

反射法弾性波探査による切羽前方の弾性波速度推定と事例検証

安藤ハザマ 土木技術統括部 正会員○山本浩之 正会員 中谷匡志
4D ジオテック 今村杉夫 太田賢治

1. はじめに

山岳トンネル施工時における切羽前方探査として、掘削発破を起震源とした反射法弾性波探査手法による「トンネルフェイステスター (TFT 探査)」の開発を進めている (図-1 参照)。

しかし当手法の問題点として、反射面位置は特定できるものの、反射面に相当する断層や地質境界の規模、強度などの定量的な指標が得られないという点がある。そこで、反射面前後の弾性波速度を算出する試行アルゴリズムを考案することにより、切羽前方地山の定量的な評価手法を検討した。本報は、システム構成、定量評価手法を示すとともに、実際のトンネル現場での連続的な掘削発破データを用いて試行アルゴリズムによる弾性波速度を算出し、適用性を検証したので報告する。

2. 探査方法

図-2 に探査機器一式を示す。弾性波データを記録する受振ユニットは、地震計、ロガー、バッテリーなどが一体化されたもので、2 箇所での計測を標準とし、支保工ロックボルトに設置する。探査は掘削発破ごとに弾性波を受振ユニットで記録し、20 データ程度収録した時点で解析を行い、発破データに含まれる反射波を抽出し切羽前方の反射面の位置を予測する。解析フローを図-3 に示す。

3. 切羽前方の弾性波速度推定について

弾性波速度の推定手法については、試行アルゴリズムでは、TFT探査から得られた反射波の振幅情報から切羽前方の速度を推定した。

具体的には、一般に平面境界への垂直入射では、反射波の振幅 A_R は式(1)のように表される。ここで、 Z_1 は入射側のインピーダンス、 Z_2 は透過側のインピーダンスを示す。なお、式(1)の右辺は入射振幅 A と反射係数の積である。

$$A_R = A \cdot \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \tag{1}$$

式(1)より、 $Z_2 < Z_1$ の場合 (速度不連続面の前方が低インピーダンス) の反射波形は正負が逆転する。図-4 に速度構造と反射係数および想定される波形の関係を示す。i 層中の入射波振幅を $A_{T(i)}$ 、反射波振幅を $A_{R(i)}$ とすれば、 $Z_{(i+1)}$ は式(2)より算出できる。

$$Z_{(i+1)} = Z_{(i)} \cdot \frac{A_{T(i)} + A_{R(i)}}{A_{T(i)} - A_{R(i)}} \tag{2}$$

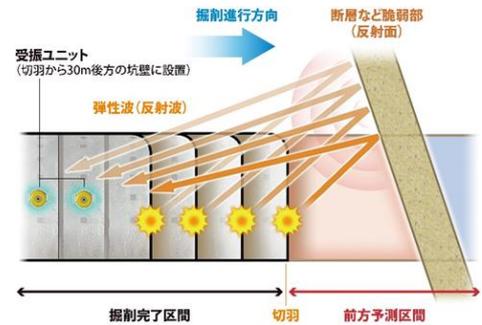


図-1 TFT 探査概念図



図-2 探査機器一式

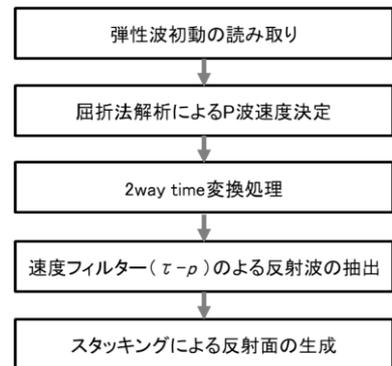


図-3 解析フロー

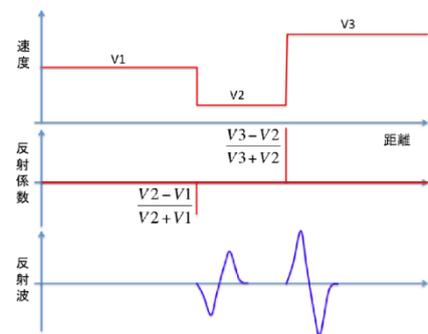


図-4 速度分布と反射波の概念図 (密度一定の場合)

キーワード：山岳トンネル, 前方探査, 反射法弾性波探査, 弾性波速度

連絡先：〒107-8658 東京都港区赤坂六丁目1番20号 TEL:03-6234-3670 FAX:03-6234-3704

すなわち、密度は変化しないと仮定した場合、V1 は初動走時の傾きで与えられるので、反射波と直達波の振幅の比が得られればV2 が計算できる。図-5に弾性波速度推定の基本的なフローを示す。

4. 検討方法

本検討は、静岡県浜松市北西端の道路トンネル工事（延長約 2.4km, 掘削断面積約 80m²）で連続的に実施した TFT 探査データを利用して行った。地質縦断図を図-6 に示す。地質構成は、中生代白亜紀～ジュラ紀頽家変成岩類の泥質片岩と珪質片岩が互層状に分布する地質を主体とし、一部マイロナイトおよび天竜峡花崗岩が分布する。

当現場では TFT 探査を TD.714～2,354m (L=1,640m 区間) で連続的 21 回に実施しており、探査より得られた弾性波データ（直達波と反射波）から、図-5 の解析フローに基づき当区間の弾性波速度を算出した。

