

狭隘トンネルにおける地中レーダ探査の作業上及び解析上の問題点

Difficulties on the GPR (Ground Penetration Radar) practical operation in narrow tunnels and the profile interpretation

共通事業本部 地質部 城野 忠幸



概要 (Abstract)

地中レーダ探査(又は地下レーダ探査)は、平坦で連続した探査面が確保されている調査地において、作業の連続性と探査費用の面で有効な探査手法として多用されている。しかし、在来トンネルのように狭隘で添架物が多い条件下では、作業の連続性や効率性を確保できないだけでなく、解析時のデータ処理においても数多くの問題点を有している。

本文では、狭隘トンネルにおける地中レーダ探査の作業上及び解析上の問題点を抽出した上で、実トンネルでの測定データを元に解析作業の一連の流れを分かりやすく説明する。

1 はじめに

現在、全ての道路トンネルを対象として、トンネル定期点検が実施されている。この点検は目視点検(近接・遠望)、応急処置、漏水量測定からなり、点検結果からA(応急対策・補修補強対策の要否検討のための標準調査が必要)・B(対策の要否検討のための標準調査が必要)・S(対策・標準調査不要)の判定を行っている。

定期点検結果の判定が A 又は B の場合、「道路トンネル維持管理便欄」(社団法人日本道路協会、平成5年11月)に記載されている標準調査の実施が必要となる。

標準調査は、先ず標準調査 A(既存資料調査・踏査・ひび割れ簡易調査・簡易覆工強度調査)を実施し、必要に応じて標準調査B(簡易ボーリング調査・覆工強度調査)を追加して行う。

さらに、変状が大きく、変状の定量的把握が必要な場合には、推定変状原因に応じた調査項目を選定しなければならない。

その中で、調査対象が覆工巻厚や背面空洞の場合、非破壊で巻厚や空洞厚(深さ)を安価に実施できる探査法として、地中レーダ探査が挙げられており、実際にも多用されている。

地中レーダ探査は、トンネルや道路のように平坦で連続した探査面が確保されている調査地では、線的～面的な情報を安価に提供できる探査法として有効な選択肢である。反面、在来トンネル

のように狭隘で照明やケーブルなどの添架物が多い条件下では、地中レーダの最大の長所である作業の連続性とそれに基づいた解析(相対評価)を困難にしている。

本文では、狭隘トンネルにおける地中レーダ探査の作業上及び解析上の問題点について概説する。

2 地中レーダ探査の概要

2.1 探査原理

地中レーダ探査は、電磁波の直進性を利用し、送信アンテナから地中に向かって電磁波を発射、受信アンテナでその反射波を受信することで地中の反射特性を測定し、埋設物及び地中構造を調査する物理探査法である。

使用する電磁波は、周波数が高いほど探査対象物の識別分解能が高くなる半面、透過力が弱まるという特性を有している。これは波動全般に当て嵌る特性でもある。

したがって、探査対象物に必要な分解能と存在深度を考慮し、使用する周波数を選択する必要がある。

一般媒質での電磁波速度は、導電率、誘電率、透磁率の3つの電磁的性質により決まるが、10MHz以上の高周波電磁波を利用した場合、地中の電磁波速度 V は、土の比誘電率を用いて次式で近似される。

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

ここに、 c : 光速 ($2.998 \times 10^8 \text{m/s}$)
 ϵ_r : 土の比誘電率

送信及び受信アンテナが同一の場合、地中の探査対象物までの深度 D は、送信時刻から反射波の受信時刻までの時間差 ΔT から次式で求められる。

$$D = 0.5 \cdot V \cdot \Delta T$$

したがって、探査対象物の深度を求めるためには、地中の電磁波速度あるいは土の比誘電率を決定する必要がある。

電磁波の反射は、地中の電磁的な不均質により生じ、境界面に対して垂直に入射する電磁波に対する反射係数 R は、次式で近似される。

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_i} - \sqrt{\epsilon_t}}{\sqrt{\epsilon_i} + \sqrt{\epsilon_t}}$$

