



โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

การสำรวจแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมทางคอนกรีต
ด้วยวิธีสำรวจหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์แบบสามมิติ

โดย

นางสาวอาทิมา โคจิมา
เลขประจำตัวนิสิต 5732761223

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี
ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของโครงการทางวิชาการที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงการทางวิชาการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด

The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the senior project authors' files submitted through the faculty.

การสำรวจแบบจำลองโครงข่ายไฟฟ้าทางคอนกรีต
ด้วยวิธีสำรวจหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์แบบสามมิติ

นางสาวอาทิมา โคจิมะ

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560

EXPLORATION OF VOID MODEL UNDER CONCRETE PAVEMENT
BY 3D GROUND PENETRATING RADAR METHOD

MISS ATIMA KOJIMA

A project submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of the Bachelor of Science in Geology
Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University
Academic Year 2017

5732761223 : ภาควิชาธรณีวิทยา

คำสำคัญ : โพร่งใต้ผิวทางคอนกรีต / วิธีสำรวจหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์แบบสามมิติ / การแปลงฮิลเบิร์ต

อาทิมา โคจิมะ : การสำรวจแบบจำลองโพร่งใต้ผิวทางคอนกรีตด้วยวิธีสำรวจหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์แบบสามมิติ (EXPLORATION OF VOID MODEL UNDER CONCRETE PAVEMENT BY 3D GROUND PENETRATING RADAR METHOD)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฐานบ ธิติมากร, 52 หน้า.

โพร่งใต้ผิวทางคอนกรีตเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลให้ถนนคอนกรีตเกิดความเสียหาย ในการทำโครงการวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษาวิธีการและความสามารถในการสำรวจแบบจำลองโพร่งใต้ผิวทางคอนกรีตด้วยวิธีสำรวจหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์แบบสามมิติ เพื่อหาวิธีการประมวลผลที่เหมาะสมและให้ผลลัพธ์ในการสำรวจที่ชัดเจนที่สุด สำรวจโดยใช้สายอากาศความถี่ 400 และ 900 เมกะเฮิรตซ์ ได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นภาพโพรไฟล์ (Profile) 2 มิติ จากนั้นนำภาพโพรไฟล์ประมวลผลด้วยโปรแกรม RADAN 6 ซึ่งใช้วิธีการประมวลผลแบบข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา (Time domain radar data) ประกอบไปด้วย การขยายสัญญาณ (Display gain) การปรับตำแหน่งข้อมูล (Correction position) การกำจัดสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background removal) และการกำจัดปลายหางของไฮเปอร์โบล่าจากเหล็กเสริม (Migration) สามารถนำข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลาประมวลผลต่อด้วยการแปลงฮิลเบิร์ต (Hilbert transform) เพื่อแปลงให้แสดงข้อมูลออกมาในรูปแบบแอมพลิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous magnitude) เฟสขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous phase) และความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous frequency) จากนั้นนำภาพโพรไฟล์ 2 มิติที่ผ่านการประมวลผลสร้างเป็นแบบจำลอง 3 มิติ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างภาพที่ได้จากสายอากาศ 400 และ 900 เมกะเฮิรตซ์ พบว่าภาพจากสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์เห็นรายละเอียดรูปร่างโพร่งมากกว่า ในขณะที่สายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรตซ์ให้ความลึกในการสำรวจมากกว่า สำหรับภาพโพรไฟล์ 2 มิติเหมาะสำหรับการดูรูปร่างหน้าตัดขวางของโพร่ง ในขณะที่แบบจำลอง 3 มิติเหมาะสมสำหรับการดูรูปร่างโพร่งเมื่อมองจากมุมมองด้านบน เมื่อนำข้อมูลทั้งสองแบบมาแปลผลร่วมกันส่งผลให้สามารถประเมินขนาดและรูปร่างของโพร่งได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลากับการแปลงแบบฮิลเบิร์ต พบว่าข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลาให้รายละเอียดของรูปร่างที่ชัดเจนกว่า แต่การแปลงแบบฮิลเบิร์ตอาจให้รายละเอียดรูปร่างไม่ชัดเจน แต่สามารถสังเกตเห็นตำแหน่งของโพร่งได้ง่ายกว่า

ภาควิชา _____ ธรณีวิทยา _____ ลายมือชื่อนิสิต _____

สาขาวิชา _____ ธรณีวิทยา _____ ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาหลัก _____

ปีการศึกษา _____ 2560 _____

5732761223: MAJOR GEOLOGY

KEYWORDS: VOID UNDER PAVEMENT/ 3D GPR/ HILBERT TRANSFORM

ATIMA KOJIMA: EXPLORATION OF VOID MODEL UNDER CONCRETE

PAVEMENT BY 3D GROUND PENETRATING RADAR METHOD. ADVISOR:

ASSIST. PROFESSOR. DR. THANOP THITIMAKORN, 52 pp.

Void under concrete pavement is major problem that results in concrete road damage. This research investigated the methods and capabilities for void exploring by using 3D GPR (Ground penetrating radar) methods to find the appropriate processing method and to provide a clear survey result. This Survey use 400 and 900 MHz frequency antennas. The results were analyzed using RADAN software. Time domain radar data were processed by basic processing steps such as display gain, position correction and migration. Then, these 2D profiles from the processing methods process again to create 3D model. Additionally the GPR data were also converted into the frequency, phase, and amplitude domain using Hilbert transform. When comparing 2D profile and 3D model obtained from the 400 and 900 MHz antennas, the image obtained from the 900 MHz provided better resolution while the 400 MHz antenna provides greater depth of penetration. For 2D profile, it is good for viewing the shape and depth of the voids, while 3D images make it possible to see the boundary of the voids from top view. When both types of data were interpreted together, the result was a better assessment of the shape of the voids. Between Time domain radar data and Hilbert transform, Time domain radar data provides clearer shape and depth of the voids. But the Hilbert transform gave the better position of voids.

Department _____ Geology _____ Student's Signature _____

Field of Study _____ Geology _____ Advisor's Signature _____

Academic Year _____ 2017 _____

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้จะไม่สำเร็จได้หากขาดความช่วยเหลือจากบุคคลดังต่อไปนี้

กราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฐานบ ธิติมากร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่คอยชี้แนะ ให้คำแนะนำ และเป็นທີ່ปรึกษาที่ตลอดการทำโครงการวิจัย

ขอขอบคุณพีณรงค์ศักดิ์ ราชูการ นายคมสันต์ จันทรเสนา นายคมกฤษ อ่อนแก้ว นายปานัสม์ รักกสิกรและนายธัญบุรณ์ สุธาศิริกุลเป็นอย่างยิ่งที่มีส่วนสำคัญในการช่วยเหลือการออกภาคสนามของโครงการวิจัย

กราบขอบพระคุณท่านอาจารย์ประจำภาควิชาธรณีวิทยาทุกท่านที่ถ่ายทอดความรู้ทางด้านธรณีวิทยา ให้คำแนะนำและอบรมสั่งสอนตลอดการเรียนที่ภาควิชา

กราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และขอบคุณน้องสาว สำหรับการสนับสนุนและกำลังใจ และขอขอบคุณเพื่อน Geo'58 ทุกคน ที่ร่วมทุกข์ร่วมสุขและช่วยเหลือกันตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ฅ
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	1
1.4 พื้นที่ศึกษา	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและระเบียบวิธีวิจัย	5
2.1 ทฤษฎีและหลักการเกี่ยวกับการสำรวจวัดการหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์ (Ground penetrating radar: GPR)	5
2.1.1 การสำรวจวัดการหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์	5
2.1.2 การกระจายตัวและการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	6
2.1.3 หลักการสะท้อนของคลื่นเนื่องจากค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก	14
2.1.4 การแปลงฮิลเบิร์ต	16

สารบัญ (ต่อ)

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Reviews)	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	17
3.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
3.2 ตรวจสอบพื้นที่ศึกษา	19
3.3 วางแผนการสำรวจ	19
3.4 เตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์	20
3.4.1 เครื่องมือสำรวจหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์รุ่น SIR-20	20
3.4.2 ล้อวัดระยะทาง (Survey wheel)	24
3.4.3 แบตเตอรี่ (Battery)	24
3.4.4 อุปกรณ์อื่นๆ	24
3.5 ออกภาคสนามและเก็บข้อมูล	25
3.6 ประมวลผลและแปลผลข้อมูลที่ได้จากการสำรวจ	25
3.6.1 การประมวลผลของภาพ 2 มิติจากการสะท้อนของคลื่นเรดาร์ในรูปแบบแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา (Time domain radar data)	27
3.6.2 การแปลงฮิลเบิร์ต (Hilbert transform)	31
3.6.3 การรวมภาพเพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติ	32
3.6.4 การแปลผลแบบจำลอง 3 มิติออกมาในรูปแบบต่างๆโดยใช้เครื่องมือมุมมองแบบ 3 มิติ (3D Cube view option)	33
3.6.5 การแปลผลแบบจำลอง 3 มิติด้วยเครื่องมือพิเศษ	34
บทที่ 4 การวิเคราะห์และอภิปรายผล	36

สารบัญ (ต่อ)

4.1	เกณฑ์การเปรียบเทียบผลลัพธ์	36
4.2	การเปรียบเทียบภาพโพรไฟล์ 2 มิติก่อนการประมวลผล	37
4.3	การเปรียบเทียบภาพโพรไฟล์ 2 มิติและแบบจำลอง 3 มิติที่ผ่านการประมวลผล	39
4.3.1	การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่แสดงในรูปแบบข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา (Time domain radar data)	30
4.3.2	การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่แสดงในรูปแบบการแปลงฮิลเบิร์ต (Hilbert transform)	41
4.3.3	การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่แสดงในรูปแบบข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลาและการแปลงฮิลเบิร์ต	46
4.4	การแปลผลแบบจำลอง 3 มิติอื่นๆ	50
4.4.1	การแปลผลแบบภาพ 3 มิติโปร่งแสง (3D Transparency)	50
4.4.2	การแสดงเส้นชั้นความสูง (Contour)	51
บทที่ 5	สรุปผล	52

สารบัญรูปลูกภาพ

		หน้า
รูป 1.1	ตำแหน่งของพื้นที่ศึกษา (ก.) แสดงตำแหน่งของพื้นที่ศึกษาภายในประเทศไทย (ข.) แสดงตำแหน่งของพื้นที่ศึกษาภายในสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (จุดสีแดง)	2
รูป 1.2	ภาพร่างของแบบจำลองถนนคอนกรีต แสดงขนาด ตำแหน่งของโพรง และชนิดของวัสดุรองพื้นทาง	3
รูป 1.3	ภาพตัดขวางของแบบจำลองถนนคอนกรีต	3
รูป 2.1	กระบวนการสำรวจด้วยวิธีวัดการหักเหด้วยสัญญาณเรดาร์	6
รูป 2.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าประกอบการสูญเสียสัมผัส ($\tan\delta$) และความถี่ (f)	8
รูป 2.3	ช่วงการสำรวจที่กว้างที่สุดที่สัญญาณเรดาร์สามารถเก็บข้อมูลได้ในแต่ละความถี่	12
รูป 2.4	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกเนื่องจากส่วนประกอบของน้ำในวัสดุ	15
รูป 2.5	ภาพโปรไฟล์เปรียบเทียบระหว่างแอมพลิจูดที่เกิดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลากับการแปลงฮิลเบิร์ต	17
รูป 3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานทั้งหมดในการสำรวจแบบจำลองโพรงใต้ผิวทางคอนกรีต ด้วยวิธีสำรวจหักเหด้วยสัญญาณเรดาร์แบบสามมิติ	18
รูป 3.2	แนวการสำรวจบนแบบจำลองถนนคอนกรีต (ก.) แนวการสำรวจ 11 แนวของสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรต์ซ์ (ข.) แนวการสำรวจ 22 แนวของสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรต์ซ์	19
รูป 3.3	ทัพบุคสำหรับใช้ร่วมกับเครื่องมือสำรวจหักเหด้วยสัญญาณเรดาร์รุ่น SIR-20	21
รูป 3.4	ตำแหน่งจุดเชื่อมต่อ 9 จุดบนหน่วยควบคุม	22

รูป 3.5	สายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิร်ทซ์	22
รูป 3.6	สายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิร်ทซ์	23
รูป 3.7	ตำแหน่งจุดเชื่อมต่อ 3 จุดบนสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิร်ทซ์	23
รูป 3.8	ตำแหน่งจุดเชื่อมต่อ 3 จุดบนสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิร်ทซ์	24
รูป 3.9	เครื่องมือและอุปกรณ์ในการสำรวจและประมวลผล	24
รูป 3.10	แนวการสำรวจและทิศทางกรลากของสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิร်ทซ์	25
รูป 3.11	เปรียบเทียบภาพ 2 มิติก่อนและหลังเปลี่ยนสีด้วยตารางสี (ก.) ภาพ 2 มิติที่ได้จากการสำรวจโดยไม่ผ่านการปรับแต่ง (ข.) ภาพ 2 มิติที่ใช้ตารางสีหมายเลข 20	26
รูป 3.12	การแสดงผลข้อมูลประมวลผลและแปลผล 2 รูปแบบ ได้แก่ ข้อมูลแอมพลิจูดจาก การสะท้อนกลับเทียบกับเวลา (Time domain radar data) และการแปลงฮิล เบิร์ต (Hilbert transform)	27
รูป 3.13	ภาพ 2 มิติได้แนวการสำรวจที่ 3 ด้วยสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิร်ทซ์ ผ่านการขยายสัญญาณ (Display gain) เท่ากับ 2	27
รูป 3.14	ขั้นตอนการปรับความลึกของผิวสัมผัส (Correct Position) ทำการปรับค่าที่ Delta Pos (nS) การปรับค่าที่ตำแหน่งโดยปกติพิจารณาจากเป็นผิวคอนกรีต แกนแนวนอนคือระยะเวลาการสะท้อนกลับของคลื่นเรดาร์ (time travel) และ แกนในแนวตั้งคือความกว้างของคลื่น(Amplitude)	28
รูป 3.15	ภาพ 2 มิติได้แนวการสำรวจที่ 4 ด้วยสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิร်ทซ์ ก่อน ผ่านการกำจัดปลายส่วนโค้งของไฮเปอร์โบลาที่เกิดจากเหล็กเสริม ปรับแต่งสีภาพ โดยใช้ตารางสีหมายเลข 20	29

รูป 3.16	ภาพ 2 มิติได้แนวการสำรวจที่ 4 ด้วยสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรท์ซ์ ผ่านการกำจัดปลายส่วนโค้งของไฮเปอร์โบล่าที่เกิดจากเหล็กเสริม ปรับแต่งสีภาพโดยใช้ตารางสีหมายเลข 25	29
รูป 3.17	เปรียบเทียบภาพก่อนและหลังการกำจัดสัญญาณรบกวนพื้นหลัง ใช้ตารางสีหมายเลข 25 (ก.) ภาพโพรไฟล์ 2 มิติก่อนการกำจัดสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (ข.) ภาพโพรไฟล์ 2 มิติหลังการกำจัดสัญญาณรบกวนพื้นหลัง	30
รูป 3.18	ภาพโพรไฟล์ 2 มิติหลังการแปลงฮิลเบิร์ต (ก.) การแปลงฮิลเบิร์ตที่แสดงแมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (ข.) การแปลงฮิลเบิร์ตที่แสดงเฟสขณะใดขณะหนึ่ง (ค.) การแปลงฮิลเบิร์ตที่แสดงความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง	31
รูป 3.19	แผนผังการประมวลผลและแปลผลภาพโพรไฟล์ 2 มิติ	32
รูป 3.20	แผนผังการรวมภาพเพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติและรูปแบบการแสดงผล	33
รูป 3.21	แบบจำลอง 3 มิติที่แปลผลแบบแสดงเฉพาะแกน (Single X,Y,Z Slicing) ที่ระดับ 0.29 เมตรจากพื้นผิว ใช้ตารางสีหมายเลข 20	33
รูป 3.22	แบบจำลอง 3 มิติที่แปลผลแบบภาพ 3 มิติโปร่งแสง (3D Transparency) ให้ความหนาของชั้น (Transparency range) เท่ากับ 0.05 เมตร ความโปร่งใส (Transparency) เท่ากับ 30%, ระดับความลึกที่ต้องการ (Position) เท่ากับ 0.32 เมตรและความละเอียด (Resolution) เท่ากับ 1:32	34
รูป 3.23	แบบจำลอง 3 มิติแสดงเส้นชั้นความสูง (Contour) ที่ระดับความลึก 0.32 เมตรจากพื้นผิว	35
รูป 4.1	ตำแหน่งของแนวการสำรวจที่ 4 และ 7 ของสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรท์ซ์ และตำแหน่งของแนวการสำรวจที่ 8 และ 16 ของสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรท์ซ์ บนแบบจำลองถนนคอนกรีต	37
รูป 4.2	ภาพตัดขวางของแบบจำลองถนนคอนกรีตบริเวณแนวการสำรวจที่ 4 และ 7 ของสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรท์ซ์ และแนวการสำรวจที่ 8 และ 16 ของ	38

สายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรต์ซ์ แสดงรูปทรงของแบบจำลองโพรง 3 ชั้น

รูป 4.3	เปรียบเทียบภาพโพรไฟล์ 2 มิติก่อนการประมวลผล (ก.) สายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรต์ซ์ (ข.) สายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรต์ซ์	39
รูป 4.4	เปรียบเทียบภาพโพรไฟล์ 2 มิติที่แสดงในรูปแบบข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับ เทียบกับเวลา (ก.) สายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรต์ซ์ (ข.) สายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรต์ซ์	40
รูป 4.5	เปรียบเทียบภาพโพรไฟล์ 2 มิติและแบบจำลอง 3 มิติที่แสดงในรูปแบบข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา ระดับความลึก 0.25 เมตรจากผิวดิน	41
รูป 4.6	เปรียบเทียบภาพโพรไฟล์ 2 มิติ (แนวการสำรวจที่ 7) และแบบจำลอง 3 มิติที่แสดง ในการแปลงฮิลเบิร์ต จากสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรต์ซ์ ที่ระดับความลึก 0.29 เมตรจากพื้นผิว (ก.) แอมพลิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous amplitude) (ข.) เฟสขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous phase) (ค.) ความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous frequency)	42
รูป 4.7	เปรียบเทียบภาพโพรไฟล์ 2 มิติ (แนวการสำรวจที่ 16) และแบบจำลอง 3 มิติที่ แสดงในการแปลงฮิลเบิร์ต จากสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรต์ซ์ ที่ระดับ ความลึก 0.29 เมตรจากพื้นผิว (ก.) แอมพลิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous amplitude) (ข.) เฟสขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous phase) (ค.) ความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous frequency)	44

- รูป 4.8 เปรียบเทียบภาพโพรไฟล์ 2 มิติที่แสดงในรูปแบบข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับ 47
เทียบกับเวลาและการแปลงฮิลเบิร์ต จากแนวการสำรวจที่ 16 สายอากาศความถี่
900 เมกะเฮิรต์ซ์
(ก.) ข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา
(ข.) ข้อมูลแมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (การแปลงฮิลเบิร์ต)
(ค.) ข้อมูลเฟสขณะใดขณะหนึ่ง (การแปลงฮิลเบิร์ต)
(ง.) ข้อมูลความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง (การแปลงฮิลเบิร์ต)
- รูป 4.9 เปรียบเทียบแบบจำลอง 3 มิติที่แสดงในรูปแบบข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับ 48
เทียบกับเวลาและการแปลงฮิลเบิร์ต ที่ระดับความลึก 0.29 เมตรจากพื้นผิว จาก
แนวการสำรวจที่ 16 สายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรต์ซ์
(ก.) ข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา
(ข.) ข้อมูลแมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (การแปลงฮิลเบิร์ต)
(ค.) ข้อมูลเฟสขณะใดขณะหนึ่ง (การแปลงฮิลเบิร์ต)
(ง.) ข้อมูลความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง (การแปลงฮิลเบิร์ต)
- รูป 4.10 แบบจำลอง 3 มิติที่แปลผลแบบภาพ 3 มิติโปร่งแสง (3D Transparency) จาก 51
สายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรต์ซ์
- รูป 4.11 แบบจำลอง 3 มิติแสดงเส้นชั้นความสูง (Contour) ที่ระดับความลึก 0.32 เมตรจาก 51
พื้นผิว จากสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรต์ซ์

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตาราง 2.1	เปรียบเทียบความลึกในการสำรวจกับความถี่และระยะเวลาเดินทางไปและกลับ	10
ตาราง 2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ การลดทอนสัญญาณ ความละเอียดข้อมูล และความลึกมากที่สุดที่สามารถสำรวจได้	13

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ

วิธีสำรวจหยังลึกด้วยสัญญาณเรดาร์แบบสามมิติ (3D Ground Penetration Radar) เป็นวิธีการทดสอบทางด้านวิศวกรรมธรณีฟิสิกส์โดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave, EM) ในการตรวจสอบสภาพใต้พื้นดินระดับตื้นในทุกทิศทางโดยให้ผลลัพธ์ที่มีความละเอียดสูง อีกทั้งยังเป็นวิธีการสำรวจที่รวดเร็ว และไม่ทำลายวัสดุที่ทดสอบ จึงมีประสิทธิภาพในการใช้งานเพื่อสำรวจ วิเคราะห์และแสดงลักษณะโพรงใต้ผิวทางคอนกรีต (Giao, P. H. et al., 2007)

โพรงใต้ผิวทางคอนกรีตเป็นปัญหาสำคัญที่พบในถนนคอนกรีต (Yong P.Z. and Xian J.M., 2014) อันเกิดจากการผุกร่อนของแผ่นคอนกรีต ดังเช่นข่าวการทรุดตัวของถนนแจ้งวัฒนะ เมื่อวันที่ 3 สิงหาคม พ.ศ. 2555 ถนนเกิดการทรุดตัวเป็นหลุมลึก ขนาดกว้างประมาณ 2 เมตร ลึกประมาณ 1.5 เมตร เกิดจากดินและทรายที่อัดเป็นชั้นวัสดุรองพื้น (Sub-base) ถูกกัดเซาะหายไปจนเป็นโพรง เนื่องด้วยเหตุการณ์น้ำท่วมในปีพ.ศ. 2554 (คม ชัด ลึก, 2555) เป็นสาเหตุของการทรุดตัวและพังทลายของผิวทางคอนกรีต ดังนั้นการแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงควรเริ่มจากการตรวจสอบเพื่อค้นหาโพรงใต้ผิวทางคอนกรีตจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการวางแผนบำรุงรักษาและการซ่อมแซม (Giao, P. H. et al., 2007)

ดังนั้นการสำรวจใต้ผิวทางคอนกรีตจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมในการป้องกันอันตรายจากโพรงใต้ผิวทางคอนกรีต เป็นเหตุผลที่สนับสนุนการศึกษาวิธีการและแนวทางที่เหมาะสมในการสำรวจด้วยวิธีจีพีอาร์แบบ 3 มิติ บริเวณแบบจำลองถนนคอนกรีต ภายในสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย จากนั้นประมวลผลข้อมูลและแสดงผลด้วยโปรแกรม RADAN

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาวิธีการและความสามารถในการสำรวจแบบจำลองโพรงใต้ผิวทางคอนกรีตด้วยวิธีสำรวจหยังลึกด้วยสัญญาณเรดาร์แบบสามมิติ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาวิธีการ ขั้นตอนการเก็บข้อมูลและแปลผลข้อมูล โดยใช้วิธีจีพีอาร์แบบ 3 มิติในการสำรวจ โดยพื้นที่ศึกษาคือแบบจำลองถนนคอนกรีตภายในสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย เก็บข้อมูลด้วยโปรแกรม SIR แปลผลและประมวลผลด้วยโปรแกรม RADAN

1.4 พื้นที่ศึกษา

ข้อมูลทั่วไป

พื้นที่ศึกษาเป็นแบบจำลองถนนคอนกรีต ตั้งอยู่ภายในสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี อยู่ในละติจูดที่ 014.08 องศาเหนือ และลองจิจูดที่ 100.61 องศาตะวันออก



(ก.)



