

連続波地中レーダ法の開発とその法面調査への適用性

Development of the Continuous Wave Ground Penetrating Radar
and It's Application to Road Slopes Investigations

山本剛 Tsuyoshi YAMAMOTO (国土交通省近畿地方整備局)
 山田茂治 Shigeji YAMADA (川崎地質株)
 鈴木敬一 Keiichi SUZUKI (川崎地質株)
 楠見晴重 Harusige KUSUMI (関西大学)
 松岡俊文 Toshifumi MATSUOKA (京都大学大学院)

地中レーダ法は、分解能力や作業効率が良い物理探査技術として評価されており、路面下の空洞探査などで実績を上げてきた。老朽化が進む道路法面の内部構造調査手法としても期待されており、構造物自体の老朽化や背面地山の劣化調査における適用性の検討が急がれている。しかし探査できる深度が2~3mと浅いため、現状のままでは内部構造に対する適用性は低い。本研究では、これまでより探査深度が大きい新しい地中レーダ法である連続波地中レーダ法を取り上げ、実際の老朽化法面で探査を行い、ボーリング調査など他の調査結果と比較してその適用性について検討した。

キーワード: 物理探査, 現地調査, 道路, 法面, 地質学, 地下水位

(IGC : C-2, C-9)

1. はじめに

地中レーダによる探査は、非常に分解能力が優れた物理探査であるため、空洞や埋設物等の細かい物標の調査を得意としてきた。しかし送信信号の周波数を高めることによって分解能力を取得しているため、高い分解能力を持つ反面、探査できる深度が2~3m程度と浅いことが弱点である。この問題から地層構造等の内部構造調査では十分に活用されてきたとは言い難く、古くから探査深度の増大が望まれてきた技術である。

地中レーダの探査深度不足を克服するため、レーダ波を連続的に発生させることによって探査深度を増大させることを試みた。それと同時に受信したレーダ波の読み取り精度向上に関しても検討した。これらの結果を用いて、高精度の地質情報が必要な道路法面調査への適用性に関して、実際の道路法面調査に適用し、その調査結果をボーリングや地下水観測による実証試験結果に基づいて検証することによって道路法面の内部構造調査に対する連続波地中レーダ法の有効性について検討した。

2. 連続波地中レーダ法について

2.1 地中レーダ法(従来法)の概要と弱点

地中レーダ法は、図-1に示したように、地表面から地中に向かって電磁波を放射し、電気特性の異なる境界で発生した反射波を捕らえることにより、地下構造を探査する方法である²⁾³⁾⁴⁾。電気特性の異なる境界とは、具体的には空洞・埋設管・埋設物・地層境界・亀裂や破碎帯などである。地中レーダは、物理探査の中でも最も分解能の高い調査手法のひとつである。

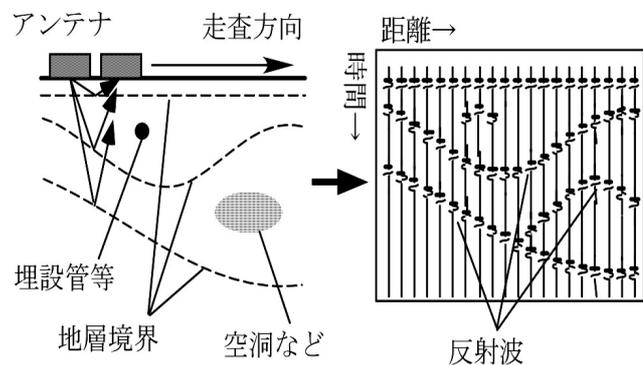


図-1 地中レーダ探査の計測原理

地中レーダで使用される電磁波は、数十MHzから数GHzであり、使用する周波数に応じてアンテナを使い分ける。送信周波数成分の中央の周波数を中心周波数といい、中心周波数が高いほど分解能が高く、探査深度は浅い。中心周波数が低くなるにつれ、探査深度が向上するが、分解能は低下する。

一般に地中レーダは、パルス波地中レーダといわれる方式のことを言う。パルス波地中レーダは、図-2に示したように送信信号にインパルスを用いる。分解能は最大20cm程度、探査深度は2~3m程度である。パルス波地中レーダは、作業性が非常に良く、高密度のデータを取得することができる反面、可探深度が少ないことが弱点である。

このことを解消するためには、パルスの送信出力(尖頭電圧)を上げることや、あるいは低周波パルスを用いることが考えられるが、いずれも高周波数成分の減衰や低下を招き、特徴である高分解能力を失ってしまう。したがって、電磁波パルスを送信する方式では高分解能力を維持したまま探査深度を増大させることは両立しない。

この論文は、鈴木啓一 他「ステップ式連続波レーダ探査装置を用いた地中レーダ探査」地質ニュース 537号 pp44-52 1999. および Suzuki, K., Nishiyama, E., Masumoto, K. and Toida, M., 2004, On the ground penetrating radar based on sinusoidal approach, Proc. MAM04, S3-P06. に新しい実験データを追加検証して再構成したものである。

2.2 連続波地中レーダ法について

パルス波地中レーダの探査深度を向上させるため、送信方式を変更した新しい地中レーダ法が連続波地中レーダ法である。

時間的に連続した電磁波を送信するのが連続波レーダであり、送信波形には大きく分けて2種類がある。一つは正弦波の周波数を徐々に変化させる方法、もう一つは疑似ランダム信号（M系列信号など）を用いる方法がある。どちらの方法も受信波形をパルス圧縮することによりパルスに変換し、波形を従来の地中レーダと同様に扱うことができる。

