

การประยุกต์วิธีการทางธรณีฟิสิกส์สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค
Application of Geophysical Methods for Geotechnical Engineering

ปิยะพงศ์ สังควังค์
Piyapong Sangkawang

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาธรณีฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Master of Science in Geophysics**

Prince of Songkla University

2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การประยุกต์วิธีการทางธรณีฟิสิกส์สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค
Application of Geophysical Methods for Geotechnical Engineering

ปิยะพงศ์ สังควังค์

Piyapong Sangkawang

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาธรณีฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for

the Degree of Master of Science in Geophysics

Prince of Songkla University

2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์วิธีการทางธรณีฟิสิกส์สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค
ผู้เขียน นายปิยะพงศ์ สังกวังก์
สาขาวิชา ธรณีฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กำแหง วัฒนเสน)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวัฒน์ชัย เทพนวล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กำแหง วัฒนเสน)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สวัสดิ์ ยอดขยัน)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนนี ฐูปการ)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาธรณีฟิสิกส์

.....
(ศาสตราจารย์ ดร. ดำรงค์ดี ฟ้ารุ่งแสง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอแสดงความขอบคุณ
บุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้อง

ลงชื่อ.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กำแหง วัฒนเสน)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....
(นายปิยะพงศ์ ตั้งวงศ์)
นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการขออนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน
และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายปิยะพงศ์ ตั้งวงศ์)

นักศึกษา

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จลงได้เนื่องจากได้รับความกรุณาจากคณาจารย์และบุคลากรหลายฝ่าย จึงกราบขอขอบพระคุณ ณ โอกาสนี้ ดังรายชื่อต่อไปนี้ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กำแหง วัฒนเสน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความรู้คำแนะนำทางวิชาการที่ดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ ดร.สันติ รักษาวงศ์ นายจำรัส ณ สุวรรณ ที่ช่วยในการเก็บข้อมูลภาคสนาม และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาฟิสิกส์ ธรณีฟิสิกส์ทุกชั้นปี สำหรับกำลังใจและคำแนะนำ ที่ทำให้วิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

และสุดท้ายนี้สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดา ที่สนับสนุนด้านการเรียนและคอยให้กำลังใจตลอดเวลาจนการเรียนผ่านพ้นไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาทุกท่านและมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับทุกสิ่งทุกอย่างที่มอบแก่ข้าพเจ้า

ปิยะพงศ์ สังควังค์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์วิธีการทางธรณีฟิสิกส์สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค
ผู้เขียน	นายปิยะพงศ์ ตั้งวงศ์
สาขาวิชา	ธรณีฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

การประยุกต์วิธีทางธรณีฟิสิกส์สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค ในบริเวณที่เกิดปัญหาในอำเภอหาดใหญ่ งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์วิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ERT) ร่วมกับวิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน (GPR) มาใช้แก้ปัญหาดินอ่อนเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาและขอบเขตของชั้นดินอ่อนบริเวณพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ เฟส 2 ตำบลลุง อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา และประยุกต์วิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน (GPR) มาใช้แก้ปัญหาถนนทรุดตัว เพื่อหาลักษณะ โครงสร้างทางธรณีวิทยาของชั้นดินและวิเคราะห์หาสาเหตุการทรุดตัวของถนน บริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห และบริเวณถนนชลธารา แนวริมคลองเคย (ตลาดไถ่ไถ่) อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

ผลวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ากับปัญหาชั้นดินอ่อน พบ โครงสร้างทางธรณีวิทยาภายใต้ผิวดินสามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มที่เป็นดินอ่อน มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่า 40 โอห์ม-เมตร และส่วนที่ไม่เป็นดินอ่อนมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามากกว่า 40 โอห์ม-เมตร และผลวิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดินสามารถแยกความแตกต่างของสัญญาณระหว่างบริเวณที่เป็นดินอ่อนกับบริเวณที่ไม่เป็นดินอ่อนได้ ผลวิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดินในการศึกษาการทรุดตัวของถนนบริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห พบโพรงขนาดเล็ก (0.5-1.5 เมตร) ในหลายแนวสำรวจ และบริเวณถนนชลธารา แนวริมคลองเคย (ตลาดไถ่ไถ่) พบกลุ่มโพรงขนาด 1-3 เมตร ทั้งสองพื้นที่พบโครงสร้างทางธรณีวิทยาภายใต้ผิวดินมีความเสียหายจากดินทรุดตัวเป็นบริเวณกว้างและลึกลงไปถึงแนวท่อรวบรวมน้ำเสีย สาเหตุของการทรุดตัวของถนนคาดว่ามีความสัมพันธ์กับท่อบำบัดน้ำเสีย ในการประยุกต์วิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และวิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน ทั้งสองวิธีมีความเหมาะสมในการนำมาใช้แก้ปัญหานทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค

Thesis Title	Application of geophysical methods for geotechnical engineering.
Author	Mr. Piyapong Sangkawang
Major Program	Geophysics
Academic year	2019

Abstract

Application of geophysics for geotechnical engineering problems in Hat Yai District, This research has applied electrical resistivity tomography (ERT) with ground penetrating radar (GPR) for soft soil problem to study the geological structure and extent of soft soil In the Southern Region Industrial Estate, Phase 2, Chalung Sub-district, Hat Yai District, Songkhla Province, and applied ground penetrating radar (GPR) for road subsidence problem to find the geological structure of subsurface and analyze the causes of road subsidence in the area of Khlong Hae Security Checkpoint and Chonthara Road Khlong Toei Riverside (Kong Khong Market), Hat Yai District, Songkhla Province

The results of electrical resistivity tomography can be divided into two groups, the soft soil group having the resistivity of less than 40 ohm-meters and the non-soft soil having the resistivity of more than 40 ohm-m and the result of the ground-penetrating radar can differentiate signals between soft ground and non-soft soil. The results of ground penetrating radar in the study of road subsidence at the Khlong Hae security checkpoint founded small cavities (0.5-1.5 m) in many survey lines and the Chonthara Road Khlong Toei Riverside (Khong Khong Market) founded a relatively large cavity (1-3 m). In both areas, the geological structure of subsurface has been damaged by subsidence in a wide area and deep down to the waste water collection line. The cause of the subsidence of roads is expected to be related to sewage pipes. The applications of both electrical resistivity tomography and ground penetrating radar both are suitable for solving geotechnical engineering problems.

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(11)
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตและลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษา	3
2. ตรวจสอบเอกสาร	
2.1 ลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา	5
2.2 ลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาและพื้นที่ใกล้เคียง	5
2.3 กรณีศึกษาที่ 1 การประยุกต์ใช้วิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ERT) ร่วมกับวิธีเรดาร์หึ่งลึกชั้นดิน (GPR) กับกรณีปัญหาดินอ่อนในพื้นที่ก่อสร้างนิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ (ฉลุง) อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา	9
2.4 กรณีศึกษาที่ 2 การประยุกต์ใช้วิธีเรดาร์หึ่งลึกชั้นดิน (GPR) กับกรณีปัญหาการทรุดตัวของถนนบริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห และบริเวณถนนชลธารา แนวริมคลองเตย (ตลาดโค้งโค้ง)	15
2.5 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวิธีธรณีฟิสิกส์ที่ใช้ในงานวิจัย	20
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์	37
3. วิธีการวิจัย	
3.1 วัสดุอุปกรณ์	46
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย	49
4. ผลและการวิเคราะห์ผล	
4.1 ผลการสำรวจด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และการสำรวจด้วยวิธีเรดาร์หึ่งลึกชั้นดิน (GPR) ในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมฉลุง	62

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.2 ผลการสำรวจการทรุดตัวของถนนบริเวณพื้นที่เทศบาลนคร หาดใหญ่ด้วยวิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน	83
5. สรุปและข้อเสนอแนะ	109
บรรณานุกรม	111
ภาคผนวก	111
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์	131
ประวัติผู้เขียน	140

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
4.1 แสดงตำแหน่งและความลึกของดินอ่อนที่พบในแนวสำรวจต่างๆ	64
4.2 แสดงสัญลักษณ์ของสัญญาณต่างๆที่พบในพื้นที่ศึกษา	90

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 ที่ตั้งของพื้นที่ศึกษา	4
2.1 ลักษณะธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา	7
2.2 แสดงที่ตั้งของพื้นที่ศึกษาประกอบไปด้วย 1) นิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ (ฉลุง) ตั้งอยู่ทางทิศตะวันตกของตัวอำเภอหาดใหญ่ (พิกัด 6.9925 N, 100.3720 E) 2) บริเวณด่านตรวจความมั่นคงคลองแห ตั้งอยู่ทิศเหนือของอำเภอหาดใหญ่ (พิกัด 7.0390 N, 100.4650 E) และ 3) บริเวณถนนชลธาราแนวริมคลองเตย (ตลาดโก้งโค้ง) ตั้งอยู่ทางทิศตะวันออกของตัวอำเภอหาดใหญ่ (พิกัด 7.0061 N, 100.4758 E)	8
2.3 รูปบนแสดงลักษณะพื้นที่ศึกษาของนิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ (ฉลุง) เฟส 2 และรูปล่างแสดงหนองน้ำที่หลงเหลือจากการทำเหมืองแร่ดีบุกในอดีต	10
2.4 A ลักษณะของดินเหนียวอ่อนอยู่ที่ความลึกประมาณ 0.5 เมตร และ B แสดงลักษณะของดินอ่อนที่ถูกขุดขึ้นมา (ถ่ายเมื่อ มีนาคม 2560)	11
2.5 A ดินลูกรังที่ถูกนำมาถมในตอนกลางของพื้นที่ศึกษา และ B การเปลี่ยนชนิดดิน โดยการนำดินที่ไม่ใช่ดินอ่อนมาแทนที่ดินเหนียวเพื่อเตรียมทำถนน (ถ่ายเมื่อ มีนาคม 2560)	12
2.6 หลุมที่ถูกขุดเพื่อปักเสาไฟฟ้า โดยดินชั้นบนเป็นดินถมและดินชั้นล่างเป็นดินเหนียวอ่อน (ถ่ายเมื่อ มีนาคม 2561)	13
2.7 รางน้ำคอนกรีตที่อยู่รอบๆพื้นที่ศึกษา (ถ่ายเมื่อ มีนาคม 2561)	13
2.8 หลุมขุดบริเวณด่านตรวจความมั่นคงคลองแห	16
2.9 หลุมขุดบริเวณถนนชลธารา แนวริมคลองเตย (ตลาดโก้งโค้ง)	17
2.10 แบบจำลองสาเหตุการเกิดแผ่นดินไหวตัวและโพรงในพื้นที่ชุมชนเมือง	18
2.11 ลักษณะการเกิดของหลุมขุดในรูปแบบต่างๆ	20
2.12 ลักษณะการไหลของกระแสไฟฟ้าและเส้นสมศักย์	22
2.13 คุณสมบัติของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของแร่ หิน และน้ำ	23
2.14 อธิบายการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า	24
2.15 ศักย์ไฟฟ้ากรณีมีจุดกำเนิดกระแสไฟฟ้าที่ผิวดิน	25

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
2.16 การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณผิวดิน	26
2.17 การสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและภาพเรดาร์แกรมที่ได้จากการสำรวจ GPR	27
2.18 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของดิน-หิน ชนิดที่พบได้ทั่วไป	32
2.19 การเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากตัวส่งไปยังตัวรับสัญญาณ	33
2.20 การเก็บข้อมูลแบบ Common Mid point (CMP)	34
2.21 การเก็บข้อมูลแบบ Wide Angle Reflection and Fraction (WARR)	35
2.22 แสดงสัญญาณรูปแบบของไฮเพอร์โบลา	35
2.23 รูปประกอบการคำนวณความลึกของคลื่น GPR	36
2.24 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินเหนียวอ่อนในประเทศเกาหลี ญี่ปุ่น สิงคโปร์ และสกอตแลนด์	37
2.25 ผลกระทบที่เกิดจากภูมิประเทศแบบคาสต์ A คือ โปรง และ B คือ ดินทรุด และ C คือ หลุมยุบ	39
2.26 A คือ สัญญาณสะท้อนแบบไฮเพอร์โบลาและ B คือ โปรงที่มีลักษณะของผนังโปรงแบบไม่ปกติ	39
2.27 ลักษณะของภาพเรดาร์แกรมที่มีการพังทลายของชั้นดินในอดีต	40
2.28 สัญญาณที่ได้จากโปรงอากาศที่วางตัวในแนวดิ่ง	40
2.29 ลักษณะของคลื่นสะท้อนที่สัมพันธ์กับบริเวณเกิดการทรุดตัวในพื้นที่ชุมชน เมือง จากสายอากาศความถี่ 100 MHz (A) และ 250 MHz (B)	41
2.30 ลักษณะการตอบสนองของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากความถี่ คือ 50 MHz, 100 MHz และ 250 MHz	42
2.31 สัญญาณรูปไฮเพอร์โบลาที่เกิดจากดินที่ไม่เป็นเนื้อเดียวและมีความไม่ต่อเนื่องซึ่งเป็นลักษณะของโปรง	43
2.32 หลุมยุบเป็นผลมาจากการมีอัตราการทรุดตัวที่ค่อนข้างสูง	44
2.33 ลักษณะโครงสร้างที่เกิดจากการทรุดตัวของหลุมยุบ	44
3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัย	45

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3.2 รูปเครื่องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า Terameter SAS 1000 ที่ต่ออยู่กับเครื่อง Electrode Selector 464 ในขณะที่ทำการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้ผิวดินแบบอัตโนมัติ	47
3.3 ชุดอุปกรณ์การสำรวจ GPR ที่ความถี่สายอากาศ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz	48
3.4 ชุดอุปกรณ์การสำรวจ GPR สายอากาศแบบ RTA ความถี่ 30 MHz	48
3.5 แนวสำรวจวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจำนวน 20 แนววัด (L1-L20) และการสำรวจวิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดินจำนวน 5 แนววัด (GPR1-GPR5)	49
3.6 การเก็บข้อมูลด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ ฉลุง	50
3.7 ลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการสำรวจแบบ ไดโพล- ไดโพล	51
3.8 แสดงภาพจากโปรแกรม S4Kwin (ABEM Instrument AB) ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏที่ได้จากการวางขั้วแบบไดโพล- ไดโพล เมื่อใช้ระยะห่างน้อยสุดระหว่างคู่อิเล็กโทรดเท่ากับ 5 เมตร	52
3.9 การเก็บข้อมูลด้วยวิธี GPR โดยใช้สายอากาศความถี่ 30 MHz (RTA antenna) ในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ (ฉลุง)	53
3.10 แนวสำรวจ GPR บริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห เทศบาลนครหาดใหญ่	54
3.11 แนวสำรวจ GPR บริเวณถนนชลธารา แนวริมคลองเตย (ตลาดไถ่ไถ่)	55
3.12 A แสดงการเก็บข้อมูลบริเวณถนนชลธารา แนวริมคลองเตย (ตลาดไถ่ไถ่) ด้วยสายอากาศความถี่ 200 MHz และ B แสดงการเก็บข้อมูลที่บริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห เทศบาลนครหาดใหญ่ด้วยสายอากาศความถี่ 100 MHz	56
3.13 A หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการจำแนกรายละเอียดของคลื่นและ B การจำแนกความละเอียดของข้อมูล GPR ในแนวตั้งและแนวด้านข้าง	57

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3.14 ลักษณะของ clutter ที่ได้จากความถี่ 100 MHz และ 50 MHz	60
4.1 ภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม RED2DINV.	62
4.2 ภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม Surfer 8	63
4.3 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 15 เมตร	63
4.4 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20	66
4.5 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 2.5 เมตร	67
4.6 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 5.0 เมตร	68
4.7 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 7.5 เมตร	68
4.8 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 10.0 เมตร	69
4.9 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 12.5 เมตร	69
4.10 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 15.0 เมตร	70
4.11 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 17.5 เมตร	70
4.12 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 20.0 เมตร	71
4.13 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 22.5 เมตร	71

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.14 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 25.0 เมตร	72
4.15 บริเวณตำแหน่งดินอ่อนและดินอ่อนช่วงแคบๆทางตอนใต้ของพื้นที่ศึกษาที่ คาดว่าอาจเป็นเส้นทางของเรื่อชุดแร่ในอดีต	73
4.16 ความสัมพันธ์ของดินอ่อนที่ความลึกต่างๆ	74
4.17 รูปบนแสดงความถี่ต่ำและการเกิด DC bias ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนอย่างเป็น ระบบของค่าค่าหนึ่งจากแกนของเวลาและรูปล่างแสดงสัญญาณที่ได้ หลังจากการปรับแก้	75
4.18 ลักษณะของ frequency spectrum ที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการกรองความถี่	76
4.19 A ลักษณะก่อนและหลังการขยายสัญญาณและ B สัญญาณแอมพลิจูดที่ ลดลงตามเวลา	77
4.20 การหาความเร็วจากสัญญาณคลื่นสะท้อนเป็นรูปไฮเพอร์โบลานในแผนภาพ เรดาร์แกรมในแนวสำรวจ GPR5	77
4.21 แผนภาพเรดาร์แกรมที่ผ่านการประมวลผลแล้วในแนวสำรวจ GPR5	78
4.22 ผลแนวสำรวจ GPR1 โดยค่าความลึกคำนวณจากความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ภายใต้แนววัดเท่ากับ 0.07 m/ns	78
4.23 ผลแนวสำรวจ GPR2 โดยค่าความลึกคำนวณจากความเร็วคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าภายใต้แนววัดเท่ากับ 0.07 m/ns	79
4.24 ผลแนวสำรวจ GPR3 โดยค่าความลึกคำนวณจากความเร็วคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าภายใต้แนววัดเท่ากับ 0.07 m/ns	79
4.25 ผลแนวสำรวจ GPR4 โดยค่าความลึกคำนวณจากความเร็วคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าภายใต้แนววัดเท่ากับ 0.07 m/ns	80
4.26 ผลแนวสำรวจ GPR5 โดยค่าความลึกคำนวณจากความเร็วคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าภายใต้แนววัดเท่ากับ 0.10 m/ns	80
4.27 การเปรียบเทียบของการลดทอนระหว่างแนวสำรวจ GPR5-GPR5 ที่อยู่ใน บริเวณของดินอ่อนและแนวสำรวจ GPR5 ที่ไม่ได้อยู่ในบริเวณของดินอ่อน	81

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.28 ผลของ GPR ในบริเวณ ดินอ่อน (GPR1-GPR4) และผลของ GPR ในบริเวณ ไม่เป็นดินอ่อน (GPR5)	82
4.29 การเปรียบเทียบระหว่างการสำรวจด้วยวิธี GPR ในแนวสำรวจ GPR5 กับ ERT ในแนวสำรวจ L19	82
4.30 ข้อมูลดิบก่อนการปรับแก้ข้อมูล	83
4.31 ผลที่ได้จากการทำ Dewow filtering	84
4.32 ผลที่ได้จากการทำ Band-pass filter	84
4.33 ผลที่ได้จากการทำ Time zero correction	84
4.34 ผลที่ได้จากการทำ Background removal	85
4.35 ผลที่ได้หลังจากการทำ AGC	85
4.36 ผลที่ได้หลังจากการทำ Running average	85
4.37 แสดงความเร็วจากลักษณะสัญญาณคลื่นสะท้อนรูปไฮเพอร์โบลาในแผนภาพเรดาร์แกรม	86
4.38 การเปรียบเทียบความถี่ที่ได้จากแนวสำรวจตามถนนในแนว X5, Y5, Z3 และ X7, Y7, Z4	87
4.39 ลักษณะสัญญาณที่ได้จากการเกิดดินทรุดตัวที่ได้จากความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz ในแนว X5, Y5, Z3	88
4.40 ลักษณะสัญญาณ โพรงที่ได้จากความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz ที่ได้จากแนวสำรวจ X13, Y11, Z14	89
4.41 การเปรียบเทียบลักษณะการทรุดตัวของชั้นดินที่ได้จากความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz	91
4.42 การเปรียบเทียบลักษณะ โพรงที่ได้จากความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz	92
4.43 ผลที่ได้จากความถี่ 100 MHz คลองแหในแนวตามถนน	94
4.44 ผลที่ได้จากความถี่ 100 MHz คลองแหในแนวขวางถนน	95

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.45 บริเวณเกิดดินทรุดตัวใต้ชั้นดินที่ได้จากความถี่ 100 MHz ในแนวตามถนนและแนวขวางถนน พื้นที่ด้านตรวจความมั่นคงคลองแห	96
4.46 แผนที่ความเสียหายจากการทรุดตัวใต้ผิวดินอ้างอิงจากการแปลความหมายข้อมูลผลการสำรวจ GPR บริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห	98
4.47 แบบจำลองทางธรณีวิทยาของการเกิดหลุมยุบบริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห	98
4.48 แสดงการเปรียบเทียบความถี่ที่ได้จาก 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz ของแนวสำรวจ A5, B5, C5 และ แนวสำรวจ A6, B4, C6	100
4.49 แสดงลักษณะของสัญญาณชั้นดินทรุดตัวที่ได้จากความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz	101
4.50 แสดงลักษณะสัญญาณ โพรงจากความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz	102
4.51 การเปรียบเทียบลักษณะการทรุดตัวของชั้นดินที่ได้จากความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz	103
4.52 ผลที่ได้จากความถี่ 50 MHz ในแนวขวางถนน	105
4.53 บริเวณเกิดดินทรุดตัวใต้ชั้นดินที่ได้จากความถี่ 50 MHz ในแนวตามถนนและแนวขวางถนน	106
4.54 แผนที่ความเสียหายจากการทรุดตัวใต้ผิวดินบริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห โดยอ้างอิงจากการแปลความหมายข้อมูลผลการสำรวจ GPR	108
4.55 แบบจำลองทางธรณีวิทยาของการเกิดหลุมยุบบริเวณถนนชลธาราแนวริมคลองเตย (ตลาด โกง โกง)	108
ผ1 ผลที่ได้จากความถี่ 200 MHz คลองแหในแนวตามถนน	118
ผ2 ผลที่ได้จากความถี่ 200 MHz คลองแหในแนวขวางถนน	119
ผ3 บริเวณเกิดดินทรุดตัวใต้ชั้นดินที่ได้จากความถี่ 200 MHz ในแนวตามถนนและแนวขวางถนน	120

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ผ4 ผลที่ได้จากความถี่ 50 MHz คลองแหในแนวตามถนน	121
ผ5 ผลที่ได้จากความถี่ 50 MHz คลองแหในแนวขวางถนน	122
ผ6 บริเวณเกิดดินทรุดตัวใต้ชั้นดินที่ได้จากความถี่ 50 MHz ในแนวตามถนน และแนวขวางถนน	123
ผ7 แสดงการเปรียบเทียบบริเวณที่ได้รับความเสียหายชั้นดินจากความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz ในแนวตามถนน	124
ผ8 แสดงการเปรียบเทียบบริเวณที่ได้รับความเสียหายชั้นดินจากความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz ในแนวขวางถนน	125
ผ9 ผลที่ได้จากสายอากาศความถี่ 200 MHz ในแนวตามถนนและแนวขวาง ถนน	126
ผ 10 บริเวณเกิดดินทรุดตัวใต้ชั้นดินที่ได้จากความถี่ 200 MHz ในแนวตามถนน และแนวขวางถนน	127
ผ 11 ผลที่ได้จากสายอากาศความถี่ 100 MHz ในแนวตามถนนและแนวขวาง ถนน	128
ผ 12 บริเวณเกิดดินทรุดตัวใต้ชั้นดินที่ได้จากความถี่ 200 MHz ในแนวตามถนน และแนวขวางถนน	129
ผ 13 แสดงเปรียบเทียบบริเวณที่ได้รับความเสียหายชั้นดินจากความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz ในแนวตามถนน	130

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

วิศวกรรมธรณีเทคนิค (Geotechnical engineering) เป็นสาขาหนึ่งในงานวิศวกรรมโยธา เกี่ยวข้องกับงานออกแบบก่อสร้าง บำรุงรักษาและแก้ไขปัญหาด้านวิศวกรรมโยธาเกือบทุกประเภท เช่น ระบบฐานรากของอาคาร งานถนน สะพาน เขื่อน สนามบิน อุโมงค์ไฟฟ้าใต้ดิน อุโมงค์บำบัดน้ำเสีย อาคารสูง และงานปรับปรุงคุณภาพดิน เป็นต้น งานการสำรวจตรวจสอบคุณภาพชั้นดินและลักษณะทางธรณีวิทยาของบริเวณ โครงการก่อสร้างหรือบริเวณที่เกิดปัญหา โครงสร้างชั้นดินจึงเป็นงานขั้นต้นที่จะต้องทำเพื่อให้ได้ข้อมูลมาใช้ในการออกแบบ วางแผนก่อสร้างหรือเพื่อแก้ไขปัญหา สำหรับปัญหาทางด้านวิศวกรรมธรณีที่พบบ่อย ได้แก่ ปัญหาดินอ่อน (soft soil) และแผ่นดินทรุด (land subsidence) กรณีปัญหาดินอ่อน คือ ดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำ (low shear strength) การอัดตัวสูงได้สูง (high compressibility), และมีการซึมผ่านต่ำ (low permeability) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ไม่เหมาะที่จะเป็นฐานรากในการก่อสร้างอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างใดๆ กรณีปัญหาแผ่นดินทรุดเป็นการเคลื่อนที่ลงของผิวดิน ซึ่งส่วนมากจะเกิดในพื้นที่ที่มีดินเหนียวอยู่ระหว่างดินชั้นบนกับดินชั้นล่าง หรือบริเวณที่มีหินปูน หิน โคลโลไมด์ หินอ่อน หินเกลือ และยิปซัมเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากหินเหล่านี้มีสมบัติที่ละลายน้ำเมื่อหินเกิดการละลายจะทำให้เกิดโพรงหรือช่องว่าง ซึ่งไม่สามารถจะรองรับน้ำหนักของมวลดินที่อยู่ด้านบนได้จึงเกิดการทรุดตัวตามมา นอกจากนี้ในบริเวณที่เป็นตัวเมืองใหญ่ที่มีสิ่งปลูกสร้างและระบบสาธารณูปโภคที่สลับซับซ้อนการเกิดแผ่นดินทรุดจะมาจากปัจจัยอื่นเพิ่มเข้ามา คือ 1) การขุดหรือย้ายหรือก่อสร้างระบบสาธารณูปโภคใต้ดินในบริเวณที่เกี่ยวข้องกับท่อระบายน้ำใต้ดิน 2) การทรุดตัวต่างกันของท่อระบายน้ำกับบ่อพัก 3) จุดที่มีการรั่วหรือแตกของท่อประปาเป็นประจำ และ 4) กำแพงกั้นดินที่อยู่ริมทางระบายน้ำหรือคลองอาจมีการรั่วไหลของดินทรายลงหลังกำแพงทำให้เกิดโพรงได้เช่นกัน

จากทั้งสองปัญหาที่ได้กล่าวมาเป็นปัญหาในงานด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิคเป็นอย่างมากเนื่องจากในการก่อสร้างอาคารขนาดใหญ่บนพื้นที่ที่โครงสร้างของฐานรากที่เป็นกรณีดินอ่อนหรือกรณีที่ชั้นดินมีโพรงอยู่ด้านล่างจะทำให้ตัวอาคารมีความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหาย

เช่น เกิดรอยแตกร้าวบนผนังหรือพื้นอาคาร เกิดการเอียง เกิดการทรุดตัวของพื้น หรือในชั้นรุนแรง อาจจะไปสู่การพังทลายของตัวอาคาร ดังนั้นก่อนที่วิศวกรจะทำการออกแบบฐานรากให้เหมาะสมกับโครงสร้างของตัวอาคารนั้น จะต้องทราบถึงข้อมูลเกี่ยวกับดินและลักษณะโครงสร้างของดินที่มากพอเพื่อให้การออกแบบสิ่งก่อสร้างหรือการแก้ไขปัญหาต่างๆ ให้ถูกต้องตามหลักทางวิศวกรรม

จากปัญหาดังกล่าวนำมาซึ่งความตระหนักถึงความสำคัญของการสำรวจทางธรณีฟิสิกส์ที่สามารถให้ข้อมูลคุณสมบัติของชั้นดินและลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาของชั้นดินในบริเวณพื้นที่จะมีการก่อสร้างโดยมีข้อดีคือ 1) สามารถให้ข้อมูลโครงสร้างของชั้นดินที่มีความต่อเนื่องและ 2) ประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย 3) เป็นการตรวจสอบชั้นดินแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing, NDT) ข้อมูลที่ได้จะเป็นแนวทางให้กับวิศวกรนำไปใช้ในการวางแผนแก้ปัญหาในทางวิศวกรรมต่อไปซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิคให้สามารถทำงานได้รวดเร็วและมีความแม่นยำมากขึ้น ในการวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการทางธรณีฟิสิกส์ 2 วิธี ได้แก่ วิธีการสำรวจเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน (Ground Penetrating Radar: GPR) และวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบการทำแผนที่ภาคตัดขวางค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าใน 2 มิติ (Electrical Resistivity Tomography: ERT) โดยวิธี ERT และ GPR ได้นำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาชั้นดินอ่อนบริเวณพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ เฟส 2 ตำบลฉลุง อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างและขอบเขตของชั้นดินอ่อน และวิธี GPR ได้นำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาดถนนทรุดตัว เพื่อหาลักษณะโครงสร้างของชั้นดินในบริเวณที่เกิดการทรุดตัวของถนนและวิเคราะห์หาสาเหตุถึงความเป็นไปได้ของการทรุดตัวในพื้นที่เทศบาลนครหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ประกอบด้วย 2 บริเวณ คือ (1) บริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห และ (2) บริเวณถนนชลธารา แนวริมคลองเตย (ตลาดโค้งโค้ง) โดยผลการวิจัยจากทั้งสองปัญหาข้างต้น น่าจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในทางวิศวกรรมเพื่อจะได้ใช้ข้อมูลเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาเป็นผลสำเร็จได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถที่จะเลือกใช้วิธีธรณีฟิสิกส์ข้างต้นในการแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิคอื่นๆได้ในอนาคต

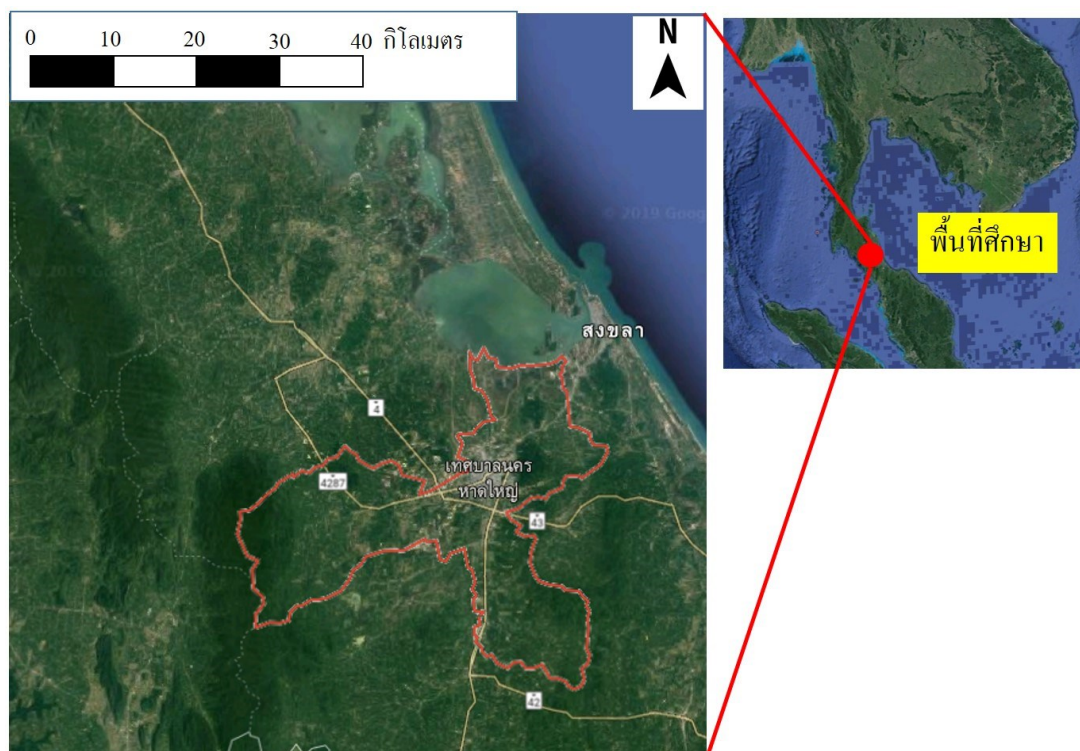
1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาภายใต้ผิวดินและหาขอบเขตของชั้นดินอ่อน ในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ ตำบลฉลุง อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา
2. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาภายใต้ผิวดินและวิเคราะห์สาเหตุของการทรุดตัวของถนน บริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห และบริเวณถนนชลธารา แนวริมคลองเตยตลาดโก้งโค้ง ในเขตเทศบาลนครหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

1.3 ขอบเขตและลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษา

อำเภอหาดใหญ่ เป็นอำเภอหนึ่งในจังหวัดสงขลา เป็นที่ตั้งของเทศบาลนครหาดใหญ่ ตั้งอยู่ทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ของตัวเมืองจังหวัดสงขลา ระยะทางห่างจากตัวเมืองสงขลา 30 กิโลเมตร อยู่ห่างจากกรุงเทพมหานครตามเส้นทางรถไฟประมาณ 974 กิโลเมตร และทางรถยนต์ประมาณ 993 กิโลเมตร มีอาณาเขตติดต่อกับเขตการปกครองข้างเคียง ดังต่อไปนี้ ทิศเหนือจรดทะเลสาบสงขลา และติดต่อกับอำเภอรัตภูมิ อำเภอบางกล่ำ อำเภอกวนเนียง และอำเภอเมืองสงขลา ทิศตะวันออก ติดต่อกับอำเภอเมืองสงขลา อำเภอนาหม่อม และอำเภอจะนะ ทิศใต้ ติดต่อกับอำเภอสะเดาและอำเภอกลองหยองโข่ง ทิศตะวันตก ติดต่อกับอำเภอกวนกาหลง จังหวัดสตูล และ อำเภอรัตภูมิ จังหวัดสงขลา (<https://th.wikipedia.org/wiki/อำเภอหาดใหญ่>)

ลักษณะภูมิประเทศของอำเภอหาดใหญ่โดยทั่วไปเป็นที่ราบลุ่มกว้างใหญ่ มีแนวภูเขาทางด้านทิศตะวันตก ทิศใต้และทิศตะวันออก โดยพื้นที่ลาดจากทิศใต้และทิศตะวันตกไปสู่ทะเลสาบสงขลา มีพื้นที่ติดกับทิวเขาบรรทัดทางทิศเหนือ และติดกับทิวเขาสันกาลาศีรีทางทิศตะวันตกและทิศใต้ ภูเขาที่สำคัญได้แก่ เขาคอหงส์ เขาแก้ว เขาวังพา และเขาน้ำน้อย (<https://sites.google.com>)



รูปที่ 1.1 ที่ตั้งของพื้นที่ศึกษา

บทที่ 2

ตรวจสอบเอกสาร

2.1 ลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา

อำเภอหาดใหญ่ตั้งอยู่บนแอ่งหาดใหญ่ซึ่งเป็นแอ่งสะสมตะกอนยุคเทอร์เชียรีตั้งอยู่ทางตอนล่างของกลุ่มน้ำทะเลสาบสงขลาโดยมีลักษณะโครงสร้างของแอ่งแบบกราเบน (Graben) (พัทธิ ศรีระชา, 2560) จากการแปลความค่าสนามโน้มถ่วงผิดปกติตกค้างของแอ่งหาดใหญ่ พบว่าแอ่งหาดใหญ่มีความลึกมากที่สุด 1 กิโลเมตร มีความยาว 60 กิโลเมตร และมีความกว้างประมาณ 20 กิโลเมตร (Lohawijam, 2005)

2.2 ลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาและพื้นที่ใกล้เคียง

พื้นที่จังหวัดสงขลาประกอบด้วยหินหลายชนิดทั้งหินตะกอนและหินอัคนีแทรกซอนทำให้มีลักษณะภูมิประเทศที่แตกต่างกันซึ่งเป็นผลจากกระบวนการทางธรณีวิทยาหลายกระบวนการผ่านระยะเวลาหลายร้อยล้านปี ลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาจะเป็นดินตะกอนร่วน ยุคควอเทอร์นารี (Quaternary) ตะกอนมีการแปรเปลี่ยนตามลักษณะธรณีสัณฐานประกอบด้วยตะกอนที่สะสมตัวโดยกระบวนการทางน้ำบนแผ่นดินกับตะกอนที่สะสมตัวโดยกระบวนการของน้ำทะเล ส่วนใหญ่จะเป็นตะกอนร่วนและตะกอนกึ่งแข็งตัวที่ผุพังจากหินต้นกำเนิดแล้วถูกพัดพาจากที่สูงหรือภูเขา ทำให้เกิดการสะสมตัวของตะกอนบนหินแข็งและพบกระจายตัวตามแนวลุ่มน้ำ แม่น้ำและที่ราบทั่วไป มีอายุประมาณ 1.8 ล้านปีถึงปัจจุบันแบ่งออกเป็น 9 หน่วยตะกอนดังนี้ (กรมทรัพยากรธรณี, 2550)

1) ตะกอนเศษหินเชิงเขาและตะกอนหินผุ (Colluvial and residual deposits) ตะกอนเหล่านี้เกิดจากหินผุสะสมตัวอยู่กับที่หรือเคลื่อนที่ไปเพียงเล็กน้อยลักษณะของตะกอนจะแตกต่างกันไปในแต่ละบริเวณขึ้นอยู่กับหินต้นกำเนิดที่จะให้ตะกอนเหล่านั้น ลักษณะทั่วไปประกอบด้วยประกอบด้วยเศษหินกรวดทราย ทรายแป้ง และดินเหนียว

2) ตะกอนตะพักน้ำ (Terrace deposits) ตะกอนเหล่านี้เกิดจากทางน้ำพัดพาตะกอนมาสะสมตัวเป็นตะพักยกระดับขึ้นมา ลักษณะทั่วไปประกอบด้วยทราย ทรายแป้ง ดินและกรวดเนื้อหยาบ

3) ตะกอนน้ำพา (Alluvial deposits) ตะกอนเหล่านี้เกิดจากทางน้ำพัดพาตะกอนมาสะสมตัวตามร่องน้ำคันดินแม่น้ำและแอ่งน้ำท่วมถึงในบริเวณที่ราบลุ่ม ลักษณะทั่วไปประกอบด้วยกรวดทราย ทรายแป้งและดินเหนียว

4) ตะกอนที่ราบน้ำท่วมถึง (Flood plain deposits) ตะกอนเหล่านี้เกิดจากการสะสมตัวของตะกอนริมฝั่งของแม่น้ำ ประกอบด้วย ดินเคลย์ปนทรายแป้งและทรายละเอียดสีเทาสีน้ำตาลแกมแดงและน้ำตาลแกมเหลืองเนื้อแน่นมาก ในบางบริเวณเป็นชั้นหนามีชั้นทรายปนกรวดแทรกเป็นเลนส์

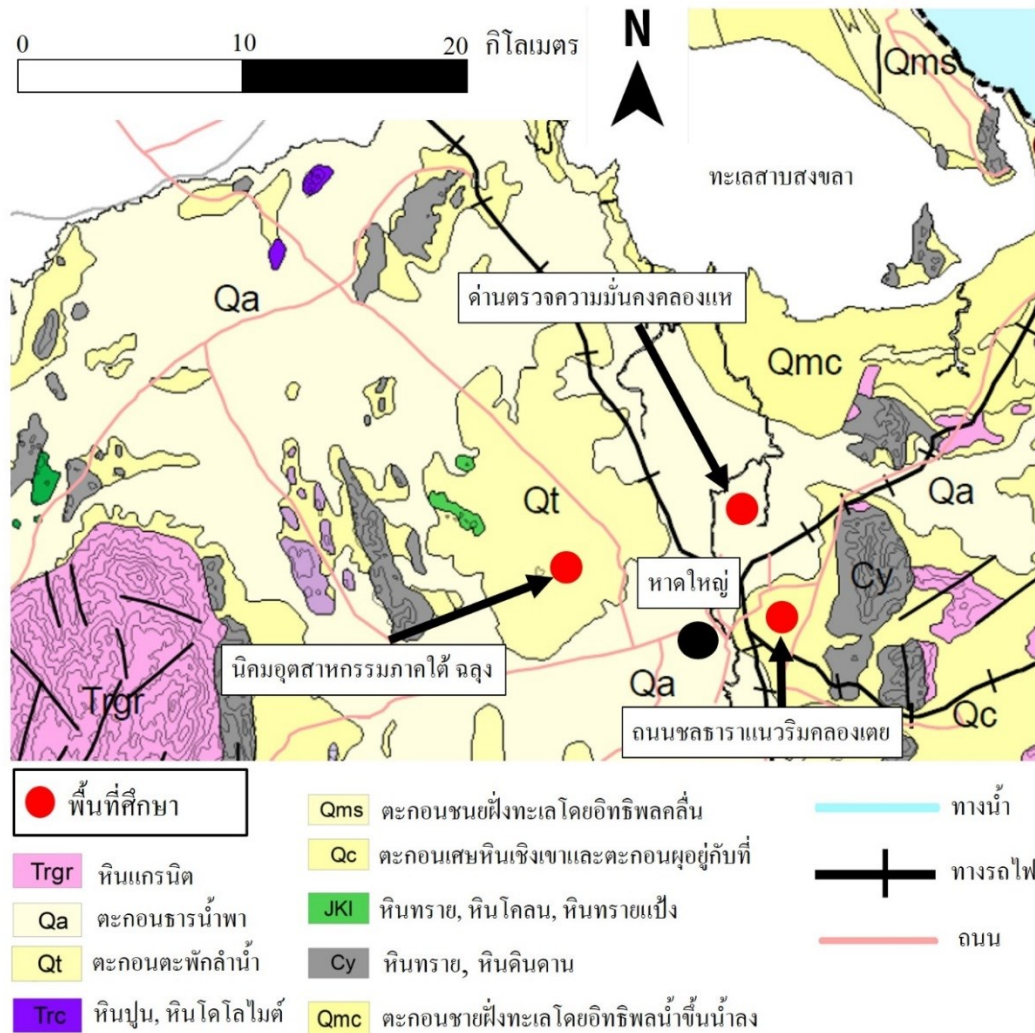
5) ตะกอนน้ำพาที่สะสมตัวในทางน้ำโค้งตัว (Meandering belt deposits) ตะกอนเหล่านี้เกิดจากการสะสมตัวด้วยอิทธิพลของทางน้ำประกอบด้วยทรายปนกรวดสีเทาเม็ดหยาบปานกลางถึงหยาบ การคัดขนาดปานกลางค่อนข้างกลมร่วนสอดแทรกกับทรายแป้งสีน้ำตาลและดินเคลย์ปนทรายแป้ง

6) ตะกอนทรายปัจจุบัน (Recent beach deposits) ตะกอนหน่วยนี้เกิดจากกระแสนคลื่นชายฝั่งพัดพาตะกอนมาสะสมตัวตามแนวชายหาดปัจจุบันส่วนใหญ่ประกอบด้วยทรายกรวดปนทรายร่วนเม็ดทรายขนาด 300-1,000 ไมครอน เม็ดกรวดขนาด 2-5 มิลลิเมตร

7) ตะกอนสันทรายเก่า (Old beach deposits) ตะกอนเหล่านี้เกิดจากการไหลบ่าเข้ามาของน้ำทะเลครั้งสุดท้ายในช่วงโฮโลซีนอยู่ห่างจากแนวชายฝั่งปัจจุบันประมาณ 3-4 กิโลเมตร และอยู่สูงกว่าชายหาดปัจจุบันส่วนใหญ่ประกอบด้วยทรายสีเทาแกมเขียวมะกอกเม็ดละเอียดมาก การคัดขนาดดีค่อนข้างกลมร่วนประกอบด้วยแร่ควอตซ์แร่ไมกาและเศษหอยปะปนเล็กน้อย

8) ตะกอนชายฝั่งทะเล โดยอิทธิพลของน้ำขึ้นน้ำลง (Tidal flat deposits) ตะกอนเหล่านี้เกิดจากการสะสมตัวด้วยอิทธิพลของกระแสน้ำขึ้นลงของน้ำทะเลในบริเวณที่น้ำทะเลขึ้นถึงได้รวมเอาตะกอนป่าชายเลน ตะกอนเลนใต้น้ำ ตะกอนทรายใต้น้ำ ตะกอนสันดอนทราย ทรายในร่องน้ำบริเวณที่ลุ่มราบน้ำขึ้นถึงและสันทรายนอกฝั่งเอาไว้ด้วยกันส่วนใหญ่ประกอบด้วยทราย ทรายแป้งทรายเลน ดินเคลย์ เศษไม้ รากไม้และสารอินทรีย์ต่างๆ

9) ตะกอนลากูน (Lagoon deposits) เป็นตะกอนที่อยู่บริเวณพื้นที่ลุ่มสะสมเป็นตะกอนทรายสลับดินเหนียวทะเลปัจจุบันลากูนเหล่านี้มักคั่นเงินเป็นที่ลุ่มมีวัชพืชปกคลุมหรือแปรสภาพไปเป็นพื้นที่เกษตรส่วนใหญ่ประกอบด้วยทรายปนฟิทและทรายปนดินเนื้อร่วน



รูปที่ 2.1 ลักษณะธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา (กรมทรัพยากรธรณี, 2550)

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ทำการประยุกต์วิธีธรณีฟิสิกส์มาใช้แก้ปัญหาในงานทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค ในบริเวณที่เกิดปัญหาทางวิศวกรรมฐานรากในอำเภอหาดใหญ่รวม 3 บริเวณด้วยกัน คือ 1) บริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห 2) บริเวณถนนชลธารา แนวริมคลองเคย

(ตลาดโก้งโค้ง) เทศบาลนครหาดใหญ่ ซึ่งทั้งสองบริเวณเป็นตำแหน่งที่เกิดการหลุดตัวของถนน และ 3) บริเวณนิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ (จตุรง) เฟส 2 ตำบลจตุรง อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปัญหาชั้นดินอ่อนโดยถูกพบในระหว่างที่มีการปรับพื้นที่เพื่อเตรียมฐานรากและระบบสาธารณูปโภค ในการรองรับการก่อสร้างอาคาร/โรงงานของนิคมอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.2 แสดงที่ตั้งของพื้นที่ศึกษาประกอบไปด้วย 1) นิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ (จตุรง) ตั้งอยู่ทางทิศตะวันตกของตัวอำเภอหาดใหญ่ (พิกัด 6.9925 N, 100.3720 E) 2) ด้านตรวจความมั่นคงคลองแห ตั้งอยู่ทิศเหนือของอำเภอหาดใหญ่ (พิกัด 7.0390 N, 100.4650 E) และ 3) ถนนชลธาราแนววิมคลองเตย (ตลาดโก้งโค้ง) ตั้งอยู่ทางทิศตะวันออกของตัวอำเภอหาดใหญ่ (พิกัด 7.0061N, 100.4758 E)

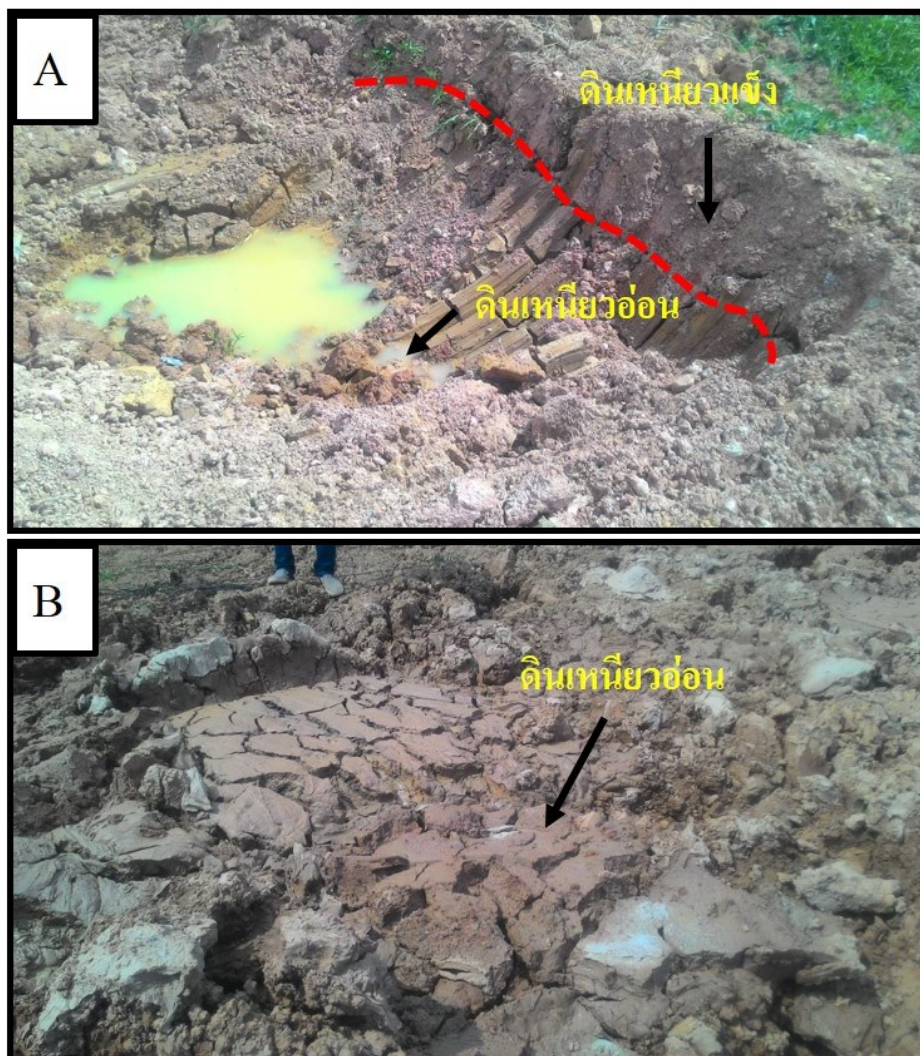
2.3 กรณีศึกษาที่ 1 การประยุกต์ใช้วิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ERT) ร่วมกับวิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน (GPR) กับกรณีปัญหาดินอ่อนในพื้นที่ก่อสร้างนิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ ตำบลฉลุง อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

พื้นที่ก่อสร้างนิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ (ฉลุง) เฟส 2 ตั้งอยู่ในพื้นที่ระยะที่ 2/2 และ 3 ของนิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ ตำบลฉลุง อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ขนาดพื้นที่ 1,218 ไร่ เป็นพื้นที่ที่กำลังถูกจัดเตรียมสำหรับโครงการนิคมอุตสาหกรรมยางพารา (Rubber City) เพื่อเพิ่มอุปสงค์การใช้ยางพาราในภาคอุตสาหกรรมชั้นกลางน้ำและปลายน้ำ โดยในระหว่างการปรับพื้นที่พบว่าบางบริเวณมีลักษณะของดินที่เป็นดินอ่อน และบางส่วนได้มีการนำดินลูกรังและกรวดมาถมในพื้นที่ที่เป็นหนองน้ำ (รูปที่ 2.3-2.7) ในบางบริเวณมีการเปลี่ยนชนิดของดินโดยการขุดดินที่เป็นดินอ่อนออกไปและนำดินอื่นที่มีคุณสมบัติเหมาะสมมาแทนที่เพื่อเตรียมทำถนน (รูปที่ 2.5B) เนื่องจากดินอ่อนที่พบเป็นดินชนิดมวลละเอียด (ดินเหนียว) ที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคแข็งแรงมาก นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติของค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อมีแรงมากระทำจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของดินเกิดขึ้น ดังนั้นในการก่อสร้างอาคารบนพื้นที่นี้อาจมีความเสี่ยงต่อการเกิดอาคารทรุดตัวเสียหายได้

