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. คลื่นวิ่งตรง (Direct Wave) เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางไปถึงจีโอโฟนในแนวขนานกับผิวดิน
2. คลื่นหักเห (Refracted Wave) เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางลงไป เมื่อกระทบกับแนวต่อของชั้นหินและดิน ที่มีความหยุ่นและความหนาแน่นต่างกัน จะเกิดการหักเหผ่านเข้าไปในตัวกลาง ซึ่งมีความหยุ่นและความหนาแน่นมากกว่า
3. คลื่นสะท้อน (Reflected Wave) เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางลงไป เมื่อกระทบกับแนวต่อของชั้นหินและดิน ซึ่งมีความหยุ่นและความหนาแน่นต่างกัน จะเกิดการสะท้อนกลับ

พิจารณาจากรูปที่ 6 จะได้

$$\sin i_1 / \sin i_2 = v_1 / v_2$$

ในกรณีที่คลื่นไหวสะเทือนเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง โดยทำมุมพอดีกับแนวต่อที่เรียกว่า มุมวิกฤต (Critical angle หรือ i_c) จะทำให้คลื่นไหวสะเทือนนั้นเกิดการหักเหขนานไปกับแนวต่อ กล่าวคือ มุม i_2 หรือ มุมหักเหจะมีค่า 90° (ดูรูปที่ 7) ในกรณีนี้คลื่นหักเหจะเคลื่อนที่ไปตามแนวต่อด้วยความเร็ว v_2 ซึ่งเป็นความเร็วของชั้นที่อยู่ข้างล่าง โดยความเร็ว v_2 จะมากกว่า v_1 ลักษณะเช่นนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อชั้นหินที่อยู่ด้านล่างมีค่าความหยุ่นและความหนาแน่นสูงกว่าชั้นหินที่อยู่ข้างบน ในกรณีที่หินชั้นล่างมีค่าความหยุ่นและความหนาแน่นน้อยกว่าชั้นบน ลักษณะเช่นนี้จะไม่เกิดขึ้น เพราะมุมหักเหจะน้อยกว่ามุมกระทบเสมอ

ในขณะที่คลื่นหักเหเคลื่อนที่ไปตามแนวต่อด้วยความเร็ว v_2 ซึ่งมีค่ามากกว่า v_1 นั้น จะทำให้เกิดคลื่นไหวสะเทือนอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า Head Wave วิ่งกลับขึ้นไปสู่ผิวดิน และถูกบันทึกไว้โดยจีโอโฟนต่อไป การเกิดคลื่นไหวสะเทือนในลักษณะนี้ จะคล้ายคลึงกับเมื่อทำการยิงปืน ลูกกระสุนปืนที่วิ่งแหวกมวลอากาศออกไปด้วยความเร็วสูง จะทำให้เกิดคลื่นไหวสะเทือนขึ้นในมวลอากาศ และทำมุมกับวิถีกระสุนที่ยิงออกไป

ในกรณีที่มุมตกกระทบเป็นมุมวิกฤต (i_c) มุมหักเห (i_2) จะมีค่าเท่ากับ 90° จากรูปที่ 7

$$\sin i_1 / \sin i_2 = v_1 / v_2$$

$$\text{ดังนั้น } \sin i_c / \sin 90^\circ = v_1 / v_2$$

$$\text{และเนื่องจาก } \sin 90^\circ = 1$$

$$\text{ดังนั้น } \sin i_c = v_1 / v_2$$

และค่าของระยะวิกฤต (Critical Distance, x_c)

$$x_c = 2h \tan i_c$$

ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินทาง (Travel Time) จากจุดระเบิดถึงจีโอโฟนของคลื่นทั้งสามชนิดจะแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับทิศทางการเคลื่อนที่และระยะทางของแต่ละคลื่น คือ

1. ที่ระยะทางน้อยกว่าระยะวิกฤต

คลื่นวิ่งตรงจะเดินทางถึงจีโอโฟนเป็นชุดแรก (first arrival) โดยใช้ระยะเวลาเดินทางน้อยที่สุด และระยะทางสั้นที่สุด

คลื่นหักเหชนิด Head Wave จะเดินทางถึงจีโอโฟนเป็นพวกที่สอง

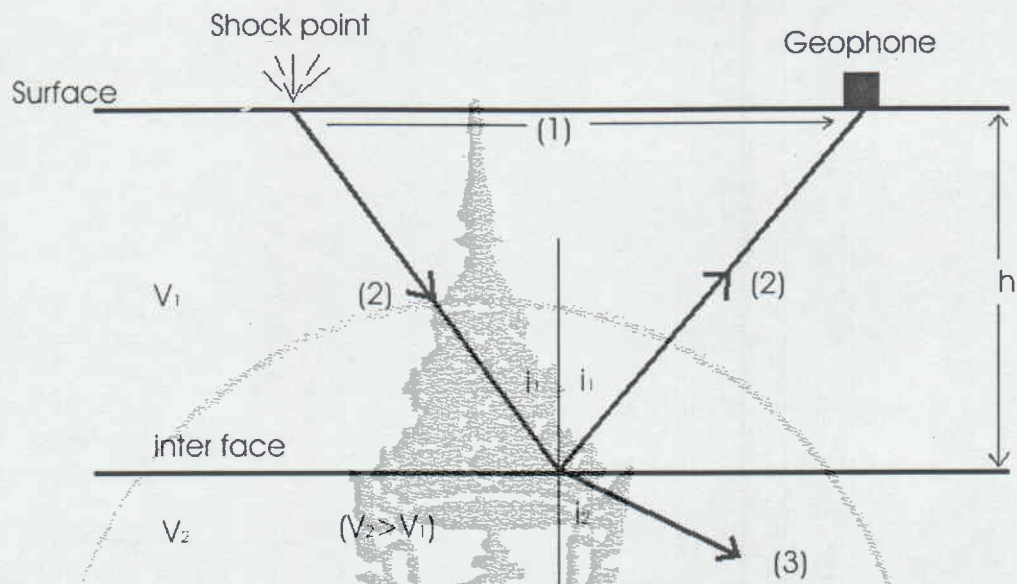
คลื่นสะท้อนจะเดินทางถึงจีโอโฟนเป็นพวกสุดท้าย

2. ที่ระยะทางมากกว่าระยะวิกฤต

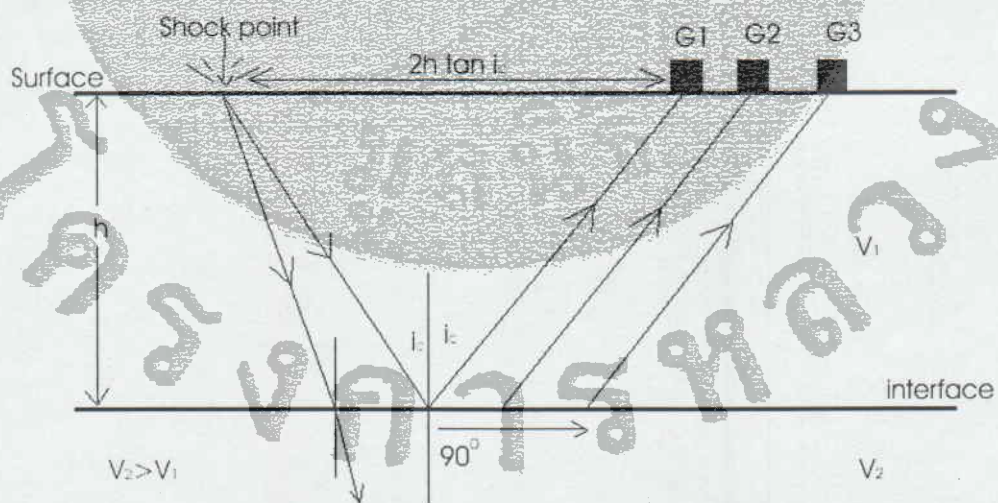
คลื่นหักเหชนิด Head Wave จะเดินทางถึงจีโอโฟนเป็นพวกแรก ทั้งนี้ถึงแม้ระยะทางจะมากกว่า แต่เนื่องจากมีอยู่ช่วงเวลาหนึ่งที่คลื่นเดินทางด้วยความเร็ว v_2 ที่มากกว่า v_1 จึงทำให้สามารถเดินทางไปถึงก่อน

คลื่นตรงจะเดินทางถึงจีโอโฟนเป็นพวกที่สอง

คลื่นสะท้อนจะเดินทางถึงจีโอโฟนเป็นพวกสุดท้าย



รูปที่ 6 แสดงชนิดของคลื่นไหวสะเทือน (1) คลื่นผิว (2) คลื่นตัวตรง (3) คลื่นสะท้อน (3) คลื่นหักเห (ดัดแปลงจาก Telford *et al.*, 1990)



รูปที่ 7 แสดงการหักเหของคลื่นหักเห (ดัดแปลงจาก Telford *et al.*, 1990)

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วของคลื่นไหวสะเทือน (Seismic Wave) หรือคลื่นยืดหยุ่น (Elastic Wave) จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากันในหินต่างชนิดกัน โดยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพ คือ ความหยุ่น (Elasticity) และความหนาแน่น (Density) ของชั้นหินและดินนั้น ๆ เป็นสำคัญ กล่าวคือ หินและดินที่มีเนื้อแน่น และมีความหยุ่นและความหนาแน่นสูง คลื่นจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้อย่างรวดเร็วสูง แต่หินและดินที่มีความหยุ่นและความหนาแน่นต่ำ คลื่นจะเคลื่อนที่ผ่านไปด้วยความเร็วที่น้อย (ดูตารางที่ 6)

2.1.3 วิธีการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (Seismic Refraction Method)

การสำรวจแบบนี้ทำได้โดยพยายามวางจีโอโฟนอนตัวแรกให้ห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นมากกว่าระยะวิกฤต จากนั้นทำการบันทึกระยะห่างระหว่างจีโอโฟนอนแต่ละตัวจากแหล่งกำเนิดคลื่น รวมทั้งเวลาที่คลื่นเดินทางจากแหล่งกำเนิดมาถึงจีโอโฟนอนตัวนั้น ๆ แล้วนำข้อมูลมาแปลความหมายต่อไป

2.2 การสำรวจในภาคสนาม

การสำรวจในภาคสนาม ใช้เครื่องมือชื่อ Seismogram ของ Bison ซึ่งประกอบด้วยการก่อให้เกิดคลื่น โดยใช้ฆ้อนทุบลงบนแผ่นเหล็ก และจัดวางจีโอโฟนอนจำนวนทั้งหมด 12 ตัว ให้มีระยะห่างเท่า ๆ กัน และเท่ากับระยะห่างของจีโอโฟนอนตัวแรกจากแหล่งกำเนิดคลื่น คือ เท่ากับ 5 เมตร จากนั้นย้ายแหล่งกำเนิดคลื่นไปอยู่ที่ระยะห่าง 5 เมตร จากจีโอโฟนอนตัวสุดท้าย แล้วทำในลักษณะย้อนกลับ (Forward and Reverse Shooting) (ดูรูปที่ 8)

ในบริเวณพื้นที่สำรวจซึ่งครอบคลุมพื้นที่ 12 ตารางกิโลเมตร ได้ทำการสำรวจทั้งหมด 12 แนวการสำรวจ ณ ตำแหน่งที่ทำการสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะหรือใกล้เคียง เพื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการสำรวจทั้ง 2 วิธี ตำแหน่งที่ทำการสำรวจแสดงไว้ในรูปที่ 9 และมีรายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 7

การสำรวจภาคสนามดำเนินการในระหว่างวันที่ 22-23 ธันวาคม 2544 และวันที่ 12-13 มกราคม 2545 (ดูรูปที่ 10)

ข้อมูลการสำรวจภาคสนามแสดงไว้ในตารางที่ 8

2.3 การแปลความหมายข้อมูล

ข้อมูลที่ทำการบินที่กมามี 2 อย่างคือ

- ระยะห่างระหว่างจีโอโฟนอนและแหล่งกำเนิดคลื่น (x)
- เวลาที่คลื่นใช้เดินทางจากแหล่งกำเนิดถึงจีโอโฟนอน (t)

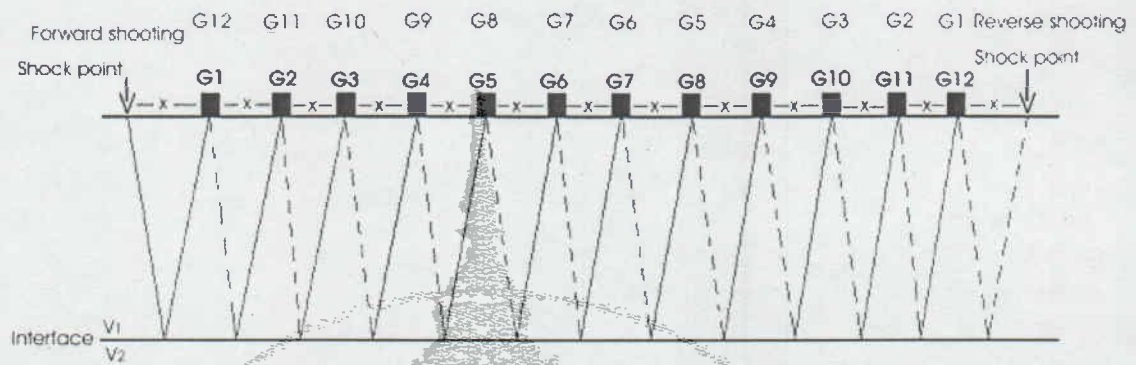
นำข้อมูลทั้งสองมาเขียนเป็นกราฟที่เรียกว่า Travel-time graph หรือ t-x graph ดังแสดงในรูปที่ 11 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Grapher®

เนื่องจากระยะเวลาที่คลื่นไหวสะเทือนใช้เดินทาง (t) จะมีค่าเท่ากับระยะทางหารด้วยความเร็ว (V) หรือ $t = x/V$

ตารางที่ 6 ความเร็วของคลื่นไหวสะเทือนในดินและหิน (ดัดแปลงจาก Telford *et al.*, 1990)

