

トンネル軸を横断する測線を用いた 弾性波振幅解析による切羽前方探査法について

今井 博^{1*}・山上 順民¹・青木智幸¹・三谷一貴²・高橋 亨³
・相澤隆生⁴

¹大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

²大成建設株式会社・関西支店・椿坂トンネル工事 (〒529-0537 滋賀県長浜市余呉町)

³公益財団法人深田地質研究所 (〒113-0021 東京都文京区本駒込2-13-12)

⁴サンコーコンサルタント株式会社 東日本支社 (〒136-8522 東京都江東区亀戸1-8-9 岩上ビル)

*E-mail: hiroshi.imai @jsakura.taisei.co.jp

トンネル切羽前方探査の技術として、坑壁に発振孔・受振孔を配置する弾性波切羽前方探査がある。しかし、この配置では、原理的にトンネル軸に平行な反射面の特定には効果的であるが、トンネル軸に垂直に交差する切羽前方の反射面に対しては、推定する速度分布などに誤差を含みやすい。そこで、切羽前方の反射面位置を精度良く捉え、また、反射面での物性変化を捉える目的で、トンネル軸に直交する発振孔・受振孔を配置した方法で実験を行った。切羽が調査領域を通過後、屈折法を実施し、本探査法で得られた反射面でのS波の反射係数やポアソン比の変化率は、屈折法の結果と整合性があり、本探査法の有効性が確認できた。

Key Words : AVO, tunnel, elastic wave, reflection, rock physics, prediction

1. はじめに

トンネル掘削において、工程に関わる落盤や異常出水などを引き起こす破碎帯や帯水層などを掘削作業前に把握することが重要であることは言を待たない。

先進ボーリングは切羽前方の地山状況を直接的に把握し、水抜きも可能であることから、現場では、水抜きを兼ねて、先進ボーリングを数十mから数百m長を削孔する場合があるが、この方式では、調査領域がボーリング孔近傍の地質に限定され、切羽前方の広範囲にわたる評価ができない。

このことから、切羽前方の地山状況を予測する弾性波反射法切羽前方探査は、広範囲な地山変化の不確実性に適切に対処することを可能にする点で期待が高い。

100~150 m程度の切羽前方探査としては、弾性波反射法によるTSP (Tunnel Seismic Prediction)やHSP (Horizontal Seismic Profiling)が用いられている¹⁾。両探査方法は、発振孔・受振孔の配置が逆になっているだけで、波形の初期信号処理や、反射面の抽出方法などはほぼ同じであると考えてよい。TSPとHSPの大きな違いは、TSPでは弾性波速度の空間分布を評価できることにある。さらに、弾性波速度 (V_p , V_s) の空間分布を用いてポアソン比を、

また、密度の空間分布を推定し、剛性率、動ヤング率、体積弾性率などの岩石物理に対応した力学的パラメーターの空間分布を推定できることである。これらのパラメーターは、切羽前方の地山状況を岩石物理的に判断できる重要な情報を与える。

しかしながら、三谷ほか²⁾は、調査領域をオーバーラップさせてTSPを実施した場合、速度空間分布の絶対値が必ずしも一致しなかったことを報告している。このことは、速度空間分布の推定に関して、その絶対値に関する信頼性に欠け、したがって、岩石物理学的パラメーターの空間分布の評価に問題があると言わざるを得ない。

そこで、本研究では、力学的地山物性のTSP以外の推定方法として、HSPと次章で述べるAVOを同時に実施して、地山物性評価を試み、切羽が評価領域を通過後、屈折法により地山の弾性波速度分布を測定し検証を行った。

2. AVO調査法

(1) AVOについて

AVO³⁾はAmplitude Versus Offset またはAmplitude Variation with Offsetの略であり、石油探査業界では従来から反射

法地震探査の解析法として用いられている。AVOは地表面や海面で起振・受振を実施し、取得したデータについて、一定の角度で反射した地震反射波を重合解析し、反射境界での物性やその変化を評価するという、油層の特性を調査する方法のである。