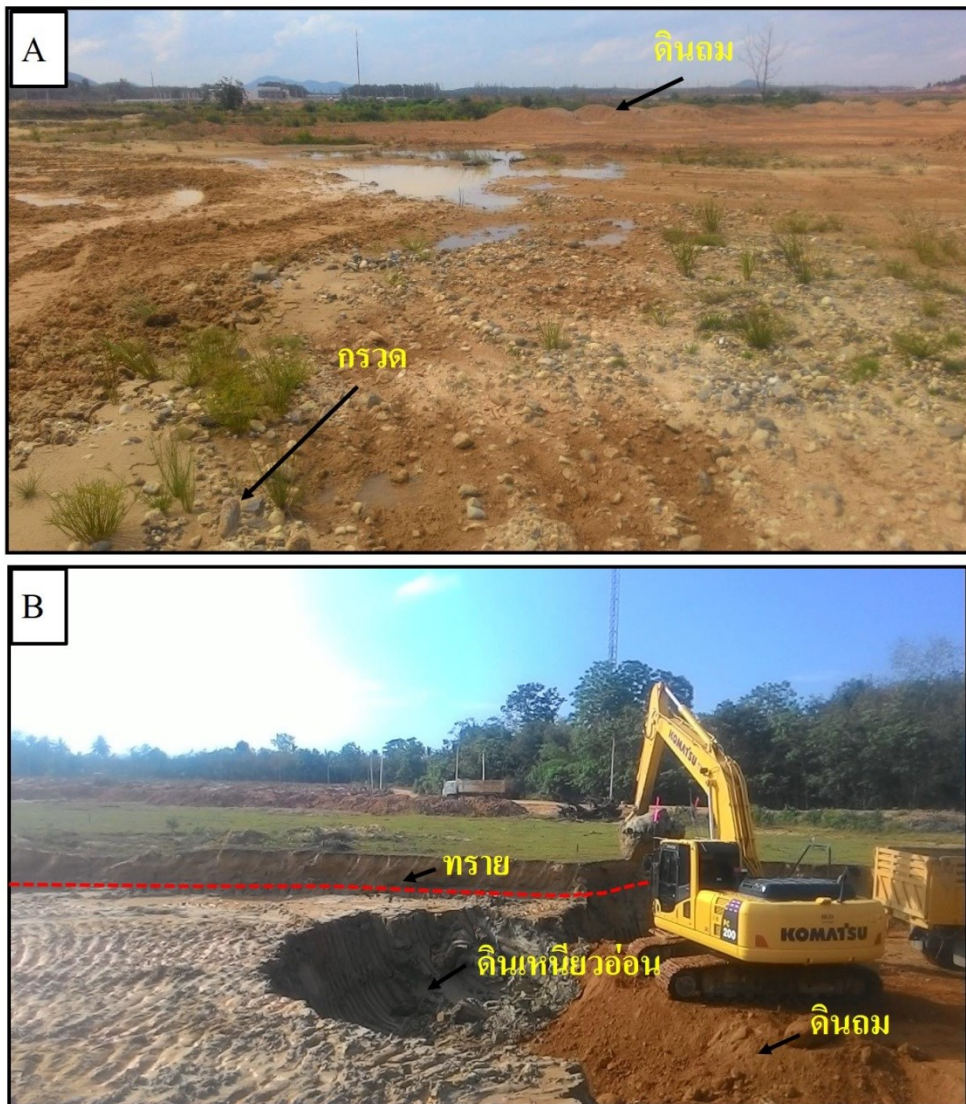
พื้นที่นิคมอุตสาหกรรมฉลุงเดิมเป็นพื้นที่ทำเหมืองแร่ดีบุก การเกิดแร่ในพื้นที่นี้เกิดจากแร่ที่ถูกพัดพามาจากเขาควนไฉน (ไพรัช สุทธากรณ์, 2534) ที่อยู่ทางทิศตะวันตกของพื้นที่ศึกษา หลังจากการเหมืองแร่ดีบุกนี้ได้ส่งผลให้เกิดหนองน้ำจำนวนมากซึ่งเป็นผลมาจากการทำเหมืองแร่ดีบุกแบบเรือขุดในอดีต โดยยังคงสามารถเห็นหนองน้ำที่หลงเหลือได้ (รูปที่ 2.3) สำหรับการทำเหมืองแบบเรือขุดนี้จะต้องทำการขุดเปิดหน้าดินเพื่อค้นหาแหล่งแร่ ที่สะสมตัวแบบลานแร่ ผลจากกระบวนการทำเหมืองแร่แบบนี้ส่งผลให้เกิดการจัดเรียงเม็ดตะกอนของดินใหม่จนเกิดเป็นแอ่งตะกอนดินเหนียวขึ้น (รูปที่ 2.4-2.7)



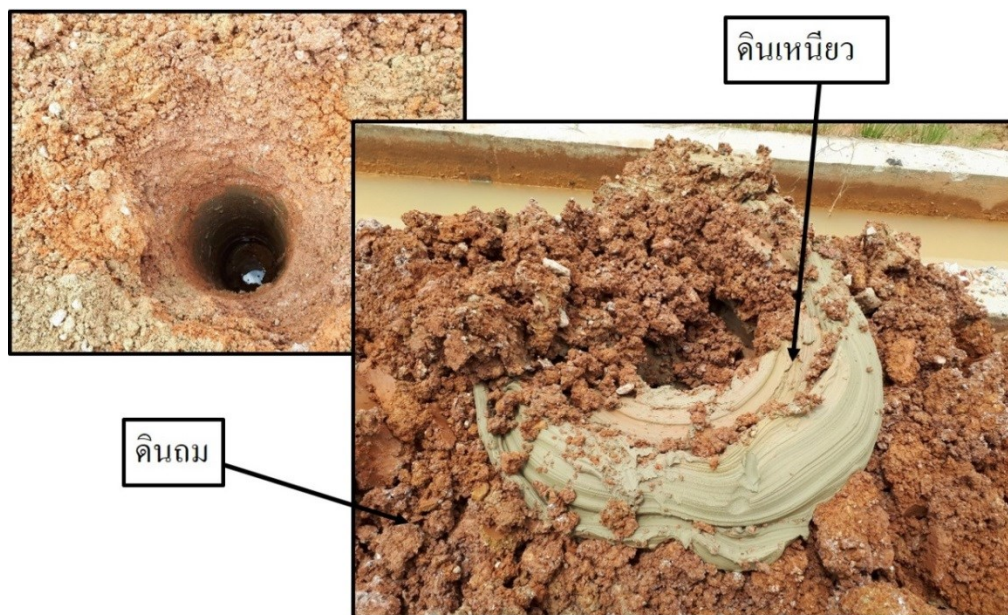
รูปที่ 2.3 รูปบนแสดงลักษณะพื้นที่ศึกษาของนิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ (จตุรง) เฟส 2 และรูปล่างแสดงหนองน้ำที่หลงเหลือจากการทำเหมืองแร่ดีบุกในอดีต



รูปที่ 2.4 A ลักษณะของดินเหนียวอ่อนอยู่ที่ความลึกประมาณ 0.5 เมตร และ B แสดงลักษณะของดินอ่อนที่ถูกขุดขึ้นมา (ถ่ายเมื่อ มีนาคม 2560)



รูปที่ 2.5 A ดินลูกรังที่ถูกนำมาถมในตอนกลางของพื้นที่ศึกษา และ B การเปลี่ยนชนิดดินโดยการนำดินที่ไม่ใช่ดินอ่อนมาแทนที่ดินเหนียวเพื่อเตรียมทำถนน (ถ่ายเมื่อ มีนาคม 2560)



รูปที่ 2.6 หลุมที่ถูกขุดเพื่อปักเสาไฟฟ้า โดยดินชั้นบนเป็นดินถมและดินชั้นล่างเป็นดินเหนียวอ่อน (ถ่ายเมื่อ มีนาคม 2561)



รูปที่ 2.7 รางน้ำคอนกรีตที่อยู่รอบๆพื้นที่ศึกษา (ถ่ายเมื่อ มีนาคม 2561)

2.3.1 ดินอ่อน

ดินอ่อน คือ ดินที่มีกำลังรับแรงเฉือนที่ต่ำ (low shear strength) มีการอัดตัวได้สูง (high compressibility) และมีการซึมผ่านต่ำ (low permeability) เมื่อเปรียบเทียบกับดินชนิดอื่นๆ การพัฒนาความรุนแรงของดินอ่อนขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งเป็นปัญหาในงานก่อสร้างด้านวิศวกรรมฐานราก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ก่อสร้างที่ตั้งอยู่บนแอ่งสะสมตะกอนที่เป็นดินอ่อนเนื่องจากดินเหล่านี้ไม่มีคุณสมบัติที่จะสามารถรองรับน้ำหนักของสิ่งปลูกสร้างได้ (Wanhasmida binti wanhassan, 2010) สำหรับดินอ่อนที่พบเจอได้บ่อย คือ ดินเหนียว ซึ่งจะพบมากในทางภาคกลางของประเทศไทย โดยเฉพาะลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาที่ปกคลุมปากอ่าวไทยแนวตะวันตกตะวันตกเริ่มตั้งแต่จังหวัดชลบุรีถึงราชบุรี แนวเหนือใต้เริ่มตั้งแต่จังหวัดอุษายถึงปากอ่าวไทยดินอยู่ในสภาพที่อ่อนมาก (มนตรี เดชาสกุลสม, 2546)

2.3.2 แร่ดิน (clay mineral)

แร่ดิน คือ เศษหิน แร่หรืออนุภาคของเศษหิน ดินทราย ที่มีขนาดน้อยกว่า 0.002 มิลลิเมตร มีลักษณะเป็นดินเนื้อละเอียด แร่ดินส่วนใหญ่ปนด้วยสารอินทรีย์และแร่ชนิดอื่น ๆ ที่มีขนาดเล็กกว่า 0.002 มิลลิเมตร ได้แก่ ควอตซ์ เฟลด์สปาร์ โคลโลไมต์ แคลไซต์ เป็นต้น (ธงชัย พึ่งรัมย์, 2558) ดินเหนียวจัดอยู่ในกลุ่มของแร่ดินชนิดหนึ่ง โดยดินเหนียวแต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไปตามชนิดของแร่ที่เป็นองค์ประกอบ ดังนั้นคุณสมบัติของดินเหนียวจึงต้องกำหนดขึ้นด้วยสภาพความเหลวของมวลดินซึ่งเราเรียกว่า พลาสติกซิตี (plasticity) (อักรเดช แซ่จิว, 2552)

2.3.3 ปัญหาของดินเหนียวในงานด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค

ในงานวิศวกรรมธรณีเทคนิคบางครั้งไม่สามารถหลีกเลี่ยงในการรองรับน้ำหนักของโครงสร้างอาคารและสิ่งก่อสร้างได้ เนื่องจากคุณสมบัติของดินเหนียวที่แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่จึงมักก่อให้เกิดปัญหาที่แตกต่างกันไป ปัญหาที่เกิดขึ้นในดินเหนียวซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับปัญหาทางด้านวิศวกรรมโดยเฉพาะปัญหาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและการทรุดตัว เนื่องจากการทรุดตัวเป็นปัญหาที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่จะต้องทำงานก่อสร้างบนพื้นที่ที่เป็นดินอ่อน

เช่น พื้นที่ถมดินเพื่อปรับระดับซึ่งเป็นการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกลงบนดิน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรหรือการทรุดตัวของชั้นดินเหนียว (มนตรี เดชาสกุลสม, 2546)

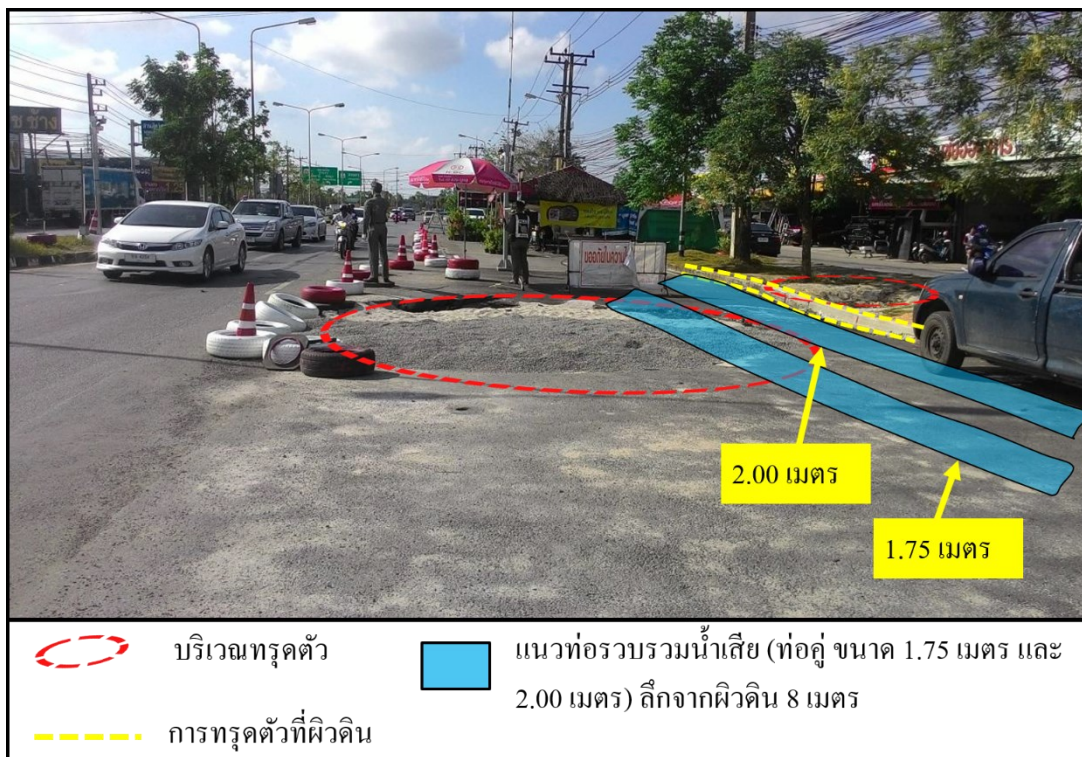
2.4 กรณีศึกษาที่ 2 การประยุกต์ใช้วิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน (GPR) กับปัญหาการทรุดตัวของถนนบริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห และบริเวณถนนชลธาราแนวริมคลองเตย (ตลาดโก้งโค้ง)

จากเหตุการณ์เกิดการทรุดตัวของผิวจราจร บริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห และบริเวณถนนชลธารา แนวริมคลองเตย (ตลาดโก้งโค้ง) เทศบาลนครหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ทั้งสองพื้นที่มีลักษณะการทรุดตัวที่คล้ายกัน คือ เกิดการทรุดตัวบริเวณที่มีท่อรวบรวมน้ำเสียอยู่ด้านล่างของถนน การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาภายใต้ผิวดินและหาสาเหตุของการทรุดตัวของถนน เพื่อจะได้หาแนวทางการแก้ไขและป้องกันปัญหาได้อย่างตรงจุดและรวดเร็ว

ท่อรวบรวมน้ำเสียอยู่ภายใต้การดูแลขององค์การจัดการน้ำเสีย โดยเป็นท่อคูมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.75 เมตร และ 2.0 เมตร วางในแนวขนานกับถนน อยู่ที่ความลึก 8 เมตร อยู่ที่บริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห และเป็นท่อเดี่ยวมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 เมตร วางตัวอยู่ที่ระดับความลึกจากผิวดิน 6 เมตร บริเวณถนนชลธารา แนวริมคลองเตย (ตลาดโก้งโค้ง) ท่อรวบรวมน้ำเสียที่วางอยู่ใต้ดินของทั้งสองพื้นที่นี้เป็นท่อที่ได้ติดตั้งเพื่อรวบรวมน้ำเสียในเขตเทศบาลนครหาดใหญ่เมื่อปี 2539 การรวบรวมน้ำเสียจะทำการสูบน้ำจากบ่อบักน้ำเสียเข้าสู่ท่อและไหลไปยังบ่อบำบัดน้ำเสียของเทศบาลนครหาดใหญ่ซึ่งตั้งอยู่ที่ตำบลน้ำน้อย ทางทิศเหนือของตัวเมืองหาดใหญ่ สาเหตุการทรุดตัวของผิวจราจรอาจเกิดจากดินบริเวณด้านล่างถูกชะล้างออกไปโดยน้ำใต้ดินซึ่งอาจจะเป็นน้ำที่ไหลในท่อรวบรวมน้ำเสีย (กรณีท่อรั่ว) หรือน้ำใต้ดินที่ไหลบริเวณรอบๆท่อ

2.4.1 พื้นที่ด้านตรวจความมั่นคงคลองแห

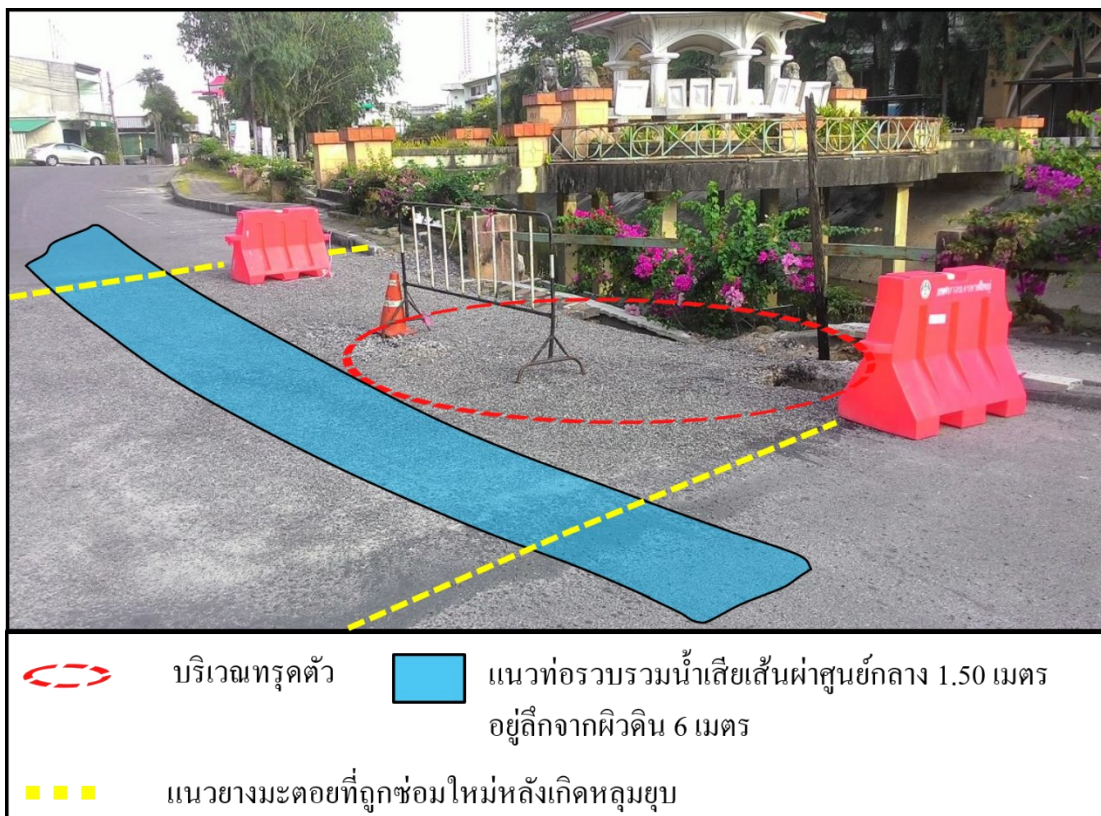
ด้านตรวจความมั่นคงคลองแห ตั้งอยู่ฝั่งทางทิศเหนือของอำเภอหาดใหญ่ ใกล้ๆกับห้างบิ๊กซีคลองแห เป็นบริเวณที่เกิดหลุมยุบขนาด 7×8 ตารางเมตร และยังพบการทรุดตัวของผิวดินขนาดไม่กว้างมากที่อยู่ใกล้กับบริเวณที่เกิดหลุมยุบ แสดงดังรูปที่ 2.8 จากรูปเป็นภาพถ่ายที่ได้หลังจากการนำทรายไปถมหลุมยุบไปแล้วหลายรอบโดยหลังจากการถมพบว่าทรายที่ถมไปนั้นมีการลดระดับลงอย่างเห็นได้ชัดซึ่งเป็นไปได้ว่าด้านล่างอาจมีการพัดพาทรายถมนี้ออกไปยังบริเวณอื่น



รูปที่ 2.8 หลุมขุดบริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห

2.4.2 บริเวณถนนชลธารา แนวริมคลองเตย (ตลาดโง้งโคง) เทศบาลนครหาดใหญ่

ถนนชลธารา แนวริมคลองเตย (ตลาดโง้งโคง) เป็นบริเวณที่เกิดหลุมขุดขนาด 7×9 ตารางเมตร แสดงดังรูปที่ 2.9 จากรูปเป็นภาพที่ถ่ายหลังจากการปรับปรุงผิวจราจรไปแล้วสองครั้ง แต่ยังสามารถสังเกตเห็นแนวการทรุดตัวของถนน นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างของถนนมีแนวโน้มที่จะเกิดการทรุดตัวเพิ่มขึ้นแม้ว่าจะผ่านการแก้ไขไปแล้วหลายรอบ



รูปที่ 2.9 หลุมยุบบริเวณถนนชลธารา แนวริมคลองเคย (ตลาด กุ้ง โค้ง)

2.4.3 การทรุดตัว (subsidence)

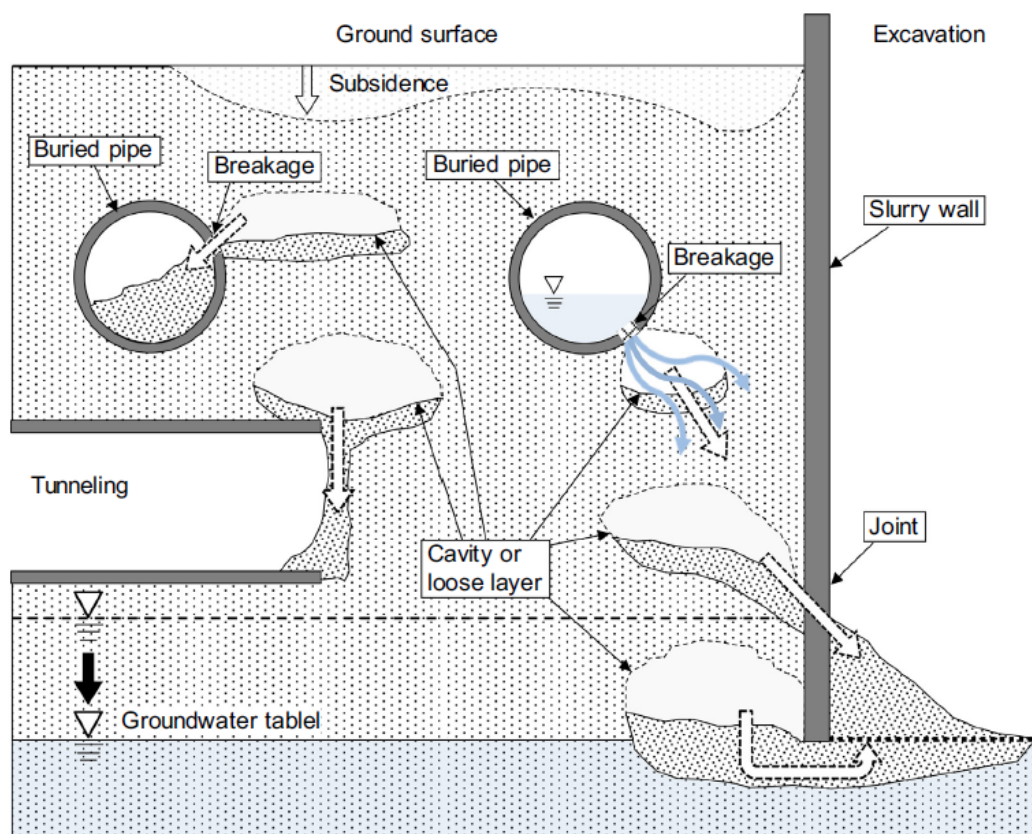
การทรุดตัว (subsidence) คือ การยุบตัวของแผ่นดินอันเกิดจากดินหรือหินที่รองรับอยู่ด้านล่างถูกพัดพาหรือละลายไปกับน้ำใต้ดิน เกิดขึ้นได้ทั้งแบบเร็วและแบบช้า โดยสาเหตุการทรุดตัวเกิดได้ทั้งจากธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ ซึ่งบางครั้งการทรุดตัวอาจครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้างและทำให้เกิดภัยพิบัติสร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินได้

2.4.4 หลุมยุบ (sink hole)

หลุมยุบ (sink hole) เป็นการทรุดตัวเนื่องจากการถล่มของโพรงใต้ดินอย่างทันทีทันใด ซึ่งโพรงเกิดขึ้นได้ทั้งจากธรรมชาติ เช่น การกัดเซาะหินปูนของน้ำใต้ดินจนกลายเป็นโพรงหรือถ้ำใต้ดินหรือเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การทำเหมืองใต้ดิน เหมืองเกลือ การสูบน้ำหรือน้ำมันจากใต้ดินขึ้นมา โดยปกติหลุมยุบที่เกิดจากน้ำใต้ดินกัดเซาะหินปูนจะไม่ยุบเมื่อมีระดับ

น้ำใต้ดินสูง แต่เมื่อน้ำใต้ดินลดต่ำลงไม่มีน้ำพุงโครงสร้างของโพรงใต้ดินอาจเกิดการถล่มได้ หรือหากมีการกระตุ้น เช่น แผ่นดินไหวก็สามารถทำให้โพรงใต้ดินถล่มได้ง่ายขึ้น

การเกิดแผ่นดินทรุดตัวในพื้นที่ชุมชนเมืองสำหรับหลายๆเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจากสาเหตุที่แตกต่างกันไปตามลักษณะของกระบวนการเกิด (รูปที่ 2.10) จากรูปท่อน้ำที่ถูกฝังใต้ผิวดิน เช่น ท่อน้ำประปา ท่อระบายน้ำเสีย เมื่อท่อมีความเสียหายจะทำให้ดินไหลลงไปในท่อ มวลดินภายนอกท่อจะถูกกัดเซาะหายไปเรื่อยๆจนเกิดเป็นโพรงขึ้น นอกจากนี้การขุดดินใกล้กับผนังกำแพงจะทำให้น้ำบาดาลไหลผ่านลอดได้กำแพงหรือตามรอยแตกของแนวกำแพงได้ การไหลของน้ำจะนำพามวลดินที่อยู่หลังกำแพงเนื่องจากมีความแตกต่างกันของน้ำบาดาลระหว่างด้านในและด้านนอกของกำแพง สิ่งสำคัญคืออาการเกิดในช่วงแรกๆจนกระทั่งมีการพัฒนาเกิดเป็นการทรุดตัวของดินนั้นไม่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า (Won-Taek Hong, 2018)



รูปที่ 2.10 แบบจำลองสาเหตุการเกิดแผ่นดินทรุดตัวและโพรงในพื้นที่ชุมชนเมือง (Won-Taek Hong, 2018)

ธรรมมา เจียรธรวาณิช, 2020 ได้กล่าวถึงสาเหตุหลักของปัญหาถนนทรุดในกรุงเทพฯ เอาไว้ โดยแยกออกเป็น 3 สาเหตุหลักๆ คือ 1) ดินทรุดตัวตามธรรมชาติ 2) ความบกพร่องในการก่อสร้างและการปรับปรุงสาธารณูปโภค 3) อายุการใช้งานของถนนและระบบสาธารณูปโภคต่างๆ ที่ทำให้ความแข็งแรงลดน้อยลงตามอายุการใช้งานและการเสื่อมสภาพของวัสดุ

Waltham & Fookes, 2017 ได้ทำการศึกษาถึงปัญหาของหลุมยุบที่เกิดจากกระบวนการละลายของหินปูนและยิปซัมที่เกิดจากน้ำเป็นตัวทำละลายตามธรรมชาติกระบวนการนี้จะส่งผลให้เกิดภูมิประเทศแบบคาสต์ซึ่งเป็นปัญหาที่คุกคามในงานงานวิศวกรรมฐานรากเป็นอย่างมากโดยได้ทำการจัดกลุ่มของหลุมยุบออกเป็น 6 แบบด้วยกัน แสดงดังรูปที่ 2.11

1. Solution sinkhole เป็นหลุมยุบที่มีชั้นดินบางปกคลุมพื้นที่ ทำให้ฝนกรดละลายเข้าไปในเนื้อหินได้โดยตรง โดยละลายเข้าไปตามแนวชั้นหิน แนวแตก แนวรอยเลื่อน

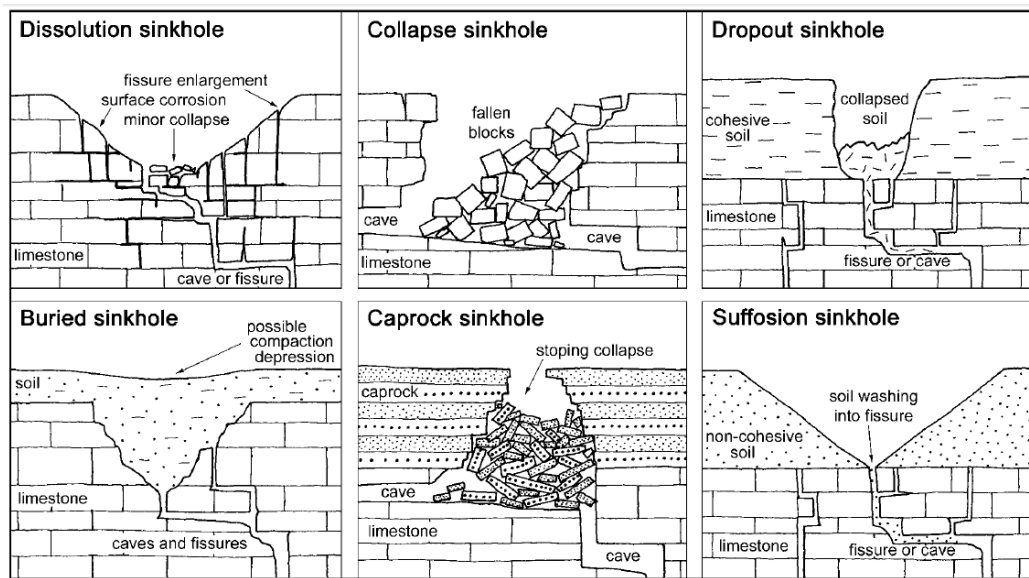
2. Collapse sinkhole เป็นหลุมยุบฉับพลัน หลุมยุบชนิดนี้เกิดขึ้นโดยฉับพลันทำให้เป็นอันตรายได้ หลุมที่เกิดขึ้นมักจะชันและลึกเนื่องมาจากสภาพธรณีวิทยาเป็นหินที่ละลายน้ำได้ และมีชั้นดินเป็นดินเหนียวที่มีความหนามากอยู่ด้านบน

3. Dropout sinkholes เป็นหลุมยุบที่เกิดจากดินชั้นบนเป็นดินแบบเกาะตัวกันแน่น (cohesive soil) เมื่อน้ำฝนซึมผ่านได้ชะล้างดินด้านบนลงไปตามรอยแตกหรือโพรงในหินปูน การสูญเสียโครงสร้างที่ผิวดินจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อการพังทลายเกิดขึ้นในรอยแตกหรือโพรง

4. Buried sinkhole เป็นบริเวณที่ในอดีตเคยเกิดหลุมยุบแบบต่าง ๆ แล้วในภายหลังมีตะกอนมาปิดทับ

5. Caprock sinkhole หลุมยุบที่มีลักษณะคล้ายกับหลุมยุบฉับพลัน (Collapse sinkhole) แต่จะแตกต่างกันที่ caprock sinkhole จะเกิดภายใต้ชั้นดินที่มีการกักเซาะของฐานรากใต้ดินและเกิดการทรุดตัวของชั้นหินปิดกั้น ซึ่งเป็นดินไม่ละลายที่ปิดทับอยู่ด้านบน มักจะเกิดขึ้นในลักษณะภูมิประเทศที่เป็นแบบ palaeokarst or interstratal karst ร่วมกับโพรงขนาดใหญ่ในหินปูน

6. Suffosion sinkholes หลุมยุบที่เกิดขึ้นเนื่องจากดินชั้นมีเป็นดินแบบเกาะตัวไม่แน่น (non-cohesive soil) วางตัวอยู่บนชั้นหินปูนเมื่อน้ำฝนซึมผ่านได้ชะล้างดินด้านบนลงไปตามรอยแตกหรือโพรงจนทำให้เกิดการทรุดตัวของดินที่อยู่ด้านบน



รูปที่ 2.11 ลักษณะการเกิดของหลุมยุบในรูปแบบต่างๆ (Waltham & Fookes, 2011)

2.5 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวิธีธรณีฟิสิกส์ที่ใช้ในงานวิจัย

การสำรวจด้วยวิธีทางธรณีฟิสิกส์

ธรณีฟิสิกส์เป็นการประยุกต์หลักการทางฟิสิกส์เพื่อศึกษาสิ่งที่อยู่ภายในผิวโลก เป็นการสำรวจเพื่อหาโครงสร้างภายในโลก โดยอาศัยการวัดค่าต่างๆทางฟิสิกส์ ตัวอย่างเช่น ดินเหนียวกับหินแกรนิตจะมีความแตกต่างของคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ทั้งความหนาแน่น ความเร็ว ความยืดหยุ่น ความนำไฟฟ้า ค่าสภาพซึมซาบทางแม่เหล็ก และค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Neil Anderson, 2008) สำหรับการวิเคราะห์ผลที่วัดได้ แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพภายในโลกที่เกิดขึ้นทั้งในแนวราบและในแนวตั้ง วิธีการทางธรณีฟิสิกส์อาจประยุกต์ได้อย่างกว้างขวางตั้งแต่การศึกษาโครงสร้างของโลกไปจนถึงการสำรวจเป็นพื้นที่เฉพาะบริเวณเปลือกโลกส่วนบน การกำหนดตำแหน่งของวัตถุที่อยู่ใต้ผิวดินที่มีสมบัติทางกายภาพต่างไปจากบริเวณใกล้เคียงและอธิบายถึงสภาพทางธรณีวิทยาใต้ผิวดินในบริเวณนั้น ในปัจจุบันวิธีการทางธรณีฟิสิกส์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในงานสาขาต่างๆทั้งงานด้านสิ่งแวดล้อมและภัยพิบัติทางธรณีวิทยา (X.M.Pellicer et al., 2014, Sebastian Kowalczyk et al., 2015, Benjamin Koster et al., 2015, Xavier Comas et al., 2005, O.V. Lunina Xavier Comas et al., 2016) ด้าน โบราณคดี (Wenke Zhaoa et al.,

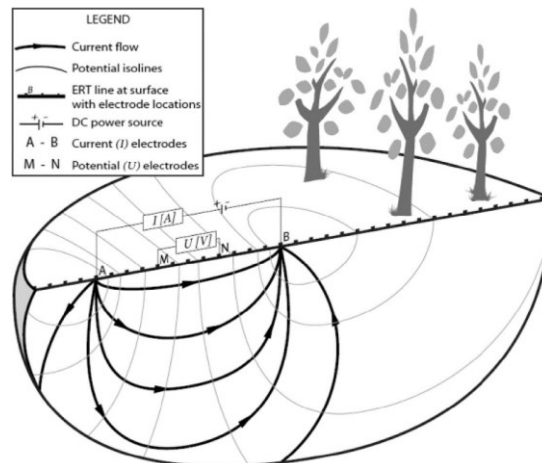
2018, Christine Joan Milton et al., 2018, Dimitrios Angelis et al., 2018, Selene L. Kenadya, et al., 2018, Imposa S. et al., 2018, Ahmed Gaber et al., 2017)

ธรณีฟิสิกส์สำหรับงานทางด้านวิศวกรรม

ธรณีฟิสิกส์สำหรับงานทางด้านวิศวกรรม คือ การประยุกต์วิธีการทางธรณีฟิสิกส์ มาใช้ในการแก้ปัญหาในงานวิศวกรรมฐานราก โดยทั่วไปความลึกที่ใช้ในการสำรวจน้อยกว่า 1000 ฟุต แต่สามารถลึกมากกว่านี้ได้ในบางกรณี การสำรวจทางธรณีฟิสิกส์อาจทำการสำรวจบนพื้นผิวดิน ในบ่อเจาะ และรวมถึงการสำรวจบนผิวน้ำและอากาศ (Neil Anderson, 2008) เทคนิคทางธรณีฟิสิกส์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างมากในงานสำรวจถนน เช่น การสำรวจงานที่เกิดปัญหาหลุมยุบ (Francisco Garcia-Garcia et al., 2017, Domingo Carbonel et al., 2015, Ó. Pueyo Anchuela et al., 2015, Ó. Pueyo-Anchuela et al., 2011, D. Gómez-Ortiz et al., 2012) งานสำรวจฐานรากบริเวณโครงการก่อสร้างต่างๆ เช่น เขื่อน ถนน เป็นต้น (Selene L. Kenady et al., 2015, Sebastian Kowalczyk et al., 2017, Silvia J. Ocaña-Levario et al., 2018)

2.5.1 การสำรวจด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Electrical Resistivity Tomography, ERT)

การสำรวจโดยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า เป็นการสำรวจสภาพธรณีวิทยาใต้ผิวดิน โดยอาศัยคุณสมบัติของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของชั้นดิน-หิน (เพียงดา สาดรักษ์, 2550) ในการวัดจะส่งกระแสไฟฟ้าที่รู้ค่าแน่นอนลงไปชั้นดินแล้ววัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 2.12 จากนั้นนำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ในการสำรวจสามารถออกแบบการเก็บข้อมูลได้ทั้ง 1 มิติ 2 มิติ และ 3 มิติ หลายปัญหาที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างใต้ชั้นดินสามารถใช้การสำรวจแบบสองมิติเข้าไปใช้แก้ปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากเป็นวิธีการสำรวจแบบไม่ทำลายชั้นดิน (Non-Destructive Testing, NDT) และมีความเหมาะสมกับงานที่ต้องการหาขอบเขตของชั้นดิน (Javier Rey, 2017)



รูปที่ 2.12 ลักษณะการไหลของกระแสไฟฟ้าและเส้นสมศักย์ (Alamrya, 2017)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน หิน และน้ำ

สมบัติทางกายภาพทั้งหลายของชั้นดิน หินและน้ำ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีความแปรผันมาก หินส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของความพรุนและสารละลายอิเล็กโทรไลต์อยู่ตามช่องว่าง ซึ่งมีผลต่อค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (พิชญ วงศ์พรชัย, 2548) ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินสามารถคำนวณได้จากกฎของอาร์ชี (Archie's law) ดังสมการที่ 2.1 สำหรับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดิน-หินที่พบทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.13

$$\rho = a\phi^{-m}S_w^{-n}\rho_w \quad 2.1$$

ρ_w คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของน้ำ (ohm-m)

S_w คือ ค่าความอิ่มตัวของน้ำในช่องว่างของเนื้อหิน

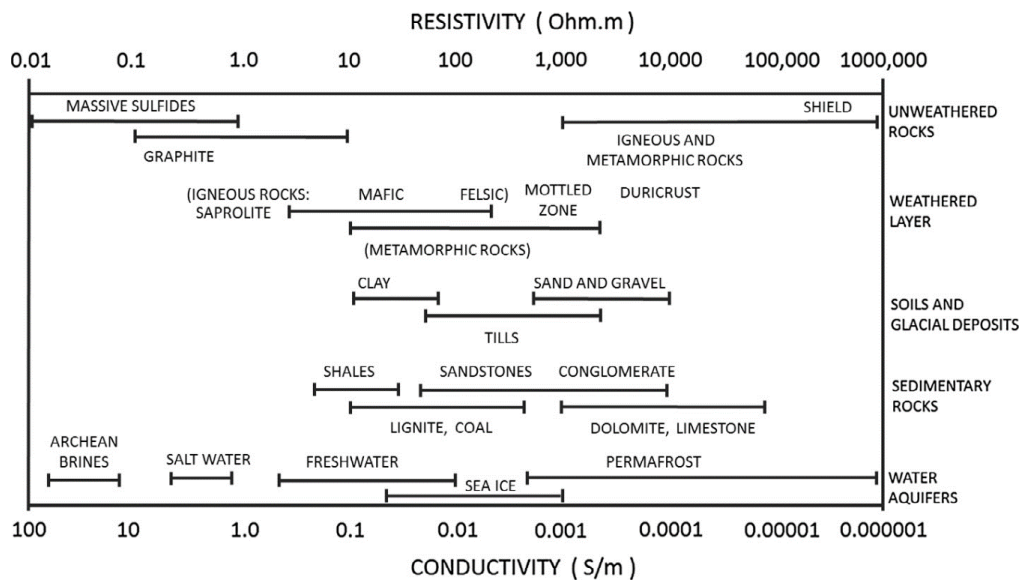
a คือ สัมประสิทธิ์ของการอิ่มตัว มีค่า 0.6-1.0

ϕ คือ ค่าความพรุน

m คือ ค่าคงตัวของการเชื่อมประสานในเนื้อหิน กรณีหินเนื้อแน่น m มีค่าประมาณ 1.40-2.20

n คือ ค่าคงตัว ≈ 2

ρ คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ารวมของหินทั้งก้อน (ohm-m)



รูปที่ 2.13 คุณสมบัติของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของแร่ หิน และน้ำ (Gunn, 2015)

กฎของโอห์ม (Ohm's Law)

กฎของโอห์มเป็นการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ไฟฟ้า เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า (I) ผ่านตัวนำทรงกระบอก กระแสไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับความต่างศักย์ (ΔV) แสดงดังรูปที่ 2.14

$$I \propto \Delta V$$

จะได้ว่า

$$I = \frac{1}{R} \cdot \Delta V \tag{2.2}$$

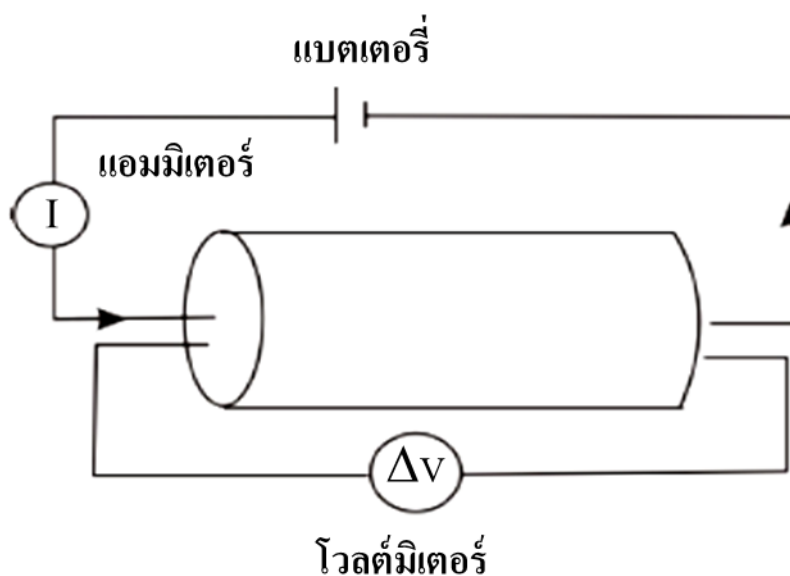
เมื่อ R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้า

เนื่องจากค่าความต้านทานไฟฟ้าแปรผันตรงกับความยาว (L) และแปรผกผันกับพื้นที่หน้าตัด (A)

$$R \propto \frac{L}{A}$$

จะได้ว่า

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad 2.3$$



รูปที่ 2.14 อธิบายการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad 2.4$$

ρ คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ohm-m)

R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้า (ohm)

A คือ พื้นที่ภาคตัดขวาง (m^2)

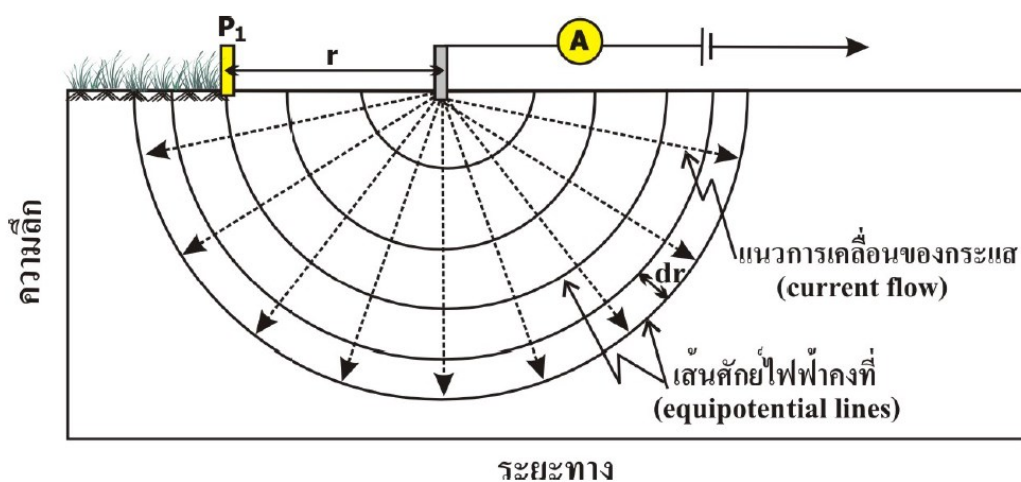
L คือ ความยาว (m)

ศักย์ไฟฟ้ากรณีมีจุดกำเนิดกระแสไฟฟ้าที่ผิวดิน

การสำรวจด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเป็นการส่งกระแสไฟฟ้าที่รู้ค่าแน่นอนลงไปในพื้นที่ดินแล้ววัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณผิวดิน กรณีที่ขั้วกระแสไฟฟ้าปักบนผิวดินที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและขั้วกระแสไฟฟ้าลบบี้อยู่ที่ระยะไกลมากๆ หรือระยะอนันต์ กระแสจะไหลออกจากขั้วไปทุกทิศทางและมีลักษณะเป็นครึ่งวงกลมรัศมี r แสดงดังรูปที่ 2.15

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ตำแหน่งที่ห่างจากขั้วกระแสไฟฟ้าบวกเป็นระยะ r ใดๆ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.5

$$J_r = \frac{I}{2\pi r^2} \quad 2.5$$



รูปที่ 2.15 ศักย์ไฟฟ้ากรณีมีจุดกำเนิดกระแสไฟฟ้าที่ผิวดิน (เพียงตา สาตวรรษ, 2550)

เนื่องจาก

$$E_r = \rho J_r = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \quad 2.6$$

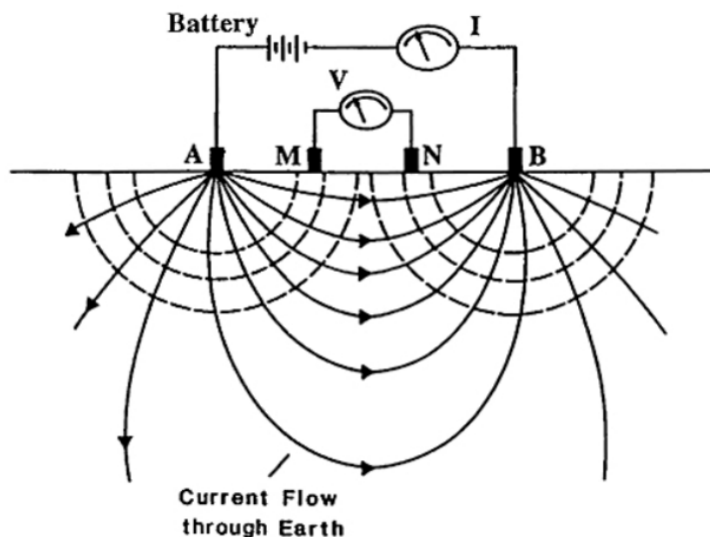
จะได้ศักย์ไฟฟ้า

$$V_r = \int_{\infty}^r E_r dr = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad 2.7$$

ศักย์ไฟฟ้ากรณีมีจุดกำเนิดกระแสไฟฟ้าไหลที่ผิวดิน 2 จุด

การสำรวจด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะทำการวัดโดยใช้ขั้วไฟฟ้า (electrode) 4 ขั้ว โดยจะทำการส่งกระแสไฟฟ้าลงไปยังผิวดินผ่านขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ ขั้ว A และ

ขั้ว B และวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผิวดินผ่านขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว คือ ขั้ว M และขั้ว N แสดงดังรูป 2.16



รูปที่ 2.16 การวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณผิวดิน (<https://www.nature.com> สืบค้นเมื่อวันที่ 18 มีนาคม 2562)

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (ΔV) ระหว่างขั้ว M และ N เป็นดังสมการ

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad 2.8$$

จากสมการสามารถจัดให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ ดังสมการ

$$\rho_a = \left(\frac{\Delta V}{I} \right) k \quad 2.9$$

เมื่อ ρ_a คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏ (Ohm.m)

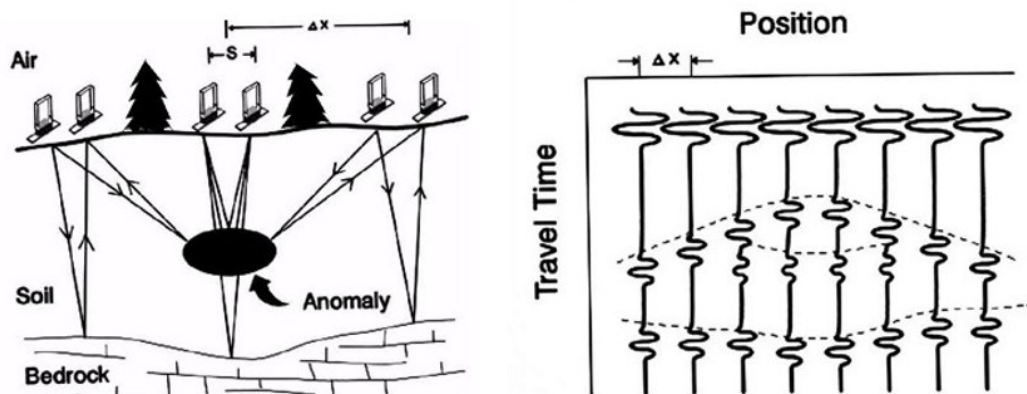
$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)} \quad 2.10$$

เมื่อ k คือ ค่า Geometrical factor ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบการจัดวางขั้วทางไฟฟ้า

2.5.2 วิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน

การสำรวจด้วยวิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน (Ground penetrating radar, GPR)

การสำรวจธรณีวิทยาใต้ผิวดินด้วยวิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน เป็นวิธีที่ใช้สำรวจสิ่งที่อยู่ใต้ผิวดินในระดับตื้น เป็นการวัดเวลาของพัลส์สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนไปและกลับมาจากใต้ผิวดิน (Two way travel time) แสดงดังรูปที่ 2.17 โดยความถี่ที่ใช้สำรวจจะอยู่ในช่วง 1 MHz - 3 GHz สำหรับชั้นดินที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูงๆจะส่งผลทำให้ความลึกที่ได้จากการสำรวจลดต่ำลง (Maurizio Ercoli, 2013) การสะท้อนของสัญญาณนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากมีความแตกต่างของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นดินหรือชั้นหินที่อยู่ด้านล่าง คุณสมบัติทางไฟฟ้าดังกล่าวได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและความนำไฟฟ้า



รูปที่ 2.17 การสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและภาพเรดาร์แกรมที่ได้จากการสำรวจ GPR (Annan, 2003)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic disturbance) โดยการทำให้สนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวางประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีการสั่นในแนวตั้งฉากกัน และอยู่บนระนาบตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น สามารถอธิบายได้โดยสมการแมกซ์เวลล์ (Harry, 2009)

$$\nabla^2 E + \mu\sigma i\omega E + \mu\epsilon\omega^2 E = 0 \quad 2.11$$

μ คือ สภาพขนำซึมได้ทางแม่เหล็ก (Magnetic Permeability)

ϵ คือ สภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity)

ω คือ ความถี่เชิงมุม (โดยที่ $\omega = 2\pi f$)

f คือ ความถี่ (Hz)

σ คือ ความนำไฟฟ้า (S/m)

E คือ เวกเตอร์สนามไฟฟ้า (V/m)

สมการแมกซ์เวลล์สามารถอธิบายธรรมชาติของสนามไฟฟ้า (Electric field) และสนามแม่เหล็ก (Magnetic field) เมื่อสนามมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งมีความสัมพันธ์กับการลดลงของแอมพลิจูด ผลเฉลยของสมการที่ 2.11 ในกรณีของคลื่นที่เป็นระนาบและสนามไฟฟ้าของคลื่นที่เคลื่อนที่ในทิศทางแกน z คือ

$$E = E_0 e^{i(kz - \omega t)} \quad 2.12$$

เมื่อ E_0 คือ แอมพลิจูดสูงสุด

k คือ เลขคลื่น

ในตัวกลางที่เป็นตัวนำไฟฟ้า เลขคลื่นจะสามารถจำแนกได้เป็นสองส่วน คือ ส่วนจริงและส่วนจินตภาพ สำหรับส่วนจริงจะเกี่ยวข้องกับ Phase factor (β , rad/m) และส่วนจินตภาพจะเกี่ยวข้องกับการลดทอนของคลื่น Attenuation (α , Np/m) แสดงดังสมการ

$$k = \beta + i\alpha = \sqrt{\omega^2 \epsilon \mu + i\omega \mu \sigma} \quad 2.13$$

โดยที่

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2}} \sqrt{\sqrt{\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2}\right)} + 1} \quad 2.14$$

และ

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2}} \sqrt{\sqrt{\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2}\right)} - 1} \quad 2.15$$

ความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (phase velocity, V) ในตัวกลางใดๆ

$$V = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\left\{ \frac{\epsilon_r \mu_r}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2}} + 1 \right] \right\}^{1/2}} \quad 2.16$$

μ_r คือ สภาพซึมซาบทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ของตัวกลาง

- μ_0 คือ สภาพซึมซาบทางแม่เหล็กของสุญญากาศ ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m)
 ϵ_r คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ของตัวกลาง
 ϵ_0 คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m)
 C คือ ความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ (3×10^8 m/s)

ในกรณีที่คลื่นมีความถี่สูงมากๆที่ทำให้ $\frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2} \ll 1$ ความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคำนวณได้จาก

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad 2.17$$

และเมื่อ $\mu_r = 1+k$ เนื่องจากค่าสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก (k) $\ll 1$ สำหรับหินทั่วไป ดังนั้น $\mu_r \approx 1$ สำหรับตัวกลางที่เป็นส่วนประกอบของโลก ความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถประมาณได้ดังสมการ 2.18

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad 2.18$$

ความลึกผิว (Skin depth, δ)