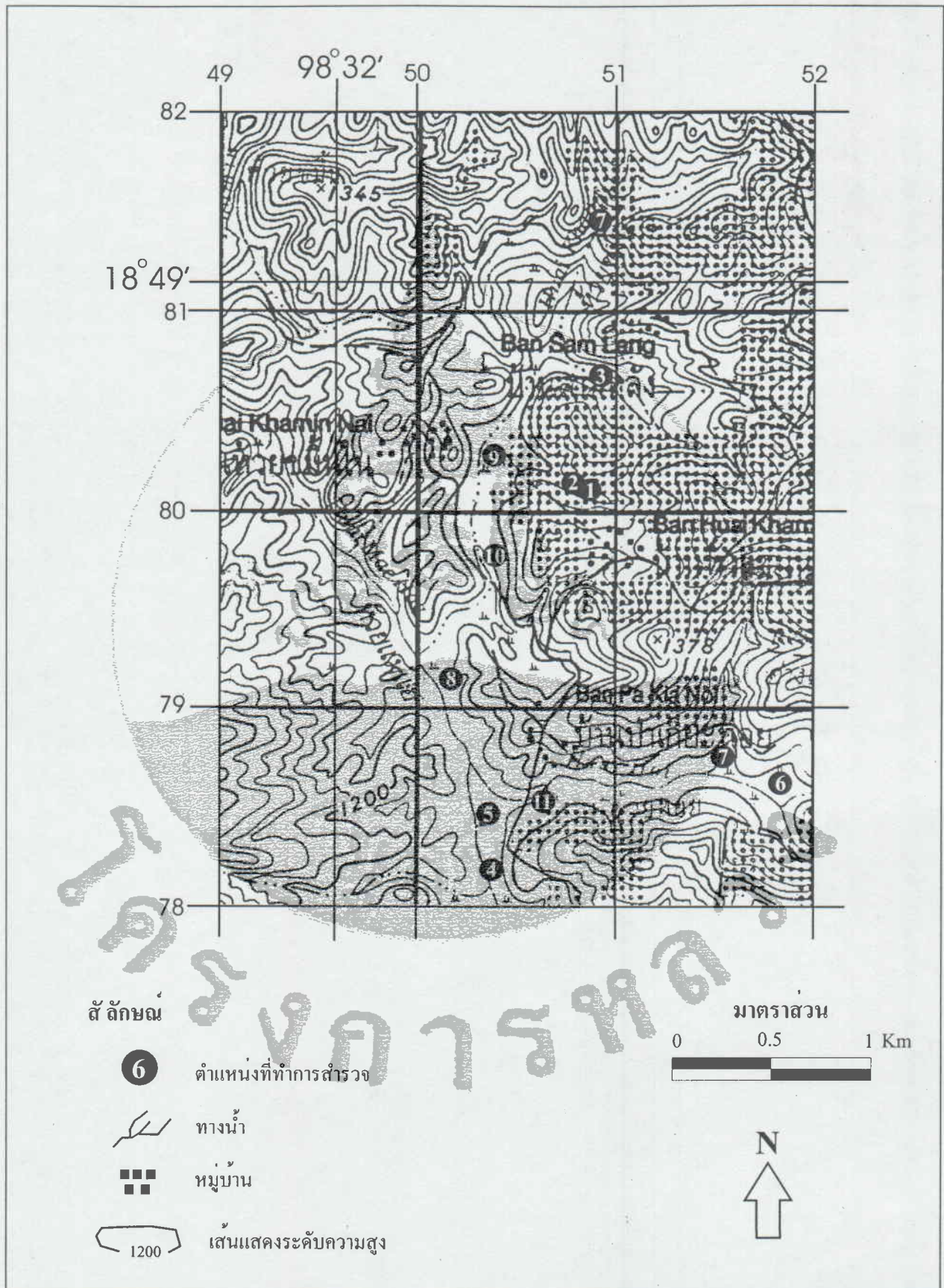
ชนิดของดิน/หิน	ความเร็วของคลื่น (เมตร/วินาที)
วัสดุผุพังสลายตัวใกล้ผิวดิน	305 - 610
กรวดทราย, ทราย (แห้ง)	468 - 915
ทราย (อิ่มตัวด้วยน้ำ)	610 - 1380
ดินเหนียว	915 - 2750
น้ำ	1430 - 1680
หินอัคนี	
หินแกรนิต	4580 - 5800
หินบะซอลต์	5500 - 6300
หินชั้น	
หินดินดาน	2750 - 4270
หินทราย	1830 - 3970
หินปูน	2140 - 6100
หินแปร	3050 - 7020

โครงการหลวง



รูปที่ 8 แสดงวิธีการสำรวจแบบไป - ช้อนกลับ (Forward - Reverse Shooting) (ดัดแปลง
จาก Telford *et al.*, 1990)

โครงการหลวง



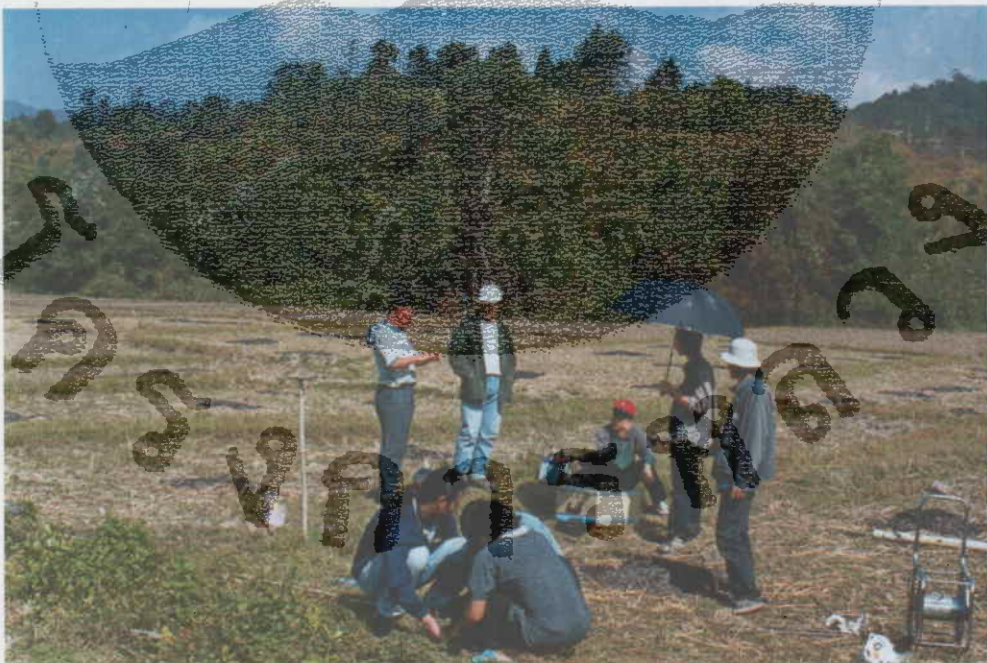
รูปที่ 9 แผนที่แสดงตำแหน่งการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห

ตารางที่ 7 รายละเอียดของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห

ตำแหน่ง ที่	พิกัด	ความสูงจาก ระดับน้ำทะเล (เมตร)	จำนวนแนว การสำรวจ	แนวการ สำรวจ	ความยาวของแนวการ สำรวจ (เมตร)
1	508801	1202	แนวที่ 1	N17E	60
2	507801	1192	แนวที่ 2/1 แนวที่ 2/2 แนวที่ 2/3	N75W N75W N75W	36 36 36
3	509806	1166	แนวที่ 3	N30W	60
4	503782	1143	แนวที่ 4/1 แนวที่ 4/2	N13W N13W	60 60
5	503785	1155	แนวที่ 5/1 แนวที่ 5/2	N50E N50E	60 60
6	517785	1187	แนวที่ 6	EW	60
7	514787	1164	แนวที่ 7	N80E	60
8	501791	1150	แนวที่ 8/1 แนวที่ 8/2 แนวที่ 8/3 แนวที่ 8/4	NS NS NS NS	60 60 60 60

ตารางที่ 7 รายละเอียดของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)

ตำแหน่ง ที่	พิกัด	ความสูงจาก ระดับน้ำทะเล (เมตร)	จำนวนแนว การสำรวจ	แนวการ สำรวจ	ความยาวของแนวการ สำรวจ (เมตร)
9	503803	1178	แนวที่ 9/1 แนวที่ 9/2 แนวที่ 9/3 แนวที่ 9/4	N45W N45W N10W N20E	60 60 60 60
10	503797	1150	แนวที่ 10/1 แนวที่ 10/2 แนวที่ 10/3	N10W N10W N10W	60 60 60
11	506785	1148	แนวที่ 11/1 แนวที่ 11/2	N65E N65E	60 60



รูปที่ 10 แสดงการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเหในภาคสนาม

ตารางที่ 8 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห

ตำแหน่งที่ 1

Number of Geophone	Spacing	Line 1			
		F1	F2	R1	R2
0	0	0	-	86	84
1	5	15.5	-	82.5	80
2	10	36.5	-	80	78
3	15	60	-	79	75
4	20	63.5	-	78	71
5	25	65	-	77	69
6	30	66	-	76	66
7	35	69	-	74	65
8	40	71.5	-	67	64
9	45	75.5	-	62	60
10	50	78	-	36	20
11	55	80	-	15	10
12	60	81	-	0	0

หมายเหตุ: F = Forward Shooting

R = Reverse Shooting

ตารางที่ 8 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)
ตำแหน่งที่ 2

Number of Geophone	Spacing	Line 2/1				Line 2/2			
		F1	F2	R2	R2	F1	F2	R2	R2
0	0	0	0	-	-	0	0	138	79
1	3	18	14.9	-	-	17	23	125	76.5
2	6	30	24.8	-	-	26	27.5	113	74.5
3	9	43.5	45	142		47.5	48.5	94.5	73.5
4	12	58.4	59	120	117	68.5	70	85.5	70
5	15	74	62	111	99	70	72	77.5	66
6	18	86.8	78	90.2	95	72	72.5	72.5	58.5
7	21	106	84	76	91	73	74.5	53	52
8	24	118.5	109	68.1	71	76	76	47	45
9	27	130.5	128	47	48	77	77	31	30
10	30	144.2	144	32	32	80	79.5	20.5	24
11	33	-	-	25.5	26	81.5	80.5	10	10
12	36	-	-	0	0	85.5	81.5	0	0

หมายเหตุ: F = Forward Shooting

R = Reverse Shooting

ตารางที่ 8 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)
ตำแหน่งที่ 2

Number of Geophone	Spacing	Line 2/3			
		F1	F2	R1	R2
0	0	0	0	-	-
1	3	8	16	93	78
2	6	13	27	89	70
3	9	31	37	84	65
4	12	50	50	63	63
5	15	67	54	59	58.5
6	18	73	59	54	54
7	21	81	62.5	50.5	49
8	24	83	66	48	40
9	27	88	67.5	36.5	37
10	30	93	68.5	14.5	27
11	33	96	71.5	10	15
12	36	-	75	0	0

หมายเหตุ: F = Forward Shooting

R = Reverse Shooting

ตารางที่ 8 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)

ตำแหน่งที่ 3

Number of Geophone	Spacing	Line 3			
		F1	F2	R1	R2
0	0	0	0	64	64
1	5	17.5	17.5	58	56.8
2	10	18.8	19	57.5	56
3	15	24.2	24	56	54.8
4	20	26	26	55	54
5	25	27	27.5	43	49
6	30	32	32.5	-	-
7	35	-	-	38	36
8	40	42.8	36	35	33
9	45	43	43	32	30
10	50	44	44	29	26
11	55	47	45	14.5	14
12	60	51	51.5	0	0

หมายเหตุ: F = Forward Shooting

R = Reverse Shooting

ตารางที่ 8 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)
ตำแหน่งที่ 4

Number of Geophone	Spacing	Line 4/1				Line 4/2			
		F1	F2	R2	R2	F1	F2	R2	R2
0	0	0	0	49.5	42	0	0	54.5	58.8
1	5	18	17.5	49	39	23	23	53	57.5
2	10	42	41.5	48.5	37	37	30	51.5	56.8
3	15	53	61	47.5	35	38	33	51	53
4	20	66.5	66.5	44.5	34	39	33.5	49	51
5	25	67	67	44	31	40	34	48	50
6	30	76	68	40.5	30	41	35	46	48
7	35	100	69	40	27	42	37.5	41	44
8	40	120.5	73	39	24	43	38	38	41.5
9	45	-	74	36	19	45	39	35	39.5
10	50	-	75	28.5	18	47	42	34	37
11	55	-	75.5	18.5	13	49	43	9	24
12	60	-	77	0	0	50	44.5	0	0

หมายเหตุ: F = Forward Shooting

R = Reverse Shooting

ตารางที่ 8 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)
 ตำแหน่งที่ 5

Number of Geophone	Spacing	Line 5/1				Line 5/2			
		F1	F2	R2	R2	F1	F2	R2	R2
0	0	0	0	42	39	0	0	30	32
1	5	3	10	36.5	37	6.5	4	28	30
2	10	6	11	35	35	10	-	26	28.5
3	15	9.5	16.5	33	31	13	11	24.5	27
4	20	13.5	18	27.5	28	17	14	23	25
5	25	15.2	19	27	24	19	17	21.5	23.5
6	30	18.5	22	21.5	21	22	20	20	22
7	35	21.5	24.5	21	18	23.5	22.5	16.5	19
8	40	24	33	15	15	25	23.5	14.5	17
9	45	27	34	12.5	12	27	28	11.5	13
10	50	30	35	11	9	28.5	29	8	10
11	55	31	40	6	6	30	31	4.5	6.5
12	60	33	41.5	0	0	32	32	0	0

หมายเหตุ: F = Forward Shooting

R = Reverse Shooting

ตารางที่ 8 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)
ตำแหน่งที่ 6

Number of Geophone	Spacing	Line 6			
		F1	F2	R1	R2
0	0	0	0	42	40.5
1	5	12	12.5	37.5	36
2	10	18	19	35	34.5
3	15	21.5	22	30.5	29
4	20	24	25	28.5	28
5	25	26	27	25	24
6	30	28.5	29	23.5	22.5
7	35	31	32	23	18
8	40	33	33.5	21	17
9	45	36	38	19	14
10	50	40	41	17.5	11
11	55	41	42	8	7
12	60	45	45	0	0

หมายเหตุ: F = Forward Shooting

R = Reverse Shooting

ตารางที่ 8 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)
ตำแหน่งที่ 7

Number of Geophone	Spacing	Line 7			
		F1	F2	R1	R2
0	0	0	-	71	57
1	5	11.5	-	65	51.5
2	10	17	-	61	48
3	15	20	-	52	44
4	20	22.5	-	47	43
5	25	24	-	45	40
6	30	25.5	-	37	33
7	35	29.5	-	35	30
8	40	30	-	27	25
9	45	32.5	-	22	22
10	50	35	-	17	18.5
11	55	36.5	-	-	-
12	60	37.5	-	0	0

หมายเหตุ: F = Forward Shooting

R = Reverse Shooting

ตารางที่ 8 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)
ตำแหน่งที่ 8

Number of Geophone	Spacing	Line 8/1				Line 8/2			
		F1	F2	R2	R2	F1	F2	R2	R2
0	0	0	0	37	37	0	0	45	-
1	5	14	11.5	35.5	36	15	14	42.5	48.5
2	10	21	20	34.5	34	21.5	18.5	41	47
3	15	23	22	33.5	31	23.5	21	38	41
4	20	25.5	24.5	33	30	26	23.5	37	38
5	25	28	26.5	-	28	30	24.5	36	35.5
6	30	30.5	29	32	27	31.5	28	30.5	31
7	35	35	30	28	27	32.5	32.5	27	29
8	40	36.5	-	25	23	34	34	24.5	27
9	45	38	34	22	20	35.5	38.5	23	24.5
10	50	39.5	28	20	18	38	43	18	18.5
11	55	40	40	12	10	40	56	9	11
12	60	41.5	41.5	0	0	42	56.5	0	0

หมายเหตุ: F = Forward Shooting

R = Reverse Shooting

ตารางที่ 8 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)