(2) AVOの理論

地表面で弾性波を発生させると、弾性波動は地中を伝播し、音響インピーダンス ρV (ρ は密度、 V は弾性波速度) に差がある境界面で反射して地表に戻る。P波速度について、媒質1から媒質2への垂直入射では、入射角 θ は0であり、反射係数 R_{PP} は、

$$R_{PP}(\theta=0) = \frac{\rho_2 V_{P2} - \rho_1 V_{P1}}{\rho_2 V_{P2} + \rho_1 V_{P1}} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、添え字1および2は、媒質の番号で、式(1)は、P波が媒質1内を伝播し、媒質2との境界面で、垂直に反射する場合の反射係数を表す。

しかしながら、入射角 θ が、角度を有すると、反射係数は複雑になる。Aki and Richards⁴⁾ は反射係数 R_{PP} について、境界面の両側の密度 ρ 、P波速度 V_P およびS波速度 V_S の変化に基づいて、次式、

$$R_{PP}(\theta) \approx \frac{1}{2} \left(1 - 4 \frac{V_{Sa}^2}{V_{Pa}^2} \sin^2 \theta \right) \frac{\Delta \rho}{\rho_a} + \frac{1}{2 \cos^2 \theta} \frac{\Delta V_P}{V_{Pa}} - 4 \left(\frac{V_{Sa}}{V_{Pa}} \sin \theta \right)^2 \frac{\Delta V}{V_{Sa}} \quad (2)$$

を導出した。ここで、

$$\begin{aligned} \Delta \rho &= \rho_2 - \rho_1, \quad \rho_a = (\rho_1 + \rho_2)/2 \\ \Delta V_P &= V_{P2} - V_{P1}, \quad \Delta V_S = V_{S2} - V_{S1} \\ V_{Pa} &= (V_{P1} + V_{P2})/2, \quad V_{Sa} = (V_{S1} + V_{S2})/2 \end{aligned} \quad (3)$$

である。上記、速度値の加減算は物理的にはおかしいが、ここでは差が微小であると仮定している。

Shuey⁵⁾ は式(2)を書き直し、さらに、藤井⁵⁾ は、式(2)を次式のように簡略化した：

$$R_{PP}(\theta) \approx R_{PP}(\theta=0) + \alpha \sin^2 \theta + \beta \quad (4)$$

ここで、ポアソン比 σ に関する加減算の式を加えて、

$$\begin{aligned} R_{PP}(\theta=0) &\approx \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_P}{V_{Pa}} + \frac{\Delta \rho}{\rho_a} \right) \\ \alpha &= A(\sigma) \frac{\Delta V_P}{V_{Pa}} + B(\sigma) \frac{\Delta \rho}{\rho_a} + C(\sigma) \Delta \sigma \\ \beta &= \frac{1}{2} \frac{\Delta V_P}{V_{Pa}} \tan^2 \theta \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (5)$$

$$\Delta \sigma = \sigma_2 - \sigma_1, \quad \sigma_a = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$$

である。また、式(5)の第2式における係数 $A(\sigma)$ 、 $B(\sigma)$

および $C(\sigma)$ は、

$$A(\sigma) = \frac{7\sigma - 3}{2(1-\sigma)}, \quad B(\sigma) = \frac{2\sigma - 1}{1-\sigma}, \quad C(\sigma) = \frac{1}{(1-\sigma)^2} \quad (6)$$

である。反射法地震探査では、一般的に、 θ は最大30度程度が目安である。藤井⁵⁾ は、AVOに関して、式(4)への $\sin^2 \theta$ と $\tan^2 \theta \cdot \sin^2 \theta$ の寄与を考慮し、 θ が25度以内では、式(4)の β を省略して、さらに簡略化できるとした。すなわち、式(4)の第1項を P として、

$$R_{PP}(\theta) \approx P + \alpha \sin^2 \theta \quad (7)$$

と書くことができ、式(2)は $\sin^2 \theta$ の一次方程式に帰着され、 P は式(7)の切片であり、 α は式(7)の傾きとなる。

P波およびS波の反射係数 P および S を近似的に、

$$\begin{aligned} P &= R_{PP}(\theta=0) \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_P}{V_{Pa}} + \frac{\Delta \rho}{\rho_a} \right) \\ S &\approx \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_S}{V_{Sa}} + \frac{\Delta \rho}{\rho_a} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