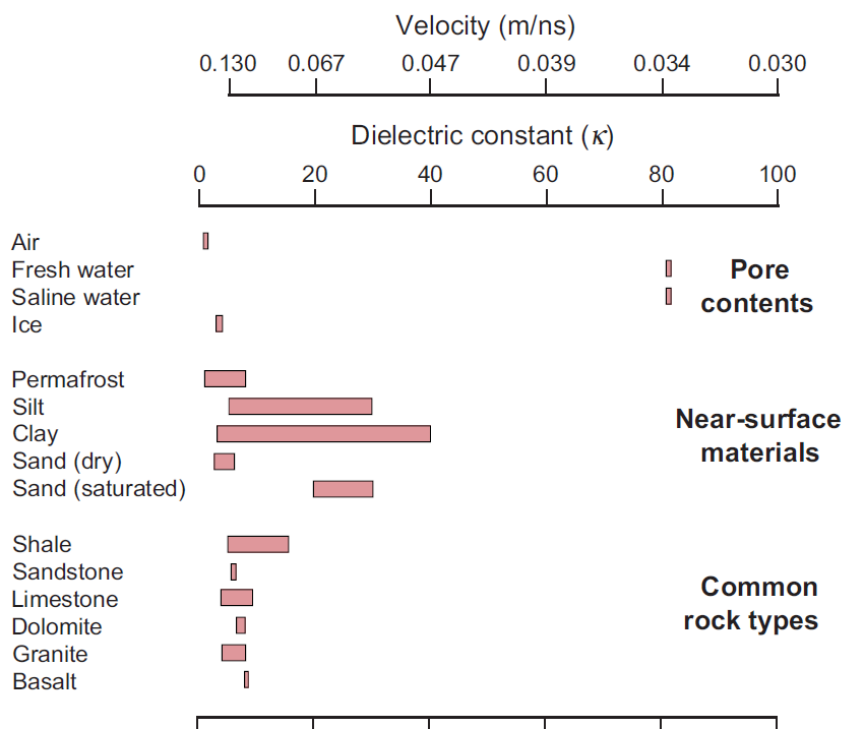
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เคลื่อนที่เข้าไปในชั้นดินจะมีลักษณะที่สำคัญคือสนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำให้เกิดการลดทอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและแอมพลิจูดของคลื่นมีการลดลงอย่างรวดเร็ว โดยความลึกของคลื่นที่แอมพลิจูดลดลงเป็น $1/e$ เท่าของแอมพลิจูดเริ่มต้น (ประมาณ 0.37) เรียกว่า ความลึกผิว ซึ่งจะขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญ คือ ค่าความนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dentith, 2014) โดยค่าความลึกผิว (δ) ในกรณีที่ความถี่สูงที่ทำให้ $\frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2} \ll 1$ คำนวณได้สมการ

$$\delta = \frac{2}{\sigma} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \quad 2.19$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) เป็นตัวกำหนดความสามารถของวัสดุในการสะสมประจุเมื่อถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้า มีค่าคงที่สำหรับสนามไฟฟ้าทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็นอิสระเมื่อความถี่ต่ำกว่า 100 Hz (พิกนุ วงศ์พรชัย, 2548) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกขึ้นกับหลายปัจจัยด้วยกันทั้ง ความพรุน สภาพการอิ่มตัวของน้ำ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำ และค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของแก๊ส แสดงดังสมการ 2.20 สำหรับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของดิน หินชนิดต่างๆแสดงดังรูปที่ 2.18

$$\epsilon_{\text{mix}} = \left[(\phi S_w \sqrt{\epsilon_w}) + (1 - \phi) \sqrt{\epsilon_w} + (\phi (1 - S_w) \sqrt{\epsilon_g}) \right]^2 \quad 2.20$$

- ϕ คือ ความพรุน
- S_w คือ สภาพการอิ่มตัวของน้ำ
- ϵ_{mix} คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของหินทั้งก้อน
- ϵ_w คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของน้ำ
- ϵ_g คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของแก๊ส

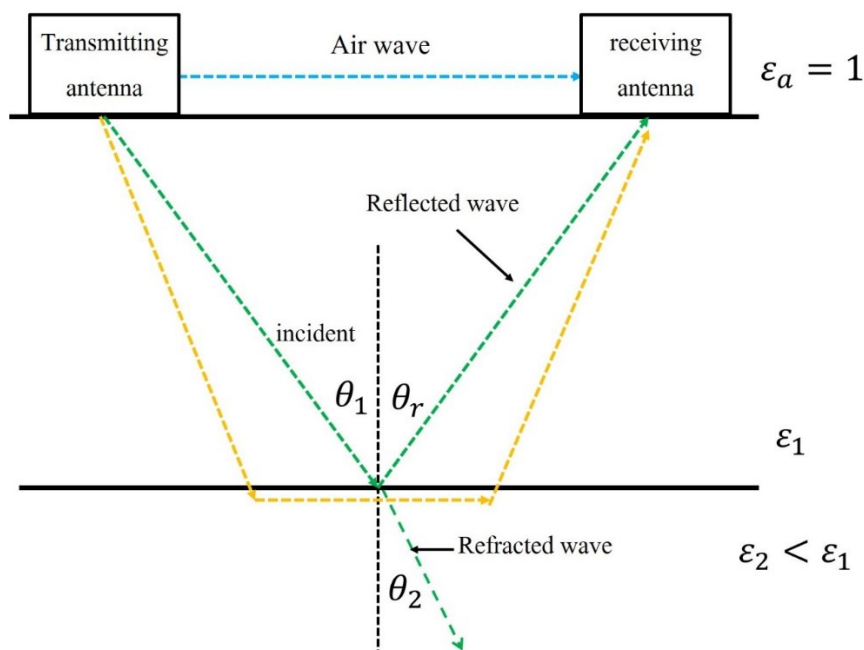


รูปที่ 2.18 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของดิน-หิน ชนิดที่พบได้ทั่วไป (Michael Dentith, 2014)

การสะท้อนและการหักเหของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การสะท้อนและการหักเหของคลื่น GPR จะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเดินทางไปตกกระทบที่ผิวรอยต่อระหว่างตัวกลางสองตัวที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 2.19 คลื่นส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับมายังตัวกลางเดิม คลื่นอีกส่วนหนึ่งจะเกิดการหักเหที่ผิวรอยต่อแล้วเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางที่อยู่ด้านล่าง คลื่นส่วนนี้อาจจะสะท้อนกลับมาอีกครั้งเมื่อเดินทางไปกระทบผิวรอยต่ออื่นๆ ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแตกต่างกัน ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของสเนลล์ (Snell's law) แสดงดังสมการ 2.21

$$\sqrt{\epsilon_{r1}} \sin \theta_1 = \sqrt{\epsilon_{r2}} \sin \theta_2 \quad 2.21$$



รูปที่ 2.19 การเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากตัวส่งไปยังตัวรับสัญญาณ (Rebecca Ludwig, 2011)

สัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflection coefficients; R) เป็นตัวบอกขนาดของแอมพลิจูด ถ้าชั้นดินมีผลต่างระหว่าง $\sqrt{\epsilon_{r1}}$ กับ $\sqrt{\epsilon_{r2}}$ มากจะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสูง ในกรณีที่ตัวกลางทั้งสองไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า ($\sigma=0$) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนคำนวณได้จากดังสมการที่ 2.22 โดยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ผิวรอยต่อระหว่างตัวกลางใดๆ จะสัมพันธ์กับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของตัวกลางคู่่นั้นๆ ในกรณีที่ $\sqrt{\epsilon_{r1}}$ น้อยกว่า $\sqrt{\epsilon_{r2}}$ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเป็นลบ ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ว่ามีการกลับเฟสของคลื่นสะท้อนที่ตำแหน่งสะท้อน

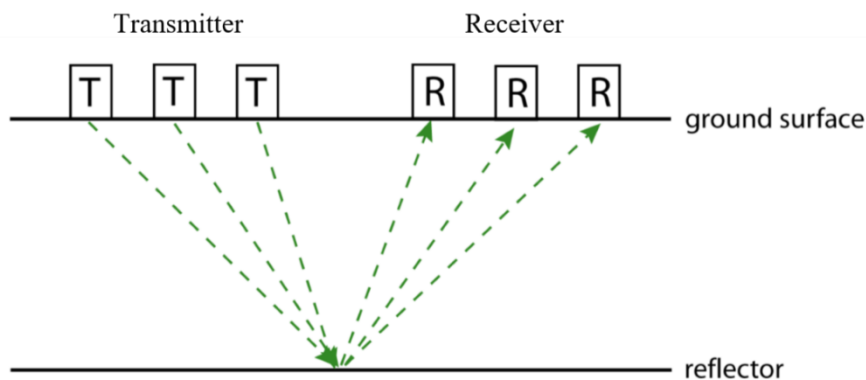
$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad 2.22$$

การประเมินค่าความเร็วคลื่น

- 1) วัดค่า dielectric constant แล้วคำนวณความเร็วจากสมการที่ 2.18
- 2) หาเวลาที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใช้ในการเดินทางจากตัวส่งสัญญาณไปสะท้อนยังผิวรอยต่อที่ทราบความลึกแน่นอนแล้วเดินทางกลับมายังตัวรับสัญญาณ คำนวณได้จากสมการที่

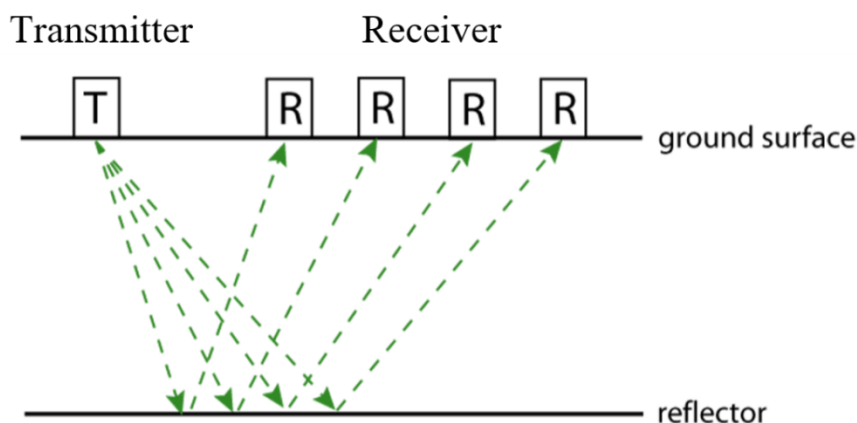
3) วิเคราะห์จากภาพสัญญาณไฮเพอร์โบลา ซึ่งเกิดจากการเลี้ยวเบนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อคลื่นไปกระทบวัตถุในตัวกลาง

4) ใช้วิธี Common Mid point (CMP) ในการวัดจะเลื่อนตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณออกจากจุดอ้างอิงใดๆ ด้วยระยะทางจากจุดกึ่งกลางเท่ากันแสดงดังรูป 2.20



รูปที่ 2.20 การเก็บข้อมูลแบบ Common Mid point (CMP)

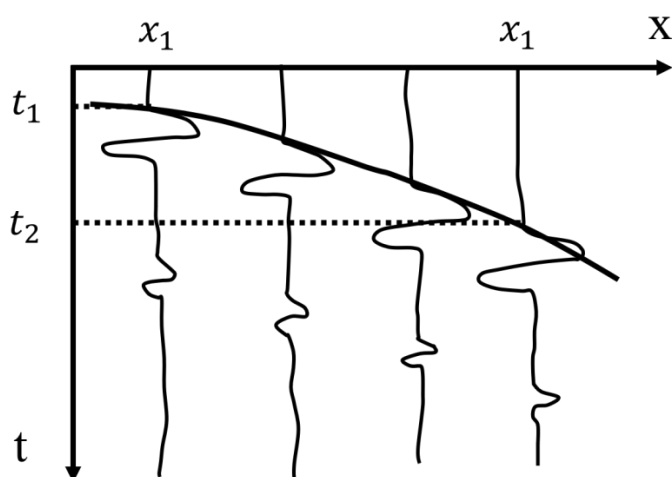
5) ใช้วิธีการ Wide Angle Reflection and Refraction (WARR) ในการวัดจะวางสายอากาศส่งสัญญาณไว้กับที่ แล้วทำการเปลี่ยนตำแหน่งตัวรับสัญญาณ โดยย้ายตัวรับสัญญาณออกจากสายอากาศส่งสัญญาณไปเรื่อยๆ ซึ่งผลการวัดจะให้ภาพสัญญาณสะท้อนรูปไฮเพอร์โบลา แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การเก็บข้อมูลแบบ Wide Angle Reflection and Fraction (WARR)

การคำนวณหาความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การคำนวณหาความเร็วในข้อ 3-5 จะให้รูปแบบของไฮเพอร์โบลาดังรูปที่ 2.22 ในสัญญาณภาพเรดาร์ซึ่งสามารถใช้ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลามาคำนวณหาความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้จากสมการที่ 23



รูปที่ 2.22 แสดงสัญญาณรูปแบบของไฮเพอร์โบล่า

$$V = \sqrt{\frac{x_2^2 - x_1^2}{t_2^2 - t_1^2}} \quad 2.23$$

x_1 และ x_2 เป็นจุดกึ่งกลางระหว่าง antenna

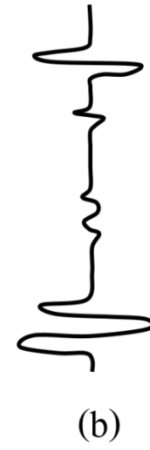
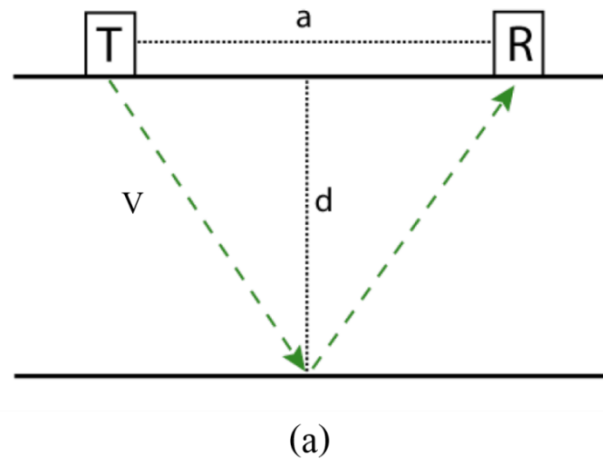
t_1 และ t_2 เป็นเวลาที่คลื่นใช้เดินทางไปสะท้อนยังผิวรอยต่อแล้วเดินทางกลับมายังตัวรับสัญญาณที่ตำแหน่ง x_1 และ x_2

V เป็นความเร็วเฉลี่ยของคลื่นในตัวกลาง

ในทางปฏิบัติการเก็บข้อมูลด้วยวิธี GPR จะได้ข้อมูลเวลาและแอมพลิจูดของสัญญาณคลื่น GPR ที่สะท้อน หักเห หรือกระเจิงจากผิวสะท้อนกลับมายังตัวรับสัญญาณ (trace) แสดงดังรูป 2.23b และจากสมการที่ 2.24 ความลึกถึงตัวสะท้อนสามารถคำนวณได้เมื่อรู้ค่าความเร็วคลื่น (v) และเวลาที่คลื่นสะท้อนมาถึงตัวรับสัญญาณดังรูป 2.23(a)

$$d = \frac{\sqrt{(vt)^2 - a^2}}{2}$$

2.24

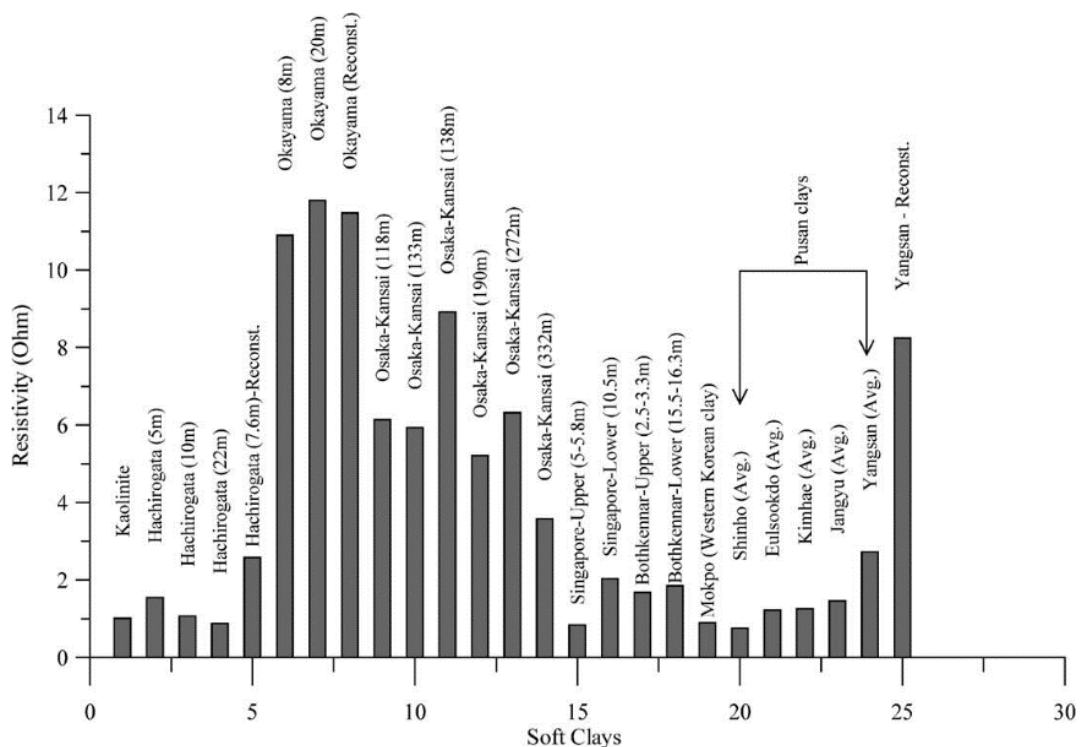


รูปที่ 2.23 รูปประกอบการคำนวณความลึกของคลื่น GPR (Ludwig, 2011)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์

2.6.1 กรณีปัญหาดินอ่อน

Giao P.H, 2003 ได้ทำการใช้วิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยใช้การวางขั้วแบบ ไตโพล-ไตโพล และทำการทดสอบวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินเหนียวในห้องทดลองในพื้นที่แอ่งตะกอนดินเหนียวปูซาน ประเทศเกาหลีใต้ ผลที่ได้สามารถแยกชั้นดินได้เป็นสามชั้นคือ ดินเหนียว ดินทรายแป้ง และดินทราย และผลที่ได้จากการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินเหนียวอ่อนในห้องทดลองพบว่าค่าสภาพไฟฟ้าค่อนข้างต่ำมากอยู่ในช่วง 1-3 โอห์ม-เมตร แสดงดังรูป 2.24



รูปที่ 2.24 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินเหนียวอ่อนในประเทศเกาหลี ญี่ปุ่น สิงคโปร์ และสกอตแลนด์ (Giao, 2003)

Chrétien M., 2014 ได้ใช้วิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของดินเหนียวที่มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำที่อยู่ในดินเหนียว

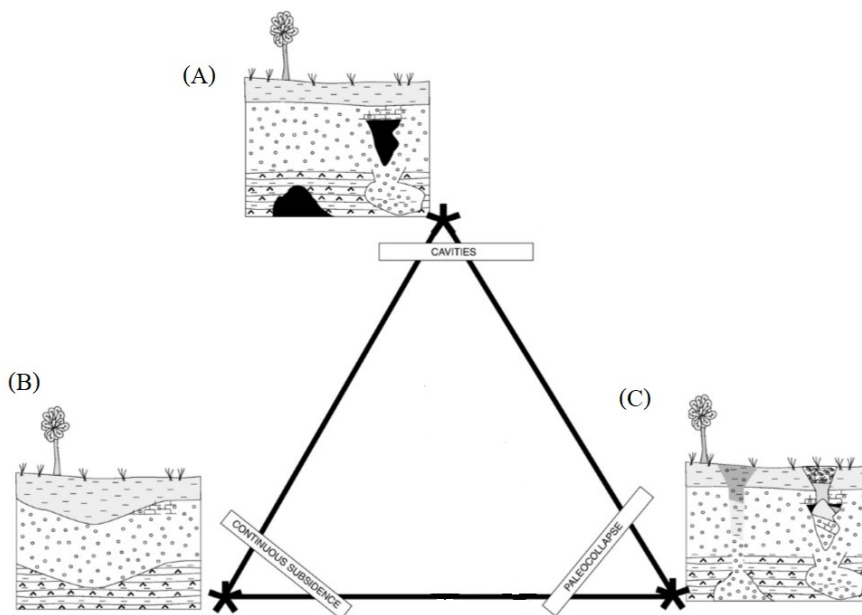
ตามฤดูกาลต่างๆ ในช่วงหน้าร้อนและหน้าฝนที่เมืองเพรสแซก ประเทศฝรั่งเศส ผลที่ได้ประสบความสำเร็จในการแยกชั้นดินออกจากกัน และเมื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละฤดูกาล พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อชั้นดินมีความชื้นน้อยลง และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าต่ำในช่วงที่มีฝนตก โดยเฉพาะในดินส่วนที่อยู่ด้านบน (top soil) ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลค่อนข้างมาก

Longo V., 2014 ได้ใช้วิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเพื่อศึกษาลักษณะของแอ่งดินเหนียวเบนโทไนท์ (bentonitic clay deposits) บริเวณทางตอนเหนือของเมืองซาดิเนีย ประเทศอิตาลี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความหนาและความต่อเนื่องในแนวข้างของดินเหนียว ผลที่ได้สามารถแยกชั้นดินเหนียวได้อย่างชัดเจน เนื่องจากมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแตกต่างจากดินที่อยู่รอบๆค่อนข้างสูง โดยค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของดินเหนียวที่วัดได้มีค่าน้อยกว่า 4 โอห์ม-เมตร

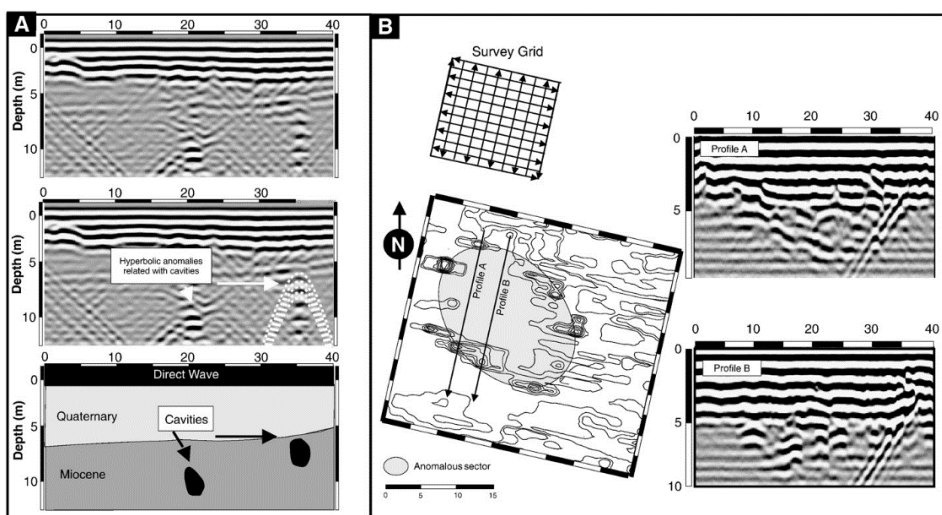
Sebastian Krzysztof, 2017 ได้ทำการศึกษาลักษณะดินที่เกิดจากเศษของเสียที่ถูกนำไปถมในบ่อเหมืองแร่เก่า เนื่องจากการทำเหมืองแร่ดินเหนียวแบบขุดเปิดหน้าดินในอดีต เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก ทางตอนกลางของประเทศโปแลนด์ ผลจากการสำรวจพบชั้นดินสามชั้น คือ ชั้นของเสียที่ถูกนำไปถม ชั้นดินเหนียว และ ชั้นที่สามเป็นชั้นของทรายแม่น้ำที่ถมตัวด้วยน้ำ

2.6.2 กรณีหลุมยุบ

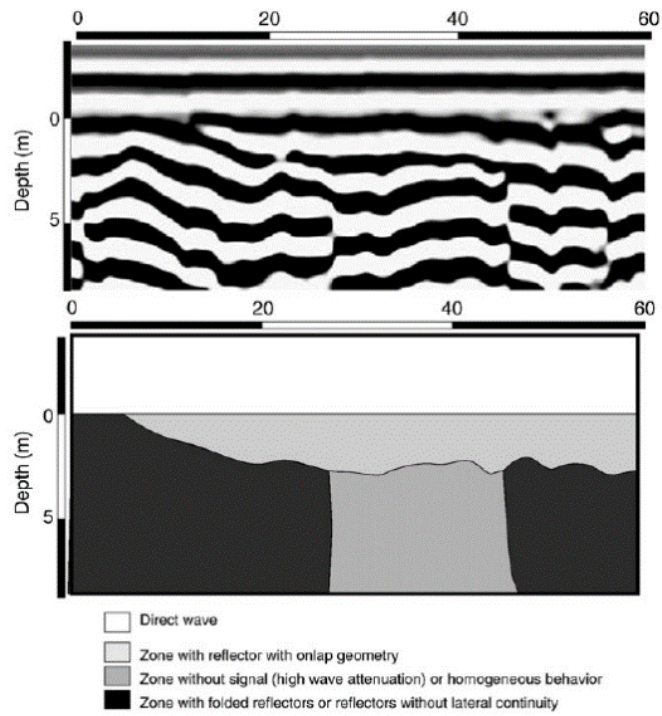
Pueyo-Anchuela, 2009 ได้ทำการศึกษาด้วยวิธีเรดาร์ห้วงความลึกชั้นดิน ในพื้นที่ภัยพิบัติในภูมิภาคแบบคลาสต์ ประเทศสเปน เพื่อตรวจสอบลักษณะโครงสร้างภายใต้ชั้นดินในพื้นที่ที่เกิดหลุมยุบ โดยใช้สายอากาศความถี่ 50 MHz และได้แบ่งผลกระทบที่เกิดจากภูมิภาคแบบคลาสต์ออกเป็น 3 แบบ คือ บริเวณที่เป็นโพรง บริเวณที่มีการทรุดตัว และบริเวณที่มีการพังทลายของชั้นดินในอดีต (รูปที่ 2.25) ผลที่ได้จากภาพเรดาร์แกรมแสดงสัญญาณสะท้อนแบบไฮเพอร์โบลา (รูปที่ 2.26 A) และโพรงที่มีลักษณะของผนังโพรงแบบไม่ปกติ (รูปที่ 2.26 B) และในกรณีของบริเวณที่มีการพังทลายของชั้นดินในอดีต (รูปที่ 2.27) นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นสัญญาณที่ได้จากโพรงอากาศที่วางตัวในแนวดิ่ง โดยส่วนที่เป็นโพรงอากาศคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีแอมพลิจูดสูงและสามารถลงไปได้ลึกมากกว่าบริเวณอื่นๆ (รูปที่ 2.28)



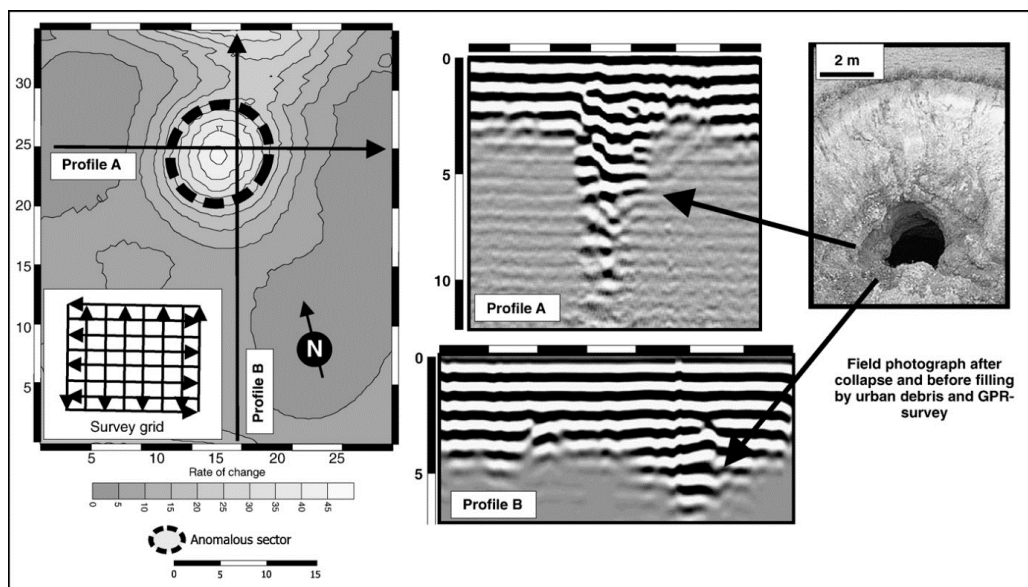
รูป 2.25 ผลกระทบที่เกิดจากภูมิประเทศแบบคาสต์ A คือ โพรง และ B คือ ดินทรุด และ C คือ หลุมยุบ ในอดีต (Anchuela, 2009)



รูปที่ 2.26 A คือ สัญญาณสะท้อนแบบไฮเพอร์โบลา และ B คือ โพรงที่มีลักษณะของผนังโพรงแบบไม่ปกติ (Anchuela, 2009)

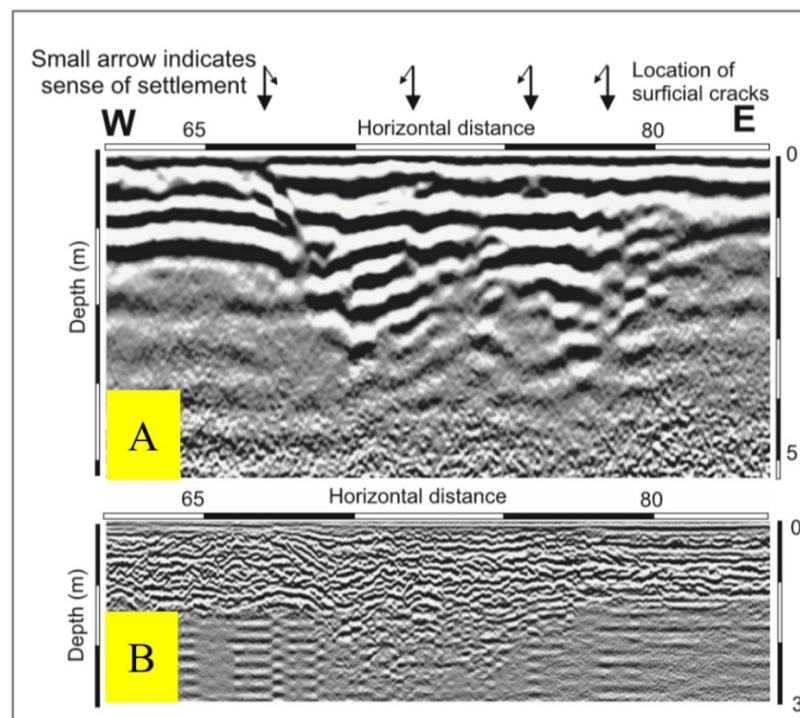


รูปที่ 2.27 ลักษณะของภาพเรดาร์แกรมที่มีการพังทลายของชั้นดิน ในอดีต (Anchuela, 2009)



รูปที่ 2.28 สัญญาณที่ได้จากโพรงอากาศที่วางตัวในแนวตั้ง (Anchuela, 2009)

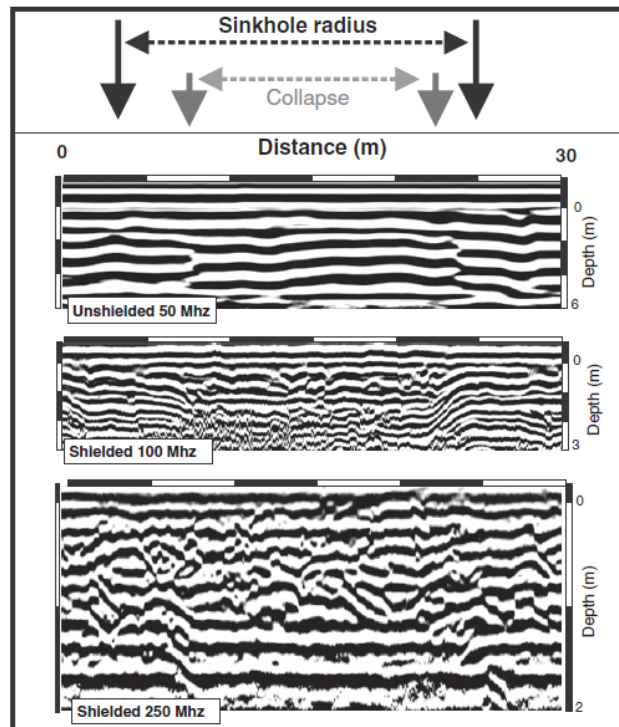
Pueyo Anchuela, 2015 ได้ทำการประเมินความเสี่ยงภัยพิบัติในพื้นที่ภูมิประเทศแบบคาสต์ เมืองซาราโกซา ประเทศสเปน ด้วยวิธีเรดาร์หยังลึกชั้นดิน โดยใช้สายอากาศความถี่ 100 MHz และ 250 MHz ในส่วนพื้นที่ที่เป็นชุมชนเมือง โดยพบว่าบริเวณพื้นที่ศึกษามีการหยังลึกของสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าได้คืบเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีปริมาณดินเหนียวในดินสูง (high clay content) วางตัวอยู่ในระดับคืบ ความลึกจากการสำรวจจะขึ้นอยู่กับเศษซากของวัสดุที่ถูกถล่มลงไป ในหลุมยุบแสดงดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 ลักษณะของคลื่นสะท้อนที่สัมพันธ์กับบริเวณเกิดการทรุดตัวในพื้นที่ชุมชนเมือง จากสายอากาศความถี่ 100 MHz (A) และ 250 MHz (B) (Anchuela, 2015)

Pueyo Anchuela, 2011 ได้ทำการสำรวจด้วยวิธีเรดาร์หยังความลึกชั้นดิน เพื่อดูลักษณะโครงสร้างภายในของชั้นดินตะกอน โดยได้ทำการวัดบนชั้นดินในบริเวณที่มีลักษณะเป็นหน้าผาหินโผล่ที่แสดงให้เห็นถึงลักษณะร่องรอยการทรุดตัวของดินในอดีตมาเปรียบเทียบกับภาพเรดาร์แกรมที่วัดได้จากภาคสนาม ในการสำรวจได้ทดลองใช้ความถี่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวส่ง-

รับสัญญาณที่ความถี่ต่างกัน คือ 50 MHz, 100 MHz และ 250 MHz เพื่อดูลักษณะการตอบสนองของสัญญาณ โดยพบว่าความถี่ 100 MHz ให้ผลของสัญญาณที่มีความชัดเจนที่สุด แสดงดังรูปที่ 2.30

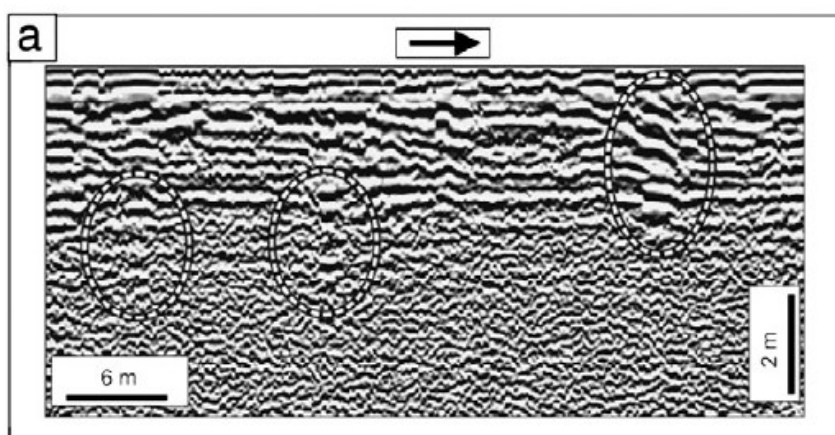


รูปที่ 2.30 ลักษณะการตอบสนองของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากความถี่ คือ 50 MHz, 100 MHz และ 250 MHz (Anchuela, 2011)

Andrea Billi, 2016 ได้ทำการศึกษาหลุมยุบและ โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแบบ คาสต์ (karst) ในพื้นที่หินปูน ที่เมือง Acque Albule ใกล้กับกรุงโรมทางตอนกลางของประเทศ อิตาลี โดยพบว่าข้อสรุปหลักๆที่ทำให้เกิดสัณฐานทางธรณีวิทยาในพื้นที่ Acque Albule คือ การเกิด หลุมยุบในพื้นที่ใช้ประโยชน์และพื้นที่อยู่อาศัยซึ่งซ่อนเร้นอยู่ภายใต้สิ่งปลูกสร้างต่างๆที่อยู่ใน ชุมชนเมือง

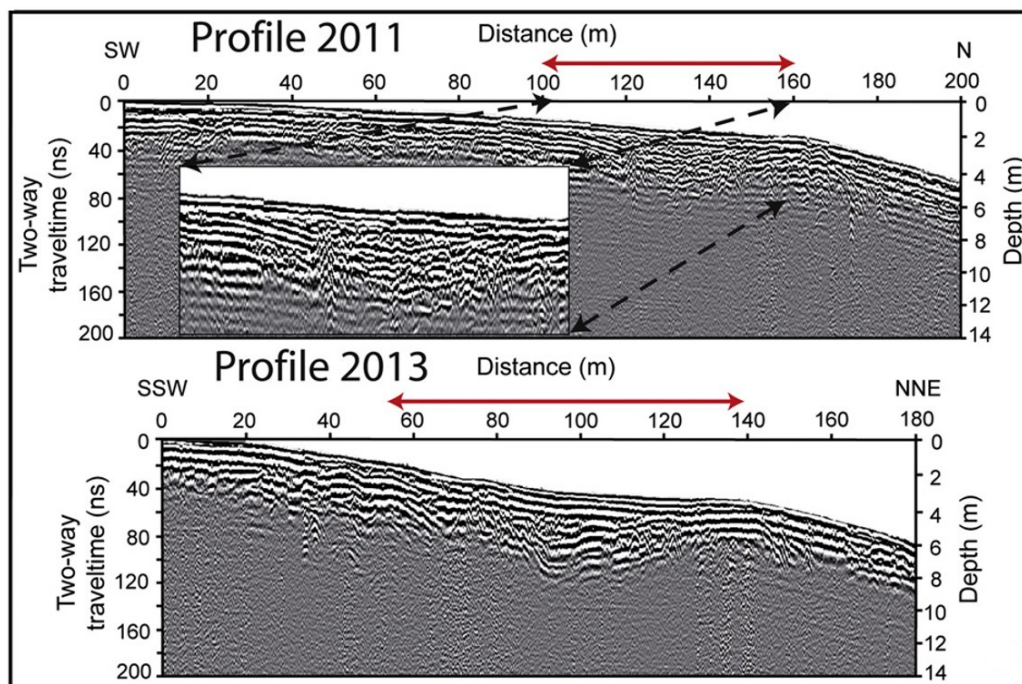
Pueyo-Anchuela, 2011 ได้ทำการศึกษาในพื้นที่สำหรับทำการออกแบบผังเมืองใน บริเวณที่เป็น alluvial karst ที่แอ่งตะกอน Ebro ประเทศสเปน ด้วยวิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน โดยพบ

สัญญาณไฮเพอร์โบลาที่มีลักษณะของสัญญาณที่ได้เกิดจากดินแบบไม่เป็นเนื้อเดียวและมีความไม่ต่อเนื่องซึ่งเป็นลักษณะของโพรง แสดงดังรูปที่ 1.31

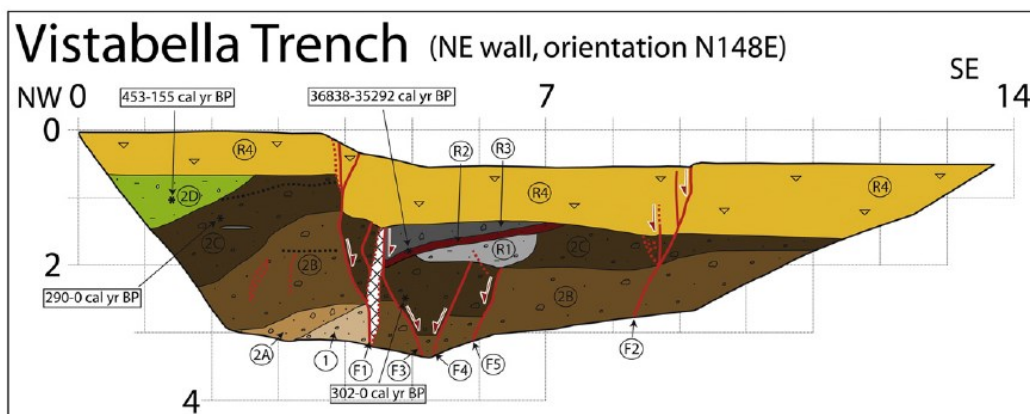


รูปที่ 2.31 สัญญาณไฮเพอร์โบลาที่เกิดจากดินที่ไม่เป็นเนื้อเดียวและมีความไม่ต่อเนื่องซึ่งเป็นลักษณะของโพรง (Pueyo-Anchuela, 2011)

Domingo Carbonel, 2015 ได้ทำการศึกษาความเสียหายที่เกิดจากหลุมยุบ ในบริเวณพื้นที่ชุมชนเมือง ที่เมืองซาราโกซา ทางตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศสเปน โดยใช้วิธีเรดาร์หยังลึกชั้นดิน ผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงการสะท้อนของสัญญาณที่มาจากชั้นดินที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูงและบริเวณแนวสำรวจเป็น สวนสาธารณะที่มีต้นไม้รอบๆด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการลดทอนของสัญญาณค่อนข้างมากทำให้ความลึกที่ได้น้อยกว่า 4 เมตร แต่ผลที่ได้ยังแสดงให้เห็นถึงหลุมยุบในพื้นที่ศึกษาซึ่งเป็นผลมาจากการมีอัตราการทรุดตัวที่ค่อนข้างสูงแสดงดังรูปที่ 2.32 นอกจากนี้ยังมีการขุดร่องสำรวจยังแสดงให้เห็นถึงลักษณะ โครงสร้างการทรุดตัวของหลุมยุบได้อย่างชัดเจนแสดงดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.32 หลุมยุบเป็นผลมาจากการมีอัตราการทรุดตัวที่ค่อนข้างสูง (Carbonel, 2015)



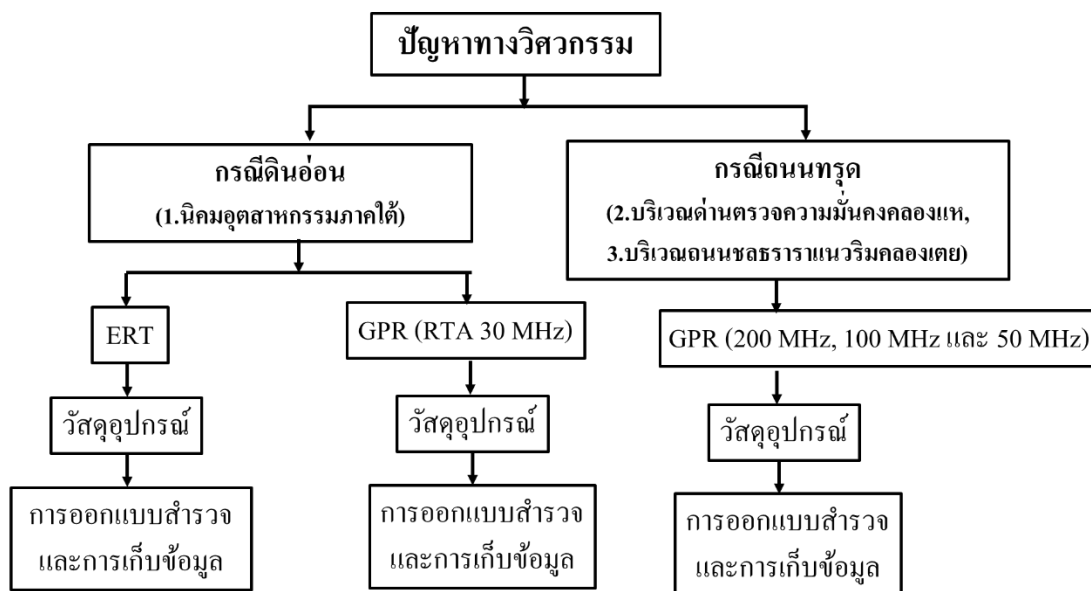
รูปที่ 2.33 ลักษณะ โครงสร้างที่เกิดจากการทรุดตัวของหลุมยุบ (Carbonel, 2015)

Gomez-Ortiz ได้ทำการศึกษาถึงความถี่ของการเกิดดินทรุดตัวพังทลายเป็นหลุมยุบโดยใช้วิธีเรดาร์หึ่งลึกชั้นดิน ที่จังหวัด เซโกเวีย ประเทศสเปน โดยใช้ความถี่ของเสาอากาศ 200 MHz และ 400 MHz โดยผลที่ได้สามารถตรวจสอบโพรงที่วางตามแนวยาวนานกันพื้นดิน โดยพบว่าโพรงมีความต่อเนื่องและมีทิศทางออกไปทางฝั่งที่เป็นแม่น้ำของพื้นที่ศึกษา

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

การประยุกต์วิธีการธรณีฟิสิกส์มาใช้ในการแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมฐานราก ประกอบไปด้วย 2 กรณีศึกษา คือ 1) การประยุกต์ใช้วิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ERT) ร่วมกับวิธีเรดาร์หยังลึกชั้นดิน (GPR) กับปัญหาดินอ่อนในพื้นที่ก่อสร้างนิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ (ฉลุง) อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา และ 2) การประยุกต์ใช้วิธีเรดาร์หยังลึกชั้นดิน (GPR) กับปัญหาการทรุดตัวของถนนบริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแหและบริเวณถนนชลธารา แนวริมคลองเตย (ตลาดโก้งโค้ง) เทศบาลนครหาดใหญ่ ขั้นตอนการวิจัยแสดงดังแผนภาพที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการสำรวจด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

1. ขั้วไฟฟ้า (electrode) ใช้สำหรับส่ง-รับกระแสไฟฟ้าและวัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นใต้ผิวดิน
2. แบตเตอรี่รถยนต์ขนาด 12 โวลต์ ใช้สำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าลงไปได้ชั้นดินขณะทำการสำรวจ
3. สายเคเบิล ทำหน้าที่นำส่ง-รับสัญญาณระหว่างขั้วไฟฟ้ากับเครื่องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Terameter SAS 1000)
4. เครื่องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า Terameter SAS 1000 (ABEM instrument AB) ดังรูปที่ 3.2
5. เครื่อง Electrode Selector 464 (ABEM instrument AB) ดังรูปที่ 3.2 ใช้สำหรับกำหนดการวัดตามลำดับการจับคู่ของขั้วไฟฟ้าที่ได้กำหนดไว้ในแต่ละรูปแบบการจัดวางขั้วการวัด (Protocal)
6. เทปวัดระยะ ใช้วัดระยะห่างระหว่างแนวสำรวจและวัดระยะจากจุดอ้างอิงของแต่ละแนววัด



รูปที่ 3.2 รูปเครื่องวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า Terameter SAS 1000 ที่ต่ออยู่กับเครื่อง Electrode Selector 464 ในขณะที่ทำการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้ผิวดินแบบอัตโนมัติ

วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการสำรวจด้วยวิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน

1. เครื่อง RAMAC/GPR ของบริษัท MALÅ Geoscience ประเทศสวีเดน ดังรูปที่

3.3

2. สายอากาศส่ง-รับสัญญาณความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz (สำหรับกรณีถนนทรุดตัว) และ Rough Terrain Antenna, RTA 30 MHz (สำหรับกรณีดินอ่อน) ทำหน้าที่ส่ง-รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนกลับมาจากใต้ผิวดิน ดังรูปที่ 3.3-3.4

3. แบตเตอรี่ ใช้สำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับสายอากาศส่ง-รับสัญญาณ ความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz

4. ราววัดระยะทาง (Hip chain) เพื่อระบุตำแหน่งที่ต้องการวัด โดยโปรแกรมควบคุมการวัดจะสั่งให้สายอากาศส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งสัญญาณคลื่นออกไป

5. หน่วยควบคุม (control unit) ทำหน้าที่ควบคุมการส่งและรับสัญญาณ

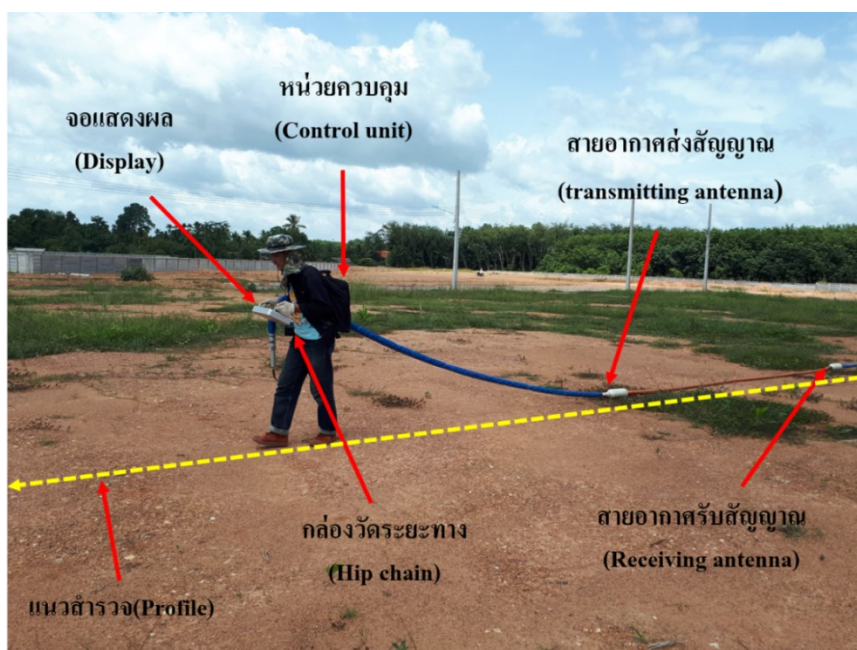
6. เส้นใยนำแสง (optical fibers) ใช้สำหรับส่ง/รับสัญญาณ

5. สายวัดระยะ ใช้วัดระยะห่างระหว่างแนวสำรวจและวัดระยะจากจุดอ้างอิงของแต่ละแนววัด

6. สเปรย์ ใช้สำหรับทำเครื่องหมายเพื่อบอกตำแหน่งของแนวสำรวจ



รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์การสำรวจ GPR ที่ความถี่สายอากาศ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz



รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์การสำรวจ GPR สายอากาศแบบ RTA ความถี่ 30 MHz

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

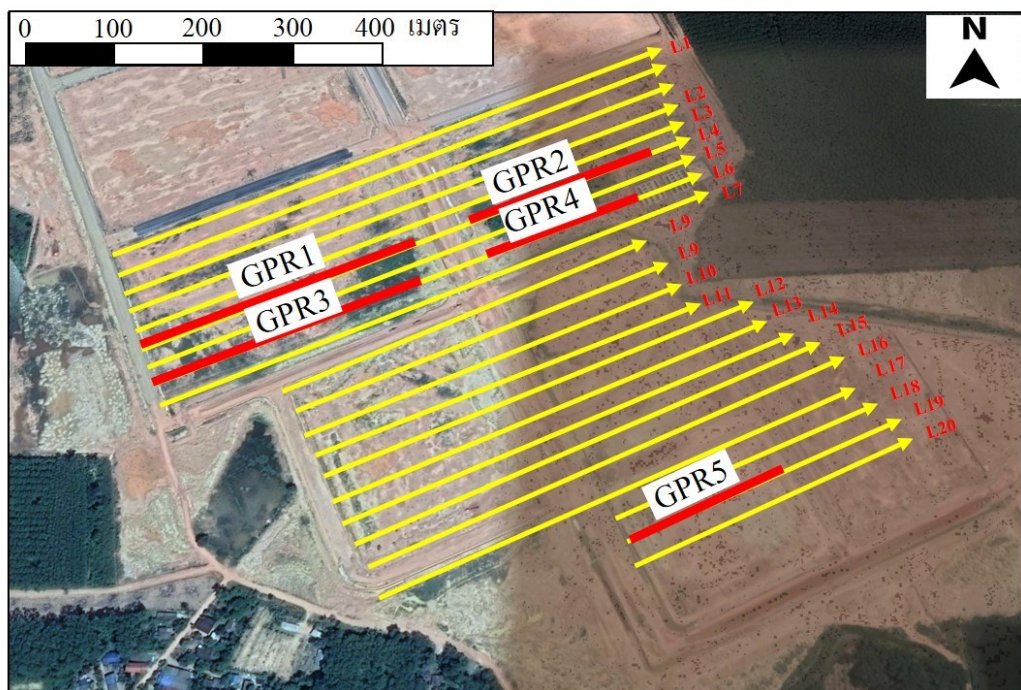
3.2.1 กรณีปัญหาดินอ่อนในพื้นที่ก่อสร้างนิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ (ตำบลฉลุง) อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

กรณีศึกษาที่ 1 การประยุกต์ใช้วิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ERT) ร่วมกับวิธีเรดาร์หยังลึกชั้นดิน (GPR) กับปัญหาชั้นดินอ่อนในพื้นที่ก่อสร้างนิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ (ฉลุง) อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

วิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ERT)

การออกแบบสำรวจและการเก็บข้อมูล

ในการสำรวจวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ทำการเก็บข้อมูลในช่วงเดือนมีนาคมและเมษายน 2560 โดยได้ออกแบบไว้ทั้งหมด 20 แนววัด มีระยะห่างระหว่างแนววัด 30 เมตร ยกเว้นแนวสำรวจ L1 กับแนวสำรวจที่ L2 มีระยะห่างกัน 75 เมตร ความยาวมากที่สุดและสั้นสุดของแนววัด คือ 600 เมตร และ 300 เมตร ตามลำดับ (ดังรูปที่ 3.5)