ตำแหน่งที่ 8

Number of Geophone	Spacing	Line 8/3				Line 8/4			
		F1	F2	R2	R2	F1	F2	R2	R2
0	0	0	0	65.5	52	0	0	68	46
1	5	13	14	55.5	50	22	12	63.5	45
2	10	30.5	33	52.5	48	22.5	21	62	44
3	15	39	38.5	45.5	46	23.5	22	61	42.5
4	20	41	42.5	40	42	27.5	25	54	41.5
5	25	45	45	36	38	30.5	28	46.5	39.5
6	30	54	53	35.5	34	34	31.5	38	36
7	35	64.5	66	35	32	37	32.5	37	31
8	40	75	69	34.5	28	39	35	36	30
9	45	78	78	32	24	41	37	26.5	26
10	50	94	80	31	20	43	38.5	25	23
11	55	100	81	12	13	45.5	41	11.5	12
12	60	118	84.5	0	0	47	42	0	0

หมายเหตุ: F = Forward Shooting

R = Reverse Shooting

ตารางที่ 8 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)

ตำแหน่งที่ 9

Number of Geophone	Spacing	Line 9/1				Line 9/2			
		F1	F2	R2	R2	F1	F2	R2	R2
0	0	0	0	55.5	56	0	0	43	35
1	5	12.5	12	53.5	54	7.5	8	34.5	34.5
2	10	28	25	50.5	51	11.5	13	33.5	34
3	15	30.5	29.5	48.5	49	20.5	21	29.5	32.5
4	20	46.5	35.5	40	45	25.5	24.5	28	28.5
5	25	71	36.5	35.5	40	39	30	25.5	26
6	30	84.5	41	33	33	43.5	32.5	23.5	24
7	35	100.5	42	30	30	44.5	37	19.5	20
8	40	115	43.5	26.5	27	46.5	39	15.5	15.5
9	45	128	45	21.5	22	56	42	10.5	12.5
10	50	144	45.5	17.5	18	62.5	44	6.5	7
11	55	156.5	46.5	9.5	9.5	65.5	47	4.5	4.5
12	60		48	0	0	68	49	0	0

หมายเหตุ: F = Forward Shooting

R = Reverse Shooting

ตารางที่ 8 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)
ตำแหน่งที่ 9

Number of Geophone	Spacing	Line 9/3				Line 9/4			
		F1	F2	R2	R2	F1	F2	R2	R2
0	0	0	0	43.5	41	0	0	49	35
1	5	5	4	40	39	10	10	44	33
2	10	11	10	36.5	35	17	14	39	30.5
3	15	12	11	34	33	19.5	16	28.5	28.5
4	20	17	16	33	31	23.5	22	26	26.5
5	25	20	16.5	31	30	28	23	25	23
6	30	24.5	24	29	29	29.5	27.5	21	21
7	35	29	28	28	28	32.5	32.5	19	18
8	40	31	31	24	23	36	34.5	14.5	15
9	45	35	31.5	22.5	22	37	37	11	12
10	50	36	34.5	20.5	20	39	38	7	9
11	55	37	36	11	10	40	39.5	3	4
12	60	37.5	37.5	0	0	41	42	0	0

หมายเหตุ: F = Forward Shooting

R = Reverse Shooting

ตารางที่ 8 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)
ตำแหน่งที่ 10

Number of Geophone	Spacing	Line 10/1				Line 10/2			
		F1	F2	R2	R2	F1	F2	R2	R2
0	0	0	0	39	32	0	0	42	42.5
1	5	5	1	35	31	3.5	3.5	39.5	40.5
2	10	7	6.5	33	29	6	7	37	36
3	15	12.5	11	32	27	9	10	34	34
4	20	17	13	28	25	13	13	31	31
5	25	19	18.5	20.5	21	15.5	16	27	27.5
6	30	22	21	19.5	18	19	19	23.5	23.5
7	35	24	24	15	14	22	22.5	20	20
8	40	27	27	13	12	26	25.5	15	15
9	45	30	29	10	8.5	27	27.5	13	13
10	50	33	31	6	8	29.5	30	4.5	8
11	55	36	33	5	4	32	33	2	4.5
12	60	38	38	0	0	34	36	0	0

หมายเหตุ: F = Forward Shooting

R = Reverse Shooting

ตารางที่ 8 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)
ตำแหน่งที่ 10

Number of Geophone	Spacing	Line 10/3			
		F1	F2	R1	R2
0	0	0	0	32	32.5
1	5	3	2	29.5	30.5
2	10	6	5	29	30
3	15	9.5	9	28	28
4	20	12	11	23	25
5	25	14	13	22	21.5
6	30	17.5	16.5	18.5	19
7	35	18.5	18	15.5	16
8	40	22	21.5	11.5	13
9	45	25.5	24	9	9
10	50	27	27	8	8
11	55	29	28	2	2.5
12	60	30	29	0	0

หมายเหตุ: F = Forward Shooting

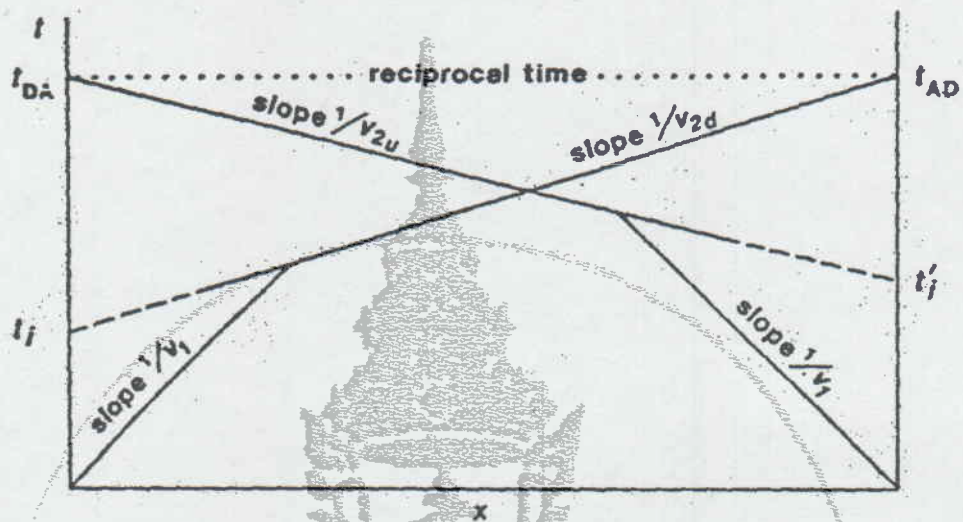
R = Reverse Shooting

ตารางที่ 8 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)
ตำแหน่งที่ 11

Number of Geophone	Spacing	Line 11/1				Line 11/2			
		F1	F2	R2	R2	F1	F2	R2	R2
0	0	0	0	28	28	0	0	30.5	-
1	5	2.5	2.5	27	26	3	1	29	-
2	10	5.5	6	24.5	24	6.5	6	28	-
3	15	9	8.5	23	22	10	9.5	27.5	-
4	20	12	12	22	21	14.5	14	25.5	-
5	25	16	16	21.5	21	17	16	23	-
6	30	18.5	18.5	19.5	18	20.5	20	19.5	-
7	35	21	22.5	16	14	23	22.5	18	-
8	40	24	25	11.5	11	27	27	13.5	-
9	45	25	25.5	8	7	29	28.5	11	-
10	50	26.5	27	6	5	31	30.5	7	-
11	55	28	28	3	1.5	33	32.5	3	-
12	60	29	28.5	0	0	34	-	0	-

หมายเหตุ: F = Forward Shooting

R = Reverse Shooting



รูปที่ 11 แสดงลักษณะของ $t-x$ graph (คัดลอกจาก Kearey and Brooks, 1991)

โครงการหลวง

ดังนั้น สำหรับ t-x graph ของคลื่นวิ่งตรงที่เดินทางด้วยความเร็ว V_1

$$t = x/V_1$$

$$t/x = 1/V_1$$

$$\text{slope} = 1/V_1$$

สำหรับ t-x graph ของ Head Wave ซึ่งส่วนใหญ่เดินทางด้วยความเร็ว v_2

$$t = x/v_2$$

$$t/x = 1/v_2$$

$$\text{slope} = 1/v_2$$

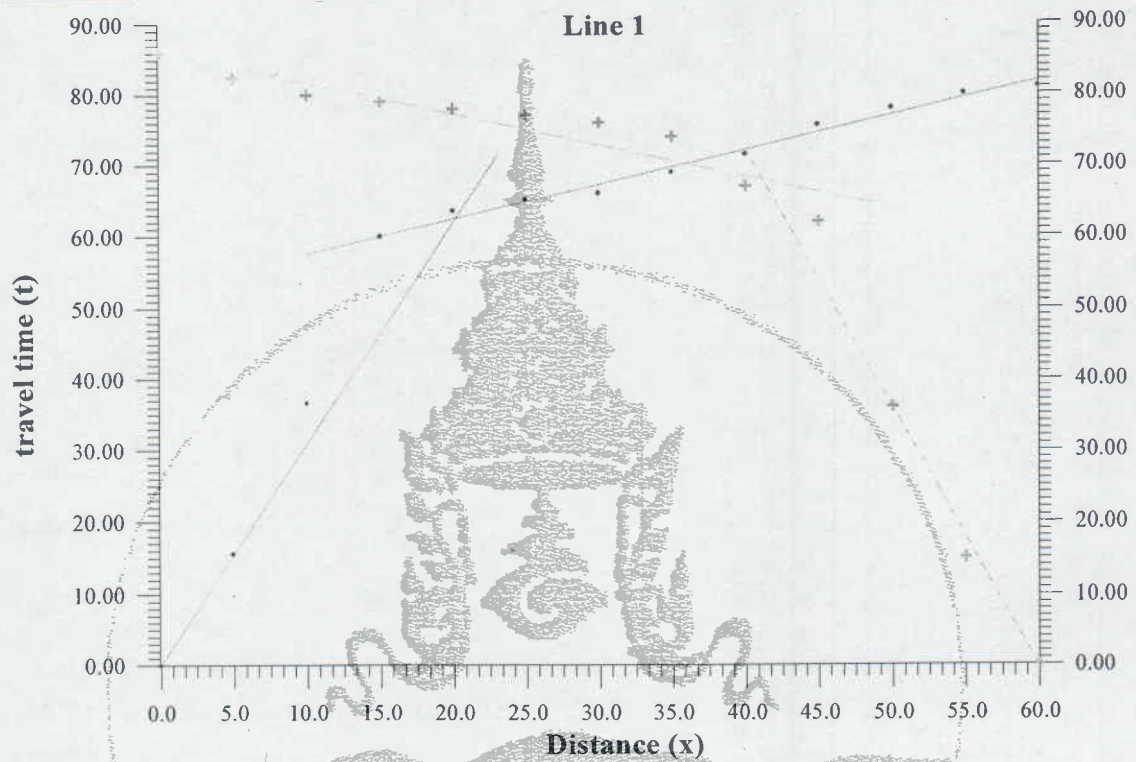
ค่าความหนาหรือความลึกถึงแนวต่อ (h) หาได้จาก

$$h = x_c/2 \sqrt{v_2 - v_1 / v_2 + v_1}$$

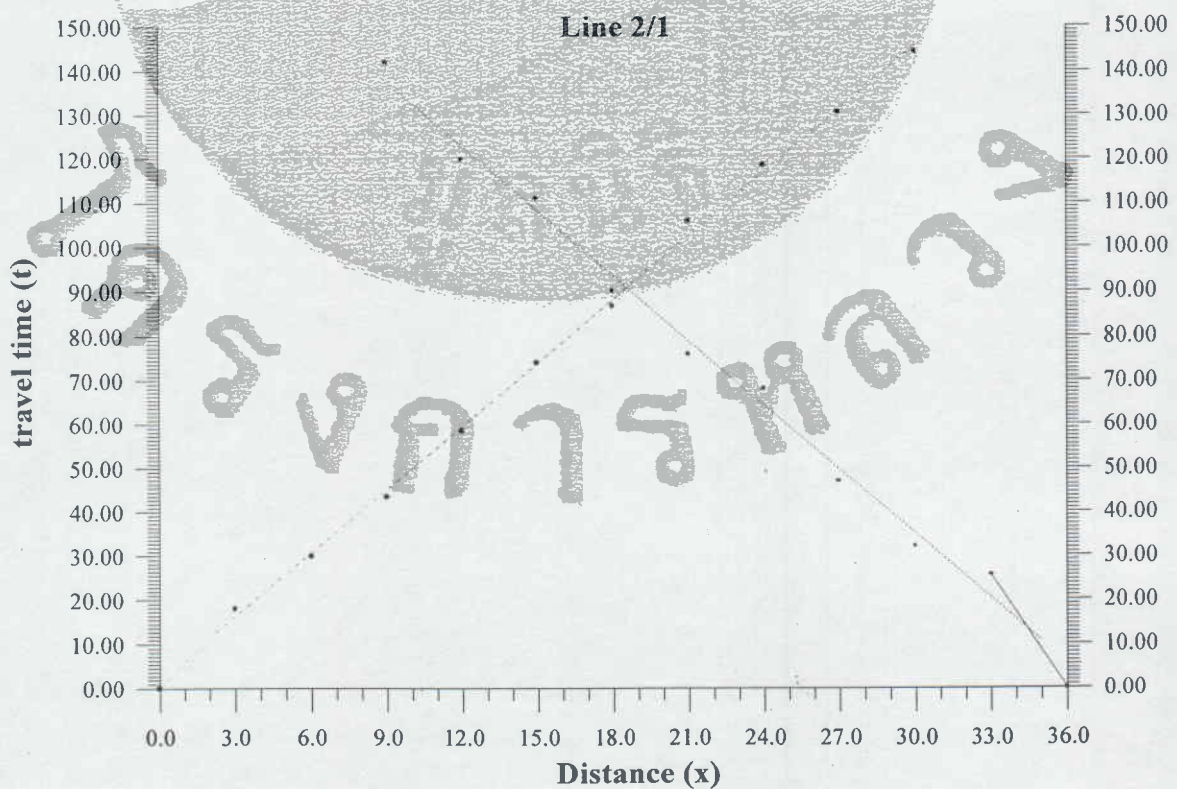
เมื่อนำข้อมูลภาคสนามของการสำรวจทั้ง 11 ตำแหน่ง ซึ่งแสดงในรูปที่ 12 มาทำการแปลความหมาย
ได้ผลออกมาดังแสดงในตารางที่ 9