とし、 θ を25度以下、ポアソン比を $\sigma_a \approx 1/3$ とした場合、さらにポアソン比の変化 $\Delta \sigma$ に関する近似式：

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma_a} = \frac{4}{3} \left(\frac{\Delta V_P}{V_{Pz}} - \frac{\Delta V_S}{V_{Sz}} \right) \quad (9)$$

を用いることができ、式(8)の2式が関係付けられ、

$$\alpha = P - 2S \quad (10)$$

となる。このときS波の反射係数 S およびポアソン比の変化率 $\Delta \sigma / \sigma_a$ は、

$$\begin{aligned} S &= (P - \alpha)/2 \\ PR &= \frac{\Delta \sigma}{\sigma_a} = \frac{4}{3} (P + \alpha) \end{aligned} \quad (11)$$

と表すことができ、式(7)の切片 P と傾き α から推定できることとなる。

3. 試験概要と結果

(1) 発振・受振配置

HSPおよびAVOで用いた発振孔および受振孔位置の平面図を図-1に示す。切羽中心を原点とし、後方をマイナスで表示している。H1~H5は坑壁に設けたHSP用発振孔であり、Rcv1~Rcv12およびRcv13~Rcv24はHSP用受振器設置位置で、24箇所である。A1~A4は坑壁に直交するように設けたAVO用発振孔および受振孔で、それぞれの諸元を表-1に示す。当初、切羽前方50m程度を見込んで、23m程度の削孔長（坑壁からの深度）を予定していたが、削孔ビットの磨耗により、削孔が困難となり、表-1に示す削孔長となった。

AVOでは、 θ が25度以内という制限を上述した。 探査深度 L は、削孔長を d とすれば、

$$L = d / \tan \theta \quad (12)$$

であり、 d が23mの場合は、AVOの探査深度はおよそ50m程度となる。 今回の研究では、削孔長は平均12.55mなので、トンネル半径4.85mを加えて、測定長としては片側で17.4mであり、探査深度は37m程度となった。

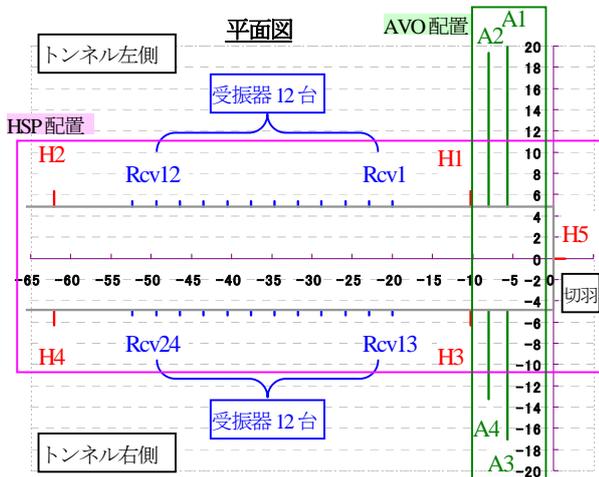


図-1 HSPおよびAVO発振孔および受振孔位置

表-1 HSPおよびAVOの発振孔および受振孔の諸元

探査法	発振孔	受振孔	発破回数	爆薬量 g
HSP	H1~H4(片側)	Rcv1~Rcv24	4	100
	H5(切羽)		1	50
	孔種	坑壁削孔長 m	角度 °	高さ m
	発振孔(両側)	1.5	下向 5	0.6
	発振孔(切羽)	1.5	下向 5	0.6
	受振孔(両側)	0.5	水平	0.6
AVO	発振孔	受振孔	発破回数	爆薬量 g
	A4 (鋼管)	A1 (GFRP)	7	100,50
	A2 (鋼管)	A3 (GFRP)	13	100,50
	A1 (GFRP)	A3 (GFRP)	13	100,50
	A3 (GFRP)	A1 (GFRP)	1	50
	孔種	坑壁削孔長 m	角度 °	高さ m
	A1-FIT管 (AGF-GFRP)	15.1	下向 5	0.65
	A2-鋼管 (AGF-鋼管)	14.6	下向 5	0.65
A3-FIT管 (AGF-GFRP)	12.2	下向 5	0.65	
A4-鋼管 (AGF-鋼管)	8.4	下向 5	0.65	