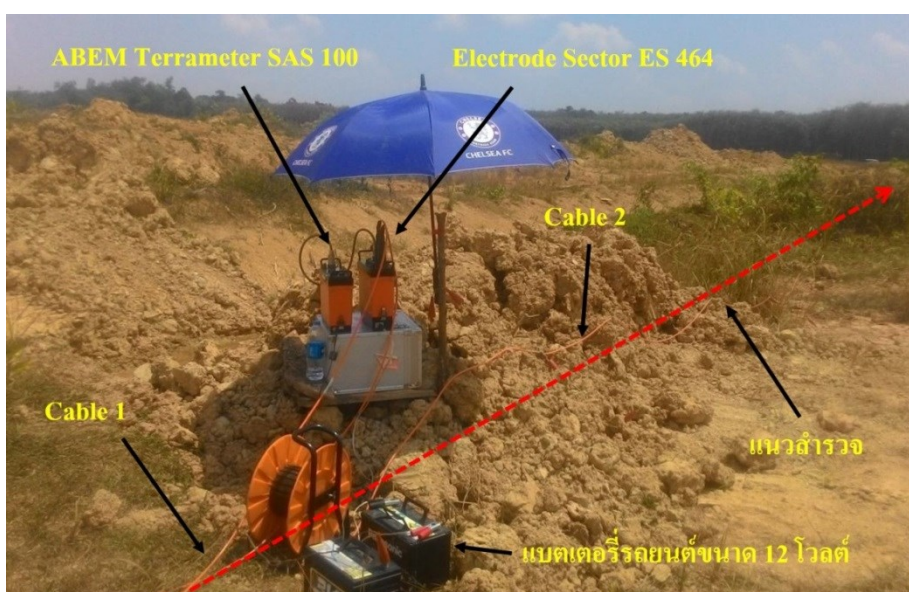


รูปที่ 3.5 แนวสำรวจวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจำนวน 20 แนววัด (L1-L20) และการสำรวจวิธีเรดาร์หยังลึกชั้นดินจำนวน 5 แนววัด (GPR1-GPR5)

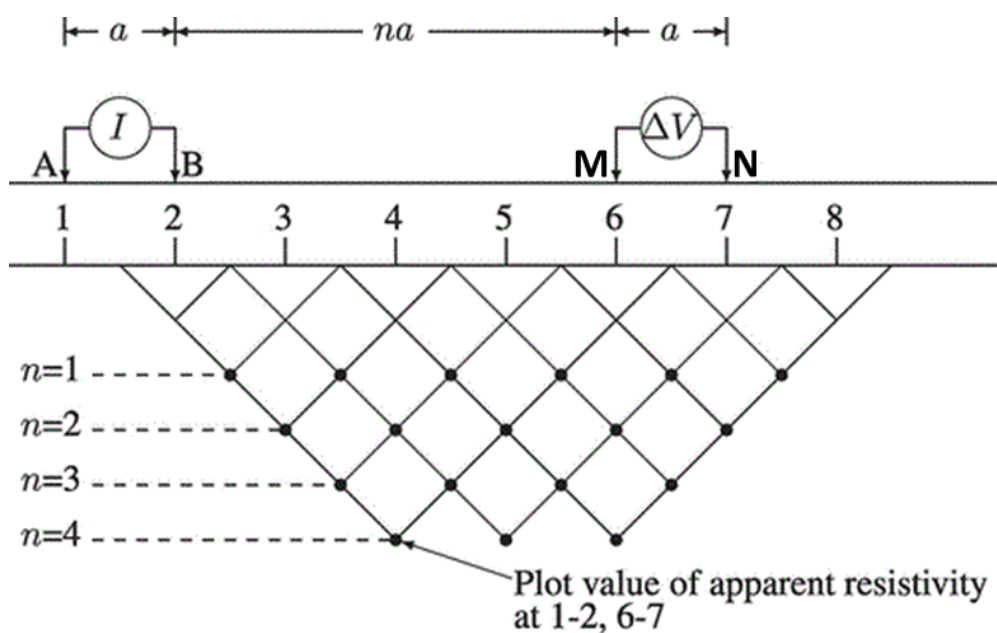
ในการศึกษารุ่นนี้ได้เลือกใช้การเก็บข้อมูลค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบระบบอัตโนมัติ (Lund imaging system) ใช้รูปแบบการวางขั้วแบบไดโพล-ไดโพล ซึ่งเป็นรูปแบบการวางขั้วที่สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าทางด้านข้างได้ดีออกแบบโดยใช้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (a) 5 เมตร ระยะห่างระหว่างแนวสำรวจ 30 เมตร และความลึกที่ได้ประมาณ 30 เมตร การวัดแบบอัตโนมัติโดยใช้ Lund Imaging System (Dahlin, 1996) จะเชื่อมต่อกับเครื่องวัดค่าสภาพต้านทาน ไฟฟ้า ABEM SAS 1000 และทำการวัดตามลำดับการจับคู่ของขั้วไฟฟ้าที่ได้กำหนดไว้ (Protocol) ดังรูปที่ 3.6-3.7 มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (a) คือ ระยะระหว่าง A กับ B หรือ M กับ N และระยะห่างระหว่างขั้วด้านในของขั้วไฟฟ้า (na) คือ ระยะระหว่าง B กับ N เมื่อ a = 5, 10, 15 เมตร และ n = 1-6 การวัดโดยใช้ short32 protocol จะให้ข้อมูลจุดวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏภายใต้ผิวดินจำนวน 356 จุด โดยค่าความลึกในแนวดิ่ง (vertical depth) จะมีค่าเท่ากับ 0.416a, 0.697a, 0.962a, 1.220a, 1.476a และ 1.730a สำหรับค่า n = 1-6 ตามลำดับ (Edwards, 1977)

$$\rho_a = \pi a n(n+1)(n+2) \left(\frac{\Delta V}{I} \right) \quad 3.1$$

$$K = \pi a n(n+1)(n+2) \quad 3.2$$



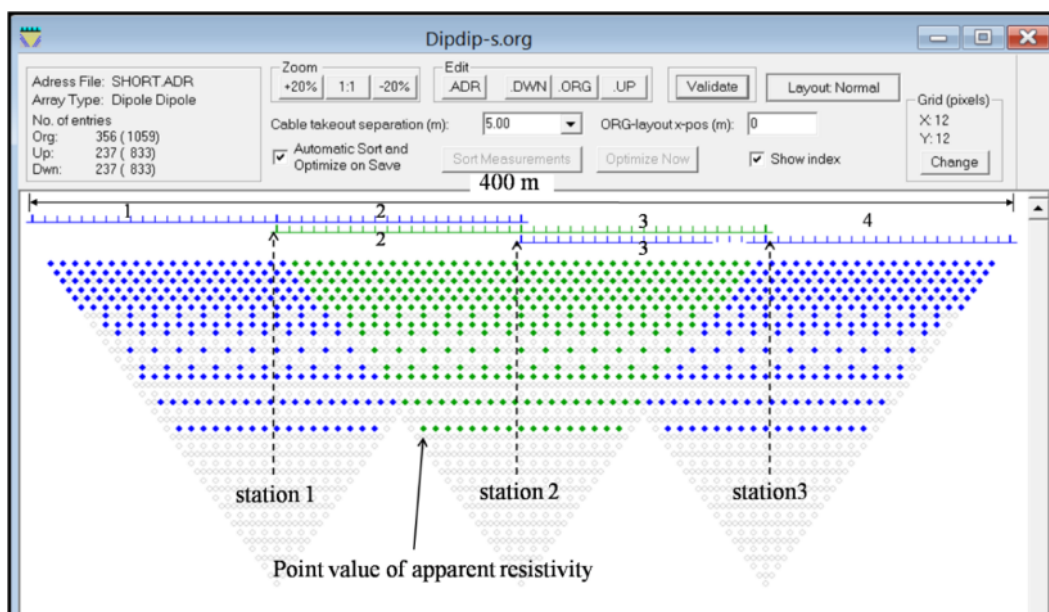
รูปที่ 3.6 การเก็บข้อมูลด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ จ.ลุง



รูปที่ 3.7 ลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการสำรวจแบบ ไคโพล- ไคโพล

([https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001268](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001268) สืบค้นข้อมูลเมื่อวันที่ 1 มกราคม 2562)

การเก็บข้อมูลค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าแบบระบบอัตโนมัติ เป็นการเก็บข้อมูลเพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างชั้นดินแบบสองมิติ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏที่วัดได้จากการสำรวจแบบไคโพล-ไคโพล แสดงดังรูปที่ 3.8 จากรูปจุดข้อมูลที่เป็นสี่เหลี่ยม คือ จำนวนข้อมูลของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏที่วัดได้ในการวัดครั้งแรกจะมีจำนวน 356 ค่า เมื่อทำการวัดเสร็จหากต้องการต่อแนวสำรวจเพิ่มในด้านขวามือหรือด้านซ้ายมือก็จะทำการเลื่อน station ไปยังฝั่งที่ต้องการวัด



รูปที่ 3.8 แสดงภาพจากโปรแกรม S4Kwin (ABEM Instrument AB) ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าปรากฏที่ได้จากการวางขั้วแบบไดโพล- ไดโพล เมื่อใช้ระยะห่างน้อยสุดระหว่างคู่อิเล็กโทรดเท่ากับ 5 เมตร

วิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน (GPR)

การออกแบบการสำรวจและการเก็บข้อมูล

การเก็บข้อมูลด้วยวิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน ได้ทำการเก็บข้อมูลหลังจากการเก็บข้อมูลวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเสร็จเรียบร้อยแล้ว โดยได้วางแผนออกแบบแนวสำรวจจากผลของ ERT เนื่องจากผลของ ERT สามารถบอกถึงบริเวณที่เป็นดินอ่อนได้อย่างชัดเจน แต่ในการเก็บข้อมูลด้วยวิธีนี้มีข้อด้อยในเรื่องของระยะเวลาในการเก็บ ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองนำวิธี GPR โดยเลือกใช้สายอากาศชนิดที่สามารถลากบนผิวแบบขรุขระได้ (Rough Terrain Antenna, RTA) 30 MHz ซึ่งมีข้อดีคือสามารถเก็บข้อมูลได้รวดเร็วกว่าการสำรวจด้วยวิธี ERT มาก ในการเก็บข้อมูลด้วยวิธี GPR ในครั้งนี้เพื่อต้องการที่จะทดสอบถึงความแตกต่างของสัญญาณของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการลดทอนในบริเวณที่เป็นดินอ่อนกับบริเวณที่ไม่ใช่ดินอ่อน เนื่องจากดินอ่อนจะมีสมบัติที่นำไฟฟ้าสูงซึ่งจะทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีการลดทอนอย่างรวดเร็ว โดยได้ออกแบบไว้จำนวน 5 แนววัด แสดงดังรูปที่ 3.5 จากรูปแนวสำรวจ GPR1, GPR2, GPR3 และ GPR4 เป็นแนวสำรวจที่อยู่บนบริเวณที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำวางตัวอยู่ใต้ผิวดินซึ่งคาดว่าจะป็นชั้นดินอ่อน และแนวสำรวจ GPR5 เป็นแนวสำรวจที่ภายใต้ผิวดินมีชั้นที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง ซึ่ง

คาดว่า เป็นบริเวณที่ไม่เป็นดินอ่อน การเก็บข้อมูลโดยใช้สายอากาศความถี่ 30 MHz (RTA antenna) แสดงดังรูป 3.9



รูปที่ 3.9 การเก็บข้อมูลด้วยวิธี GPR โดยใช้สายอากาศความถี่ 30 MHz (RTA antenna) ในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมตากใต้(ฉลุง)

3.2.2 กรณีปัญหาการทรุดตัวของถนนบริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห และบริเวณถนนชลธารา แนวริมคลองเตย (ตลาดโก้งโค้ง)

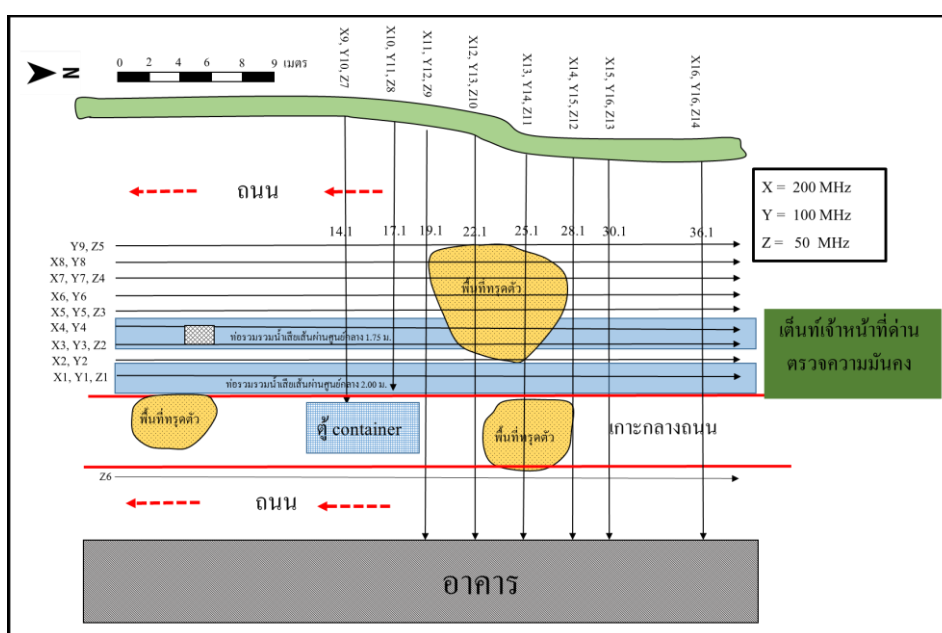
กรณีศึกษาที่ 2 การประยุกต์ใช้วิธีเรดาร์หยังลึกชั้นดิน (GPR) กับปัญหาการทรุดตัวของถนนบริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห และบริเวณถนนชลธารา แนวริมคลองเตย (ตลาดโก้งโค้ง) เทศบาลนครหาดใหญ่ ทั้งสองพื้นที่ได้ถูกออกแบบโดยการใช้วิธีการสำรวจด้วยเรดาร์หยังลึก ในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้ 3 ความถี่ด้วยกัน คือ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz เพื่อศึกษา ลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาภายใต้ผิวดินและหาสาเหตุของการทรุดตัวของถนน

3.2.2.1 บริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห เทศบาลนครหาดใหญ่

การออกแบบการสำรวจและการเก็บข้อมูล

การออกแบบวางแผนสำรวจได้ออกแบบทั้งในแนวตามถนนและขวางถนน ในแต่ละแนววัดจะทำการเก็บข้อมูล โดยใช้สายอากาศ 3 ความถี่ (200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz) ในแนวตามถนนได้ทำการออกแบบการเก็บข้อมูลด้วยสายอากาศความถี่ 100 MHz จำนวน 9 แนววัด (Y1-Y9) โดยมีระยะห่างแนวสำรวจ 1 เมตร ความถี่ 200 MHz จำนวน 8 แนววัด (X1-X8) และมีระยะห่างแนวสำรวจ 1 เมตร เช่นเดียวกับความถี่ 100 MHz ส่วนความถี่ 50 MHz ได้ออกแบบไว้จำนวน 5 แนววัด (Z1-Z5) แต่ละแนววัดมีระยะห่าง 2 เมตร ยกเว้นแนววัดที่ Z6 ซึ่งมีระยะห่างจากแนววัด Z1 เป็นระยะ 7 เมตร และแต่ละแนวมีความยาวประมาณ 38 เมตร แสดงดังรูปที่ 3.10

ในแนวขวางถนนได้ออกแบบสายอากาศความถี่ 100 MHz จำนวน 8 แนววัด (Y10-Y16) เมตร 200 MHz จำนวน 8 แนววัด (X9-X16) และความถี่ 50 MHz จำนวน 8 แนววัด (Z7-Z14) โดยมีความยาวของแต่ละแนววัดประมาณ 24 เมตร ดังรูป 3.10 การเก็บข้อมูลได้ออกแบบอุปกรณ์ทำหน้าที่สำหรับลากคล้ายเรือบก โดยทำการติดตั้งเครื่อง GPR บนเรือบกแล้วทำการลากตามไปตามแนวสำรวจ การออกแบบเรือบกนี้จะช่วยให้การเก็บข้อมูลทำได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.12A



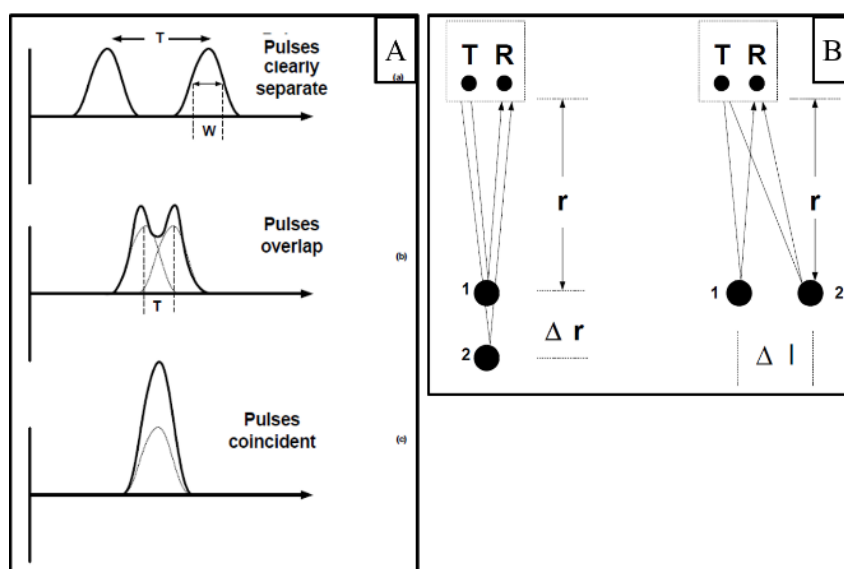
รูปที่ 3.10 แนวสำรวจ GPR บริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห เทศบาลนครหาดใหญ่



รูปที่ 3.12 A แสดงการเก็บข้อมูลบริเวณถนนชลธารา แนวนวมคลองเตย (ตลาดไก่กิ้ง) ด้วยสายอากาศความถี่ 200 MHz และ B แสดงการเก็บข้อมูลที่บริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแหเทศบาลนครหาดใหญ่ด้วยสายอากาศความถี่ 100 MHz

ในการเก็บข้อมูลด้วยวิธี GPR จะมีตัวแปรเข้ามาเกี่ยวข้องหลายปัจจัยที่จะต้องพิจารณา โดยจะต้องคำนึงถึงขีดจำกัดของวิธี GPR เพื่อให้การเก็บข้อมูลบรรลุตามวัตถุประสงค์ ซึ่งมีปัจจัยต่างๆที่จะต้องนำมาพิจารณา ดังต่อไปนี้

1. ความสามารถในการจำแนกวัตถุของข้อมูลจะพิจารณาเป็นสองกรณี คือ ความละเอียดในแนวตั้ง Vertical resolution และความละเอียดในแนวด้านข้าง Lateral resolution โดยขนาดของวัตถุที่จะจำแนกได้จากภาพเรดาร์แกรม คาบของสัญญาณ (T) จะต้องมากกว่าความกว้างที่มีขนาดเป็นครึ่งหนึ่งของแอมพลิจูดหรือ pulse width (w) แสดงดังรูป 3.13



รูปที่ 3.13 A หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการจำแนกรายละเอียดของคลื่นและ B การจำแนกความละเอียดของข้อมูล GPR ในแนวตั้งและแนวด้านข้าง (Annan, 2003)

1.1 Vertical resolution คือ ความสามารถในการจำแนกขอบบนและขอบล่างของวัตถุที่ได้รับจากสัญญาณสะท้อนจากใต้ผิวดิน ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่และความเร็วของคลื่นในชั้นดิน โดย Δr คือ ความหนาของวัตถุที่สามารถจำแนกได้จากคลื่น

$$\Delta r \geq \frac{v}{2f_c} \quad 3.3$$

v คือ ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลาง หน่วย m/s

f_c คือ ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หน่วย Hz

1.2 Lateral resolution คือ ความสามารถในการจำแนกชั้นดินในแนวด้านข้าง เนื่องจากพลังงานของคลื่นที่สะท้อนกลับมาจากผิวยอดต่อได้ผิวดินไม่ได้สะท้อนมาจากจุดสะท้อนเพียงจุดเดียวแต่สะท้อนมาจากพื้นที่รูปวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ $\Delta l/2$ หากพื้นที่ผิวยอดสะท้อนด้านข้างโตกว่าพื้นที่ผิวยอดรัศมี $\Delta l/2$ วัตถุสะท้อนสามารถที่จะถูกตรวจสอบได้บนภาพเรดาร์แกรม

$$\Delta l \geq \frac{V_r}{2f_c} \quad 3.4$$

เมื่อ r คือ ความลึก หน่วย m

2. การประมาณ time window (w) เป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการแสดงผลข้อมูล คำนวณได้ดังสมการ (Annan A.P., 2003)

$$W = 1.3 \frac{2\text{Depth}}{V} \quad 3.5$$

3. การประมาณ sampling interval เป็นการคำนวณระยะห่างของช่วงเวลาที่ใช้ในการชักตัวอย่างของสัญญาณ ซึ่งถูกควบคุมโดยหลักการของ Nyquist sampling คำนวณได้ดังสมการ (Annan A.P., 2003)

$$t = \frac{1000}{6f_c} \quad 3.6$$

4. การเลือกระยะห่างระหว่างตัวรับและตัวส่งสัญญาณ (S) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงได้ดังสมการ ในการส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าลงไปในชั้นดินถ้าระยะห่างระหว่างตัวส่งและตัวรับสัญญาณอยู่ใกล้กันมากเกินไปสัญญาณที่บันทึกได้นั้นอาจเกิดการอิมตัวของสัญญาณได้ ดังนั้นในการแยกระยะห่างระหว่างตัวรับและตัวส่งสัญญาณที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มความสามารถในการสะท้อนที่ดีขึ้น

$$S = \frac{2\text{Depth}}{\sqrt{\epsilon_r - 1}} \quad 3.7$$

5. การเลือกระยะห่างระหว่างจุดวัด point interval (ΔX) เป็นการคำนวณระยะห่างระหว่างจุดวัดเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงความคลุมเครือของสัญญาณและเพื่อให้แน่ใจว่าระยะห่างที่ใช้มีความเหมาะสมในการตรวจหาวัตถุ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta X = \frac{75}{f_c \sqrt{\epsilon_r}} \quad 3.8$$

6. Stacking เป็นการเพิ่มอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio) เป็นการลดสัญญาณรบกวนให้มีค่าน้อยที่สุดและเพิ่มประสิทธิภาพของสัญญาณสะท้อนให้มีความชัดเจนขึ้น โดยทั่วไปค่าของ stacking ที่เลือกใช้ในการสำรวจมีค่าอยู่ระหว่าง 1 – 2048 แต่การเพิ่ม stack จะหมายถึงการเพิ่มเวลาที่ใช้ในการส่งและรับสัญญาณด้วยเช่นกัน

การเลือกใช้ความถี่ GPR

การเลือกใช้ความถี่ของ GPR มีหลายปัจจัยที่เข้ามาเกี่ยวข้องทั้งความละเอียดของข้อมูล ความสามารถในการจำแนกชั้นดินของข้อมูลและความลึกที่คลื่นสามารถทะลุผ่านในชั้นดิน ซึ่งจะถูกรควบคุมโดยความถี่ (Annan, 2003)

1. Spatial resolution desired

ความละเอียดของข้อมูลที่ต้องการ หาได้โดยการประมาณอัตราส่วนระหว่างค่าความถี่กลางกับ bandwidth เท่ากับ 1 การควบคุมการเลือกค่าความถี่ (f) สามารถคำนวณได้จากสมการ (Annan A.P., 2003)

$$f > \frac{75}{\Delta Z \sqrt{\epsilon_r}} \text{ MHz} \quad 3.9$$

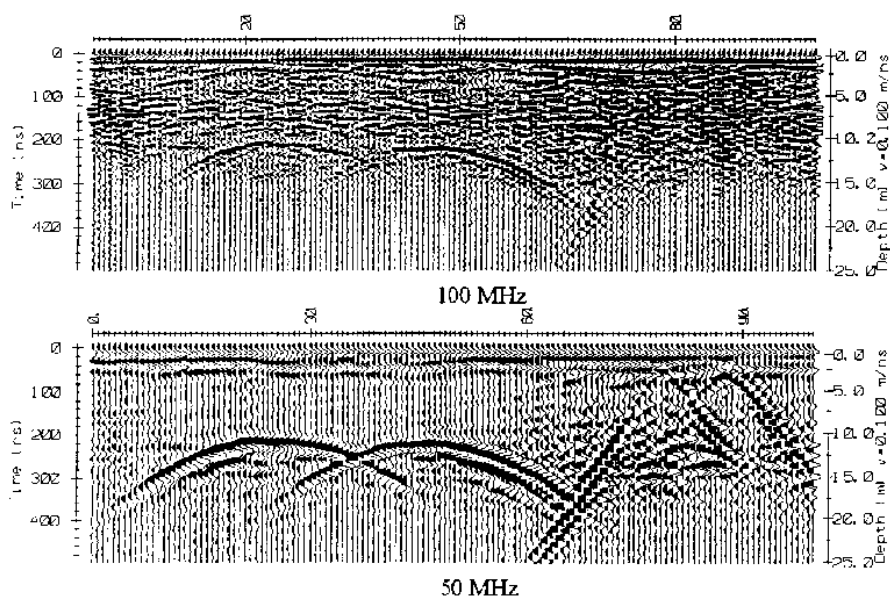
เมื่อ ΔZ คือ Spatial resolution

ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

2. Clutter limitation

Clutter ในการสำรวจ GPR สัญญาณของคลื่นเรดาร์ที่เดินทางกลับมาจากวัสดุที่มีความเป็นเนื้อเดียวในดินหรือหินจะมีการตอบสนองในระดับเล็กๆที่เกิดขึ้นจากรอยแตก รอยแยก ชั้นหินย่อยๆที่วางตัวในแนวนอน ชั้นดินที่มีลักษณะซ้อนเป็นแผ่น Clutter จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.14 จากรูปแสดงให้เห็นถึง clutter เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความถี่ ถ้าความถี่สูงเกินไปเราจะไม่สามารถเห็น โครงสร้างหลักได้ซึ่งจะต้องลด Clutter limitation สามารถประมาณได้จากสมการด้านล่าง ΔL Clutter dimension in host environment (Annan A.P., 2003)

$$f < \frac{30}{\Delta L \sqrt{\epsilon_r}} \text{ MHz} \quad 3.10$$



รูปที่ 3.14 ลักษณะของ clutter ที่ได้จากความถี่ 100 MHz และ 50 MHz (Annan A.P., 2003)

3. ความลึกของการสำรวจ (exploration depth)

ความลึกของการสำรวจเป็นความลึกที่มั่นใจว่าจะสามารถตรวจหาวัตถุเจอ ซึ่งสามารถประมาณได้จากสมการด้านล่าง (Annan A.P., 2003)

$$f < \frac{1200\sqrt{\epsilon_r - 1}}{D} \text{ MHz} \quad 3.11$$

บทที่ 4

ผลและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการสำรวจด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและการสำรวจด้วยวิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน (GPR) ในพื้นที่ นิคมอุตสาหกรรมฉลุง

4.1.1 ผลการสำรวจด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในพื้นที่ นิคมอุตสาหกรรมฉลุง

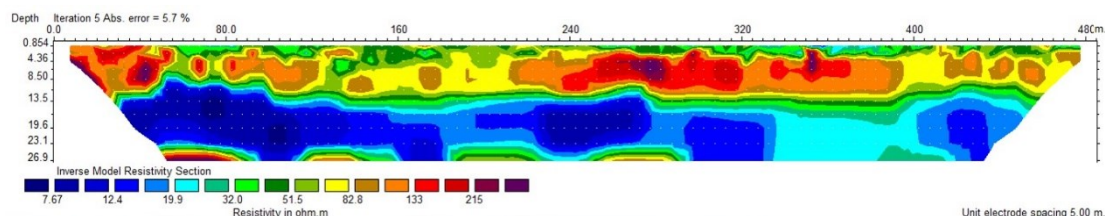
การประมวลผลวิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า

1. โหลดข้อมูลดิบ (raw data) จากเครื่อง Tetrameter SAS 1000 เข้ามายังโปรแกรม SAS 4000 Utilities และทำการแปลงไฟล์ จากไฟล์นามสกุล .s4k เป็นไฟล์นามสกุล .dat

2. นำไฟล์นามสกุล .dat ที่แปลงไฟล์เรียบร้อยแล้วเข้ามาอ่านในโปรแกรม RED2DINV โดยไปที่เมนู file > read data file

2.1 คูข้อมูลโดยเข้าไปที่เมนู inversion > least squares inversion

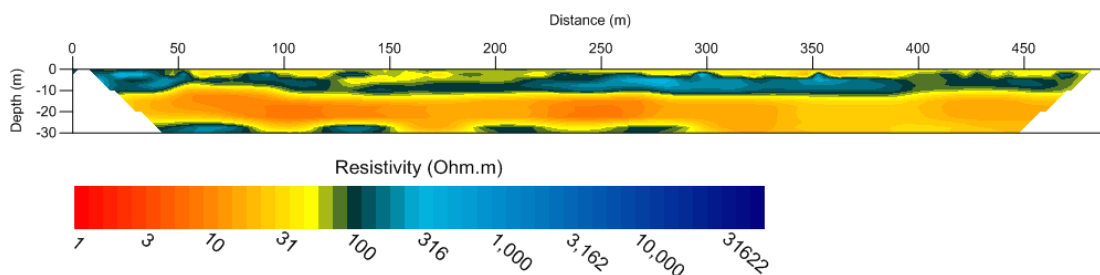
2.2 ปรับแก้ข้อมูลที่ผิดปกติจากค่าบริเวณข้างเคียง โดยเข้าไปที่เมนู Edit > Exterminate bad datum points และนำไฟล์ที่ปรับแก้แล้วมาอ่านใหม่อีกครั้ง ทำซ้ำข้อ 2.1 อีกรอบ ก็จะได้ดังรูปที่ 4.1



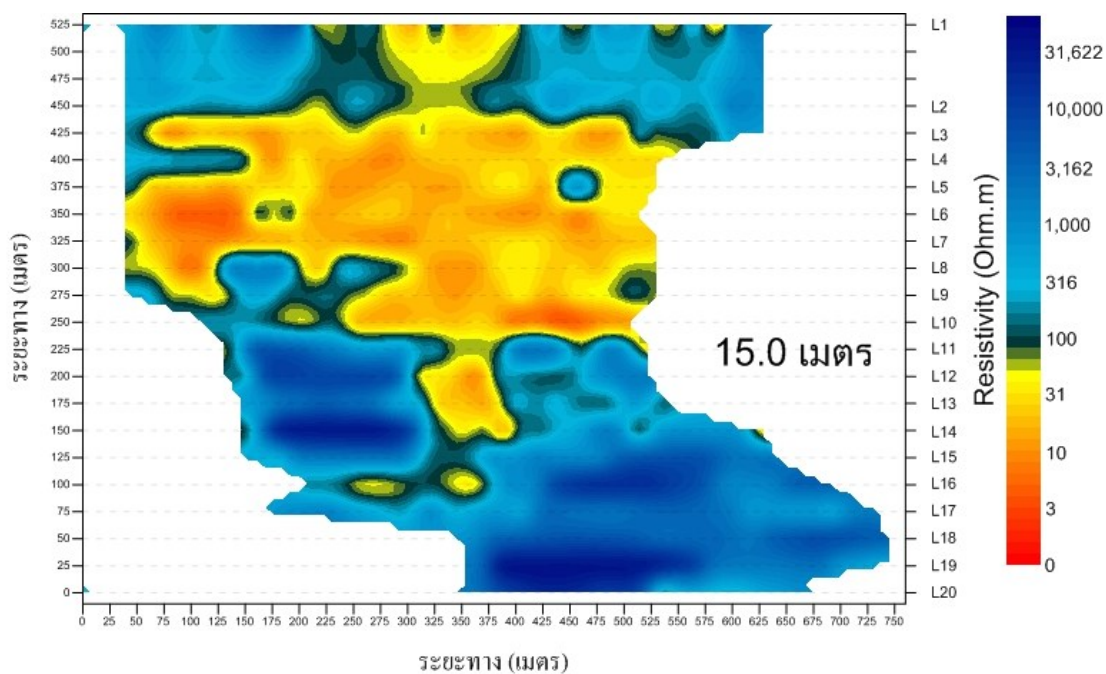
รูปที่ 4.1 ภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม RED2DINV.

3. นำผลที่ได้จากโปรแกรม RED2DINV. มาเข้าโปรแกรม Surfer 8 เพื่อแสดงแผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัดต่างๆดังแสดงในรูปที่ 4.2 และแผนภาพการ

กระจายตัวของค่าสภาพต้านทาน ไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ครอบคลุมพื้นที่สำรวจที่ระดับความลึกต่างๆดังตัวอย่างรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 ภาพตัวอย่างการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทาน ไฟฟ้าภายใต้แนววัด L7 ที่ได้จากโปรแกรม Surfer 8



รูปที่ 4.3 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทาน ไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ครอบคลุมพื้นที่สำรวจที่ระดับความลึก 15 เมตร

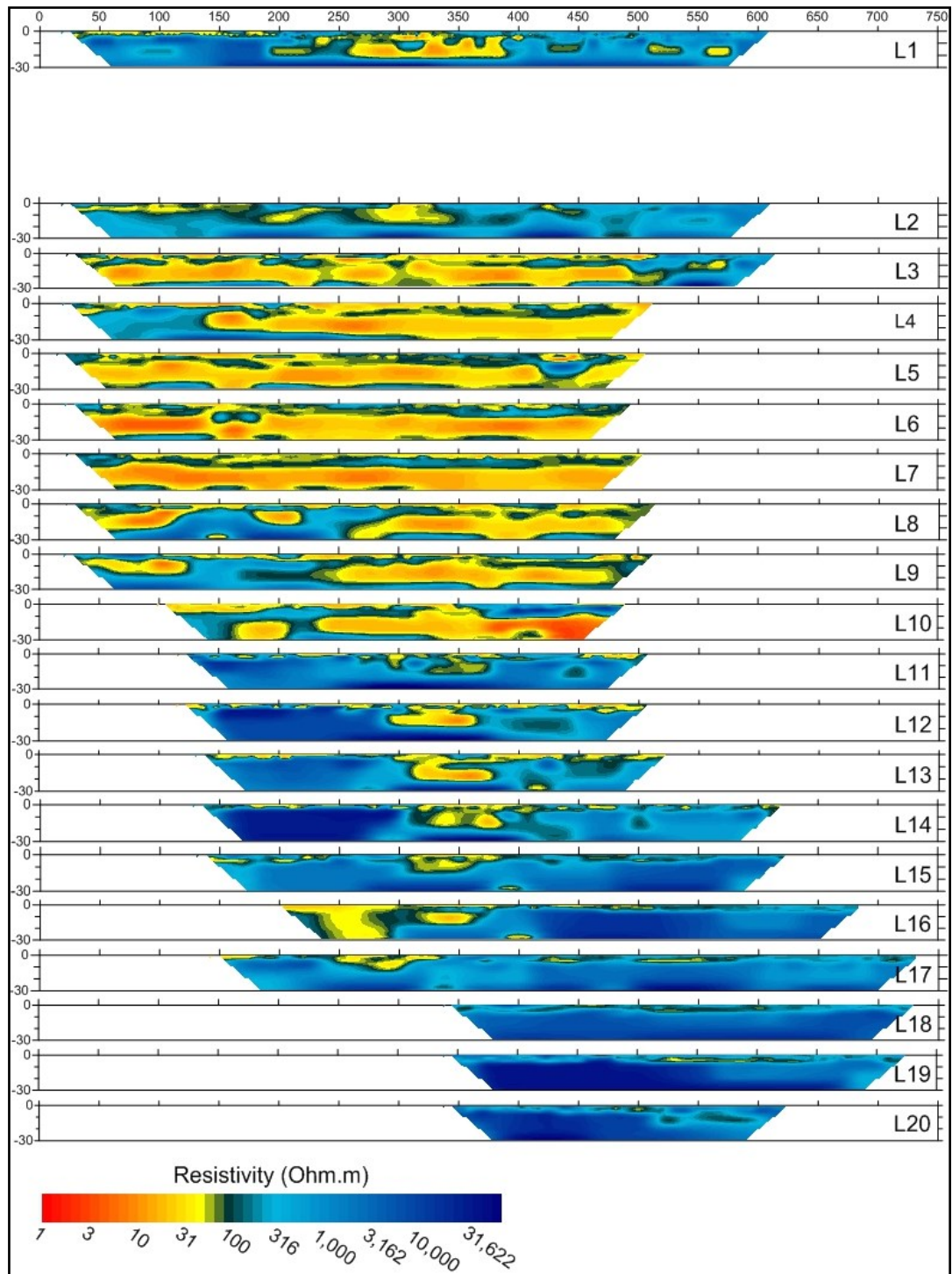
แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพด้านทานไฟฟ้า

ผลการสำรวจด้วยวิธีวัดค่าสภาพด้านทานไฟฟ้าทั้ง 20 แนววัด สามารถแปลความหมายลักษณะของชั้นดินได้เป็นสองกลุ่ม คือ บริเวณที่คาดว่าเป็นชั้นดินอ่อนมีค่าสภาพด้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า 40 โอห์ม-เมตร และบริเวณที่ไม่เป็นดินอ่อนมีค่าสภาพด้านทานไฟฟ้ามากกว่า 40 โอห์ม-เมตร พบดินอ่อนอยู่ในแนวสำรวจ L3-L10 ดินอ่อนมีความต่อเนื่องกันเกือบทั้งแนวสำรวจ และมีความลึกมากกว่า 30 เมตร ส่วนแนวสำรวจ L1, L2, L11, L12, L13, L14, L15, L16 และ L17 พบดินอ่อนเพียงบางช่วงของแนวสำรวจมีความกว้างประมาณ 100 - 200 เมตร แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงตำแหน่งและความลึกของดินอ่อนที่พบในแนวสำรวจต่างๆ

แนวสำรวจ	ตำแหน่งดินอ่อน (เมตร)	ความลึกจากผิวดิน (เมตร)	ความหนา (เมตร)
L1	200 – 400	1-3	20
L2	0 – 350	1-3	15
L3	34-500	1-3	>30
L4	150-500	1-3	>30
L5	34-500	1-3	>30
L6	34-500	1-3	>30
L7	34-500	1-3	>30
L8	34-225, 250-500	1-3	>30
L9	34-125, 250-500	1-3	>30
L10	100-450	1-3	>30
L11	300-375	1-3	15
L12	275-370	1-3	20

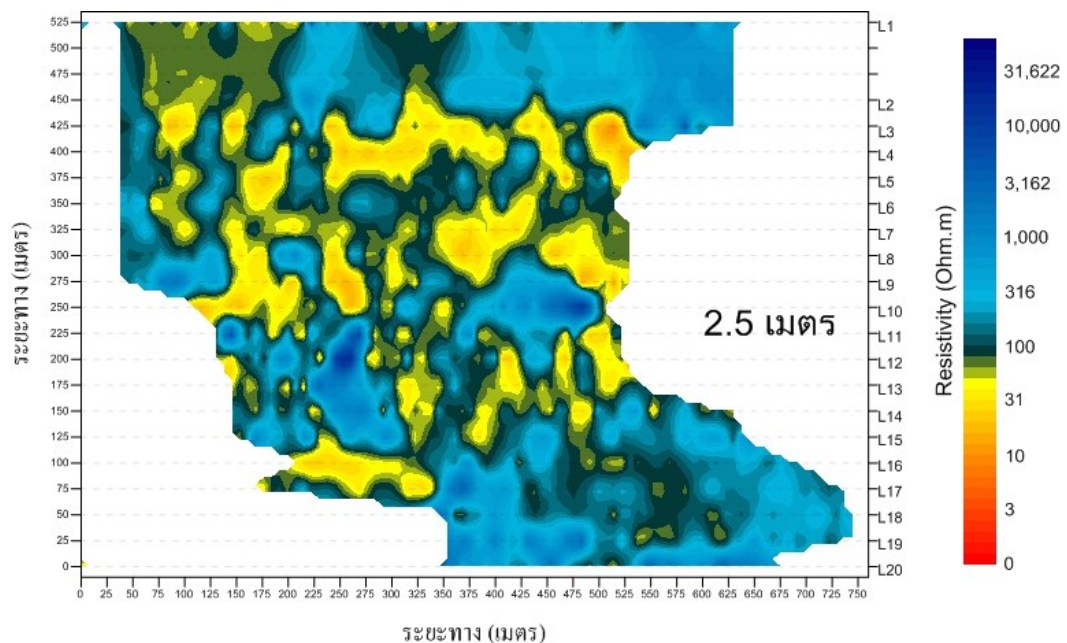
L13	300-375	1-3	20
L4	325-400	1-3	20
L15	300-375	1-3	20
L16	200-350	1-3	>30
L17	250-375	1-3	15
L18	ไม่พบชั้นดินอ่อน	-	-
L19	ไม่พบชั้นดินอ่อน	-	-
L20	ไม่พบชั้นดินอ่อน	-	-



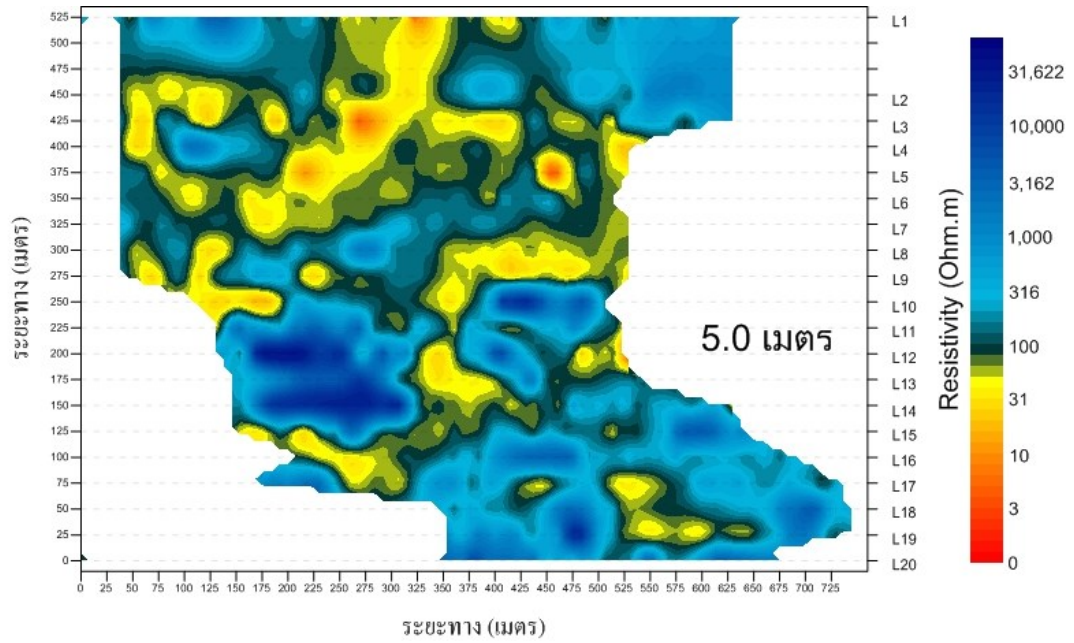
รูปที่ 4.4 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20

แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0, 17.5, 20.0, 22.5 และ 25.0 เมตร

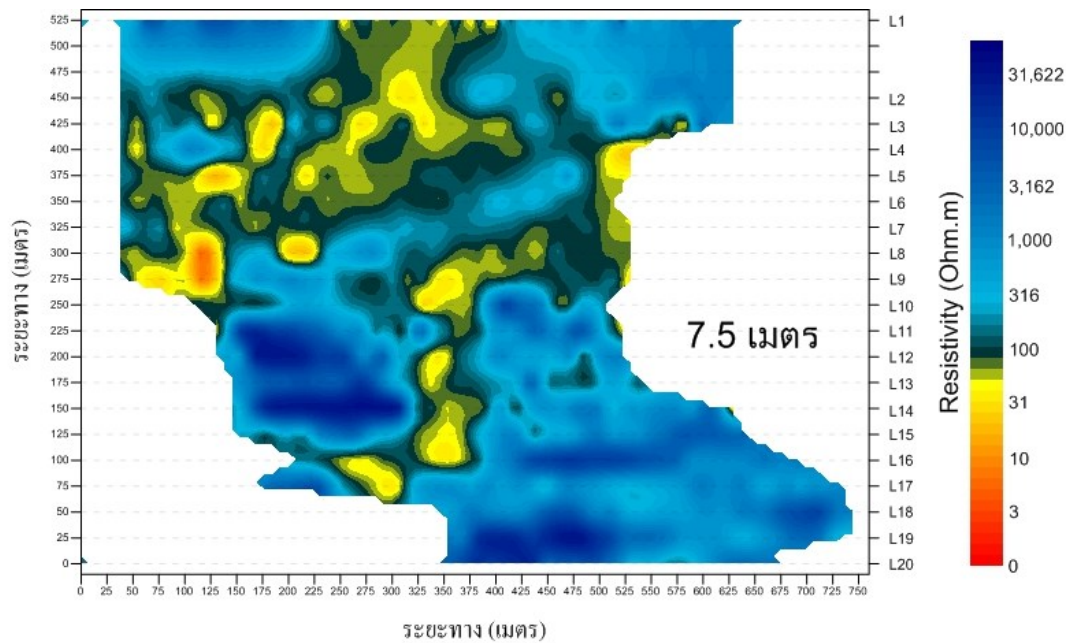
ผลแผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึกต่างๆ พบว่าที่ความลึก 2.5, 5.0, 7.5 และ 10.0 เมตร ดินอ่อนมีการกระจายตัวสลับกับส่วนที่ไม่เป็นดินอ่อนทั่วทั้งพื้นที่ศึกษา แสดงดังรูปที่ 4.5-4.8 ส่วนที่ความลึก 12.5, 15.0, 17.5, 20.0, 22.5 และ 25.0 เมตร พบว่าขอบเขตของดินอ่อนสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนและมีความต่อเนื่องเป็นแอ่งเดียว แสดงดังรูปที่ 4.9-4.14



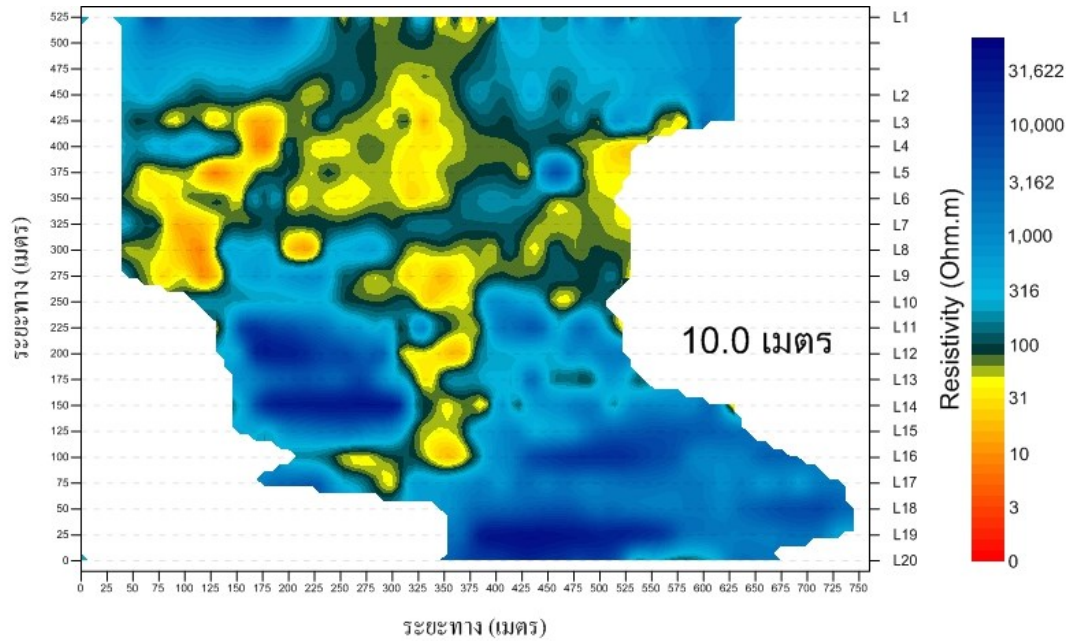
รูปที่ 4.5 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 2.5 เมตร



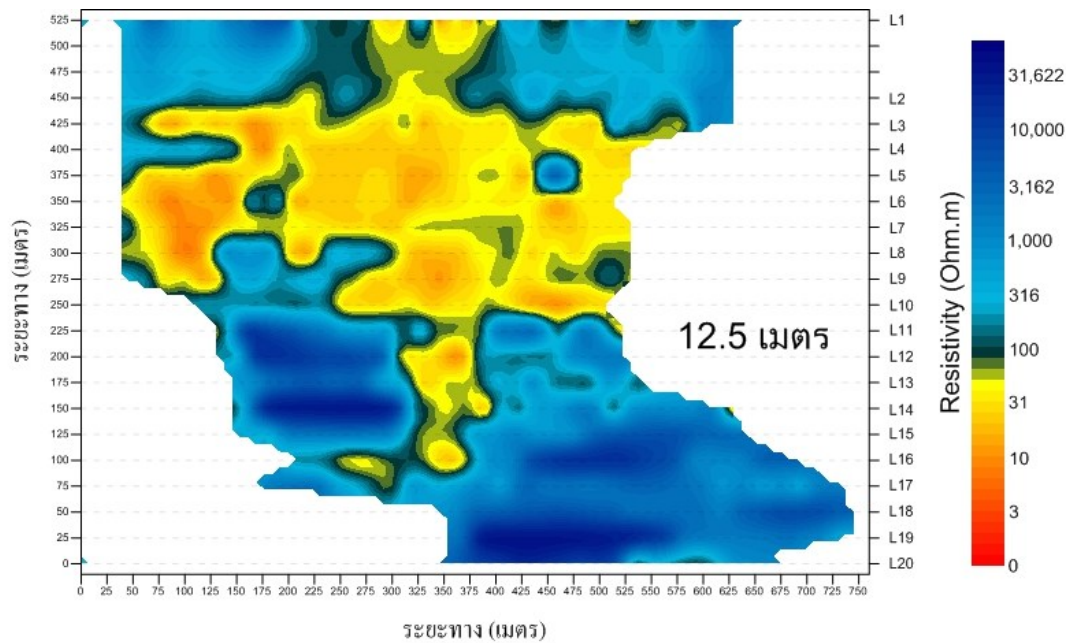
รูปที่ 4.6 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 5.0 เมตร



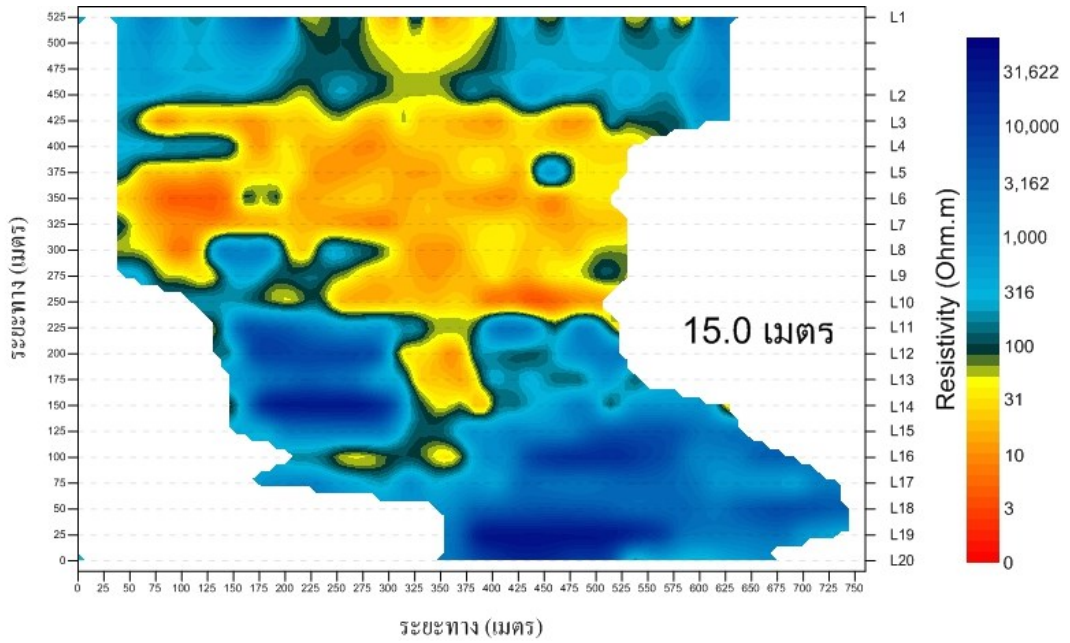
รูปที่ 4.7 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 7.5 เมตร



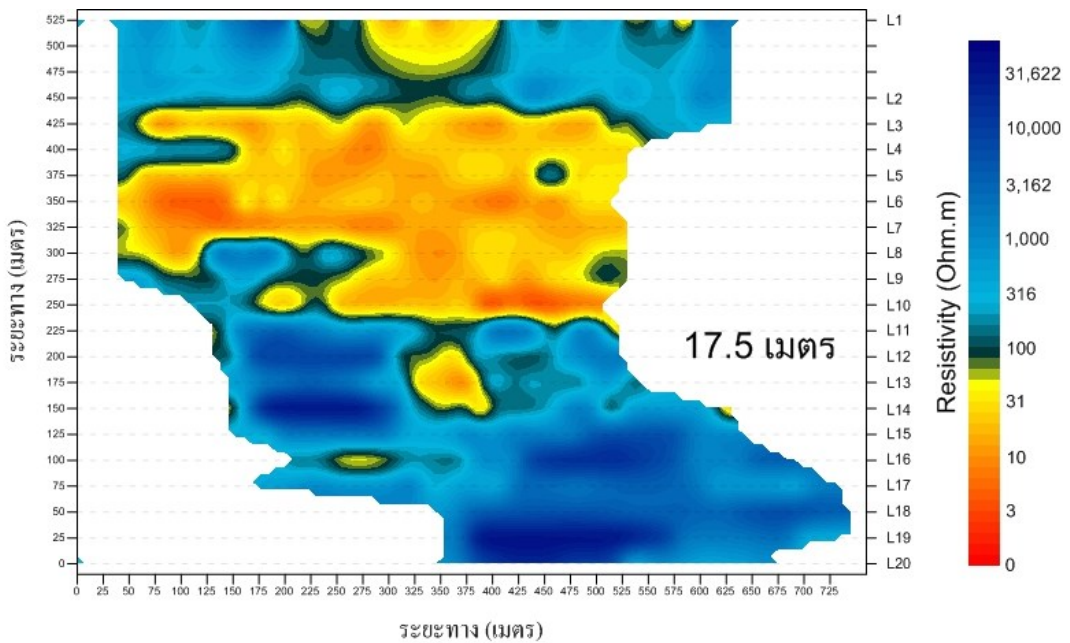
รูปที่ 4.8 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 10.0 เมตร