(ข.)

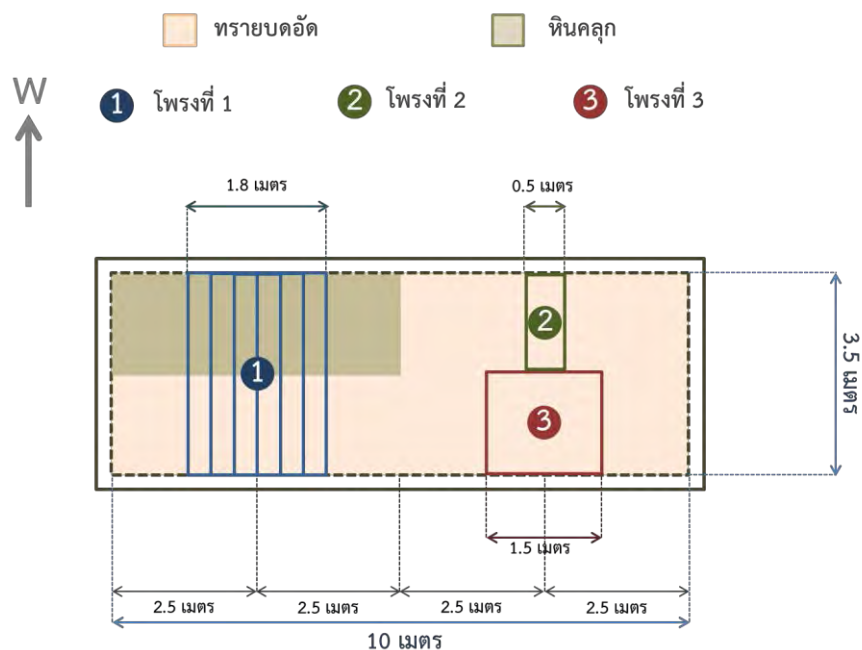
รูปที่ 1.1 ตำแหน่งของพื้นที่ศึกษา

(ก.) แสดงตำแหน่งของพื้นที่ศึกษาภายในประเทศไทย

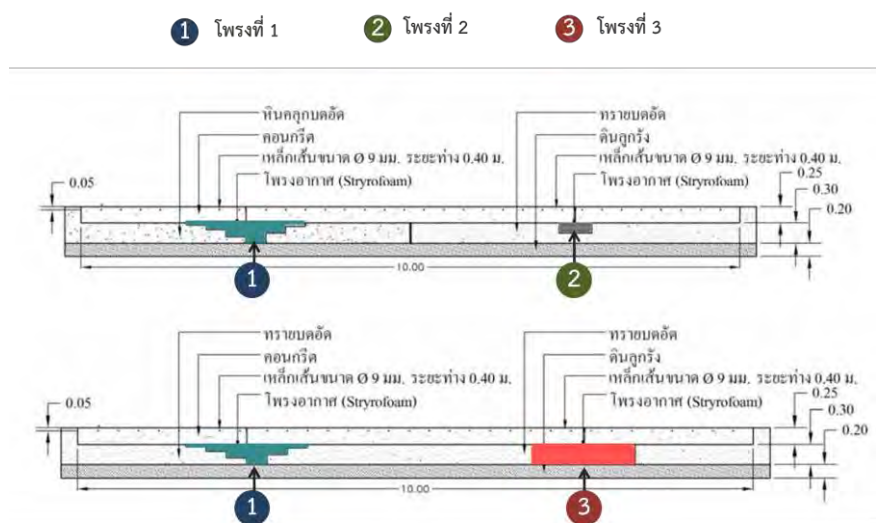
(ข.) แสดงตำแหน่งของพื้นที่ศึกษาภายในสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (จุดสีแดง)

ข้อมูลแบบจำลองถนนคอนกรีต

แบบจำลองถนนคอนกรีต คือ ถนนคอนกรีตที่สร้างเลียนแบบถนนจริง มีขนาดกว้าง 3.5 เมตร ยาว 10 เมตร ภายในประกอบด้วยแบบจำลองโพรงทั้งหมด 3 ชั้น สร้างจากโฟม เนื่องจากมีค่าคงที่ของไดอิเล็กทริกใกล้เคียงกับอากาศ เพื่อจำลองเสมือนเป็นโพรงอากาศจริง ข้อมูลขนาดของแบบจำลองถนนคอนกรีตและแบบจำลองโพรงแสดงในรูปที่ 1.2 และ 1.3



รูปที่ 1.2 ภาพร่างของแบบจำลองถนนคอนกรีต แสดงขนาด ตำแหน่งของโรง และชนิดของวัสดุรองพื้นทาง



รูปที่ 1.3 ภาพตัดขวางของแบบจำลองถนนคอนกรีต

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ก. ในด้านความรู้และประสบการณ์ต่อตัวนิสิตเอง

- เรียนรู้การสำรวจด้วยวิธีจีพีอาร์แบบ 3 มิติและการใช้โปรแกรม RADAN และโปรแกรม SIR
- เกิดการเรียนรู้ขั้นตอนการปฏิบัติงานตามระเบียบการวิจัย

- ข. ความรู้ ความเข้าใจที่นำไปสู่การแก้ไขปัญหาของสังคมหรือสภาพแวดล้อม
- ผลการวิจัยจากการสำรวจแบบจำลองโครงข่ายไฟฟ้าทางคอนกรีตอาจนำไปประยุกต์ใช้สำรวจก่อนการวางแผนซ่อมแซมและปรับปรุงถนนคอนกรีตต่อไปได้ในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและระเบียบวิธีวิจัย

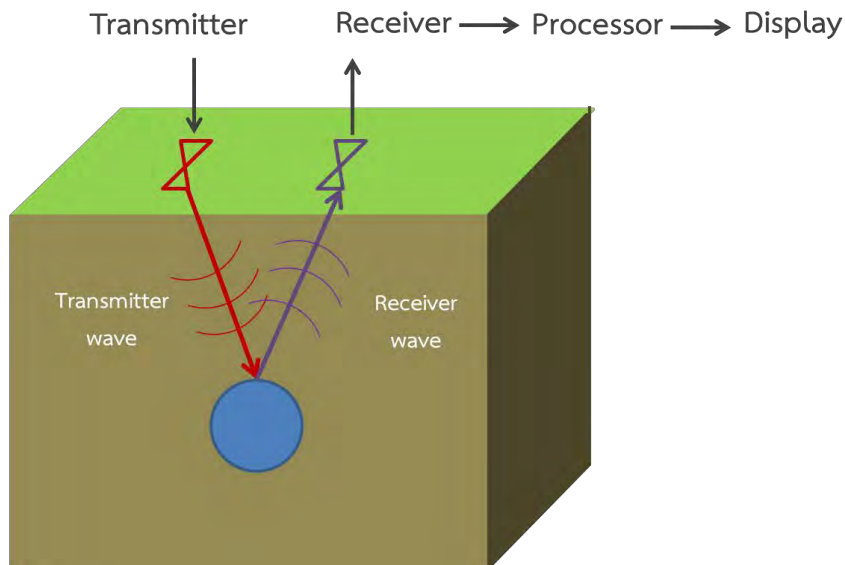
2.1 ทฤษฎีและหลักการเกี่ยวกับการสำรวจวัดการหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์ (Ground penetrating radar: GPR)

2.1.1 การสำรวจวัดการหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์

การสำรวจวัดการหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์เป็นวิธีการทดสอบทางด้านวิศวกรรมธรณีฟิสิกส์โดยการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves, EM) ในการตรวจสอบสภาพใต้พื้นดินในระดับตื้นโดยให้ผลลัพธ์ที่มีความละเอียดสูง สามารถสำรวจได้อย่างรวดเร็วและไม่ทำลายวัสดุทดสอบ (กรมทางหลวง สำนักวิจัยและพัฒนาทาง, 2552)

นอกจากนี้การสำรวจวัดการหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย การเลือกใช้ช่วงความถี่ในการสำรวจและชนิดของสายอากาศขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุที่ต้องการสำรวจ เช่น ขนาดและรูปร่าง คุณสมบัติการส่งผ่านสัญญาณของตัวกลาง ลักษณะของพื้นผิวสำรวจ รวมไปถึงงบประมาณ (Daniel, D.J., 2004)

หลักการทำงาน คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งออกมาจะแพร่กระจายจากอุปกรณ์หัวส่งสัญญาณ (Transmitting Antenna) จากนั้นคลื่นจะเคลื่อนที่ผ่านไปใ้ในเนื้อวัสดุด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุนั้นๆ ในขณะที่คลื่นเคลื่อนที่ลึกลงไปในเนื้อวัสดุนั้น หากพบวัตถุที่ฝังอยู่ด้านใต้หรือพบความเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุ เช่น เกิดการเปลี่ยนแปลงของชั้นวัสดุจะเกิดการสะท้อนของคลื่นบางส่วนกลับขึ้นมาที่ผิวดิน ซึ่งอุปกรณ์หัวรับสัญญาณ (Receiving Antenna) จะรับสัญญาณที่สะท้อนขึ้นมามีค่าแสดงในรูปที่ 2.2-1 การแสดงผลของการสำรวจวัดการหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์จะสแกน (Scan) ผลอย่างต่อเนืองแสดงเป็นภาพโปรไฟล์ (Profile) ที่เป็นลักษณะโทนสีต่างๆ ซึ่งแสดงถึงสภาพด้านใต้พื้นผิว ซึ่งลักษณะของการสะท้อนกลับเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระทบกับวัตถุที่มีคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันทำให้ผลการทดสอบที่ได้แสดงภาพของวัสดุอย่างชัดเจน เนื่องมาจากค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) ของวัสดุแต่ละชนิดมีค่าที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อการสะท้อนคลื่นกลับยังตัวรับสัญญาณด้วยโดยค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุต่างๆ (กรมทางหลวง สำนักวิจัยและพัฒนาทาง, 2552)



รูปที่ 2.1 กระบวนการสำรวจด้วยวิธีวัดการหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์

ดัดแปลงรูปภาพจาก : www.gp-radar.com

2.1.2 การกระจายตัวและการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

จากงานวิจัย Giao, P. H. et al. (2007) กล่าวว่า การสำรวจวัดการหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์เป็นการสำรวจธรณีฟิสิกส์เพื่อตรวจสอบใต้ผิวดิน โดยใช้หลักการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave: EM) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของแมกเวล (Maxwell's Equation) แสดงในสมการ (2.1) เนื่องจากในแต่ละวัสดุมีค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) แตกต่างกัน ส่งผลให้การปล่อยและวัดค่าการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าแตกต่างกัน

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \epsilon \mathbf{E} \quad \text{สมการที่ (2.1)}$$

จากสมการ (2.1) สามารถอธิบายตัวแปรได้ดังนี้

$\nabla \times$ คือ ตัวดำเนินการเคิร์ล (The Curl Operator)

\mathbf{H} คือ สนามแม่เหล็ก (A/m)

σ คือ ค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้า (s/m)

\mathbf{E} คือ สนามไฟฟ้า (V/m)

j คือ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

ω คือ ความเร็วเชิงมุมมีค่าเท่ากับ $2\pi f$

f คือ ความถี่ (Hz)

ϵ คือ ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก

อัตราส่วนของการนำไฟฟ้าต่อระยะทางที่เคลื่อนที่ คือ ค่าประกอบการสูญเสียสัมผัส (Tangent Loss: $\tan\delta$) สามารถอธิบายด้วยสมการ (2.2)

$$\tan \delta = \frac{|\sigma E|}{j\omega\epsilon E} = \frac{\text{Conducting Current}}{\text{Displacement Current}} = \frac{\sigma}{\omega\epsilon} \quad \text{สมการ (2.2)}$$

จากสมการ (2.2) สามารถอธิบายตัวแปรได้ดังนี้

σ คือ ค่าการเหนี่ยวนำไฟฟ้า (s/m)

E คือ สนามไฟฟ้า (V/m)

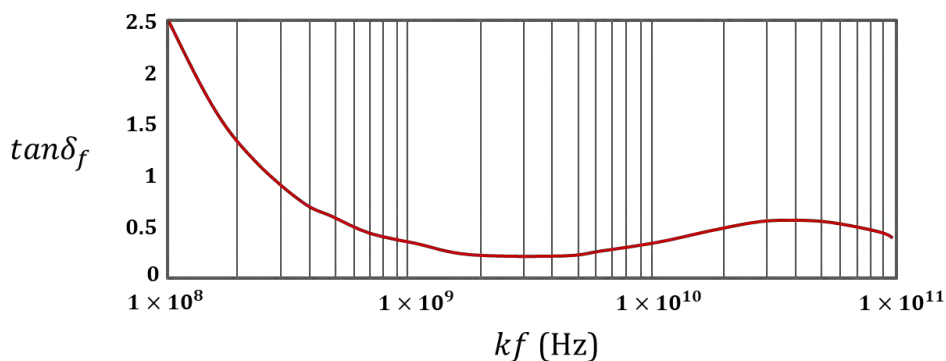
j คือ ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

ω คือ ความเร็วเชิงมุมมีค่าเท่ากับ $2\pi f$

f คือ ความถี่ (Hz)

ϵ คือ ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก

จากสมการ (2.2) พบว่าเมื่อความถี่ (f) สูงขึ้น จะส่งผลให้ความเร็วเชิงมุมสูงขึ้น ดังนั้นค่าประกอบการสูญเสียสัมผัส ($\tan\delta$) จะมีแนวโน้มต่ำลงตามไปด้วย หรือกล่าวได้ว่าการลดทอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูง (Daniel, D.J., 2004) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประกอบการสูญเสียสัมผัส ($\tan\delta$) และความถี่ (f) แสดงดังรูป 2.1



รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าประกอบการสูญเสียสัมผัส ($\tan \delta$) และความถี่ (f)

ดัดแปลงรูปภาพจาก : (Daniel, D.J., 2004)

วิธีการสำรวจวัดการหึ่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์กระทำการวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนกลับจากโครงสร้างใต้ผิวดิน ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติการยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ของวัสดุ (Electrical Permittivity) เป็นสำคัญ คุณสมบัติดังกล่าว คือ คุณสมบัติที่ทำให้วัสดุเก็บพลังงานไฟฟ้าได้ มีการแยกข้อตรงข้ามตามคุณสมบัติความถี่ของวัสดุนั้นๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (V) สามารถอธิบายดังสมการ (2.3)

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{สมการ (2.3)}$$

จากสมการ (2.3) สามารถอธิบายตัวแปรได้ดังนี้

V คือ ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (m/s)

C คือ ความเร็วคงที่ของแสงในสุญญากาศเท่ากับ 3×10^8 m/s

ϵ_r คือ ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (v) และความยาวคลื่น (λ) แสดง
 ดังสมการ (2.4)

$$\lambda = vT = \frac{v}{f} \text{ สมการ (2.4)}$$

จากสมการ (2.4) สามารถอธิบายตัวแปรได้ดังนี้

λ คือ ความยาวคลื่น

v คือ ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (m/s)

T คือ คาบ (s)

f คือ ความถี่ (Hz)

แสดงให้เห็นว่าความยาวคลื่นและความถี่แปรผกผันกัน

หลักการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการสำรวจวัตถุการหยั่งลึกด้วยสัญญาณ
 เรดาร์ จะปล่อยสัญญาณจากตัวส่งสัญญาณ (Transmitter) และสะท้อนกลับมายังตัวรับ
 สัญญาณ (Receiver) ถ้าทราบความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและเวลาเดินทางไปและกลับ
 จะสามารถนำมาคำนวณความลึกของวัตถุสะท้อนคลื่นได้ ดังแสดงในสมการ (2.5)

$$d = \frac{v\tau}{2} \text{ สมการ (2.5)}$$

จากสมการ (2.5) สามารถอธิบายตัวแปรได้ดังนี้

d คือ ความลึกของวัตถุสะท้อนคลื่น (m)

v คือ ความเร็วเดินทางไปและกลับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (m/s)

τ คือ ระยะเวลาเดินทางไปและกลับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (m)

เมื่อแทนสมการ (2.3) ลงในสมการ (2.5) จะจัดรูปได้สมการ (2.6) ดังนี้

$$d = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \frac{\tau}{2} \quad \text{สมการ (2.6)}$$

จากสมการ (2.6) สามารถอธิบายตัวแปรได้ดังนี้

d คือ ความลึกของวัสดุสะท้อนคลื่น (m)

τ คือ ระยะเวลาเดินทางไปและกลับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (m)

C คือ ความเร็วของแสงในสุญญากาศ เท่ากับ 3×10^8 m/s

ϵ_r คือ ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุ

การคำนวณระยะเวลาการสะท้อนกลับของคลื่น (**τ**) สามารถคำนวณได้จากระยะเวลาในการเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากตัวส่งสัญญาณคลื่น ไปยังวัตถุที่ทำให้เกิดการสะท้อน และเดินทางกลับมาที่ตัวรับสัญญาณ (Time window) โดยที่ระยะเวลาสะท้อนกลับขึ้นกับความถี่ที่แตกต่างกันของสายอากาศของบริษัท GSSI เช่น สายอากาศ 400 MHz จะมีระยะเวลาการสะท้อนกลับของคลื่น เท่ากับ 20 ns ถึง 100 ns จากสมการ (2.6) สามารถแสดงด้วยตาราง 2.1 ดังนี้

ตาราง 2.1 เปรียบเทียบความลึกในการสำรวจกับความถี่และระยะเวลาเดินทางไปและกลับ
ดัดแปลงตารางจาก: (Giao, P. H. et al., 2007)

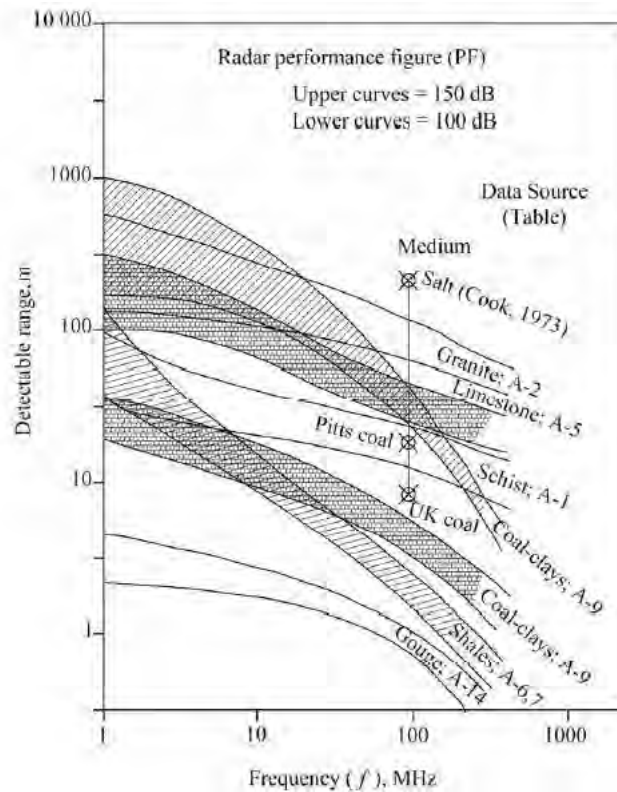
ค่าระดับความลึกการสำรวจกับความถี่และค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก constant ที่แตกต่างกัน						
ความถี่ของสายอากาศ	$f = 1.5$ GHz		$f = 900$ MHz		$f = 400$ MHz	
ระยะเวลาไปและกลับของคลื่นเรดาร์ (ns)	$\tau=10$ ns	$\tau=15$ ns	$\tau=10$ ns	$\tau=20$ ns	$\tau=20$ ns	$\tau=100$ ns
ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก	ความลึกในการสำรวจ (m)					

