

反射法地震探査による切羽前方探査

—三次元 TSP システムの現場への適用—

山本 松生・瀬谷 正巳・吉野 隆之

山岳トンネルの切羽前方探査には様々な手法が取入れられてきたが、反射法地震探査の一つである TSP (Tunnel Seismic Prediction) システムは、切羽での予測作業時間が短く、急速施工が望まれる現在、もっとも有効な予測手段のひとつであると言える。特に 3 次元 TSP システムは、従来のシステムに比べ、さらに短時間で予測結果を示すことが可能なおえ、地山物性値を含めた 3 次元の予測が可能となった。

キーワード：トンネル、切羽前方探査、反射法地震探査、TSP

1. まえがき

山岳トンネルにおいて、経済的な制約などから事前調査の結果だけでは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。

さらに、施工の安全性や経済性に加え急速施工が望まれるなか、施工を妨げない切羽前方予測方法の確立が望まれている。筆者らは、短時間で予測可能な手段として、反射法地震探査の一つである 3 次元 TSP (Tunnel Seismic Prediction) システム (以下、TSP 203) を導入し、これまでに 8 件の実績を重ねてきた。

TSP 203 は、切羽での作業時間が 2 時間程度と短く、トンネル軸方向、鉛直方向およびトンネル直交方向の 3 成分の反射波データを用いることで不連続面の 3 次元的な予測が可能になった。加えて、予測区間の地山物性値が得られるため、前方地山性状の予測に役立てられる。また、その予測範囲は、切羽から 100~150 m 程度である。作業時間が短く、予測範囲の長い TSP 203 は、トンネルの切羽前方の地山予測方法として非常に有効である。

本報文は、TSP 203 の特徴とともに、適用事例を紹介する。

2. TSP 203 の概要

TSP 203 は、反射法地震探査の原理を応用した

ものである。

山岳トンネルの片側側壁に 1.5 m 程度の間隔で設けた 20 数孔の発振孔から順次小発破を行い、後方に設けたセンサで不連続面 (地層境界や断層破砕帯等) 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と幅およびその性状を予測するものである。測定装置および発破孔・受振孔の配置図を図-1 に示す。TSP 203 は、3 成分の反射波を利用することで多くの利点を持つこととなった。

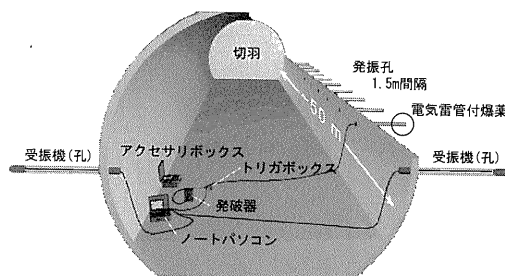


図-1 測定装置配置図

以下に TSP 203 の特徴を列記する。

- 現場での測定は約 2 時間で完了する。
- 解析時間が 1 時間程度である。
- 解析ソフトは Windows NT 上で動くため操作性がよい (写真-1 参照)。
- 地層境界や断層破砕帯等の走向・傾斜がわかる。
- 予測区間の地山物性値がわかる。
- 予測結果の 3 次元表示が可能である (図-2 参照)。
- 切羽前方 100~150 m の予測が可能である。



写真—1 Windows NT上の解析ソフト

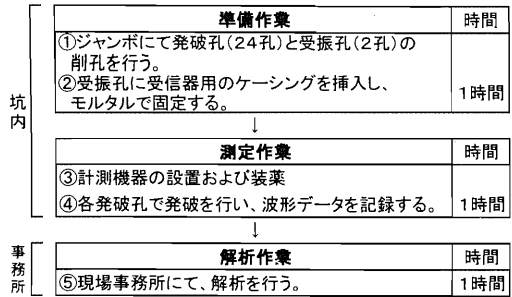
・測定装置が、コンパクトである。
 反射面の位置と同時に地山の物性値が得られることは、その反射面が地層境界なのか破碎帯等の脆弱帯なのかといった性状を含めた地山状況の予測が可能となり、大きな成果を上げている。

3. TSP 試験のながれ

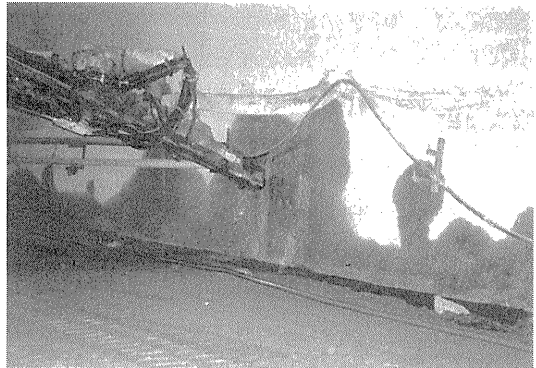
測定の流れを図—3 に示す。

実作業時間は、準備、測定、解析含め3時間程度である。各作業内容について説明する。

① 削孔は、位置と角度および深度を確認しながら行う（写真—2 参照）。発破孔は、爆薬のこめものとして水を使用するため下向きに行う。受振孔もケーシングをモルタルにて固



