

# 13. 三次元TSPシステムの現場への適用

佐藤工業(株)：山本 松生、瀬谷 正巳、  
\*吉野 隆之

## 1. はじめに

山岳トンネルにおいて掘削時に切羽前方の地質状況を把握することは、地山に適合する施工法や支保の選定、懸念される事象の対策など事前に準備することが可能となり、工事の安全性および経済性を高める重要な役割を果たすものである。

トンネル工事の設計段階おいての事前調査だけでは、経済的な制約などから施工上必要十分な地質状況が掴み切れていないのが現状であり、事前予測された地質の変化が、切羽面において、いつどのように現われてくるのかどうかは、施工において重要な情報である。したがって最近では、切羽の進行に伴い、または地山性状変化が予測される個所において、切羽前方の地山予測が行われるようになってきている。そして、それらの予測作業は常に、簡易性、明瞭性および経済性が求められるてきた。3次元 TSP (TSP : Tunnel Seismic Prediction )システムは、これらのニーズに答えることができるものと考えられる。

本稿は、3次元 TSP システムの概要を紹介するとともに、現場適用事例の予測結果と実際の地山状況との対比、現時点での予測精度や今後の課題等について報告する。

## 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)。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を3次元的に予測することが可能となった。

予測区間が切羽前方120~150mと長い上、作業および解析に要する時間が短いため先進ボーリングや、他の物理探査より効率的で経済的で

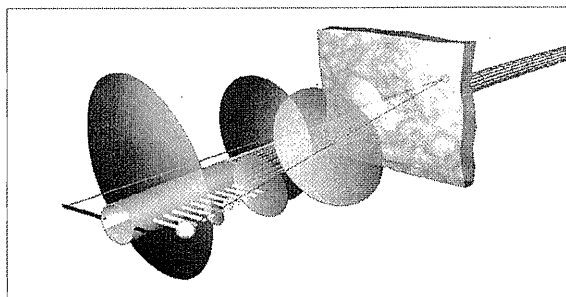


図-1 TSP 概念図

あり、予測結果を2次元および3次的に表すことが出来る。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出来ることも大きな特徴となっている。従来のシステムが定性的であったのに対し、3次元 TSP システムは定量的な判断が出来ることから、これからの活用が大いに期待される。

## 2. 3次元 TSP システム適用実績

3次元 TSP システムの現場適用実績は、現在までに6例である(表-1)。

これらの適用事例のうち、H東トンネルとIトンネルについて予測結果と実際の地山変化の対比を行う。

表-1 3次元 TSP システムの適用事例

No	名称	発注者	掘削方式	地質
1	Hトンネル	日本道路公団	発破工法	斑レイ岩、輝緑凝灰岩
2	Tトンネル	地方自治体	発破工法	安山岩
3	Aトンネル	北海道開発局	発破工法	粘板岩、硬砂岩
4	Aトンネル	北海道開発局	発破工法	粘板岩、硬砂岩
5	Hトンネル	日本道路公団	発破工法	片麻岩、流紋岩
6	Iトンネル	日本道路公団	発破工法	片麻岩、流紋岩

## 3. Hトンネル適用例

### 3-1. 地質概要

予測範囲周辺の地質は、図-2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狭在し泥質となる。

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。

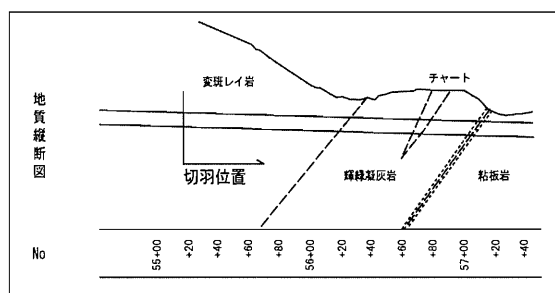


図-2 Hトンネル地質縦断面図

### 3-2. 予測結果

予測結果と実際の地山変化を縦断面比較図(図-3)と、各反射面間の地山物性値(表-2)

から以下のように予測した。 1) 事前調査で切羽より 100m 前方に予測されている変斑レイ岩と輝緑凝灰岩の境界は、算出された S 波速度および密度の変化から④の反射面位置であり、切羽前方約 70m に存在する。 2) ①～③の反射面は変斑レイ岩の風化帯である。 3) ⑥の反射面は、物性値の変化が非常に小さいことから、地質縦断図に示されているチャート層ではなく、輝緑凝灰岩の亀裂部である。 4) ⑦の反射面は密度が大きくなるなど物性値は良好な地山の値を示すものの、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るが、その地山は風化もしくは亀裂が発達している。

