

3次元反射法弾性波探査による切羽前方探査

GEOLOGICAL PREDICTION AHEAD OF TUNNEL FACE BY THREE-DIMENSION REFLECTING ELASTIC WAVE METHOD

○吉野隆之¹⁾・山本松生¹⁾・篠川俊夫¹⁾・瀬谷正巳²⁾

Takayuki YOSHINO, Matsuo YAMAMOTO, Toshio SHINOKAWA and Masami SEYA

We introduced three-dimension TSP (Tunnel Seismic prediction) system, which is one of elastic wave reflection method for probing and predicting ahead of the tunnel face.

This system is able to locate strikes and dips of geological discontinuity (boundary, fault and fracture zone etc) on three dimensions and estimate mechanical properties of prediction areas. We can also grasp more exactly geological conditions ahead of the tunnel face.

In this paper, we report some application examples and problems to be solved at present.

Key Words: tunnel, 3D-TSP, geology, mechanical properties,

1. はじめに

複雑な地山を対象とする山岳トンネルの施工において、事前調査の経済的な制約などからトンネル全線にわたり詳細な地質情報を得ることは困難であり、施工中に切羽前方の地山状況を予測することは、工事の安全性や経済性を高めるため不可欠となりつつある。

施工中の調査においては、工事の安全性や経済性はもとより施工を妨げない切羽前方予測手法の確立が望まれており、特に湧水を伴う断層破砕帯や切羽が自立しない地質不良部の存在を掘削前に予測することは、トンネルの調査・施工技術の中で最も重要な課題の一つとなっている。

筆者らは、3次元反射法弾性波探査（以後3次元TSPシステム）を導入し、これまでに7件の実績を重ねてきた。このシステムは、切羽での作業時間が2時間程度と短く、施工を妨げないで行うことができる。また、3成分の波を解析することで地質不連続面の走向・傾斜がわかり、予測区間の地山物性値を試算することができる特徴を持つ。本報告は、適用事例を3例紹介し、このシステムの特徴や問題点等を明らかにする。

2. 3次元TSPシステムの概要

3次元TSPシステムは、従来の2次元TSPシステムを発展させたもので、山岳トンネルの坑内に1.5m程度の間隔でトンネルの片側側壁に設けた20数孔の発振孔から順次小発破を行い、地山の不連続面からの反射波をとらえ、切羽前方に存在する不連続面の位置を推定するシステムである（図-1）。

1) 正会員 佐藤工業（株） 土木本部技術部門
2) 正会員 佐藤工業（株） 中央技術研究所

従来のシステムでは、トンネルの軸方向と鉛直方向の2成分の反射波データだけを用いて解析を行うため、地質不連続面(地層境界、断層破碎帯等)の走向・傾斜を推定することが不可能であった。一方、3次元TSPシステムは、トンネル軸方向、鉛直方向および直交方向の3成分の反射波を使うことにより切羽前方の地山変化(地層境界、断層破碎帯等)を3次的に予測することが可能となった。また、切羽前方の弾性波速度や密度、ポアソン比等の地山物性値を推定することができることも大きな特徴となっている。

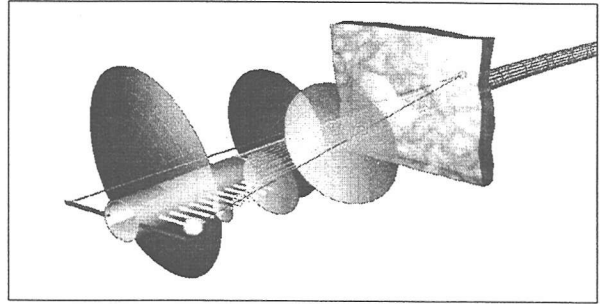


図-1 3次元TSPシステム概念図

以下に3次元TSPシステムの特徴を列記する。

- 1) X, Y, Zの3成分のデータが測定できる。
- 2) 地層境界や断層破碎帯などの地質不連続面の走向・傾斜をより正確に推測できる。
- 3) P波とS波の両方を解析に用いる。
- 4) 切羽前方地山の弾性波速度や弾性係数、ポアソン比などの物性値が推測できる。
- 5) 解析結果をビジュアルに3次元表示できる。
- 6) 測定・解析のソフトがWindowsNT上で動き、操作性が向上した。
- 7) 解析に要する時間が2時間程度から1時間程度に短縮された。
- 8) 測定装置が軽量・コンパクトとなり、取り扱い性が向上した。
- 9) 切羽前方100～150m程度先までの地山状況を予測できる。

