

# 横断測線を用いたトンネル切羽前方弾性波探査法の開発

大成建設株式会社 正会員 ○今井 博  
 大成建設株式会社 正会員 山上順民  
 大成建設株式会社 正会員 友野雄士  
 大成建設株式会社 正会員 青木智幸

## 1. はじめに

山岳トンネルの工事で、100~150mの切羽前方の地山状況を調査するためにTSP法やHSP法などが実施される。しかし、特に、支保パターンを決めるために重要な弾性波速度に関するTSP法の出力が疑問視された(三谷他<sup>1)</sup>)。その解決法として、山上他<sup>2)</sup>および今井他<sup>3)</sup>は、トンネル軸に直交する発振孔・受振孔を配置する方法(Tunnel Transverse-array Seismic Profile. 以下、TTSPと呼ぶ)を実験し、HSP法と併用して速度変化や物性の変化の抽出方法を検証した。

## 2. 目的

上記実験で残された課題は、①削孔深度の延長法、②高品質のHSPデータを取得するための受振器設置方法、③HSPによるS波の取得方法と反射面におけるTTSP法への寄与方法、である。これらの課題を解決する目的で、再度実験を実施した。

## 3. 実験概要

実験レイアウト(平面図)を図2.1に示す。TTSPの発振孔A2, A4(鋼管φ76)・受振孔A1, A3(鋼管φ76)およびHSPの受振孔HR1~6, 発振孔H1~24の配置を示している。切羽は横軸の右端0の位置である。ただし、火薬による起振であるため、TTSPの発振孔は5°傾斜させ、HSPの発振孔は10°傾斜させた。

課題②の検討では、HR5位置で、HR5-1:側壁に0.5m差し込んで固定した鉄筋棒に受振器を固定する方法、HR5-2:側壁に設けた0.5m孔内にモルタルで埋めて固定する方法、HR5-3:側壁に設けた3m孔内に受振器を設置し、保護管の外側をモルタルで固定する方法、HR5-4:側壁に設けた3m孔内に受振器を設置し、孔内をモルタルで固定する方法、の4種の方式を試行した。

発振孔A2およびA4では1m間隔50gの爆薬で発振した。受振孔A1およびA3では1m間隔で設置したハイドロフォンで受振した。

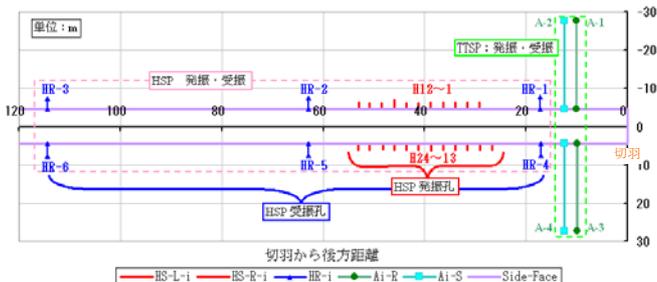


図 2.1 TTSP および HSP の発振孔受振孔配置 (平面図)

## 4. TTSP の基本原理

TTSPの基本原理は、速度解析<sup>4)</sup>とAVO法<sup>5)6)</sup>である。特にAVO法では、反射面での反射角θによる反射係数 $R_{pp}$ の変化を扱い、反射面での物性の変化を捉えることである。 $\sin^2 \theta$ とP波の反射係数 $R_{pp}$ の間に、

$$R_{pp} \approx P + \alpha \sin^2 \theta \quad (1)$$

という一次式の関係がある<sup>3)6)</sup>。ここで、Pは反射面への直接入射での反射係数で、これらからS波の反射係数 $R(S)$ およびポアソン比の変化率PRが、次式で推定できる<sup>6)</sup>。この議論は、今井他<sup>3)</sup>や藤井<sup>6)</sup>に詳しい。

$$R(S) = (P - \alpha) / 2$$

$$PR = \frac{\Delta \sigma}{\sigma_a} = \frac{4}{3}(P + \alpha) \quad (2)$$

## 5. 実験結果

### 5.1 削孔長

課題①については、削孔ビットを新たに製作し、25m、掘削可能であることを確認した。

### 5.2 受振設置法

4種の受振器設置方式で測定した生波形を図5.1に示す。方式①や方式②は明らかにノイズが多い。

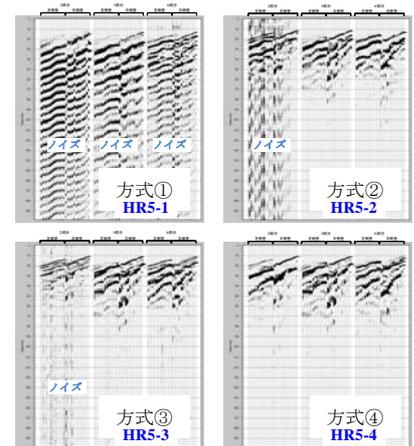


図 5.1 受振器設置方法の比較

方式②は1成分にノイズがみられるが、他は方式③と同等な品質である。方式②のノイズはモルタルの充填の際、上部にできた隙間が原因と考えられる。方式④が最も良かったが、経済性や設置時間から、モルタルの充填を改善した③が妥当と考えられる。