ค่าระดับความลึกการสำรวจกับความถี่และค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก constant ที่แตกต่างกัน						
5	0.670	1.006	0.670	1.341	1.341	6.704
10	0.474	0.711	0.474	0.948	0.948	4.740
15	0.387	0.581	0.387	0.774	0.774	3.870
20	0.335	0.503	0.335	0.670	0.670	3.352
25	0.300	0.450	0.300	0.600	0.600	2.998
30	0.274	0.411	0.274	0.547	0.547	2.737
35	0.253	0.380	0.253	0.507	0.507	2.534
40	0.237	0.356	0.237	0.474	0.474	2.370
45	0.223	0.335	0.223	0.447	0.447	2.235
50	0.212	0.318	0.212	0.424	0.424	2.120
55	0.202	0.303	0.202	0.404	0.404	2.021
60	0.194	0.290	0.194	0.387	0.387	1.935
65	0.186	0.279	0.186	0.372	0.372	1.859
70	0.179	0.269	0.179	0.358	0.358	1.792
75	0.173	0.260	0.173	0.346	0.346	1.731
80	0.168	0.251	0.168	0.335	0.335	1.676

ระดับการสำรวจที่ลึกที่สุดและการแยกแยะระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างวัตถุ 2 ชิ้น
เป็นความสามารถในการสำรวจด้วยวิธีการสำรวจวัดการหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์

ระดับการสำรวจที่ลึกที่สุดหาได้จากอัตราส่วนระหว่างพลังงานและระดับสัญญาณ
ต่ำสุด หรือระดับของตัวรับสัญญาณที่ถูกรบกวน ดังรูปที่ 2.4 แสดงช่วงของความลึกที่สัญญาณ
สามารถสำรวจได้ สัญญาณจะสามารถสำรวจได้ลึกประมาณ 20 เท่าของความยาวคลื่น

ยกเว้นในตัวอย่างที่มีการลดทอนของสัญญาณต่ำ แต่ในการสำรวจจริง ความลึกในการสำรวจมักจะน้อยกว่าค่าดังกล่าว (Daniel, D.J., 2004)



รูปที่ 2.3 ช่วงการสำรวจที่กว้างที่สุดที่สัญญาณเรดาร์สามารถเก็บข้อมูลได้ในแต่ละความถี่ (Daniel, D.J., 2004)

จากค่าประกอบการสูญเสียสัมพัทธ์ จะพบว่าแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น ความถี่ส่งผลให้ความลึกในการสำรวจลดลง นอกจากนี้ความละเอียดของข้อมูลที่ได้ยังแปรผันตามความยาวคลื่น

ดังนั้นสามารถสรุปจากคุณสมบัติค่าประกอบการสูญเสียสัมพัทธ์ ความถี่และความยาวคลื่นได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ การลดทอนสัญญาณ ความละเอียดข้อมูล และความลึกมากที่สุดที่สามารถสำรวจได้ ดัดแปลงตารางจาก: (Giao, P. H. et al., 2007)

ความถี่	ความถี่สูง	ความถี่ต่ำ
ความยาวคลื่น	ความยาวคลื่นสั้น	ความยาวคลื่นยาว
การลดทอนสัญญาณ	การลดทอนสัญญาณสูง	การลดทอนสัญญาณต่ำ
ความละเอียดของข้อมูล	ความละเอียดสูง	ความละเอียดต่ำ
ความลึกมากที่สุดที่สามารถสำรวจได้	ตื้น	ลึก

การสะท้อนกลับของคลื่นเกิดเนื่องมาจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของวัตถุ ได้แก่ คุณสมบัติความเป็นโลหะหรือความเป็นฉนวน ฉนวนถูกอ้างอิงให้เป็นวัสดุประเภทไดอิเล็กทริก เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุสองชนิดที่มีค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกแตกต่างกัน ได้แก่ ϵ_1 และ ϵ_2 โดย Γ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของขอบเขตวัสดุ มีค่าระหว่าง $-1 \leq \Gamma \leq 1$ และสามารถนำไปหาความกว้างหรือยอดคลื่น (Amplitude) ของคลื่น Γ ได้ สามารถอธิบายดังสมการ (2.7)

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}} \quad \text{สมการ (2.7)}$$

จากสมการพบว่าถ้าวัตถุชั้นล่างเป็นวัสดุจำพวกโลหะ จะมีค่า ϵ_2 ค่อนข้างสูง ประมาณ 10,000 ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Γ) สูงด้วยเช่นกัน ส่งผลให้เกิดยอดคลื่นค่าสูงสุดได้ จากคุณสมบัติดังกล่าววัสดุจำพวกโลหะจึงสามารถตรวจพบได้ง่ายในการสำรวจวัดการหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์

ขนาดของวัตถุเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลให้การสะท้อนกลับของคลื่น ถ้าวัตถุที่ต้องการสำรวจมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของความยาวคลื่น การสะท้อนกลับคลื่นจึงจะให้ผลดี โดยปกติ การสำรวจวัดการหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์จะใช้ความยาวคลื่นที่หลากหลาย

แต่ส่วนใหญ่จะมีความยาวคลื่นประมาณ 1 เมตร โดยที่ยอดคลื่นยังจัดเป็นข้อมูลสำคัญในการสำรวจประเภทดังกล่าว นอกจากนี้ความสูงยอดคลื่นสามารถบอกถึงขนาดของวัตถุที่ต้องการสำรวจได้อีกด้วย

2.1.3. หลักการสะท้อนของคลื่นเนื่องจากค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก

ความสามารถในการเก็บพลังงานของไดอิเล็กทริกเป็นปริมาณสเกลาร์ที่บ่งบอกความสามารถในการจุประจุไฟฟ้าของวัสดุนั้นๆเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ซึ่งความสามารถในการเก็บพลังงานจะบอกด้วยค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก โดยเปรียบเทียบกับอากาศ ค่าคงตัวของอากาศเท่ากับ 1 เมื่อส่งสัญญาณเรดาร์ลงไปจะมีการสะท้อนกลับเมื่อพบรอยต่อของบริเวณที่มีค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกแตกต่างกัน บริเวณดังกล่าวมักเป็นรอยต่อระหว่างชั้นหิน บางครั้งอาจเกิดเนื่องมาจากระดับน้ำบาดาลหรือชั้นหินที่มีค่าทางไฟฟ้าแตกต่างจากหินโดยรอบ

ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกจะบอกความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความลึก (ซึ่งสามารถบอกถึงความเร็วได้โดยตรง) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก (ϵ_r) และความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (v) สามารถอธิบายดังสมการ (2.3)

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{สมการ (2.3)}$$

จากสมการ (2.3) สามารถอธิบายตัวแปรได้ดังนี้

V คือ ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (m/s)

C คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ เท่ากับ 2.998×10^8 (m/s)

ϵ_r คือ ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก

ข้อจำกัดของสมการ คือ ไม่สามารถนำไปใช้กับดินที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ เช่น ดินเหนียว หรือดินที่มีของไหลนำไฟฟ้าอยู่ในรูพรุน เช่น น้ำกร่อยหรือน้ำบาดาลที่มีคุณสมบัตินำไฟฟ้า (Geophysical Survey System, Inc., 2009)

ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกสามารถเปลี่ยนแปลงตามส่วนประกอบของน้ำในวัสดุได้ วัสดุเปียก เช่น ดินชุ่มน้ำ จะมีค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกเปลี่ยนไปจากค่าของวัสดุแห้ง สามารถแสดงดังสมการ (2.7)

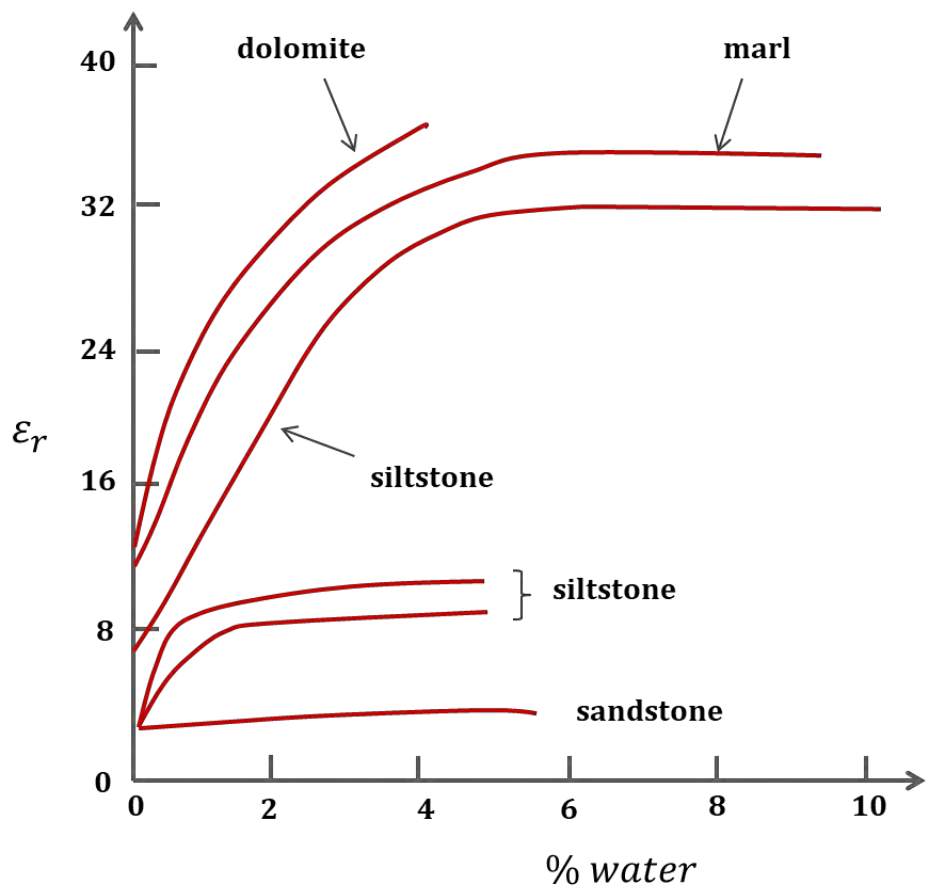
$$\theta = -0.0503 + 0.0292\varepsilon_r - 5.5 \times 10^{-4}\varepsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6}\varepsilon_r^3$$

สมการ(2.7)

จากสมการ (2.7) สามารถอธิบายตัวแปรได้ดังนี้

θ คือ ร้อยละส่วนประกอบของน้ำในวัสดุ

ε_r คือ ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกของวัสดุ



รูปที่ 2.4 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก

เนื่องจากส่วนประกอบของน้ำในวัสดุ

ดัดแปลงรูปภาพจาก : (Daniel, D.J., 2004)

นอกจากนี้ Martinez A. and Byrnes A.P. (2001) กล่าวว่าความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบของแร่และความพรุนยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก แต่อย่างไรก็ตามความอิ่มตัวของน้ำส่งผลต่อค่าคงตัวของไดอิเล็กทริกมากที่สุด

ขณะที่ส่วนประกอบของแร่และความพรุนส่งผลกระทบต่อผลลงมา แม้ว่าค่าตัวแปรทั้ง 3 ข้างต้นจะสัมพันธ์ระหว่างกันสูง จากกราฟจำลองของ Martinez A. and Byrnes A.P. (2001) ระบุว่าเมื่อความอิ่มตัวของน้ำสูงอาจช่วยขยายสัญญาณเรดาร์ที่สะท้อนกลับมาได้ ในทางตรงกันข้ามวัตถุแห้งอาจลดสัญญาณเรดาร์ที่สะท้อนกลับให้ต่ำลงได้

2.1.4. การแปลงฮิลเบิร์ต

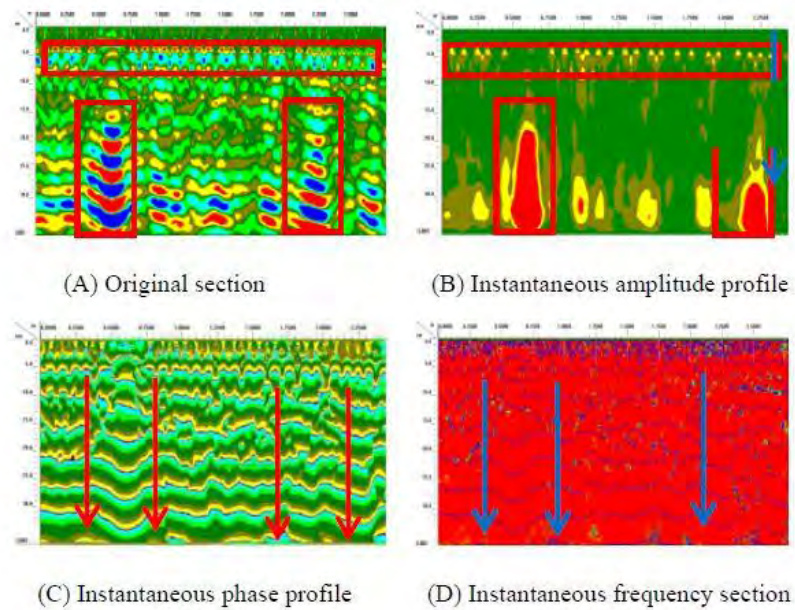
การแปลงฮิลเบิร์ต คือ การนำข้อมูลคุณลักษณะขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous attribute) 3 แบบ ได้แก่ แอมพลิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous amplitude) เฟสขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous phase) และความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous frequency) มาผ่านการวิเคราะห์ จากนั้นนำผลลัพธ์มาแสดงเป็นภาพ (Profile) บางคุณลักษณะขณะใดขณะหนึ่งทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความชัดเจนมากขึ้น เห็นรายละเอียดของวัตถุใต้ดินที่สนใจได้ดีขึ้น (กรมทางหลวง สำนักวิจัยและพัฒนาทาง, 2552)

ปกติวิธีหยังสัญญาณด้วยสัญญาณเรดาร์นิยมนำข้อมูลแอมพลิจูดที่เกิดจากการสะท้อนกลับ (Reflector amplitude) และลักษณะของสัญญาณ (Geometry) มาใช้ในการแปลผล และข้อมูลที่ได้เหล่านี้จะนำมาแสดงในรูปของแอมพลิจูดที่เกิดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา (Time domain radar data) แต่เมื่อแสดงในรูปข้อมูลเฟสขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous phase) พบว่าข้อมูลมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัตถุใต้ดินมากกว่า ในขณะที่ข้อมูลแมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous magnitude) หรือข้อมูลแอมพลิจูดขณะใดขณะหนึ่ง จะแสดงพลังงานสะท้อนที่แตกต่างกันจากวัตถุหรือรอยต่อชั้น ซึ่งเดิมสัญญาณที่ได้จากคลื่นเรดาร์เองไม่สามารถแสดงชัดเจน ในขณะที่ข้อมูลความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous frequency) สามารถระบุได้ว่าแต่ละพื้นผิวมีการดูดกลืนสัญญาณมากน้อยเท่าไร (Geophysical Survey System, Inc., 2009)

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Reviews)

Longjin Zh. et al. (2016) ศึกษาเกี่ยวกับการวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้การแปลงฮิลเบิร์ตในการจำลองสัญญาณเรดาร์ ซึ่งการแปลงฮิลเบิร์ตสามารถแสดงข้อมูลในรูปแมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous magnitude) เฟสขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous phase) และความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous frequency) งานวิจัยดังกล่าวสำรวจด้วยวิธีวัดการหยังลึกด้วยสัญญาณเรดาร์ ความถี่ 100 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างภาพโพสไฟล์ของแอมพลิจูดที่เกิดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา (Time domain radar

data) ก็กับการแปลงฮิลเบิร์ต พบว่าการแปลงฮิลเบิร์ตที่แสดงข้อมูลแมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง ให้ผลลัพธ์ชัดเจนและถูกต้องมากกว่า ขณะที่เฟสขณะใดขณะหนึ่งและความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง แสดงรอยต่อของวัสดุต่างชนิดกันและรูปร่างของวัตถุได้ถูกต้องมากขึ้น แต่เนื่องจากเฟสขณะใดขณะหนึ่งและความถี่ขณะใดขณะหนึ่งมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุ ทำให้ผลลัพธ์เปลี่ยนแปลงไปได้ง่าย ส่งผลให้ภาพผลลัพธ์บางส่วนจึงมีความคลาดเคลื่อนได้



รูปที่ 2.5 ภาพโพรไฟล์เปรียบเทียบระหว่างแอมพลิจูดที่เกิดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา

กับการแปลงฮิลเบิร์ต (Longjin Zh. et al., 2016)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

การสำรวจแบบจำลองโพรงใต้ผิวทางคอนกรีตด้วยวิธีสำรวจหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์แบบสามมิติ มีวิธีการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

- 3.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 3.2 ตรวจสอบพื้นที่ศึกษา
- 3.3 วางแผนการสำรวจ
- 3.4 เตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์
- 3.5 ออกภาคสนามและเก็บข้อมูล
- 3.6 ประมวลผลและแปลผลข้อมูลที่ได้จากการสำรวจ
- 3.7 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลลัพธ์
- 3.8 สรุปผล



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานทั้งหมดในการสำรวจแบบจำลองโพรงใต้ผิวดินทางคอนกรีตด้วยวิธีสำรวจหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์แบบสามมิติ

3.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ สาเหตุที่ก่อให้เกิดการชำรุดของผิวดินทางคอนกรีต ความสามารถในการสำรวจวัตถุใต้ผิวดินด้วยวิธีสำรวจหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์ หลักการเก็บข้อมูลด้วยเครื่องมือสำรวจหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์รุ่น SIR-20 หลักการประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรม RADAN

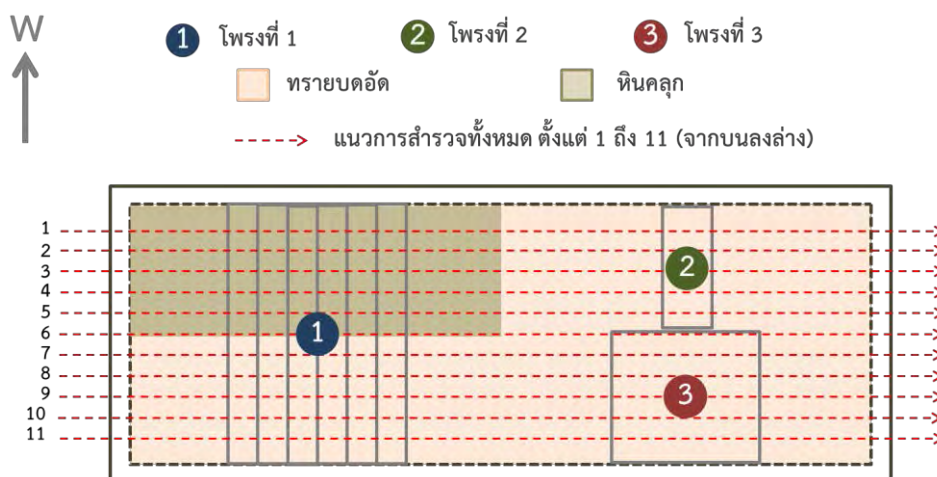
Version 6.6

3.2 ตรวจสอบพื้นที่ศึกษา

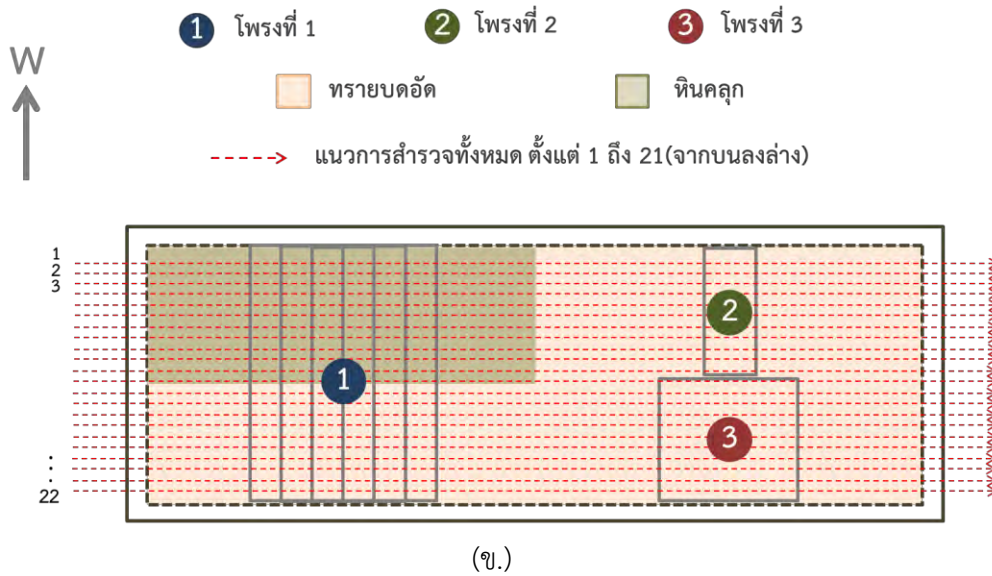
พื้นที่ศึกษาที่ผู้จัดทำสนใจ คือ แบบจำลองถนนคอนกรีตภายในสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย จังหวัดปทุมธานี ขั้นตอนนี้ผู้จัดทำได้ตรวจสอบความเรียบร้อยและเตรียมพื้นที่ให้พร้อมสำหรับการสำรวจ ได้แก่ ตรวจสอบการชำรุดของแบบจำลองถนนคอนกรีต วัดขนาดของแบบจำลองถนนคอนกรีต พบว่ามีความกว้าง 3.5 เมตร ยาว 10 เมตร ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลขนาดที่ระบุไว้ในงานวิจัยของ Giao, P. H. et al. (2007) ซึ่งเคยศึกษาพื้นที่ดังกล่าวมาก่อน จากนั้นทำความสะอาดและกำจัดสิ่งปกคลุมพื้นผิวถนน

3.3 วางแผนการสำรวจ

ภายหลังการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับข้อมูลการก่อสร้างแบบจำลองถนนคอนกรีตจากงานวิจัยของ Giao, P. H. et al. (2007) กล่าวว่า ในขั้นตอนการก่อสร้างแบบจำลองถนนคอนกรีต มีการติดตั้งแบบจำลองโพรง 3 ชั้นภายใต้ผิวทางคอนกรีต ซึ่งทำจากโฟม แต่ละชั้นมีรูปร่างและขนาดแตกต่างกัน จากข้อมูลดังกล่าวผู้จัดทำจึงนำมาประกอบการวางแผนการสำรวจโดยกำหนดให้มีความถี่ของสายอากาศ (Antenna) และจำนวนแนวการสำรวจที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบความคมชัดของภาพแบบจำลองโพรงจากแต่ละวิธีการ เลือกใช้สายอากาศที่มีความถี่ 400 เมกะเฮิรต์ซ์ และ 900 เมกะเฮิรต์ซ์ โดยสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรต์ซ์ มีระยะห่างระหว่างแนวการสำรวจ (Line spacing) เท่ากับ 30 เซนติเมตร มีแนวการสำรวจ (Line) ทั้งหมด 11 แนว ขณะที่สายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรต์ซ์ มีระยะห่างระหว่างแนวการสำรวจ (Line spacing) เท่ากับ 15 เซนติเมตร มีแนวการสำรวจทั้งหมด 22 แนว



(ก.)