図—3 TSP 測定フロー図

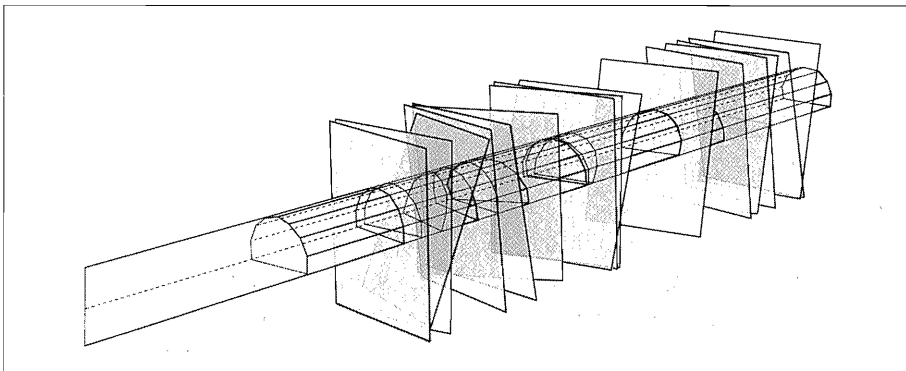


写真—2 削孔状況

定するため同様に下向き削孔する。

② 受振孔にケーシングを固定するが、モルタルが固化するまで、約6時間あいだをおく必要がある。時間に余裕のない場合やモルタルが流失する場合は、レジンで固定することも可能である。この場合は、30分程度の時間で測定に移ることができる。

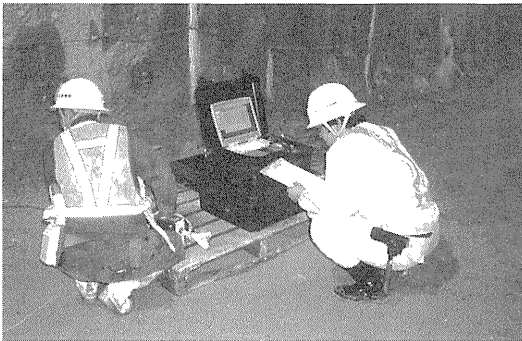
③, ④ 雷管とトリガーボックスを繋ぎ、1孔



図—2 予想結果の3次元表示例

づつの発破を行い、波形データを記録する(写真—3参照)。

⑤ 解析は、1時間で終了する。事前地質調査



写真—3 計測状況

や地質学的判断およびトンネル工学的判断をもとに予測を行い、施工に反映させる。

4. 適用事例

TSP 203 は、現在までに 8 回の実績を重ねている(表—1参照)。以下に 3 例を紹介する。

表—1 適用事例

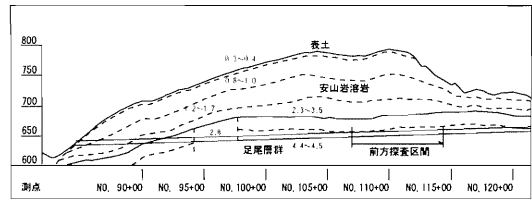
No.	名称	掘削方式	対象地質
1	H トンネル	発破工法	斑れい岩、緑色凝灰岩
2	T トンネル	発破工法	安山岩、砂岩、チャート
3	A トンネル	発破工法	粘板岩、硬砂岩
4	A トンネル	発破工法	粘板岩、硬砂岩
5	H トンネル	発破工法	片麻岩、流紋岩
6	I トンネル	発破工法	片麻岩、流紋岩
7	M トンネル	発破工法	花崗閃緑岩
8	M トンネル	発破工法	花崗閃緑岩

(1) 適用事例 1—T トンネル—

(a) トンネル概要

事前調査(図—4参照)より本トンネルは、弾性波速度の高い足尾層群の中を掘削していくとされたが、実際は、その上位の安山岩質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質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、風化した安山岩質溶岩や自破碎状組織を呈する安山岩溶岩が切羽に現れることが予想される。