ここに、 ϵ_i : 入射側の媒質の比誘電率
 ϵ_t : 透過側の媒質の比誘電率

媒質の比誘電率は、土質によって異なるため、その違いが土質境界の反射面となって現れる。また、水の比誘電率が他の媒質と比べ大きいことから分かる通り、同じ土質でも含水状態によって比誘電率は大きく変化する(表 2.1 参照)。

表 2.1 代表的な媒質の比誘電率と電磁波速度

媒 質	比誘電率	電磁波速度 ($\text{m}/\mu\text{s}$)	
空 気	1	300	
氷	3.2	170	
水	81	33	
アスファルト	(乾燥)	2~4	150~210
	(湿潤)	6~12	87~120
コンクリート	(乾燥)	4~10	95~150
	(湿潤)	10~20	67~95
礫質土	9~14	80~100	
砂質土	(乾燥)	4~6	120~150
	(湿潤)	15~30	55~77
ローム	(乾燥)	4~6	120~150
	(湿潤)	10~20	67~95
粘性土	(乾燥)	4~6	120~150
	(湿潤)	10~15	77~95

(物理探査ハンドブック(物理探査学会)に電磁波速度を加筆)

2.2 使用機器

当社の地中レーダシステムは、送信・受信アンテナとして一般的なシールド型のボウタイアンテナ(平板型アンテナ)である Mala GeoScience 社製の RAMAC/GPR を使用し、アンテナ周波数としては、250MHz と 500MHz を常備している。

アンテナ周波数は、探査深度に応じて使い分けているが、道路トンネルのように 1.0~1.5m 前後が探査対象となる場合、深度方向の分解能 1cm, 水平方向の分解能 5cm 程度を確保できる 500MHz が最も適している。

アンテナと表示・記録用ノート PC 間のデータ通信は、コントロールユニットを介して行い、探査距離の測定には測距輪を使用している(図 2.1 参照)。

測距輪は、アンテナ本体に取り付けることができ、距離データをコントロールユニットに送信するものであるが、道路や護岸など、地表方向に平坦面が連続する調査地の探査では、測距輪付きのカートを使用し、探査効率・精度の向上を図っている(図 2.2 参照)。



図 2.1 トンネルで使用する地中レーダシステム
(左よりバッテリー、アンテナ+コントロールユニット+測距輪、PC)



図 2.2 平坦地で使用する地中レーダシステム
(右が測距輪を兼ねたアンテナ本体を載せるカート)

2.3 解析方法

地中レーダの測定方法は、一般的にプロファイル測定とワイドアングル測定に区分される。後者は対象地盤の電磁波速度を求めるために実施されるものであり、通常、地中レーダと言えば前者を指すことが多い。

解析は先ず、測距輪によるアンテナの移動距離と、測量による探査測線距離が一致するように横軸(距離軸)を調整する。

次に対象媒体の境界面(反射面)を抽出するために様々なフィルタ処理を行う。このとき、ボーリングやコアリングなどの補完調査結果と整合が取れるように注意を払う。

その後、電磁波速度を適当な範囲内で調整し最終的に深度軸を決定する。この際、現場条件が許せば、ワイドアングル測定によって電磁波速度を求め、それを使用することが望ましい。以上、解析の流れをまとめると図 2.3 のようになる。