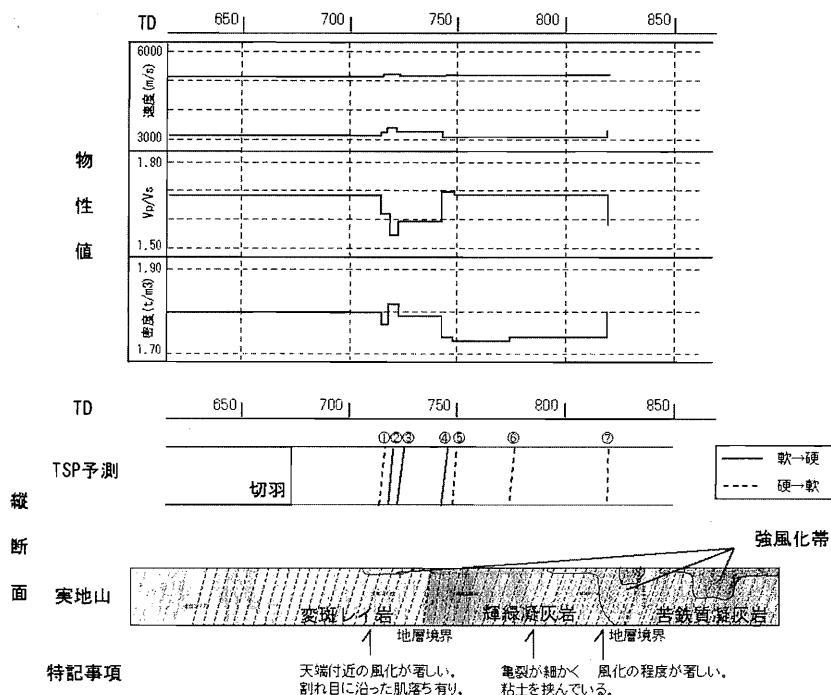


図-3 Hトンネル予測結果および縦断図

表-2 反射面間地山物性値

No	TD (m)	切羽から(m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Vp/Vs	密度 (t/m <sup>3</sup> )
①	715	41	5118	3159	1.62	2.77
②	718	44	5132	3311	1.55	2.82
③	723	49	5119	3219	1.59	2.79
④	743	69	5119	3029	1.69	2.74
⑤	748	74	5126	3033	1.69	2.73
⑥	774	100	5131	3036	1.69	2.74
⑦	819	145	5125	3244	1.58	2.80

\*No に示した物性値は、次の反射面までの物性値を示している。

### 3-3. 地山対比

予測結果と実際の切羽観察記録との比較を表-3に示す。予測では、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 で現れ、予測結果に6mのずれが見られた。①～④の反射面間で予測した変斑レイ岩の風化帯についても、幅はほぼ正確に予測されているが、地層境界同様7mのずれがあった。⑦反射面で予測した輝緑凝灰岩と苦鉄質凝灰岩の地層境界については、実際より20mほど手前に予測されたが、予測位置からの輝緑凝灰岩は、強風化を受けており亀裂が非常に発達していたためウレタン注入を施しながらブレーカ掘削を行った。予測では、⑦反射面以降亀裂が発達した強風化帯を予測していたことから、予測精度は良好であったといえる。

表-3 予測結果と地山変化の対比表

TD	TSP予測結果	地質区分	切羽観察記録
650	674 予測時切羽		674 予測時切羽
700	715 ①反射面 強風化帯 743 ④反射面	変斑レイ岩	708 風化変質が激しく強度低下。茶褐色に変色し肌落ちが見られる。 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。
800	819 ⑦反射面		820 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。
850	強風化帯	苦鉄質凝灰岩	837 強風化帯でブレーカ掘削を行い、亀裂が発達しウレタン注入を行った。

## 4. Iトンネル適用例

### 4-1. 地質概要

この地域は、古生代の飛騨変成岩類を基盤とし、その上部に中生代後期～古第三紀の濃飛流紋岩類が分布している。また、岩脈として新第三紀の貫入岩類が、飛騨変成岩類および濃飛流紋岩類を貫いている。

トンネル施工区間においては、濃飛流紋岩が分布している。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。