โครงการหลวง

ตำแหน่งที่ 1

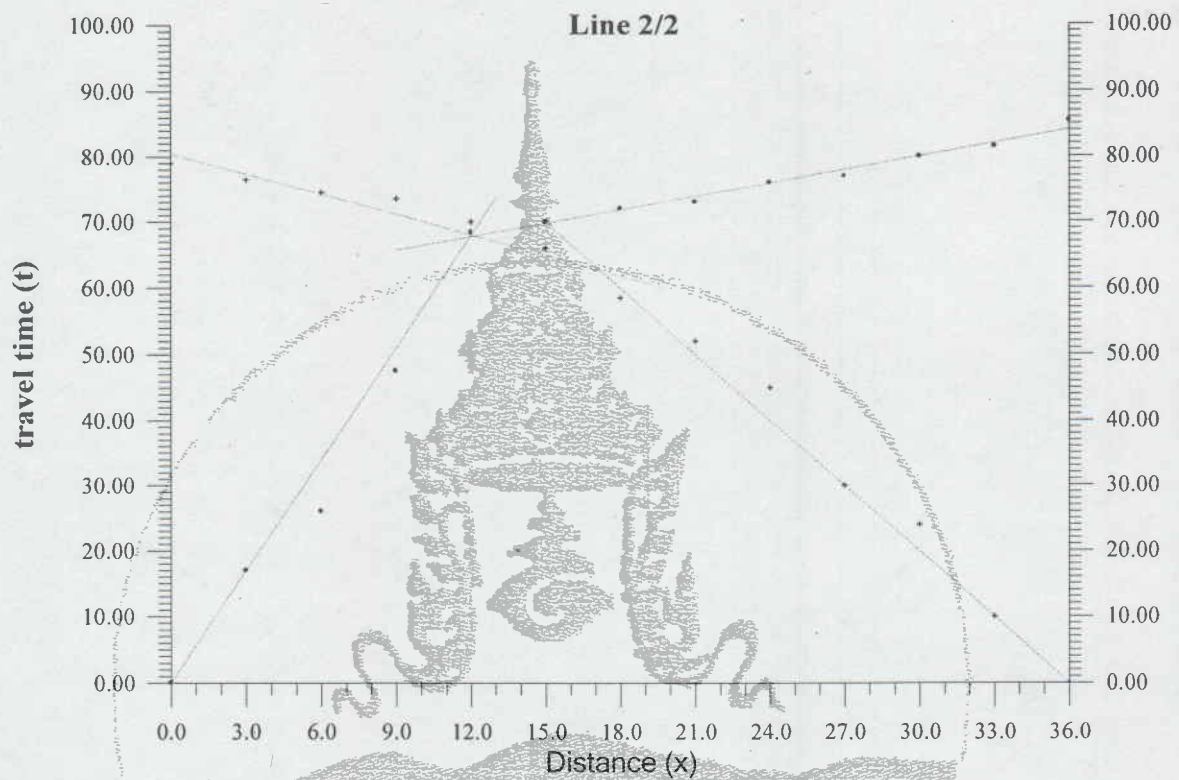


ตำแหน่งที่ 2

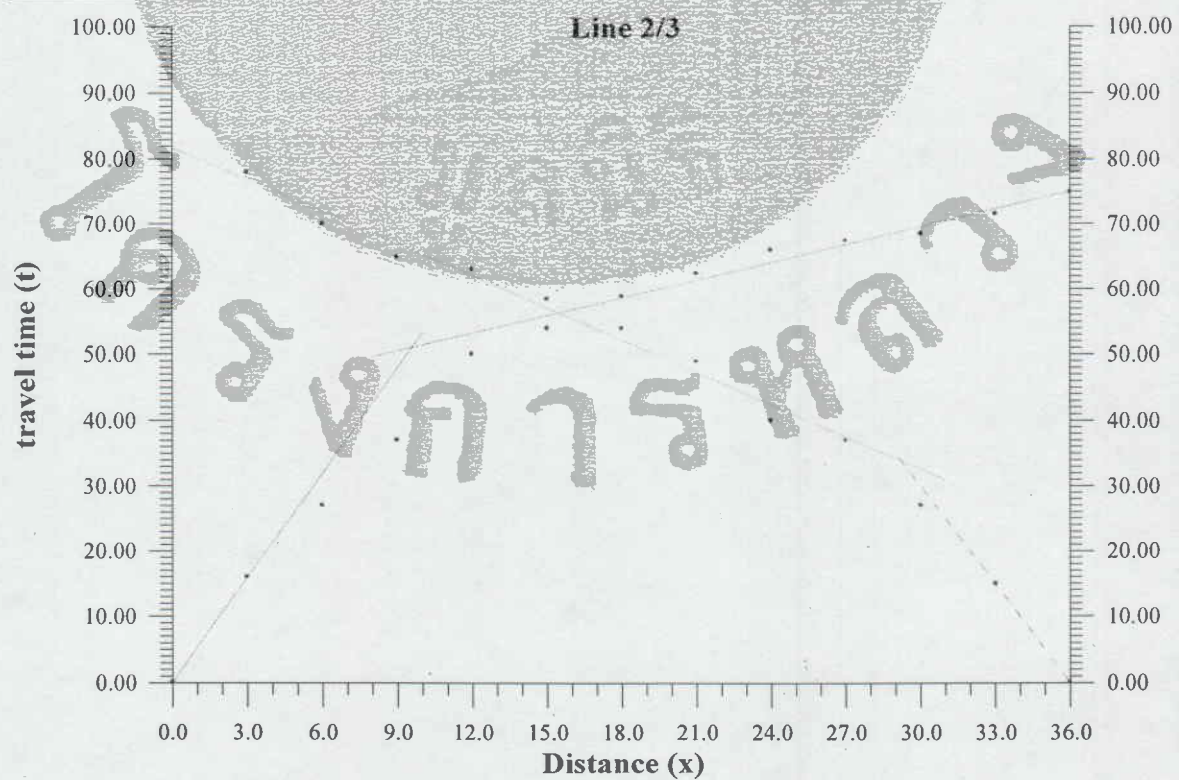


รูปที่ 12 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห

ตำแหน่งที่ 2

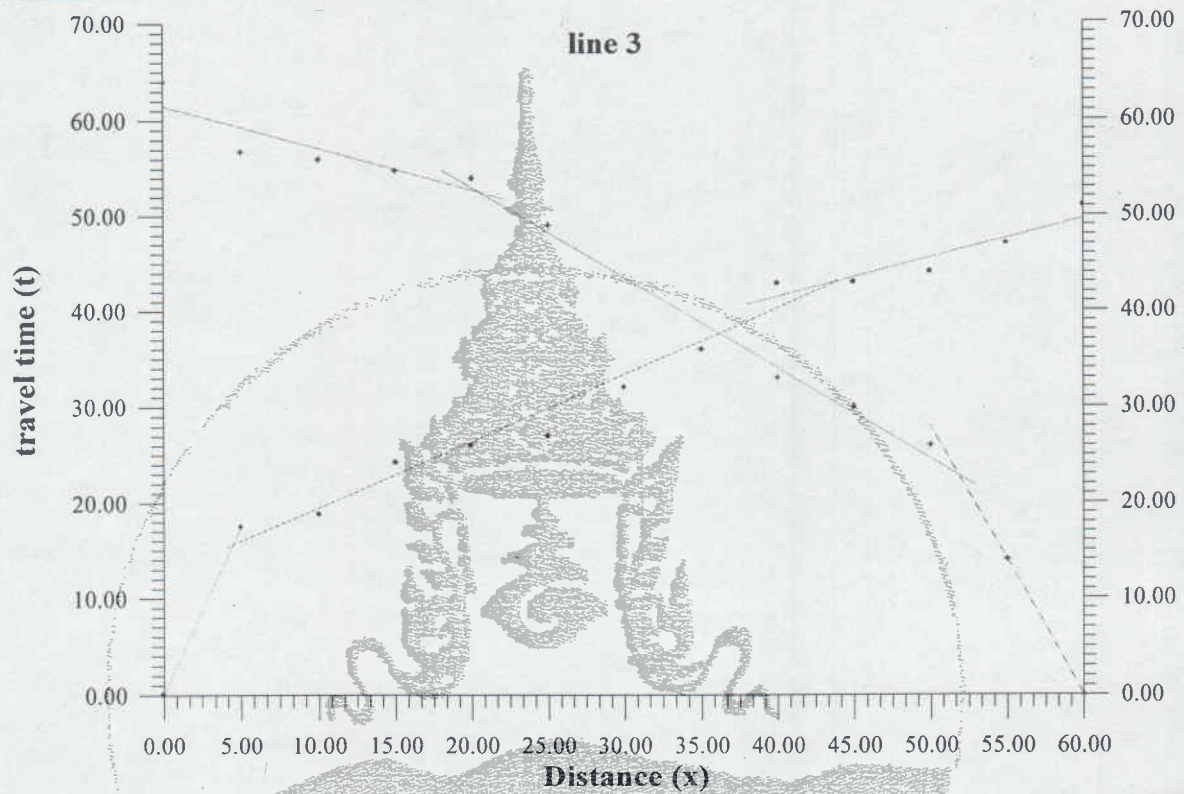


ตำแหน่งที่ 2

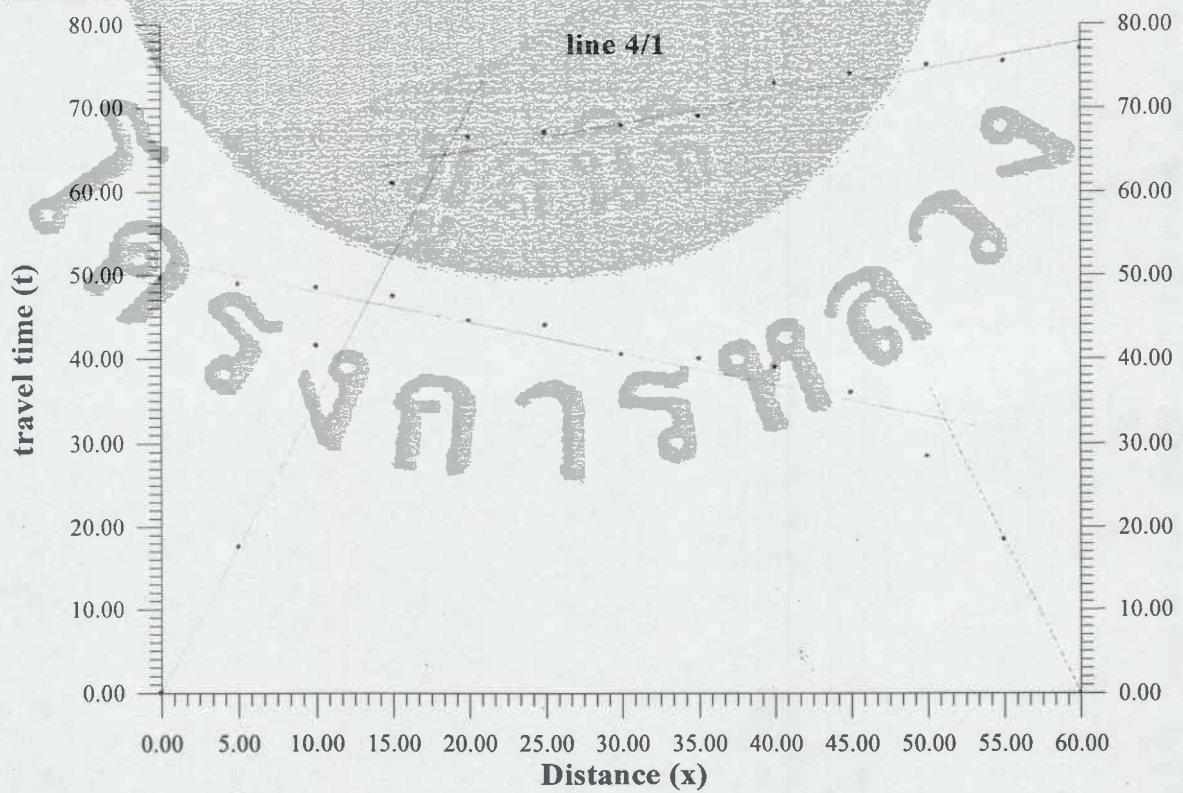


รูปที่ 12 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)

ตำแหน่งที่ 3

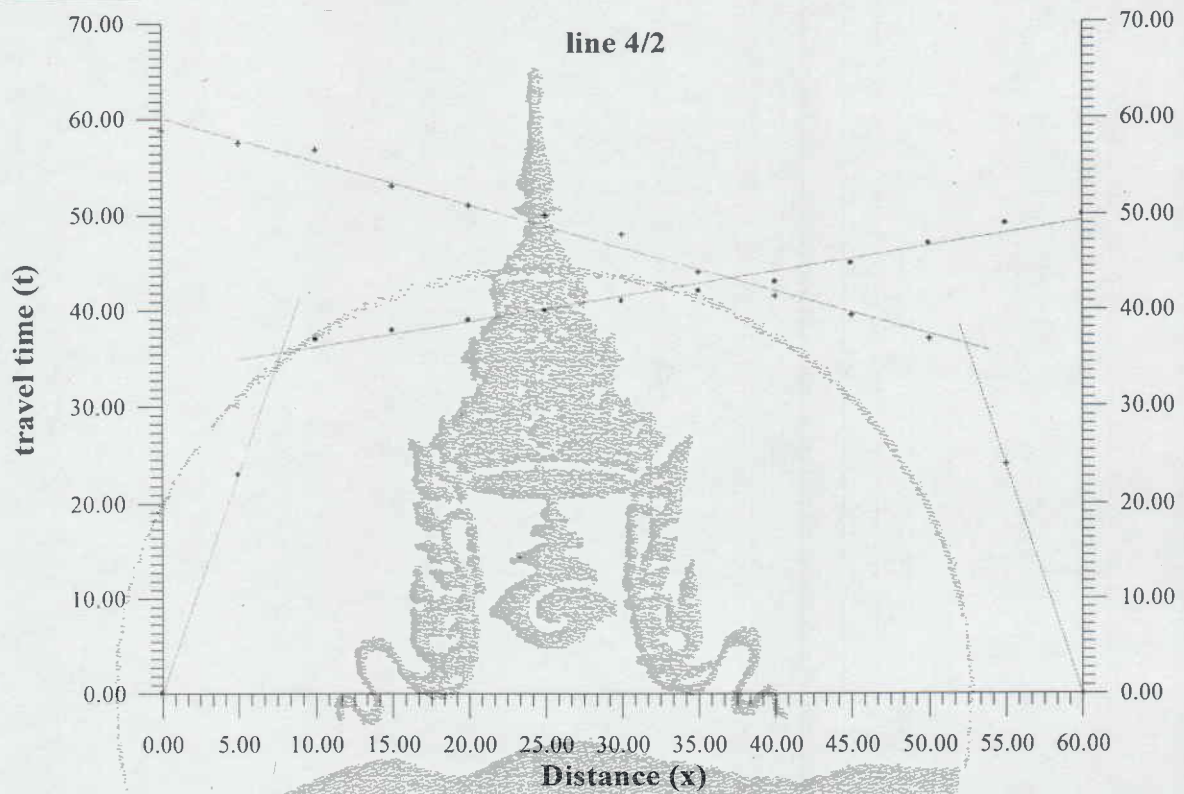


ตำแหน่งที่ 4

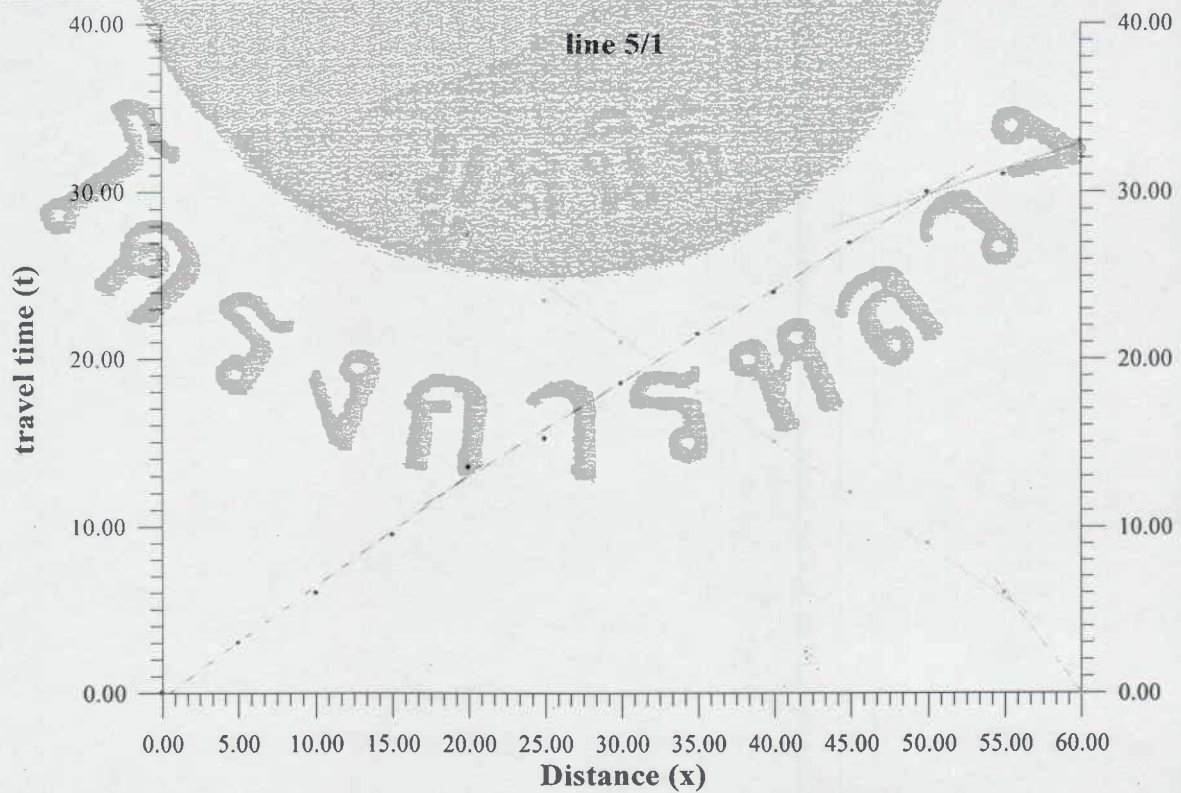


รูปที่ 12 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)