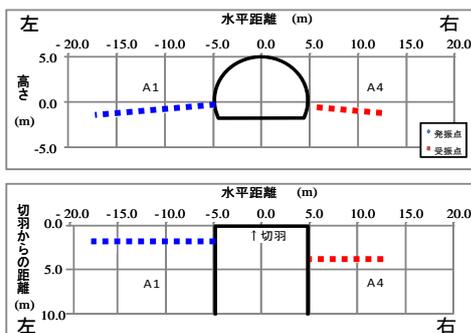


図-2 AVO発振・受振例 (ケースNo. 1)

(2) 実施状況

写真-1ではAVO用受振孔および発振孔の状況を、写真-2では坑壁に金属棒を埋め込み、3成分のジオフォンを設置した状況を、写真-3ではAVO用受振孔内に連結した hidroフォンを設置している状況を、それぞれ、示す。また、図-2に、AVOの発振・受振のケースNo.1の例を示す。ケースNo.1は受振孔をA1 (AGF-GFRP)、発振孔をA4 (AGF-鋼管)とした場合、ケースNo.2は受振孔をA3 (AGF-GFRP)、発振孔をA2 (AGF-鋼管)とした場合、ケースNo.3は受振孔をA3 (AGF-GFRP)、発振孔をA1 (AGF-GFRP)とした場合である (表-1 参照)



写真-1 A1, A2(左)およびA3, A4(右)受振孔・発振孔状況

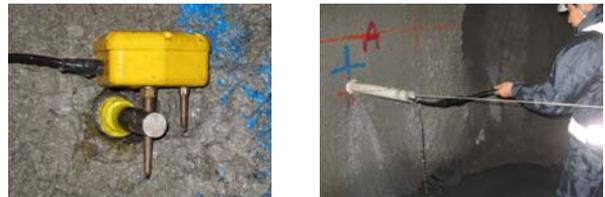


写真-2 Rcv1~24位置受振器 写真-3 A1孔受振器 (ジオフォン) 設置状況 (hidroフォン) 設置状況

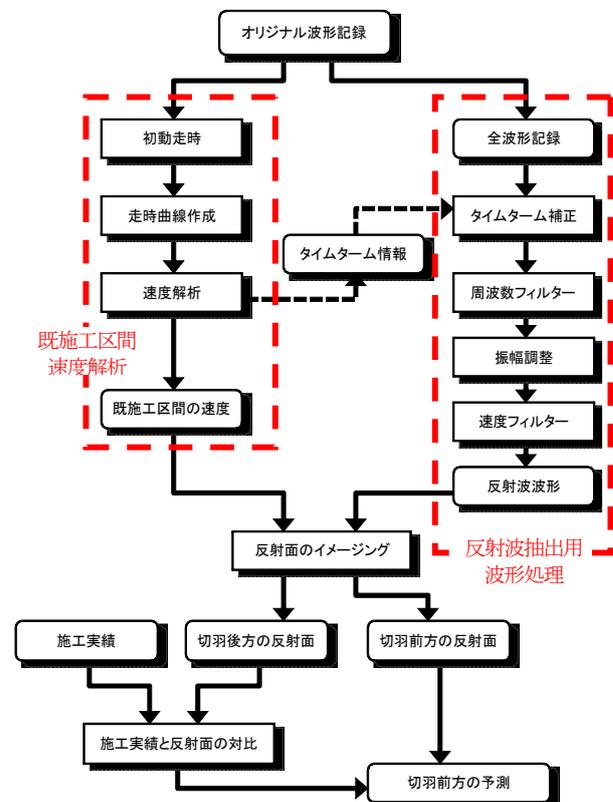


図-3 HSP探査のデータ処理フロー

AVOの発振孔・受振孔は23mの削孔予定であり、裸孔の場合保孔が必要のため、長尺先受け工法に使用されるφ76のAGF鋼管およびGFRP管を使用した。2種の管を使用したのは、材質による計測波形への影響を調べるためであるが、実際には有意な差異は見られなかった。

(3) HSP解析手順

受振孔Rcv1～Rcv24での受振データは、通常のHSP解析を行った。また、A1およびA3での受振データはAVO解析を実施した。HSPデータ処理フローを図-3に示す。