ここでは正弦波を使用するタイプの連続波レーダ手法を取り上げた。この方法は、送信時間を長くして地下に送り込む電磁波のエネルギーを増やして波の減衰に対応している。さらに周波数の変化間隔や変化幅も任意に制御できるため、高周波数成分を失うことなく探査深度を増大できる。受信についても周波数の異なる正弦波を連続的に受信し、受信した連続波形をパルス圧縮することによってパルス波形に変換する。この方式を取り上げた理由は、正弦波を用いることから一度に取り扱う周波数の帯域が非常に狭いため、増幅器をはじめとする機器の製作が比較的容易である点である。

正弦波を使用する連続波地中レーダは、図-3に示したように、インパルスを送信して時間をかけて地下に電磁波を放射する。同じ周波数の正弦波を一定時間送り続けた後、図-4に示したようにステップ的に周波数を変化させ、送信を繰り返す。またこの方法は受信後の波形をパルス圧縮（時間領域における相関処理）しており、通常的地中パルスレーダ装置等と同様の波形解析が可能となる。

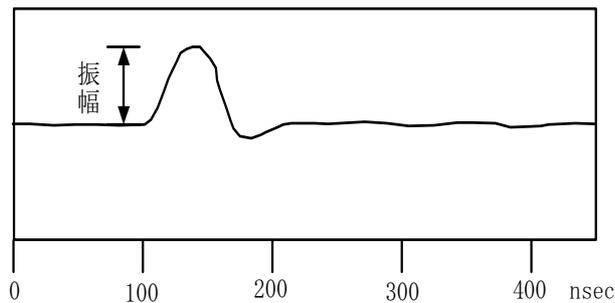


図-2 インパルス送信波形

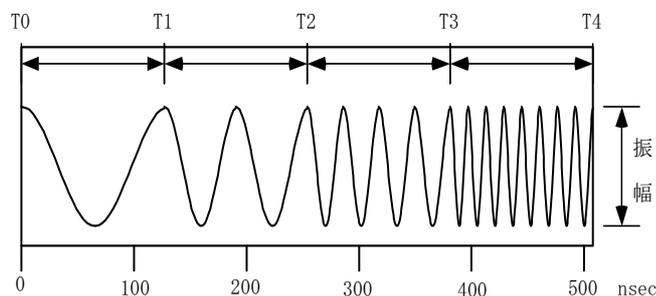


図-3 連続波送信波形

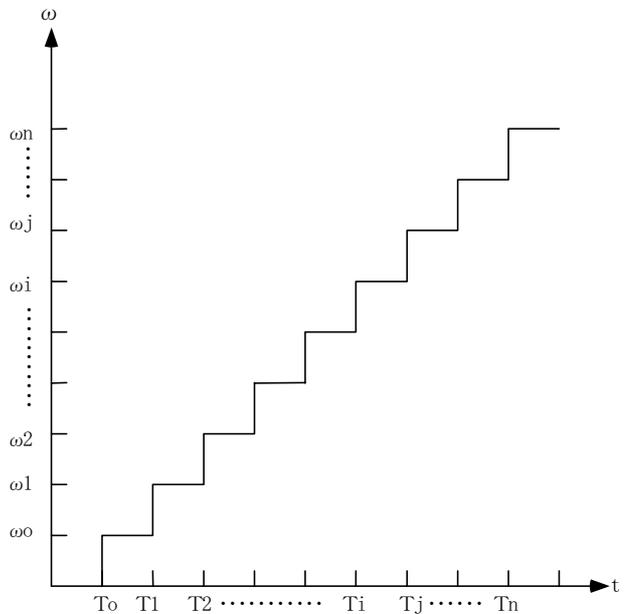


図-4 ステップ式周波数掃引方法

道路法面に対して連続波地中レーダ法を適用することに当たり、探査装置の開発⁹⁾および性能試験⁹⁾を行っているため、その特徴や能力について以下に述べる。

開発した連続波地中レーダ装置の構成は、図-5に示したように送信アンテナ、受信アンテナ、ケーブル、地上制御器、インターフェイス、表示・収録器からなる。各仕様は表-1に示した通りである。

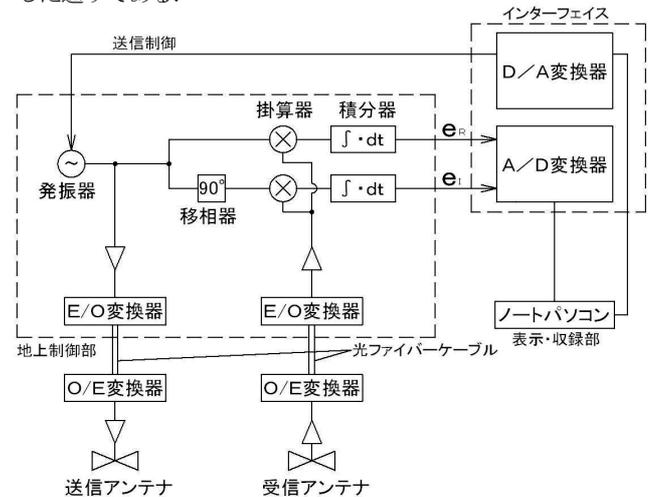


図-5 連続波地中レーダの装置構成

送受信アンテナと地上制御部との信号伝送には、従来の地中レーダ装置が電気信号を送信する方式に対して、送受信アンテナ間の誘導ノイズ及び外来ノイズを低減するために光伝送方式を行った。計測の制御・表示・収録は、専用ソフトを開発してノートパソコンを用いて実施する方式とし、図-3 および図-4で説明した正弦波の送信開始周波数、送信終了周波数、ステップ数などをパソコン上で任意にコントロールできるようにした。