รูปที่ 3.2 แนวการสำรวจบนแบบจำลองถนนคอนกรีต

(ก.) แนวการสำรวจ 11 แนวของสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรต์ซ์

(ข.) แนวการสำรวจ 22 แนวของสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรต์ซ์

3.4 เตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือสำหรับการสำรวจและประมวลผล ประกอบด้วย

3.4.1 เครื่องมือสำรวจหยังลึกด้วยสัญญาณเรดาร์รุ่น SIR-20 ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 4 ส่วน ดังนี้

3.4.1.1 ท้าฟบุก (Toughbook) เป็นโน้ตบุคสำหรับเก็บข้อมูล ประมวลผลและแสดงผลข้อมูลจากการสำรวจ ภายในประกอบไปด้วยโปรแกรม SS Linescan, SIR-20, Structure Scan III, Radan 6.6 และ Radan2bmp ซึ่งในการสำรวจครั้งนี้จะใช้เฉพาะโปรแกรม SIR-20 และ Radan 6.6



รูปที่ 3.3 ท้าพุกสำหรับใช้ร่วมกับเครื่องมือสำรวจหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์รุ่น SIR-20

3.4.1.2 หน่วยควบคุม (Control Unit) เป็นส่วนที่เชื่อมต่อกับท้าพุกและสายอากาศ ประกอบด้วย 8 จุดเชื่อมต่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ได้แก่

1. สายเชื่อมต่อพลังงานจากไฟฟ้ากระแสตรงให้กับท้าพุก (Laptop power)
 2. สายเคเบิลอีเธอร์เน็ตเชื่อมต่อกับท้าพุก (Ethernet cable)
 3. จุดเชื่อมต่อเพื่อใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ (Battery transformer)
 4. จุดเชื่อมต่อเพื่อใช้พลังงานจากไฟฟ้ากระแสสลับ (AC transformer)
 5. จุดเชื่อมต่อมาร์กเกอร์ (Marker connector) เชื่อมมาร์กเกอร์กับล้อวัดระยะทาง
 6. จุดเชื่อมต่อกับล้อวัดระยะทาง (Survey wheel connector) ซึ่งล้อจะทำหน้าที่บันทึกระยะทางที่สำรวจให้โดยอัตโนมัติ
 7. ทรานสดิวเซอร์ 1 (Transducer 1) คือ จุดเชื่อมต่อกับสายอากาศตัวที่ 1
 8. ทรานสดิวเซอร์ 2 (Transducer 2) คือ จุดเชื่อมต่อกับสายอากาศตัวที่ 2
- ในกรณีใช้สายอากาศเพียงตัวเดียวจะเชื่อมต่อเพื่อส่งข้อมูลที่จุดเชื่อมต่อทรานสดิวเซอร์ 1



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งจุดเชื่อมต่อ 9 จุดบนหน่วยควบคุม

3.4.1.3 สายอากาศ (Transmitting and Receiving antenna) เป็นอุปกรณ์ส่งและรับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งลงไปใต้ดิน ซึ่งการศึกษาคั้งนี้จะใช้สายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรท์ และ 900 เมกะเฮิรท์ ในการใช้งานจริงจะต้องต่อสายอากาศเข้ากับก้านจับเพื่อให้ง่ายต่อการลาก และก่อนการเก็บข้อมูลจะต้องเชื่อมต่อสายนำสัญญาณเข้ากับหน่วยควบคุมและสายอากาศก่อนที่จะเปิดใช้งานทัฟบุค สายอากาศประกอบด้วย 3 จุดเชื่อมต่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8 ได้แก่

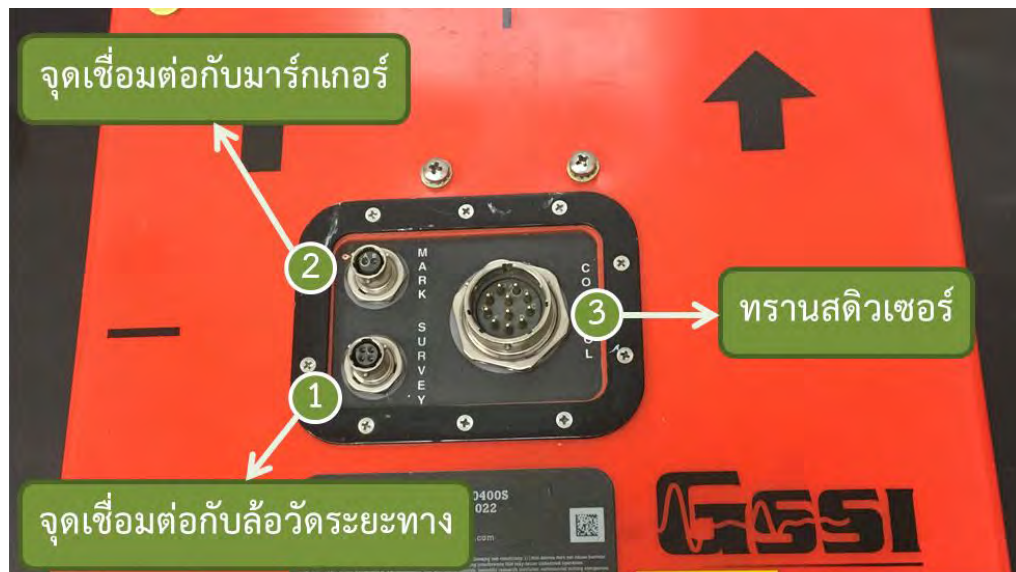
1. จุดเชื่อมต่อกับล้อวัดระยะทาง (Survey wheel connector) เชื่อมต่อล้อวัดระยะทางกับสายอากาศ
2. จุดเชื่อมต่อมาร์กเกอร์ (Marker connector) เชื่อมมาร์กเกอร์กับล้อวัดระยะทาง
3. ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) คือ จุดเชื่อมต่อกับหน่วยควบคุม



รูปที่ 3.5 สายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรท์



รูปที่ 3.6 สายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรต์ซ์
(ที่มา: <http://www.geophysicaldepot.com>)



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งจุดเชื่อมต่อ 3 จุดบนสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรต์ซ์
ดัดแปลงรูปภาพจาก: (<http://www.expins.com>)



รูปที่ 3.8 ตำแหน่งจุดเชื่อมต่อ 3 จุดบนสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์

3.4.1.4 ส่วนประกอบอื่นๆ ของเครื่องมือสำรวจยังอีกด้วยสัญญาณเรดาร์ ได้แก่ ก้านจับของสายอากาศ อุปกรณ์ชาร์จแบตเตอรี่ของทัฟบูค สายนำสัญญาณ

3.4.2 ล้อวัดระยะทาง (Survey wheel)

3.4.3 แบตเตอรี่ (Battery)

3.4.4 อุปกรณ์อื่นๆ เช่น ตลับเมตร ซอล์ก อุปกรณ์ชาร์จแบตเตอรี่



รูปที่ 3.9 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการสำรวจและประมวลผล

3.5 ออกภาคสนามและเก็บข้อมูล

ก่อนการสำรวจจะต้องเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ให้พร้อมสำหรับการใช้งาน รวมถึงโปรแกรมในการเก็บข้อมูล ทำการสำรวจด้วยเครื่องมือสำรวจหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์รุ่น SIR-20 การศึกษาครั้งนี้จะใช้โปรแกรม SIR-20 จากนั้นเชื่อมอุปกรณ์ต่างๆ ด้วยสายนำสัญญาณ ปรับแก้ระยะทาง (Calibration) ของล้อวัดระยะทาง ตั้งค่าตัวแปรในการเก็บข้อมูลและทำการเก็บข้อมูล ลากสายอากาศจากทิศใต้ไปทิศเหนือตามแนวการสำรวจ โดยสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรตซ์ มีระยะห่างระหว่างแนวการสำรวจ (Line spacing) เท่ากับ 30 เซนติเมตร มีแนวการสำรวจทั้งหมด 11 แนว ดังรูปที่ 3.10 ขณะที่สายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์ มีระยะห่างระหว่างแนวการสำรวจ (Line spacing) เท่ากับ 15 เซนติเมตร มีแนวการสำรวจทั้งหมด 22 แนว



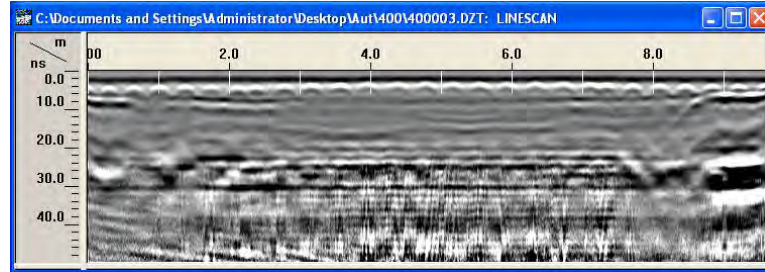
รูปที่ 3.10 แนวการสำรวจและทิศทางการลากของสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรตซ์

การเก็บข้อมูลของแต่ละแนวการสำรวจจะถูกบันทึกเป็นไฟล์แยก ข้อมูลที่บันทึกได้ คือ ภาพโพรไฟล์ เป็นภาพ 2 มิติที่ได้จากการสแกนในแต่ละแนวการสำรวจ ควรตรวจสอบภาพโพรไฟล์ทุกครั้งภายหลังการเก็บข้อมูล เพื่อลดความผิดพลาดเนื่องจากเครื่องมือและผู้สำรวจ

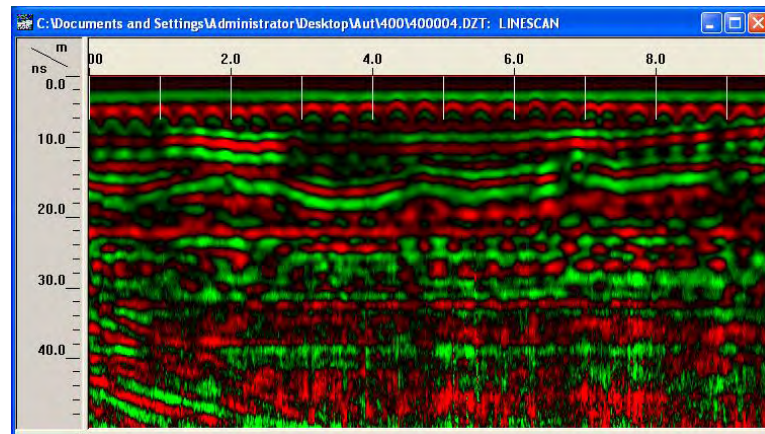
3.6 ประมวลผลและแปลผลข้อมูลที่ได้จากการสำรวจ

ภายหลังจากการออกภาคสนามและเก็บข้อมูล ข้อมูลที่ได้ คือ ภาพโพรไฟล์ 2 มิติจากการสะท้อนของคลื่นเรดาร์ เนื่องจากภาพโพรไฟล์ที่ไม่ผ่านการปรับแต่งอาจสังเกตเห็นโครงสร้างหรือวัตถุ

ต่างๆไม่ชัดเจน ดังนั้นการปรับสีภาพด้วยตารางสี (Color table) ก่อนนำภาพที่ได้มาประมวลผลและแปลงผลด้วยโปรแกรม RADAN 6.6 ภายในทัพพุก อาจทำให้เห็นความแตกต่างระหว่างภาพก่อนและหลังการประมวลผลได้ชัดเจนยิ่งขึ้น



(ก.)



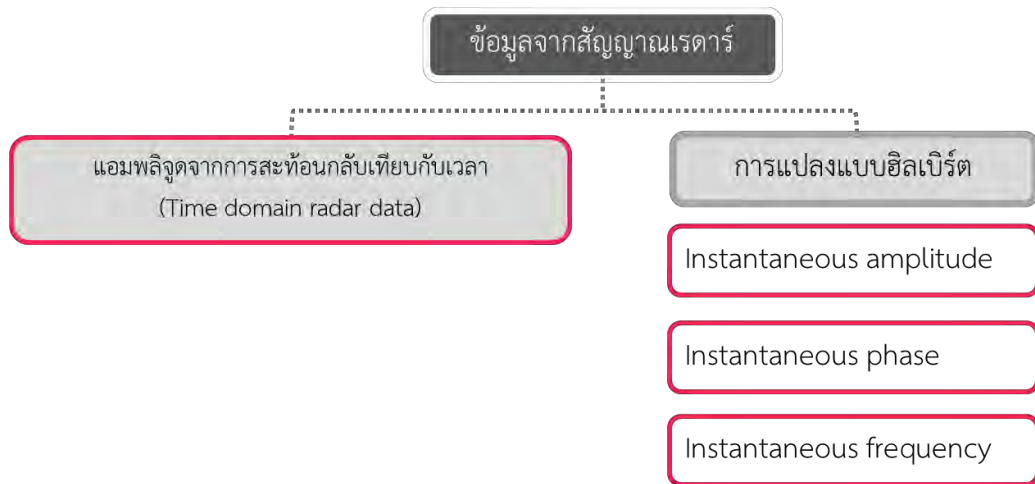
(ข.)

รูปที่ 3.11 เปรียบเทียบภาพ 2 มิติ ก่อนและหลังเปลี่ยนสีด้วยตารางสี

(ก.) ภาพ 2 มิติที่ได้จากการสำรวจโดยไม่ผ่านการปรับแต่ง

(ข.) ภาพ 2 มิติที่ใช้ตารางสีหมายเลข 20

การประมวลผลสามารถแสดงออกมาได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ ข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา (Time domain radar data) และการแปลงฮิลเบิร์ต (Hilbert transform)

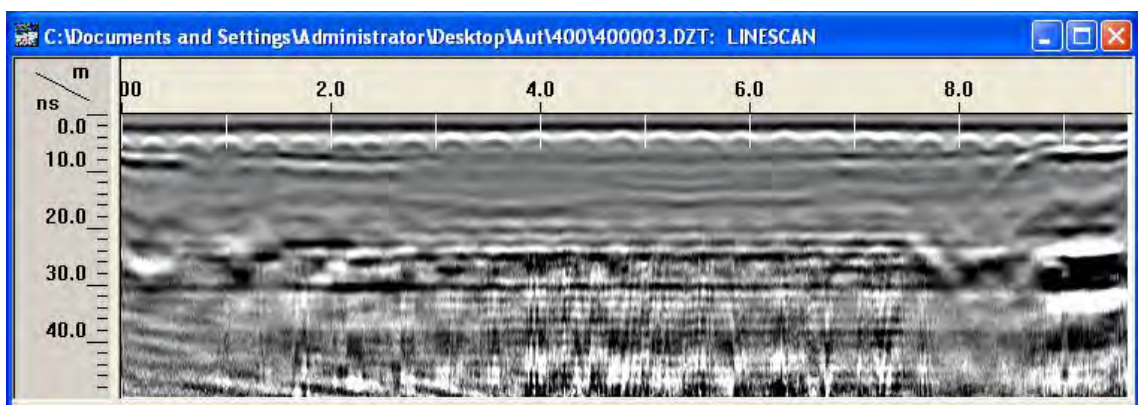


รูปที่ 3.12 การแสดงข้อมูลประมวลผลและแปลผล 2 รูปแบบ ได้แก่ ข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา (Time domain radar data) และการแปลงฮิลเบิร์ต (Hilbert transform)

3.6.1 การประมวลผลของภาพ 2 มิติจากการสะท้อนของคลื่นเรดาร์ในรูปแบบแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา (Time domain radar data)

3.6.1.1 การขยายสัญญาณ (Display gain)

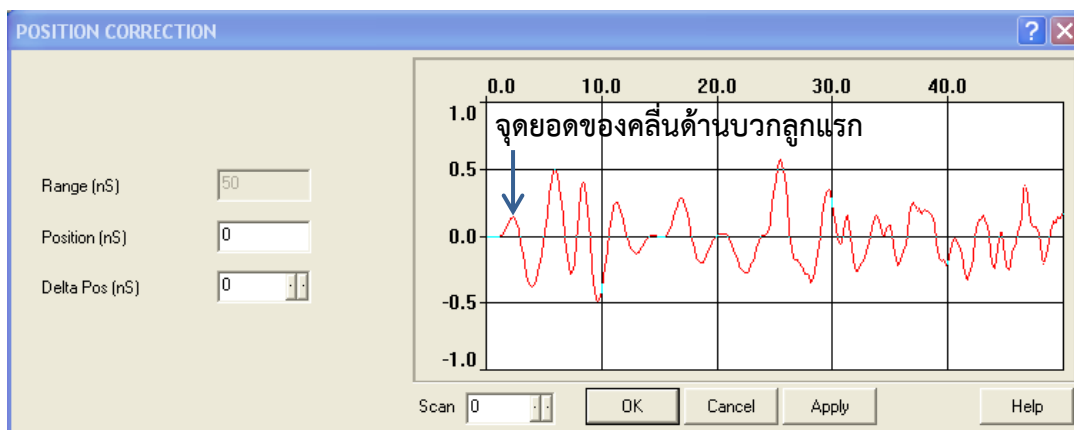
คือ การปรับสัญญาณที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาคสนามให้มีความชัดเจนมากขึ้น สังเกตเห็นโครงสร้างใต้ผิวทางคอนกรีตได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยภาพของผลลัพธ์ทั้งหมดที่ได้จากการสำรวจจะตั้งค่าการขยายสัญญาณเท่ากับ 2 ถึง 4 ขึ้นกับความคมชัดของแต่ละภาพภาพ แต่การตั้งค่าการขยายสัญญาณไม่ได้ส่งผลใดๆต่อข้อมูลที่เก็บมาจากการออกภาคสนาม เนื่องจากการปรับค่าเพื่อให้ง่ายต่อการแปลผลข้อมูลเท่านั้น



รูปที่ 3.13 ภาพ 2 มิติได้แนวการสำรวจที่ 3 ด้วยสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรต์ ผ่านการขยายสัญญาณ (Display gain) เท่ากับ 2

3.6.1.2 การปรับตำแหน่งของข้อมูล (Correction position)

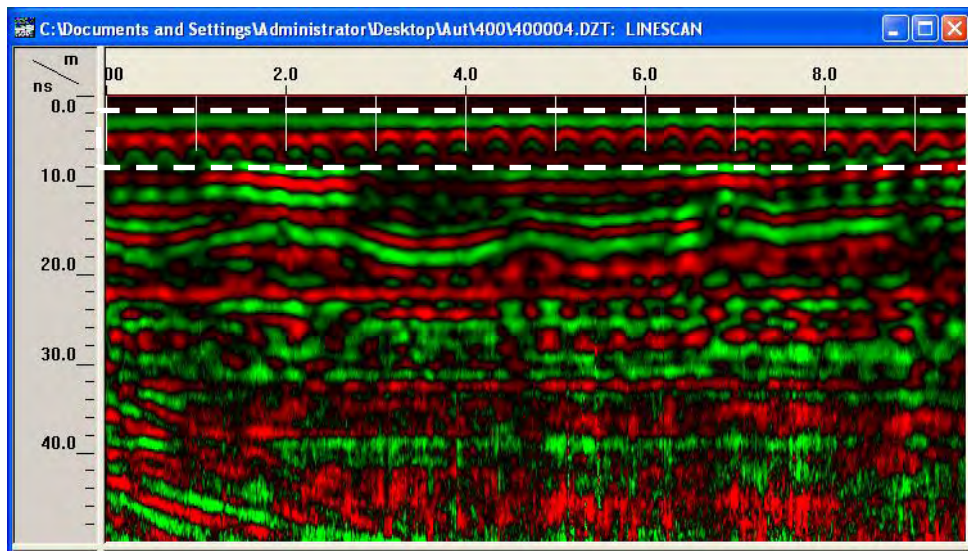
คือ การลบข้อมูลที่บันทึกก่อนคลื่นจะเดินทางลงสู่ถนนคอนกรีตที่ส่งผลให้ความลึกของผิวสัมผัสไม่ตรงตามความเป็นจริง เป็นการปรับสัญญาณเริ่มต้นที่ได้ให้ใกล้เคียงกับพื้นผิวสัมผัส ใช้ในกรณีไม่ได้ปรับแก้สัญญาณเริ่มต้นในสนาม เป็นขั้นตอนการประมวลผลที่สำคัญ เพราะส่วนใหญ่การประมวลผลในขั้นตอนอื่นๆ จะต้องทำการปรับตำแหน่งของข้อมูลก่อนนำไปใช้ โดยปกติการปรับตำแหน่งจะปรับให้ตำแหน่งของผิวคอนกรีตอยู่ที่จุดยอดของคลื่นด้านบวกลูกแรก ดังรูปที่ 3.8