表-2に、地震波反射法で用いる基本信号処理の諸元を示す。ここで、「イメージング処理」は、マイグレーション処理とも言われ、地震波の反射点（面）を特定する処理であるが、その際に、走時時間を距離に変換するために速度が必要となる。図-4に、HSPデータおよびAVOデータの解析・解釈のフローを示す。

(4) HSP解析結果

図-5に坑壁両側12箇所ずつ設置した受振器により得られた未処理波形を示す。(a)に示す波形はH1で起振したHSPデータ、(c)に示す波形はH5で起振したHSPデータであり、起振位置は受振位置群（Rcv1～Rcv24）の前方にある。一方、(b)に示す波形はH2で起振したHSPデータで、起振位置が受振位置群の後方にある（図-1参照）。

表-2 基本信号処理の諸元

項目	パラメータ
AGC (Automatic Gain Control)	ゲート長 25 ms
周波数フィルター	120～500 Hz
デコンボリューションフィルター	Spiking
反射波イメージング速度	5.0 km/s

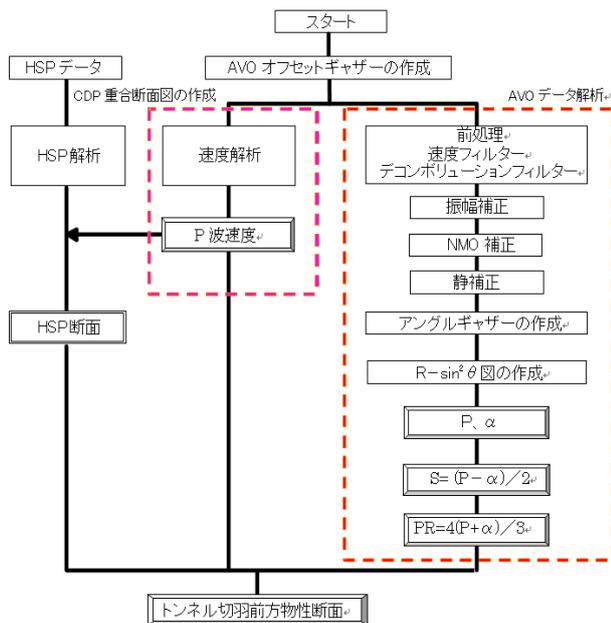


図-4 HSPおよびAVOデータ解析処理フロー

図-5 (c)に示すように、赤線はP波の初動で、その他S波および表面波と考えられる波群が認められ、その速度は 2.0km/secおよび 1.7km/secである。

HSPの解析結果を図-6に示す。上図が断面図であり、下図は平面図である。切羽方向をZ軸、坑壁方向をY軸、上下方向をX軸とする。反射面が7箇所抽出された。

また、坑壁両側で得られたHSPデータを用いたトンネル坑壁に沿う弾性波走時解析によれば、切羽後方9mの受振器を境に、切羽側で 5.0 km/sec、坑口側で 4.0～4.2 km/secであった。

(5) AVOデータ速度解析

速度解析には、定速度重合法を用いた。RMS速度は、

$$V_{RMS,n} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}} \quad (13)$$

として得られるため、Dixの式⁶⁾：

$$V_{RMS,n} = \sqrt{\left(V_{RMS,i}^2 \cdot \sum_{j=1}^i t_j - V_{RMS,i-1}^2 \cdot \sum_{j=1}^{i-1} t_j \right) / t_i} \quad (14)$$