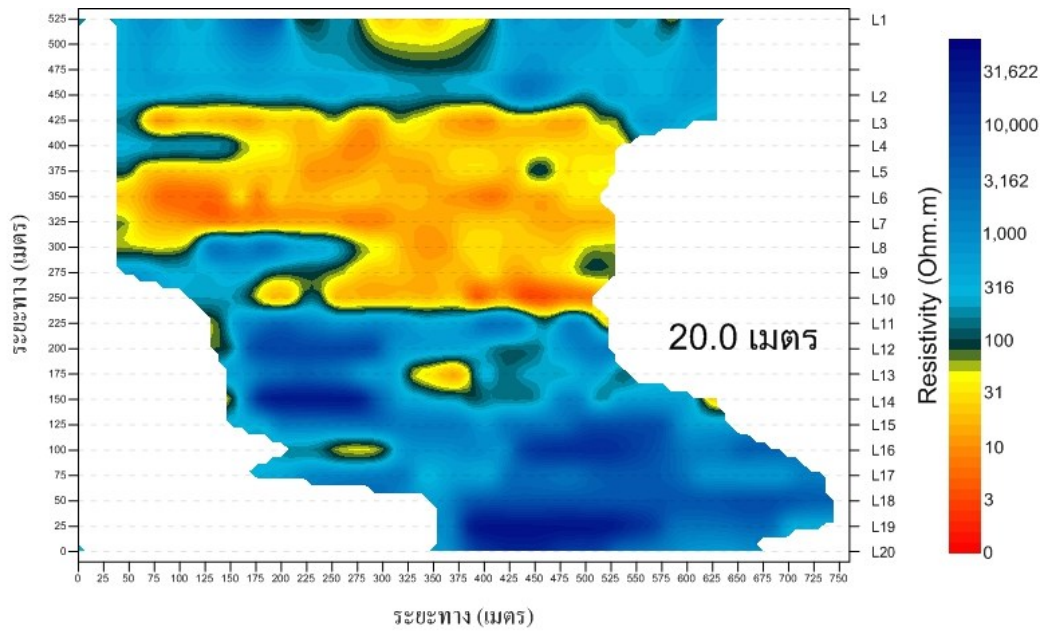
รูปที่ 4.9 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 12.5 เมตร



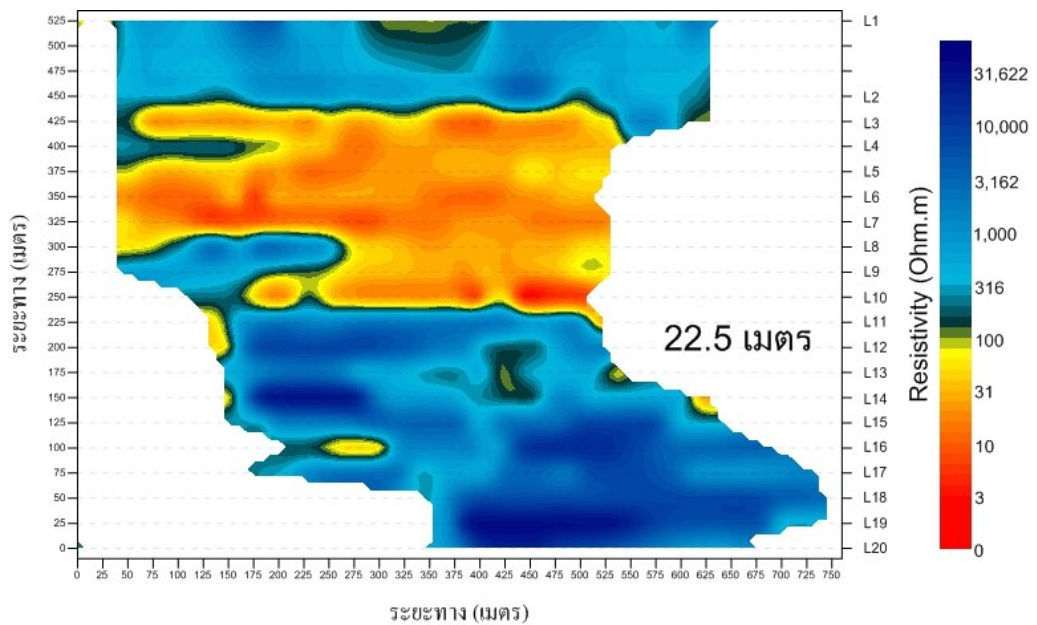
รูปที่ 4.10 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 15.0 เมตร



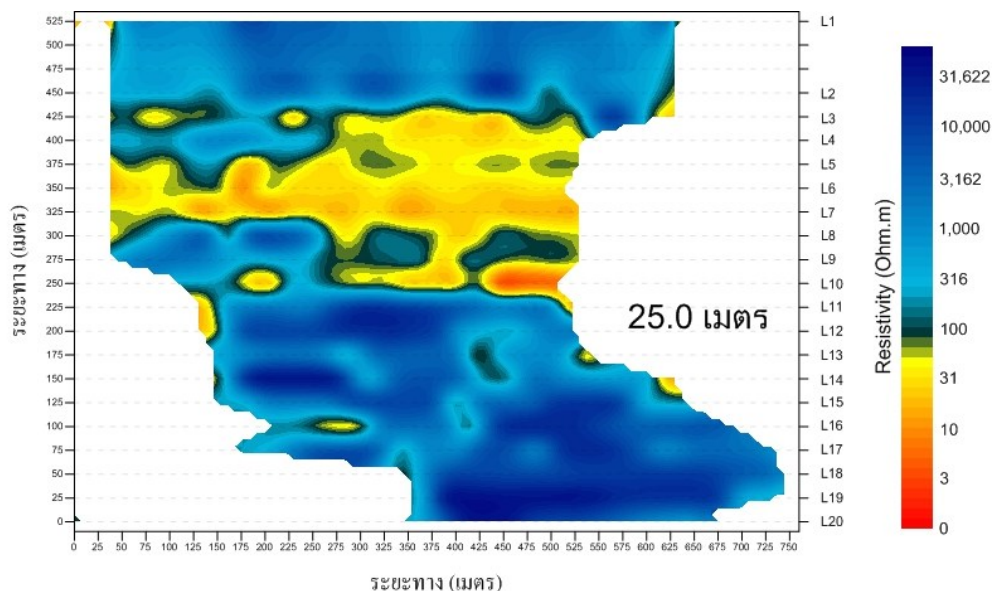
รูปที่ 4.11 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 17.5 เมตร



รูปที่ 4.12 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 20.0 เมตร



รูปที่ 4.13 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 22.5 เมตร

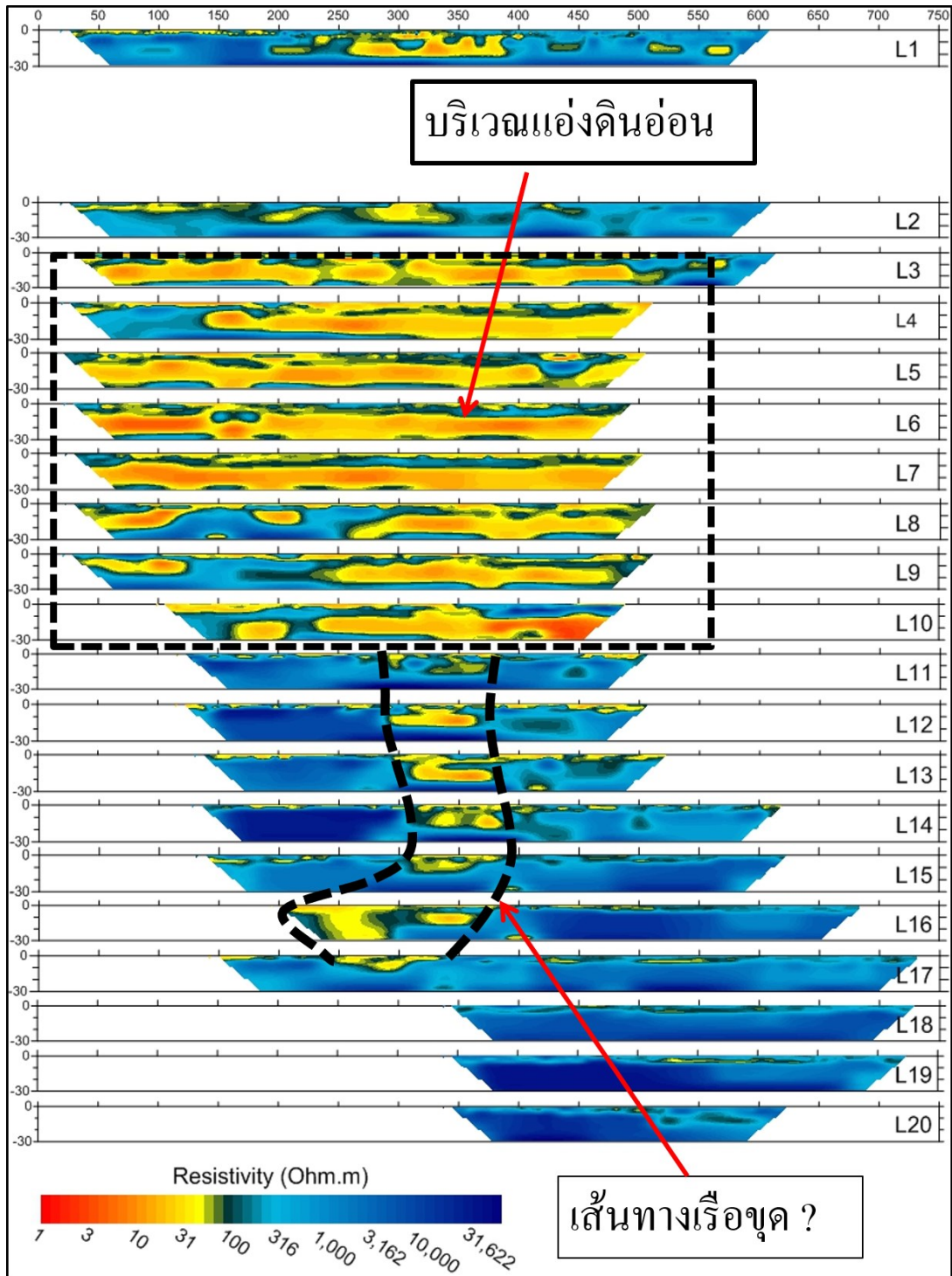


รูปที่ 4.14 แผนภาพการกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าภายใต้แนววัด L1-L20 ที่ระดับความลึก 25.0 เมตร

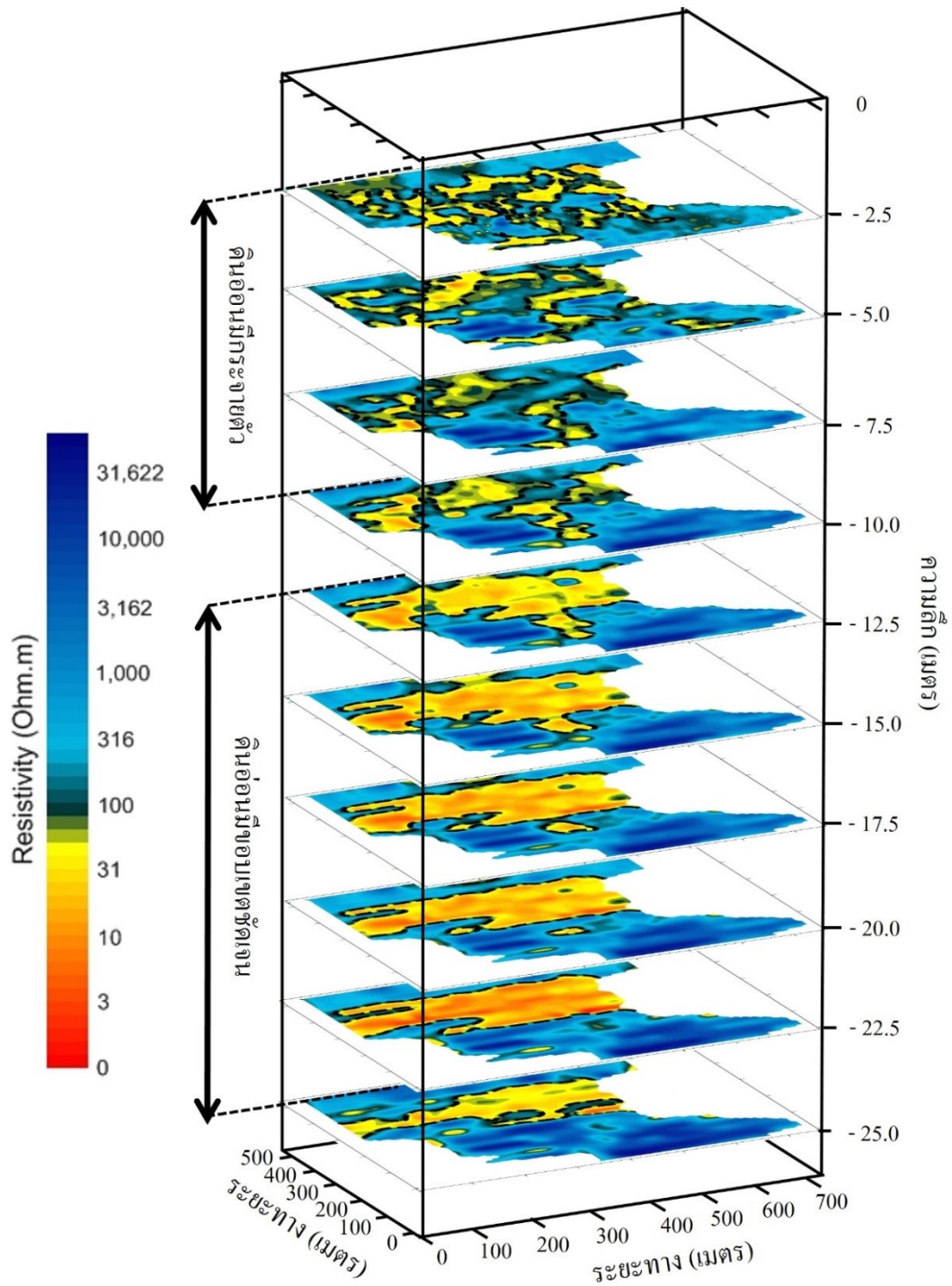
วิเคราะห์ผล

ผลบริเวณดินอ่อนที่พบในแนว L11-L17 ที่มีลักษณะเป็นร่องที่มีความกว้างประมาณ 100-150 เมตร คาดว่าน่าจะมีการมีความสัมพันธ์กับเส้นทางเดินของเรือขุดแร่ดิบุกในอดีต เนื่องจากบริเวณนี้เคยมีการทำเหมืองแร่แบบเรือขุดมาก่อน และบริเวณที่เป็นดินอ่อนในแนวสำรวจ L3-L10 ที่เป็นลักษณะแอ่งสะสมดินอ่อนที่มีความลึกมากกว่า 30 เมตร คาดว่าน่าจะมีการมีความสัมพันธ์กับการทำเหมืองแร่ดิบุกแบบเรือขุดในอดีตเช่นกัน แสดงดังรูปที่ 4.15

นอกจากนี้ข้อมูลของแผนที่การกระจายตัวของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ความลึก 2.5, 5.0, 7.5, และ 10.0 เมตร ที่พบดินอ่อนกระจายตัวสลับกับบริเวณที่ไม่เป็นดินอ่อนอยู่ทั่วทั้งพื้นที่ศึกษา และขอบเขตของดินอ่อนมีความต่อเนื่องเป็นแอ่งเดียวสามารถเห็นได้ชัดเจนที่ความลึก 12.5, 15.0, 17.5 และ 25.0 เมตร คาดว่าเป็นผลที่ได้จากการขบวนการของการทำเหมืองแร่ดิบุกแบบใช้เรือขุดซึ่งการทำเหมืองแร่ด้วยวิธีนี้จะทำการเปิดหน้าดินจนเป็นหลุมลักษณะขนาดใหญ่เพื่อนำดินมาผ่านกระบวนการคัดแยกสินแร่ ส่วนดินที่ไม่ต้องการก็จะถูกนำไปถมในหลุมน้ำที่ได้ทำการขุดเสร็จแล้วก่อนหน้านี้ กระบวนการนี้จะเป็นการขุดและถมกลับไปเรื่อยๆตามเส้นทางขุดแร่ แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 บริเวณตำแหน่งดินอ่อนและดินอ่อนช่วงแคบๆทางตอนใต้ของพื้นที่ศึกษาที่คาดว่าอาจเป็นเส้นทางของเรือขุดแร่ในอดีต

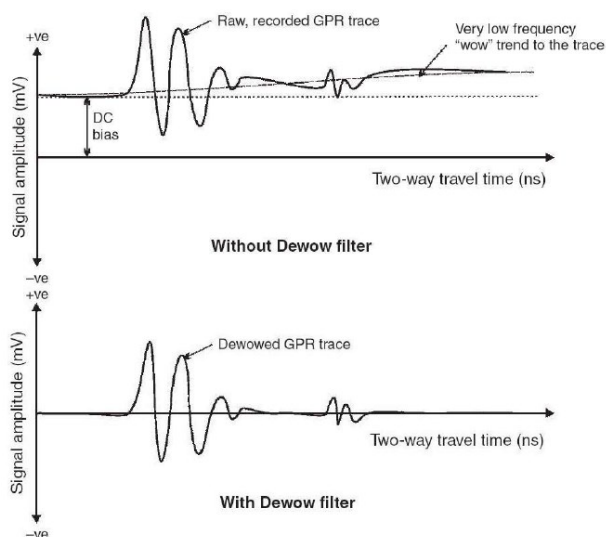


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของดินอ่อนที่ความลึกต่างๆ

4.1.2 ผลการสำรวจด้วยวิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน (GPR) ในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมลุง

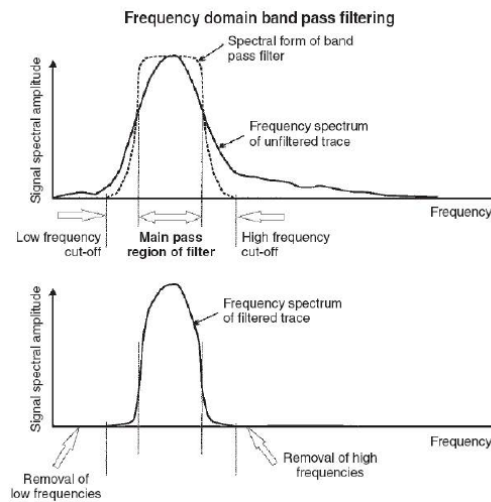
การเก็บข้อมูล GPR สัญญาณที่ได้จากภาคสนามนั้นยังมีความไม่ถูกต้องอยู่ เนื่องจากในการเก็บข้อมูลนั้น ได้มีสัญญาณอื่นๆที่ไม่ต้องการปะปนเข้ามาด้วยซึ่งเกิดได้จากหลายปัจจัย ทั้งสัญญาณรบกวนที่ไม่ใช่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกส่งออกไป เช่น คลื่นวิทยุ คลื่น โทรศัพท์ คลื่นอากาศ (direct wave) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลจากความขรุขระบนผิวดิน การอ้อมตัวของสัญญาณที่เกิดจากตัวอุปกรณ์ และปัจจัยอื่นๆ ดังนั้นจะต้องทำการกำจัดหรือลดสัญญาณที่ไม่เกี่ยวข้องเหล่านี้ออกไปให้ได้มากที่สุดก่อนนำไปแปลความโดยใช้โปรแกรม Reflexw Version 8.0.2 ซึ่งมีขั้นตอนต่างๆดังต่อไปนี้

1. Dewow filtering เป็นการกรองข้อมูลความถี่ต่ำและการเกิด DC bias ในข้อมูล ซึ่งจะทำให้เกิดการเบี่ยงเบนอย่างเป็นระบบของค่าหนึ่งจากค่าอ้างอิง แสดงดังรูป 4.17



รูปที่ 4.17 รูปบนแสดงความถี่ต่ำและการเกิด DC bias ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนอย่างเป็นระบบของค่าหนึ่งจากแกนของเวลาและรูปล่างแสดงสัญญาณที่ได้หลังจากการปรับแก้ (Nurul Jihan Farhah Bostanudin, 2013)

2. Band-pass filter เป็นรูปแบบการกรองข้อมูลโดยการเลือกช่วงความถี่ที่ต้องการ เนื่องจากความถี่ที่เข้ามายังตัวรับสัญญาณไม่ได้มีแค่ช่วงความถี่จากคลื่น GPR เพียงอย่างเดียว แต่มีความถี่อื่นๆที่ไม่เกี่ยวข้องปะปนเข้ามาด้วย ดังนั้นจะต้องทำการกรองความถี่เหล่านี้ทิ้งออกไปโดย Band-pass filter จะเป็นการเลือกช่วงของความถี่ที่ต้องการส่วนความถี่ที่สูงและต่ำกว่าช่วงที่ถูกเลือกจะถูกกรองทิ้งออกไปแสดงดังรูป 4.18

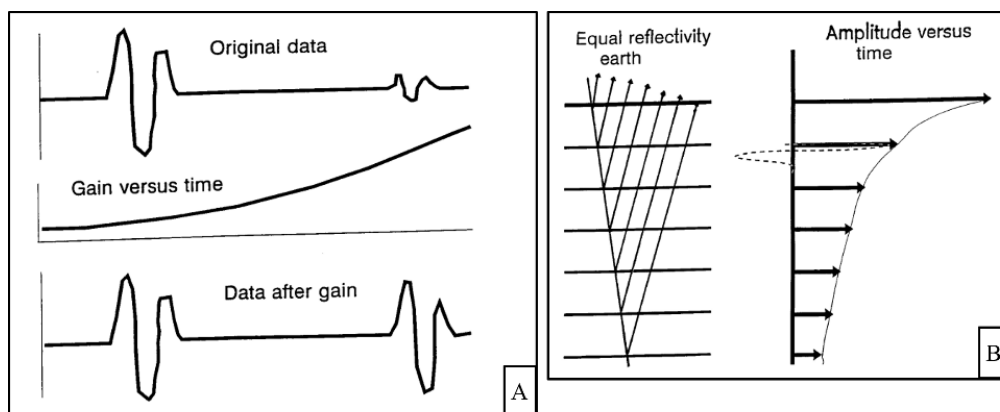


รูปที่ 4.18 ลักษณะของ frequency spectrum ที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการกรองความถี่ (Bostanudin, 2013)

3. Time zero correction เป็นการตั้งเวลาของคลื่นแรกของสัญญาณสะท้อนให้มาอยู่ที่ตำแหน่ง 0 เนื่องจากการเดินทางของคลื่น direct wave ที่เดินทางผ่านอากาศมาถึงก่อนคลื่นสะท้อนทำให้คลื่นแรกของสัญญาณสะท้อน ไม่อยู่บนตำแหน่งอ้างอิงบนผิวดิน โดยจะต้องทำการย้ายให้มาอยู่ที่ตำแหน่งที่ถูกต้องบนผิวดิน

4. Background removal เป็นการลบล้างสัญญาณที่เป็นค่าภูมิหลังเฉลี่ย เพื่อเน้นให้เห็นความผิดปกติทางแนวโค้งของโครงสร้างชั้นดิน

5. Gain function เป็นการขยายสัญญาณที่อยู่ในระดับลึกๆ ให้มีความชัดขึ้น เนื่องจากแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนจะลดลงตามเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ไป ดังนั้นเพื่อให้สัญญาณสะท้อนที่อยู่ในระดับลึกมีความชัดเจนขึ้นจะต้องทำการขยายสัญญาณซึ่งอาจประมาณได้ว่าแอมพลิจูดลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล แสดงดังรูป 4.19

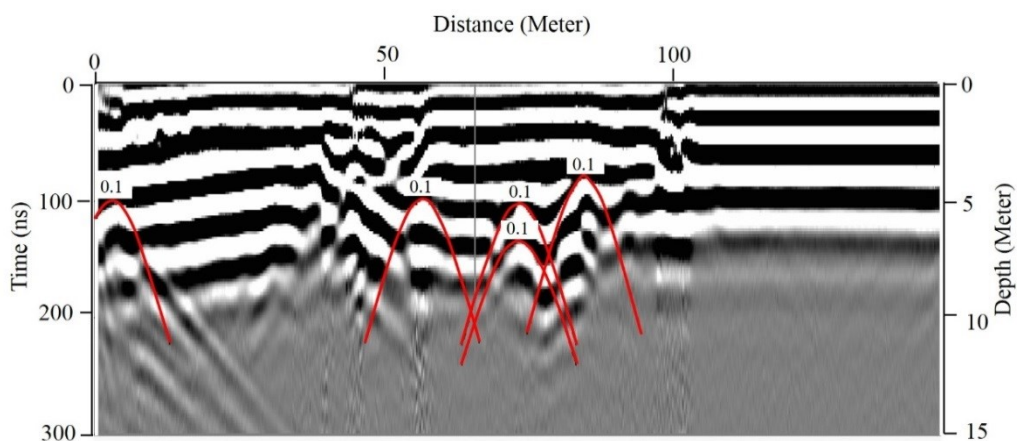


รูปที่ 4.19 A ลักษณะก่อนและหลังการขยายสัญญาณและ B สัญญาณแอมพลิจูดที่ลดลงตามเวลา (Annan, 2003)

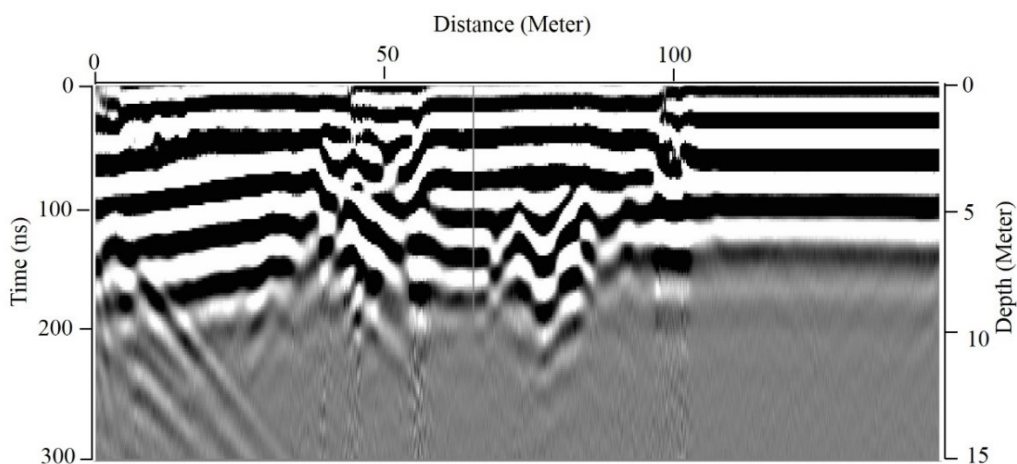
6. Running average เป็นการปรับปรุงสัญญาณในแนวด้านข้างให้มีความชัดเจนขึ้น

7. การหาความเร็ว โดยใช้รูปแบบของสัญญาณคลื่นสะท้อนที่เป็นไฮเพอร์โบลาใน

แผนภาพเรดาร์แกรม แสดงดังรูปที่ 4.20

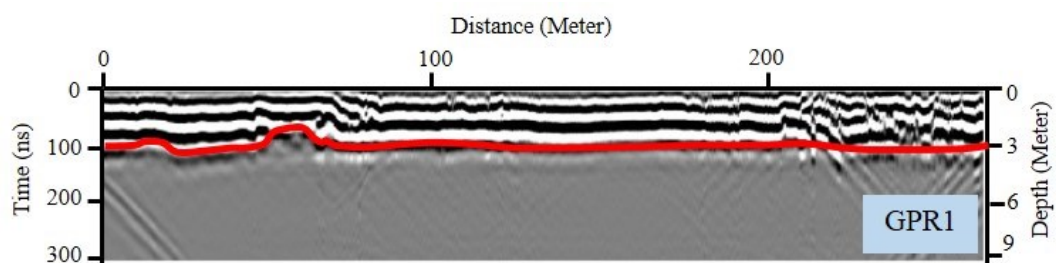


รูปที่ 4.20 การหาความเร็วจากสัญญาณคลื่นสะท้อนเป็นรูปไฮเพอร์โบลาในแผนภาพเรดาร์แกรมในแนวสำรวจ GPR5



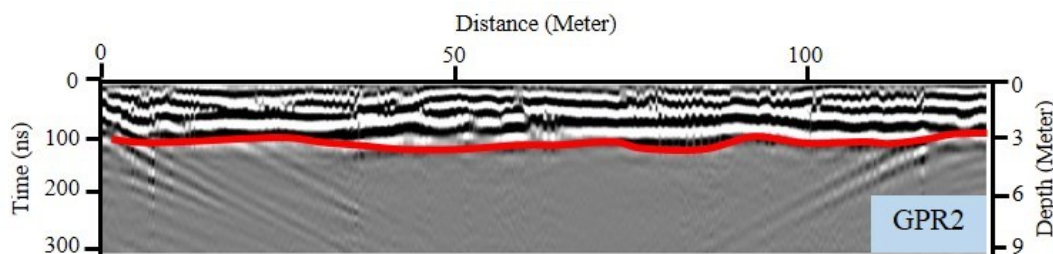
รูปที่ 4.21 แผนภาพเรดาร์แกรมที่ผ่านการประมวลผลแล้วในแนวสำรวจ GPR5

แนวสำรวจ GPR1 พบชั้นดินที่ที่มีการลดของสัญญาณสูงที่ความลึก 3 เมตร และพบสัญญาณรบกวนที่ไม่ได้มาจากโครงสร้างจริงใต้ผิวดินที่ระยะ 0-30 เมตร และ 200-250 เมตร (อาจเป็นสัญญาณที่สะท้อนมาจากท่อหรือน้ำคอนกรีตที่วางตัวตั้งฉากกับแนวสำรวจซึ่งอยู่ที่ต้นแนวและปลายแนว) โดยสามารถเห็นได้จากสัญญาณเอียงที่บริเวณช่วงต้นแนวและช่วงปลายของแนวสำรวจ



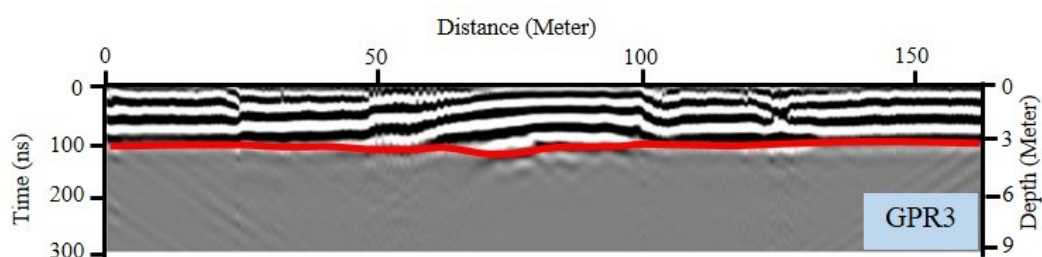
รูปที่ 4.22 ผลแนวสำรวจ GPR1 โดยค่าความลึกคำนวณจากความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายใต้แนววัดเท่ากับ 0.07 m/ns

แนวสำรวจ GPR2 พบชั้นดินที่มีการลดของสัญญาณสูงที่ความลึกประมาณ 3 เมตร และพบสัญญาณรบกวนที่ไม่ได้มาจากโครงสร้างจริงใต้ผิวดินที่ระยะ 0-50 เมตร และ 80-140 เมตร



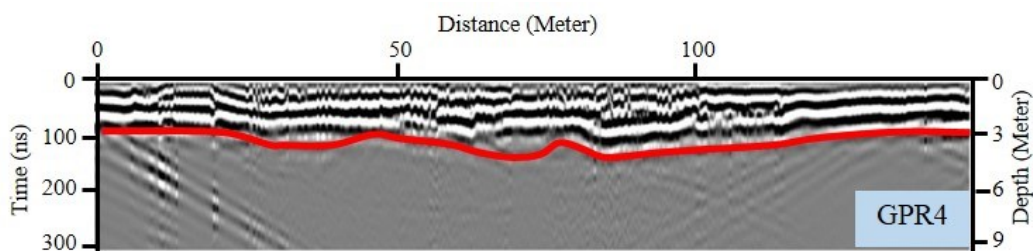
รูปที่ 4.23 ผลแนวสำรวจ GPR2 โดยค่าความลึกคำนวณจากความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายใต้แนววัดเท่ากับ 0.07 m/ns

แนวสำรวจ GPR3 พบชั้นดินที่มีการลดของสัญญาณสูงที่ความลึกประมาณ 3 เมตร ที่ระยะ 50-100 พบสัญญาณที่มีลักษณะโค้งนูนขึ้น และพบสัญญาณรบกวนที่ไม่ได้มาจากโครงสร้างจริงใต้ผิวดินที่ระยะ 0-40 เมตร และ 125-160 เมตร



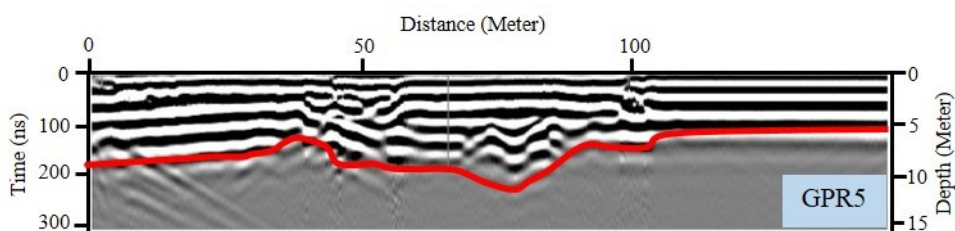
รูปที่ 4.24 ผลแนวสำรวจ GPR3 โดยค่าความลึกคำนวณจากความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายใต้แนววัดเท่ากับ 0.07 m/ns

แนวสำรวจ GPR4 พบชั้นดินที่มีการลดของสัญญาณสูงที่ความลึกประมาณ 3 เมตร พบชั้นดินมีลักษณะเอียงเข้าหาตอนกลางของแนวสำรวจจากทั้งสองฝั่ง และพบสัญญาณรบกวนที่ไม่ได้มาจากโครงสร้างจริงใต้ผิวดินที่ระยะ 0-40 เมตร และ 80-150 เมตร



รูปที่ 4.25 ผลแนวสำรวจ GPR4 โดยค่าความลึกคำนวณจากความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายใต้แนววัดเท่ากับ 0.07 m/ns

แนวสำรวจ GPR5 พบชั้นดินที่มีการลดของสัญญาณสูงที่ความลึกประมาณ 5 เมตร ยกเว้นที่ระยะ 40-100 เมตร ที่มีความลึกของสัญญาณลึกลงไปถึง 10 เมตร พบชั้นดินแข็งที่ระยะ 0-40 เมตร โดยชั้นดินมีลักษณะลาดลงไปทางจุดเริ่มต้นของแนวสำรวจ ชั้นดินที่พบมีลักษณะคล้ายร่องทางน้ำหรือลำคลองในอดีต อยู่ที่ระยะ 40-100 เมตร โดยเห็นได้จากสัญญาณการลดทอนที่มีค่าต่ำกว่าบริเวณอื่นซึ่งทำให้ได้ความลึกถึง 10 เมตร ที่ตำแหน่ง 100-150 เมตร พบชั้นดินที่มีลักษณะราบเรียบ และพบสัญญาณรบกวนที่ไม่ได้มาจากโครงสร้างจริงใต้ผิวดินที่ระยะ 0-40 เมตร

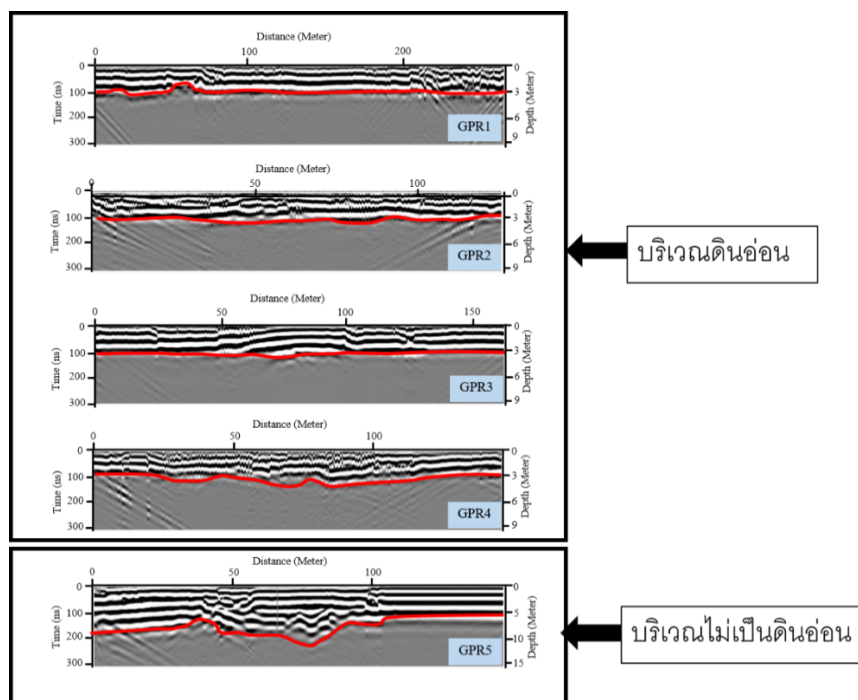


รูปที่ 4.26 ผลแนวสำรวจ GPR5 โดยค่าความลึกคำนวณจากความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายใต้แนววัดเท่ากับ 0.10 m/ns

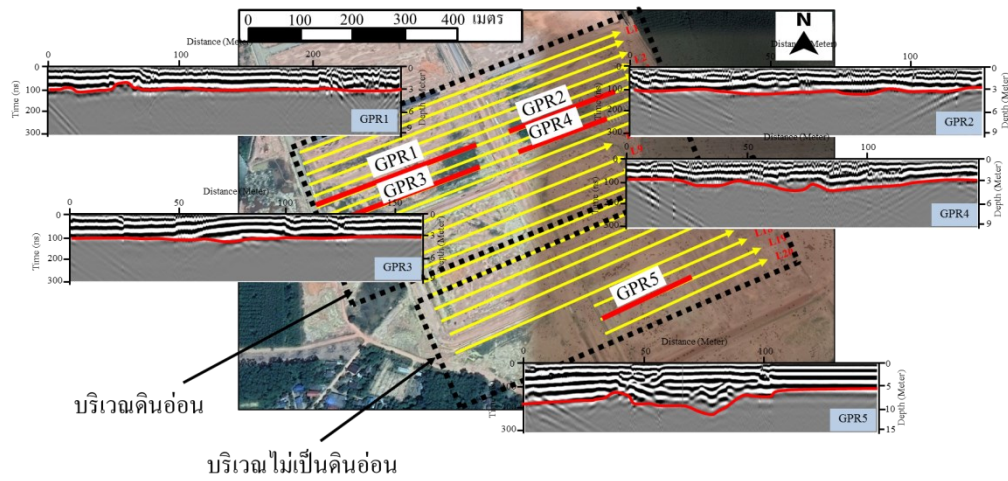
วิเคราะห์ผล GPR ในพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ ๓๑

เมื่อทำการเปรียบเทียบแนวสำรวจ GPR1-GPR4 ที่แนวสำรวจอยู่ในบริเวณขอบเขตของดินอ่อนกับแนวสำรวจ GPR5 ที่อยู่ในบริเวณไม่เป็นดินอ่อนพบความแตกต่างของการ

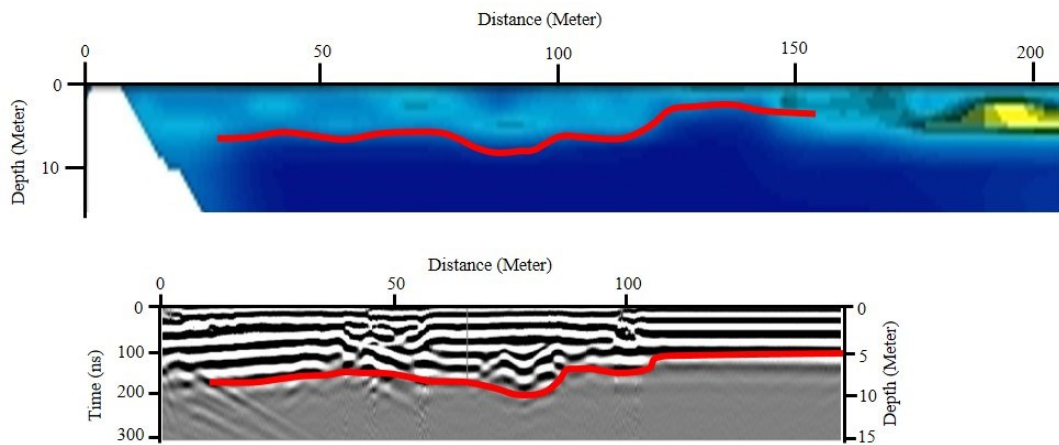
ลวดทอนชัดเจน แสดงรูปที่ 4.27-4.28 สำหรับแนวสำรวจ GPR5 ได้ความลึกของสัญญาณมากกว่า แต่ลักษณะของการลวดทอนของสัญญาณจากบริเวณที่เป็นดินอ่อนกับบริเวณไม่เป็นดินอ่อนมีลักษณะที่เหมือนกัน ดังนั้นในการระบุขอบเขตของดินอ่อนด้วยวิธี GPR ก่อนข้างคลุมเครือหากไม่มีข้อมูลบ่งชี้หรือมีการสำรวจด้วยวิธีอื่นทางธรณีฟิสิกส์ร่วมด้วย แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการสำรวจครั้งนี้เพียงพอที่จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของความลึกที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีการลวดทอนอย่างรวดเร็วในพื้นที่ดินอ่อน นอกจากนี้ที่แนวสำรวจ GPR1, GPR2, GPR3 และ GPR4 ชั้นดินที่ระดับความลึก 0-3 เมตร เป็นดินถมที่เกิดจากการขุดดินอ่อนเดิมออกแล้วนำดินอื่นที่ไม่เป็นดินอ่อนมาถมแทน ส่วนแนว GPR5 เป็นบริเวณที่ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงชั้นดิน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ความแตกต่างของความลึกที่ได้จากการลวดทอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่มาก เมื่อเปรียบเทียบแนวสำรวจ GPR5 ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงชั้นดินกับวิธี ERT ในแนวสำรวจ L19 พบว่ามีความสอดคล้องกันอย่างมาก แสดงดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบของการลวดทอนระหว่างแนวสำรวจ GPR1-GPR5 ที่อยู่ในบริเวณของดินอ่อนและแนวสำรวจ GPR5 ที่ไม่ได้อยู่ในบริเวณของดินอ่อน



รูปที่ 4.28 ผลของ GPR ในบริเวณดินอ่อน (GPR1-GPR4) และผลของ GPR ในบริเวณไม่เป็นดินอ่อน (GPR5)



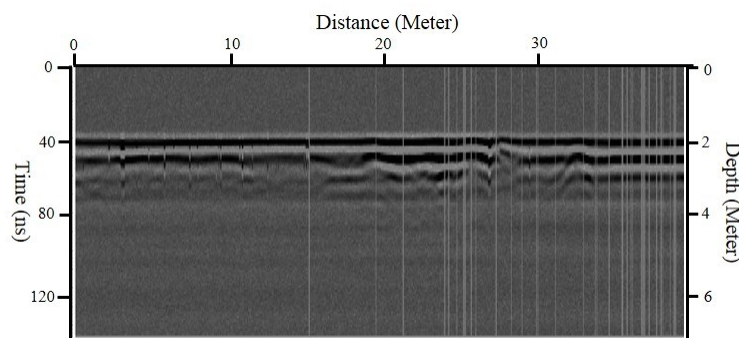
รูปที่ 4.29 การเปรียบเทียบระหว่างการสำรวจด้วยวิธี GPR ในแนว GPR5 กับ ERT ในแนวสำรวจ L19

4.2 ผลการสำรวจการทรุดตัวของถนนบริเวณพื้นที่เทศบาลนครหาดใหญ่ด้วยวิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน

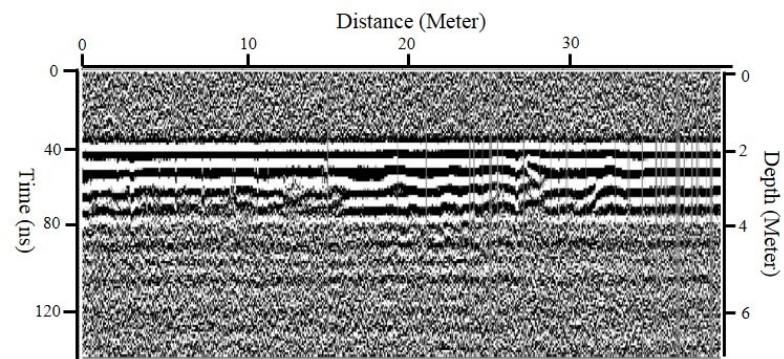
การประมวลผลข้อมูล GPR บริเวณพื้นที่เทศบาลนครหาดใหญ่ด้วยวิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน

1. Dewow filtering (timewindo = 20 ns)
2. Band-pass filter (bandpassbutterwort > low cutoff = 40 MHz, upper cutoff = 178 MHz)
3. Time zero correction (move time = 34 ns)
4. Background removal (start time = 0 ns, end time = 130 ns)
5. Gain function (normalize > window length = 0, scaling value = 1, max. gain = 10000, max. normalize value = 32000)
6. Running average (average traces = 3, start time = 0 ns, end time = 130 ns)
7. การหาความเร็ว ฟังก์ชันไฮเพอร์โบล่า ($v = 0.10$ m/ns)

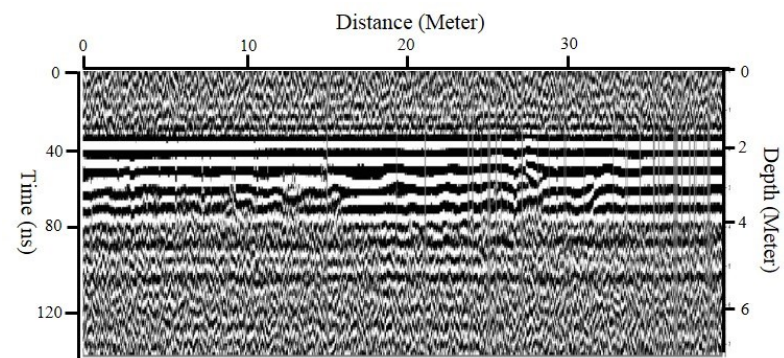
ตัวอย่างผลที่ได้หลังจากการผ่านกระบวนการในทำการกรองข้อมูลในแนวสำรวจ Y14 แสดงดังรูปที่ 4.30-4.37



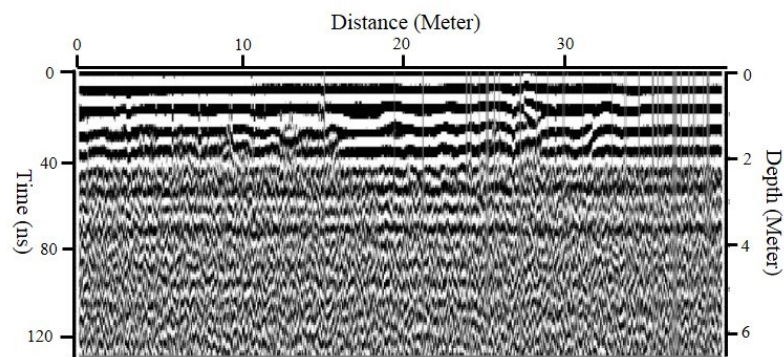
รูปที่ 4.30 ข้อมูลดิบ (raw data) ก่อนการปรับแก้ข้อมูล



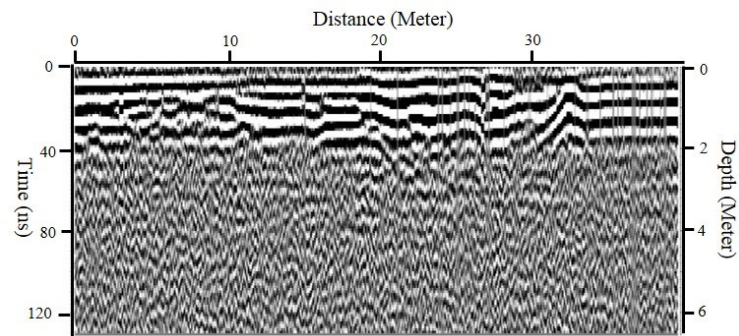
รูปที่ 4.31 ผลที่ได้จากการทำ Dewow filtering



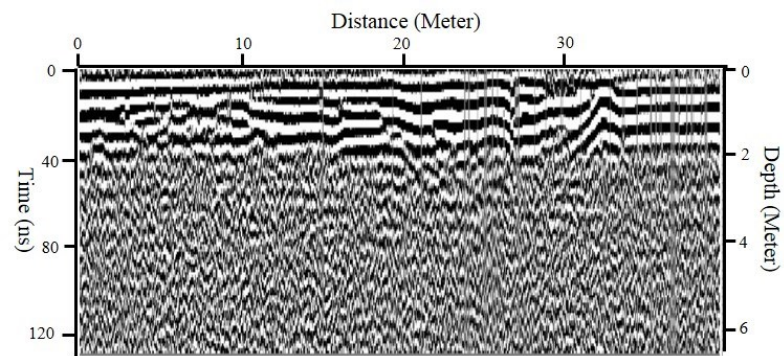
รูปที่ 4.32 ผลที่ได้จากการทำ Band-pass filter



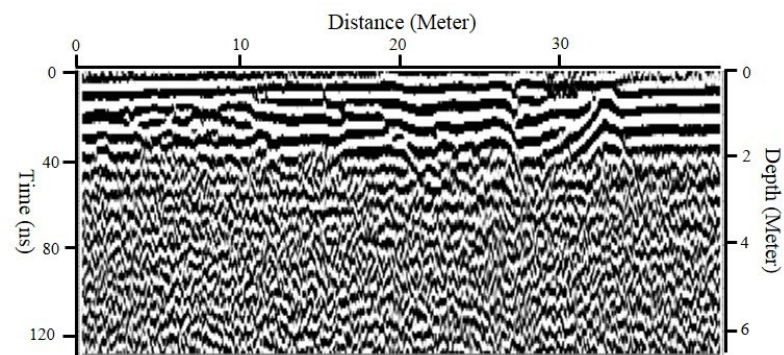
รูปที่ 4.33 ผลที่ได้จากการทำ Time zero correction



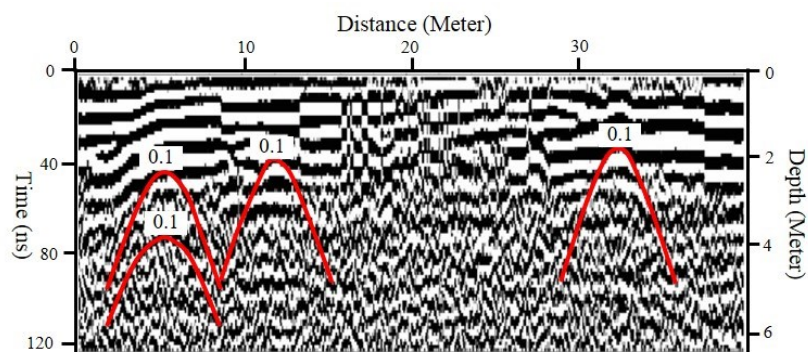
รูปที่ 4.34 ผลที่ได้จากการทำ Background removal