受信後の波形に対してパルス圧縮（時間領域における相関処理）を行う方式は、送信信号を地上制御器内で、送信信号そのもの（位相 0° ）と、移相器で 90° 位相をずらした信号（位相 90° ）とに分離し、受信信号とをミキサーにより混合すること

によりパルス圧縮を行う。位相 0° 及び位相 90° のパルス圧縮データ、それぞれが受信信号とのパルス圧縮データ（周波数領域）となる。

表-1 連続波地中レーダ装置仕様

項目	仕様		
送信器	送信周波数	5～160MHz（大型） 50～500MHz（小型）	
	送信波形	ステップ可変周波数正弦波	
	電力増幅方式	C級プッシュプル	
受信器	受信周波数	5～160MHz（大型） 50～500MHz（小型）	
	雑音指数	1.2dB	
	受信方式	スーパーヘテロダイン検波方式	
	入出力インピーダンス	50Ω	
アンテナ部	方式	ダイポールアンテナ（ボウタイ型）	
	寸法	2000×800mm（大型） 400×500mm（小型）	
	ケーブル	種類	光ファイバー（50/125、G1）
従来法との比較	送信方式	連続波	パルス波
	探査深度	8～10m	2～3m
収録器	ノート型パソコン		
電源	DC12V（最大20Ah）、またはAC100V		

アンテナは、回路内で生成した電磁波を地中に伝える役割を担う。これには送信用と受信用があり、両者の構造はほぼ同じである。アンテナエレメント（電磁波を放射、あるいは検出する部分）は、地中レーダ法によく用いられるボウタイアンテナである。ただしアンテナは、回路内で生成した電磁波を空中や地中に放射する際、アンテナの大きさによって生成時の電磁波の周波数特性を変化させてしまう場合がある。このため、アンテナの大きさについては、大型タイプと小型タイプの二タイプを設計した。

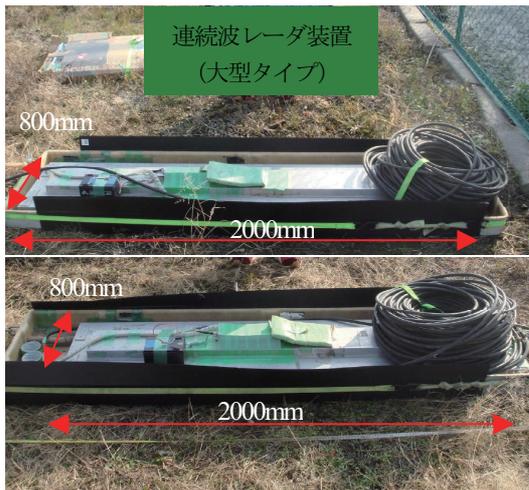


写真-1 連続波地中レーダ装置の大型タイプ



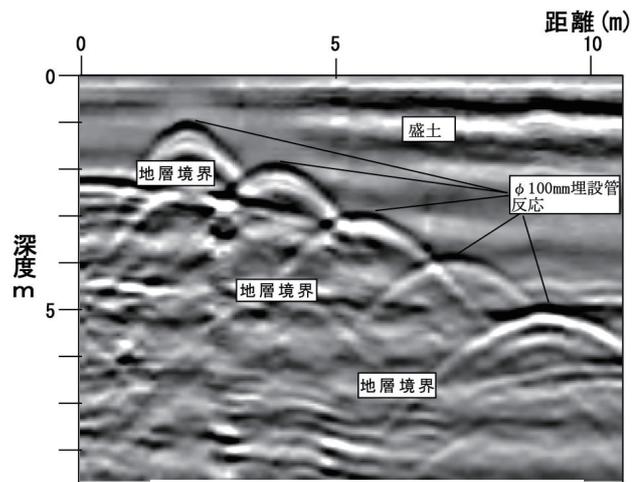
写真-2 連続波地中レーダ装置の小型軽量タイプ⁵⁾

写真-1 に示した大型タイプは、探査できる深度に重点を置き、アンテナ規模を大きくして低周波数の信号を取り扱うことに優れた設計とした。主に平坦地あるいは緩斜面の調査が適用範囲となる。小型タイプは写真-2 に示した。機動性や安全性を重視して大型タイプをベースに小型軽量化を行っている⁵⁾。アンテナ規模が小型となることから低周波数側の帯域が狭くなるため、探査できる深度が大型タイプに比べて減少するが、吹き付け法面等の急峻斜面への対応力が格段に向上する。

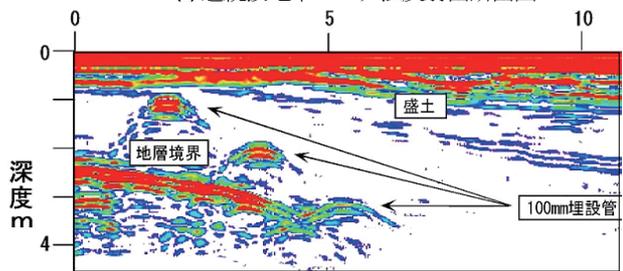
図-6 は、連続波地中レーダ法の能力検証を行った実験事例である。また比較のため、同じ場所で行った従来法である地中レーダ探査の結果も示した。