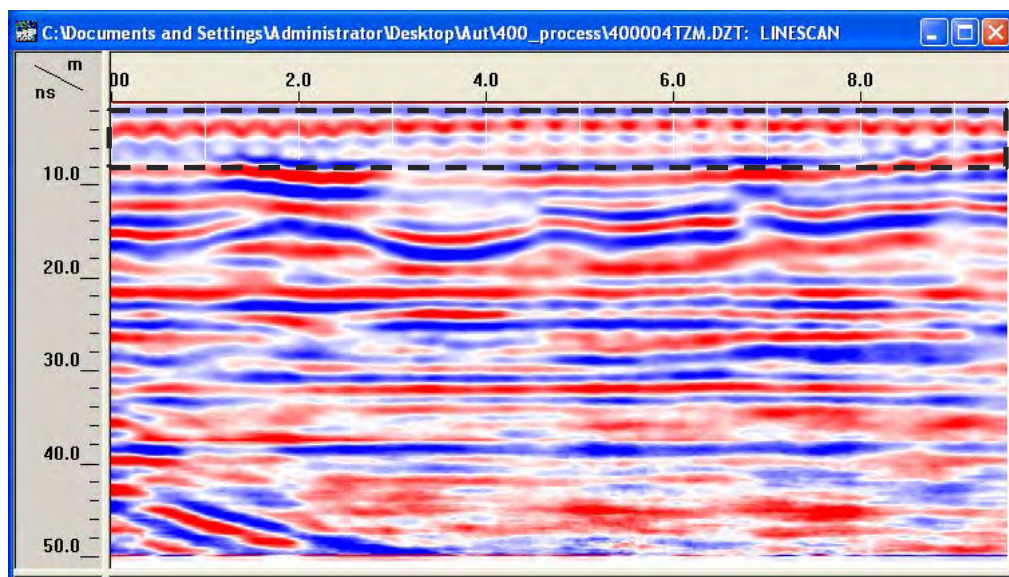
รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการปรับความลึกของผิวสัมผัส (Correct Position) ทำการปรับค่าที่ Delta Pos (nS) การปรับค่าที่ตำแหน่งโดยปกติพิจารณาจากเป็นผิวคอนกรีต แกนแนวนอนคือระยะเวลาการสะท้อนกลับของคลื่นเรดาร์ (Time Travel) และแกนในแนวตั้งคือความกว้างของคลื่น(Amplitude)

3.6.1.3 การกำจัดปลายหางของไฮเปอร์โบล่าที่เกิดจากเหล็กเสริม (Migration)

คือ การกำจัดปลายส่วนโค้งที่เกิดจากเหล็กเสริมด้วยตัวกรองไมเกรชั่น (Migration) ทำให้ปลายส่วนโค้งถูกกำจัดไปกลายเป็นจุดกลม เพื่อให้เห็นตำแหน่งของสิ่งที่ต้องการสำรวจและภาพจากการสะท้อนของสัญญาณได้ชัดเจนยิ่งขึ้น รวมถึงสามารถประเมินความลึกโดยประมาณของวัตถุที่อยู่ภายในวัสดุเนื้อเดียวกันได้ดีอีกด้วย แต่ก่อนการประมวลผลในขั้นตอนนี้ จะต้องทำการปรับตำแหน่งของข้อมูล (Correction position) ก่อนเสมอ



รูปที่ 3.15 ภาพ 2 มิติได้แนวการสำรวจที่ 4 ด้วยสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรท์ซ์ ก่อนผ่านการกำจัดปลายส่วนโค้งของไฮเปอร์โบลาที่เกิดจากเหล็กเสริม ปรับแต่งสีภาพโดยใช้ตารางสีหมายเลข 20

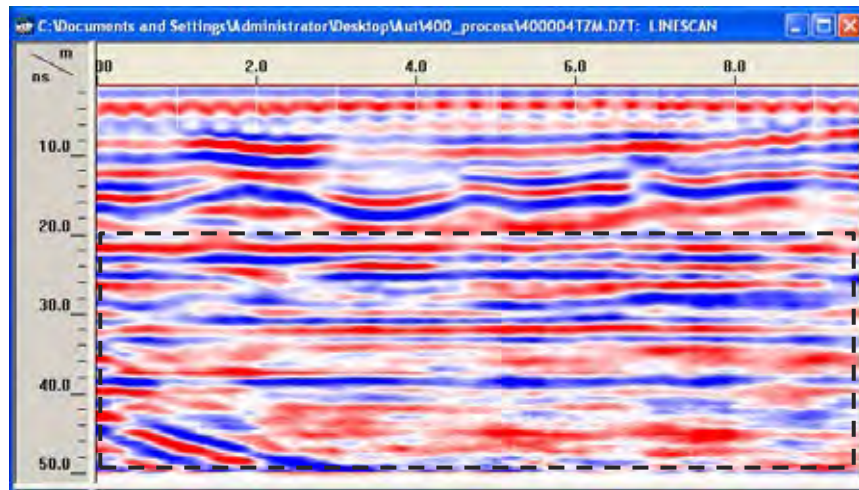


รูปที่ 3.16 ภาพ 2 มิติได้แนวการสำรวจที่ 4 ด้วยสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรท์ซ์ ผ่านการกำจัดปลายส่วนโค้งของไฮเปอร์โบลาที่เกิดจากเหล็กเสริม ปรับแต่งสีภาพโดยใช้ตารางสีหมายเลข 25

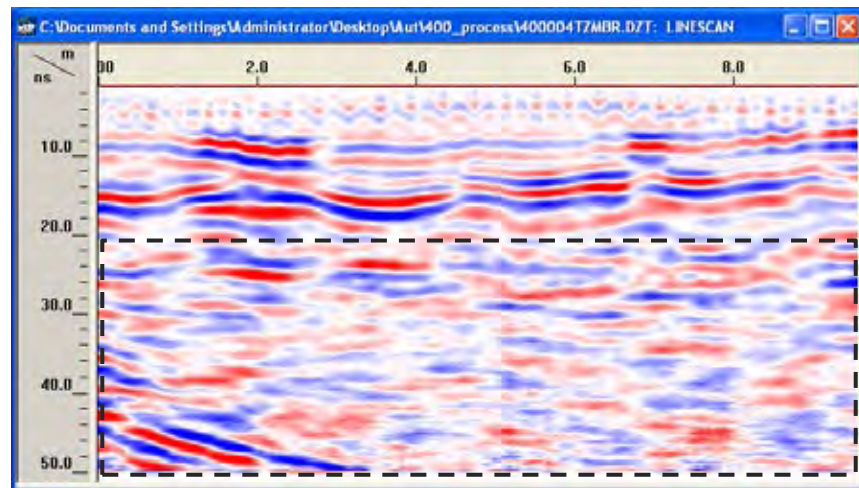
3.6.1.4 การกำจัดสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background removal)

คือ ตัวกรองความถี่สูงตามแนวนอน (Horizontal high pass filter) ที่ช่วยลบแถบแนวนอนที่เกิดจากการรบกวนของโลหะที่อยู่ใกล้เคียงหรือสำรวจในบริเวณที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูง ส่งผลให้สัญญาณไม่ดี สังเกตบริเวณกรอบเส้นประ ดังรูปที่ 3.17 ภาพ (ก.) จะมีแถบเส้นตรงแนวนอน แต่หลังจากกำจัดสัญญาณรบกวนพื้นหลังแถบเหล่านี้จะหายไป

นอกจากนี้ตัวกรองยังทำให้บริเวณที่มีแอมพลิจูดสูงเด่นชัดมากขึ้น ในขณะที่บริเวณแอมพลิจูดต่ำจะถูกกดให้จางลง ทำให้สามารถสังเกตเห็นตำแหน่งของวัตถุที่สนใจได้ดีขึ้น ตัวกรองนี้ทำงานโดยจะเฉลี่ยจำนวนครั้งที่สแกนและลดค่าเฉลี่ยในแต่ละตัวอย่างจากการสแกนทั้งหมด โดยปกติมักตั้งค่าของตัวกรองนี้ให้มีความมากๆ เช่น ถ้าเก็บข้อมูลจำนวนครั้งที่สแกนต่อเมตร (Scan/meter) เท่ากับ 50 ตั้งค่าตัวกรองเท่ากับ 49 ข้อมูลหลังการกำจัดสัญญาณรบกวนพื้นหลังจะถูกถูกลบแถบแนวนอนออกไปประมาณ 1 เมตร



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 3.17 เปรียบเทียบภาพก่อนและหลังการกำจัดสัญญาณรบกวนพื้นหลัง ใช้ตารางสีหมายเลข 25

(ก.) ภาพโพรไฟล์ 2 มิติก่อนการกำจัดสัญญาณรบกวนพื้นหลัง

(ข.) ภาพโพรไฟล์ 2 มิติหลังการกำจัดสัญญาณรบกวนพื้นหลัง

3.6.2 การแปลงฮิลเบิร์ต (Hilbert transform)

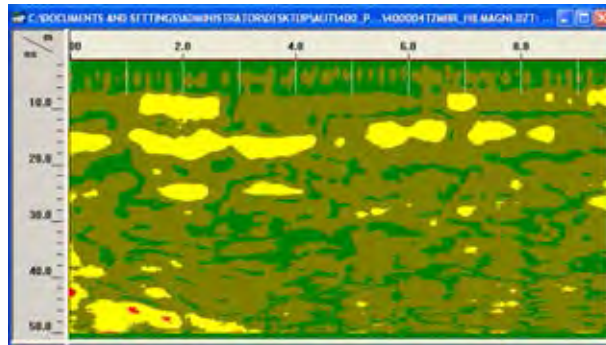
คือ การแสดงข้อมูลคุณสมบัติขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous attribute) 3 แบบ ได้แก่

3.6.2.1. แมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous amplitude)

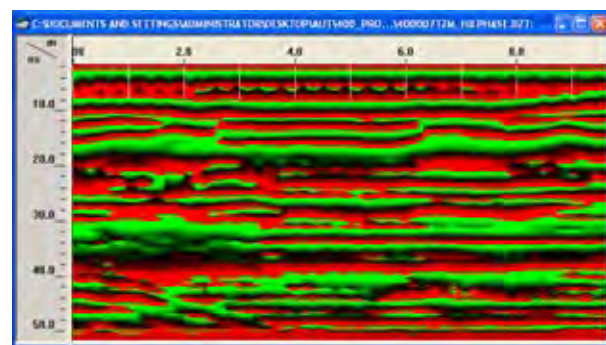
3.6.2.2 เฟสขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous phase)

3.6.2.3 ความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous frequency)

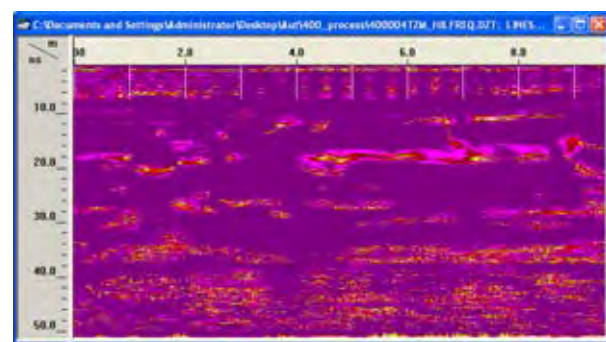
ซึ่งก่อนจะนำภาพมาแปลงแบบฮิลเบิร์ตจะต้องผ่านการประมวลผลแบบข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลาก่อน จากนั้นจึงนำไปแปลงแบบฮิลเบิร์ตต่อไป



(ก.)



(ข.)



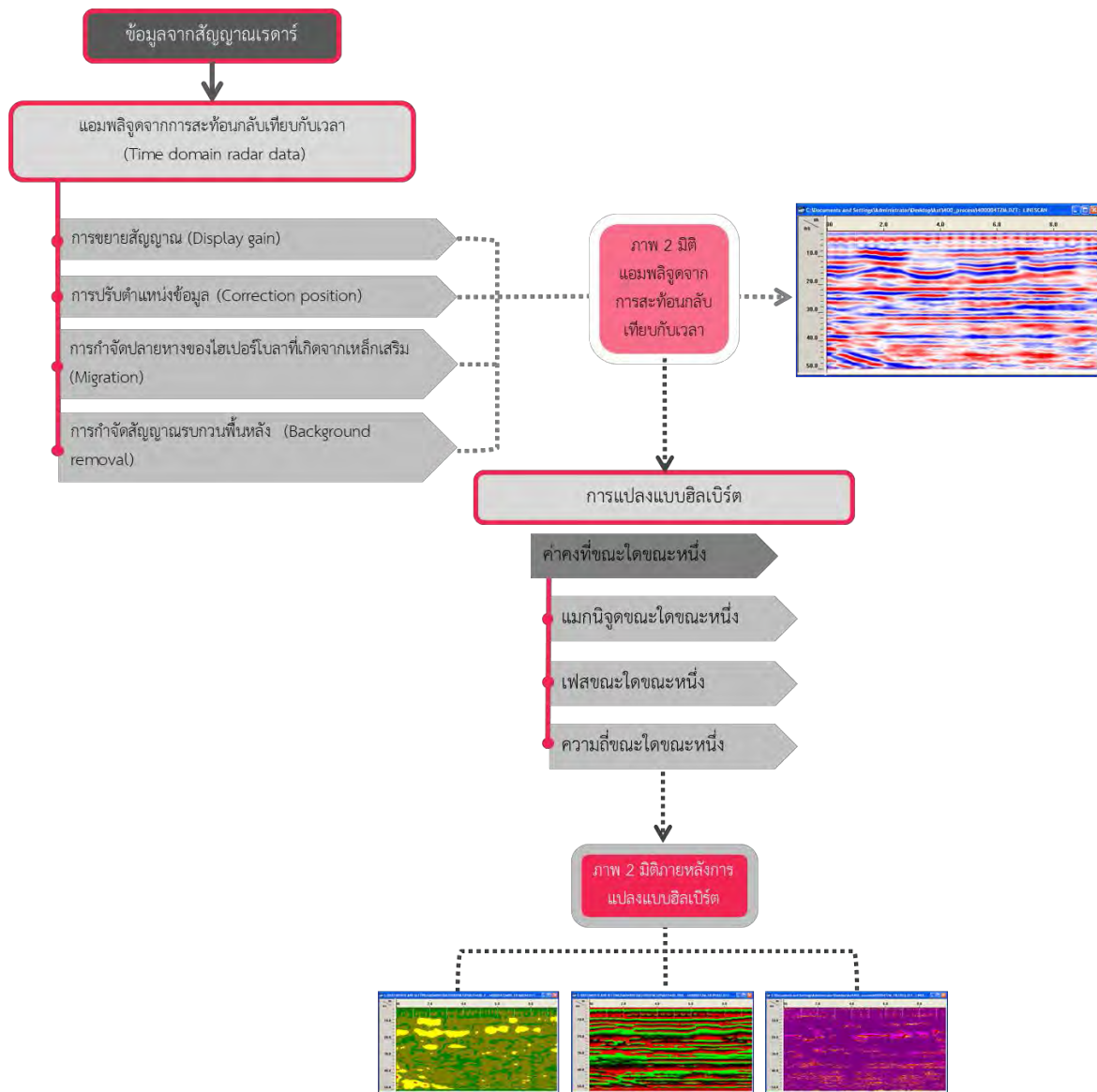
(ค.)

รูปที่ 3.18 ภาพโพรไฟล์ 2 มิติหลังการแปลงฮิลเบิร์ต

(ก.) การแปลงฮิลเบิร์ตที่แสดงแมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง

(ข.) การแปลงฮิลเบิร์ตที่แสดงเฟสขณะใดขณะหนึ่ง

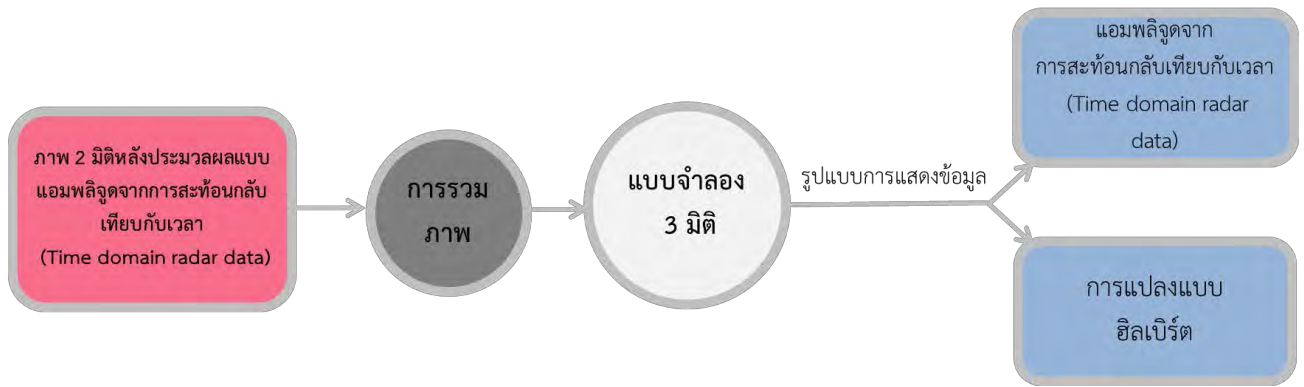
(ค.) การแปลงฮิลเบิร์ตที่แสดงความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง



รูปที่ 3.19 แผนผังการประมวลผลและแปลผลภาพโพรไฟล์ 2 มิติ

3.6.3 การรวมภาพเพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติ

คือ การนำไฟล์ภาพ 2 มิติมารวมเพื่อสร้างเป็นแบบจำลอง 3 มิติ ขั้นแรกต้องสร้างไฟล์งาน 3 มิติ กำหนดลักษณะแนวการสำรวจ (Line order) และระยะห่างระหว่างแนวการสำรวจ (Line spacing) ให้สอดคล้องกับการออกภาคสนาม จากนั้นรวมภาพโพรไฟล์ 2 มิติแต่ละไลน์ที่สำรวจด้วยสายอากาศความถี่เดียวกัน และสร้างแบบจำลอง 3 มิติของแบบจำลองถนนคอนกรีตเป็นไฟล์ใหม่ออกมา ซึ่งแบบจำลอง 3 มิติสามารถจะนำไปแปลงแบบฮิลเบิร์ตต่อไปได้

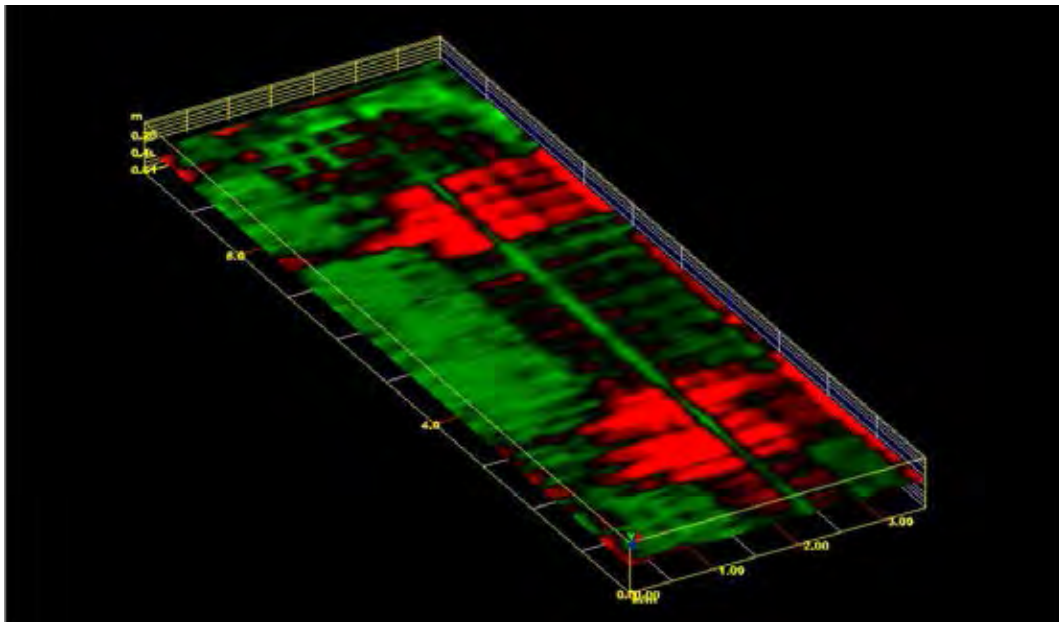


รูปที่ 3.20 แผนผังการรวมภาพเพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติและรูปแบบการแสดงผล

3.6.4 การแปลงแบบจำลอง 3 มิติออกมาในรูปแบบต่างๆโดยใช้เครื่องมือมุมมองแบบ 3 มิติ (3D Cube view option)

3.6.3.1 การแปลงแบบแสดงเฉพาะแกน (Single X,Y,Z Slicing)

คือ การแปลงแบบจำลอง 3 มิติให้แสดงเพียงบางแกนได้ ซึ่งแบบจำลอง 3 มิติประกอบด้วย 3 แกน ได้แก่ แกน X, แกน Y, แกน Z โดยแกน X แสดงความกว้างของถนน แกน Y แสดงความยาวของถนนและแกน Z จะแสดงความลึกนับจากพื้นผิวถนนคอนกรีต ในการศึกษาครั้งนี้จะเลือกแสดงเฉพาะภาพตามแนวแกน Z เท่านั้น โดยที่แกน X และแกน Y มีค่าคงที่ ดังรูปที่ 3.21 ทำให้สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแบบจำลองโพรงในแต่ละความลึกได้