### 5.3 S波の抽出

受振孔HR-3およびHR-6は、切羽に向かって後方に進む弾性波について、S波の分離を図って、トンネル側壁に沿うP波速度だけでなくS波速度を求めるために設置した。図5.2にHR-3およびHR-6における波形からのS波の抽出状況を示す。いずれも、変換S波の存在の可能性もあり波界が乱れている。さらに、HR-2およびHR-5-3での波界では、発振・受振の距離が短いこともあり、S波はP波のコーダ部分で影響を受けている。一方、HR-3およびHR-6の波界では、S波の可

キーワード トンネル, 切羽前方探査, TTSP, S波, 弾性波, 反射法

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1 大成建設(株)技術センター TEL: 045-814-7237

能性がある初動が確認でき、これらから、弾性波速度を求めると、 $V_p = 3.6 \text{ km/sec}$  および  $V_s = 1.2 \text{ km/sec}$  となり、計測位置でのポアソン比は 0.438 と推定できる。

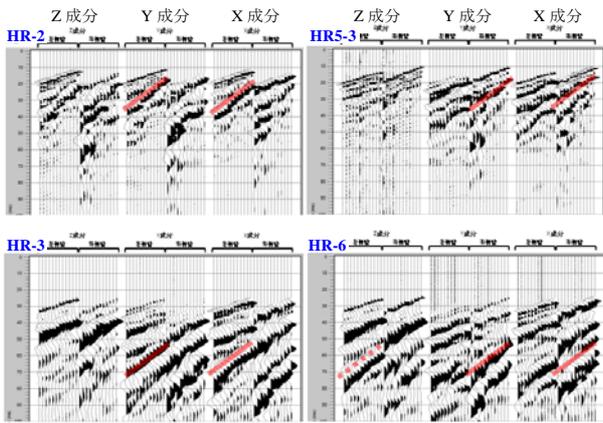


図 5.2 S 波の抽出 (受振孔: HR2, HR5-3, HR-3, HR-6)

5.4 式(1)の  $P$  と  $\alpha$  の抽出

図 5.3 は、同じ反射角度の波群を重合し、図にプロットして近似曲線から  $P$  と  $\alpha$  の抽出した例である。

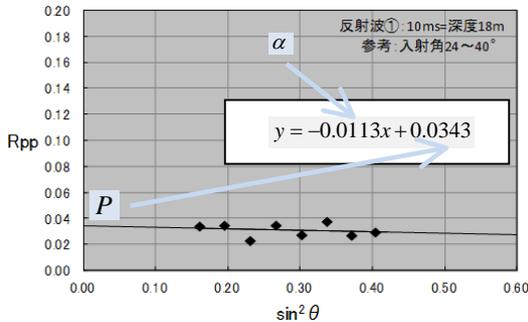


図 5.3 式(1)の  $P$  と  $\alpha$  の抽出例

5.5 反射面および  $P$  と  $\alpha$  のまとめ

図 5.4 に TTSP で求めた 3 箇所反射断面と区間速度を示す。5.4 節のように求めた  $P$  および  $\alpha$  から、式(2)で、反射断面ごと求めた  $R(S)$  および  $PR$  を表 5.1 にまとめる。区間速度の結果から、地山が切羽から 18m 以降に良くなり、36m から不良に変化するものの、52m 以降また良くなる、と解釈できる。

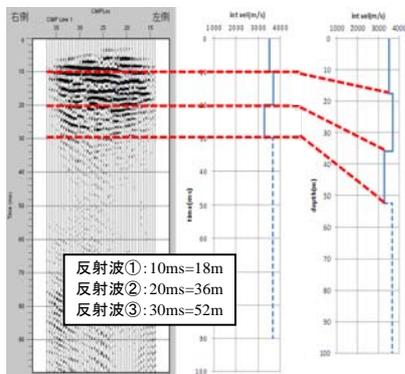


図 5.4 反射断面と弾性波速度分布

6. 考察と結論

図 6.1 に HSP・TTSP および前方予測結果の確認のために実施した屈折法および切羽評価点 (上向き不良, 下向き良好), 地質平面図 (塗り部, 線は地山