能力検証は、1m 深度間隔で地下 5m まで埋設した φ100mm の鉄管の検出状況を確認する方法で実施した。地質は、表層 1～2m 程度が盛土であり、その以深は関東ロームとなる。連続波地中レーダや地中レーダ法は、埋設管や空洞等のように球体形状を呈した地下物標の場合、図-7 に示したように双曲線構造の反射反応が得られる。図-6 の連続波地中レーダ法の反射面断面は、このような双曲線構造が全ての埋設管位置において得られているため、問題なく検出できることが検証された。この実験事例により、地下 3m までの探査が限界であった地中レーダ法以上の探査深度が確認されたと共に、100mm 程度の物標が検出できる高分解能力についても確認された。

以上のように連続波地中レーダ法の能力が検証された。ただし従来法の地中レーダ法には、探査装置が数 kg と非常に軽量であることや、パルス波計測であることから計測速度が速いこと等、作業性の面で大きな利点がある。このため、地中レーダ法が探査できる地下 3m 程度を使用境界とし、以深の調査が必要な場合に連続波地中レーダ法を適用することが望ましい。



(a) 連続波地中レーダ法反射面断面図



(b) 地中レーダ法反射面断面図

図-6 連続波地中レーダ法の能力検証例⁶⁾

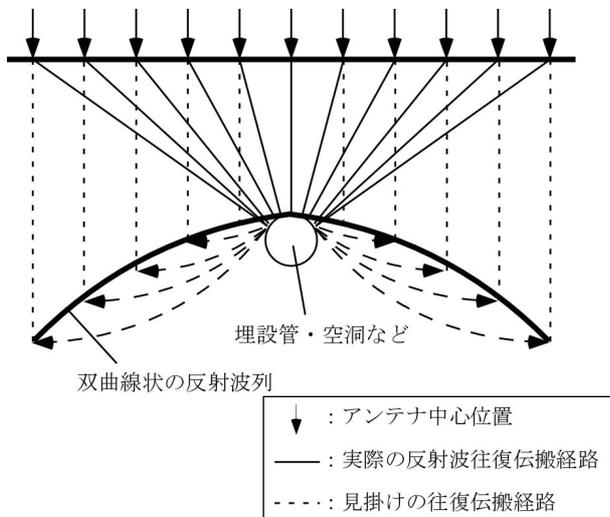


図-7 反射法探査における球体構造の検出パターン

3. 道路法面における連続波地中レーダ法の実験

3.1 実験場所

実証実験の場所は、和歌山県西牟婁郡白浜町（地点1）と、同県日高郡みなべ町（地点2）の二地点であり、いずれも国道42号の道路法面である。

地点1は、コンクリート吹き付けの切土法面である。地質構成は、新第三紀砂岩泥岩互層から成り立っている。築年から約45年が経過して老朽化が目立っており、吹き付けコンクリートには浮きや亀裂が多数見られている。

地点2は、鉄筋コンクリート張施工の盛土法面である。盛土厚は2m～3mであり、礫混じりの砂質粘土である。基盤は、新第三紀層礫岩であり、これも築年から約45年が経過し、昭和45年には降雨時に崩壊・補修された経歴を持つ。

表-2 実験地概要

	地点1	地点2
種別	切土	盛土
築経過年	約45年	約45年
法高	17m	12m
法勾配	1:0.5～1:0.7	1:1.5
構成地質	新第三紀砂岩泥岩互層	新第三紀層礫岩（基盤）
地質構造	受け盤	—
法面工	コンクリート吹付	コンクリート張
備考		昭和47年降雨時に崩壊、同年修復。

3.2 データ取得

連続波地中レーダ装置には、探査深度が大きい大型アンテナと探査深度は小さいが作業性の良い小型アンテナがある。

アンテナ重量は前者が50kg、後者が15kgであり、送信と受信とあわせて2台である。大型アンテナの長所は可探深度が10m以上と大きいことであり、短所はアンテナが大きく重いことである。小型アンテナは可探深度が10m以下に劣化するが、アンテナが小型軽量であるため急峻な地形でも計測作業が行えるこ

とが長所である。

写真-3に示した地点1は、急峻かつ足場の悪い吹き付け法面であるため、作業性が良い小型アンテナを利用した。計測は法面を横断する計測を実施した。

写真-4に示した地点2は、足場の良い張りコンクリートであるが鉄筋が配筋されている。地表面の鉄筋コンクリートは、地中に入射する電磁波を大きく減衰させるため、その対応として可探深度が大きい大型アンテナを使用した。



写真-3 地点1（吹き付け切土）計測状況



写真-4 地点2（コンクリート張盛土）計測状況

3.3 解析

解析は、測線分の波形列であるデータセットを作成し、これに対してデータ処理を実施し、処理後の波形列を用いて反射面断面図を作成した。

具体的な解析の流れは図-8に示した通りであり、50cm間隔で計測した波形データをまとめてデータセットを作成し、これら波形列に対して各種データ処理を実施した。地中レーダは反射法探査の一種であるため、そのデータ処理の体系は、先達の反射法地震探査と同様となり、デコンボリューションとマイグレーションが中心になる⁷⁾。