5. 弾性波速度推定値と掘削実績との比較

弾性波速度（設計：青線、当手法による実績：赤線）、切羽評価点、5m 区間で切羽評価点±5 以上を地質イベントと定義した 26 箇所および TFT 探査による反射面（赤色表示）をまとめたものを図-6 に示す。弾性波速度に注目すると、TD.714～2,354m 区間で設計の 3.0～4.5km/s に対し、TFT 探査による当手法の実績は 2.3～5.0km/s 程度を示す。ここで表-1 に示す当サイトの地山分類と弾性波速度との関係より、掘削実績は CII～DI パターン（2.3～4.2km/s 程度）が主体であり、5.0km/s の上限値、断面形状（駐車帯）の変化区間は今後検証する必要があるものの、概ね同程度の数値を示している。また、切羽評価点の変化が大きい地質イベント 6～7、11～16 での速度変化の傾向は一致しており、地山変化を捉えているものと考えられる。

6. おわりに

当検討により、反射法弾性波探査で得られた弾性波速度（直達波と反射波）から、切羽前方の弾性波速度を概略推定できる可能性があり、今後さまざまな岩種での事例検証を進める必要があるものとする。

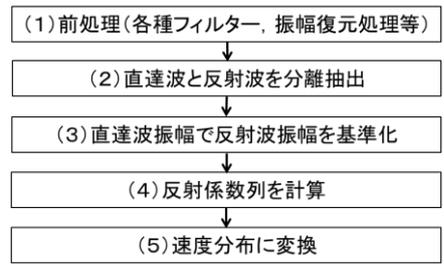


図-5 弾性波速度推定の解析フロー

表-1 当サイトの地山分類

地山等級	弾性波速度 (km/s)	
	変成岩類、マイロナイト (Rps, Rsc) 中硬質層状岩盤 (M層状)	花崗岩 (Gr) 硬質塊状岩盤 (H塊状)
B	—	4.3～
C I	3.8～5.2	3.3～4.7
C II	2.9～4.2	2.3～3.7
D I	～4.1	～2.7
D II	～4.1	—

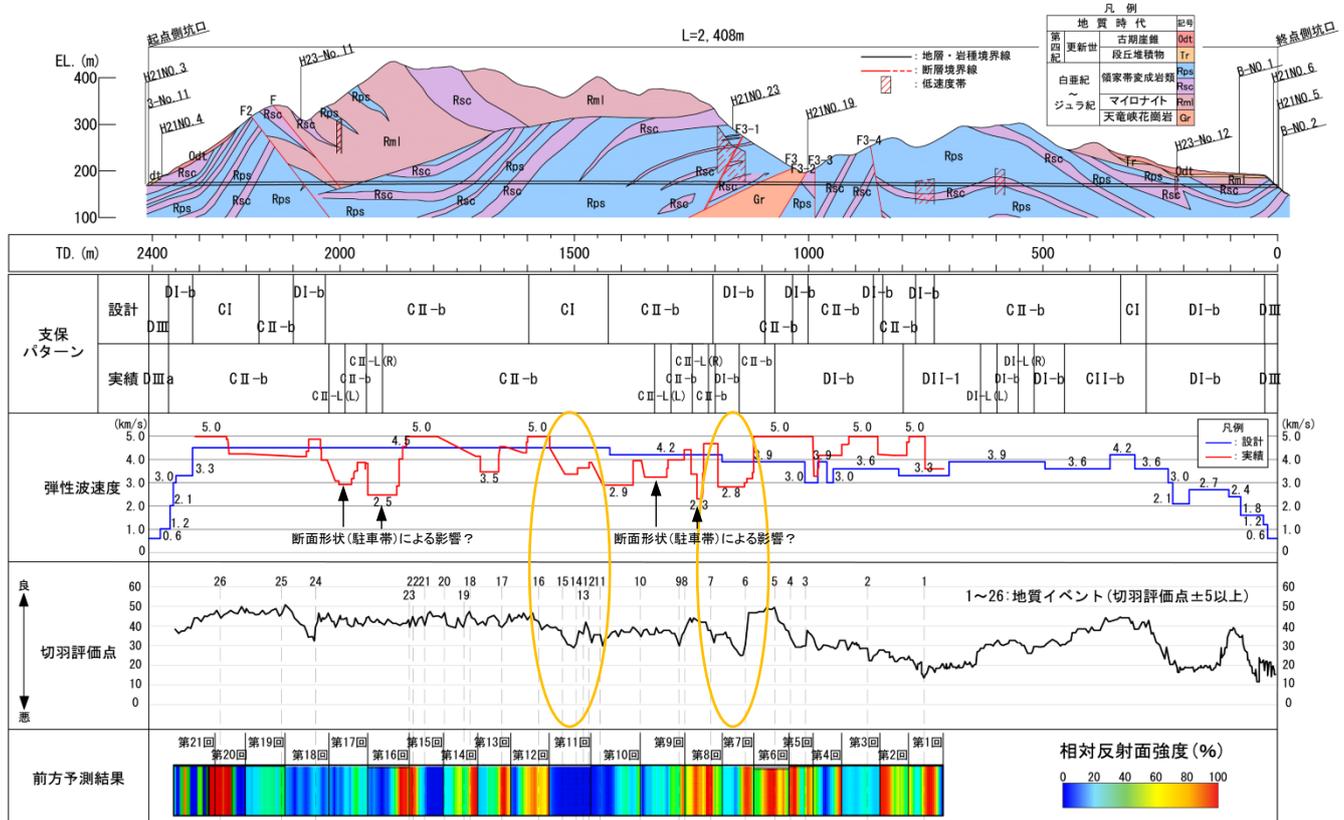


図-6 弾性波速度値（設計、実績）と掘削実績との比較図（地質縦断図）