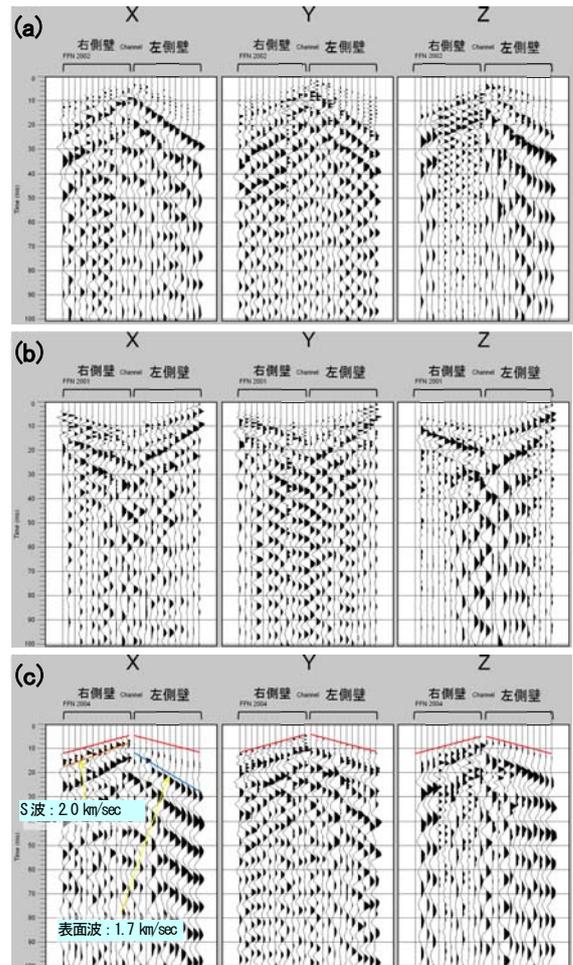


図-5 HSPデータの未処理波形

(起振点 a:H1, b:H2, c:H5, X,Y,Z:軸方向/図-6参照)

により区間速度へ変換した．ここで $V_{RMS,i}$ は $i-1$ 番目の反射面から i 番目の反射面までのRMS速度である．

表-3 AVOの解析結果

反射面番	切羽距離 m	傾き α	切片 P	S波 反射係数 S	ポアソン比 変化率 PR	地山 変化 予想
AVO-反射面①	16	0.3383	0.0691	-0.140	0.530	硬→軟
AVO-反射面②	34	0.1999	0.0662	-0.067	0.355	硬→軟
AVO-反射面③	47	-0.1562	0.0413	0.099	-0.153	軟→硬

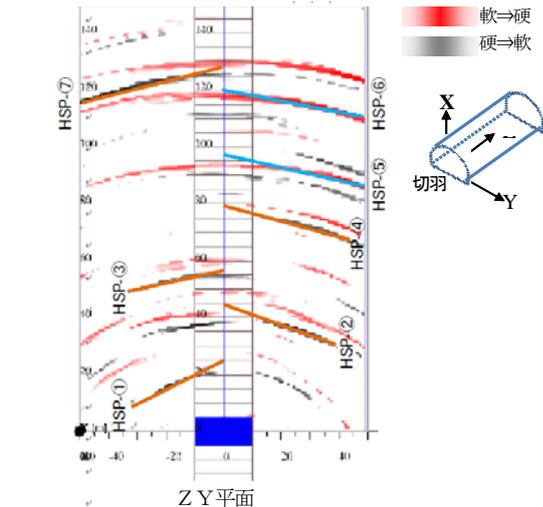
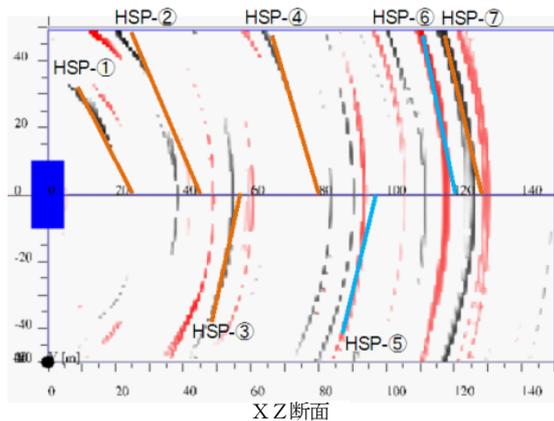