ตำแหน่งที่ 4

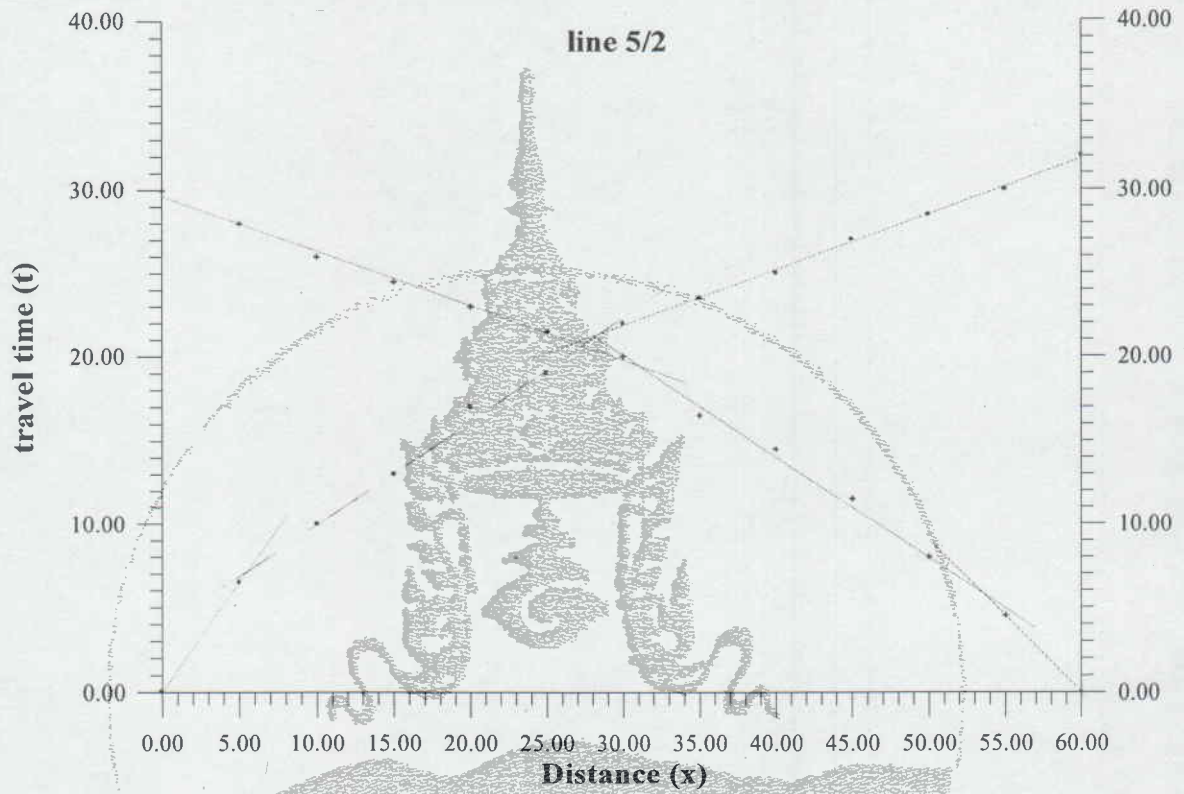


ตำแหน่งที่ 5

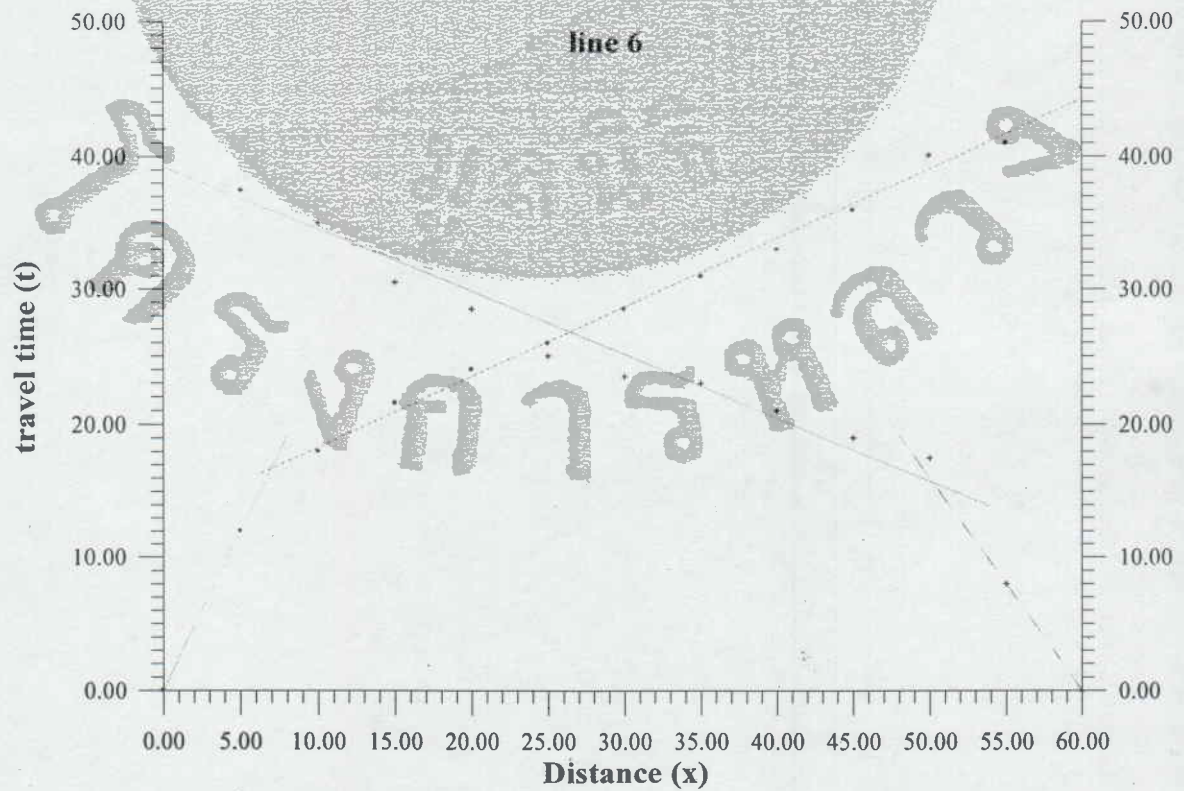


รูปที่ 12 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)

ตำแหน่งที่ 5

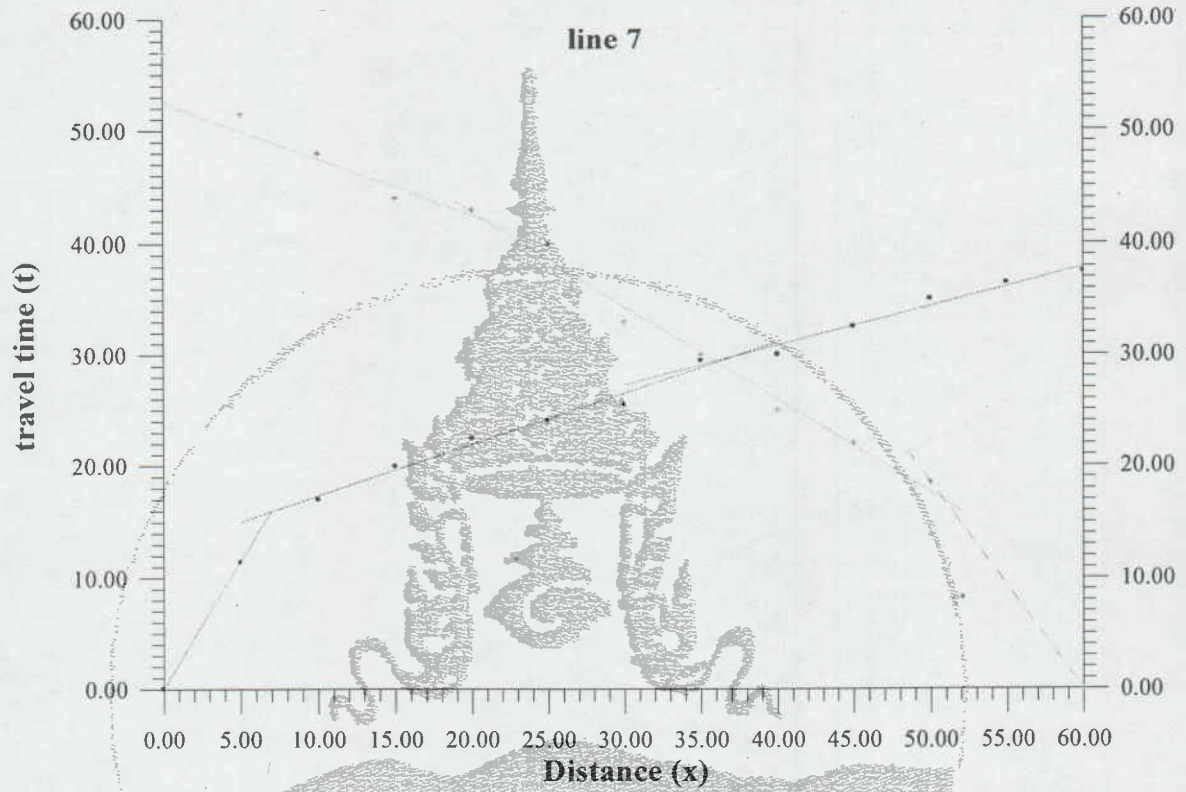


ตำแหน่งที่ 6

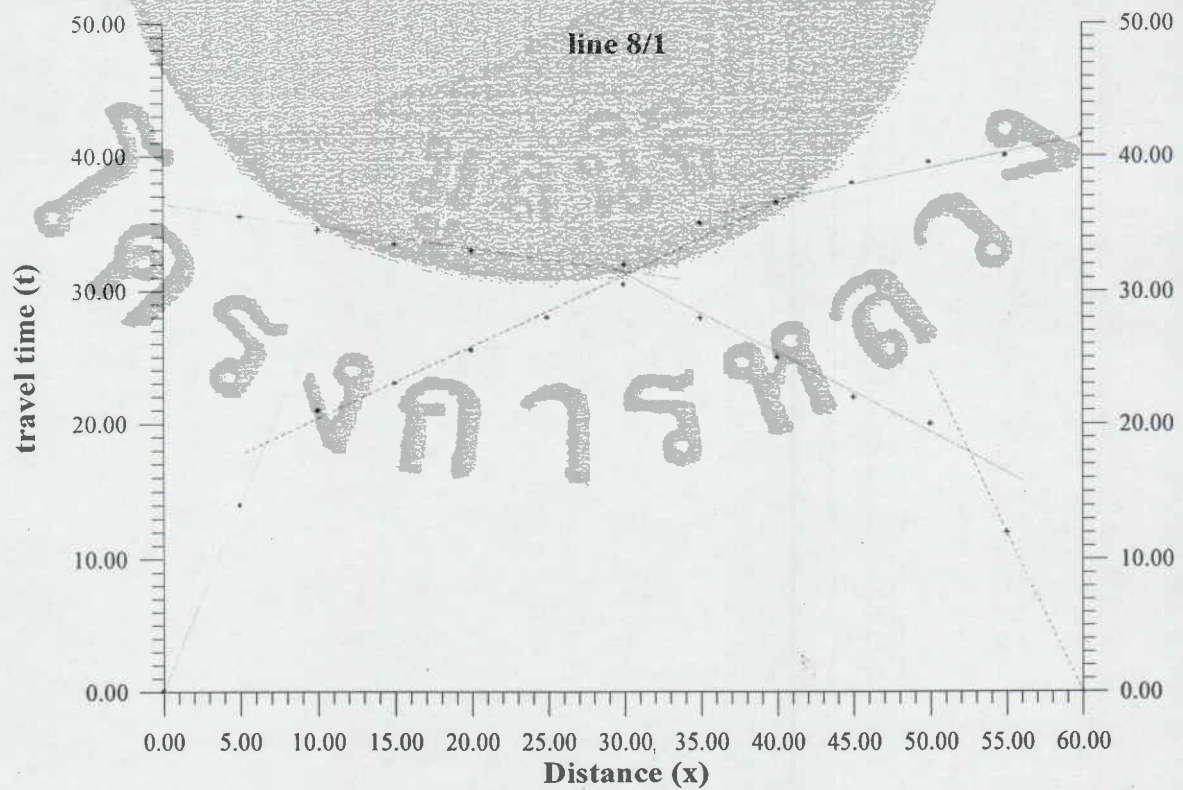


รูปที่ 12 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)