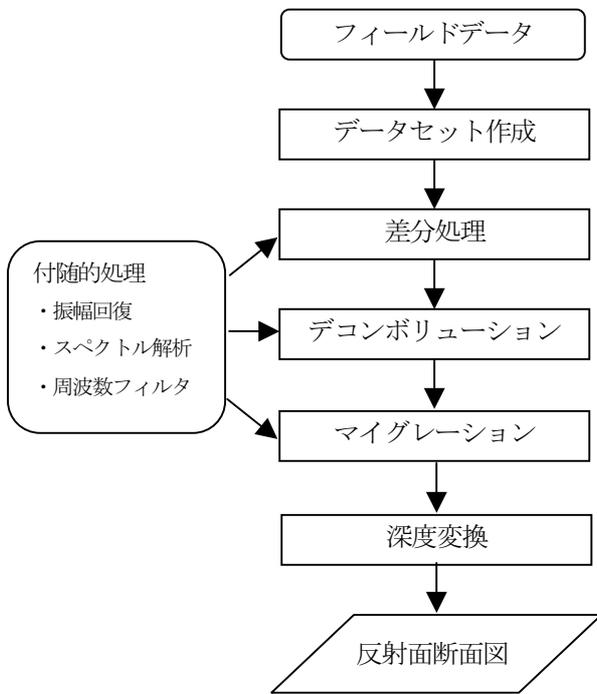


図-8 連続波地中レーダ法の解析手順⁷⁾

デコンボリューションは地層特性等で変形した波形記録を補正して分解能力を向上させる処理であり、マイグレーションは記録断面上の回折波を除去して傾斜した反射波の列を地下の真の位置に戻す処理である。

また法面調査では、地表の凹凸や保護工の影響から地表や表層でエネルギーの大きい波が卓越し、その影響が地下深部の波形にまで残存するため、この対応として差分処理を実施した。

差分処理は、データセットから平均波形を作成し、各測点の波形から差分する方法である。平均波形は、測線全体で同じ深度に表れる波形が強調されるため、平均波形を差分することによって地表と同じ傾斜を持つ波形の並びを除去できる。地表と同傾斜の地質境界面からの信号も除外されるが、このような地質境界面が少ない急峻な道路法面では有効なデータ処理技術であった。

以上の主要なデータ処理の効果を向上させるため、必要に応じて付随的なデータ処理を行う。実施した処理は、振幅回復処理と周波数フィルタである。振幅回復は、波形の振幅が減衰する深部データの振幅を回復させる補正である。周波数フィルタは、スペクトル解析によって地下構造に起因する周波数成分を検討し、その成分のみを残す周波数フィルタを設計して実施した。

4. 実証実験結果

4.1 地点1

図-9は、ボーリングなどの詳細調査から評価した地点1の推定地質構造である。新第三紀砂岩泥岩互層から成り、その中の地質境界を赤線で示した。赤破線は受け盤構造を示す層理面である。

また水色線は、ボーリング孔内の水位観測から得られた地下水水面であり、浅部から雨天直後、ボーリング掘削時、晴天時の観測結果である。計測日は雨天直後であったため、地下水水面は浅層部で観測されることが予想された。

図-10は、地点1における連続波地中レーダ法の評価結果である。評価にあたっては、ボーリング結果を参考にして実際の地質境界面に検出された反射波形に着目し、連続性のある波形の並びを評価した。図-9で推定された地質構造と対比できるようにそれぞれ同色で示した。

推定地質断面図と連続波地中レーダの反射面データを比較すると、地質境界面や層理面と概ね整合する傾斜方向に反射波形の並びが検出できた。しかし、一部に地質境界面と整合しない反射面も検出された。これは深度2～3m付近に連続的に検出された反射面に当たり、雨天直後の地下水水面の場所と概ね一致している。このため、これは地下水水面と推定できる。

また地点1はモルタル吹き付け法面であるため、表面の凹凸による強い直接波の発生によるデータ劣化が懸念されたが、差分処理によって影響を削減できた。

4.2 地点2

図-11は、ボーリングなどの詳細調査から評価した地点2の推定地質構造である。図中の赤線は地質境界であり、盛土と基盤の境界面を示す。基盤は新第三紀礫岩である。

図-12は、地点2における連続波地中レーダ法の評価結果である。評価にあたっては、ボーリング結果を参考にして実際の地質境界面や地下水水面に検出された反射波形に着目し、連続性のある波形の並びを評価した。図-11で推定された地質構造と対比できるようにそれぞれ同色で示した。

推定地質断面図と連続波地中レーダの反射面データを比較すると、盛り土境界や地質境界面と概ね整合する深度に反射波形の並びが検出できた。また法尻から法面中腹の小段にかけて、常時地下水水面に相当する深度4.5～6m付近に連続する反射波形の並びが検出できた。しかし鉄筋コンクリート被覆工の影響によって送信信号が減衰したため、小段から法肩にかけては探査能力が不足して反射面を検出することができなかった。

また地点2においては、盛土法面の保護工である鉄筋コンクリート版の影響が懸念された。地中レーダ法のように電磁波を取り扱う探査手法は、鉄筋等の金属物の影響を受けて著しく測定データが劣化する。本実験では、鉄筋が持つ電界の振動方向と逆転する方向の電界を検出しやすい測定を採用して鉄筋の影響を極力削減した。また差分処理も実施した結果、探査深度は7m程に劣化したが、内部構造の情報を評価できる程度にデータ劣化を緩和することが可能になった。