รูปที่ 4.35 ผลที่ได้หลังจากการทำ AGC



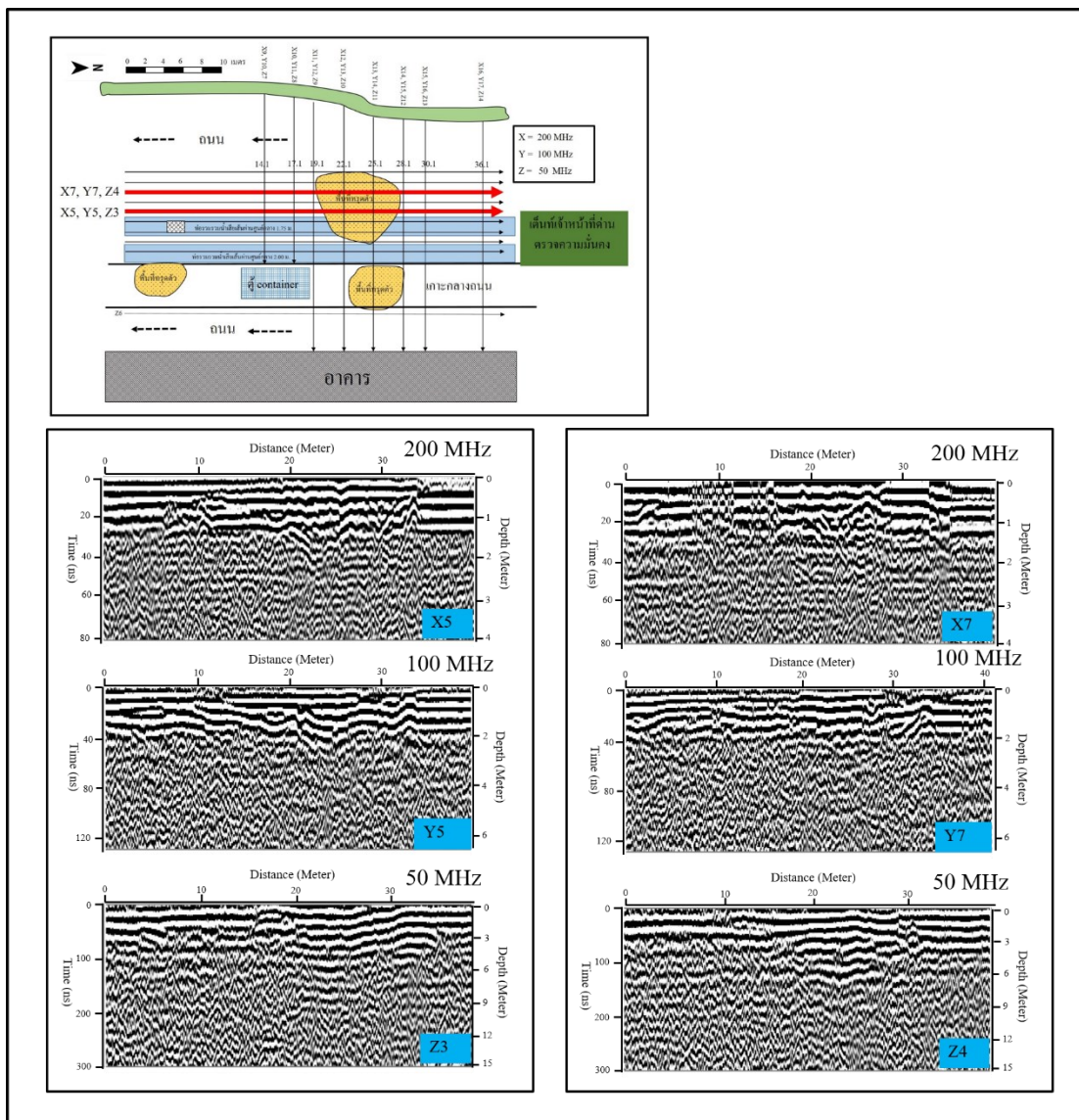
รูปที่ 4.36 ผลที่ได้หลังจากการทำ Running average



รูปที่ 4.37 แสดงความเร็วจากลักษณะสัญญาณคลื่นสะท้อนรูปไฮเพอร์โบลาในแผนภาพเรดาร์แกรม

4.2.1 ผลการสำรวจ GPR บริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห เทศบาลนครหาดใหญ่

ผลการเก็บข้อมูลด้วยความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz พบความแตกต่างของสัญญาณเรดาร์แกรมที่ได้จากแต่ละความถี่ โดยความถี่ 200 MHz พบสัญญาณสะท้อนของคลื่นเห็นได้ชัดถึงที่ความลึกประมาณ 1.5 เมตร, ความถี่ 100 MHz สัญญาณสะท้อนสามารถเห็นได้ชัดถึงที่ความลึกประมาณ 4 เมตร และความถี่ 50 MHz สัญญาณสะท้อนของคลื่นสามารถเห็นได้ชัดถึงที่ความลึกประมาณ 8 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.38



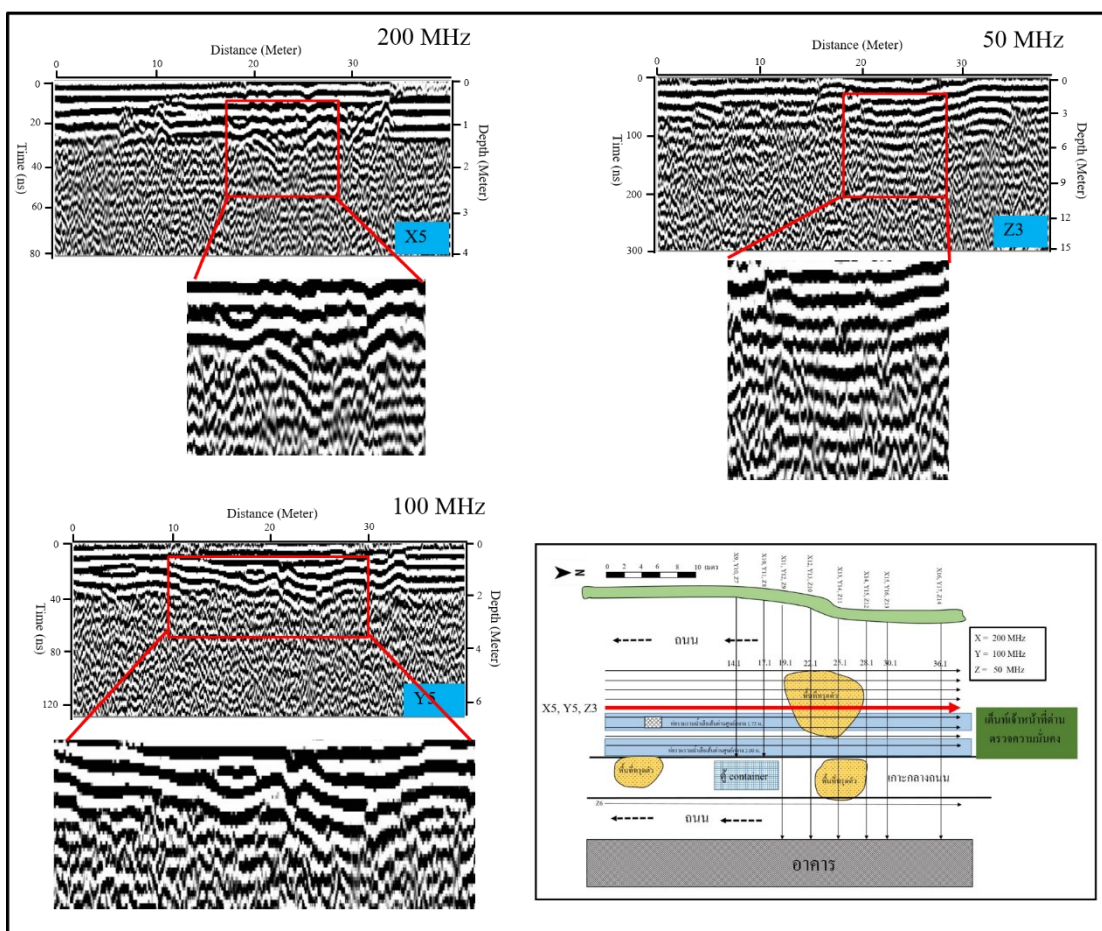
รูปที่ 4.38 การเปรียบเทียบความถี่ที่ได้จากแนวสำรวจตามถนนในแนว X5, Y5, Z3 และ X7, Y7, Z4

สัญญาณความไม่ต่อเนื่องของชั้นดินที่เกิดจากการทรุดตัวของมวลดินและสัญญาณจากโพรงที่พบในพื้นที่ด้านตรวจความมั่นคงคลองแห

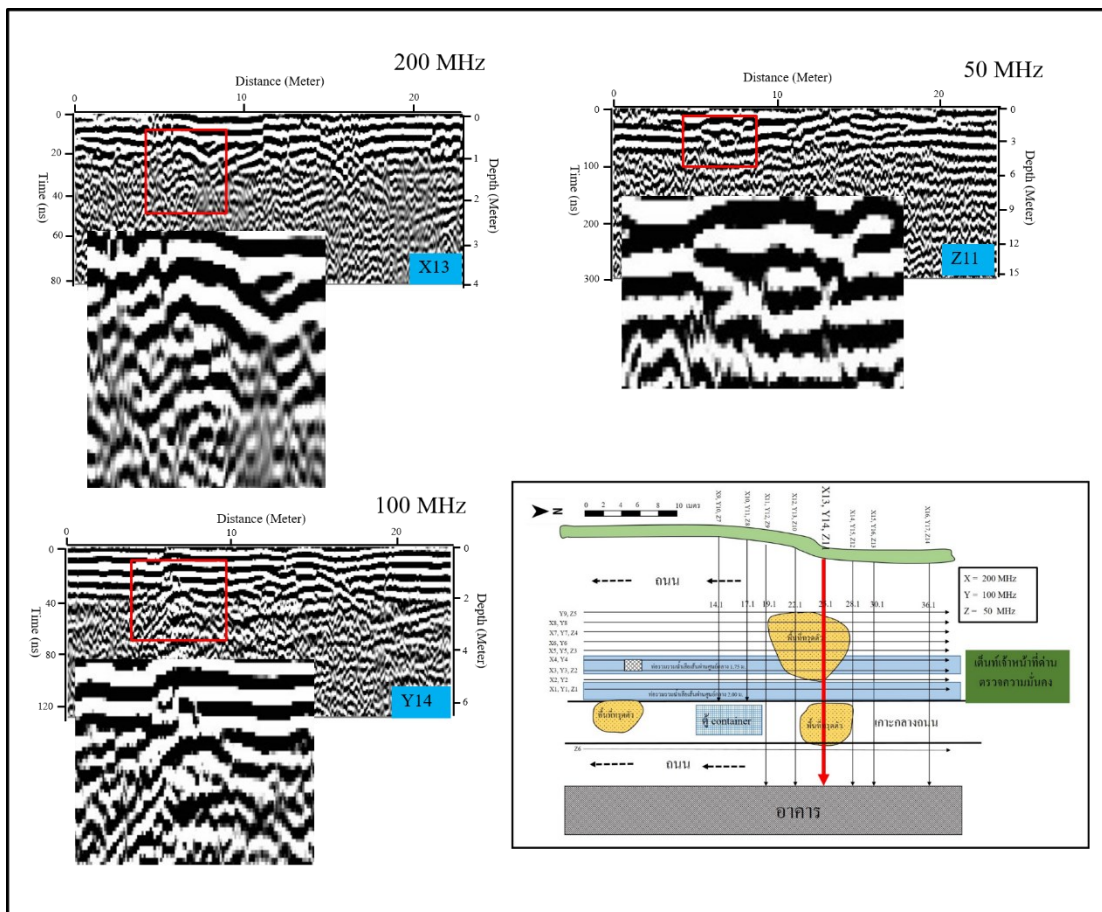
ลักษณะสัญญาณที่ได้จากการเกิดดินทรุดตัวสามารถเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณสะท้อนภายใต้ชั้นดิน โดยสามารถดูได้จากความหนาของชั้นดินที่มีการเปลี่ยนแปลง (สัญญาณสะท้อนมีความลึกเพิ่มมากขึ้น) ซึ่งเป็นผลมาจากวัสดุก่อสร้างพวงยางมะตอย ดินถมถนน

หรือดินที่มีค่าความนำไฟฟ้าต่ำที่อยู่ด้านบนเกิดการยุบตัวลงไปอยู่ด้านล่างจึงทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเกิดการสะท้อนได้ดีมากกว่าดินบริเวณอื่น ๆ ที่ไม่มีการเกิดดินทรุดตัว แสดงดังรูปที่ 4.39

ลักษณะสัญญาณสะท้อนที่เกิดจากโพรง (สัญญาณสะท้อนรูปไฮเพอร์โบลา) ที่ได้จากความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz แสดงดังรูปที่ 4.3 จากรูปสามารถแสดงตำแหน่งของสัญญาณที่เป็นโพรงใต้ดิน โดยดูได้จากสัญญาณความไม่ต่อเนื่องทางด้านข้างที่เป็นสัญญาณสะท้อนไฮเพอร์โบลา แสดงดังรูปที่ 4.40





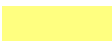




รูปที่ 4.39 ลักษณะสัญญาณที่ได้จากการเกิดดินทรุดตัวที่ได้จากความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz ในแนว X5, Y5 และ Z3



รูปที่ 4.40 ลักษณะสัญญาณ โพรงที่ได้จากความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz ที่ได้จากแนวสำรวจ X13, Y11, Z14

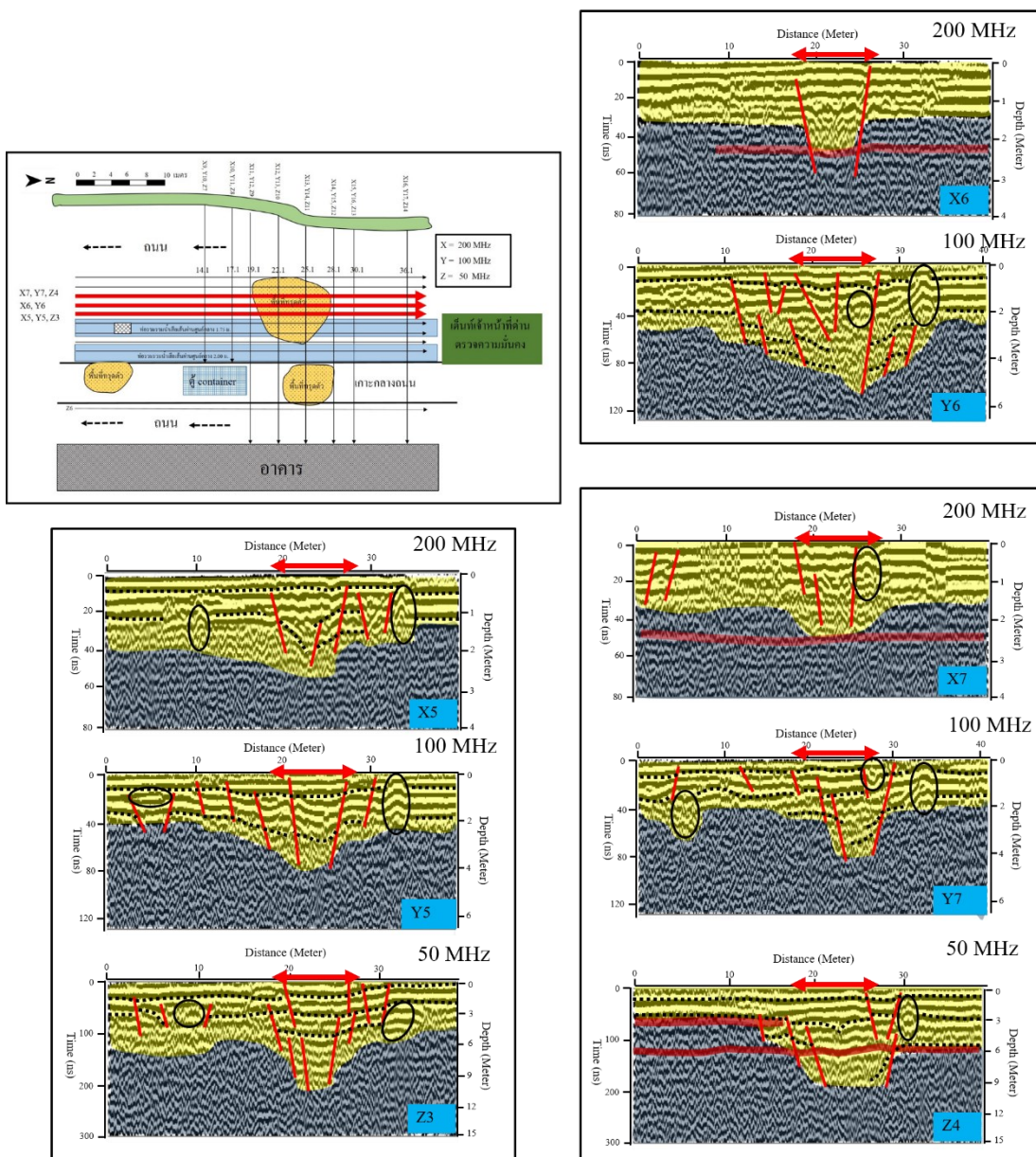
ตารางที่ 4.2 แสดงสัญลักษณ์ของสัญญาณต่างๆที่พบในพื้นที่ศึกษา

สัญลักษณ์	ความหมาย
	สัญญาณผิดปกติที่คาดว่าเป็นตำแหน่งโพรงใต้ดินหรือท่อ
	สัญญาณความผิดปกติที่เกิดจากแนวท่อใต้ถนนหรือจุดที่ผ่านตะแกรงฝาท่อที่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนในพื้นที่สำรวจ
	ความต่อเนื่องของชั้นดินในแนวนอน
	การเคลื่อนตัวของชั้นดินในแนวตั้ง
	ชั้นดินที่สามารถมองเห็นสัญญาณสะท้อนได้ชัดเจน
	ชั้นดินที่สามารถมองเห็นสัญญาณสะท้อนได้ไม่ชัดเจน
	บริเวณเกิดหลุมยุบบนผิวดิน

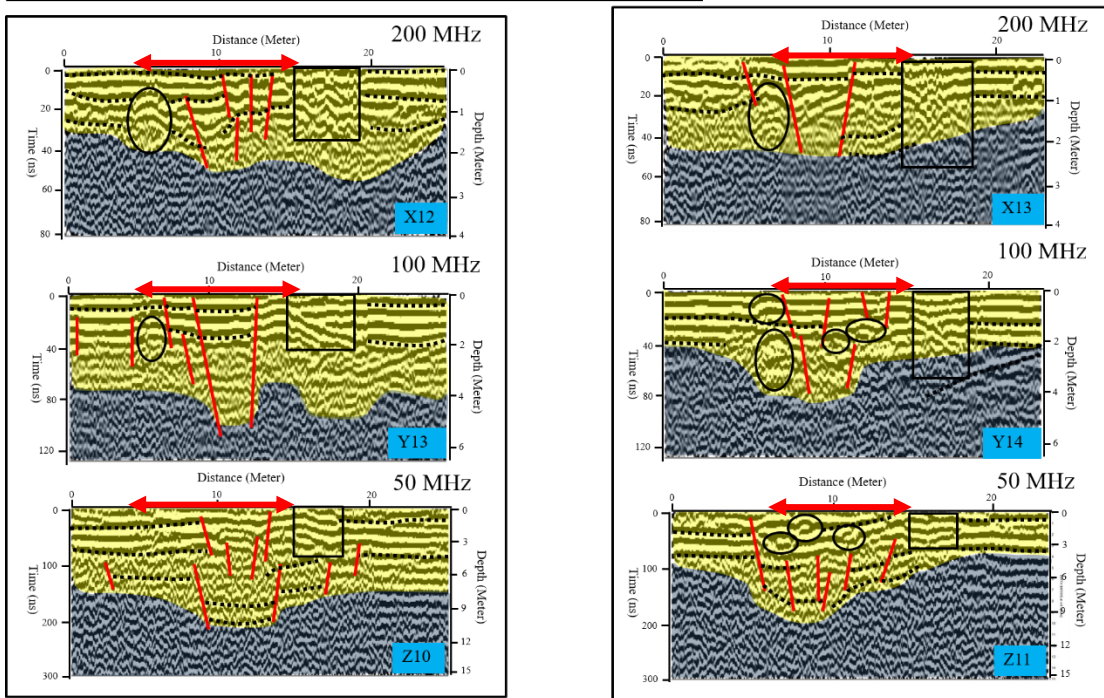
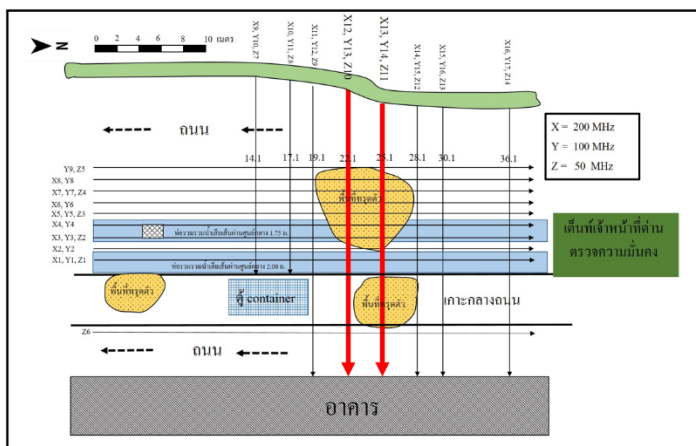
ผลการเปรียบเทียบสัญญาณในพื้นที่ด้านตรวจความมั่นคงคลองแห

ผลการเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากทั้งสามความถี่ในแนวตามถนนจำนวน 3 แนวสำรวจ คือ (X5, Y5, Z3), (X7, Y7, Z4) และ (X7, Y7) แสดงดังรูปที่ 3.41 และผลการเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากทั้งสามความถี่ในแนวขวางถนนจำนวน 2 แนว คือ (X12, Y13, Z10) และ (X13, Y14, Z11) แสดงดังรูปที่ 4.42 ผลการเปรียบเทียบพบว่าความถี่ 100 MHz และ 200 MHz ให้รายละเอียดของข้อมูลชั้นดินในระดับต้นได้ดี โดยพบว่าความถี่ 100 MHz ให้รายละเอียดของข้อมูลได้ชั้นดินได้ดีที่สุดและสามารถพบสัญญาณของโพรงใต้ดินได้ชัดกว่าความถี่อื่นๆ ส่วนความถี่ 50 MHz สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับรายละเอียดของชั้นดินได้น้อยสุดเมื่อเทียบกับความถี่อื่น แต่สามารถให้ข้อมูลการทรุดตัวที่ระดับความลึก 4-9 เมตร ในบางแนวสำรวจ สำหรับสัญญาณของการทรุดตัวพบว่าความถี่ 100 MHz สามารถให้ข้อมูลขอบเขตของดินทรุดตัวได้ชัดเจนมากที่สุดและลึกลงไปถึง 6 เมตร นอกจากนี้พบว่าขอบเขตความเสียหายมีความสอดคล้องกับตำแหน่งหลุมยุบบนผิวดินและเมื่อเปรียบเทียบที่ผลได้จากทั้งสามความถี่พบว่าขอบเขตความเสียหายมีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นใน

พื้นที่ด้านตรวจความมั่นคงของแหได้เลือกความถี่ 100 MHz มาใช้วิเคราะห์ผล และใช้ความถี่ 50 MHz มาเสริมการแปลความ



รูปที่ 4.41 การเปรียบเทียบลักษณะการทรุดตัวของชั้นดินที่ได้จากความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz



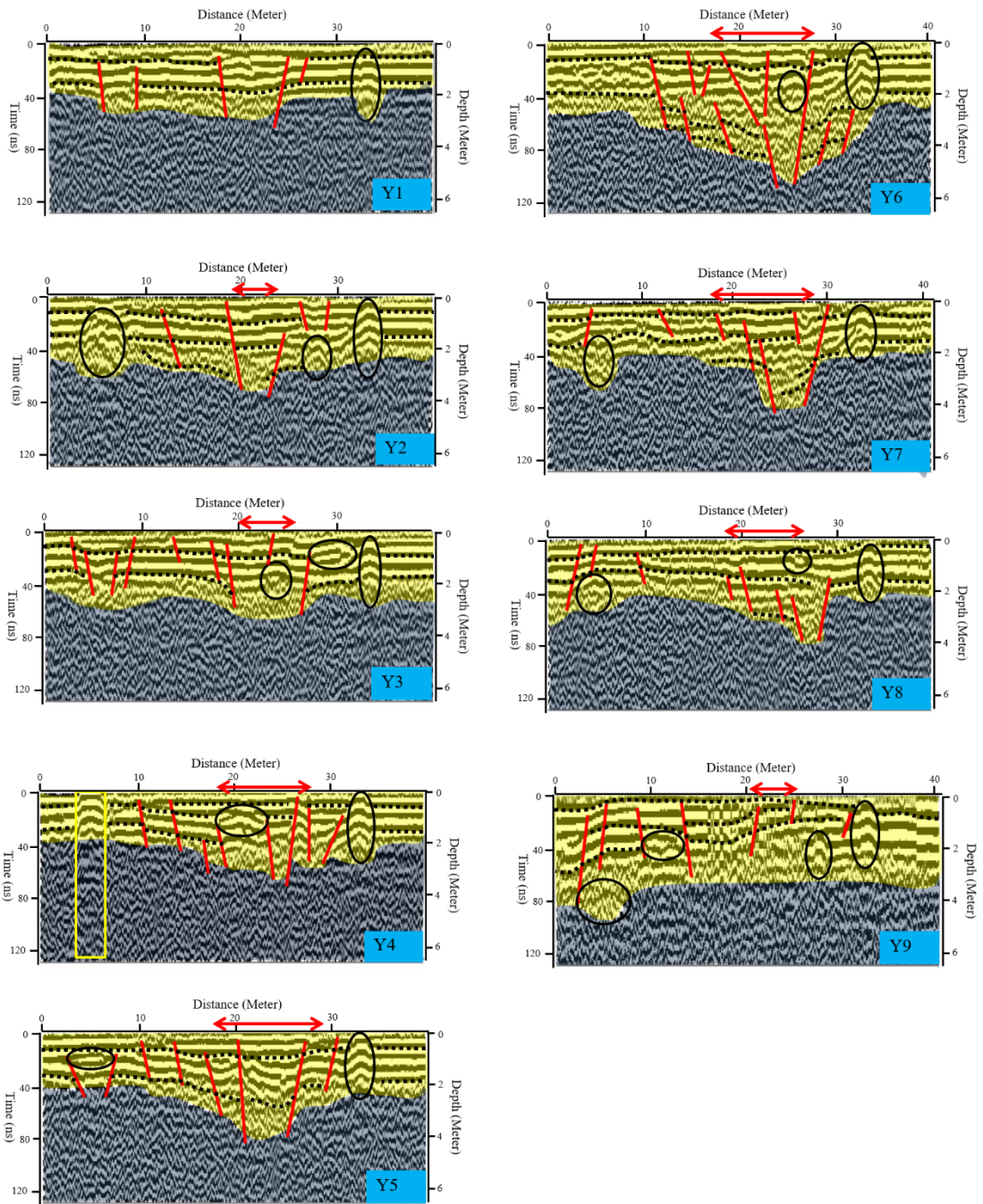
รูปที่ 4.42 การเปรียบเทียบลักษณะ โพรงที่ได้จากความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz

ผลความถี่ 100 MHz ในแนวตามถนนและขวางถนน ในพื้นที่ด้านตรวจความมั่นคงคลองแห

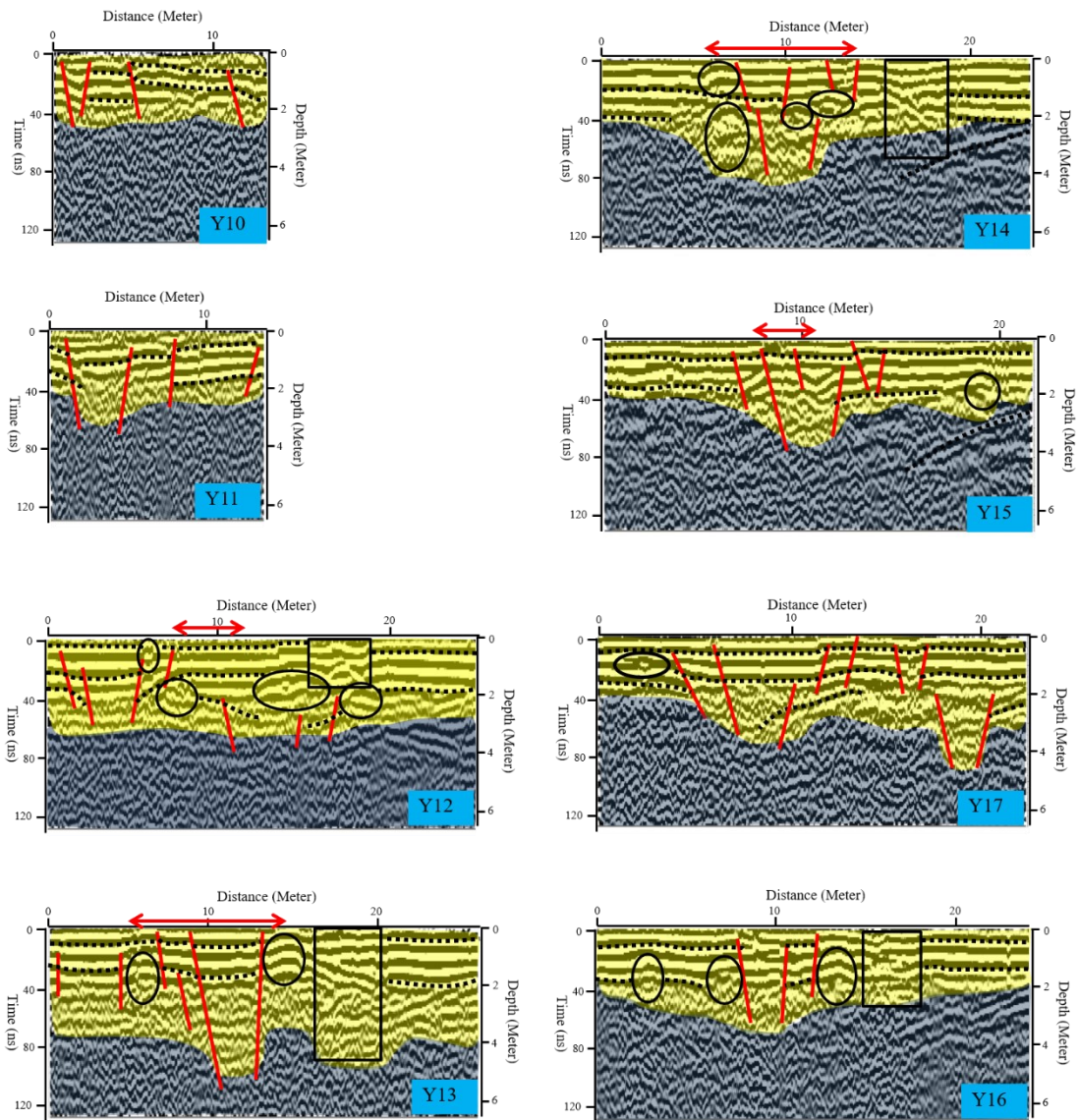
ผลความถี่ 100 MHz ในแนวตามถนนพบ โพรงเกือบทุกแนวสำรวจยกเว้นแนวสำรวจ Y1 โพรงที่พบมีขนาดอยู่ที่ประมาณ 0.5-2 เมตร มีความลึกไม่เกิน 4 เมตร พบความเสียหายของชั้นดินทรุดตัวเกิดขึ้นใกล้เคียงกับตำแหน่งที่เกิดหลุมยุบบนผิวดิน นอกจากนี้พบว่าที่แนวสำรวจ Y3, Y5, Y7, Y8 และ Y9 มีความเสียหายของชั้นดินทรุดตัวแบ่งเป็นสองบริเวณ คือ ที่ระยะประมาณ 0-10 เมตร และที่ระยะ 18-32 เมตร บนแนวสำรวจ แสดงดังรูปที่ 3.43 และผลความถี่ 100 MHz ใน

แนวขวางถนน พบโพรงเกือบทุกแนวสำรวจยกเว้นแนวสำรวจ Y10 และ Y11 โพรงที่พบมีขนาดประมาณ 1-3 เมตร ลึกไม่เกิน 4 เมตร พบความเสียหายของชั้นดินทรุดตัวเกิดขึ้นใกล้เคียงกับตำแหน่งที่เกิดหลุมยุบบนผิวดิน นอกจากนี้แนวสำรวจ Y12 และ Y14 พบโพรงมีลักษณะเป็นกลุ่มโพรงประมาณสี่จุดของแต่ละแนวสำรวจ แสดงดังรูปที่ 4.44

โพรงที่พบส่วนใหญ่เกิดในแนวขอบใกล้ๆกับแนวหลุมยุบเดิม แสดงให้เห็นว่าด้านล่างยังมีการสูญเสียมวลดินอยู่ เห็นได้ชัดในแนวสำรวจ Y2, Y3, Y5, Y12, Y13, Y14 และ Y16 และพบชั้นดินมีการเอียงเทเข้าหาตำแหน่งที่มีการเกิดหลุมยุบสามารถเห็นได้ชัดในแนวสำรวจ Y4, Y5, Y11 และ Y16



รูปที่ 4.43 ผลที่ได้จากความถี่ 100 MHz คลองแห่ในแนวตามถนน



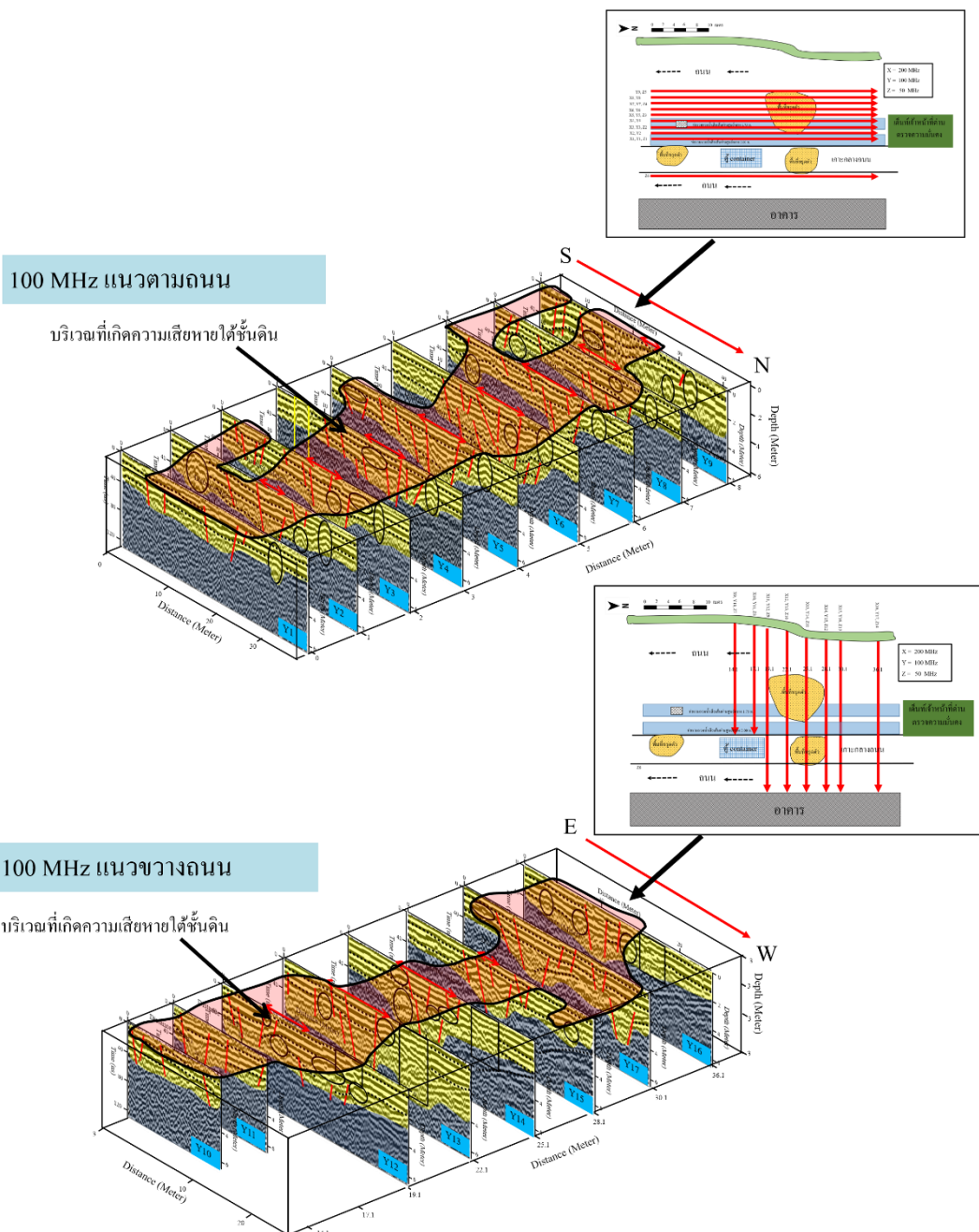
รูปที่ 4.44 ผลที่ได้จากความถี่ 100 MHz คลองแหในแนวขวางถนน

วิเคราะห์ผล

เปรียบเทียบข้อมูลทั้งสามความถี่ (200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz)

ข้อมูลที่ได้จากทั้งสามความถี่แสดงให้เห็นถึงชั้นดินด้านล่างมีลักษณะที่เป็นตัวนำไฟฟ้าสูง โดยเฉพาะสัญญาณเรดาร์แกรมจากความถี่ 200 และ 100 MHz สัญญาณมีความชัดเจนอยู่ที่ความลึกประมาณ 1.5 และ 3 เมตร ตามลำดับ และที่ความถี่ 50 MHz สามารถเห็นสัญญาณชัดได้ประมาณ 3-6 เมตร ซึ่งเป็นไปได้ว่าชั้นดินด้านล่างเป็นดินที่มีความนำไฟฟ้าสูง พวกดินเหนียว ดิน

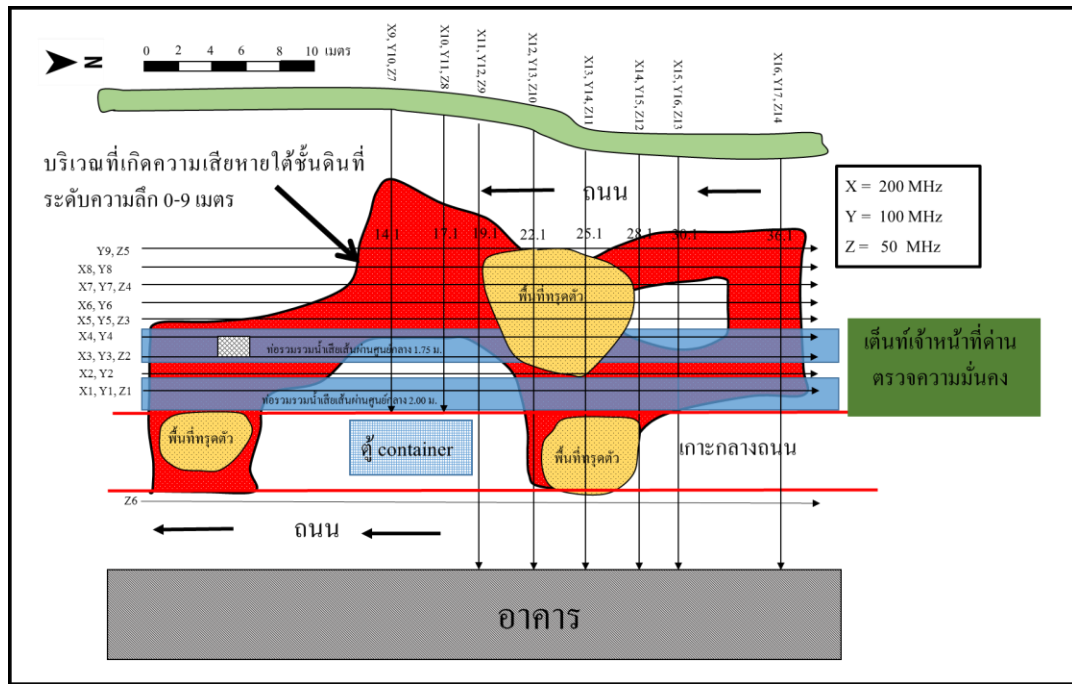
เหนียวปนทรายหรือชั้นทรายที่อิ่มตัวด้วยน้ำ สำหรับขอบเขตที่ได้รับผลกระทบจากการทรุดตัวได้
 ผิวดินที่ได้จากความถี่ 100 MHz แสดงดังรูปที่ 4.45



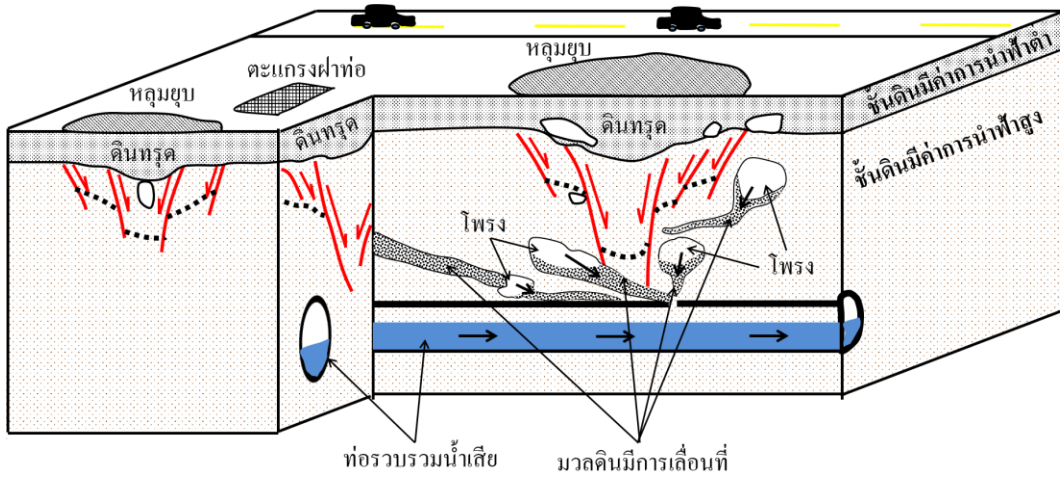
รูปที่ 4.45 บริเวณเกิดดินทรุดตัวได้ชั้นดินที่ได้จากความถี่ 100 MHz ในแนวตามถนนและแนวขวางถนน พื้นที่ด้านตรวจความมั่นคงคลองแห

การประเมินความเสี่ยงในพื้นที่นี้พบว่ามีโอกาสที่จะเกิดการทรุดตัวได้อีกในอนาคตเนื่องจากพบโพรงขนาด 0.5-2 เมตร จำนวนหลายโพรง นอกจากนี้ลักษณะของโพรงที่เกิดขึ้นบางโพรงสามารถแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มในการพัฒนาเป็นโพรงที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยเฉพาะในแนวสำรวจ Y2, Y3, Y7, Y8, Y9, Y12, Y13, Y14 และ Y16 และพบความเสียหายของชั้นดินลึกลงไปถึงความลึก 6 เมตร

สาเหตุของการเกิดดินทรุดตัวนี้สามารถระบุจากความถี่ 100 MHz และ 50 MHz การทรุดตัวของมวลดินมีลักษณะทรุดตัวลงไปที่ตำแหน่งความลึกใกล้เคียงกับท่อรวบรวมน้ำเสียสังเกตเห็นได้ชัดเจนที่แนวสำรวจ Z3, Z4, Z8, Z9, Z10 และ Z14 (ผลแสดงไว้ในภาคผนวก) ที่พบลักษณะการทรุดของดินคล้ายเส้นทางการไหลของมวลดินลึกลงไปถึงที่ความลึกประมาณ 7-9 เมตร จะเห็นได้ว่าดินด้านบนมีการสูญเสียมวลดินและเคลื่อนที่ลงไปถึงความลึกประมาณ 9 เมตร และเมื่อประกอบกับข้อมูลที่ได้จากความถี่ 100 MHz พบความลึกของการทรุดตัวลงไปถึงประมาณ 6 เมตร และมีแนวโน้มที่อาจลึกได้มากกว่า 6 เมตร แต่เนื่องสัญญาณที่ 100 MHz ถูกลดทอนค่อนข้างสูงจึงเห็นได้แค่ประมาณ 6 เมตร เท่านั้น ดังนั้นสาเหตุการทรุดตัวของหลุมยุบในครั้งนี้อาจมาจากการทรุดตัวดินที่ระดับลึก 7-9 เมตร โดยเริ่มแรกคาดว่ามีการเกิดโพรงอยู่ในระดับลึกที่ใกล้ๆกับตัวท่อรวบรวมน้ำเสียจากนั้นโพรงได้มีการพัฒนาใหญ่ขึ้นจนเกิดการทรุดตัว โดยการทรุดตัวนี้ไม่ได้ปรากฏให้เห็นบนผิวดินและเมื่อเวลาผ่านไปมวลดินมีการสูญเสียพัฒนามาเรื่อยๆเกิดการทรุดตัวเป็นทอดๆจนเกิดโพรงที่ระดับตื้นขึ้นและเกิดหลุมยุบบนผิวดินในที่สุด สำหรับแผนที่แสดงความเสียหายจากการทรุดตัวได้ผิวดินที่ความลึก 0-9 เมตร บริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห แสดงดังรูปที่ 4.46 และแบบจำลองทางธรณีวิทยาในการเกิดหลุมยุบแสดงดังรูปที่ 4.47



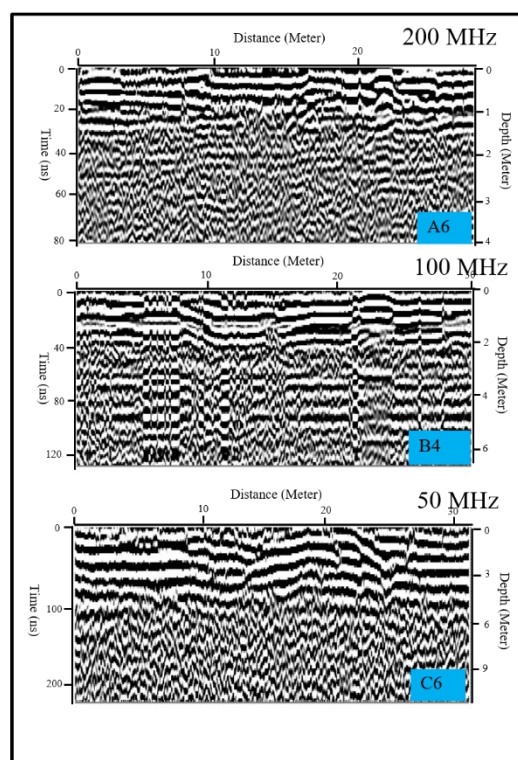
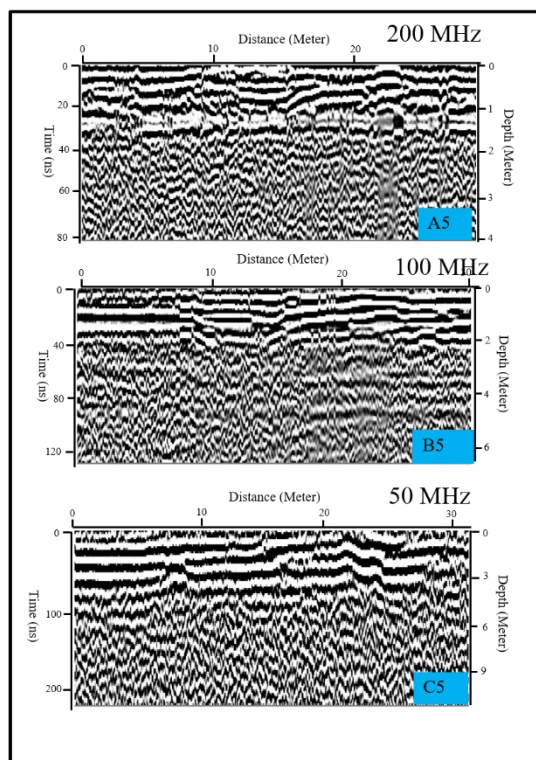
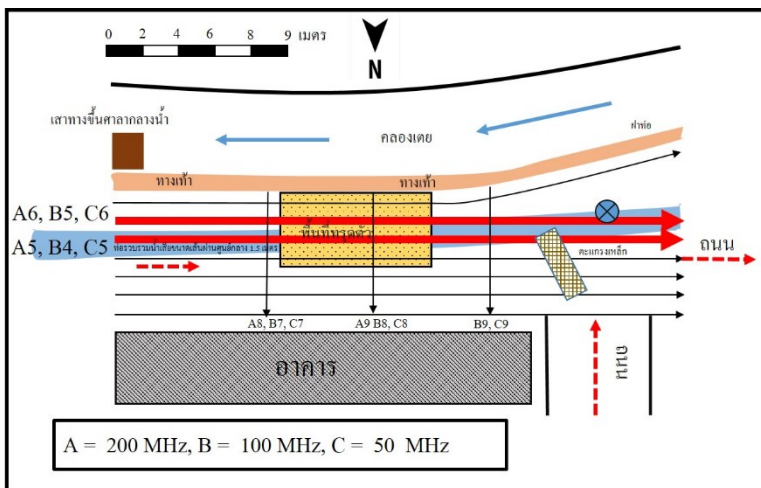
รูปที่ 4.46 แผนที่ความเสียหายจากการทรุดตัวใต้ผิวดินอ้างอิงจากการแปลความหมายข้อมูลผลการสำรวจ GPR บริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห



รูปที่ 4.47 แบบจำลองทางธรณีวิทยาของการเกิดหลุมขูดบริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห

4.2.2 ผลการสำรวจ GPR บริเวณถนนชลธาราแนวริมคลองเตย (ตลาดโค้งโค้ง)

ผลการเก็บข้อมูลด้วยความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz ในพื้นที่ถนนชลธาราแนวริมคลองเตย (ตลาดโค้งโค้ง) สามารถแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของสัญญาณเรดาร์แกรม โดยที่ความถี่ 200 MHz สามารถเห็นสัญญาณระดับตื้นชัดสุด แต่ให้ข้อมูลได้ไม่เกิน 1.5 เมตร สำหรับความถี่ 100 MHz สัญญาณสะท้อนของคลื่นสามารถเห็นได้ชัดที่ความลึกประมาณ 2 เมตร แต่เนื่องจากที่ความถี่ 100 MHz มีสัญญาณรบกวนเข้ามาทำให้ไม่สามารถเห็นรายละเอียดที่ชัดเจน และความถี่ 50 MHz สัญญาณสะท้อนของคลื่นสามารถเห็นได้ชัดถึงความลึกประมาณ 6 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.48

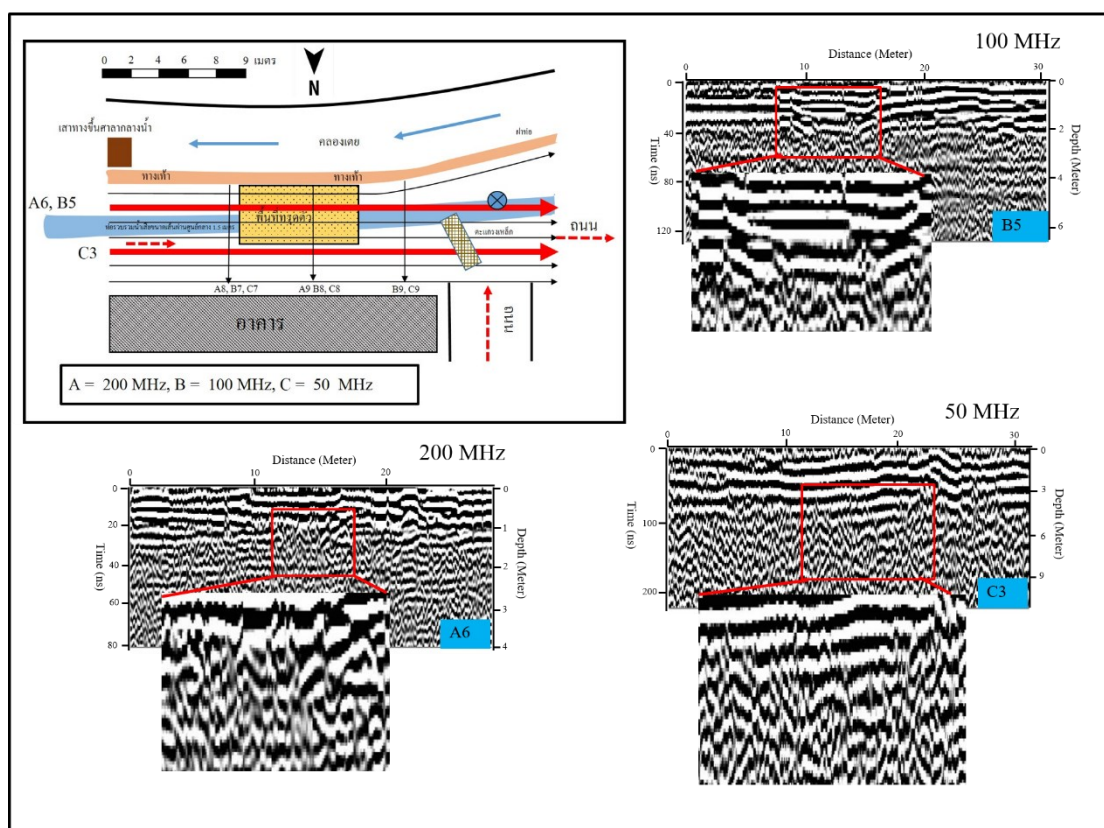


รูปที่ 4.48 แสดงการเปรียบเทียบความถี่ที่ได้จาก 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz ของแนวสำรวจ A5, B5, C5 และ แนวสำรวจ A6, B4, C6