図-6 HSP解析結果（上図：断面図，下図：平面図）

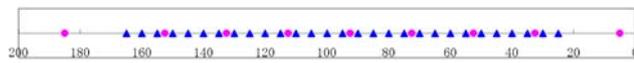


図-7 屈折法の発振・受振位置

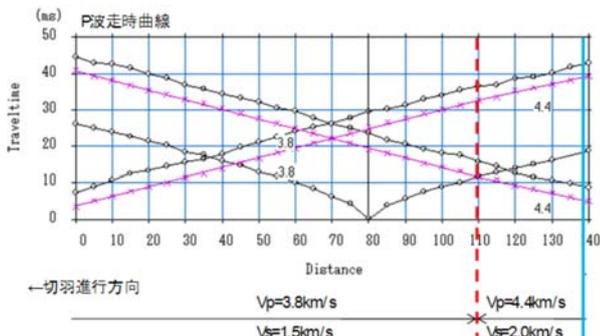


図-8 屈折法探査結果

(6) 屈折法解析結果

屈折法は、地下の弾性波速度構造を探索する方法であり、通常、トンネル施工前に地表面から実施し、施工計画を作成するデータとなる。

屈折法のレイアウトを図-7に示す。桃色●は発振位置、青色▲は受振位置である。受振位置は5m間隔で29箇所配置した。発振位置では、爆薬やハンマー打撃などを用いてP波以外にS波の発振も実施した。

図-8に屈折法探査の解析の結果を示す。事前の検証実験実施時の切羽位置から切羽進行方向28.7mまでの区間は $V_p=4.4\text{km/s}$ 、 $V_s=2.0\text{km/s}$ 、この区間の前方は $V_p=3.8\text{km/s}$ 、 $V_s=1.5\text{km/s}$ であった。

(7) AVO解析結果

速度解析結果をもとに、CDP重合を行った結果を図-9に示す。AVO-反射面①が7 msec付近に、AVO-反射面②が15 msec付近に、AVO-反射面③が22 msec付近に、3箇所からの反射が認められる。また、上記3箇所の反射面について、 P を式(7)の切片として、 α は式(7)の傾きとして近似式から求め式(11)のS波の反射係数 S およびポアソン比の変化率 $\Delta\sigma/\sigma_a$ を求めた(図-10参照)。表-3にAVO解析結果をまとめた。

4. 考察

HSP探査による推定P波速度を用いたイメージング(図-6参照)は推定にとどまる。そこで、上記の屈折法探査による地山P波速度 $V_p=4.4\text{km/s}$ を用いて、再解析を行った。図-10に示すように、この再解析により、HSPの解析で得られたHSP-反射面①～⑦の7面を検討し、4面とした。また、図-10にAVO、屈折法の結果を併記した。HSP反射面①'～HSP反射面④'のうちAVO-反射面②がHSP反射面①'と対応していることが分かる。 S と PR は、 $\sin^2\theta$ と $R_{PP}(\theta)$ のプロットから近似的に式(7)の P と α を求め、式(11)で計算した。屈折法のポアソン比は V_p/V_s から求めた。

図-10に示したように、AVOデータでは測線長が原因で参考部分を加えても切羽前方40m程度であったため、HSPデータや屈折法のデータの一部との比較となった。AVO-反射面②では、ポアソン比の変化率がプラスであることから、ポアソン比は増加し、P波速度は減少し、S波反射係数は負であるため、AVO-反射面①後から、地山がさらに軟弱化となると推定できる。

一方、AVO-反射面③の反射面では、ポアソン比変化率がマイナスであるから、ポアソン比は減少し、また、S波反射係数は正であるため、AVO-反射面③の反射面以降、地山が硬質化すると推定できる。また、AVO-反射

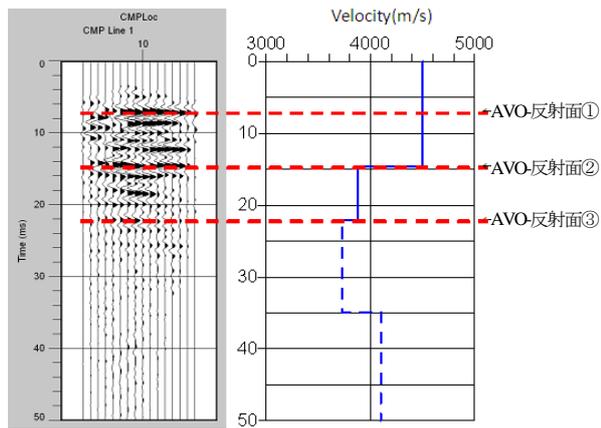


図-9 CDP重合結果と反射面の特定

(左：速度解析結果；右：発振・受振ケースNo. 1)