不良部) を併記した。TTSP の結果は、屈折法の結果および切羽観察・地質平面図と非常に良い整合性がある。また、HSP の結果 (P 波・S 波) から求めたポアソン比 0.438 (5.3 節) および表 5.1 で示したポアソン比の変化率からポアソン比の空間分布を計算した (図 6.1)。その結果は、切羽観察・地質平面図との良い整合性が得られた。このように、TTSP は HSP と併用することで岩盤物性の評価の可能性があり、トンネル切羽探査技術として有効な手段であると考えられる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 山上順民, 今井博, 城まゆみ, 青木智幸, 友野雄士 三谷一貴, 切羽前方探査の精度比較実験, 土木学会第66回年次学術講演会, III-091, p181-182, 2011.
- 3) 今井 博, 山上順民, 青木智幸, 三谷一貴, 高橋 亨, 相澤隆生, 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, 第 41 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 講演番号19, p105-110, 2012.
- 4) 図解物理探査, 物理探査学会, p 3-18, 1989.
- 5) Shuey, R. T.: A simplification of the Zoeppritz equations, *Geophysics*, vol.50, No.4, 609-614, 1985.
- 6) 藤井康友, 『AVO解析』, 物理探査, 第45巻, 第4号, 318-327, 1992.

表 5.1 式(1)による  $\alpha$  と  $P$  および式(2)による  $R(S)$  と  $PR$

反射面 <sup>①</sup>	傾き $\downarrow$ ( $\alpha$ ) <sup>②</sup>	切片( $P$ ) <sup>③</sup>	S波反射係数 <sup>④</sup> $R(S)$	ポアソン比 <sup>⑤</sup> 変化率 $PR$	AVO データ <sup>⑥</sup> 解析による <sup>⑦</sup> 地山の変化 <sup>⑧</sup>
反射面 <sup>①</sup> 深度 18m <sup>②</sup>	-0.0113 <sup>③</sup>	0.0343 <sup>④</sup>	0.023 <sup>⑤</sup>	0.031 <sup>⑥</sup>	軟→硬 <sup>⑦</sup>
反射面 <sup>①</sup> 深度 36m <sup>②</sup>	0.0282 <sup>③</sup>	0.0169 <sup>④</sup>	-0.006 <sup>⑤</sup>	0.060 <sup>⑥</sup>	硬→軟 <sup>⑦</sup>
反射面 <sup>①</sup> 深度 52m <sup>②</sup>	-0.004 <sup>③</sup>	0.0076 <sup>④</sup>	0.006 <sup>⑤</sup>	0.005 <sup>⑥</sup>	軟→硬 <sup>⑦</sup>

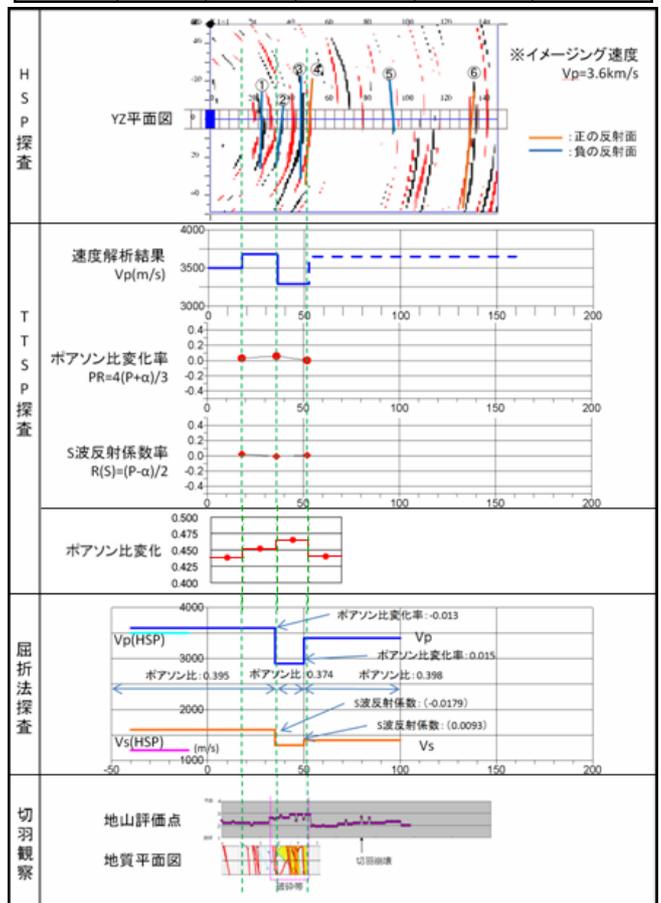


図 6.1 各探査の結果と屈折法および地山観察との比較