

TSPによるトンネル切羽前方探査の調査例とその検証

CASE STUDY OF THE TSP METHOD FOR PREDICTION AHEAD OF THE TUNNEL FACE USING TSP METHOD

川上 純*・今井 博*・峯村 英二**・奥 秀朗***・小林光雄****

Jun KAWAKAMI, Hiroshi IMAI, Eiji MINENURA, Hiderou OKU, Mitsuo KOBAYASHI

Three Field examinations of TSP (tunnel Seismic Prediction) method for prediction ahead of the tunnel face were carried out in Tarouyama tunnel. In order to verify the results of the prediction, we measured velocity distributions in the predicted zone using refraction method after excavation.

Two results of the prediction coincided with the measured velocity distribution. In this tunnel, an adequate correlation between seismic velocity and rock quality judging from the tunnel face observations was estimated. This suggests that the TSP method would be an effective tool for this rock condition. However, the other examination result didn't coincide with the geological structure. It was assumed that large contrast of seismic velocity in prediction zone affected the result of prediction.

Keywords: seismic survey, tunnel, TSP system, reflection wave

1. まえがき

掘削中のトンネルの切羽前方の地質を事前に調査することは、工事の安全性および経済性にとって重要である。切羽前方の地質調査法としては、種々の方法が提案されているが、最近では、石油探査で使用されているVSP法をトンネルに応用したHSP法やTSP法等が適用されつつある。この方法は、弾性波反射法を利用したもので、探査深度は100~150mと比較的遠方までの調査が可能である。また、調査のために切羽を占有する時間は2~3時間程度であり、数時間の解析で調査結果を提出することができる等の利点を有している。

筆者等は、TSP法によりいくつかの調査を実施している。TSP法はスイスで開発されたシステムであり、地質構造が比較的単純で硬岩が主体であるヨーロッパでの使用実績がある。しかし、地質構造が複雑で軟岩が多い日本の地質への適用性については、不明な点も多い。本報は、TSP法の調査結果と掘削後の状況およびトンネルの底盤において測定した弾性波速度との比較を行い、その適用性を検討したものである。

2. TSP調査の概要

TSP法では、図-1のように、トンネル切羽付近の側壁に約1.5m間隔に24~36個の発破孔を設け、その後

* 正会員 大成建設(株)技術研究所
** 日本道路公団上田工事事務所
*** (株)虎ノ門コンサルタンツ
**** 太郎山トンネル東工事作業所

方に受振器を設置する。各発破孔で順次発破を行って弾性波を記録する。得られた波形データに対して、直接波の除去、パルス圧縮および各種フィルター処理を行って反射波を強調する。その後、ディフラクション・スタック法などを用いて反射面の特定を行い、切羽前方の破碎帯や地質の変化面の位置を推定する。

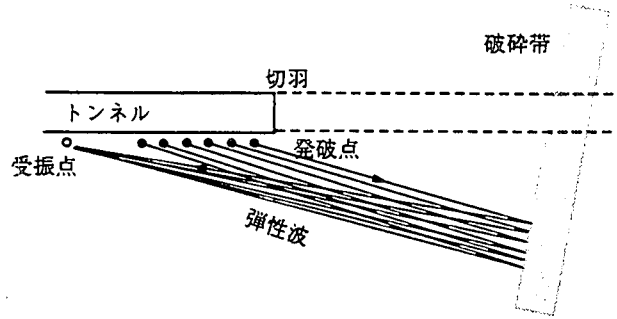


図-1 TSP調査の概要

TSP調査は、上信越自動車道の太郎山トンネルの作業坑で実施した。当トンネルの地質は、新第三紀の凝灰岩および凝灰角礫岩から構成されているが、強風化帯や破碎帯が数多くみられ、複雑な地質構成となっている。堅岩部での弾性波速度は3.8km/s～5.0km/sであるが、破碎された部分では3km/s以下となっている。

調査は、坑口から1096～1430mの位置で3回実施した。発破点は深さ1.5mとし、1.5m間隔で24点設置した。受振孔の位置は、切羽から一番遠い発破点から15～20m後方とし、深さは2.5mとした。