これらの特徴は、先進ボーリングや他の物理探査より効率的で経済的であり、これからの活用が大いに期待される。次節より、適用事例を検討し、3次元TSPシステムの検証を行う。

3. 適用事例1(Tトンネル)

3.1 トンネル概要

事前調査(図-2)より本トンネルは、弾性波速度の高い足尾層郡の中を掘削していくとされたが、実際は、その上位の安山岩溶岩がトンネル計画高さにまで広がっており、測定時の切羽以前から安山岩溶岩が切羽を占めていた。トンネル計画高さ付近に、弾性波速度境界があることから、今後、風化した安山岩溶岩や自破砕状組織を呈する安山岩溶岩が切羽に現われる事が予想される。本事例では、切羽前方の安山岩の強度変化を予測するために3次元TSPシステムで前方探査を行い、同時に切羽進行に合わせて削孔探査システムを併用した。

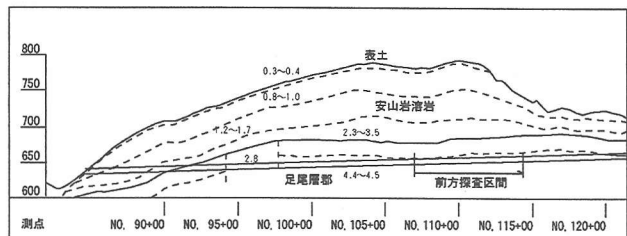


図-2 Tトンネル地質縦断図

3.2 予測結果

3次元TSPシステムによる予測結果を図-3に示す。予測結果に示した主な不連続面(図-3中の①～⑤)の位置と物性値を表-1に示す。得られた反射面と物性値から切羽前方の地山変化を図-3に示した①～⑤の反射面で区切り、以下のように予測した。

- ・ 切羽～①区間 (TD489～498) :
切羽と同等の強度の安山岩溶岩が続く。
- ・ ①～②区間 (TD498～519) :
岩質の変化は少ないが、クラッキーゾーンが続く。
- ・ ②～③区間 (TD519～540) :
前後に比べ僅かに密度が低くなる事から、風化帯もしくは自破碎状の安山岩溶岩が現われる。
- ・ ③～④区間 (TD540～552) :
切羽と同等の安山岩溶岩が現われる。
- ・ ④～⑤区間 (TD552～590) :
目立った岩質の変化は無いが、風化帯が続く。
- ・ ⑤以降 (590～) :
地山の状態は回復する。

上記の予測結果を削孔探査の打撃エネルギーと比較すると (図-4)、非常に良い関係が見られる。

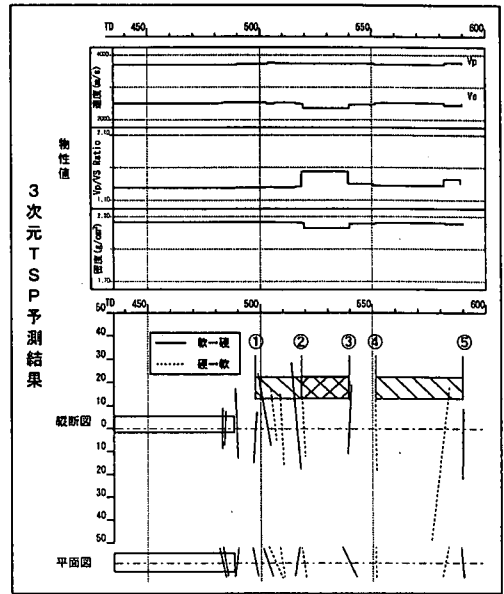


図-3 Tトンネル予測結果

表-1 予測区間物性値

	反射面属性	TD	Vp (m/msec)	Vs (m/msec)	Vp/Vs Ratio	密度 (g/cm ³)
①	軟→硬	498	3697	2498	1.48	2.29
②	硬→軟	519	3702	2343	1.58	2.23
③	軟→硬	540	3696	2464	1.50	2.27
④	硬→軟	552	3693	2479	1.49	2.28
⑤	軟→硬	590	3703	2469	1.50	2.28