ตำแหน่งที่ 7

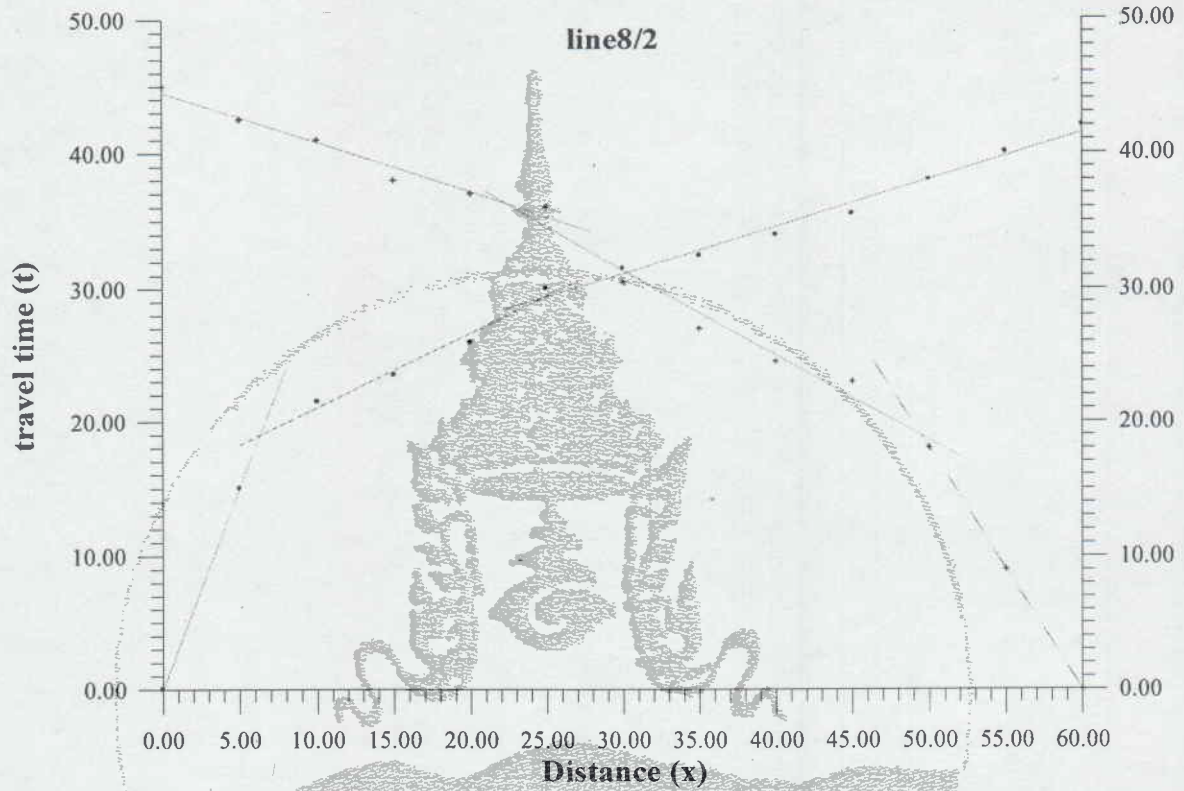


ตำแหน่งที่ 8

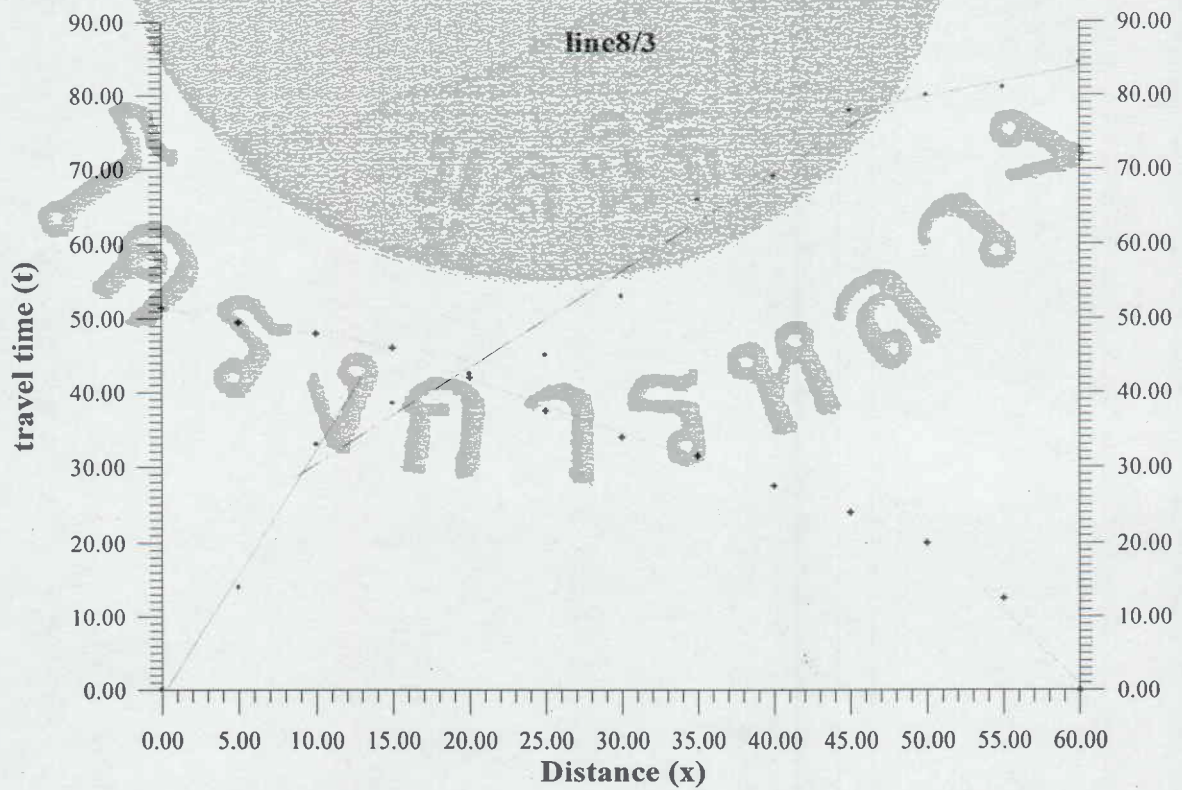


รูปที่ 12 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)

ตำแหน่งที่ 8

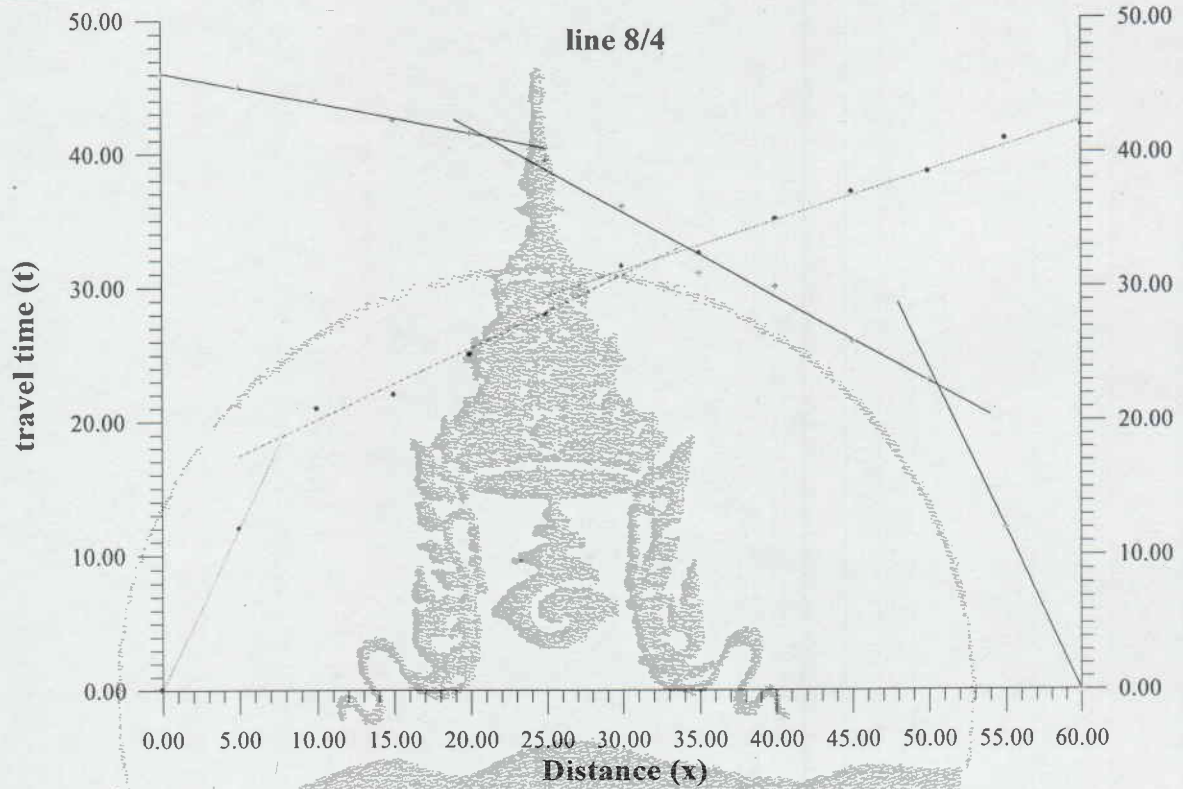


ตำแหน่งที่ 8

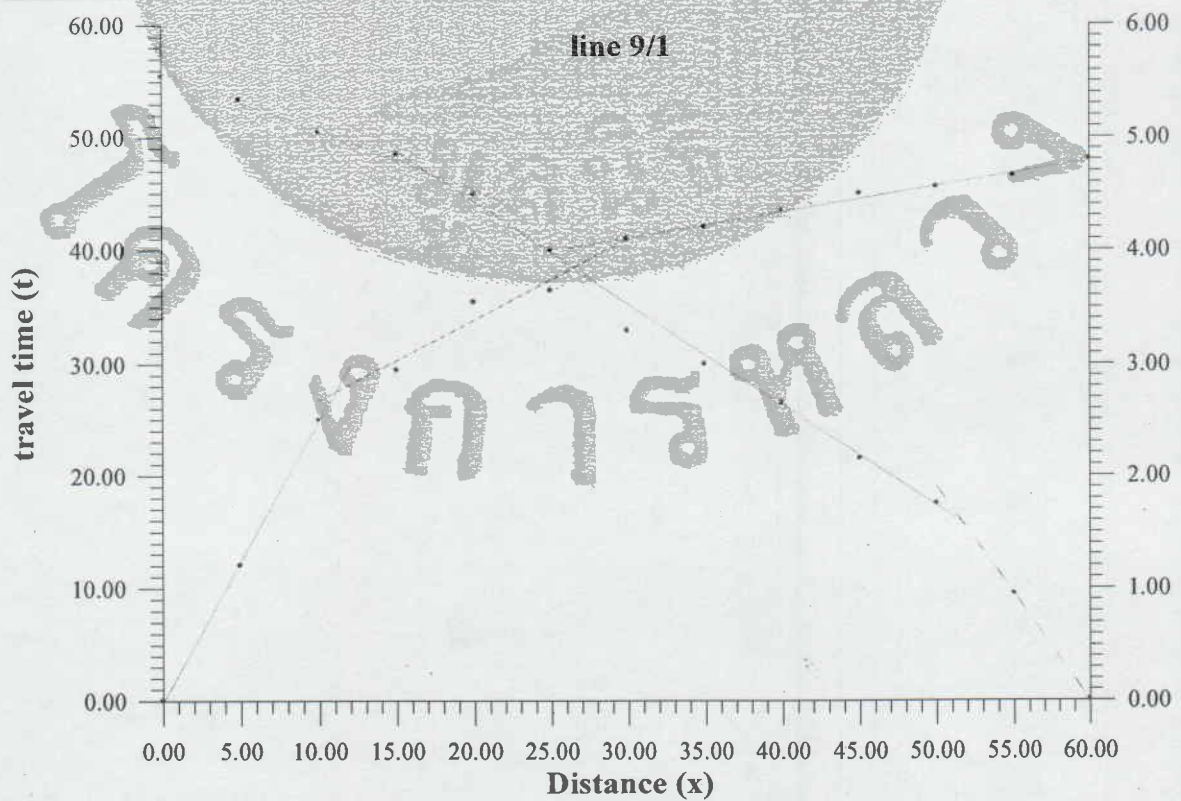


รูปที่ 12 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)