本事例では、切羽前方の安山岩の強度変化を予

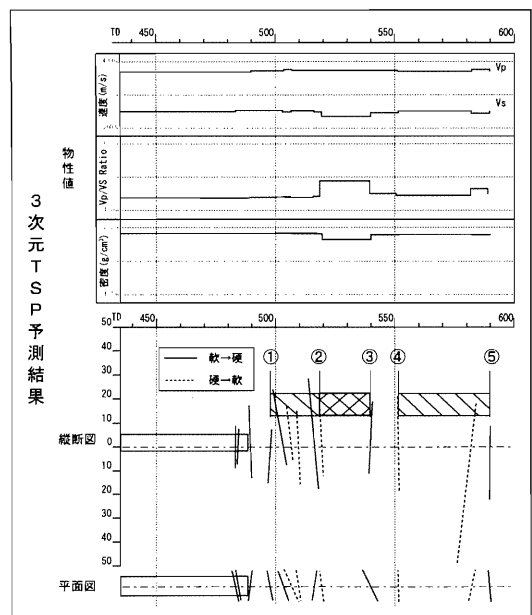


図—4 T トンネル地質縦断面図

測するために TSP 203 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。

(b) 予測結果

TSP 203 システムによる予測結果を図—5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—5に示した①～⑤の反射面で区切り、以下のように予測した。



図—5 T トンネル予測結果

- 切羽～①区間 (TD 489～498) :
切羽と同等の強度の安山岩質溶岩が続く。
- ①～②区間 (TD 498～519) :
岩質の変化は少ないが、クラッキーゾーンが続く、相対的に弱帯である。
- ②～③区間 (TD 519～540) :
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質溶岩が現われる。

- ③～④区間 (TD 540～552) :
切羽と同等の安山岩質溶岩が現れる。
 - ④～⑤区間 (TD 552～590) :
目立った岩質の変化は無いが、クラッキーゾーンが続く。
 - 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 (図-6 参照) すると、非常に良い関係が見られる。

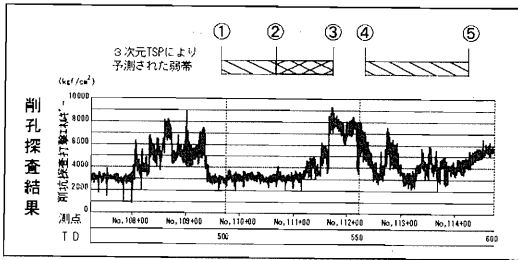


図-6 TSP 予測と削孔探査結果

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ことで、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。

図に示したように、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ことができた。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。

(2) 適用事例 2—1 トンネル—

(a) 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。流紋岩質溶岩は、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 参照)。

そこで TSP 203 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。

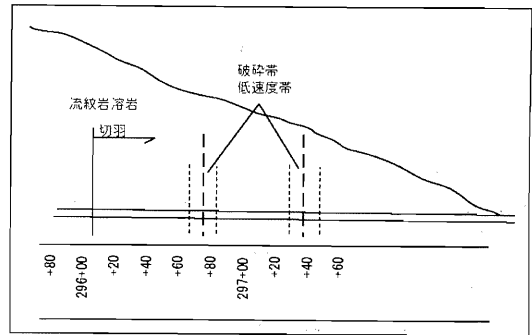


図-7 1 トンネル地質縦断面図

(b) 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実地山状況とともに図-8 に示す。予測結果を以下に示す。

- ①～② (TD 1273～1297) の反射面までは、切羽に見られる流紋岩質溶岩が風化し、節理や亀裂などを伴いながら硬軟を繰り返す。
- ②～③ (TD 1297～1313) 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 (TD 1313～1345) の区間は、緻密で硬い地山となる。
- ④ (TD 1345) 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 (TD 1388) 以降の反射面密集帯は、弾性波

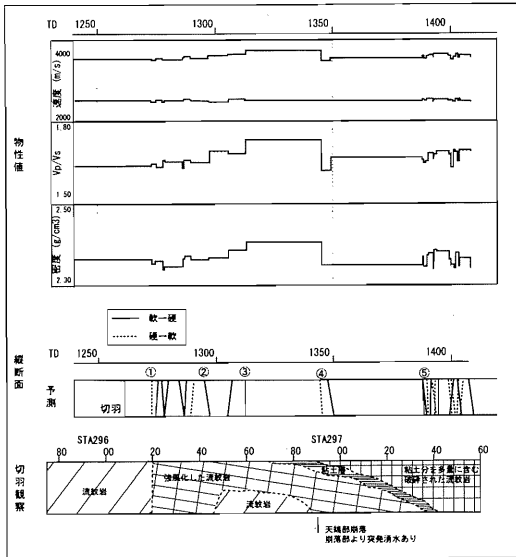


図-8 Iトンネル結果対比図

速度および密度の変化が著しいことから、流紋岩質破砕帯である。

- ・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れる。

実際の地山変化と比較すると、②の反射面の位置まで、流紋岩質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および、③～④で予測した区間は、亀裂の少ない新鮮な流紋岩質溶岩が下半部に露出した。