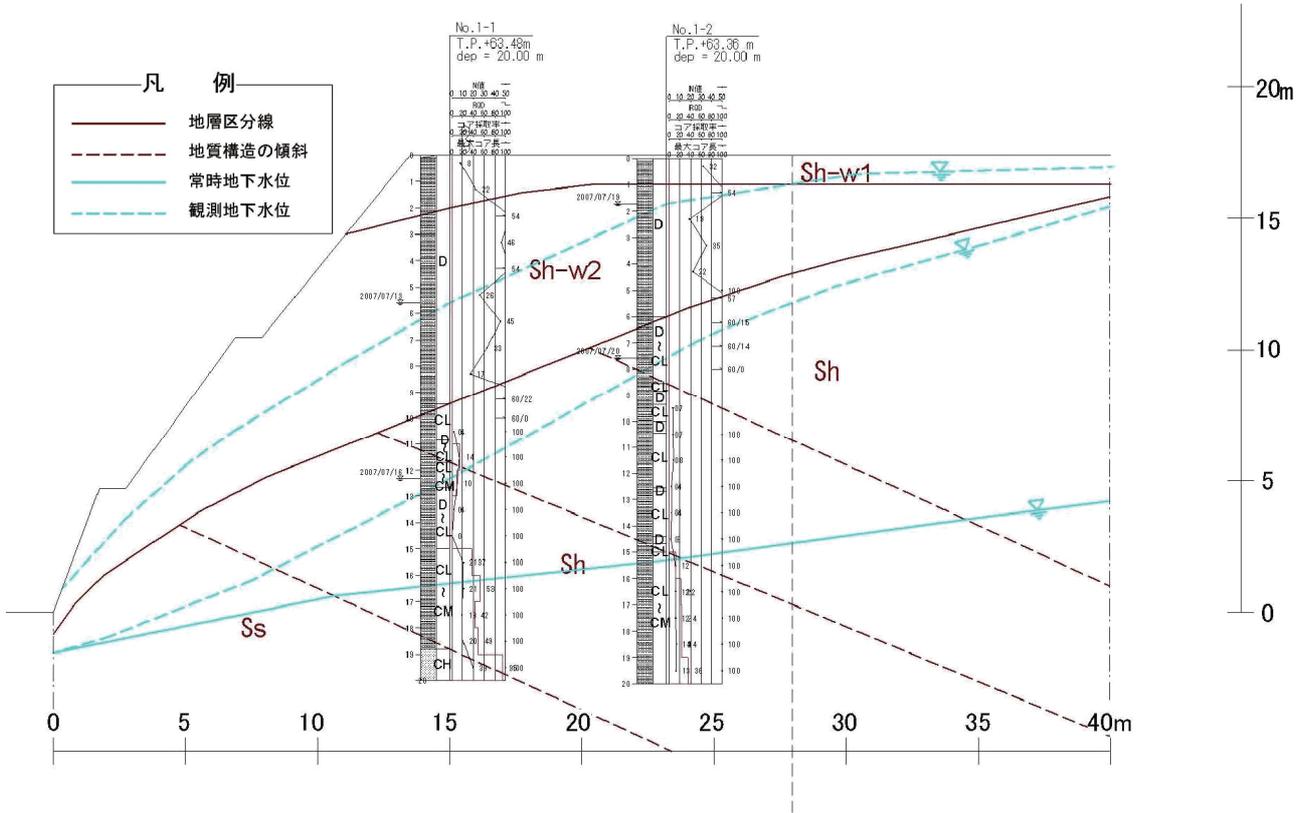


図-9 地点 1 の推定地質構造断面

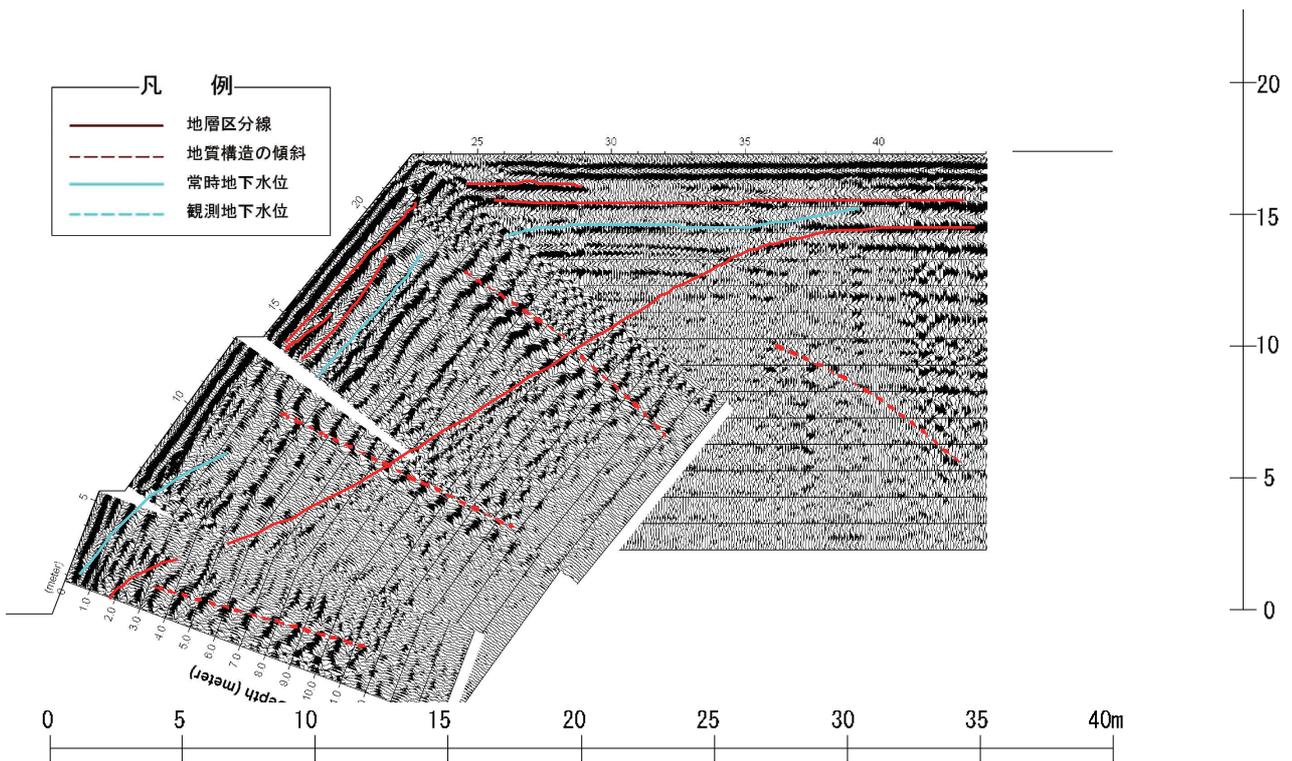


図-10 地点 1 の連続波地中レーダ法による反射面断面図

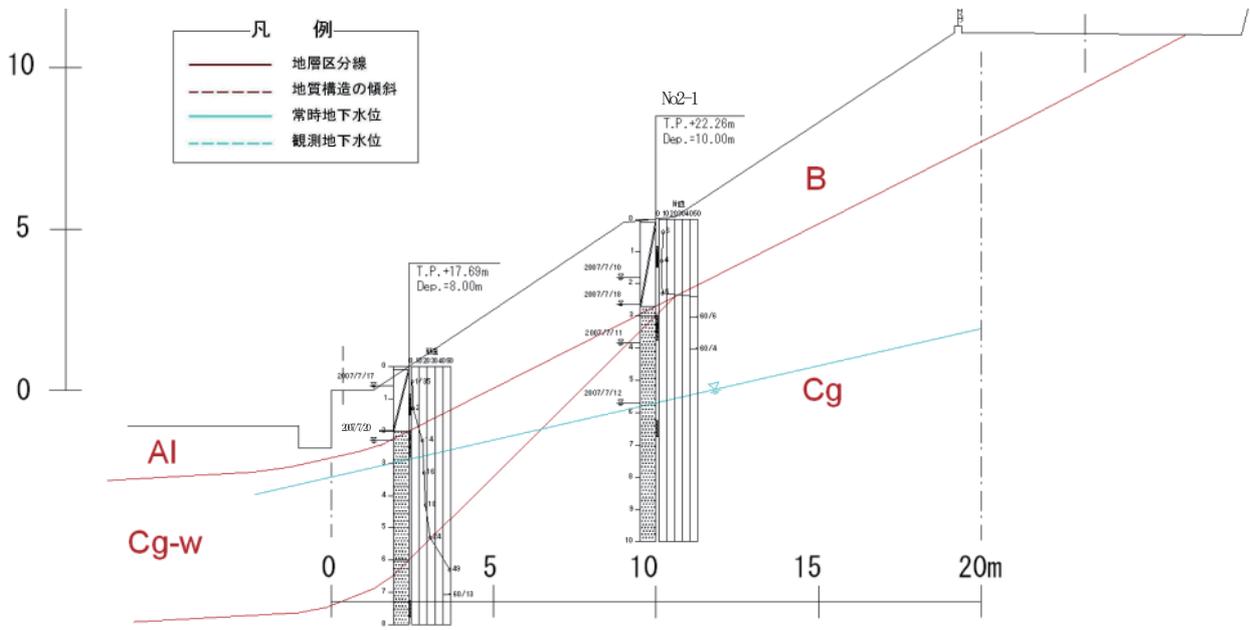


図-11 地点 2 の推定地質構造断面

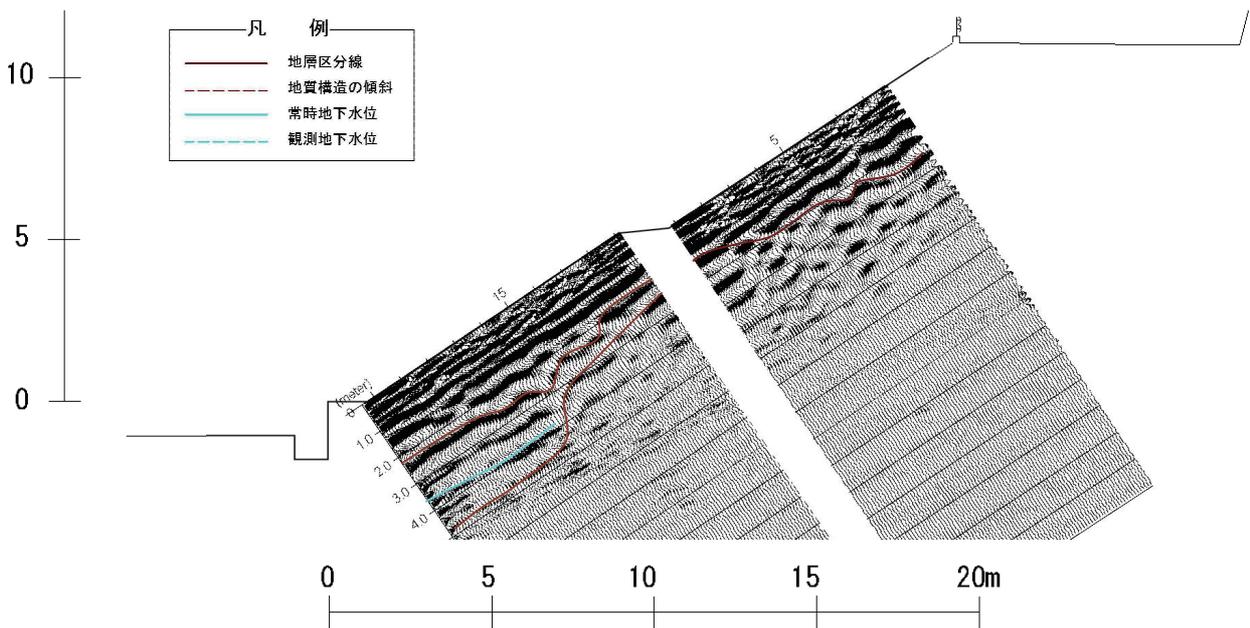


図-12 地点 2 の連続波地中レーダ法による反射面断面図

5. まとめ

実証実験を行った様な切土法面および盛土法面においては、連続波地中レーダによって地質境界面に対応する反射面が検出でき、また地下水面と推定できる反射面も検出できたことが判った。切土法面では、風化帯に応じた反射面が概ね検出できており、探査結果から受け盤や流れ盤等の評価を行うことや、少ないボーリングデータから孔間の地質構造の連続性を詳しく評価することに有効であった。盛土法面では、盛土境界面が検出されるとともに、地下水面と推定できる反射面も検出できたため、排水機能の低下を示唆する地下情報が評価可能であることが判断できる。またこれら評価は、凹凸する急峻地形や鉄筋を含む保護工が存在する上で得られたものであるため、現在のデータ処理技術によって法面データの補正が可能であることも同時に検証できた。

以上の様に連続波地中レーダ法は、道路法面の内部構造調査に適用できる有効な手法の一つであると思われる。しかし地層境界面と地下水面で発生する反射波には明確な差異が見られないことや、解析断面図の中の反射面は、地質境界面や地下水面以外にも偽造や歪み波形等のノイズが含まれるため、明確な区別を行うためにはボーリングデータと合わせて探査結果を分析することが重要である。