ตำแหน่งที่ 8

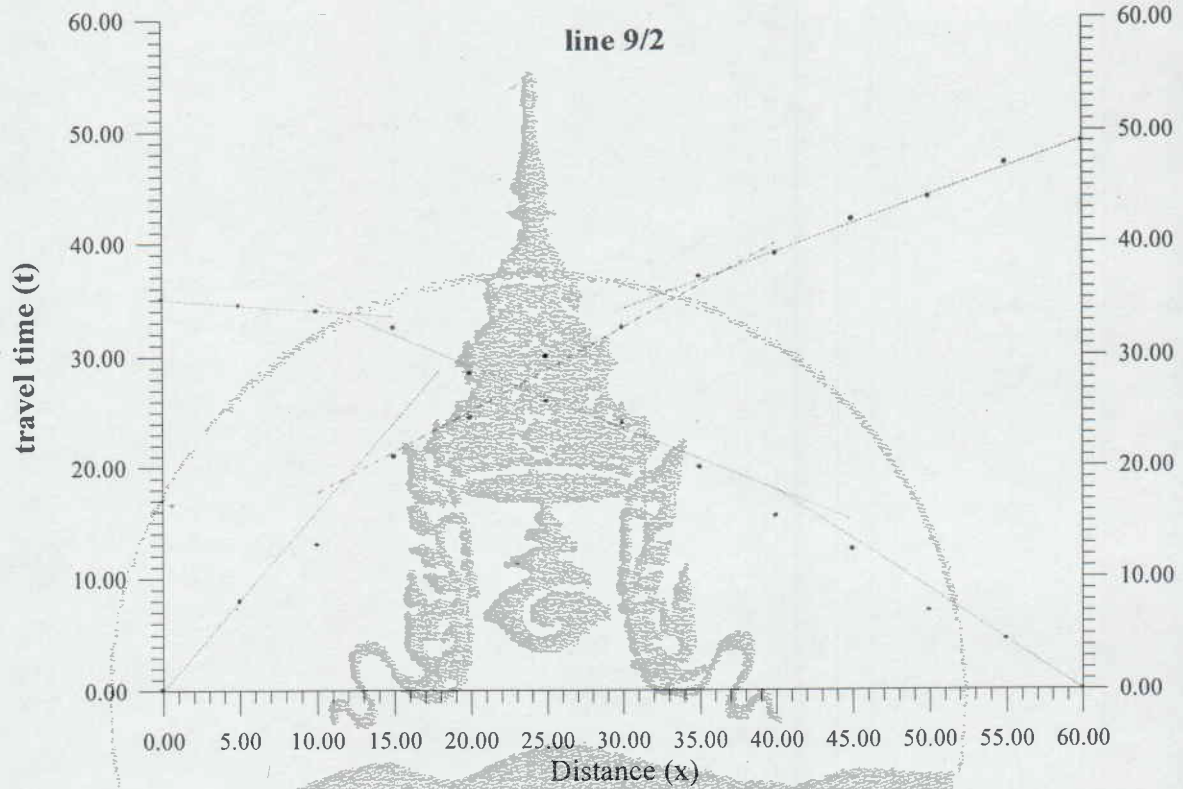


ตำแหน่งที่ 9

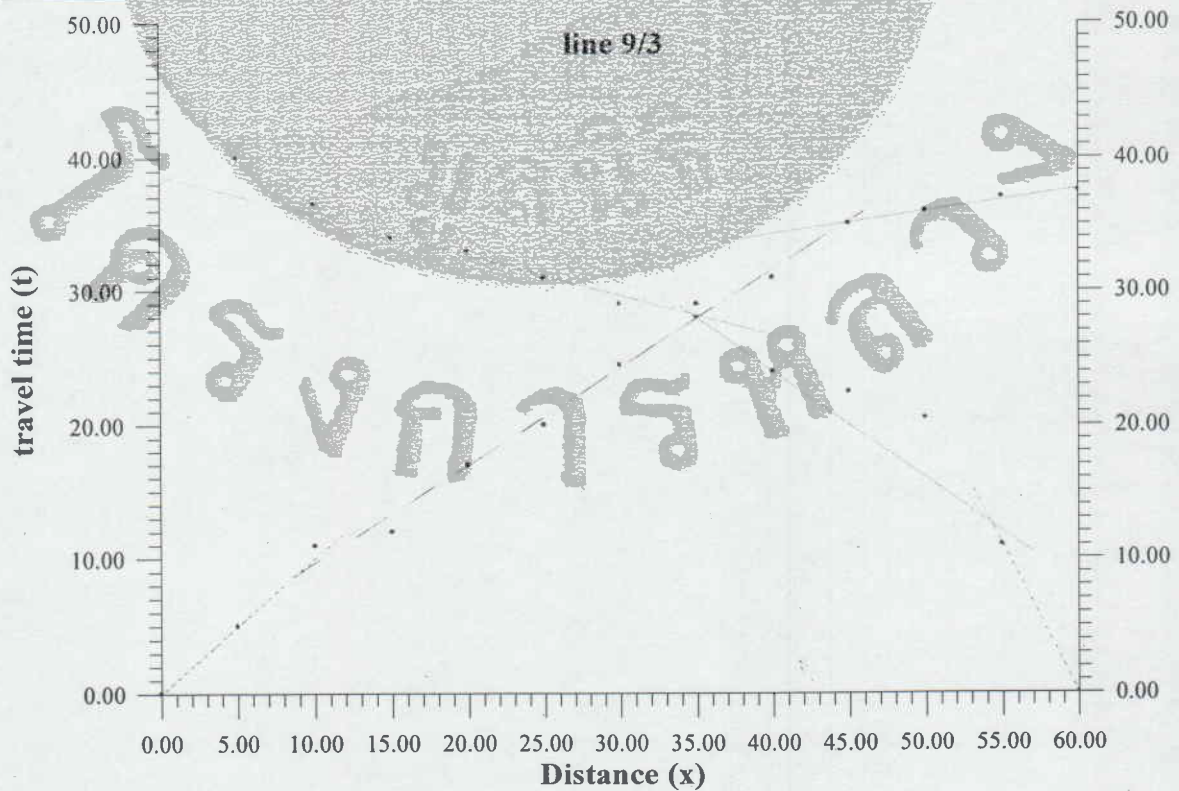


รูปที่ 12 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)

ตำแหน่งที่ 9

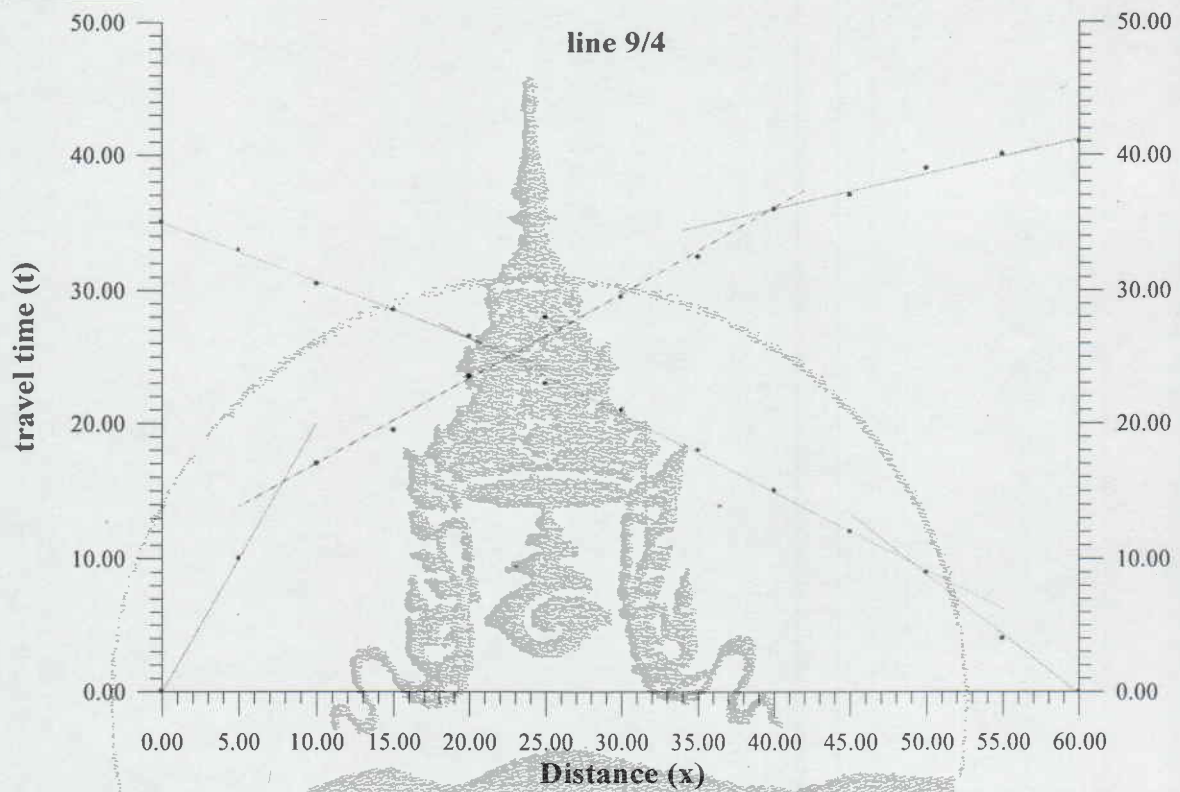


ตำแหน่งที่ 9

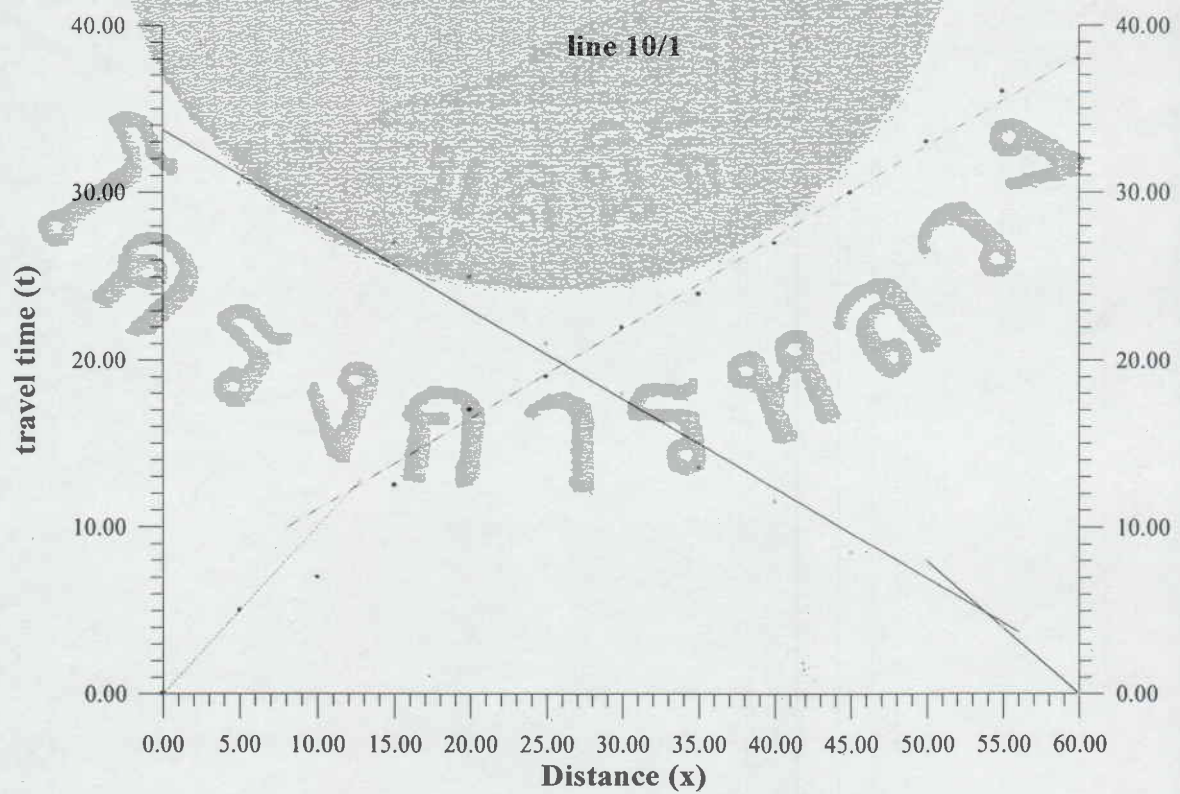


รูปที่ 12 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)

ตำแหน่งที่ 9

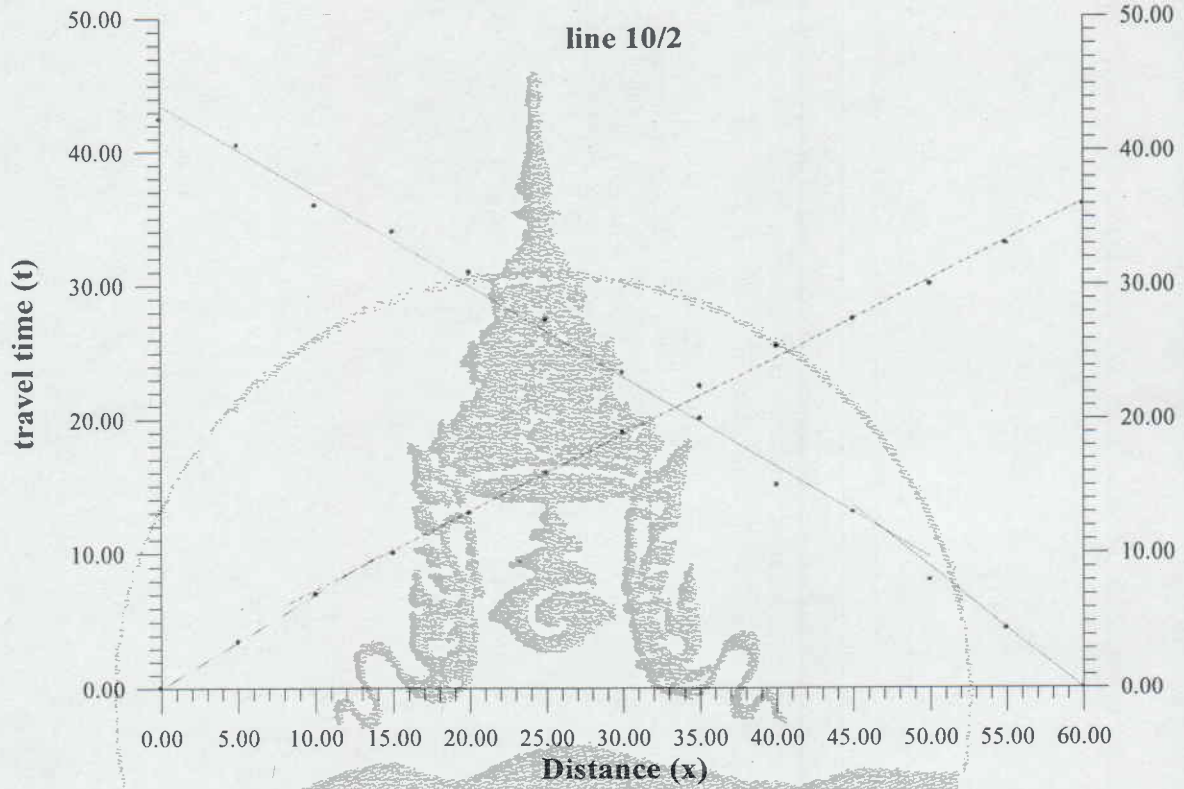


ตำแหน่งที่ 10

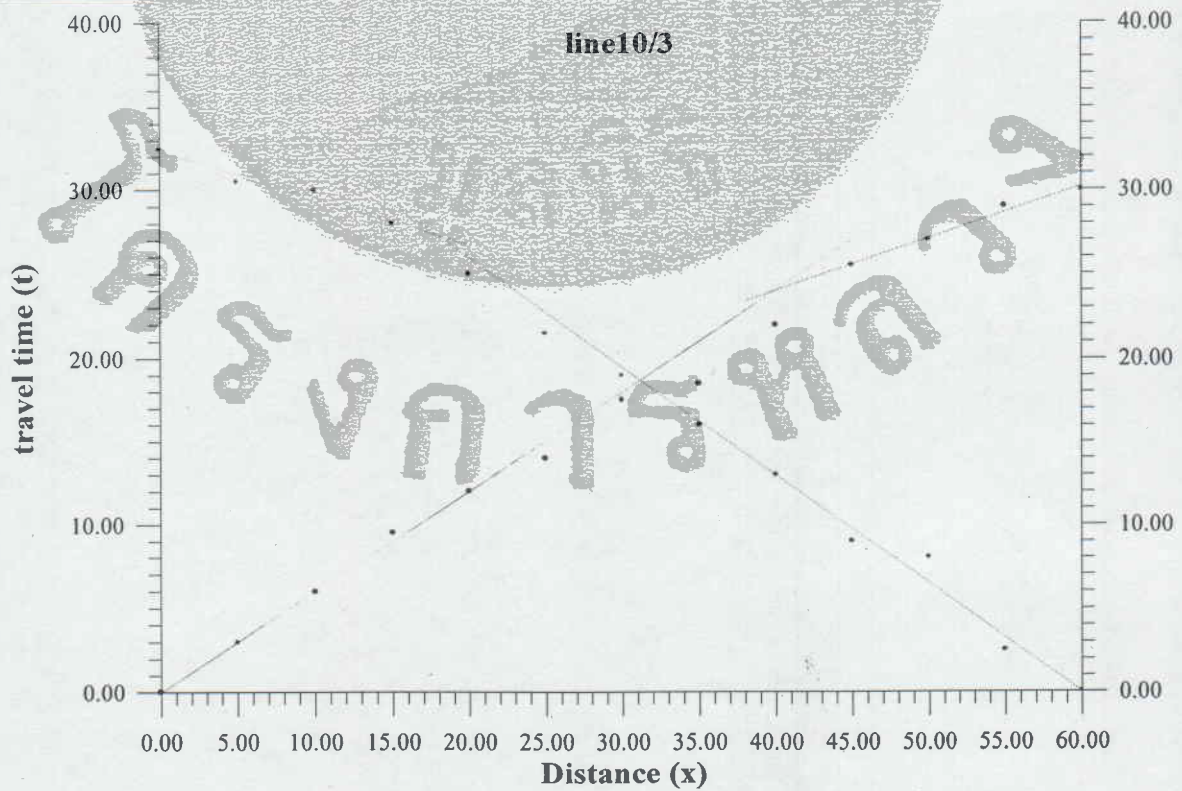


รูปที่ 12 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)