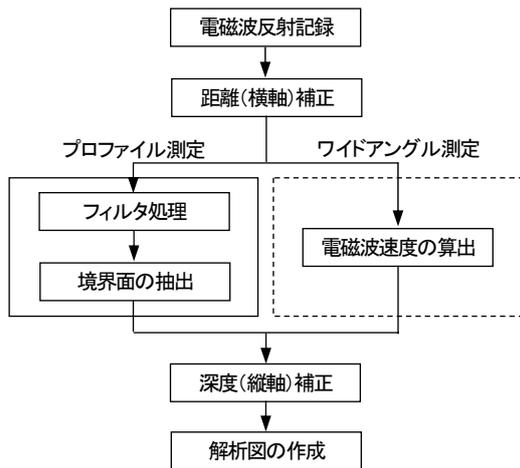


図 2.3 解析の流れ

3 狭隘トンネルにおける作業・解析上の問題点

3.1 作業上の問題点

道路トンネルでの探査作業は、片側交互通行が原則となる。しかし、トンネル断面が狭隘で、かつ添架物の多いトンネル(図 3.1 参照)では、両側通行規制を実施し、通行車両と作業員の安全を確保しなければならない。

両側通行規制の時間は、交通量や大型車の混入率、時間帯によって異なるが、片側通行規制分の待ち時間 2~3 分を考慮すると、探査そのものの時間は 1 分が限界である。

この 1 分間で探査可能な測線長は、トンネル点検車のアウトリガ接地走行時の限界速度であ

る 3km/h から計算すると 50m となる。

また、NATM 以前の在来トンネルでは、漏水対策のための面導水やコンクリート剥落防止のための部分補強工が施されている箇所も多く、その部分は探査することができない。



図 3.1 照明・ケーブルが添架され面導水が漸続する坑内

横断的には、添架された照明やケーブルの存在により断続的な作業を強いられるため、作業効率が格段に落ちるのに加え(図 3.2 参照)、距離の補正やプロファイルの合成等に煩雑な解析作業を伴う。

これらのことから、狭隘トンネルでの地中レーダ探査の費用算出の際には、単純に測線長当たり単価を適用するのではなく、測定箇所数や現場条件に応じた適正な補正を考慮することが望ましいと考える。



図 3.2 横断方向の探査状況

(現場条件により、作業台昇降による作業効率低下、添架物によるプロファイルの不連続性・外部電磁場の影響等、問題が多い)

3.2 解析上の問題点

断面が狭隘なトンネル(その多くは在来トンネル)における地中レーダ探査の解析上の問題点については、前節までに若干触れているが、具体的にまとめると以下のようなになる。

- ① 断続的な測定により、結果として測線数や

中抜け区間が多くなり、中抜け区間の推定や縦横断面の交差部での整合性の確保が難しい。

② 照明やケーブルなどの添架物が電磁場を形成するため、反射波がこの部分で攪乱されてしまう。

③ 覆工コンクリート中の鋼製支保工(H鋼)での反射が大きいため、対象物の反射波(ターゲットエコー)が埋没してしまう。

④ 覆工コンクリート背面に木製の支保工や矢板が残置されているため、この部分での電磁波エネルギーの吸収が著しく、その背後の地山境界からの反射波がノイズに紛れてしまう。

このうち、①、③、④は在来トンネル特有の問題であって、NATMトンネルにおいては、ごく一部の区間や特殊地山に建設されたトンネルに限定される。

プロファイル解析の大雑把な流れは、図 2.3 に示したとおりであるが、実際の解析ではフィルタ処理ひとつ取っても、目的とする境界面を抽出するためのルーティーンは存在しない。

在来トンネルでの生データから覆工～空洞、空洞～地山間の境界を求めるまでの処理の一例を図 3.3.1～3.3.5 に順に示す。

なお、実際には同一トンネル内でも、断面特性に応じて異なる処理を行うことも多い。

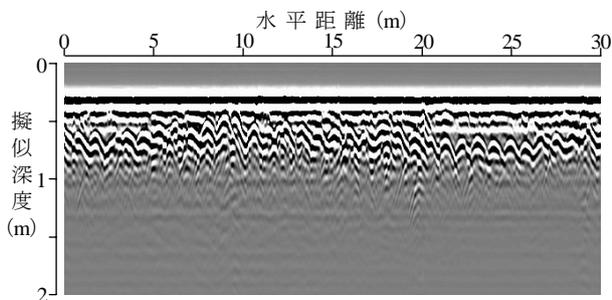


図 3.3.1 未処理プロファイル

(深度 0.4～0.6m 間に H 鋼の放物線パターンが約 1m ピッチで表出、また 9～10m ごとの施工目地による深部に及ぶエコーが特徴的)