また今回の実証実験は二箇所だけであり、今後多数の箇所を検証を行うことや、同じ箇所を複数回計測して地下水位に関わる反射波の変化状況を分析する等、さらに適用性について検討を続けて行く必要がある。

連続波地中レーダ法の探査装置の適用条件を整理すると、地点1のような吹き付けコンクリート防護の切土法面では、急峻な地形が多いことから作業性と安全性を重視して小型装置を用いる。この場合の探査可能深度は、地点1の実験で評価できた10m程度となる。地点2のような盛土法面では、探査深度を劣化させる鉄筋コンクリートによって防護されている場合が多いが、この場合は緩斜面が多いため、探査できる深度が大きい大型装置を用いる。この場合の探査可能深度の目安は、地点2の実験で評価できた6~7m程度となる。

道路法面の防災総点検等は、これまで表面に現れる現象（亀裂や湧水など）を主に目視で確認し、簡易的な計測によりその進行状況を確認するもので、法面内部の状況把握までには至っていない。実証実験を行った地点1を例とすれば、吹き付けコンクリートに多数の亀裂が認められる老朽化法面の一つであったが、実証実験によって比較的 안전한受け盤構造であることが判明した。地点2は、亀裂や湧水が現れにくい強固な鉄筋コンクリート防護による盛土法面であり、このような法面では表面から劣化の予測を行うことが難しいため、初期の段階で簡単な内部構造調査による点検が急がれる法面である。しかし鉄筋の影響から有効な非破壊探査が検討されていなかったが、連続波地中レーダ法を利用することによって内部構造や地下水の概略を把握することが可能であることがわかった。これら目にみえない劣化状況を正確かつ定量的に評価することができれば、斜面の健全度を詳細に把握できるとともに、それに応じた対策工を実施することができる。そして、この様な探査手法を用いる