④反射面以降の脆弱帯は、上部より厚さ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砕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予測した傾斜とは大きく異なった。

このような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。

(3) 適用事例3—Mトンネル—

(a) トンネル概要

当該地域には、古生代の三郡変成岩類、中生代白亜紀の朝倉型花崗岩類が分布し、トンネル区間は概ね朝倉型花崗岩類の花崗閃緑岩の中を通過す

る(図-9参照)。この花崗閃緑岩は、一般に地表面からかなり深い位置まで風化が進みマサ土化している。

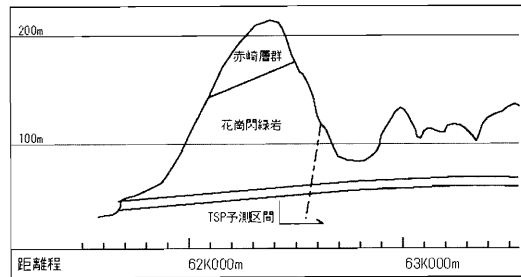


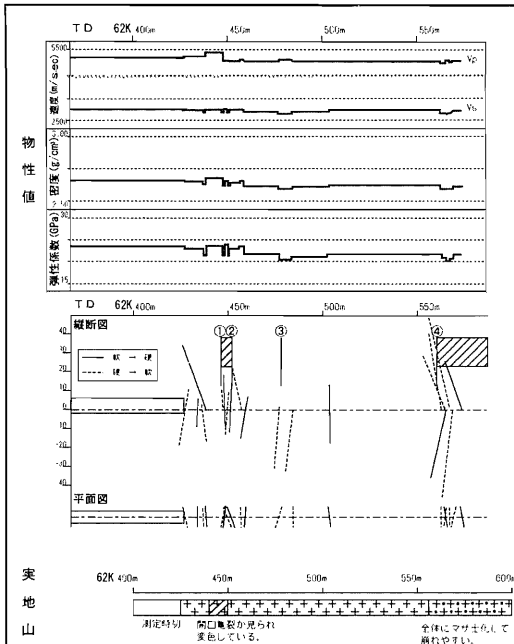
図-9 Mトンネル地質縦断面図

事前調査より、断層(F1)が想定されているが、F1断層は、露頭や低速度帯として確認されたものではなく、事前調査の結果において地山弾性波速度が $V_p=3.3\sim 3.7$ km/sec と $V_p=2.8$ km/sec の境界を断層と想定したものである。したがってその位置や規模については、正確に予測されているとは言いがたい。TSP試験は、F1断層の位置と幅およびおおよそその性状を把握する事を目的として行うものである。

(b) 予測結果

予測結果の2次元縦断面図と、物性値のグラフを実地山状況とともに図-10に示す。結果を以下に示す。

- ・切羽～① (62 k 365 m～446 m) :
節理が多くなるが、切羽と同等の地山が続く。
 - ・①～② (62 k 446 m～450 m) :
反射面が密集し、物性値の変化が見られるため、F1断層に相当すると判断した。
 - ・②～④ (62 k 450 m～561 m) :
亀裂の間隔が大きくなるが、③ (62 k 475 m) 付近では、局部的に亀裂帯が現れる。
 - ・④以降 (62 k 561 m以降) :
亀裂帯であり、岩強度も低下する。土被りがこの区間で薄くなることから、花崗岩が強風化して漸次マサ土化していくものと予測した。
- 実際の地山変化と比べると、①～②のF1断層相当区間は、数mm程度の開口亀裂が見られるもののF1断層亀裂帯と呼ぶほどの変化はなかった。
- ④以降の区間は、予測通り風化が激しくマサ土



図—10 Mトンネル結果対比図

化した花崗閃緑岩が現れ、支保パターンもこの区間以降変更された。

5. ま と め

以上、地山状況の異なる3つの事例を紹介したが、他の実績を含め、TSP 203 について次のことが言える。

- 予測区間は切羽前方 100 m~150 m 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（破碎帯や風化帯）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正確に行えるが、走向、傾斜については大きく異なる。

- 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、実地山を反映してい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。

これらの事例が示すように、TSP 203 の予測精度は高く、短時間で施工を妨げない切羽前方地山予測手段として有効であることが確認された。

今後、より積極的な適用で実績を重ね、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。

J C M A

[筆者紹介]

山本 松生 (やまもと まつお)
佐藤工業株式会社
土木本部技術部門
部長



瀬谷 正巳 (せや まさみ)
佐藤工業株式会社
中央技術研究所土木研究グループ
地盤チーム
研究員



吉野 隆之 (よしの たかゆき)
佐藤工業株式会社
土木本部技術部門
トンネルグループ