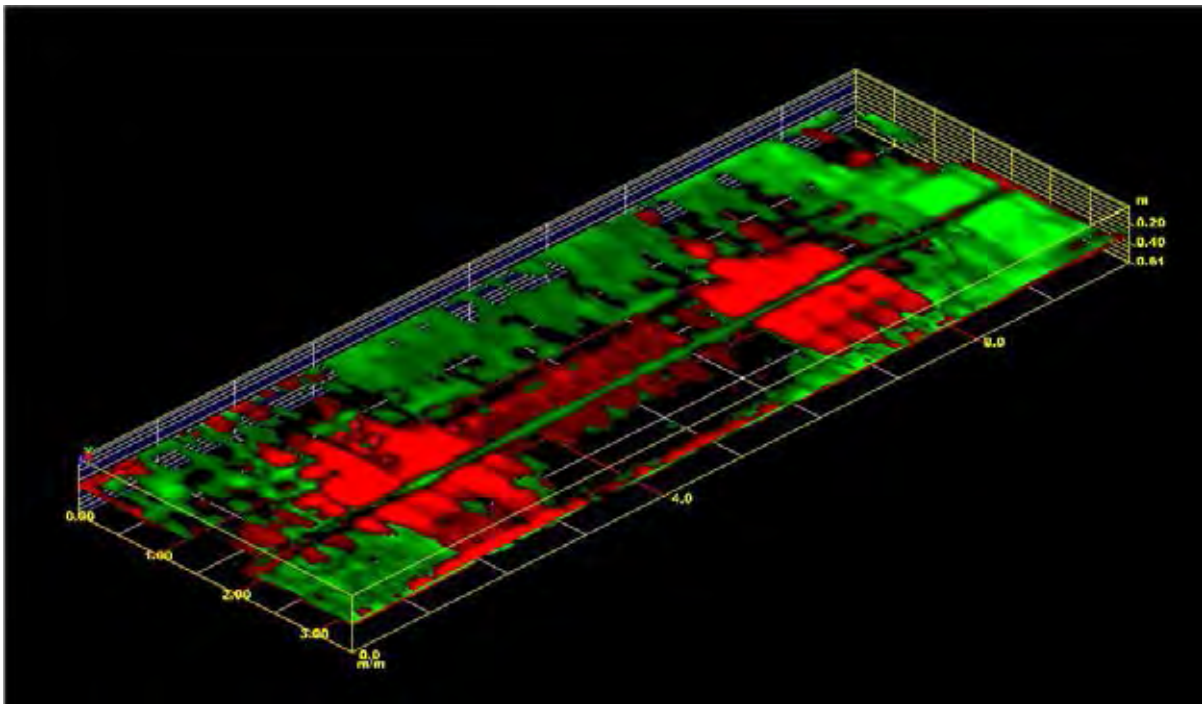


รูปที่ 3.21 แบบจำลอง 3 มิติที่แปลงแบบแสดงเฉพาะแกน (Single X,Y,Z Slicing)

ที่ระดับ 0.29 เมตรจากพื้นผิว ใช้ตารางสีหมายเลข 20

3.6.3.2 การแสดงผลแบบภาพ 3 มิติโปร่งแสง (3D Transparency)

คือ การแสดงเฉพาะวัตถุที่มีค่าแอมพลิจูดสูงและวัสดุอื่น ๆ ที่มีค่าแอมพลิจูดเป็นกลาง เช่น ชั้นพื้นทาง จะเปลี่ยนเป็นโปร่งแสง ซึ่งสีต่างๆจะแทนค่าแอมพลิจูดที่แตกต่างกัน เหมาะกับกรณีที่ว่าวัตถุใต้ดินที่สนใจมีค่าแอมพลิจูดสูง การแสดงผลสามารถตั้งค่าความโปร่งใส (Transparency) เป็นเปอร์เซ็นต์ ความหนาของชั้น (Transparency range) ระดับความลึกที่ต้องการ (Position) และความละเอียด (Resolution) ถ้าตั้งค่าสูงจะแสดงรายละเอียดของรูปภาพมากขึ้น

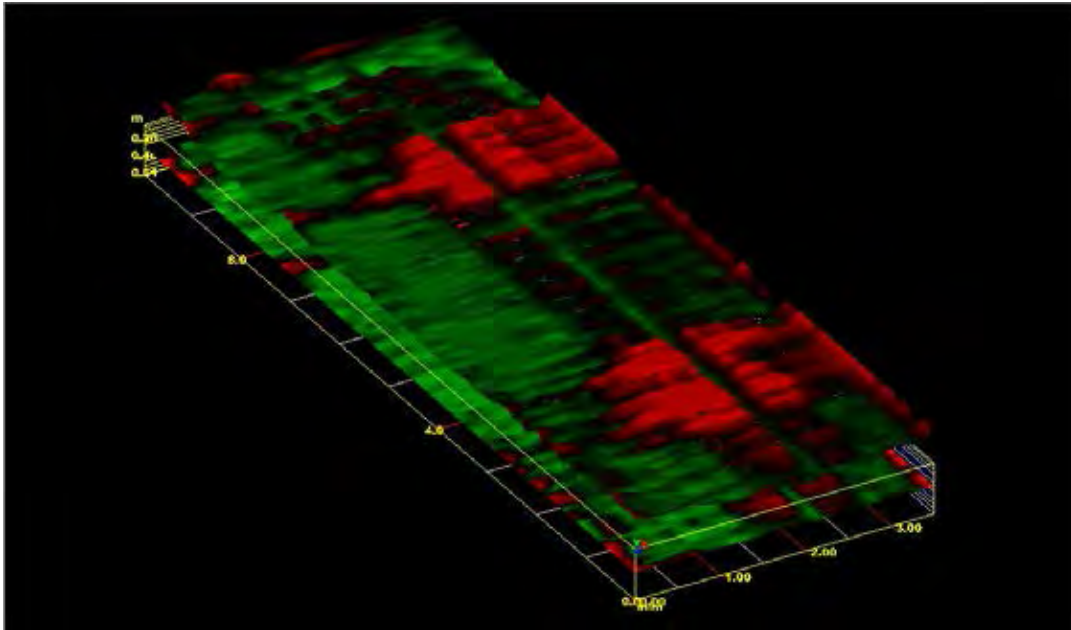


รูปที่ 3.22 แบบจำลอง 3 มิติที่แสดงผลแบบภาพ 3 มิติโปร่งแสง (3D Transparency) ให้ความหนาของชั้น (Transparency range) เท่ากับ 0.05 เมตร ความโปร่งใส (Transparency) เท่ากับ 30%, ระดับความลึกที่ต้องการ (Position) เท่ากับ 0.32 เมตรและความละเอียด (Resolution) เท่ากับ 1:32

3.6.5 การแสดงผลแบบจำลอง 3 มิติด้วยเครื่องมือพิเศษ

3.6.5.1 การแสดงเส้นชั้นความสูง (Contour)

คือ การสร้างเส้นชั้นความสูงขึ้นมาจากค่าแอมพลิจูด การแสดงผลสามารถเลือกกระชั้นความลึกที่ต้องการแสดงได้



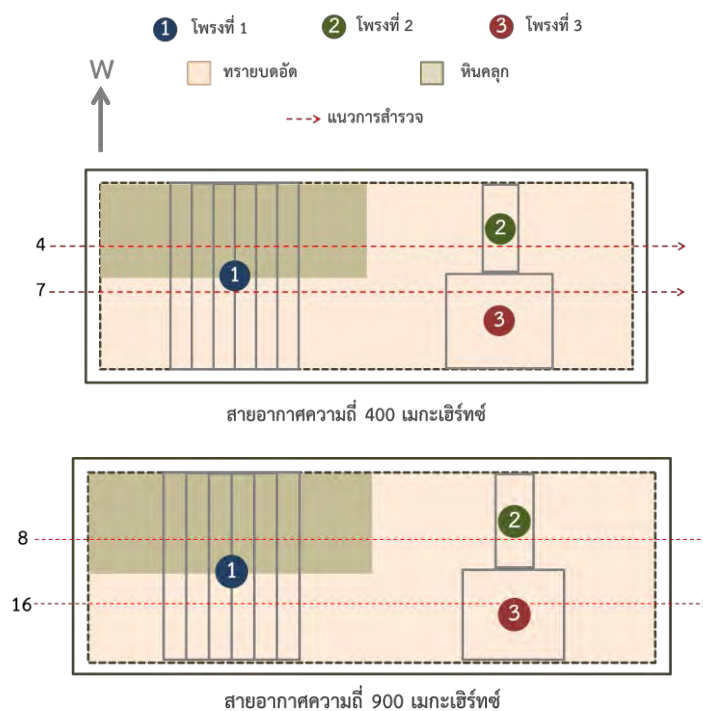
รูปที่ 3.23 แบบจำลอง 3 มิติแสดงเส้นชั้นความสูง (Contour) ที่ระดับความลึก 0.32 เมตรจากพื้นผิว

บทที่ 4

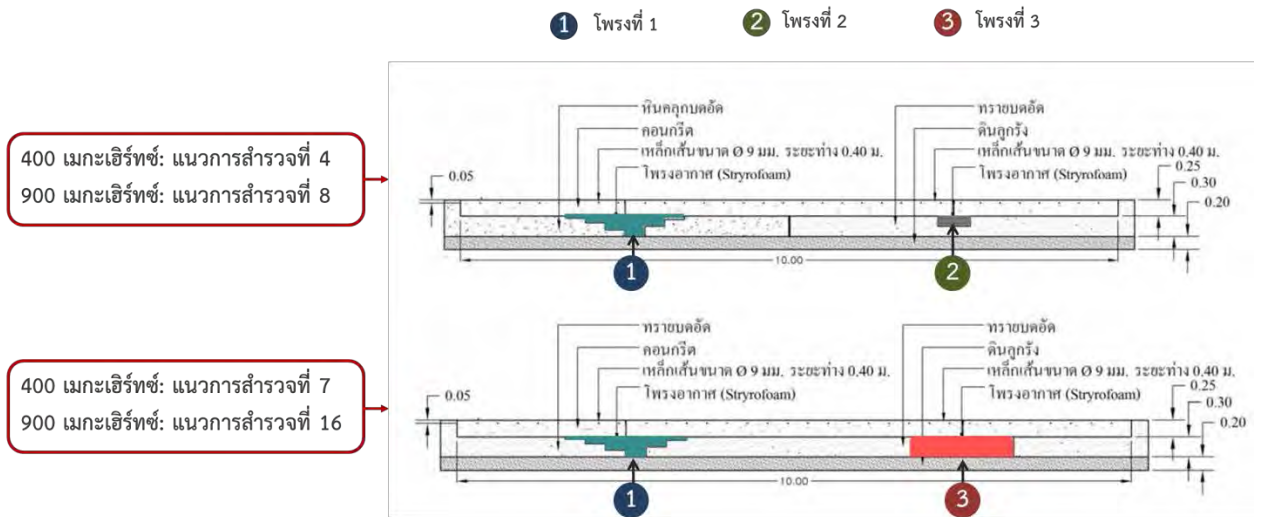
การวิเคราะห์และอภิปรายผล

4.1 เกณฑ์การเปรียบเทียบผลลัพธ์

นำภาพโพรไฟล์ 2 มิติที่บันทึกมาจากการออกภาคสนามด้วยสายอากาศความถี่ 400 และ 900 เมกะเฮิรตซ์จากแนวการสำรวจที่อยู่บริเวณเดียวกันมาเปรียบเทียบ ในที่นี้ภาพโพรไฟล์ 2 มิติของสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรตซ์ เลือกจากแนวการสำรวจที่ 4 และ 7 มาเป็นตัวแทนของข้อมูลในเปรียบเทียบความแตกต่าง ส่วนสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์เลือกแนวการสำรวจที่ 8 และ 16 มาเป็นตัวแทนของข้อมูลในเปรียบเทียบ เนื่องจากเห็นรูปทรงและตำแหน่งของโพรงชัดเจนเป็นแนวการสำรวจที่ลากผ่านบริเวณกึ่งกลางโพรง ซึ่งการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากแต่ละขั้นตอนการประมวลผลจะพิจารณาจากการเห็นตำแหน่งของโพรงที่ชัดเจนและรายละเอียดของรูปทรงโพรงเป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ ได้ผลลัพธ์การเปรียบเทียบดังนี้



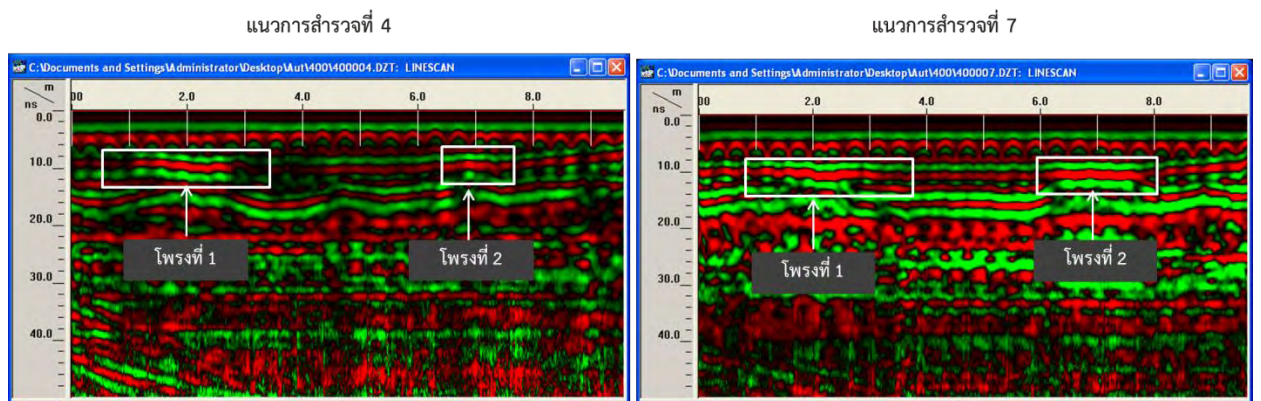
รูปที่ 4.1 ตำแหน่งของแนวการสำรวจที่ 4 และ 7 ของสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรตซ์ และตำแหน่งของแนวการสำรวจที่ 8 และ 16 ของสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์ บนแบบจำลองถนนคอนกรีต



รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางของแบบจำลองถนนคอนกรีตบริเวณแนวการสำรวจที่ 4 และ 7 ของสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิร์ทซ์ และแนวการสำรวจที่ 8 และ 16 ของสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิร์ทซ์ แสดงรูปทรงของแบบจำลองโพรง 3 ชั้น

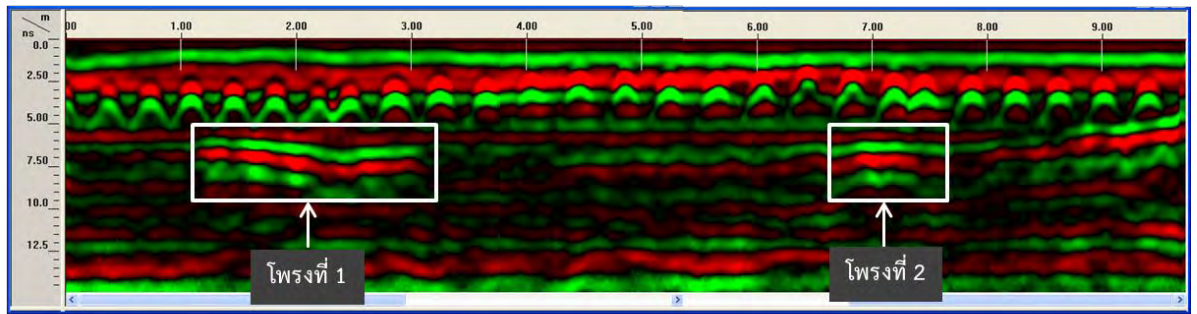
4.2 การเปรียบเทียบภาพโพรไฟล์ 2 มิติก่อนการประมวลผล

การเปรียบเทียบภาพโพรไฟล์ 2 มิติก่อนการประมวลผลระหว่างสายอากาศความถี่ 400 และ 900 เมกะเฮิร์ทซ์นำมาใช้เปรียบเทียบเพื่อพิจารณาผลลัพธ์ระหว่างการสำรวจด้วยสายอากาศที่มีความถี่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังใช้เป็นภาพอ้างอิงสำหรับเปรียบเทียบกับภาพที่ผ่านการประมวลผลแล้วได้อีกด้วย

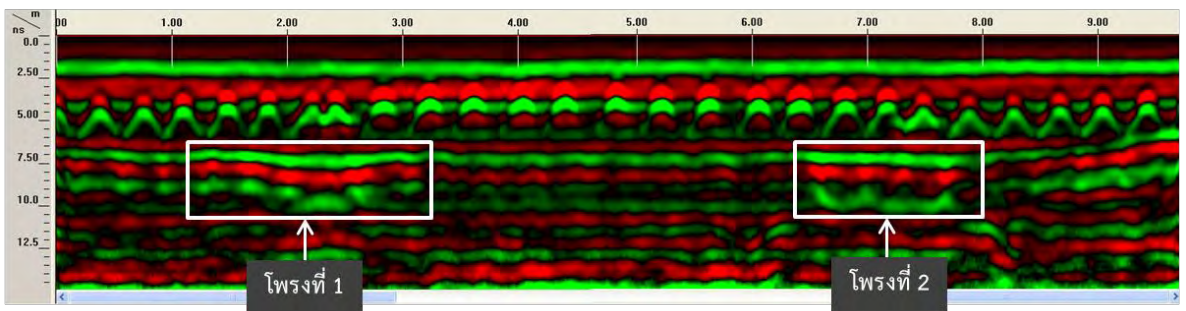


(ก.) สายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิร์ทซ์

แนวการสำรวจที่ 8



แนวการสำรวจที่ 16



(ข.) สายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์

รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบภาพโพรงไฟล 2 มิติก่อนการประมวลผล

(ก.) สายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรตซ์

(ข.) สายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์

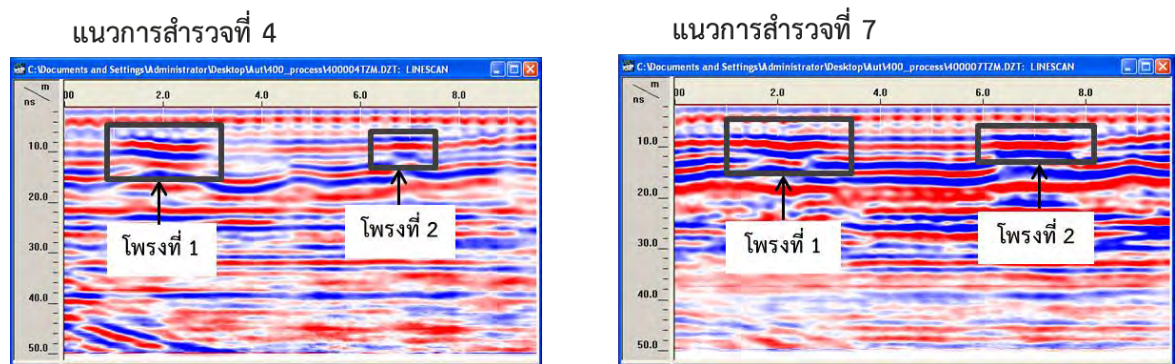
จากรูปที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างภาพที่ได้จากสายอากาศความถี่ 400 และ 900 เมกะเฮิรตซ์ พบว่าภาพจากสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรตซ์เห็นขอบเขตของโพรงไม่ชัดเจน ทำให้สังเกตเห็นได้ยาก แต่ภาพจากสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์เห็นขอบเขตของโพรงชัดเจนกว่า และให้ความละเอียดมากกว่า จึงเห็นรูปร่างของโพรงชัดเจนกว่า เนื่องจากสัญญาณความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์มีความถี่สูง จึงมีความยาวคลื่นสั้น ถ้าขนาดความยาวคลื่นมีขนาดเล็กกว่าขนาดโพรง การสะท้อนกลับคลื่นจะให้ผลลัพธ์ที่ดี เมื่อพิจารณาโพรงที่ 1 ดังรูปที่ 4.3 (ก.) และ 4.3 (ข.) ภาพจากสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์เห็นลักษณะของโพรงรูปร่างขึ้นบันไดชัดเจนกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบด้านความลึกในการสำรวจพบว่าภาพจากสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรตซ์ให้ความลึกในการสำรวจมากกว่า เนื่องจากสัญญาณที่มีความถี่สูง จะมีพลังงานสูง ทำให้การลดทอนพลังงานสูงตามไปด้วยเช่นกัน ส่งผลให้สัญญาณไม่สามารถเคลื่อนที่ในตัวกลางได้ไกลเท่ากับสัญญาณที่มีความถี่

ต่ำกว่า ดังนั้นสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิร์ตซ์จึงให้ความลึกในการสำรวจมากกว่า พิจารณาได้จากความลึกในแนวแกนตั้ง ดังรูปที่ 4.3 (ก.)