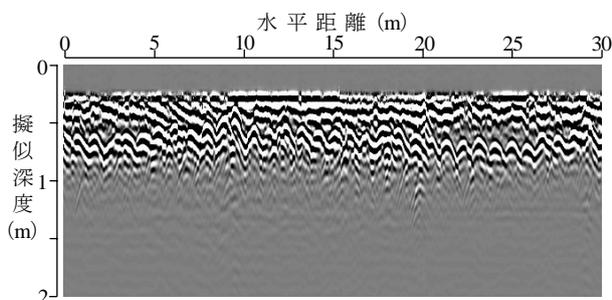


図 3.3.2 平均トレースの差分処理(Delete Mean Trace)

(差分処理によって、直接波等の共通の反射波をマスク)

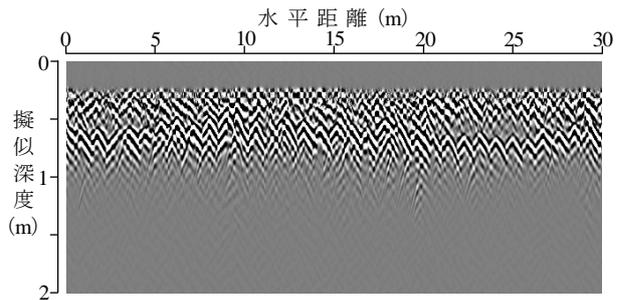


図 3.3.3 移動平均フィルタ処理(Moving Average)

(隣接するプロファイルの移動平均を取ることで、空洞や地山の擬似深度や分布範囲を抽出)

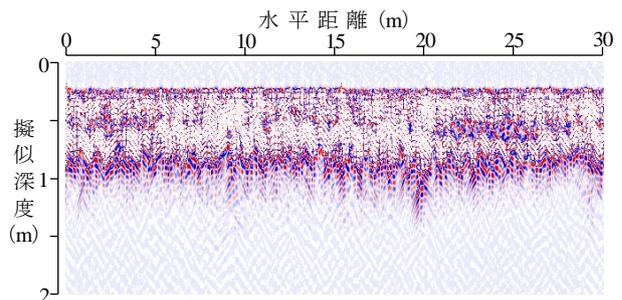


図 3.3.4 フィルタ処理後の着色

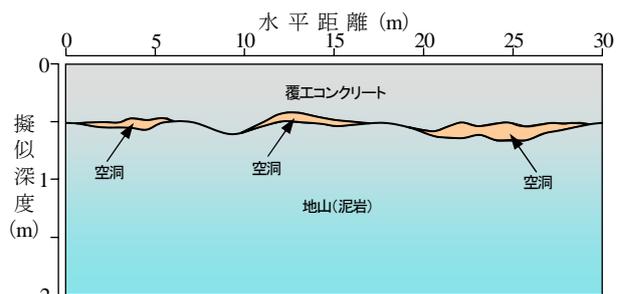


図 3.3.5 最終的な地中レーダ解析図

4 まとめ

地中レーダは、他の物理探査と比較し、測定作業が容易で探査費用が安価なため、ボーリング等の点データを線～面データに拡張する必要がある場合に多用される。これとは逆に、地山情報が乏しい調査対象地での調査計画立案及び実施時のスクリーニング調査としての役割も担っている。

前述した作業上の問題点については、現地調査段階での現場条件の確認を詳細に行い、綿密な作業計画を立案・提案することで解決を図って行きたい。

解析上の問題点については、他の物理探査とは違い、定型的な処理方法がないため解析作業の効率化を妨げている。このことに対しては、実解析作業の経験値を増やすとともに、現場条件ごとに処理プロセスを整理しながら、基本的な処理手順を構築することで対応したいと考える。