試験当日の切羽は、湧水もなく全体に

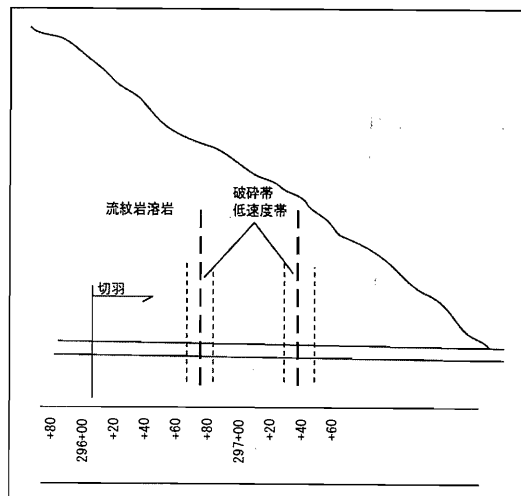


図-4 Iトンネル地質縦断面図

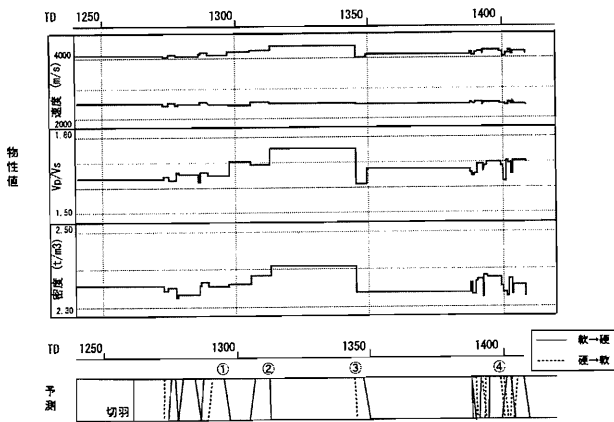
流紋岩溶岩が現われていた。流紋岩溶岩は堅硬であるが節理をともっており、その間隔は、70cm 程度から一部数 cm であった。節理の方向は、おおむねトンネル軸に対し、鋭角に交差し急角度の差し目を呈していた。

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-4）。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。また、切羽手前の複数の水抜き孔からは 10% 程度程度の湧水が見られることから地下水に対する予測も期待された。

#### 4-2. 予測結果

予測結果の 2 次元縦断面図と、弾性波速度、 $V_p/V_s$  および密度のグラフを図-5 に示す。

1) 切羽より②の反射面までは、切羽同様に流紋岩溶岩が、節理や亀裂などを伴いながら硬軟を繰り返す。 2) ②～③の区間は、P 波速度や密度が高くなっていることから、節理・亀裂の少ない流紋岩が現われる。



を繰り返す。 2) ②～③の区間は、P 波速度や密度が高くなっていることから、節理・亀裂の少ない流紋岩が現われる。

3) ③の反射面は、前後の物性値の変化が大きく、地山の強度が下がる値を示すことから、地質状況が大きく変化し、③～④の区間は、強風化を受けて脆弱な地山となる。 4) ④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ら、流紋岩破碎帯である。 5) 予

図-5 I トンネル予測結果

測目的であった 2 つの低速度帯は、③～④までの風化脆弱帯と、④付近の破碎帯として切羽に現われる。

#### 4-3. 地山対比

I トンネルの予測対比を図-6 に示した。

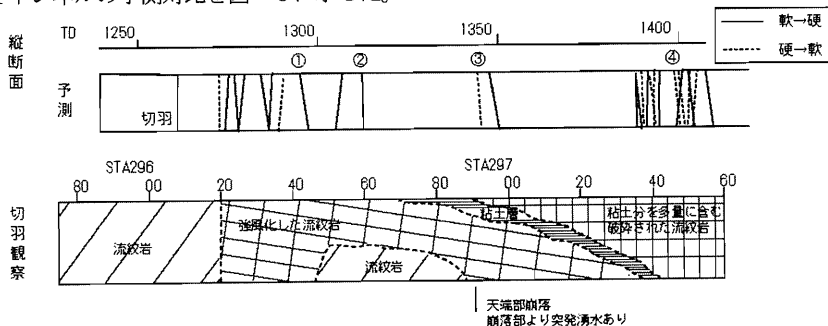


図-6 I トンネル縦断面比較図

予測結果では②の反射面まで、試験時切羽と同等の流紋岩溶岩が、硬軟を繰り返すと予測したが、実際は一番手前の反射面の位置から②の反射面の位置まで、流紋岩溶岩の風化の程度が著しく、②までの反射面は、強風化帯であった。

②～③の反射面間に現われると予測した節理・亀裂の少ない緻密な流紋岩溶岩は、実際も現われ、その範囲と位置および幅は正確に予測された。しかし、緻密な流紋岩溶岩の上部には強風化した流紋岩が続いていた。

予測した③反射面以降の脆弱帯は、実際に厚さ2m程度の粘土層が予測位置から切羽にみられるようになり、その後も粘土分を多量に含む破碎された流紋岩が続き、予測結果と良い一致を示した。しかし、出現した粘土層の傾斜は緩やかであった。また施工時、③反射面付近では、天端に現われた粘土層が崩落し突発湧水が発生した。

このように、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 の基本原理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。

## 5. 今後の課題

前述のように、3次元 TSP システムは、反射面の情報以外に反射面間の地山物性値を得ることが出来るため、その反射面が地層境界なのか亀裂帯なのか風化帯なのかといった、地山の性状を踏まえた予測が可能である。そして、その精度も数 m の範囲であり、施工時の切羽前方探査において、有効な手段であるといえる。

I トンネルの場合のように、トンネルに対し緩やかな傾斜を有する不連続面、または、貫入岩帯や不整合などが予想される状況では、事前調査を元にした地質学的判断が重要となってくる。

今後の大きな課題の一つとして、地質状況の予測の他に施工の安全性および経済性に大きく影響する地下水の予測があげられる。前述の I トンネルでは、③反射面付近にて切羽崩落に伴う突発湧水が発生したが、現段階では適用事例が少なく、反射面や物性値から地下水の存在を判断するには至っていない。

これらを解決していくためには、積極的に現場での適用を行いデータの蓄積を行うことが必要である。そして、最終的には、支保パターンの選定や補助工法の必要性の判断まで行えるようなシステムとしての精度向上を図る必要がある。