4.3 การเปรียบเทียบภาพโพรไฟล์ 2 มิติและแบบจำลอง 3 มิติที่ผ่านการประมวลผล

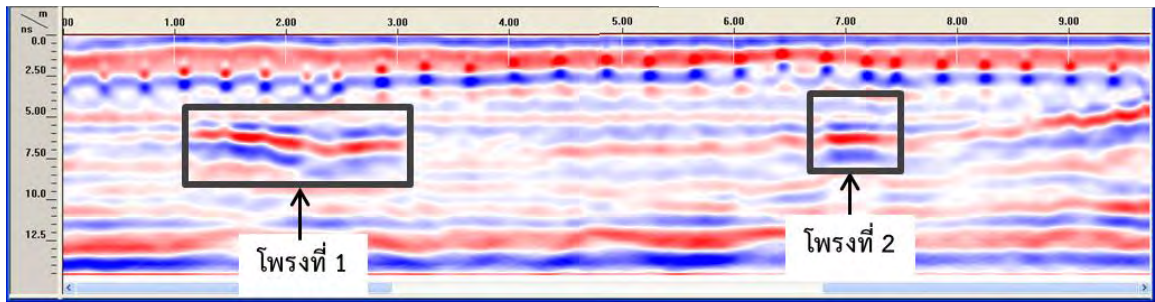
4.3.1 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่แสดงในรูปแบบข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา (Time domain radar data)

4.3.1.1 การเปรียบเทียบภาพโพรไฟล์ 2 มิติที่แสดงในรูปแบบข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา ระหว่างสายอากาศความถี่ 400 และ 900 เมกะเฮิร์ตซ์

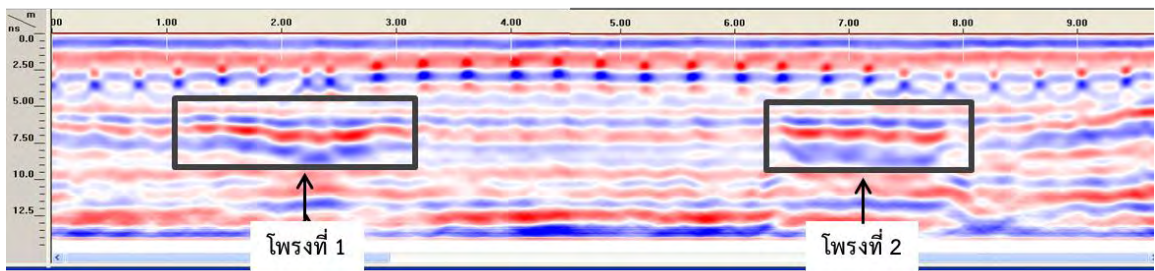


(ก.) สายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิร์ตซ์

แนวการสำรวจที่ 8



แนวการสำรวจที่ 16



(ข.) สายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์

รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบภาพโพรไฟล์ 2 มิติที่แสดงใน
รูปข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา

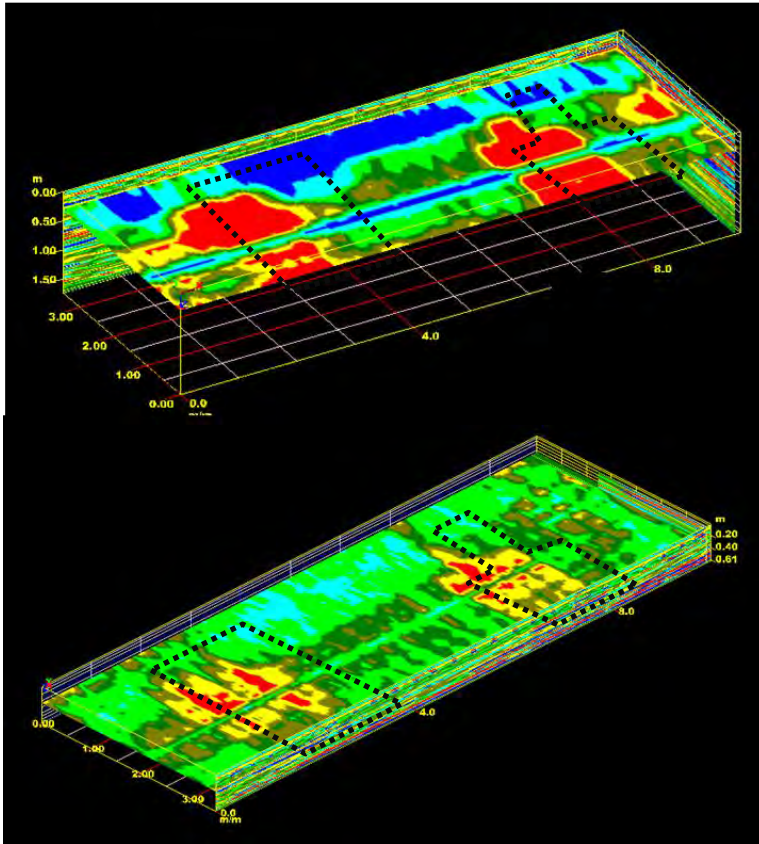
(ก.) สายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรตซ์

(ข.) สายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์

จากรูปที่ 4.4 ภาพโพรไฟล์ทั้งหมดผ่านการขยายสัญญาณ การปรับตำแหน่งข้อมูล และการกำจัดปลายหางของไฮเปอร์โบล่าที่เกิดจากเหล็กเสริม เมื่อเปรียบเทียบระหว่างภาพก่อนการประมวลผล (รูปที่ 4.2) พบว่าภายหลังการขยายสัญญาณจะเห็นตำแหน่งและรูปทรงของแบบจำลองโพรงชัดเจนขึ้น เนื่องจากมีความแตกต่างของสีระหว่างโพรงกับวัสดุรองรับพื้นทางมากขึ้น โดยเฉพาะภาพจากสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์ สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างได้ชัดเจนมาก และหลังจากกำจัดปลายไฮเปอร์โบล่าที่เกิดจากเหล็กเสริมออก ทำให้เห็นขอบเขตของโพรงได้ชัดเจนขึ้น

4.3.1.2 การเปรียบเทียบภาพโพรไฟล์ 2 มิติและแบบจำลอง 3 มิติที่แสดงในรูป
ข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา

ระดับความลึก 0.25 เมตร



400 เมกะเฮิร်ทซ์

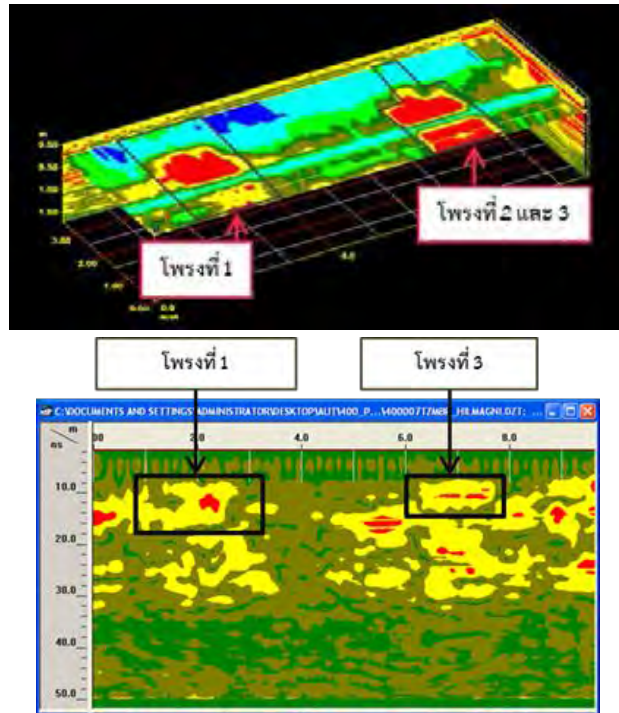
900 เมกะเฮิร်ทซ์

รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบภาพโพรไฟล์ 2 มิติและแบบจำลอง 3 มิติที่แสดงในรูปแบบข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา ระดับความลึก 0.25 เมตรจากผิวดิน

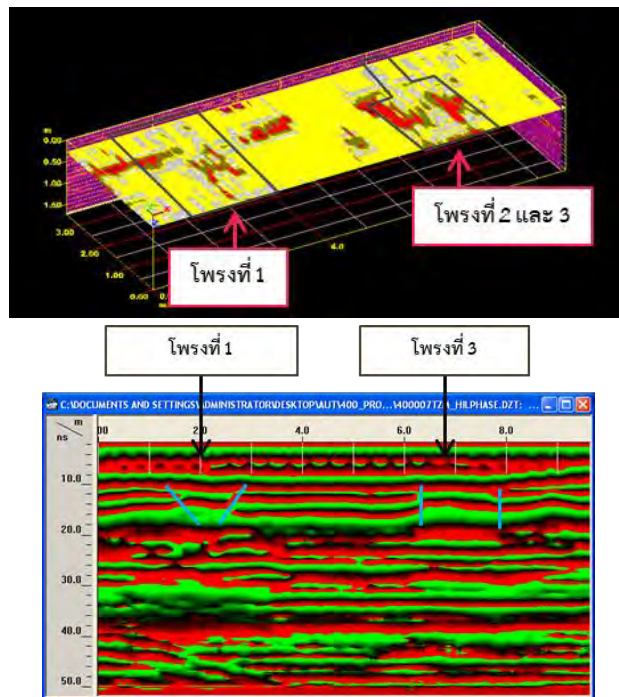
จากรูปที่ 4.5 ระดับความลึก 0.25 เมตรจากพื้นผิวเป็นบริเวณรอยต่อระหว่างโพรงและแผ่นคอนกรีต ภาพจากสายอากาศทั้งสองความถี่เห็นตำแหน่งและรูปทรงของโพรงชัดเจน แต่ภาพจากสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิร်ทซ์จะเห็นรูปทรงของโพรงชัดเจนกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับภาพโพรไฟล์ 2 มิติในรูปแบบข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา ดังรูปที่ 4.4 พบว่าภาพ 2 มิติจะให้มุมมองด้านความลึก สามารถเห็นภาพตัดขวางของโพรงและความลึกของโพรงจากพื้นผิวได้ ในขณะที่แบบจำลอง 3 มิติทำให้เห็นรูปทรงของโพรงเมื่อมองจากมุมมองด้านบน (Top view) ในแต่ละความลึกได้ดี

4.3.2 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่แสดงในรูปการแปลงฮิลเบิร์ต (Hilbert transform)

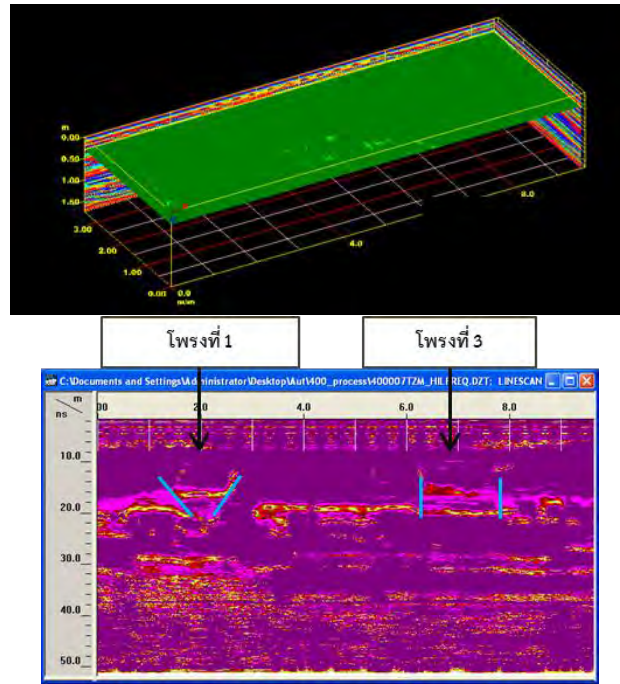
4.3.2.1 การเปรียบเทียบภาพโพรไฟล์ 2 มิติและแบบจำลอง 3 มิติที่แสดงในรูปการแปลงฮิลเบิร์ต



(ก.) แมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous amplitude)



(ข.) เฟสขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous phase)



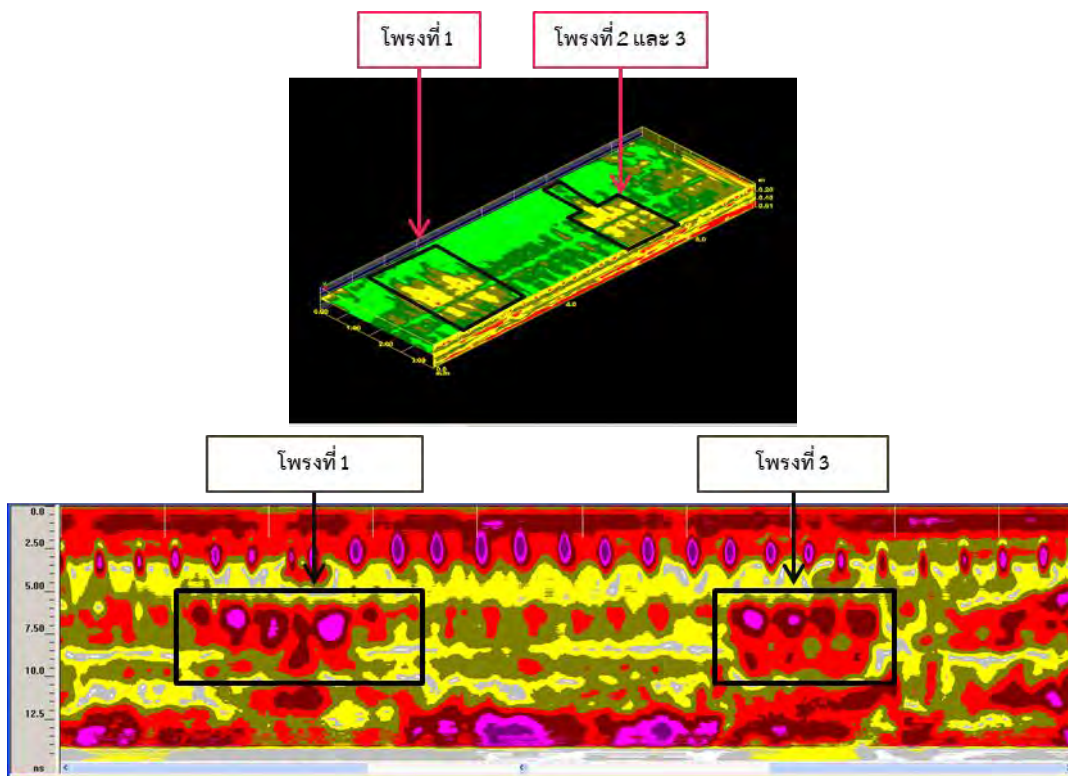
(ค.) ความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous frequency)

รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบภาพโปรไฟล์ 2 มิติ (แนวการสำรวจที่ 7) และแบบจำลอง 3 มิติที่แสดงในรูปการแปลงฮิลเบิร์ต จากสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ระดับความลึก 0.29 เมตรจากพื้นผิว

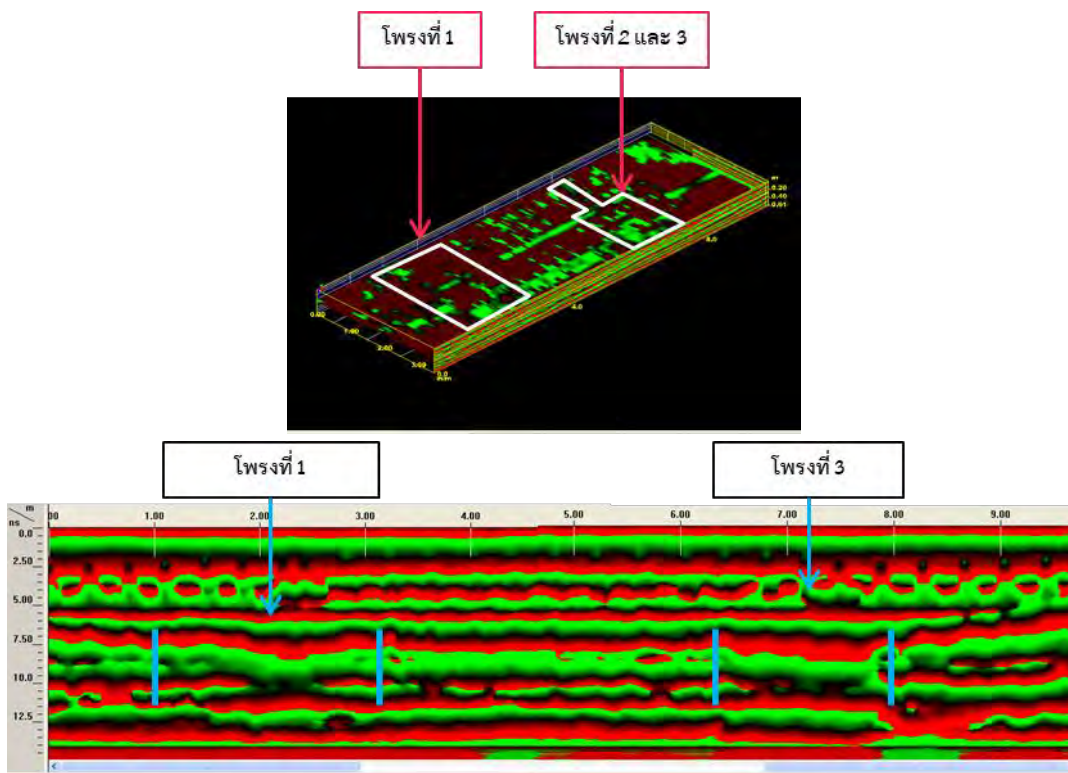
(ก.) แอมพลิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous amplitude)

(ข.) เฟสขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous phase)

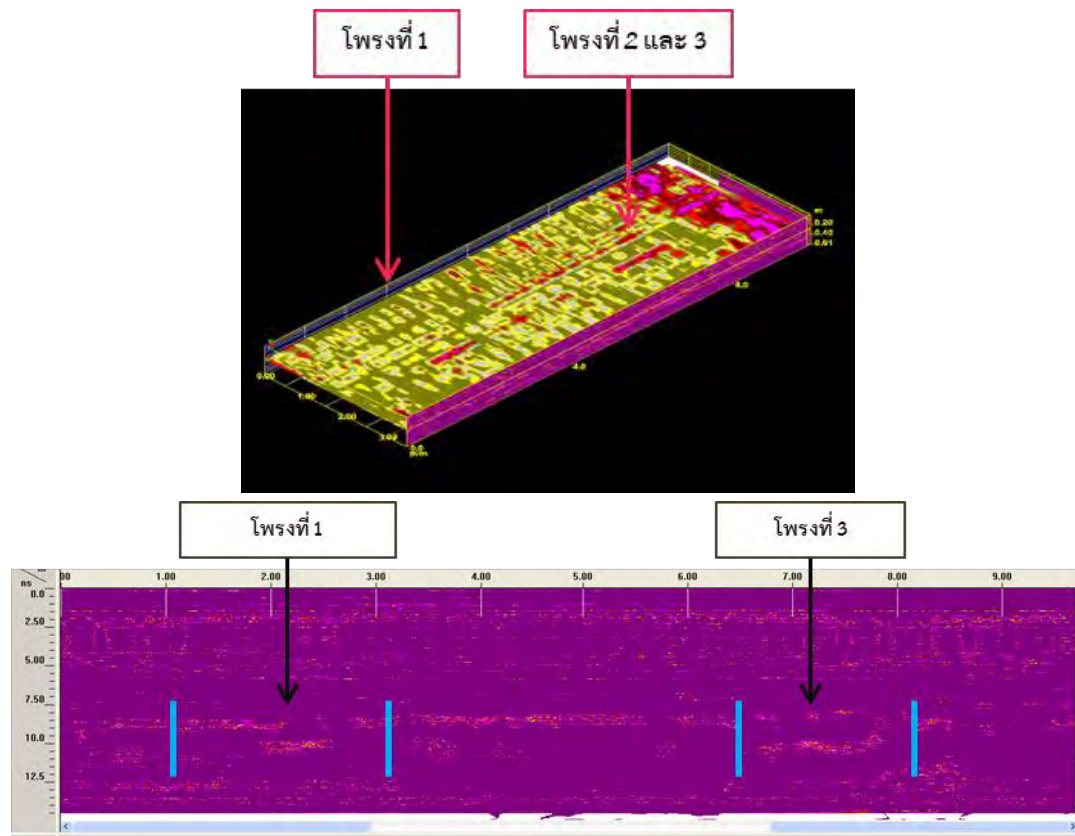
(ค.) ความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous frequency)



(ก.) แมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous amplitude)



(ข.) เฟสขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous phase)



(ค.) ความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous frequency)

รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบภาพโพรไฟล์ 2 มิติ (แนวการสำรวจที่ 16) และแบบจำลอง 3 มิติที่แสดงในรูปการแปลงฮิลเบิร์ต จากสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ระดับความลึก 0.29 เมตรจากพื้นผิว

(ก.) แมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous amplitude)

(ข.) เฟสขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous phase)

(ค.) ความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous frequency)

จากรูปที่ 4.6 และ 4.7 เมื่อเปรียบเทียบทั้งภาพโพรไฟล์ 2 มิติและแบบจำลอง 3 มิติของการแปลงฮิลเบิร์ตรูปแบบอื่นๆ พบว่าข้อมูลแมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่งแสดงตำแหน่งของโพรงชัดเจนที่สุด เนื่องจากความแตกต่างของสีแบบจำลองโพรงกับวัตถุอื่น ๆ มีค่อนข้างมาก จึงสังเกตเห็นโพรงได้ง่าย ซึ่งสีเหล่านี้แสดงถึงพลังงานสะท้อนจากแต่ละวัตถุ ซึ่งวัตถุแต่ละชนิดมีพลังงานสะท้อนแตกต่างกัน ส่งผลให้สีของโพรงแตกต่างจากวัตถุอื่นๆ ด้านรายละเอียดรูปทรงของโพรงจากแบบจำลอง 3 มิติ พบว่ารูปทรงของโพรงชัดเจนเป็นบางส่วน ในขณะที่บางส่วนของโพรงหายไป แต่ภาพโพรไฟล์ 2 มิติ รูปทรงของโพรงค่อนข้างสมบูรณ์ แต่อาจเห็นรายละเอียดของรูปทรงของโพรงไม่ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา (รูปที่ 4.3)

จากข้อมูลเฟสขณะใดขณะหนึ่ง แบบจำลอง 3 มิติมองเห็นโพรงไม่ชัดเจน เห็นขอบโพรงบางส่วนเท่านั้น แต่ภาพโพรไฟล์ 2 มิติแสดงรอยต่อของโพรง ดังรูป 4.6 (ข.) แสดงด้วยเส้นสีฟ้า

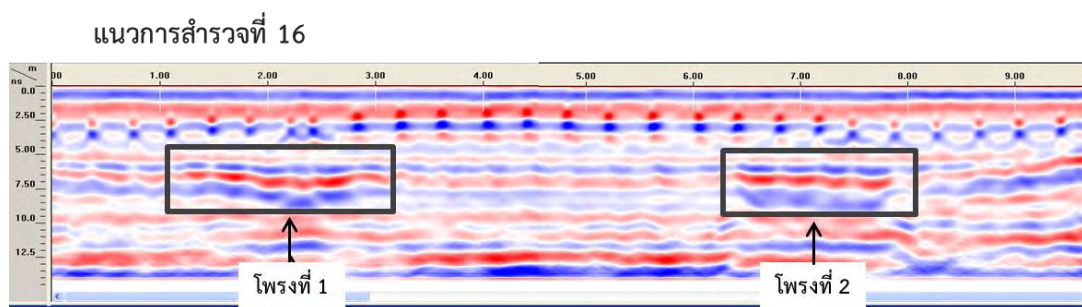
จากข้อมูลความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง แบบจำลอง 3 มิติไม่พบลักษณะของโพรง แต่ภาพโพรไฟล์ 2 มิติแสดงรอยต่อของโพรงเช่นเดียวกับข้อมูลเฟสขณะใดขณะหนึ่ง แต่สังเกตเห็นได้ยากกว่า ดังรูป 4.6 (ค.) แสดงด้วยเส้นสีฟ้า