3. TSP推定結果と掘削データとの対比方法

TSP調査では、反射波の位相から反射面は「硬→軟」と「軟→硬」の2種類が識別される。また、反射波のエネルギーから、相対的な反射面のおおよその強度が推定できる。これらの情報から切羽前方の地質状況を推定することができる。TSP推定結果と掘削後の実際の地質状況との対比データとしては、以下の項目を取り上げた。

①切羽評価点

各切羽毎に記録している切羽観察結果の項目のうち、弾性波速度と関連性のあるA～Fの6項目の和をとったものである（表-1参照）。したがって、評価点は6～24点であり、点数が大きいものほど切羽が悪いことを示す。

②支保パターン分類

支保工のパターンを弱いものから順番に番号をつけたものである。したがって、番号が大きいものほど強い支保を採用したことを示しており、岩質が悪かったことに対応する。

③弾性波速度

トンネル底盤において屈折法による弾性波速度測定を行い、トンネルの緩み領域の外側の弾性波速度を算出した。また、TSP調査では、発破点付近の弾性波速度も測定することができるので、この値も参考にした。

表-1 切羽評価点に使用した切羽観察項目

①	切羽の状態	1. 安定	2. 鏡面から岩塊が抜け落ちる	3. 鏡面の押し出しを生じる	4. 鏡面は自立せず崩れあるいは流出
②	掘削面の状態	1. 自立（昔請不要）	2. 時間がたつとゆるみ肌落ちする（後昔請）	3. 自立困難掘削後早期に支保する（先昔請）	4. 掘削に先行して山を受けておく必要がある
③	圧縮強度	1. $\sigma_c \geq 1000 \text{ kgf/cm}^2$ ハンマー打撃はね返る	2. $1000 > \sigma_c \geq 200$ ハンマー打撃でくだける	3. $200 > \sigma_c \geq 50$ 軽い打撃でくだける	4. $50 \text{ kgf/cm}^2 > \sigma_c$ ハンマー刃先食い込む
④	風化質	1. なし・健全	2. 岩目に沿って変色、強度やや低下	3. 全体に変色、強度相当に低下	4. 土砂状、粘土状破砕、当初より未固結
⑤	割れ目の頻度	1. 間隔 $d \geq 1 \text{ m}$ 割れ目なし	2. $1 \text{ m} > d \geq 20 \text{ cm}$	3. $20 \text{ cm} > d \geq 5 \text{ cm}$	4. $5 \text{ cm} > d$ 破砕当初より未固結
⑥	割れ目の状態	1. 密着	2. 部分的に開口	3. 開口	4. 粘土をはさむ当初より未固結

4. T S P 推定結果と掘削データとの対比結果

図-2は、T S P 推定結果と上記した掘削データとを比較したものである。T S P 推定結果は、反射面の性質とその強度から推定した岩質の良・不良を濃淡で表示した。また、切羽評価点と支保パターン分類は縦軸を反転させ、弾性波速度と同様に上方が岩盤が良いことを示すようにした。以下に各推定結果との比較を行う。

No.1のT S P 推定領域は、弾性波速度の測定結果によると、1110m付近から速度が遅くなるとともに、1145m付近および1160m付近に幅5m程度の低速度帯がある。切羽評価点もほぼこの弾性波速度に対応して変化している。T S P 推定結果では、1118m付近に破碎帯がありこの付近から岩質が悪くなり、1145m付近に破碎帯があると推定したが、ほぼ実際の地質と対応している。ただし、1160m付近の破碎帯は検出されていない。これは、切羽前方が、速度3.4km/sと比較的悪い岩盤であつたため、波動の減衰が大きくて反射波が検出されなかったためと考えられる。

No.2の領域では、弾性波速度の測定結果によると、T S P を実施した地点のすぐ先から岩質が良くなり、1310mおよび1350m付近には低速度帯がある。この低速度帯では、切羽評価点も大きくなっている。T S P 推定結果では、岩質が良くなる点については一致しているが、検出された破碎帯の位置はかなりのずれがあり、実際の地質状況と一致していない。