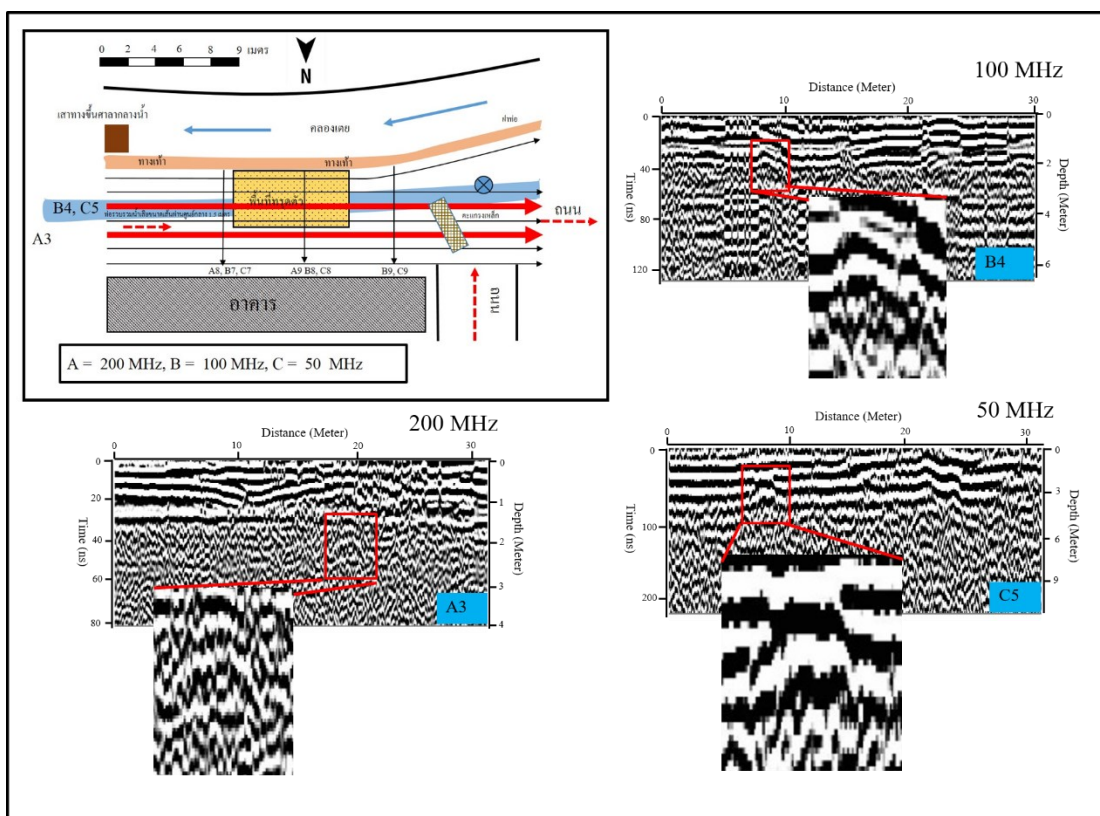
สัญญาณความไม่ต่อเนื่องของชั้นดินที่เกิดจากการทรุดตัวของมวลดินและสัญญาณจากโพรงที่พบในพื้นที่ถนนชลธาราแนวริมคลองเตย(ตลาดกิ้งกิ้ง)

ลักษณะสัญญาณจากการเกิดดินทรุดตัวสามารถเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณสะท้อนภายใต้ชั้นดินที่มีความหนาของชั้นดินมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะคล้ายกับบริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห แสดงดังรูปที่ 4.49

ลักษณะผลสัญญาณสะท้อนที่เกิดจากโพรง จากความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz แสดงดังรูปที่ 4.50 จากรูปสามารถแสดงตำแหน่งของสัญญาณที่เป็นโพรงใต้ดิน โดยดูได้จากสัญญาณความไม่ต่อเนื่องทางด้านข้างที่เป็นสัญญาณสะท้อนไฮเพอร์โบลา ลักษณะคล้ายกับบริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห



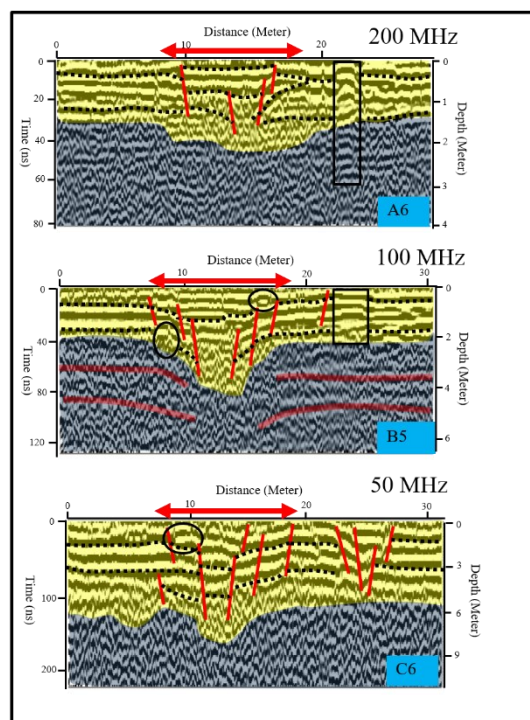
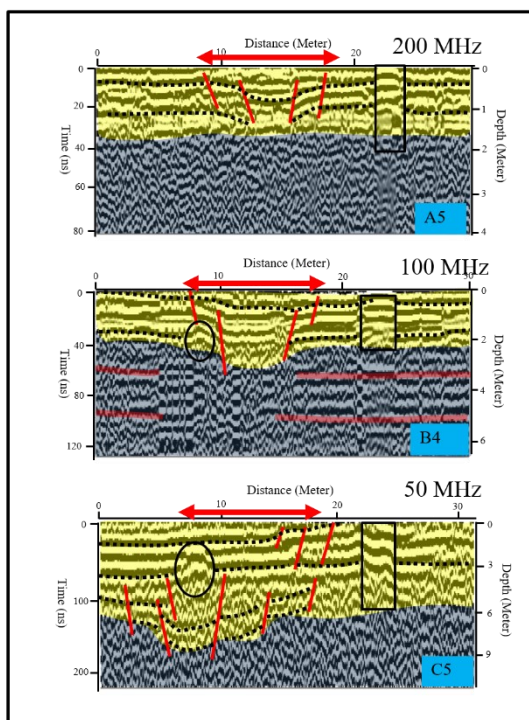
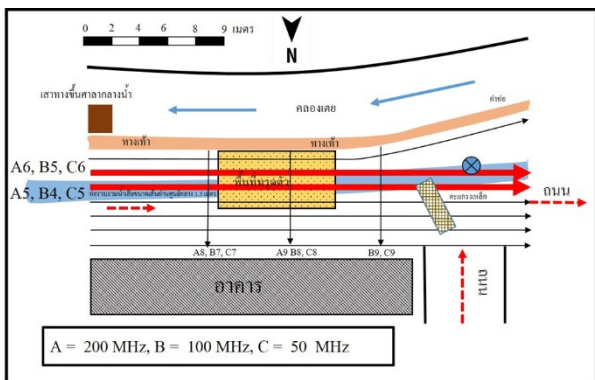
รูปที่ 4.49 แสดงลักษณะของสัญญาณชั้นดินทรุดตัวที่ได้จากความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz



รูปที่ 4.50 แสดงลักษณะสัญญาณ โพรจจากความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz

ผลการเปรียบเทียบสัญญาณ

ผลการเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากทั้งสามความถี่ในแนวตามถนนจำนวน 3 แนว คือ (A5, B4, C5) และ (A6, B5, C6) แสดงดังรูปที่ 4.51 ผลการเปรียบเทียบพบว่าความถี่ 100 MHz และ 200 MHz ให้ความละเอียดของข้อมูลชั้นดินในระดับตื้นได้ดี โดยเฉพาะความถี่ 100 MHz ที่ให้รายละเอียดของชั้นดินได้ถึงความลึก 4 เมตร แต่เนื่องจากที่ความถี่นี้ในหลายแนวสำรวจพบว่ามีสัญญาณรบกวนเข้ามาเกี่ยวข้องจึงไม่สามารถให้ข้อมูลที่ครบถ้วนได้ ส่วนความถี่ 50 MHz สามารถรายละเอียดของข้อมูลชั้นดินได้ครบถ้วนมากที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่อื่นๆ และสามารถให้ข้อมูลของสัญญาณจากการเกิดดินทรุดตัวได้ลึกถึง 6 เมตร ดังนั้นในพื้นที่ถนนชลธาราแนวริมคลองเตย (ตลาดไก่จิ้ง) ได้เลือกความถี่ 50 MHz มาใช้วิเคราะห์ผล

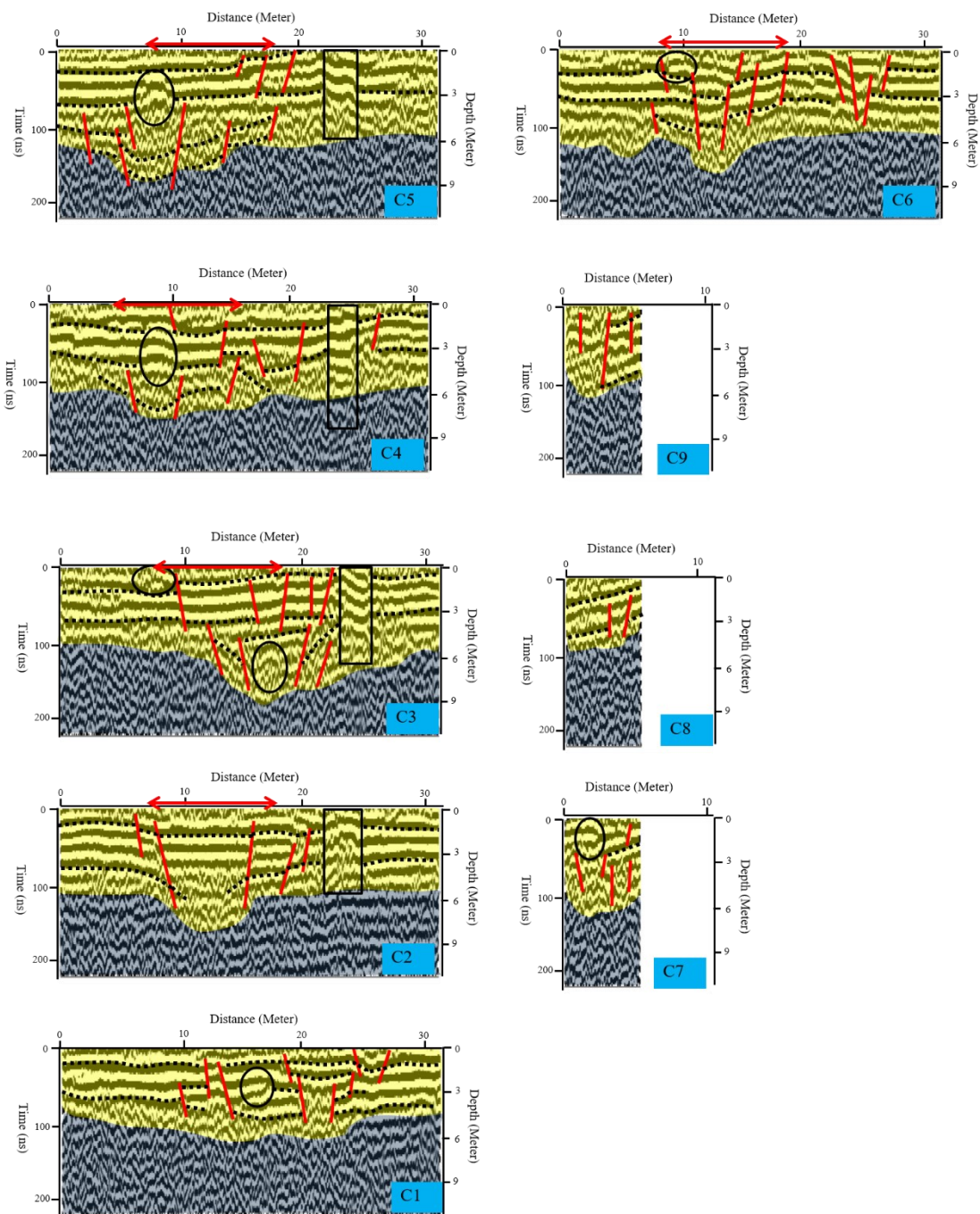


รูปที่ 4.51 การเปรียบเทียบลักษณะการทรุดตัวของชั้นดินที่ได้จากความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz

ผล 50 MHz ตามถนนและแนววางถนน

ผลความถี่ 50 MHz ในแนวตามถนนพบโพรงในแนวสำรวจ C1, C3, C4, C5 และ C6 โพรงที่พบมีขนาดอยู่ที่ประมาณ 1-3 เมตร มีความลึกไม่เกิน 7 เมตร และในแนววางถนน พบโพรงในแนวสำรวจ C7 โพรงที่พบมีขนาดอยู่ที่ประมาณ 2 เมตร ลึกไม่เกิน 2 เมตร และพบความเสียหายของชั้นดินทรุดตัวเกิดขึ้นใกล้เคียงกับตำแหน่งที่เกิดหลุมยุบบนผิวดิน แสดงดังรูปที่ 4.52

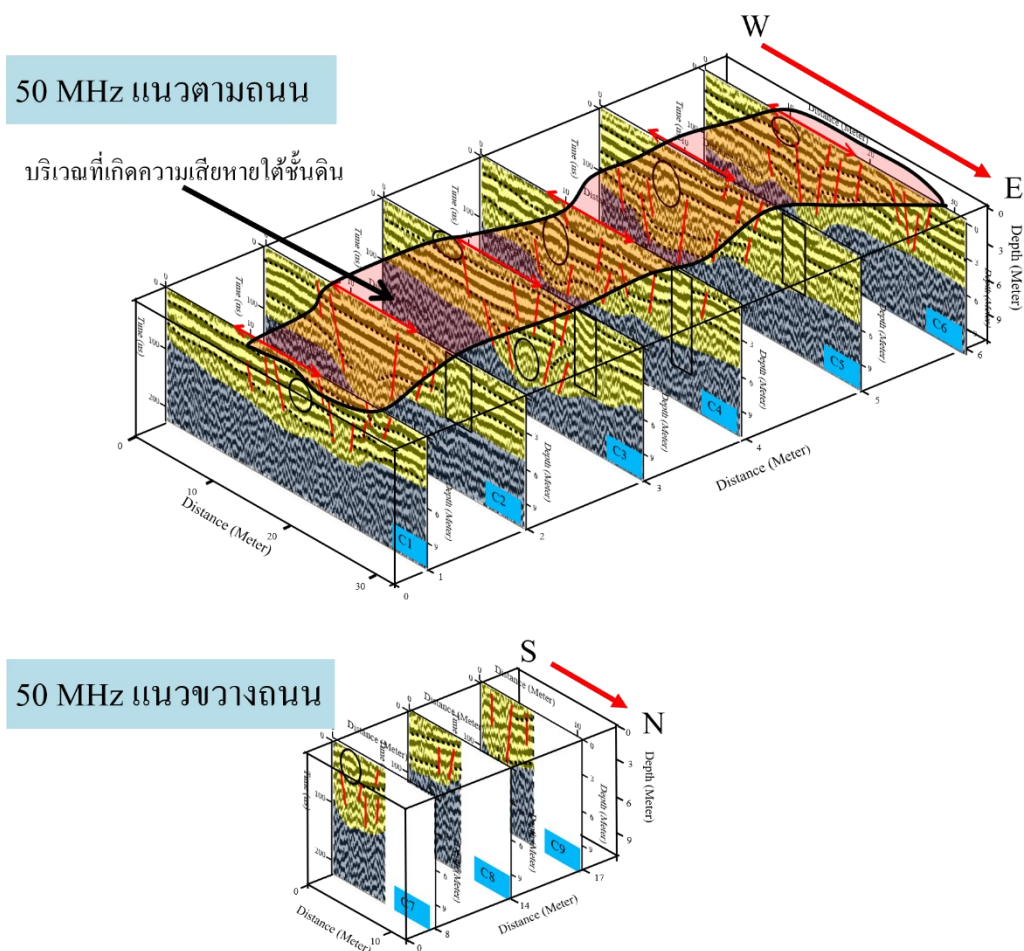
โพรงที่พบมีขนาดค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับโพรงที่พบในบริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแหและในแนวสำรวจ C5, C4, C3 พบโพรงมีความต่อเนื่องกัน โดยโพรงมีความลาดเอียงจากแนวสำรวจ C5 ไปยังแนวสำรวจ C3 ในแนวสำรวจ C3 พบโพรงอยู่ที่ความลึกถึง 6 เมตร นอกจากนี้ในแนวสำรวจ C2 พบการทรุดตัวถึงที่ความลึก 6 เช่นกัน โดยคาดว่าที่ตำแหน่ง 10-20 เมตร ที่ความลึก 6 เมตร ของแนวสำรวจ C3, C2 เป็นจุดเริ่มต้นการเกิดถนนทรุดตัวในพื้นที่นี้



รูปที่ 4.52 ผลที่ได้จากความถี่ 50 MHz ในแนวขวางถนน

วิเคราะห์ผล

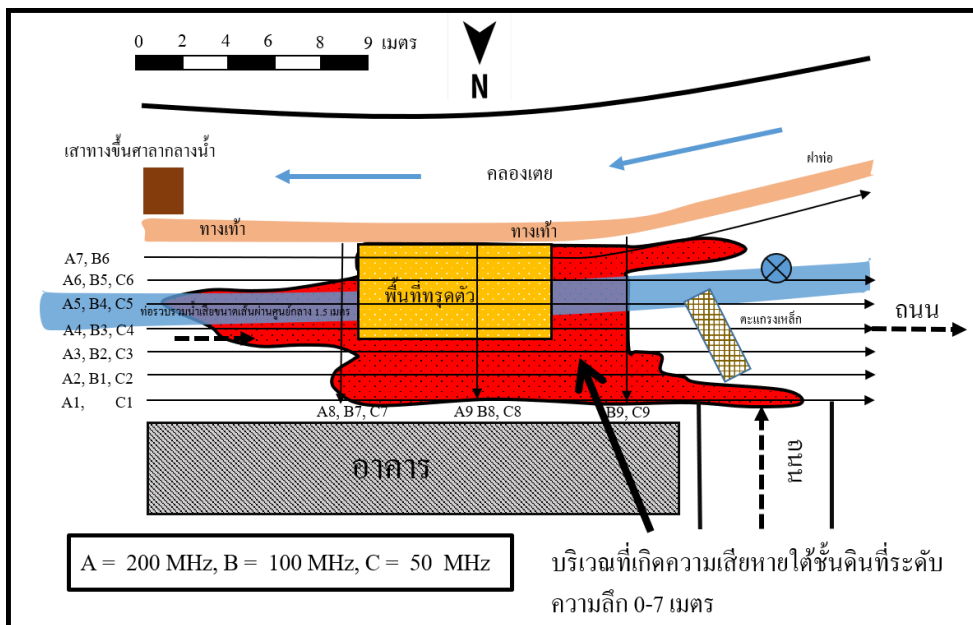
ข้อมูลที่ได้จากทั้งสามความถี่แสดงให้เห็นว่าชั้นดินที่อยู่ด้านล่างมีลักษณะที่เป็นตัวนำสูง โดยดูได้จากสัญญาณเรดาร์แกรมที่ได้จากความถี่ 200 MHz และ 100 MHz ที่ปรากฏความลึกของสัญญาณมีความชัดเจนอยู่ที่ 1.5 และ 2 เมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปได้ว่าชั้นดินด้านล่างเป็นดินที่มีความนำไฟฟ้าสูง อาจเป็นพวกดินเหนียว ดินเหนียวปนทรายหรือทรายที่ความอึดตัวด้วยน้ำ สำหรับขอบเขตที่ได้รับผลกระทบจากการทรุดตัวได้ผิวดินที่ได้จากความถี่ 50 MHz แสดงดังรูปที่ 4.53



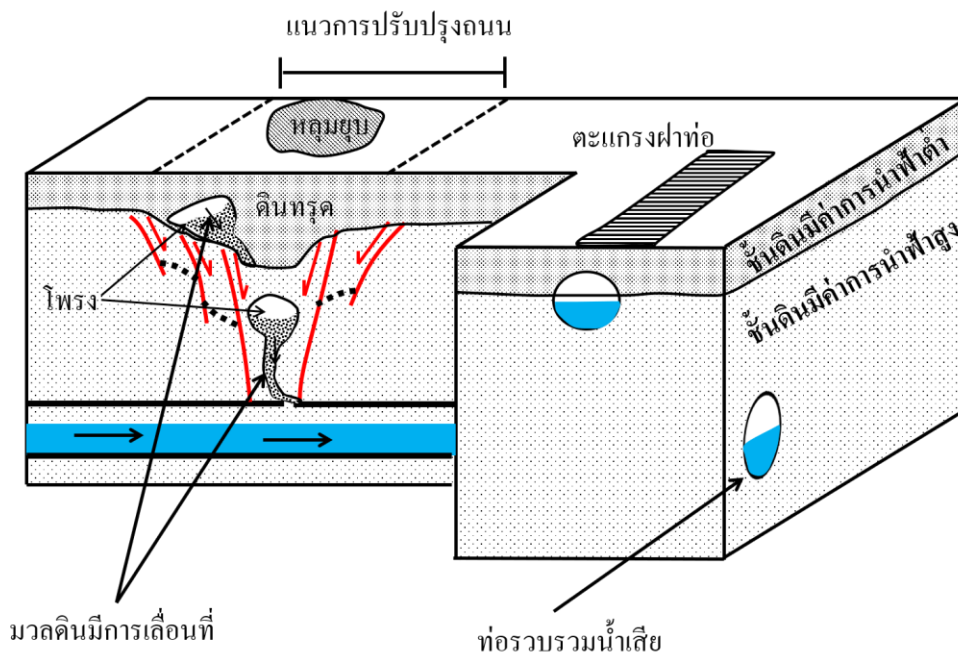
รูปที่ 4.53 บริเวณเกิดดินทรุดตัวใต้ชั้นดินที่ได้จากความถี่ 50 MHz ในแนวตามถนนและแนวขวางถนน

การประเมินความเสี่ยงในพื้นที่ถนนชลธารา ผลความถี่ 100 200 MHz พบโครงขนาดเล็กน้อยกว่าพื้นที่ด้านตรวจความมั่นคงคลองแห โดยโครงขนาดเล็กที่พบนี้ คาดว่าเป็นโครงที่เกิดขึ้นหลังจากการปรับปรุงถนน ส่วนที่ความถี่ 50 MHz พบโครงขนาด 1-3 เมตร ดังนั้นพื้นที่นี้จึงมีความเสี่ยงที่จะเกิดหลุมยุบได้อีกในอนาคต ซึ่งเห็นได้จากโครงที่เพิ่งเกิดใหม่ต่างๆ ที่ผ่านการปรับปรุงถนนไปเพียงไม่นานแสดงว่าด้านล่างนี้ยังคงมีการสูญเสียมวลดินอย่างต่อเนื่องเห็นได้จากแนวสำรวจ C3 ที่พบโครงอยู่ลึกถึง 7 เมตร

สาเหตุของการเกิดดินทรุดตัว จากข้อมูลที่ได้จากความถี่ 50 MHz พบความลึกของชั้นดินที่มีการทรุดตัวลึกไปถึง 7 เมตร และมีตำแหน่งใกล้เคียงกับแนวท่อรวบรวมน้ำเสีย ซึ่งเห็นได้จากแนวสำรวจในแนวตามยาว C2, C3, C4 และ C5 นอกจากนี้ที่ความถี่ 50 MHz ในแนวขวางถนนยังพบความเสียหายลึกถึงไปถึงที่ความลึก 6-7 เมตร ลักษณะของการเกิดดินทรุดตัวนี้คาดว่าจะ เป็นแบบเดียวกับบริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห คือ เริ่มแรกมีการเกิดโครงที่ระดับลึกใกล้กับตัวท่อรวบรวมน้ำเสียจากนั้นโครงพัฒนากลายเป็นโครงที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและเกิดการทรุดตัวภายใต้ชั้นดินอย่างต่อเนื่องจนทำให้เกิดโครงในระดับที่ตื้นขึ้นและเกิดการทรุดตัวเป็นหลุมยุบปรากฏที่ผิวดินในที่สุด สำหรับแผนที่แสดงความเสียหายจากการทรุดตัวใต้ผิวดินที่ความลึก 0-7 เมตร บริเวณถนนถนนชลธาราแนวริมคลองเตย (ตลาด กุ้ง กุ้ง) แสดงดังรูปที่ 4.54 และแบบจำลองทางธรณีวิทยาในการเกิดหลุมยุบแสดงดังรูปที่ 4.55



รูปที่ 4.54 แผนที่ความเสียหายจากการทรุดตัวใต้ผิวดินบริเวณถนนถนนชลธาราแนวริมคลองเตย (ตลาดโค้งโค้ง) โดยอ้างอิงจากการแปลความหมายข้อมูลผลการสำรวจ GPR



รูปที่ 4.55 แบบจำลองทางธรณีวิทยาของการเกิดหลุมยุบบริเวณถนนชลธาราแนวริมคลองเตย (ตลาดโค้งโค้ง)

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลกรณีศึกษาปัญหาดินอ่อนและปัญหาคอนกรีตทรุดตัว

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์วิธีการธรณีฟิสิกส์มาใช้ในการแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมฐานรากประกอบไปด้วย 2 กรณีศึกษา คือ 1) การประยุกต์ใช้วิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ERT) ร่วมกับวิธีเรดาร์หึ่งลึกชั้นดินชั้นดิน (GPR) กับปัญหาชั้นดินอ่อนในพื้นที่ก่อสร้างนิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ (ฉลุง) อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา และ 2) การประยุกต์ใช้วิธีเรดาร์หึ่งลึกชั้นดินชั้นดิน (GPR) กับปัญหาการทรุดตัวของถนนบริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแหและบริเวณถนนชลธารา แนวริมคลองเตย (ตลาดโก้งโค้ง) เทศบาลนครหาดใหญ่

ผลวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ERT) ร่วมกับวิธีเรดาร์หึ่งลึกชั้นดินชั้นดิน (GPR) กับปัญหาชั้นดินอ่อนในพื้นที่ก่อสร้างนิคมอุตสาหกรรมภาคใต้ (ฉลุง) อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา ผลวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า พบโครงสร้างทางธรณีวิทยาภายใต้ผิวดินสามารถแบ่งได้เป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มที่เป็นดินอ่อนมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่า 40 โอห์ม-เมตร และส่วนที่ไม่เป็นดินอ่อนมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามากกว่า 40 โอห์ม-เมตร โดยขอบเขตของชั้นดินอ่อนอยู่ระหว่างแนวสำรวจ L3-L10 และส่วนแคบ ๆ ในแนวสำรวจ L1-L12 และ L11-L17 มีความกว้างอยู่ในช่วง 150-200 เมตร และ 80-150 เมตร ผลวิธีเรดาร์หึ่งลึกชั้นดิน (GPR) สามารถแยกความแตกต่างของสัญญาณระหว่างบริเวณที่เป็นดินอ่อนกับบริเวณที่ไม่เป็นดินอ่อนได้

ผลวิธีเรดาร์หึ่งลึกชั้นดินชั้นดิน (GPR) กับปัญหาการทรุดตัวของถนน บริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแห จากการเปรียบเทียบข้อมูลทั้งสามความถี่พบสายอากาศความถี่ 100 MHz ให้รายละเอียดโครงสร้างใต้ชั้นดินดีที่สุด โดยพบกลุ่มโพรงขนาด 0.5-1.5 เมตร หลายโพรง โดยเฉพาะในแนวสำรวจ Y2, Y9, Y12, Y14 และ Y16 โพรงที่พบอยู่ที่ความลึกประมาณ 2-4 เมตร และพบการทรุดตัวของชั้นดินลงไปที่มีความลึกประมาณ 4-6 เมตร ในแนวสำรวจ Y5, Y6, Y7, Y13, Y14 และ Y17 บริเวณถนนชลธารา แนวริมคลองเตย (ตลาดโก้งโค้ง) เทศบาลนครหาดใหญ่ จากการเปรียบเทียบข้อมูลทั้งสามความถี่พบสายอากาศความถี่ 50 MHz ให้รายละเอียดโครงสร้างใต้ชั้นดินดีที่สุด โดยพบโพรงขนาด 1-3 เมตร อยู่ที่แนวสำรวจ C2, C4 และ C5 โพรงที่พบอยู่ที่ความลึก

ประมาณ 3-6 เมตร และพบการทรุดตัวของชั้นดินลงไปที่มีความลึกประมาณ 6-7 เมตร ในแนวสำรวจ C2, C3, C4, C5 และ C6 โดยทั้งสองบริเวณมีความเสียหายของชั้นดินลึกลงไปถึงแนวท่อรวบรวมน้ำเสียและสาเหตุของการทรุดตัวของถนนในครั้งนี้คาดว่ามีความสัมพันธ์กับท่อบำบัดน้ำเสีย

การประยุกต์วิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ERT) กับวิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดิน (GPR) ทั้งสองวิธีมีความเหมาะสมในการนำมาใช้สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค โดยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถแปลผลบริเวณดินอ่อนได้ชัดเจน แต่ใช้เวลาในการสำรวจค่อนข้างมาก ส่วนวิธีเรดาร์หยั่งลึกชั้นดินการเก็บข้อมูลทำได้รวดเร็ว สามารถระบุโครงและการทรุดตัวของชั้นดินได้ดี แต่มีข้อจำกัดหากชั้นดินด้านล่างเป็นชั้นตัวนำสูงจะส่งผลให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีการลดทอนสูงตามไปด้วย โดยบริเวณด้านตรวจความมั่นคงคลองแหและบริเวณถนนชลธาราแนววิมคลองเตย (ตลาดโค้งโค้ง) สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากภาพเรดาร์แกรมไม่สามารถตรวจพบท่อรวบรวมน้ำเสียได้

4.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษากรณีดินอ่อนการสำรวจด้วยวิธี ERT การเก็บข้อมูลภาคสนามใช้เวลาค่อนข้างนานและในงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้สายเคเบิลทำการวัดเพียง 2 เส้น แต่ละเส้นมีความยาว 100 เมตร ซึ่งทำให้ต้องย้ายเครื่องมือวัดบ่อย ในกรณีที่แนวสำรวจมียาวมากกว่า 400 เมตร ควรใช้สายเคเบิล 4 เส้น จะทำให้ช่วยลดระยะเวลาในการสำรวจได้ การสำรวจด้วยวิธี GPR แบบ RTA 30 MHz มีข้อจำกัดหากบริเวณใกล้ๆกับต้นและปลายของแนวสำรวจมีวัตถุ เช่น ราน้ำคอนกรีต อาคารหรือกองดิน จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนในรูปแบบของชั้นดินเอียงซึ่งไม่ใช่โครงสร้างจริงใต้ผิวดิน ทำให้ข้อมูลที่ระดับลึกๆไม่สามารถแปลความได้

ในการศึกษากรณีถนนทรุดตัวการสำรวจด้วยวิธี GPR โดยใช้สายอากาศทั้งสามความถี่ (200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz) มีข้อจำกัดในเรื่องความลึกของการสำรวจ นอกจากนี้ผลจากการสำรวจด้วยวิธี GPR การระบุชนิดของชั้นดินค่อนข้างแปลผลยากหากไม่มีข้อมูลบ่อเจาะ ดังนั้นหากพื้นที่สำรวจมีความเหมาะสมควรเก็บข้อมูลด้วยวิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าควบคู่ไปด้วยเพื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับผล GPR จะทำให้การแปลผลได้ง่ายและมีความแม่นยำขึ้น

บรรณานุกรม

- ทีมงานจัดการความรู้สำนักชลประทานที่ 15. 2557. การแก้ปัญหาการทรุดตัวของดินถม (Soil Subsidence) หลังท่อส่งน้ำ คสล. ขนาด 3.00 x 3.00 ม.ของคลองส่งน้ำ LMC ฝ่ายคลองท่าดีโครงการส่งน้ำและบำรุงรักษานครศรีธรรมราช โดยวิธีการอัด นิคน้ำปูน (Cement Grouting). สำนักชลประทานที่ 15 กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- ธงชัย พึ่งรัมย์, 2558. รายงานทางวิชาการชุดแร่วิทยา เล่มที่ 4 แร่ดิน (clay mineral). ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ธรรมมา เจียรธรวานิช, 2015. ปัญหาถนนทรุดตัวในงานก่อสร้างทาง (Pavement Deflection Problem in Highway Construction). RSU JET Vol. 18, No. 2.
- ภูวนารถ จงจิตร, 2556. การประยุกต์ใช้วิธีการสำรวจข้อมูลระยะไกล และวิธีการธรณีฟิสิกส์ เพื่อหารอยเลื่อนในเขตพื้นที่ส่วนในและส่วนนอกรอบแอ่งหาคีใหญ่ จังหวัดสงขลา วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาธรณีฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พัทวิ ศีระยา, 2560. ภาพตัดขวางคลื่นไหวสะเทือนของแอ่งหาคีใหญ่ วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา.
- มนตรี เดชาสกุลสม, 2546. คุณสมบัติกำลังรับแรงดึงและค่า CBR ของดินเหนียวเสริมเส้นใยไฟเบอร์สั้น. กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม.

อัครเดช แซ่จิ๋ว, 2552. คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรม
มหาบัณฑิต, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา.

Abdulmohsen, S.A., Mark van der, M., Marleen, N., Elisabeth, A.A., Rik van, B., Steven, M.J.
2017. Spatial and temporal monitoring of soil moisture using surface electrical
resistivity tomography in Mediterranean soils. *Catena*. Vol. 45: 388-396.

Ahzebobor, P.A., Kehinde, D. 2014. The use of the multiple-gradient array for geoelectrical
resistivity and induced polarization imaging. *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 111:
364–376.

Andrea, B., Luigi, D.F., Pier, P.P., Pio, S. 2016. Hidden sinkholes and karst cavities in the
travertine plateau of a highly-populated geothermal seismic territory (Tivoli, central
Italy). *Geomorphology*. Vol. 255: 63–80.

Annan, A.P. 2003. *Ground Penetrating Radar Principles, Procedures & Applications*. Sensors &
Software Inc. Canada.

Antonio, L.F., Walter E.M., Francisco, H.R., Josibel, G.O., Caroline, L.C. 2015. GPR
investigation of karst guided by comparison with outcrop and unmanned aerial vehicle
imagery. *Journal of Applied Geophysics* Vol. 112: 268–278.

Chrétien, M., Lataste, J.F., Fabre, R., Denis, A. 2014. Electrical resistivity tomography to
understand clay behavior during seasonal water content variations. *Engineering
Geology*. Vol. 169: 112–123.

Domingo, C., Verónica, R.T., Francisco, G., Jorge, P.G., Jesús, G., Mario, Z., Carles, R., Rogelio, L., James P.M, Enrique, A. 2015. Investigating a damaging buried sinkhole cluster in an urban area (Zaragoza city, NE Spain) integrating multiple techniques: Geomorphological surveys, DInSAR, DEMs, GPR, ERT, and trenching. *Geomorphology*. Vol. 229: 3–16.

Edwards, L.S., 1977. A modified pseudo-section for resistivity and IP, *Geophysics*, Vol.42, No. 5, 1020-1036.

Francisco, G., Jorge, P.G., Pedro, L., Carmen, C., Jaime, B., Jesús, G. 2011. geomorphological mapping, trenching, InSAR and GPR for the identification and characterization of sinkholes: A review and application in the mantled evaporite karst of the Ebro Valley (NE Spain). *Geomorphology*. Vol. 134: 144–156.

Francisco, G., Mario, Z., Rogelio, L., Carles, R., Domingo, C., Jesús, G., James, P.M., Xavier, C., Anthony H. 2018. Identifying the boundaries of sinkholes and subsidence areas via trenching and establishing setback distances. *Engineering Geology*. Vol. 233: 255-268.

Giaoa, P.H., Chung, S.G., Kim, D.Y., Tanakad, H. 2003. Electric imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation of Pusan clay deposits. *Journal of Applied Geophysics*. Vol.52: 157– 175.

Gómez-Ortiz, D., Martín-Crespo, T. 2012. Assessing the risk of subsidence of a sinkhole collapse using ground penetrating radar and electrical resistivity tomography. *Engineering Geology* Vol. 149-150: 1–12.

Gunn, D.A., Chambers, J.E., Uhlemann, S., Wilkinson, P.B., Meldrum, P.I., Dijkstra, T.A., Haslam, E.M., Kirkham, J.W., Holyoake, S., Hughes, P.N., Hen-Jones, R., Glendinning, S. 2015. Moisture monitoring in clay embankments using electrical resistivity tomography. *Construction and Building Materials*. Vol. 92: 82–94.

Inger-Lise, S., Michael L, Vikas C.B., Anders S.G., Jan, S.R. 2016. Geophysical and geotechnical studies of geology and sediment properties at a quick-clay landslide site at Esp, Trondheim, Norway. *Engineering Geology*. Vol.208: 214–230.

John, M. 2003. *Field Geophysics*. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England.

John, M.R. 2011. *Second Edition An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. 9600 Garsington Road, Oxford, OX4 2DQ, UK.

Jorge, S., Francisco, G., Mario, Z, Gloria, D., Jesús, G., Rogelio, L., Carles, R., Ivan, F. 2017. Sinkhole investigation in an urban area by trenching in combination with GPR, ERT and high-precision leveling. Mantled evaporite karst of Zaragoza city, NE Spain. *Engineering Geology*. Vol. 231: 9–20.

Longo, V., Testone, V., Oggiano, G., Testa, A. 2014. Prospecting for clay minerals within volcanic successions: Application of electrical resistivity tomography to characterise bentonite deposits in northern Sardinia (Italy). *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 111: 21–32.

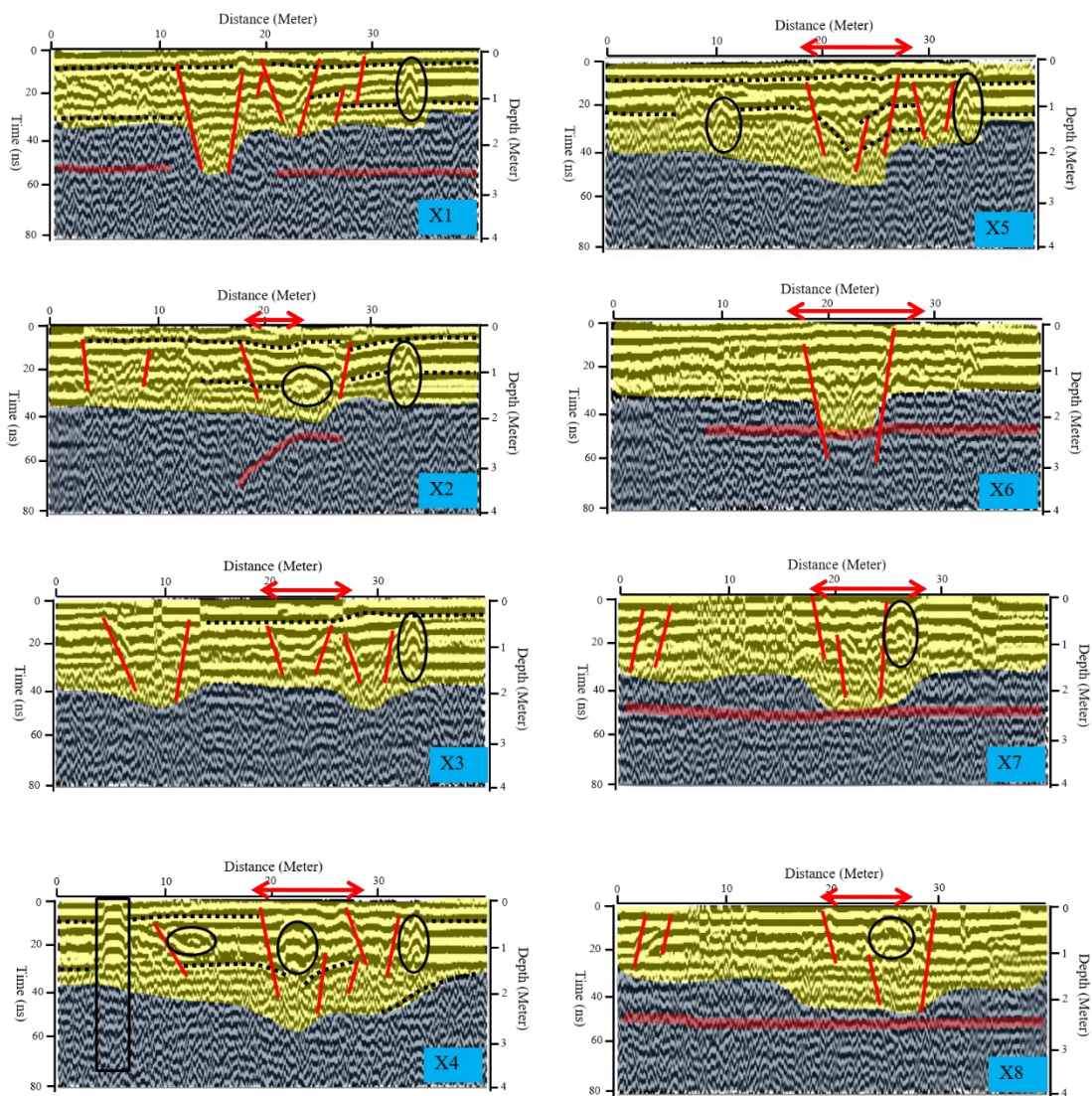
- Martínez, J., Rey J., Gutiérrez, L.M., Novod, A., Ortiz, A.J., Alejo, M., Galdón, J.M. 2015. Electrical resistivity imaging (ERI) and ground-penetrating radar (GPR) survey at the Giribaile site (upper Guadalquivir valley; southern Spain). *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 123: 218–226.
- Michael, D. 2014. *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. University Printing House, Cambridge CB2 8BS, United Kingdom.
- Neil Anderson, N.C., Rick, H., Phil, S. 2008. *Geophysical Methods Commonly Employed for Geotechnical Site Characterization*. Transportation Research Board Exploration and Classification of Earth Materials Committee.
- Parasnis, D. S. 1979. *Principles of Applied Geophysics*. Fifth edition Chapman and Hall, 429 pages.
- Pueyo Anchuela, Ó., Casas Sainz, A.M., Pocoví Juan, A., Gil Garbí, H. 2015. Assessing karst hazards in urbanized areas. Case study and methodological considerations in the mantle karst from Zaragoza city (NE Spain). *Engineering Geology*. Vol. 184: 29–42.
- Pueyo-Anchuela, Ó., Casas-Sainz, A.M., Pocoví Juan, A., Ansón-López, D. 2011. Multidisciplinary approach for urban planning in alluvial karstic zones Case study from the Central Ebro Basin (Spain). *Engineering Geology*. Vol. 122: 222–238.

- Pueyo-Anchuela, Ó., Casas-Sainz, A.M., Pocoví Juan, A., Soriano, M.A. 2011. Applying GPR-amplitude wave maps and Am-scans as a semi-quantitative approach to the internal structure of sediments. *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 75: 151–160.
- Pueyo-Anchuela, Ó., Pocoví Juan, A., Soriano, M.A., Casas-Sainz, A.M. 2009. Characterization of karst hazards from the perspective of the doline triangle using GPR — Examples from Central Ebro Basin (Spain). *Engineering Geology*. Vol. 108: 225–236.
- Sebastian, K., Krzysztof, C., Micha, R. 2017. Application of geophysical methods in the evaluation of anthropogenic transformation of the ground: A case study of the Warsaw environs, Poland. *Engineering Geology*. Vol. 216: 42–55.
- Sebastian, U., Oliver, K., Laura, A.R., Emma, N., David, A.P. 2017. Electrical resistivity tomography determines the spatial distribution of clay layer thickness and aquifer vulnerability, Kandal Province, Cambodia. *Journal of Asian Earth Sciences*. Vol. 147: 402–414.
- Wanhassan, W.B. 2010. Strength characteristic of soft soil reinforced with coir fibres. Faculty of civil Engineering and Earth Resources University Malaysia Pahang.
- Won-Taek, H., Seonghun, K., Sung, J.L., Jong-Sub, L. 2018. Analyses of GPR signals for characterization of ground conditions in urban areas. *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 152: 65-76.

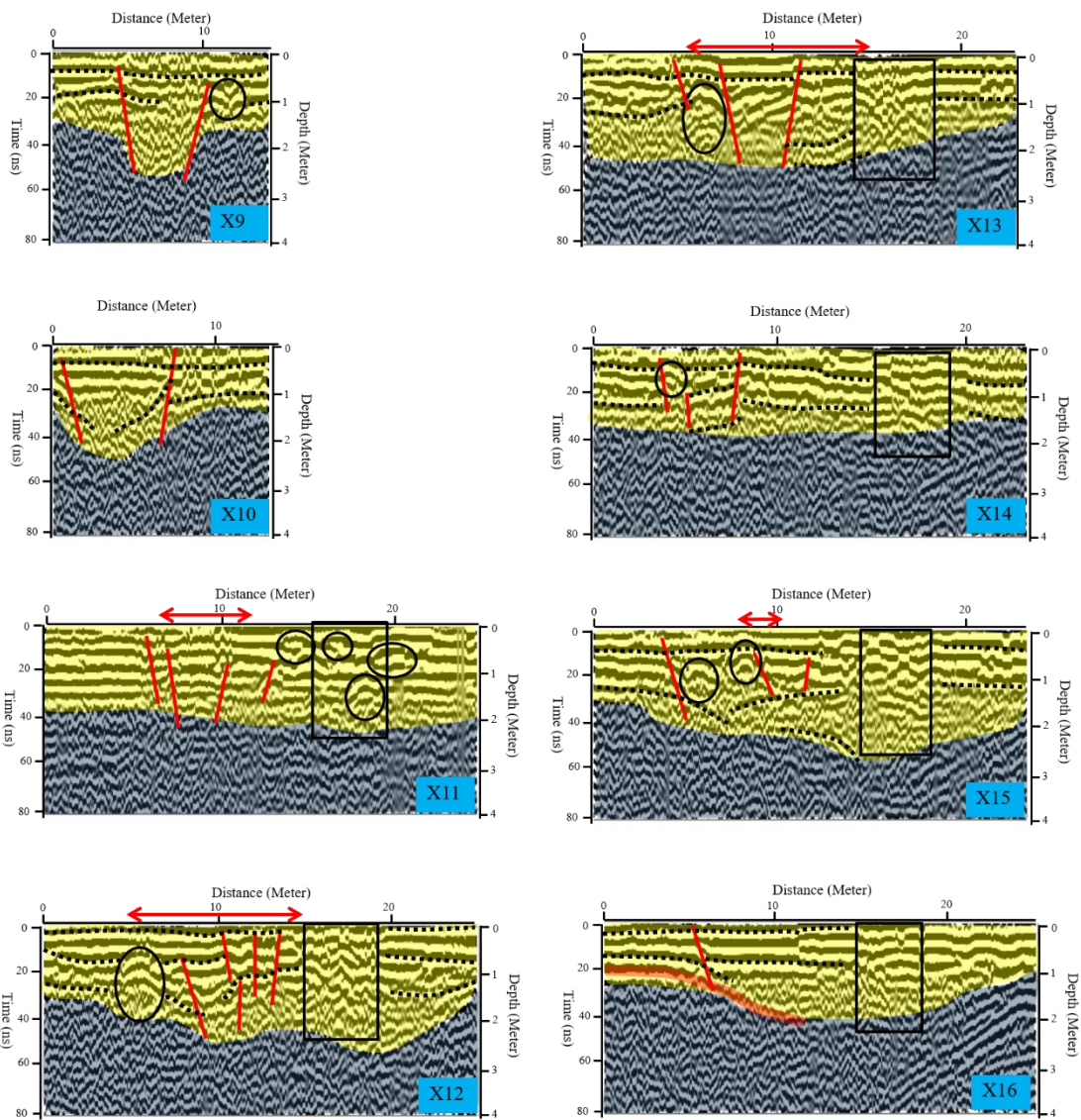
ภาคผนวก

ภาคผนวก

ผลการสำรวจ GPR จากสายอากาศความถี่ 200 MHz และ 50 MHz บริเวณพื้นที่ด้านตรวจความ
 มั่นคงคลองแห



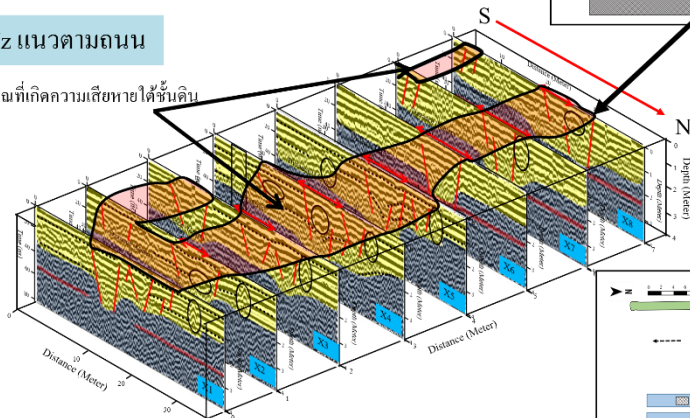
รูปที่ ๗1 ผลที่ได้จากความถี่ 200 MHz คลองแหในแนวตามถนน



รูปที่ ๗2 ผลที่ได้จากความเร็ว 200 MHz คลองแหในแนวขวางถนน

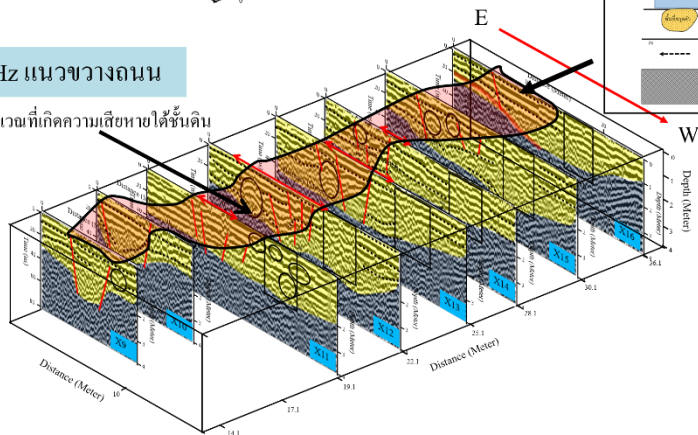
200 MHz แนวตามถนน

บริเวณที่เกิดความเสียหายได้ชั้นดิน

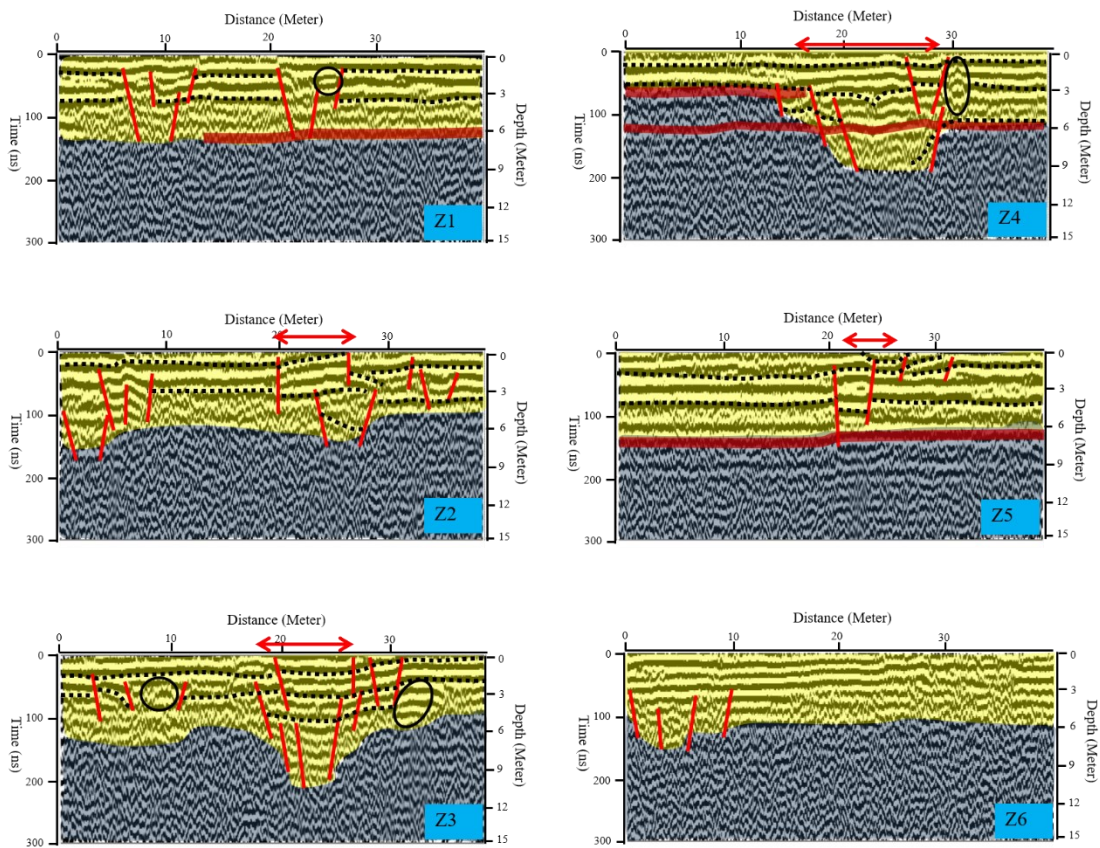


200 MHz แนวขวางถนน

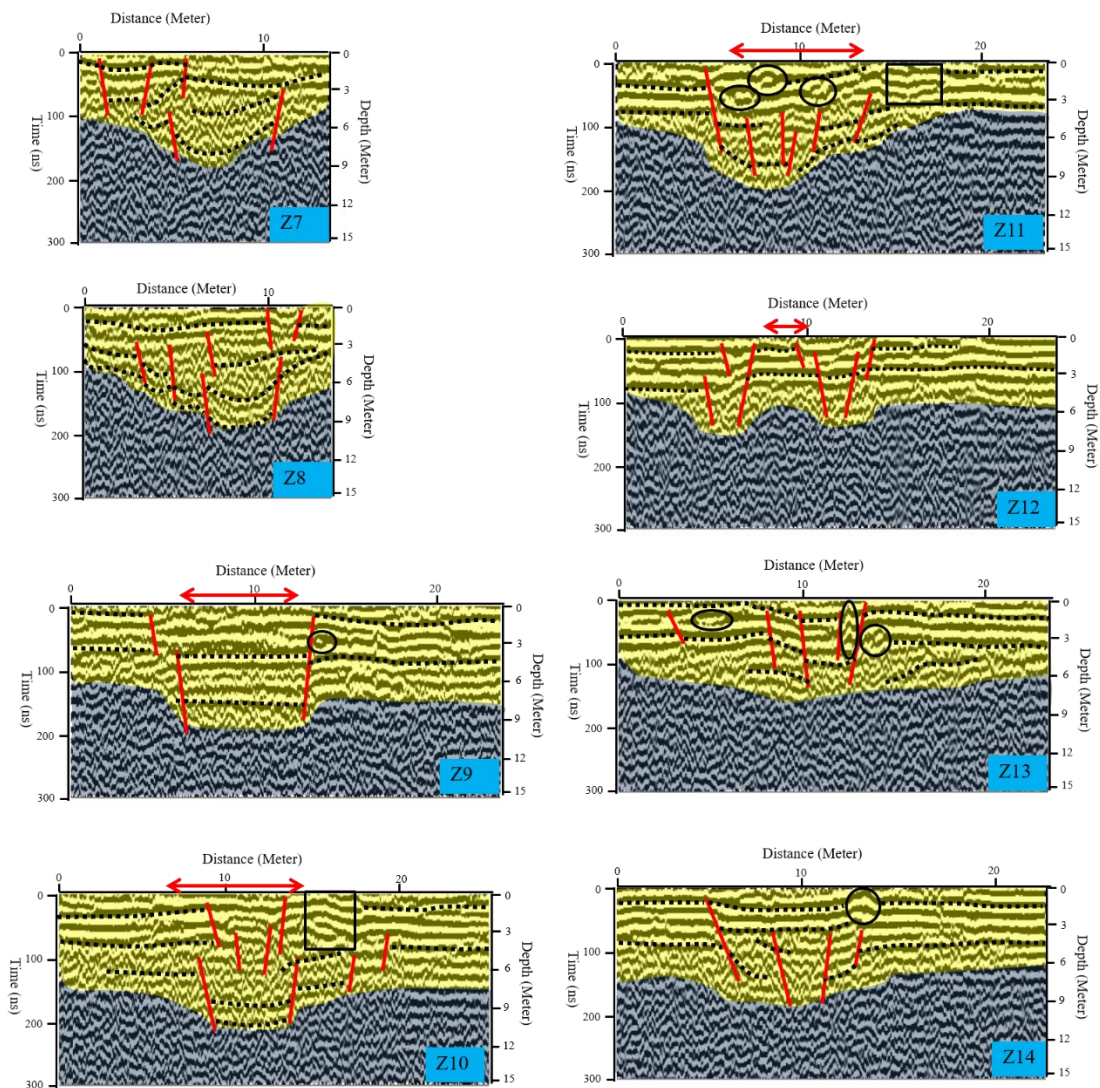
บริเวณที่เกิดความเสียหายได้ชั้นดิน



รูปที่ ๓3 บริเวณเกิดดินทรุดตัวได้ชั้นดินที่ได้จากคามถี่ 200 MHz ในแนวตามถนนและแนวขวางถนน



