

トンネル事前調査におけるトモグラフィー手法を用いた弾性波探査の評価

エース（株）正 ○岩本 啓幸 山口大学 学 井上 浩一
日本道路公団試験研究所 正 赤木 渉（株）基礎地盤コンサルタンツ 正 三木 茂
山口大学 正 河原 幸弘 山口大学 正 中川 浩二

1. はじめに

現在、トンネル事前調査で行われている弾性波探査解析では、通常“はぎとり法”が広く用いられている。しかしこの方法は長年基本的に大きな革新もないまま続けられており、多くが手作業で、時間と経験を必要とする作業となっているのが現状である。そこで最近では“トモグラフィー手法を用いた弾性波探査”が注目されている。この手法はコンピューターを用いるので、短時間かつ客観的に解析できる特徴を持っている。そこで本研究では、過去に施工されたトンネルの走時データを用い、両解析手法の比較を行い、その有効性を調べることを目的としている。ここではトモグラフィー手法解析のために特別なデータは用いていない。

2. トモグラフィー手法を用いた弾性波探査解析

トモグラフィー手法を用いた弾性波探査解析の解析フローを図-1に示す。

この解析方法により速度分布図、波線図、走時図が得られる。速度分布図とは、解析された走時を最も説明し得る速度構成図である。波線図とは、波線通過位置を表しており、どの範囲が探査されているのかを確認できる。走時図とは、逆解析により推定した地盤の速度構造から計算できる走時（解析走時）と、実際に測定した走時を直接比較した図である。図-2に波線と速度分布図を示す。

3. トモグラフィー手法の有効性に関する検討方法

ここでは対象トンネル20本のデータを用い、弾性波速度の信頼性、および断層の検知性について検討方法を述べる。

(1) 弾性波速度の信頼性

地山評価に関する調査技術のうち、弾性波速度は数値的な根拠を与える。日本道路公団において「地山分類表」が示されている。この地山分類表には、各地山等級における岩種別の弾性波速度及びこの速度に対応するおよその岩盤状況が示されている。一方、弾性波速度は、岩の固結度、風化の程度、節理状況等が影響していると考えられている。この中で固結度、風化の程度は、切羽観察項目 C,D に表されている。ここで、上記の地山分類表を参考に、弾性波速度からの C,D 項目を推定した。表-1に参考とした弾性波速度と C,D との関係を示す。検討対象となる速度は、日本道路公団の設計要領に基づき、トンネルフォーメーションの基盤から15m上のところの速度を用い、表-1を参考にし(C+D)に対応させた。切羽観察記録の一部を表-2に示す。

トンネル全体に対して、両解析で得られた弾性波速度から推定された(C+D)と、実際の切羽観察記録の(C+D)とを比較す

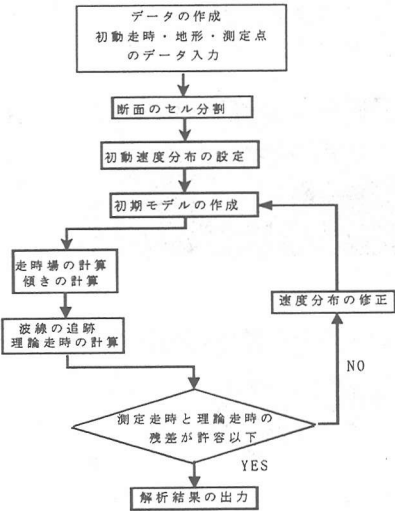


図-1 解析フロー

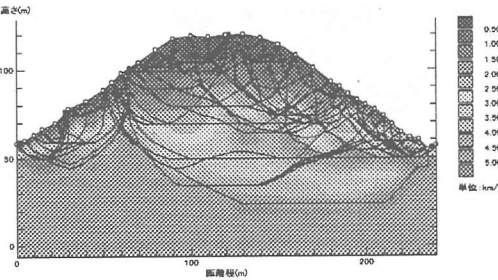


図-2 波線と速度分布図

表-1 弾性波速度と C, D の関係

地山等級	岩種(タイプ)	弾性波速度 Vp (km/s)	C, D (強度, 風化)		合計
			C	D	
A	I	5.0~	1~2	1~2	2~4
	II	4.9~			
	III	3.5~			
B	I	3.8~5.0	2~3	2	4~5
	II	3.8~4.9			
	III	3.0~3.5			
C I	I	3.3~3.8	2~3	2~3	4~6
	II	3.1~3.8			
	III	2.0~3.0			
C II	I	3.3~3.8	2~3	2~3	4~6
	II	3.1~3.8			
	III	2.0~3.0			
D I	I	2.9~3.3	3	3~4	6~7
	II	2.9~3.1			
	III	1.5~2.0			
D II	I	~2.8	3~4	4	7~8
	II	~2.8			
	III	~1.5			
D III	I	~2.8	3~4	4	7~8
	II	~2.8			
	III	~1.5			

岩種による分類
(タイプ I) - 片岩・粘板岩・蛇紋岩
(タイプ II) - 花崗岩・石英斑岩・安山岩
(タイプ III) - 砂岩頁岩・泥岩

る。結果を図-3に示す。縦軸に(C+D)評価点を、横軸にSTA.NOを示している。つまり実線が波線の間に入っているということは、弾性波速度から推定された(C+D)と、実際の(C+D)が一致しているといえる。