面③までのAVOの速度は、屈折法で得られた速度とほぼ一致した。さらに、AVOから得られた弾性波速度分布は、AVO-反射面①やAVO-反射面③あたりの地山観察による地質変化と整合性が確認された。

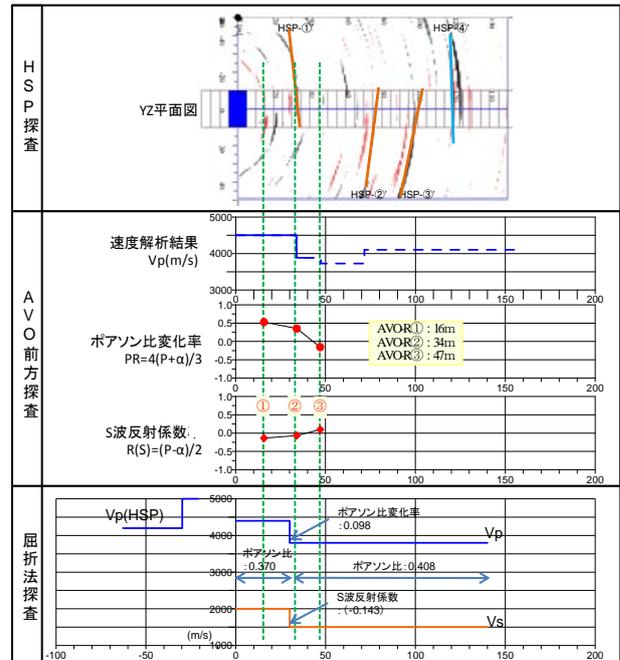


図-10 HSP, AVO及び屈折法の探索結果の比較

5. まとめ

従来の弾性波切羽前方探査法に比べて、切羽前方の反射面位置を精度良く捉え、また、反射面での物性変化を捉える目的で、トンネル坑壁に発振孔・受振孔を配置したHSPおよびトンネル軸に直交する発振孔・受振孔を配置したAVOを同位置で実施した。それらの結果と、切羽が調査領域を通過後実施した屈折法の解析結果とを比較検討した。本探査法で得られた反射面でのS波の反射係数やポアソン比の変化率は、屈折法の結果と整合性があり、本探査法の有効性が確認できた。

今後はさらに適用事例を増やし、本探査法の実用性を高めていきたい。

参考文献

- 1) 例えば、蔵谷他：切羽前方探査を目的とした高精度弾性波探査の実施例，土木学会第 64 回年次学術講演会，VI-290，p 579-580，2009.
- 2) 三谷一貴，友野雄士，青木智幸，山上順民，今井博，トンネル切羽前方弾性波反射法探査における速度解析について，土木学会第 66 回年次学術講演会，III-093，p 185-186，2011.
- 3) 藤井康友，『AVO 解析』，物理探査，第 45 巻，第 4 号，318-327，1992.
- 4) Aki, K. and Richards, P.G.: Quantitative Seismology Theory and Methods, p.932, W. H. Freeman and Co., 1980.
- 5) Shuey, R. T.: A simplification of the Zoeppritz equations, *Geophysics*, vol.50, 609-614, 1985.
- 6) Dix, C. H.: Seismic Velocity from Surface Measurements, *Geophysics*, vol.20, 68-86, 1955.

EXPLORATION METHOD FOR ROCK PROPERTY IN FRONT OF TUNNEL FACE BY ELASTIC WAVE AMPLITUDE USING A SURVEY LINE PERPENDICULAR TO THE TUNNEL AXIS

Hiroshi IMAI, Masahito YAMAGAMI, Tomoyuki AOKI,
Kazuki MITANI, Toru TAKAHASHI, Takao AIZAWA

To estimate the locations of seismic reflection planes ahead of a tunnel face, a field experiment was carried out, using a transmitter-receiver alignment prepared near the tunnel face in the direction perpendicular to the tunnel axis. The accuracy of estimation was then verified, when the tunnel excavation reached the point of interest. As a result, it was found that the exploration technique used would be effective. The method also enabled to estimate the changes in the reflection coefficients of shear waves and Poisson's ratio.