削孔探査は、トンネル現場で従来から用いられてきた“探りノミ”をシステム化したもので、油圧ドリルによる削孔の際に記録された削孔速度、フィード圧、回転圧、打撃圧といった削孔データから掘削エネルギーを計算により求める。その掘削エネルギーは、油圧ドリルが地山の岩盤を破壊するのに必要としたエネルギーであり、岩盤の硬さ、亀裂の密度、風化の程度などによって左右される。したがって掘削エネルギーとTSP予測結果を比較する事で、実際の地山の状態とTSPで予測された結果を直接比較することができる。

図示したように、TSPで亀裂帯や風化帯であると予測した位置および幅と、削孔探査エネルギーの低い地山とが非常によく一致した。

当トンネルのような安山岩が連続して続く場合や地山変化の境界が不明瞭な場合は、地質不連続面が幾何学的な面を持たない場合が多く、TSPの原理上、予測精度が低下すると考えられたが、結果的には、地山変化の位置と幅を数m未満の範囲で正確に予測する事ができた。しかし、得られた物性値の変化は非常に小さく、地山強度や支保の選定といった定量的な判断をすることができなかった。

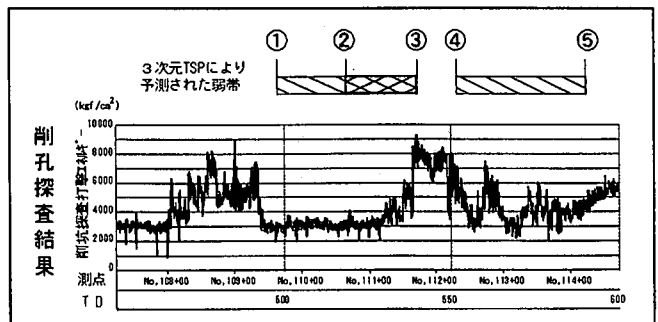


図-4 削孔探査結果とTSP予測結果

4. 適用事例2 (Hトンネル)

4. 1 トンネル概要

予測範囲周辺の地質は、図-5に示すように切羽では変斑レイ岩が分布しており、以後、輝緑凝灰岩、粘板岩が切羽に現われることになっている。

変斑レイ岩は、暗灰色を呈し硬質かつ緻密な岩盤であるが、開口亀裂が発達しているところがある。輝緑凝灰岩は部分的に暗紫色をおび、しばしば粘板岩層を挟在し泥質となる。粘板岩は、片状構造を有し片理に沿った亀裂が発達している。

TSP試験は、地層境界の位置、施工上問題となるような風化帯や脆弱帯等の有無、それらの幅および性状を調べるために行った。

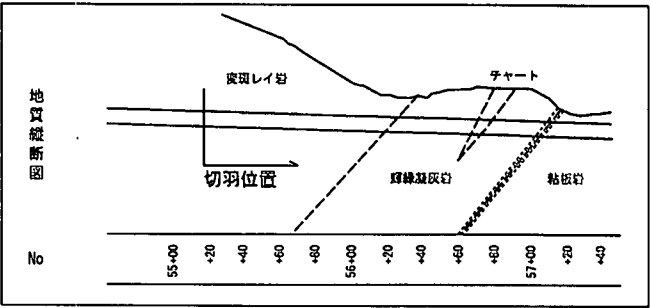


図-5 Hトンネル地質縦断面図

4. 2 予測結果

TSP予測結果 (図-6) から以下のように予測した。

- ①～④の反射面間は切羽と同様に変斑レイ岩が硬軟を繰り返す風化帯で、その幅は28mである。
- 変斑レイ岩と輝緑凝灰岩の境界は、算出された密度の変化から④の反射面位置であり、切羽前方約70m (TD743m) に存在する。
- ⑥の反射面は、物性値の変化が非常に小さいことから、地質縦断面図に示されているチャート層に変わる地層境界ではなく、輝緑凝灰岩の亀裂部である。
- ⑦の反射面 (TD819) は密度が大きくなるなど物性値の変化が大きく硬から軟への変化を示す反射面で有ることから、地層境界を捕らえたものであり、風化が進行している地山である。