จากข้อมูลเฟสขณะใดขณะหนึ่งและข้อมูลความถี่ขณะใดขณะหนึ่งที่มองเห็นโพรงไม่ชัดเจนหรือไม่พบลักษณะของโพรง อาจเนื่องมาจากข้อมูลทั้งสองชนิดมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุ ทำให้ผลลัพธ์เปลี่ยนแปลงไปได้ง่าย ส่งผลให้ภาพผลลัพธ์บางส่วนมีความคลาดเคลื่อนได้

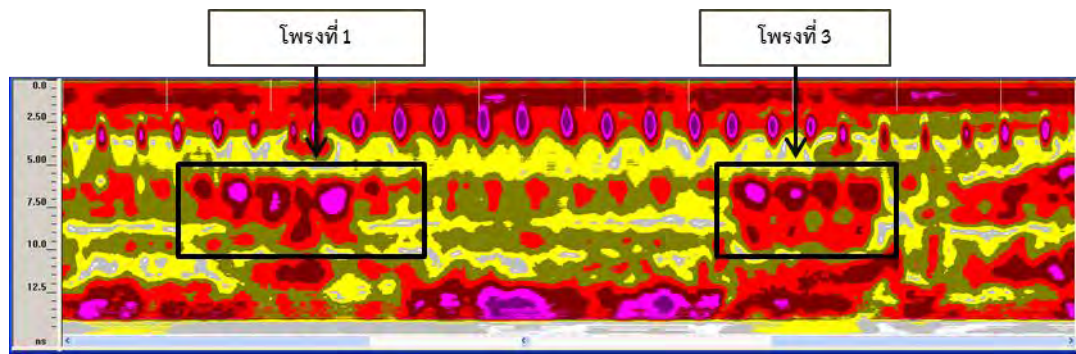
4.3.3 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่แสดงในรูปข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลาและการแปลงฮิลเบิร์ต

4.3.3.1 การเปรียบเทียบระหว่างภาพโพรไฟล์ 2 มิติ

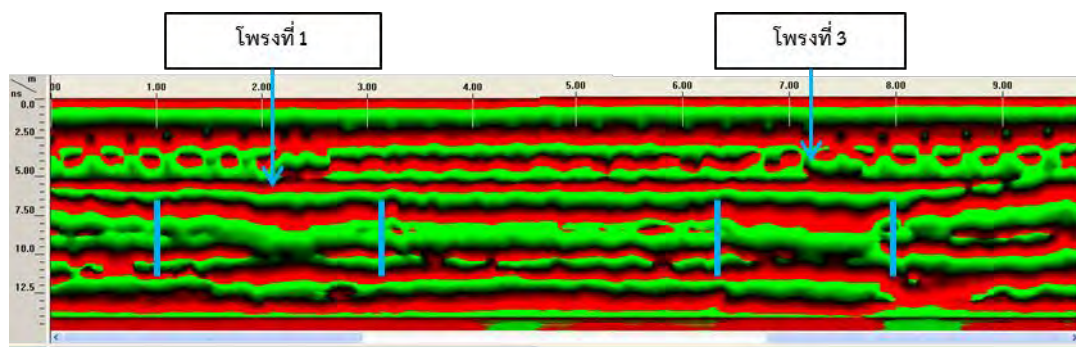
ในที่นี้จะเปรียบเทียบภาพโพรไฟล์ 2 มิติจากสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์ ระหว่างข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลาและการแปลงฮิลเบิร์ต เนื่องจากภาพโพรไฟล์ 2 มิติจากสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์ มีความถี่สูงกว่า จึงเห็นขอบเขตและรายละเอียดรูปร่างของโพรงมากกว่าภาพโพรไฟล์ 2 มิติของสายอากาศความถี่ 400 เมกะเฮิรตซ์



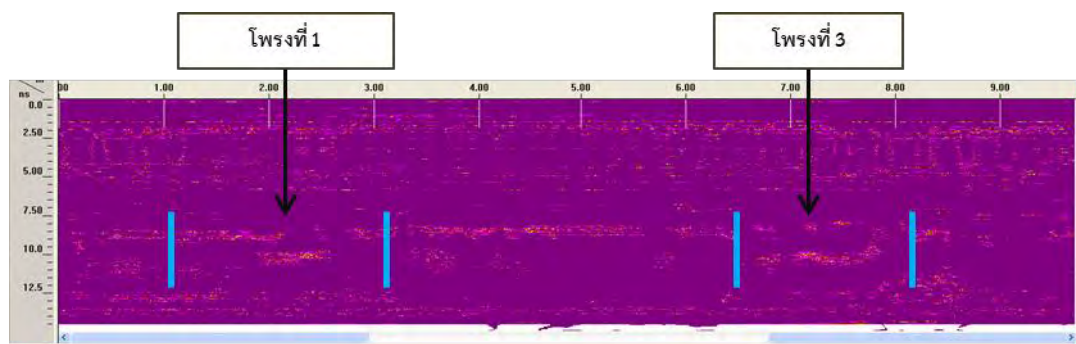
(ก.) ข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา



(ข.) แมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (การแปลงฮิลเบิร์ต)



(ค.) เฟสขณะใดขณะหนึ่ง (การแปลงฮิลเบิร์ต)



(ง.) ความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง (การแปลงฮิลเบิร์ต)

รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบภาพโพรไฟล์ 2 มิติที่แสดงในรูปข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลาและการแปลงฮิลเบิร์ต จากแนวการสำรวจที่ 16 สายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์

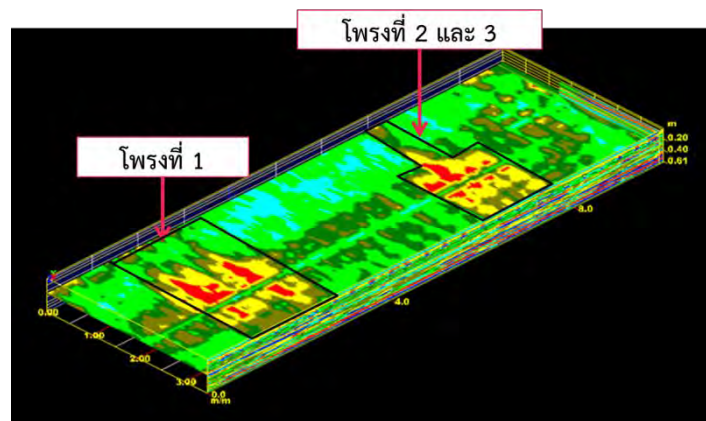
- (ก.) ข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา
- (ข.) ข้อมูลแมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (การแปลงฮิลเบิร์ต)
- (ค.) ข้อมูลเฟสขณะใดขณะหนึ่ง (การแปลงฮิลเบิร์ต)
- (ง.) ข้อมูลความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง (การแปลงฮิลเบิร์ต)

จากรูปที่ 4.6 เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลากับข้อมูลแมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง พบว่าภาพของข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลาเห็นรายละเอียดของรูปทรงโพรงใกล้เคียงกับลักษณะของโพรงจริงมากที่สุด (เปรียบเทียบจากรูปที่ 4.2) แต่ข้อมูลแมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่งสามารถสังเกตเห็นโพรงได้ง่ายกว่า

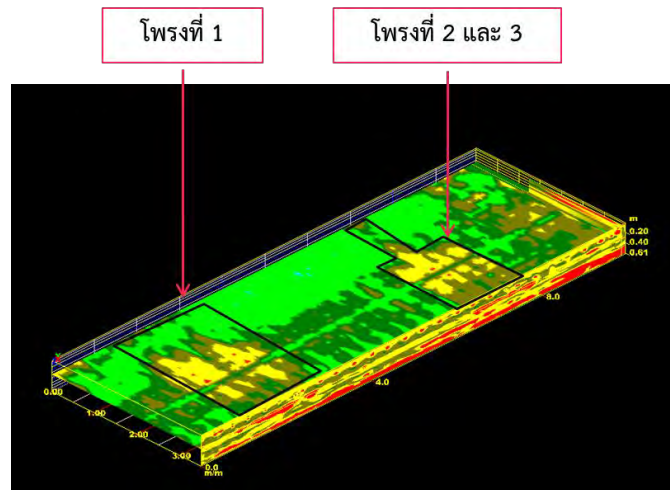
เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลากับข้อมูลเฟสขณะใดขณะหนึ่งและข้อมูลความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง พบว่าข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลาเห็นรายละเอียดของโพรงและสังเกตเห็นโพรงได้ง่ายกว่า เพราะข้อมูลเฟสขณะใดขณะหนึ่งและข้อมูลความถี่ขณะใดขณะหนึ่งจะแสดงเพียงรอยต่อของโพรงเท่านั้น

4.3.3.2 การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง 3 มิติ

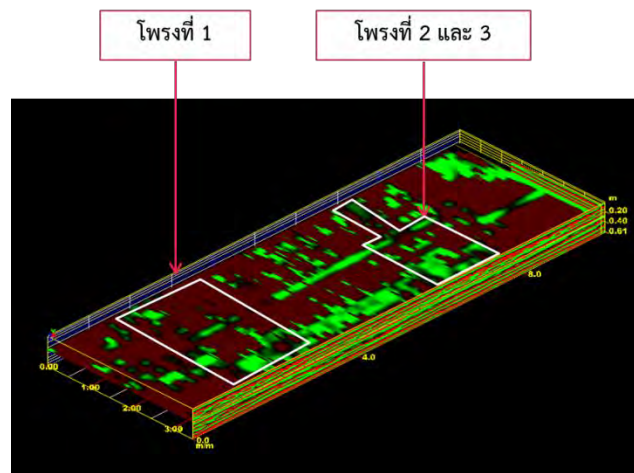
เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง 3 มิติจากสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรต์ระหว่างข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลาและการแปลงฮิลเบิร์ต



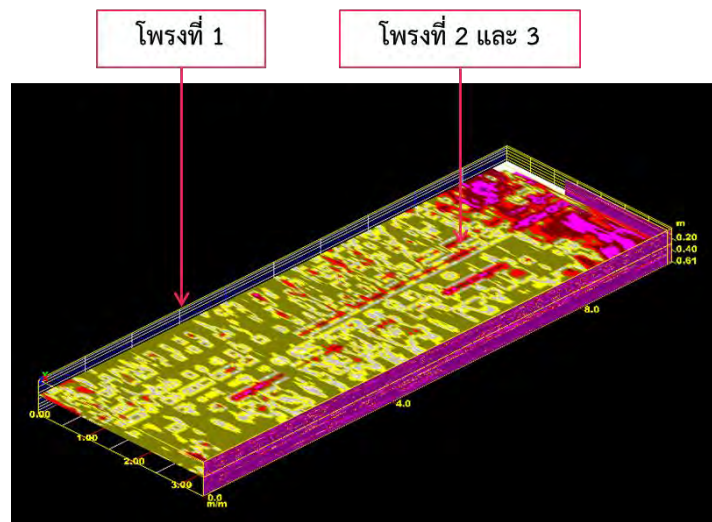
(ก.) ข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา



(ข.) แมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (การแปลงฮิลเบิร์ต)



(ค.) เฟสขณะใดขณะหนึ่ง (การแปลงฮิลเบิร์ต)



(ง.) ความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง (การแปลงฮิลเบิร์ต)

รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบแบบจำลอง 3 มิติที่แสดงในรูปข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลาและการแปลงฮิลเบิร์ต ที่ระดับความลึก 0.29 เมตรจากพื้นผิว จากแนวการสำรวจที่ 16 สายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์

- (ก.) ข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา
- (ข.) ข้อมูลแมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (การแปลงฮิลเบิร์ต)
- (ค.) ข้อมูลเฟสขณะใดขณะหนึ่ง (การแปลงฮิลเบิร์ต)
- (ง.) ข้อมูลความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง (การแปลงฮิลเบิร์ต)

จากรูปที่ 4.7 เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลากับข้อมูลแมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง ข้อแตกต่างคือ แบบจำลองจากข้อมูลแมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง บริเวณโพรงจะมีสีแตกต่างจากบริเวณอื่นๆ แต่ภายในบริเวณที่เป็นโพรงเหมือนกันจะมีสีใกล้เคียงกัน เพราะโพรงทำมาจากวัสดุเดียวกัน จึงมีพลังงานสะท้อนเท่ากัน เช่นเดียวกันกับในบริเวณอื่นๆที่ไม่ใช่โพรงจะมีสีใกล้เคียงกัน แต่สีจะแตกต่างจากสีของบริเวณโพรง จึงง่ายที่จะแยกบริเวณที่มีโพรงและไม่มีโพรงออกจากกันได้มากกว่า

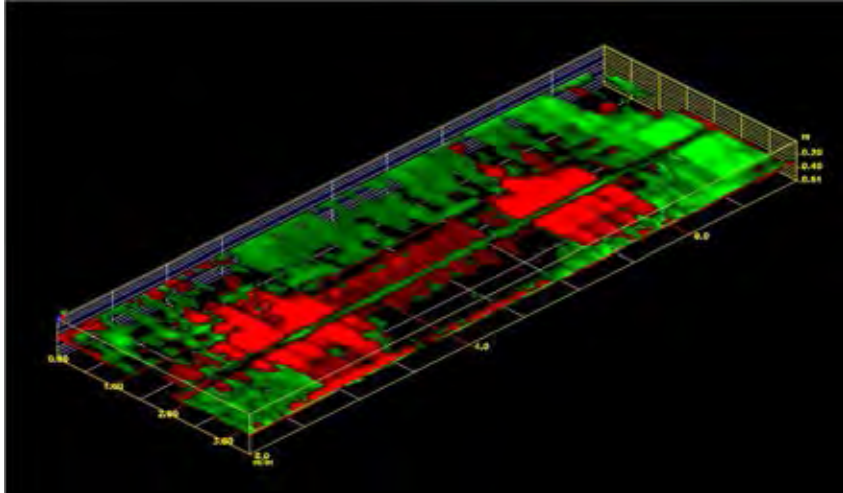
เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลากับข้อมูลเฟสขณะใดขณะหนึ่งและข้อมูลความถี่ขณะใดขณะหนึ่ง พบว่าแบบจำลอง 3 มิติของข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลาเห็นรายละเอียดของโพรงและสังเกตเห็นโพรงได้ง่ายกว่า เพราะข้อมูลเฟสขณะใดขณะหนึ่งสังเกตขอบเขตของโพรงยากและข้อมูลความถี่ขณะใดขณะหนึ่งไม่เห็นลักษณะของโพรงเลย

4.4 การแปลผลแบบจำลอง 3 มิติอื่นๆ

เป็นการแสดงผลของแบบจำลอง 3 มิติในรูปแบบต่างๆ ช่วยในการจำแนกโพรงได้ดียิ่งขึ้น

4.4.1 การแปลผลแบบภาพ 3 มิติโปร่งแสง (3D Transparency)

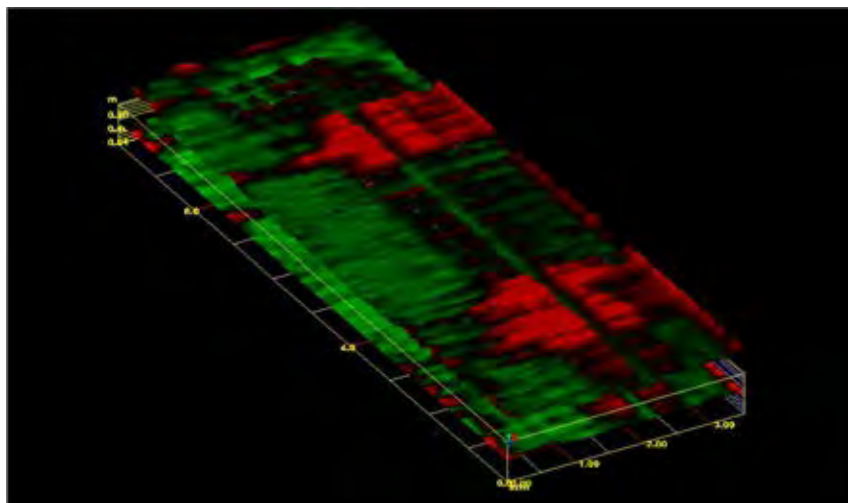
แสดงเฉพาะบริเวณโพรงซึ่งเป็นบริเวณที่มีค่าแอมพลิจูดสูง และวัสดุอื่นๆที่มีค่าแอมพลิจูดเป็นกลางจะเปลี่ยนเป็นโปร่งแสง แปลผลมาจากข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา ทำให้เห็นลักษณะของโพรงได้ชัดเจนยิ่งขึ้น แต่เนื่องจากบางส่วนของโพรงหายไปจึงทำให้รูปร่างโพรงไม่ต่อเนื่อง



รูปที่ 4.10 แบบจำลอง 3 มิติที่แปลผลแบบภาพ 3 มิติโปร่งแสง (3D Transparency) จากสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์

4.4.2 การแสดงเส้นชั้นความสูง (Contour)

เป็นการสร้างเส้นชั้นความสูงขึ้นมาจากค่าแอมพลิจูด บริเวณโพรงซึ่งมีค่าแอมพลิจูดสูงจึงปรากฏเป็นบริเวณนูนดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.11 แบบจำลอง 3 มิติแสดงเส้นชั้นความสูง (Contour) ที่ระดับความลึก 0.32 เมตรจากพื้นผิวจากสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์

บทที่ 5

สรุปผล

การสำรวจแบบจำลองโพรงใต้ผิวทางคอนกรีตด้วยวิธีสำรวจหยั่งลึกด้วยสัญญาณเรดาร์แบบสามมิติ โดยใช้สายอากาศความถี่ 400 และ 900 เมกะเฮิรตซ์ในการสำรวจ พบว่าสายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์สามารถตรวจสอบได้ละเอียด ผลลัพธ์ที่ได้เห็นตำแหน่งและรูปร่างของโพรงได้ชัดเจน แม้ว่าระดับความลึกของการสำรวจจะตื้น แต่โครงสร้างของถนนคอนกรีตมีความลึกจากพื้นผิวน้อย การใช้สายอากาศความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์จึงเหมาะสมสำหรับการสำรวจถนนคอนกรีตมากกว่า

ขั้นตอนประมวลผลเป็นขั้นตอนสำคัญที่ส่งผลต่อการค้นหาโพรงใต้ผิวทางคอนกรีต เพราะเป็นการปรับปรุงคุณภาพภาพโพรไฟล์ 2 มิติและแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อให้ง่ายต่อการระบุตำแหน่งและรูปร่างของโพรง มากขึ้น เปรียบเทียบระหว่างภาพโพรไฟล์ 2 มิติและแบบจำลอง 3 มิติ พบว่า ภาพ 2 มิติจะให้มุมมองความลึก จึงเหมาะสำหรับการดูรูปร่างหน้าตัดขวางของโพรงและความลึกของโพรงจากพื้นผิว ในขณะที่ภาพ 3 มิติเหมาะสำหรับการดูรูปร่างโพรงเมื่อมองจากมุมมองด้านบน เมื่อนำข้อมูลทั้งสองแบบมาแปลผลร่วมกันส่งผลให้สามารถประเมินขนาดและรูปร่างของโพรงได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลแมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous magnitude) ข้อมูลเฟสขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous phase) และข้อมูลความถี่ขณะใดขณะหนึ่งของการแปลงฮิลเบิร์ต พบว่าการแสดงข้อมูลในรูปแมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่งแสดงตำแหน่งของโพรงชัดเจนที่สุด หากเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลแมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่งและข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา พบว่าข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลาเห็นรายละเอียดของรูปร่างโพรงใกล้เคียงกับลักษณะของโพรงจริงมากที่สุด แต่ข้อมูลแมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่งสามารถสังเกตเห็นตำแหน่งของโพรงได้ง่ายกว่า ดังนั้นหากต้องการหาตำแหน่งของโพรงควรใช้ข้อมูลแมกนิจูดขณะใดขณะหนึ่ง แต่ถ้าต้องการประเมินรูปร่างและขนาดของโพรงควรใช้ข้อมูลแอมพลิจูดจากการสะท้อนกลับเทียบกับเวลา

บรรณานุกรม

- ทางหลวง, กรม. สำนักวิจัยและพัฒนาทาง. คู่มือการสำรวจหาโพรงใต้ถนนคอนกรีต., 2552.
- Geophysical Survey System, Inc. RADAN Version 6.6. the United states:
Geophysical Survey System, Inc.
- Giao, P. H., Vichalai, C.,and Maneechot W. โครงการจัดทำแบบจำลองแผ่นพื้นถนนคอนกรีต และสำรวจด้วยเครื่อง Ground Penetration Radar (GPR) พร้อมแปลผลข้อมูล. ปทุมธานี :
โปรแกรมวิชาการสำรวจระบบธรณีวิทยาและวิศวกรรมธรณีปิโตรเลียม สถาบันเทคโนโลยี
แห่งเอเชีย, 2550.
- Martinez A., and Byrnes A.P., Modeling Dielectric-constant values of Geologic Materials: An Aid to Ground-Penetrating Radar Data Collection and Interpretation. (2001)
- Daniel, D.J., Ground Penetrating Radar 2nd Edition., London, United Kingdom:
The Institution of Electrical Engineers, 2004.
- Schön, Jürgen H. Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics. Vol. 65. Elsevier, 2015.
- Zhao, W., Forte, E., Pipan, M.,and Tian G. Ground Penetrating Radar (GPR) attribute analysis for archaeological prospection 97 (2013) : 107-117