No.3の領域では、1430m、1445mおよび1475m付近の3つの破碎帯がある。T S P 推定結果では、その内第2番目と第3番目の破碎帯については検出できている。なお、第1番目の低速度帯は他に比べて速度低下が小さいため検出できなかったものと考えられる。

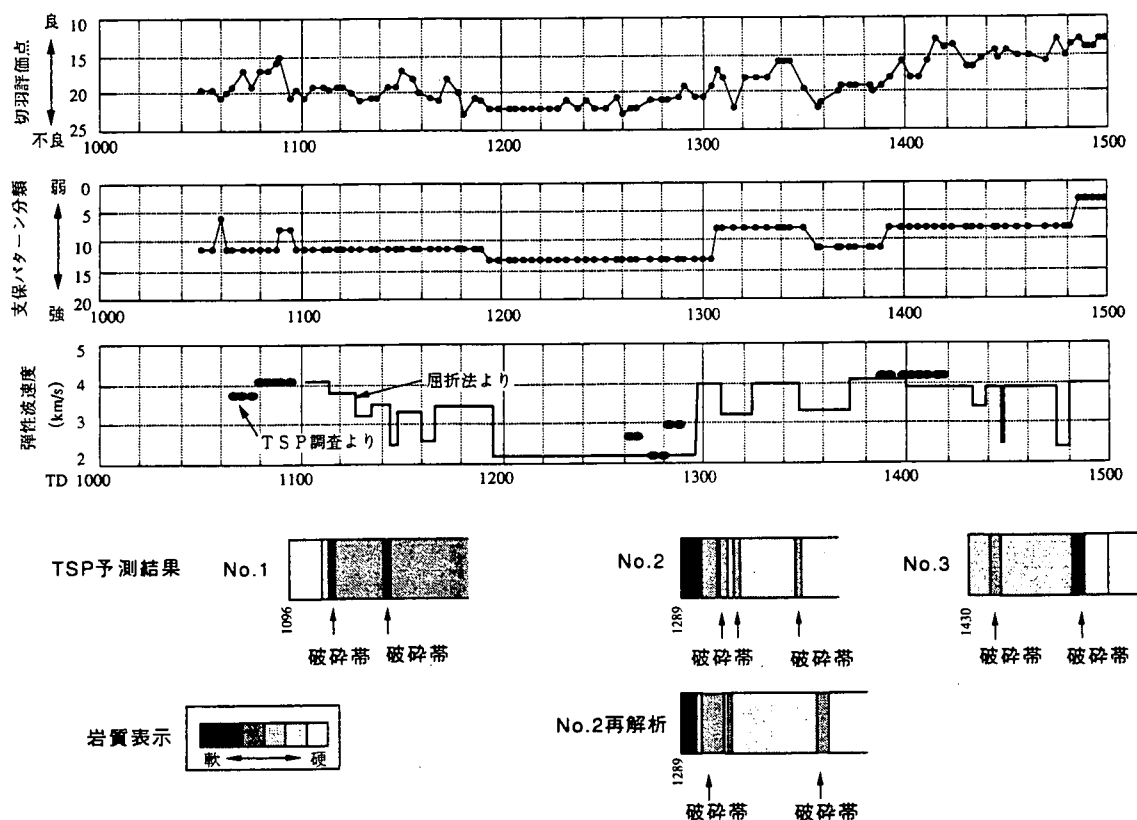


図-2 T S P 調査結果と掘削データとの比較

5. 調査結果の考察およびまとめ

調査No.2のTSP予測結果は、実際の地質状況と異なっていた。これは、TSPを実施した地点は、弾性波速度が2.3km/sであり、その速度を使用して解析を行ったが、実際に推定した領域の弾性波速度は3.2~4.0km/sであり、この違いが解析結果に影響を与えたものと考えられる。