ตำแหน่งที่ 10

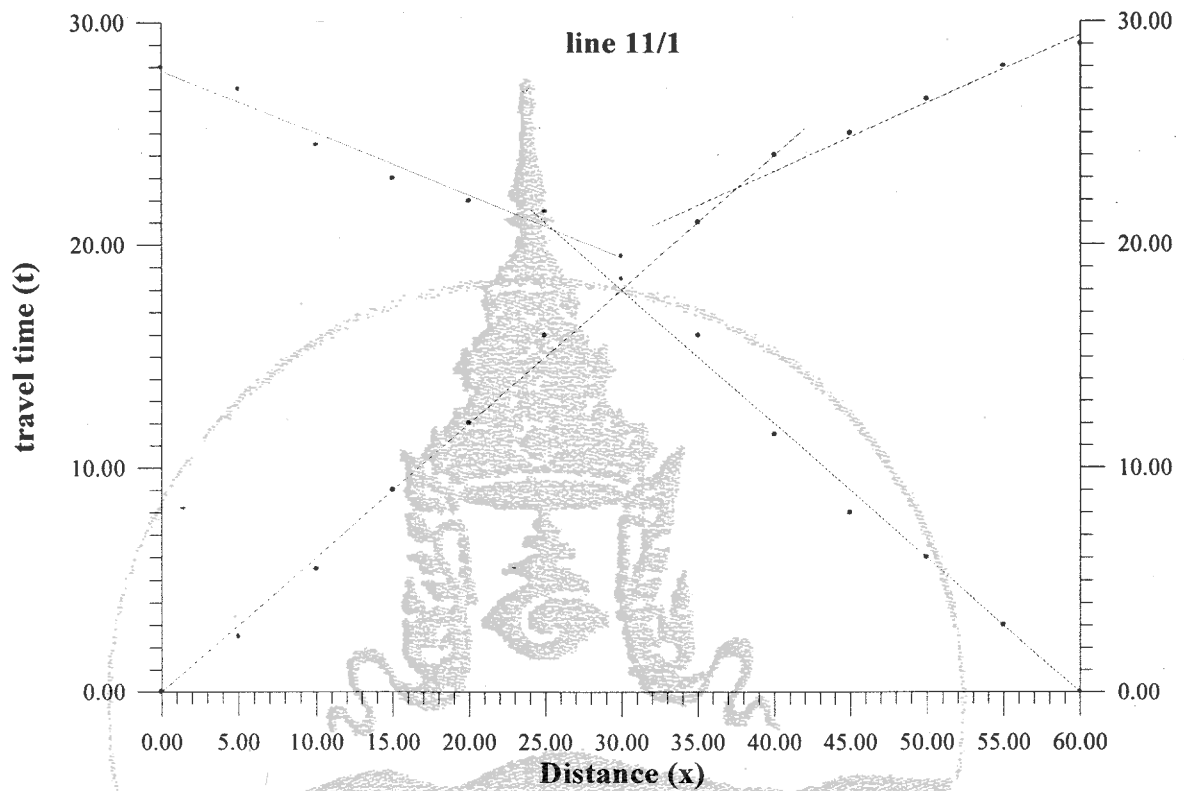


ตำแหน่งที่ 10

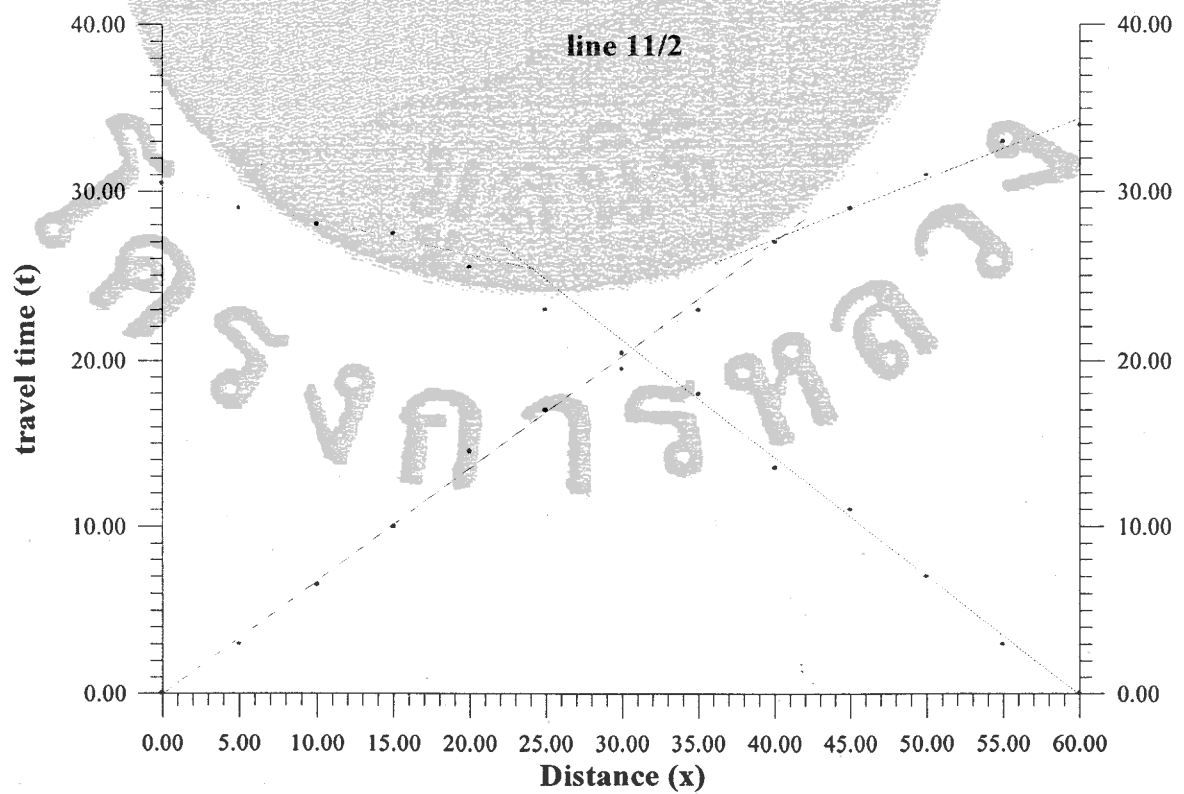


รูปที่ 12 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)

ตำแหน่งที่ 11



ตำแหน่งที่ 11



รูปที่ 12 ข้อมูลภาคสนามของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)

ตารางที่ 9 ผลการแปลความหมายของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห

ตำแหน่งที่	แนวการสำรวจที่	ชั้นที่	ค่าความเร็วคลื่นไหวสะเทือน (เมตร/วินาที)	ความหนา (เมตร)	ชนิดของดิน/หิน
1	1	1	322.58	8.31	ตะกอนร่วน
		2	2083.33	-	หินแกรนิตผุ
2	2/1	1	166.67	0.07	ชั้นหน้าดิน
		2	208.77	-	ตะกอนร่วน
	2/2	1	176.37	5.18	ตะกอนร่วน
		2	1470.59	-	หินแกรนิตผุ
	2/3	1	187.62	3.58	ตะกอนร่วน
		2	1100.11	-	หินแกรนิตผุ
3	3	1	285.71	1.82	ตะกอนร่วน
		2	1449.28	11.26	หินแกรนิตผุ
		3	2450.98	-	หินแกรนิต
4	4/1	1	285.71	8.27	ตะกอนร่วน
		2	3067.48	-	หินแกรนิตผุ
	4/2	1	217.39	3.68	ตะกอนร่วน
		2	3846.15	-	หินแกรนิตผุ
5	5/1	1	1492.54	2.31	หินแกรนิตผุ
		2	1785.71	12.72	หินแกรนิตผุ
		3	3333.33	-	หินแกรนิต
	5/2	1	769.23	1.66	ตะกอนร่วน
		2	1612.90	7.35	หินแกรนิตผุ
		3	3030.30	-	หินแกรนิต

ตารางที่ 9 ผลการแปลความหมายของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)

ตำแหน่งที่	แนวการสำรวจที่	ชั้นที่	ค่าความเร็วคลื่นไหวสะเทือน (เมตร/วินาที)	ความหนา (เมตร)	ชนิดของดิน/หิน
6	6	1	416.67	2.60	ตะกอนร่วน
		2	1923.08	-	หินแกรนิตผุ
7	7	1	540.541	5.02	ตะกอนร่วน
		2	1176.47	18.74	หินแกรนิตผุ
		3	3378.38	-	หินแกรนิต
8	8/1	1	3571.43	27.30	หินแกรนิตผุ
		2	18518.52	122.68	หินแกรนิต
		3	41666.67	-	หินแกรนิต
	8/2	1	3333.33	26.30	หินแกรนิตผุ
		2	17857.14	57.58	หินแกรนิต
		3	29411.76	-	หินแกรนิต
	8/3	1	303.03	2.87	ตะกอนร่วน
		2	769.23	16.46	หินแกรนิตผุ
		3	2439.02	-	หินแกรนิต
	8/4	1	4166.67	31.43	หินแกรนิตผุ
		2	18518.52	66.02	หินแกรนิต
		3	27027.03	-	หินแกรนิต

ตารางที่ 9 ผลการแปลความหมายของการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห (ต่อ)

ตำแหน่งที่	แนวการสำรวจที่	ชั้นที่	ค่าความเร็วคลื่นไหวสะเทือน (เมตร/วินาที)	ความหนา (เมตร)	ชนิดของดิน/หิน
9	9/1	1	400.00	4.11	ตะกอนร่วน
		2	1408.45	10.23	หินแกรนิตผุ
		3	4347.83	-	หินแกรนิต
	9/2	1	625.00	3.60	ตะกอนร่วน
		2	1345.90	7.51	หินแกรนิตผุ
		3	2000.00	-	หินแกรนิต
	9/3	1	1000.00	1.75	ตะกอนร่วน
		2	1373.63	16.99	หินแกรนิตผุ
		3	5882.35	-	หินแกรนิต
	9/4	1	500.00	2.82	ตะกอนร่วน
		2	1572.33	12.41	หินแกรนิตผุ
		3	3846.15	-	หินแกรนิต
10	10/1	1	1000.00	1.95	ตะกอนร่วน
		2	1818.18	-	หินแกรนิตผุ
	10/2	1	1428.57	0.36	ตะกอนร่วน
		2	1724.14	-	หินแกรนิตผุ
	10/3	1	1666.67	7.25	ตะกอนร่วน
		2	3333.33	-	หินแกรนิตผุ
11	11/1	1	1666.67	6.84	หินแกรนิตผุ
		2	3267.97	-	หินแกรนิต
	11/2	1	1470.59	6.77	หินแกรนิตผุ
		2	2777.78	-	หินแกรนิต

3. สรุปผลการสำรวจ

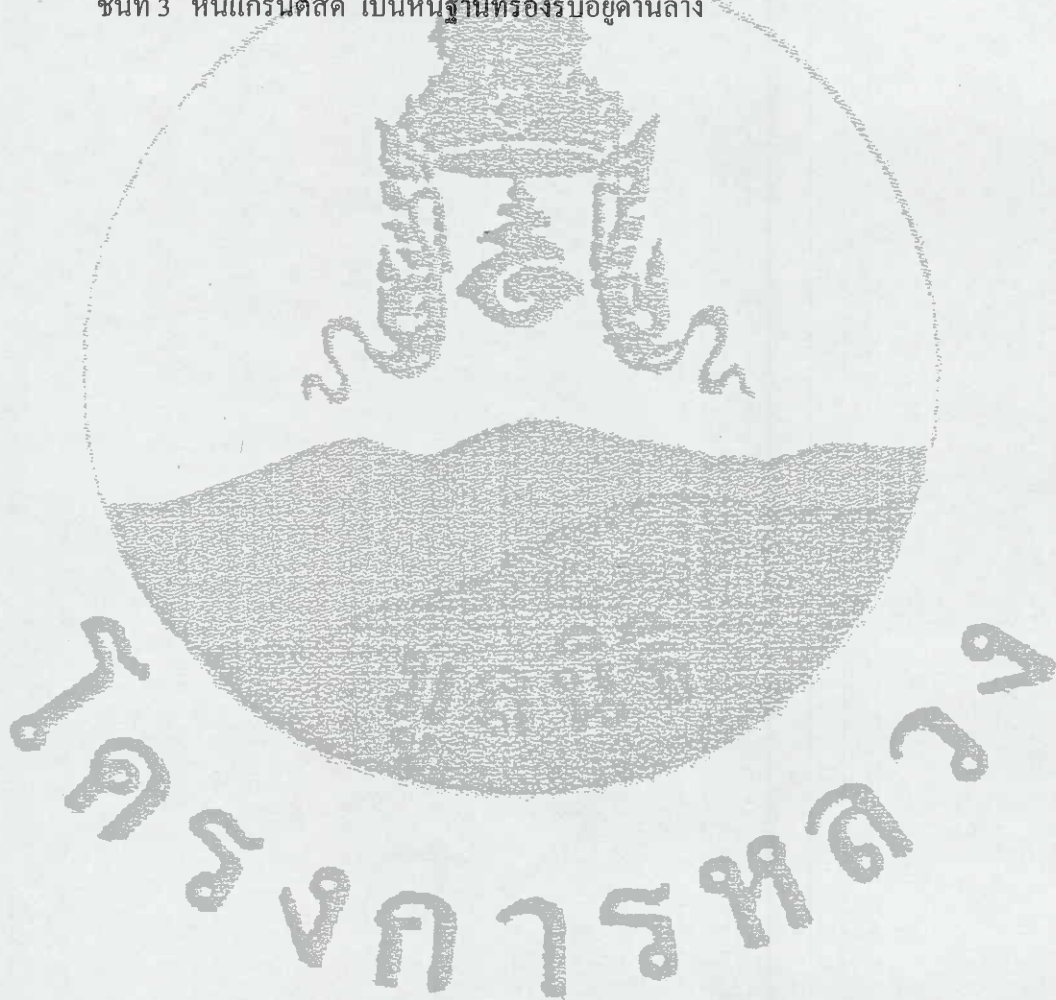
จากการสำรวจธรณีฟิสิกส์ทั้ง 2 วิธี คือ การสำรวจความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ และการสำรวจคลื่นไหวสะเทือนแบบหักเห ซึ่งมีจุดมุ่งหมายหลักเพื่อหาข้อมูลธรณีวิทยาใต้พื้นผิว สรุปผลการแปลความหมายโดยแยกลักษณะชั้นดินชั้นหินออกได้เป็น 3 ชั้นใหญ่ ๆ เรียงลำดับจากบนลงล่าง ดังนี้

ชั้นที่ 1 ตะกอนร่วน มีลักษณะของตะกอนทั้งที่เป็นขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ ได้แก่ ดินเหนียว ทราย และกรวด

ความหนาของชั้นตะกอนร่วน อยู่ระหว่าง 0.36 ถึง 9.1 เมตร

ชั้นที่ 2 หินแกรนิตผุ ความหนาของชั้นหินแกรนิตผุ อยู่ระหว่าง 4.7 ถึง 54.4 เมตร

ชั้นที่ 3 หินแกรนิตสด เป็นหินฐานที่รองรับอยู่ด้านล่าง



เอกสารอ้างอิง

Kearey, P., and Brooks, M., 1991, An Introduction to Geophysical Exploration: Blackwell Scientific Publications, 254 p.

Manual of GRAPHER Version 1.24 ®, 1994, Golden Software, Inc.

Telford, W.M., Geldart, L.P., and Sheriff, R.E., 1990, Applied Geophysics: Cambridge University Press, Cambridge, 770 p.

Todd, D.K., 1980, Groundwater Hydrology: John Wiley & Sons, Inc., 535 p.

Velpen, V., 1988, RESIST 87 ®, Msc. Research Project, International Training Centre, The Netherlands.