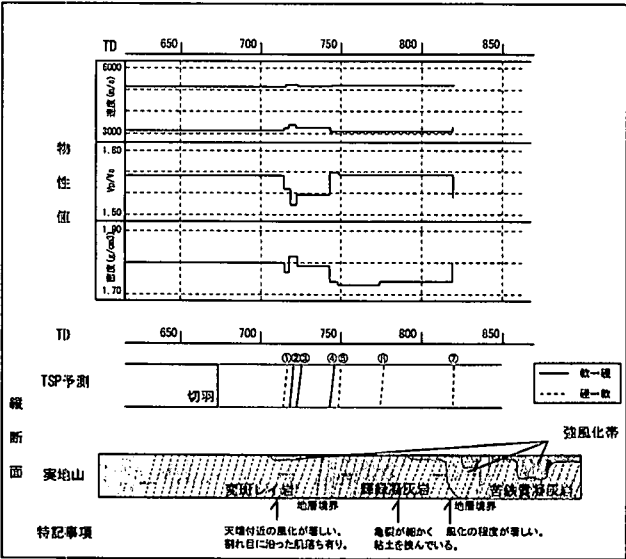


図-6 Hトンネル予測結果および実地山状況

予測結果と実際の地山変化を掘削距離 (TD) を基準に比較する (表-2)。

- ①～④の反射面間で予測した変斑レイ岩の風化帯の幅はほぼ正確に予測されているが、TDで7mのずれがあった。
- ④反射面位置 (TD743m) で変斑レイ岩と輝緑凝灰岩の地層境界が現われると予測したが、実際は、TD737mで現われ、予測結果に6mのずれが見られた。

- ⑦反射面 (TD819) で予測した地層境界とその後の強風化帯については、実地山では、地層境界ではなく輝緑凝灰岩の強風化帯であり、亀裂が非常に発達していた。この区間はウレタン注入をしながらブレーカ掘削を行ったほど風化が進んでいたため物性値が大きく変わったものと思われる。反射面以後の強風化帯としては、非常に高い精度で予測できた。
- この現場の地質は、先のTトンネルとは違い、明瞭な地質境界が存在する。このような地質境界は、高い精度で予測できることがわかった。

5. 適用事例3 (Iトンネル)

5. 1 トンネル概要

トンネル施工区間においては、濃飛流紋岩類が分布している。濃飛流紋岩類は主に流紋岩、凝灰角礫岩、溶結凝灰岩からなる。流紋岩溶岩は、堅硬緻密であるが節理を伴っている。凝灰角礫岩は塊状で風化すると軟質化しやすく、溶結凝灰岩は、風化すると亀裂が発達する。

事前調査では、今後2つの弾性波速度低速度帯の通過が予測される(図-7)。そこで三次元TSPシステムを使用して、その低速度帯の位置・幅および性状を確認することを目的として行った。

5. 2 予測結果

予測結果の2次元縦断図と、弾性波速度、 V_p/V_s および密度のグラフを実地山状況とともに図-8に示す。図-8から以下のように予測した。

- ①～② (TD1273～1297) の反射面までは、切羽に見られる流紋岩溶岩が風化し、節理や亀裂などを伴いながら硬軟を繰り返す。
- ②～③ (TD1297～1313) の区間は、徐々にP波速度や密度が高くなっていることから、流紋岩の節理・亀裂の幅が次第に大きくなり良好な地山になる。
- ③～④ (TD1313～1345) の区間は、緻密で硬い地山となる。
- ④ (TD1345) の反射面は物性値の変化が大きく、⑤の反射面まで不良な強風化した地山が続く。
- ⑤ (TD1388) 以降の反射面密集帯は、弾性波速度および密度の変化が著しいことか