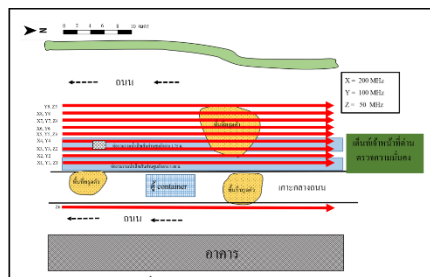
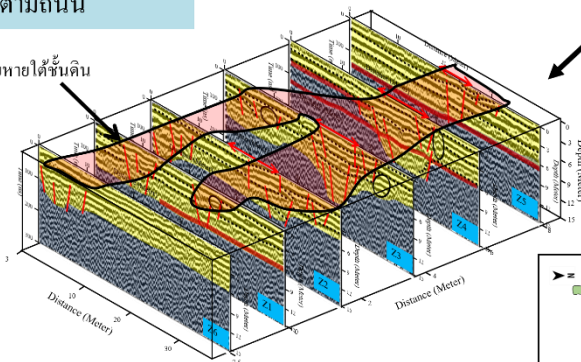
รูปที่ ผ4 ผลที่ได้จากความถี่ 50 MHz คลองเหินแนวตามถนน



รูปที่ ๗5 ผลที่ได้จากความถี่ 50 MHz คลองแหในแนวขวางถนน

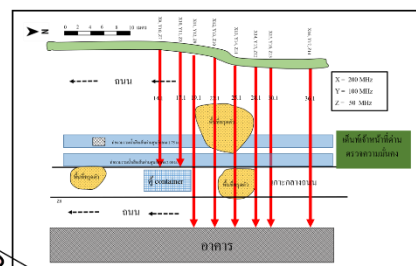
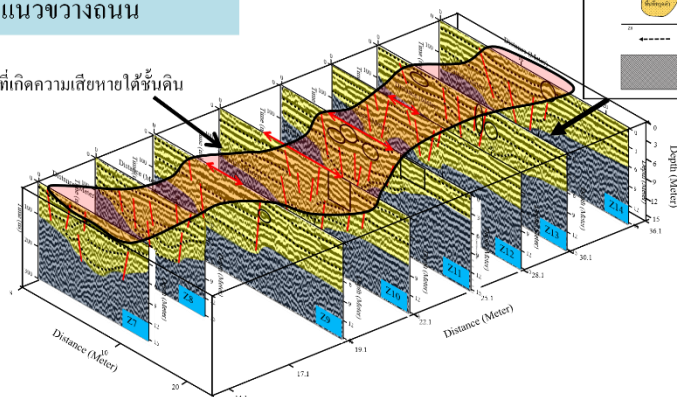
50 MHz แนวตามถนน

บริเวณที่เกิดความเสียหายได้ชั้นดิน

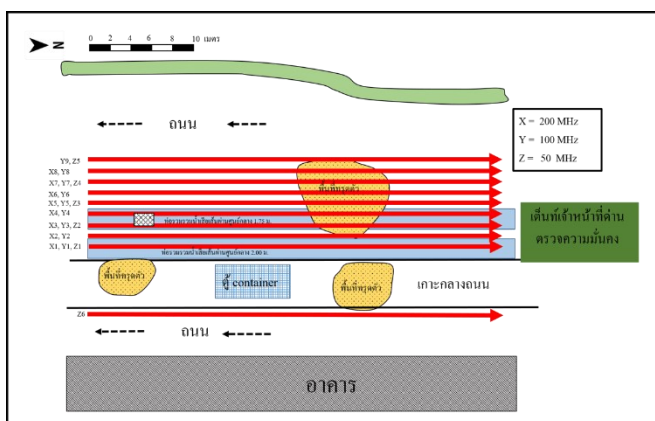


50 MHz แนววางถนน

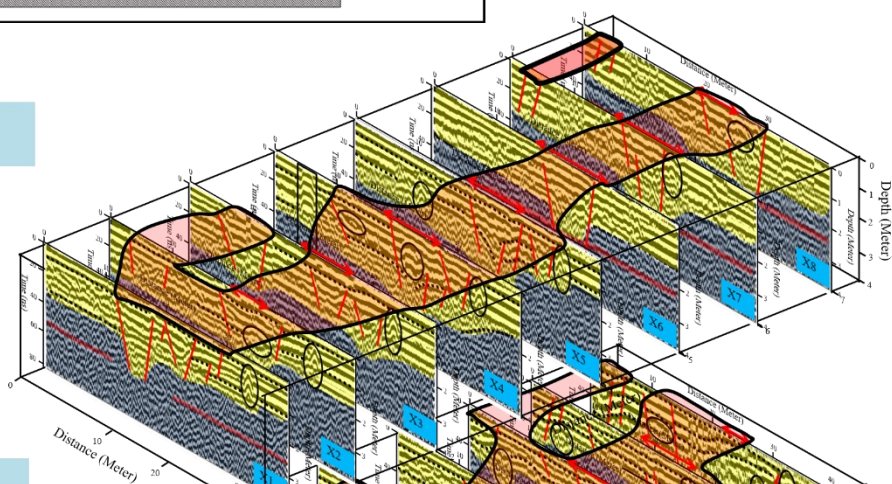
บริเวณที่เกิดความเสียหายได้ชั้นดิน



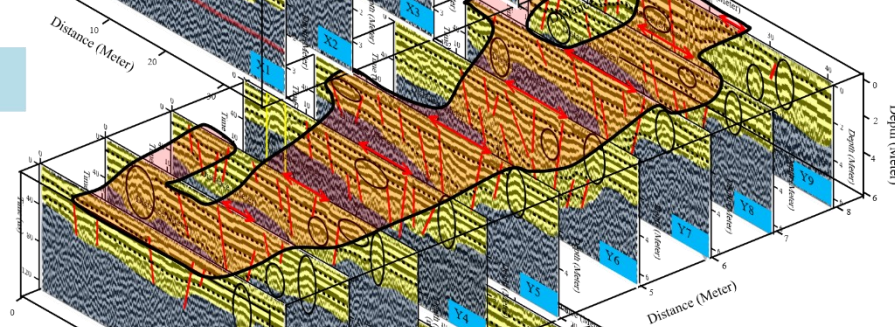
รูปที่ ๗6 บริเวณเกิดดินทรุดตัวใต้ชั้นดินที่ได้จากความถี่ 50 MHz ในแนวตามถนนและแนววางถนน



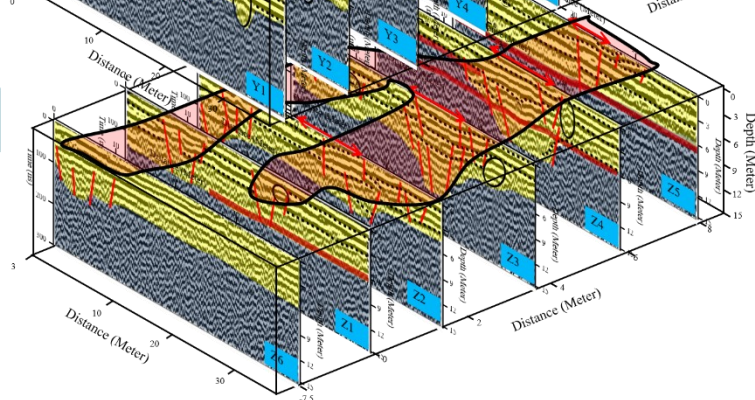
200 MHz



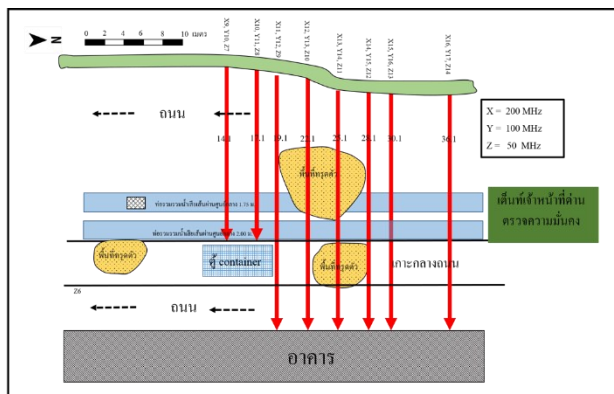
100 MHz



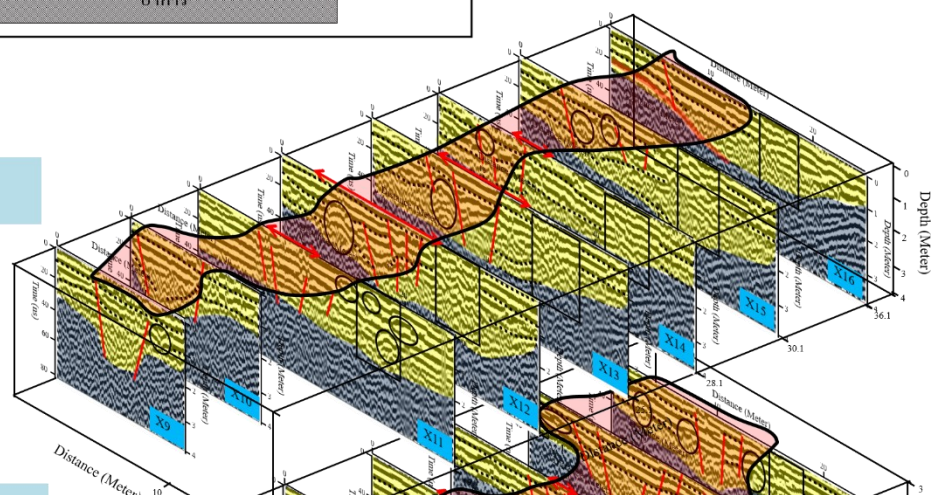
50 MHz



รูปที่ ๗ แสดงการเปรียบเทียบบริเวณที่ได้รับผลกระทบชั้นดินจากความถี่ 200, 100 และ 50 MHz ในแนวตามถนน



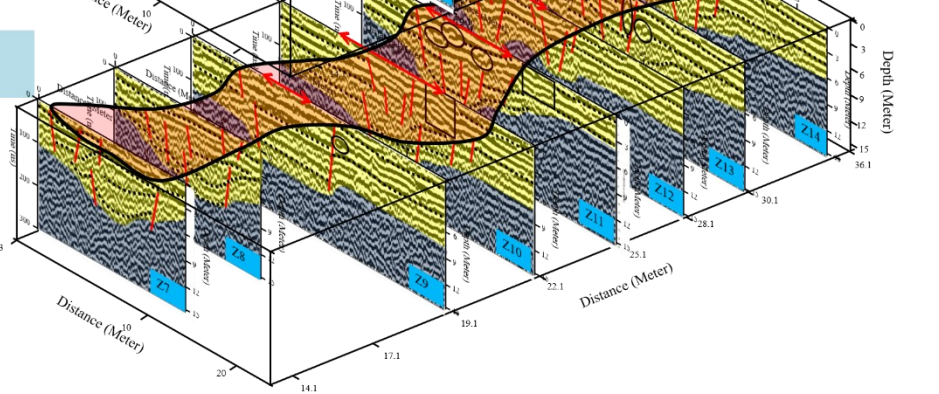
200 MHz



100 MHz

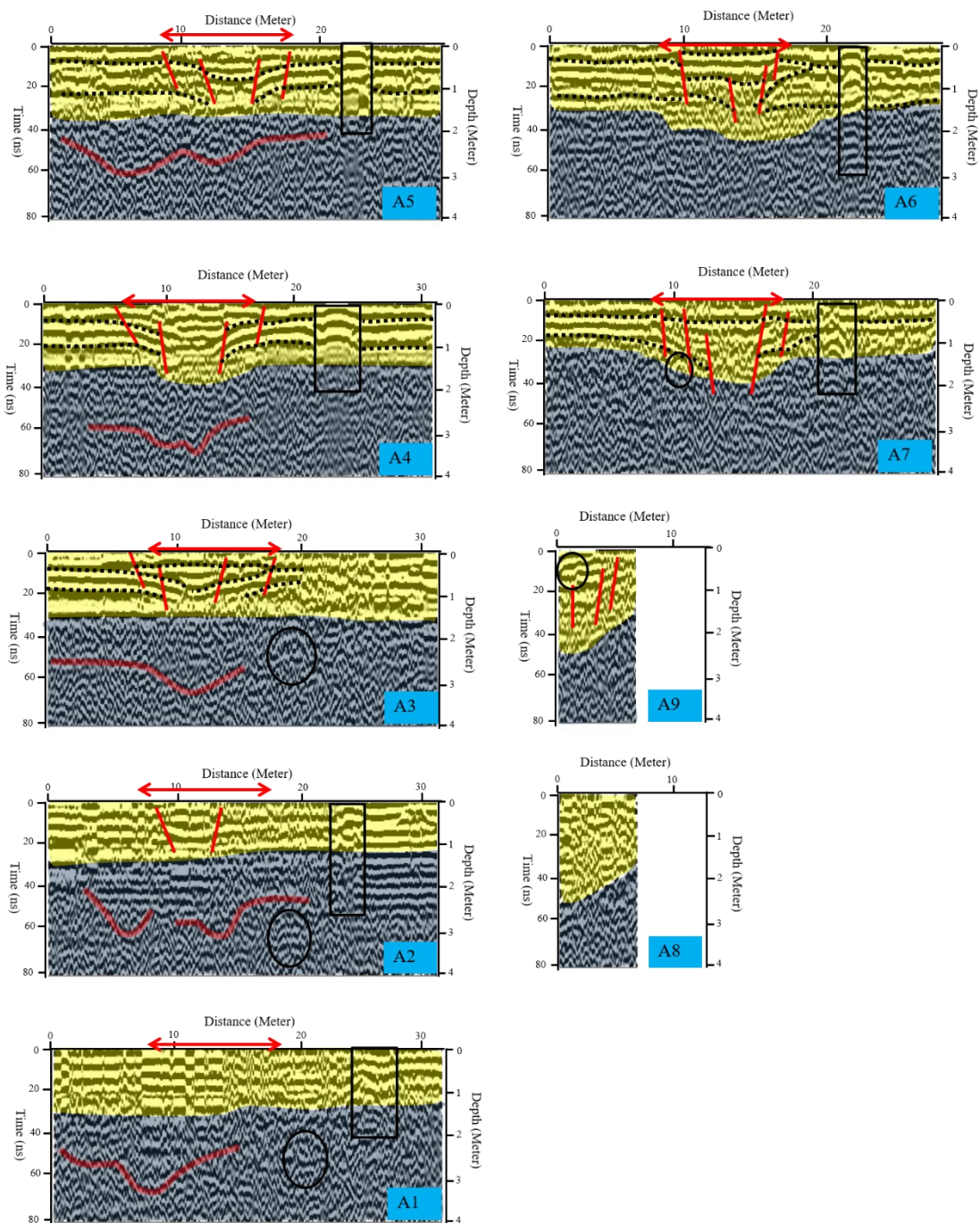


50 MHz



รูปที่ ๒๘ แสดงการเปรียบเทียบบริเวณที่ได้รับความเสียหายชั้นดินจากความถี่ 200 MHz, 100 MHz และ 50 MHz ในแนวขวางถนน

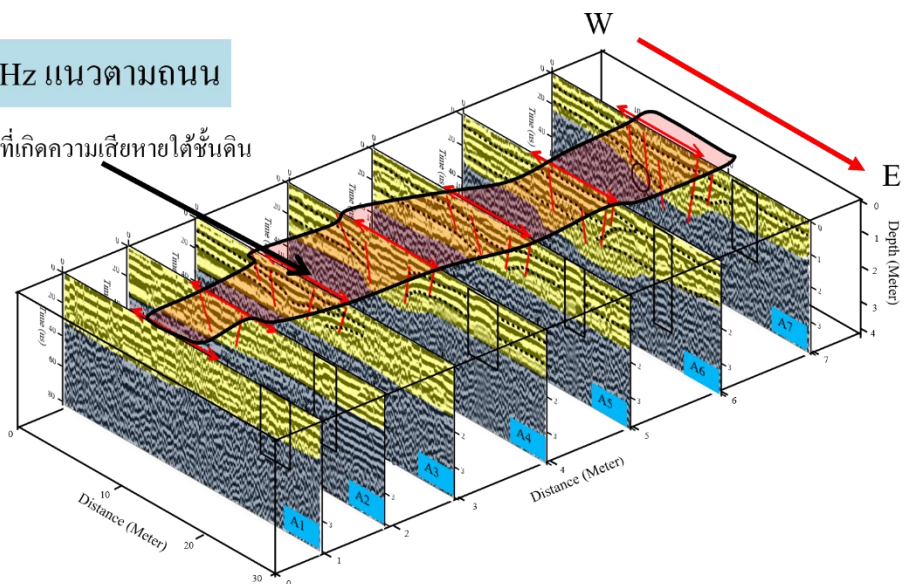
ผลการสำรวจ GPR จากสายอากาศความถี่ 200 MHz และ 100 MHz บริเวณถนนขสาธาแนวริมคลองเตย (ตลาดกิ่งโค้ง)



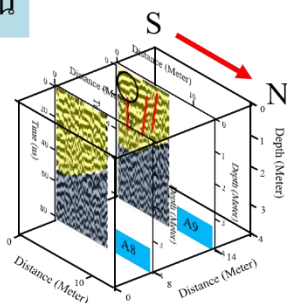
รูปที่ ๗9 ผลที่ได้จากสายอากาศความถี่ 200 MHz ในแนวตามถนนและแนวขวางถนน

200 MHz แนวตามถนน

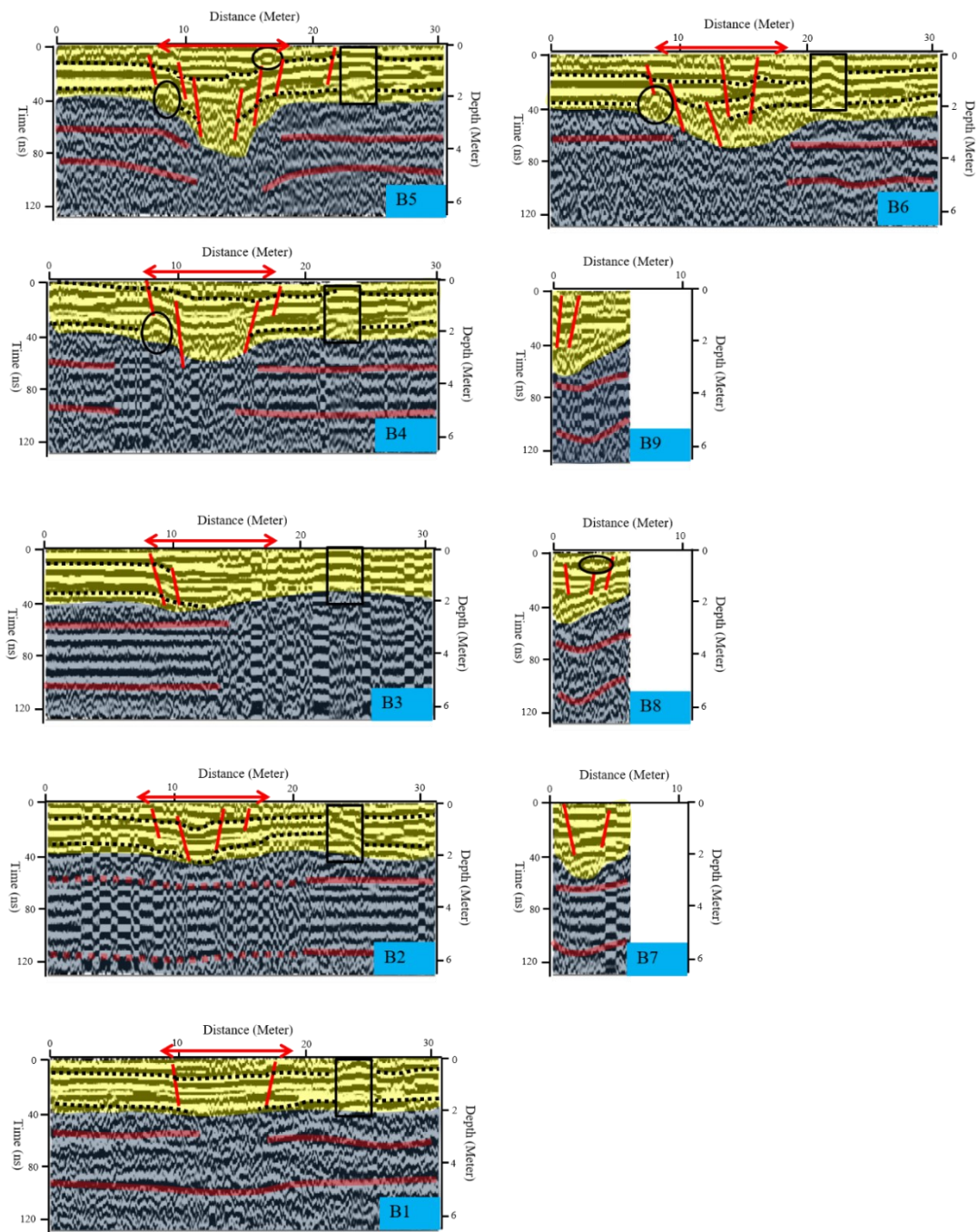
บริเวณที่เกิดความเสียหายใต้ชั้นดิน



200 MHz แนวขวางถนน



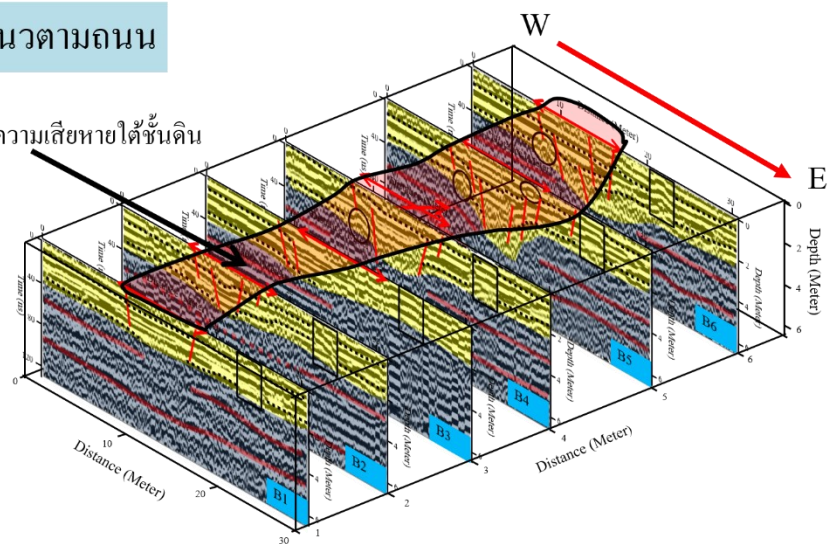
รูปที่ ๑๐ บริเวณเกิดดินทรุดตัวใต้ชั้นดินที่ได้จากความถี่ 200 MHz ในแนวตามถนนและแนวขวางถนน



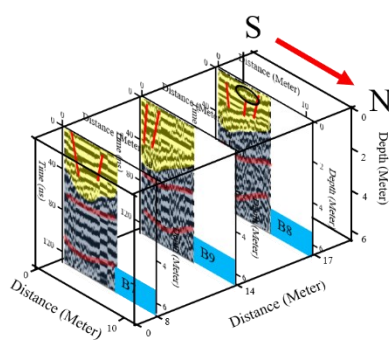
รูปที่ ๑๑ ผลที่ได้จากสายอากาศความถี่ 100 MHz ในแนวตามถนนและแนวขวางถนน

100 MHz แนวตามถนน

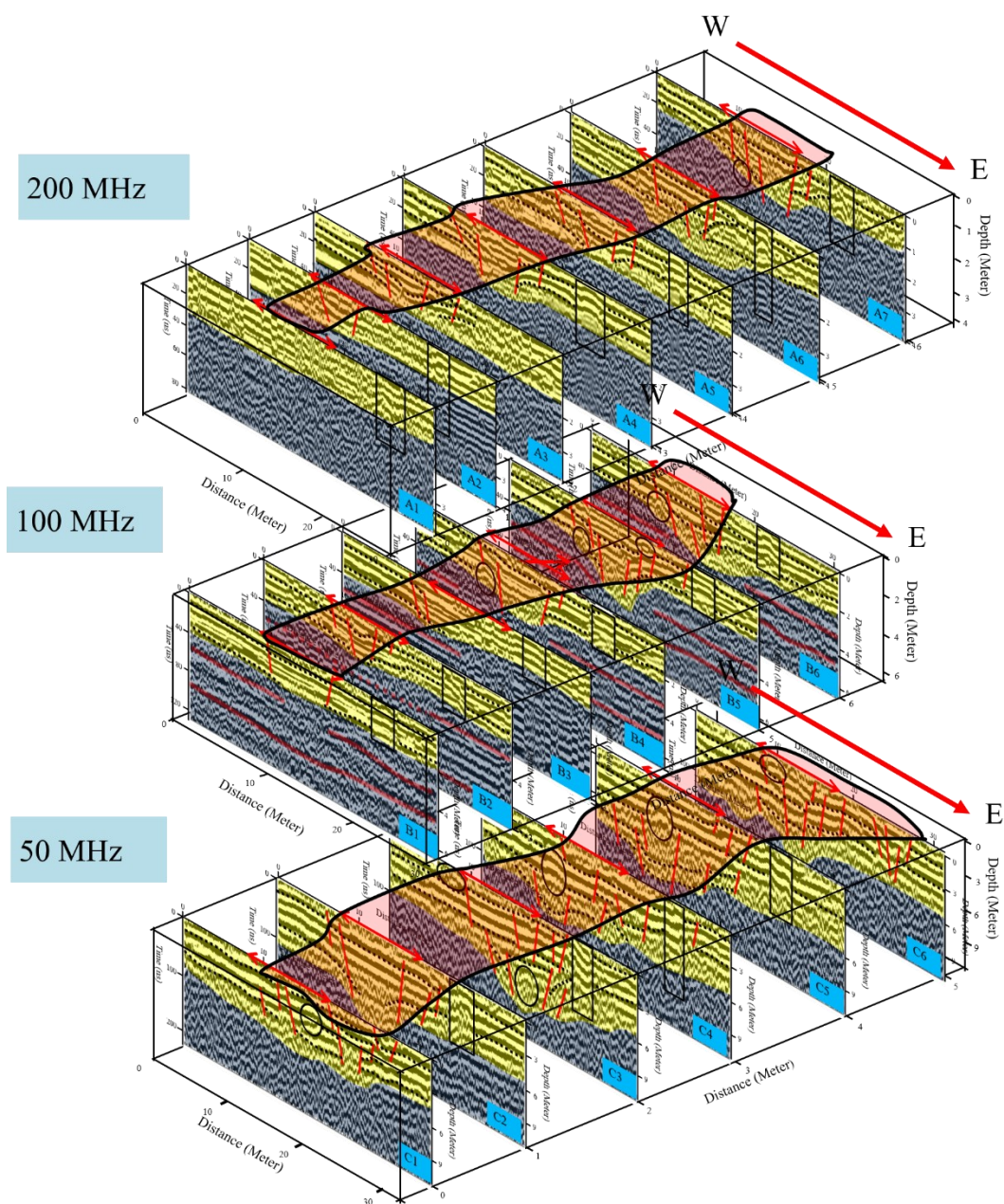
บริเวณที่เกิดความเสียหายได้ชั้นดิน



100 MHz แนวขวางถนน



รูปที่ ๗12 บริเวณเกิดดินทรุดตัวได้ชั้นดินที่ได้จากความถี่ 100 MHz ในแนวตามถนนและแนวขวางถนน



รูปที่ ๗13 แสดงเปรียบเทียบบริเวณที่ได้รับความสะดวกเสียหายชั้นดินจากความถี่ 200, 100 และ 50 MHz ในแนวตามถนน

ผลงานเผยแพร่จากวิทยานิพนธ์



The 8th International Conference on Applied Geophysics



PROCEEDINGS

8-10 November 2018
BP Samila Beach Hotel & Resort,
Songkhla, Thailand

Application of Resistivity Method for Characterizing Soft Soil in Construction Site, Rubber City, Southern Thailand

Piyapong Sangkawang^{1,*}, Santi Raksawong¹, Thanan Chub-uppakarn²,
Kamhaeng Wattanasen¹

^{1,*}Department of Physics, Prince of Songkla University, THAILAND.

²Department of Civil Engineering, Prince of Songkla University, THAILAND

(Email: piyapong.s320@gmail.com, kamhaeng.w@psu.ac.th)

ABSTRACT Electrical resistivity tomography (ERT) method was performed a survey in the construction site of the southern industrial estate (Chalung) phase 2, HatYai district, Songkhla province, covering an area of about 315,500 m² to characterize the subsurface structure. The purpose of this study was to determine a zone of soft soil because it was found in some parts of the project area. Due to the high compressibility and low shear strength of soft soil, constructions on it will be effected by stability and settlement problems. ERT dipole-dipole array was conducted by Lund Imaging System and ABEM Terrameter SAS 1000 with 5 m of smallest electrode spacing for the target depth of about 30 m. There are totally 20 resistivity survey lines, which were inverted by RES2DINV software for subsurface true resistivity distribution sections. The zone of soft soil was characterized by the zone of resistivity value < 40 Ohm-m. This zone found cover relatively wide area that can be seen from a depth of about 12.5 m to 25.0 meters, covering an area from lines BCH03 - BCH10 in the middle of study area. For areas with the resistivity is higher than 40 Ohm-m, they are expected that the subsurface is not the soft soil. At shallow depths (5.0 m, 7.5 m and 10.0 m) some narrow zones of soft soil can be suggested. ERT has proven as a high potential geophysical method for mapping the boundary of subsurface soft soil in geotechnical engineer projects.

Keywords: soft soil; geophysics methods; GPR; Geotechnical Engineering; Resistivity.

1. INTRODUCTION

Soft soil is any soil which is susceptible to failure or causes excessive settlement when superstructure is constructed over it. The type of soil is classified as soft such as clay, loose sand and silt particular clay that have low shear strengths and to lose shear strength further upon wetting or other physical disturbances. It is thus the problems in geotechnical engineering, in which these kinds of soil making very hazardous for shallow foundations. The exploration evaluation of clay is generally achieved through conventional methods, including structural and stratigraphic studies, drilling investigation and trenches. These methods are normally high cost and waste of time. In addition, shallow subsurface geophysics provides quick and relatively inexpensive methods which can obtain continuous information of the subsurface in the prospected area. The use of geophysical techniques based on the contrast of physical properties, such as electrical resistivity, dielectric permittivity, magnetic permeability, velocity and density etc. When the model of subsurface geophysical properties distribution has been achieved by measuring and processing data, then the interpretation of that model will give the subsurface geological information. In an area of geotechnical engineering, the trend of applying geophysical methods e.g. resistivity and Ground Penetrating Radar (GPR) in geotechnical problems has been now increasing. The electrical resistivity tomography (ERT) method has been successfully applied to identify and characterize conductive clay bodies (Chrétien et al. 2014, Longo et

HA2-2

al. 2014, Wattanasen et al. 2006). Generally the electrical resistivity of clay is quite low which it ranges from 1 - 100 $\Omega.m$ and ranges from 1-12 $\Omega.m$ for soft clay (Giao et al. 2004). The aim of this study is to apply the ERT method for characterising the subsurface soft soil zone in the construction site of the southern industrial estate (Chalung) phase 2, HatYai District, Songkhla province, southern Thailand. This study result will provide a very important information of the soft soil zone beneath the site that will then be used by geotechnical or civil engineer for planning to solve the soft soil problem.

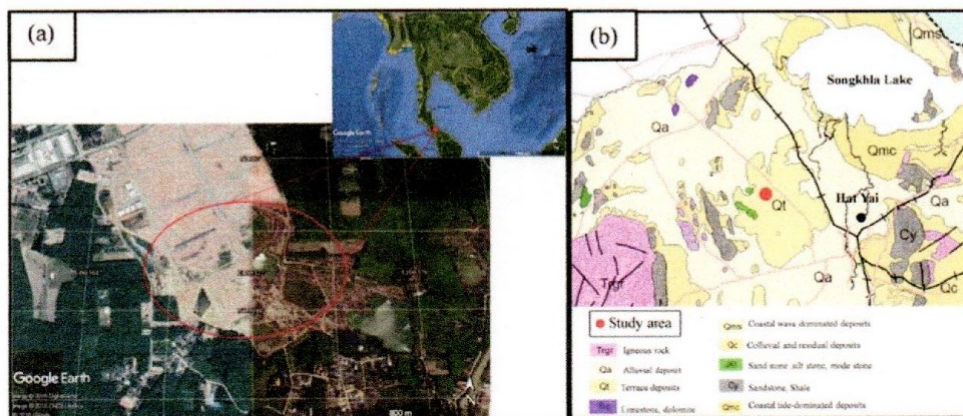


Figure 1 (a) Location map of the study area, and (b) and geological map of location of studied zone.

2. BACKGROUND OF THE STUDIED AREA

The study area located in the southern industrial estate (Chalung) phase 2, Chalung sub-district, HatYai District, Songkhla province, southern Thailand. It has been known that it is planned to be a rubber city by the government. This area is former mining area associated with the Dredge mining on land for cassiterite and other minerals so there were many old mining pits that their depth are several meters below the ground surface. The exploitation of these minerals date back to the second half twentieth century and continues to the end of the twentieth century. The geology of the study area has been covered by Terrace deposits shown in Fig.1 (b). They consist of sand, silt, gravel, clay and laterite. Because of sedimentary layer in this site, existence much of soft clay is one of the big issues for project manager to design the foundation of under constructing buildings. The soft clay was observed during the developed phase that it had been seen in some excavation areas (Fig. 2(a) and 2(c)). The event that confirmed the subsurface soil had very low strength was when the excavator stuck in the soft clay. Therefore, the subsurface investigation for the depth, the thickness and extent of the soft clay information of this site is needed for geotechnical engineering in order to design and plan to solve the foundation problem in this site.

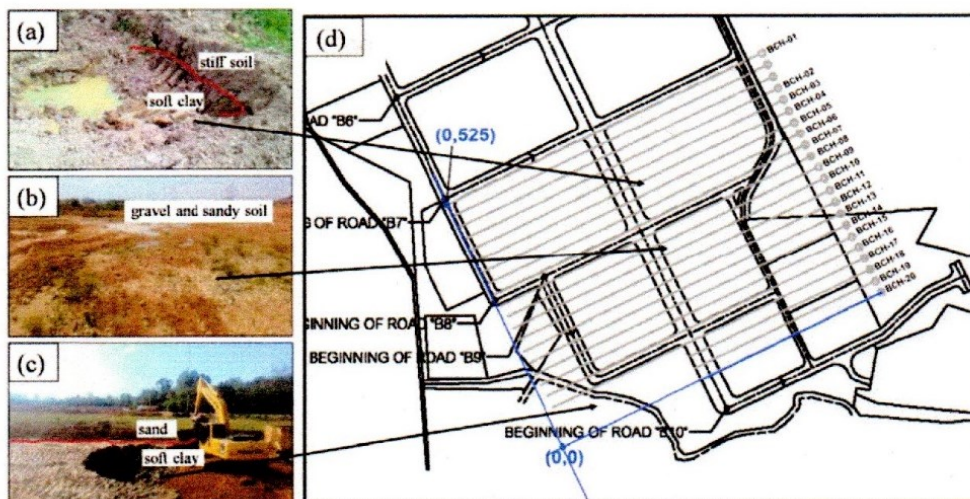


Figure 2 (a) The soft soil lay on the bottom of the relatively stiff soil, (b) Show the surface area is covered by the topsoil; gravel and sandy soil, (c) soft clay layer found at a depth of about 1.50 m from the surface and (d) the map shows the 20 ERT survey lines (BCH-01 - BCH-20).

3. METHODOLOGY

Dipole-dipole arrays (Fig. 3) were used to determine a continuous 2-dimensional image of the subsurface resistivity along the 20 measuring profiles (BCH-01 – BCH-20) with the purpose of searching for relationship between resistivity and stratigraphy of unconsolidated sediments. If the stratigraphy can be imaged, soft soil zone might be determined from discontinuities in the layers. The dipole-dipole array has been widely used in resistivity and IP surveys because of the low electromagnetic coupling between the current and potential circuit. It is the array most sensitive to horizontal change in resistivity, thus vertical structures (changing in lateral resistivity) such as faults, dyke, cavities etc. are suitable to be mapped by this array e.g. Bano et al. (2002). To acquiring data with the dipole-dipole array, the Lund Imaging System (Dahlin, 1996) consisting of ABEM Terrameter SAS 1000 (ABEM Instrument AB, Sundbyberg, Sweden) together with ES4640 Electrode selector was used to specify the sequence of measurement. All the ERT profiles were oriented in N62°E direction and parallel to each other with the profile interval 25 m except for the distance between the BCH-01 and BH-02 was 75 m. The maximum length and the shortest length of the profiles are 600 m and 300 m, respectively with the target depth of investigation about 30 m. The short 32 protocol file was used to conduct the measurement sequence with a distance between the dipole pair (AB or MN), $a = 5 \dots 15$ m and $n = 1 \dots 6$. This protocol gives totally 356 measuring points of apparent resistivity and the vertical depths of plotting points are $0.416a$, $0.697a$, $0.962a$, $1.220a$, $1.476a$, and $1.730a$ for $n = 1 \dots 6$ respectively (Edwards, 1977).

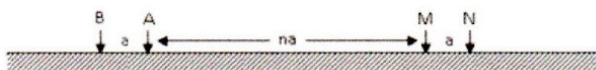


Figure 3 Dipole-dipole array for resistivity measurement. A and B are current electrodes, M and N are the potential electrodes. The distance between the dipole pair (AB or MN) is a , whereas n is an integer equal $1 \dots 6$.

Measuring of electrical resistivity with dipole-dipole array by injecting direct electrical currents in to the ground via the pair of current electrodes and measuring the voltage difference () between the

HA2-4

pair of potential electrodes. The apparent resistivity data from the field investigation can be calculated from Eq. 1

$$\rho_a = \frac{V}{I} \dots \dots \dots (1)$$

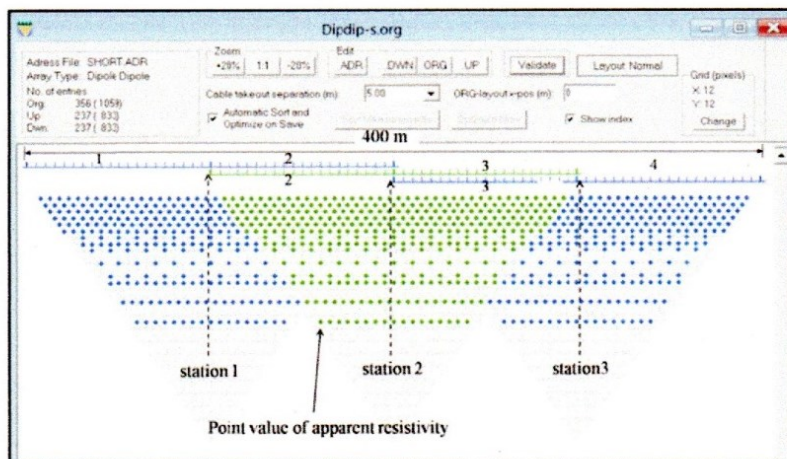


Figure 4 Short protocol for dipole-dipole array resistivity measurement. Starting measurement with 2 spreads of electrodes (2 and 3), the measured apparent resistivity was then plotted in green points color. For an extension of resistivity data beneath the profiles (blue points color) the upward or downward spread need to be performed.

Two-dimensional resistivity models were constructed using the inversion program RES2DINV version 3.41c (Loke, 1999). This program creates a model of resistivity in a pseudosection and adjusts this model to fit the measured data by applying a non-linear least squares optimization technique (deGroot-Hedlin and Constable, 1990; Loke and Baker, 1996). The resolution in the model is here decided by setting the thickness of the first layer of blocks at 0.9 times of the electrode spacing (a). The thickness of the subsequent deeper layer was set to increase by 10%. In the optimization procedure, the program basically tries to get the best fitting by adjusting the resistivity of the model blocks to minimize the root-mean square (RMS) error. We tried to force the program to calculate models with RMS error lower than 5%. The best possible models were considered when the RMS error did not change significantly, which usually occurred between the 5th and 9th iteration of calculation. However, models with small values of RMS error sometimes might not represent the best models of the geological features. Therefore, geological information in the area had an important role for the choice of the best model. For some models, the RMS error was never lower than 5% because of noises in the raw data. Nevertheless, all models have RMS errors lower than 5% and these models files were then saved for more sophisticated contouring by the program Surfer8 (Golden Software Inc., 1999)

4. RESULTS AND DISCUSSION

Inversion resistivity models along 20 profiles show fairly the same pattern of subsurface stratigraphy (Fig. 5). The differences in the layer thickness of each layer between the profiles reflects the subsurface structures variations within the area. The area of low resistivities (< 40 Ωm) can be correlated to clay or soft soil, while the area with the resistivities higher than this value, the soft soil area is not expected.

HA2-5

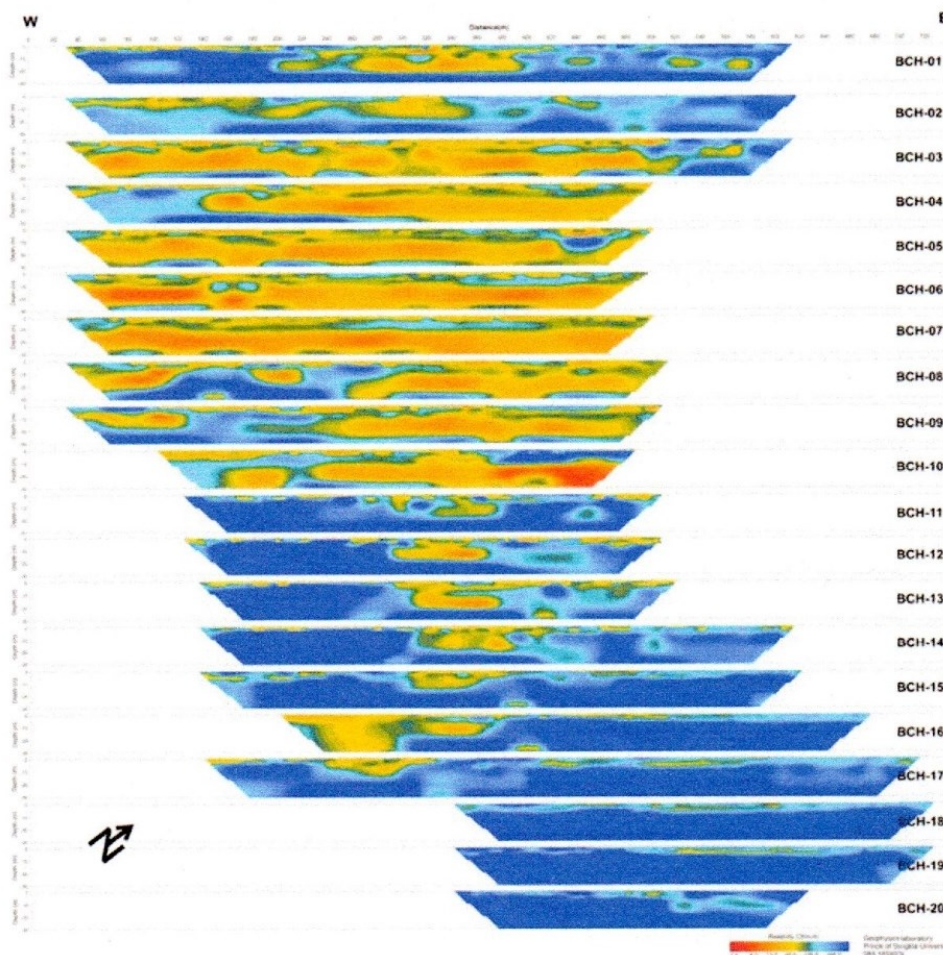


Figure 5 The models of the subsurface 2D resistivity distribution beneath the profiles BCH-01 – BCH-20.

From the cross-sectional model of resistivity distribution, it was found that the soft soil layer (yellow – red color) overlain by the thin high resistive top soil layer (green – blue color). This zone of soft soil layer covers an area from profiles BCH-03 to BCH-10 with the thickness of more than 10 m at some distances, except for the area between 450 and 620 m, 25 and 140 m, 220 and 280 m, and 120 and 240 m in the profiles BCH-03, BCH-04, BCH-08, and BCH-09, respectively where the high resistivity layers were found instead of soft soil layer. The area in the south, the resistivity subsurface soil mostly indicates no soft soil zone, except at a distance of 310-380, and 200-360 m in the profiles BCH-12-15 and BCH-16, respectively. This narrow area from the North to the South is probably the route of the dredging mine operation in the past. There are only three profiles, BCH-18, BCH-19 and BCH-20 that showed high resistive subsurface soil, so the zone of the project area is not suffered from the soft soil problem. The horizontal resistivity variation at 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0, 17.5, 20.0, and 25.0 m depths is shown in Fig. 6. Each layer depths of resistivity image were obtained by contouring the determined resistivity data at the same depth along each profile. Low resistivities expected soft soil layer are found dominantly covering in the central area from BCH-03 to BCH-10 at the depths of about 12.5 to 25.0 m. At shallow depth (< 12.5 m), some prominent areas of soft soils are found at depths of 5 m, 7.5 m, and 10 m. The continuation of low resistivities less than 40 Ωm at the shallow

HA2-6

depths looks like the road that it should be correlated to the route of the dredging machine during mining operation in the past.

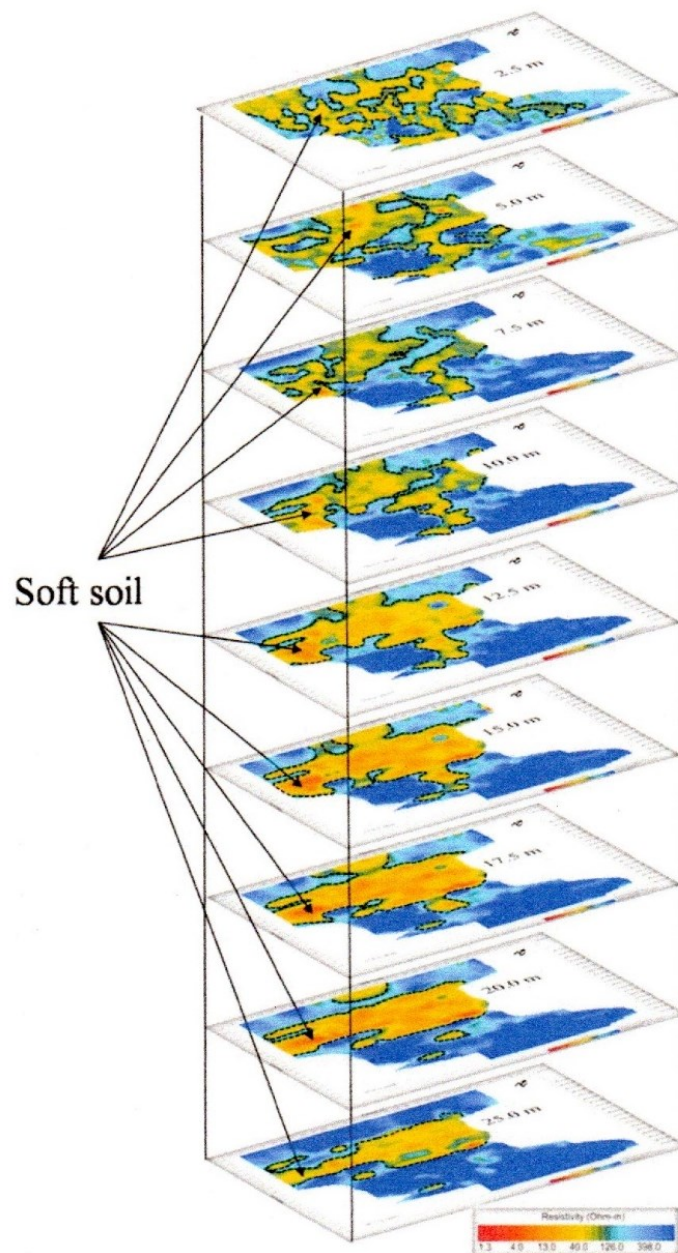


Figure 6 The distribution of resistivity at depths from 2.5 to 25.0 m.

5. CONCLUSIONS

By using dipole-dipole electrical resistivity tomography it was possible to define the soft soil zone in the study area. The area of low resistivity ($< 40 \Omega\text{m}$) is expected to be the soft soil area. A variation thickness of soft soil can be seen from images of 2D resistivity distribution and horizontal resistivity distribution at different depths. From the resistivity distribution images, the boundary of soft soil was found from depths of about 12.5 to 25.0 m covering in the central part of the area (profiles BCH-03 - BCH-10) with a thickness more than 10 m. The soft soil is covered by a thin layer of high resistive top soil. At shallow depth (< 12.5 m), some prominent areas of soft soils are found at depths of 5 m, 7.5 m, and 10 m. This continuation of low resistivity pattern looks like the road that it should be correlated to the route of the dredging machine during mining operation in the past. In the southern part of the area (BCH-18, BCH-19 and BCH-20) where the subsurface soil showed high resistivity, it is suggested that the zone of the project area is not suffered from the soft soil problem. The successful of this study has been confirmed by later excavation for soft soil improvement. This geophysical study has proven to be a helpful tools for mapping soft soil zone in the construction area. The results provide significantly data for geotechnical engineering for planning and designing of builders foundation.

REFERENCES

- Chrétien, M., Lataste, J.F., Fabre, R., Denis, A. 2014. Electrical resistivity tomography to understand clay behavior during seasonal water content variations. *Engineering Geology*, Vol. 169: 112–123
- deGroot-Hedlin C, Constable SC (1990) Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics* 55:1613–1624
- Edwards LS (1977) A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics* 42(5):1020–1036
- Giao, P.H., Chung, S.G., Kim, D.Y., Tanaka, H. 2003. Electric imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation of Pusan clay deposits. *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 52: 157– 175.
- Golden Software Inc. (1999) Surfer User's guide
- Loke, M.H., 2001, RES2DINV ver.3.4 Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. ABEM Instrument AB, User manual.
- Loke MH (1999) RES2DINV Ver.3.4: Rapid 2D Resistivity and IP inversion using the least-squares method. User manual, ABEM Instrument AB
- Longo, V., Testone, V., Oggiano, G., Testa, A. 2014. Prospecting for clay minerals within volcanic successions: Application of electrical resistivity tomography to characterise bentonite deposits in northern Sardinia (Italy). *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 111: 21–32.
- Dahlin, T., 1996. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications, *First Break*, 14, 275-283
- Wattanasen, K., Elming, S.A., Lohawijarn, W., and Bhongsuwan, T. 2006. An integrated geophysical study of arsenic contaminated area in the peninsular Thailand, *Environ Geol* 51: 595-608.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายปิยะพงศ์ สังควังค์
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 5810220046
 วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2557

ทุนการศึกษา

ทุนผู้ช่วยวิจัยของศูนย์วิจัยธรณีฟิสิกส์ ปีการศึกษา 2558
 ทุนผู้ช่วยสอนของคณะวิทยาศาสตร์ ปีการศึกษา 2559
 ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์เพื่อบัณฑิตวิทยาลัย ปีการศึกษา 2559

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Sangkawang, P., Raksawong, S., Chub-uppakarn, T., Wattanasen, K. Application of Resistivity Method for Characterizing Soft Soil in Construction Site, Rubber City, Southern Thailand, Proceeding of the International conference on Applied Geophysics (November 8-10, 2018): Songkhla, Thailand.