TSPでは、領域内の速度は一定と仮定した解析法を採用しており、速度変化を考慮した解析はできない。この影響を解消するために、速度を2.3~4.0km/sと変化したパラメータ解析を行った。そして、個々の解析で検出された反射面の距離とトンネル軸からの離れから算出される平均速度が、その解析で仮定した速度と一致した反射面を抽出した。その結果を、図-2のNo.2の下に示した。しかし、この解析結果も実際の地質とはあまり一致していない。

図-3は調査No.1とNo.2で得られたトンネル軸方向の波形を示したものである。No.2の波形はNo.1に比べて低振動数となっているとともに、後続波の振幅が大きくなっており、データの質が悪いことが分かる。No.2の発破地点は弾性速度が遅く、破碎帯部分となっており、地質が複雑に変化している部分である。このように、得られた波形の質が悪いことも調査精度が悪くなった原因と考えられる。

今回の調査では、No.2を除いて実際の地質状況を推定できていた。図-4および図-5は弾性波速度と切羽評価点および支保パターン分類との関係を示したものである。弾性波速度が2.4km/s付近のデータはばらついており、両者とも逆相関が認められる。すなわち、当トンネルの地質では、岩盤の良・不良は弾性波速度が良い指標になっていることが分かる。したがって、弾性波速度を使用しているTSP法が有効であったと考えられる。

また、No.2の調査のように、調査地点の岩質が悪い場合や、弾性波速度の変化が激しい場合はTSP予測精度は、かなり低下することが分かった。今後、より多くの調査を実施し、岩質によるTSP調査の適用性を検討していく予定である。

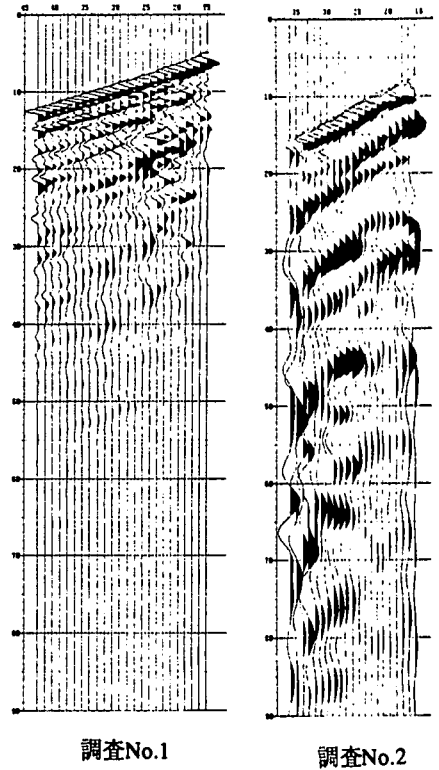


図-3 測定データ（トンネル軸成分）

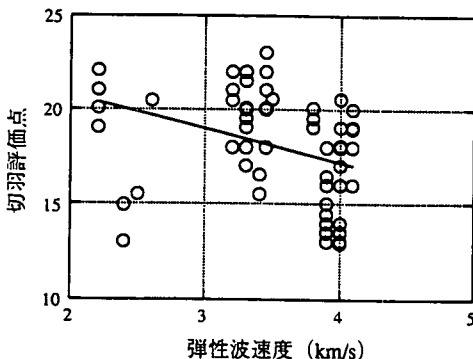


図-4 弾性波速度と切羽評価点の関係

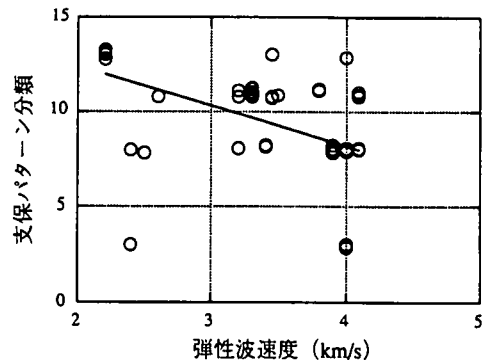


図-5 弾性波速度と支保パターン分類の関係