(2) 低速度帯・断層・破碎帯の検知性

ここでは、両解析方法がどれくらい低速度帯・断層・破碎帯を、検知できているか調べる。切羽観察項目の評価点から推定した断層の位置と、両解析方法の弾性波速度から推定した位置とを比較し、それらの位置が一致しているならば断層が検知されたと判断する。断層・破碎帯部では評価点数が平均的に1点ないし2点いくつかの項目で高くなるため周辺より帯状、あるいはピーク(山)状の評価点が表れる。よって評価点からの断層推定方法としては、3点以上ピーク状に高くなっている箇所を断層・破碎帯と推定した。また、トモグラフィー手法の弾性波速度からの断層推定方法としては、速度が周辺よりも1Km/s以上遅い方に狭い範囲で変動している位置を断層と推定した。はざとり法の弾性波速度からの断層推定方法としては、低速度帯と推定されていた位置(図の弾性波速度が遅い方に突出した位置)を断層と推定した。結果の一例を図-4に示す。なお、断層と推定したところは●印で示している。

4. 結果の整理

(1) 弾性波速度の信頼性

図-3より得られた実際の(C+D)と、両解析での弾性波速度から得られた(C+D)との一致率を求めた。その一致率の上昇率を図-5に示す。縦軸にトンネル本数を、横軸に、解析手法をはざとり法からトモグラフィー手法に変えることによって上昇した割合を示す。この図より、はざとり法よりもトモグラフィー手法を用いた方が一致率は高く、トモグラフィー手法における弾性波速度の信頼性は高くなるといえる。

(2) 低速度帯・断層・破碎帯の検知性

図-4より両解析方法とも実施施工時にトンネル施工に影響を及ぼす断層等破碎帯らしきものを検知することはできず、その他の対象トンネルでも断層らしきものを検知することはできなかった。

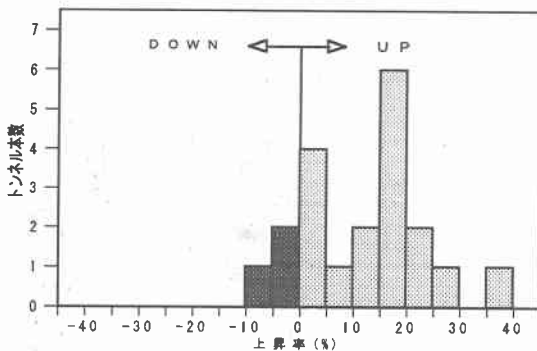


図-5 はざとりからトモグラフィーへの上昇率

表-2 切羽観察項目の一部

項目	評価内容	評価点と評価基準			
		1	2	3	4
A	切羽の状態	安定	鏡面から岩塊が抜け落ちる	鏡面の押し出しを生じる	鏡面は自立せず崩れあるいは流出
B	素掘面の状態	自立(管轄不要)	時間がかつとゆるみ肌落ちする(後管轄)	自立面崩壊後早期に安撫する(先管轄)	掘削前に先行して山を受けとておく必要がある
C	圧縮強度	σc ≥ 1000kgf/cm ² ハンマー打撃はね返る	1000 > σc ≥ 200 ハンマー打撃でできる	200 > σc ≥ 50 軽打撃でできる	50kgf/cm ² > σc ハンマーで先くい込む
D	風化変質	なし・健全	岩目に沿って変色・強度やや低下	全体に変色・強度相当に低下	土砂状、粘土状、破碎、当初より未固結
E	割れ目の頻度	間隔 d ≥ 1m 割れ目無し	1m > d ≥ 20cm	20cm > d ≥ 5cm	5cm > d 砕砕当初より未固結
F	割れ目の状態	密着	部分的に開口	開口	粘度はさむ、当初より未固結
G	割れ目の形態	ランダム形状	柱状	層状、片状、板状	土砂状、細片状、当初より未固結
H	湧水	なし、湧水程度	湧水程度	集中湧水	全面湧水
I	水による劣化	なし	ゆるみを生ず	軟弱化	崩壊・流出

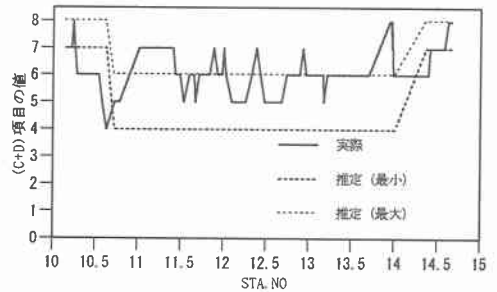


図-3 (C+D)の比較一例

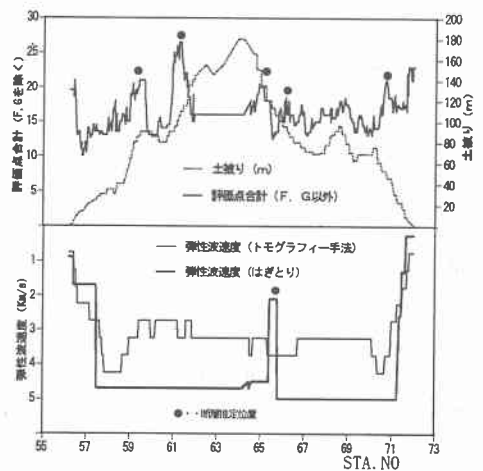


図-4 断層推定位置比較の一例