表-2 予測結果・実地山変化比較表

TD	TSP予測結果	切羽観察記録
650	674 予測時切羽	地質区分 674 予測時切羽
700	715 ①反射面 強風化帯 743 ④反射面	変成レイ岩 708 風化変質が強く強度低下。茶褐色に変色し崩落が見られる。 737
750	774 ⑥反射面 亀裂部	輝緑凝灰岩 783 天端部は亀裂が発達。間隔は10cm程度。亀裂に粘土を挟む。 783 天端部は風化が激しく亀裂が発達。間隔は10cm程度。亀裂に粘土を挟む。
800	819 ⑦反射面 強風化帯	820 強風化帯でブレーカ掘削を行う。亀裂が連続しウレタン注入を行った。 837
850		苦鉄質凝灰岩

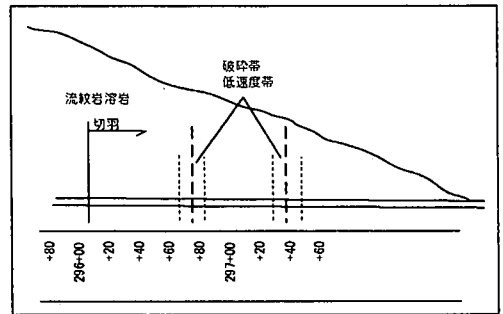


図-7 Iトンネル地質縦断図

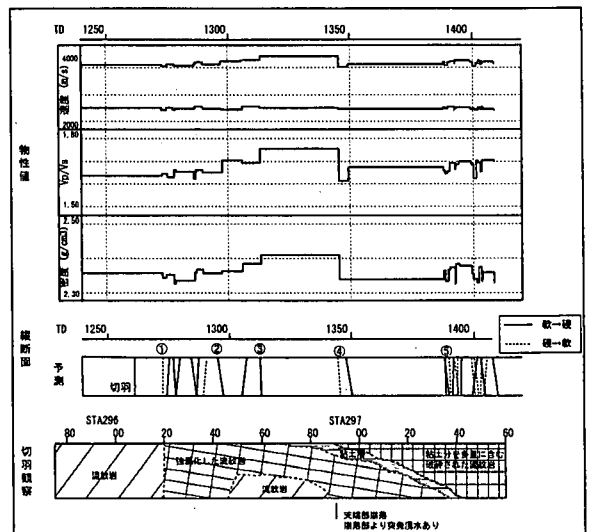


図-8 Iトンネル予測結果および実地山状況

ら、流紋岩破砕帯である。

- ・ 予測目的であった2つの低速度帯は、④～⑤までの風化脆弱帯と、⑤付近の破砕帯として切羽に現われる。

予測したような地山変化が予測どおりに実地山でも現われ、予測精度が高いことが確認された。④の反射面として捕らえた層厚約2mの粘土層は、切羽に現われた位置・幅は正確に予測できていたが、その傾斜はゆるく、予測とは大きく異なっていた。TSPは反射弾性波を解析に使うため、トンネルに対し緩やかな傾斜を持つ地層境界や、貫入岩帯・不整合などの地層境界の予測はTSPの基本原則から予測困難な場合が多く、十分な注意が必要であることを示している。

6. まとめ

地山状況の異なる3つの事例を紹介したが、これまでの実績より次のことが言える。

- ・ 予測区間は切羽前方100m～150m可能で、予測精度も高い。
- ・ 地質不連続面の位置・幅・走向・傾斜をほぼ正確に予測できる。
- ・ 層理面を持たないような地山に対しても不連続面（破砕帯や風化帯）の予測ができる。
- ・ トンネルに対し緩い角度で交わる地質不連続面は、位置や幅についての予測はある程度可能であるが、走向・傾斜には、違いが生じやすい。
- ・ 物性値が得られることで、地層の変化や風化の程度が地質学的判断をもとに推定が行える。
- ・ 得られた物性値（特に弾性波速度）から、直接的に支保選定や補助工法の必要性を決定するには至っていない。
- ・ 得られた物性値が、実地山を反映してないことがまれに見られ、その原因を正確に把握していないが、その場合、地質学的判断が重要となってくる。

以上が現在の実績から言える3次元TSPシステムの特徴であるが、問題点となる事象を解決していくためにも、より積極的な活用を展開したいと思っている。最終的には、不連続面の予測にとどまらず、地下水の有無や、支保・補助工法の選定といった定量的な予測を信頼できる結果として得られるように発展させていきたいと考えている。