ことで、未然に災害発生を防止するとともに、人的・経済的損失を最小限に抑え、かつ既設道路の延命化にもつながることが期待される。

参考文献

- 1) 鈴木敬一, 笠井弘幸, 西山英一郎: ステップ式連続波レーダ探査装置を用いた地中レーダ探査, 地質ニュース 537号, pp.44-52, 1999.
- 2) 物理探査学会編: 新版物理探査用語辞典, 愛智出版, pp.288, 2005.
- 3) 物理探査学会編: 物理探査ハンドブック「手法編」, 第7章地中レーダ, pp.399-429, 1998.
- 4) 物理探査学会, 物理探査学会編: 物理探査適用の手引き(とくに土木分野への利用), 第III編物理探査計画実施要領(案), pp.140-148, 2000.
- 5) Suzuki, K., Nishiyama, E., Masumoto, K., and Toida, M., 2004, On the Ground penetrating radar based on sinusoidal approach, *Proc. IWAM04*, S3-P06.
- 6) 鈴木敬一, 伊藤牧人, 田辺一夫: ステップ式FM-CWレーダによる埋設管探査実験, 物理探査学会第96回学術講演論文集, pp.376-380, 1997.
- 7) 西山英一郎, 笠井弘幸, 鈴木敬一: GPRにおけるデータ処理法, 地質ニュース537号, pp.53-60, 1999.

(2009年6月29日 受付)