

トンネル切羽前方探査システム

TSP303

切羽前方の断層破碎帯や地質境界面及び湧水の有無を弾性波反射法の3次元解析で予測

四塚 勝久・篠原 茂

リニア中央新幹線トンネル工事がスタートし、トンネル施工に関する新たな技術の蓄積が急務である。トンネル工事では、1000 mを越える土被りもあり地質状況の把握は重要である。TSPは事前調査で十分には地質状況を把握できない山岳トンネル工事や、詳細な地質の把握が必要なトンネル（TBM工事も含む）に適用可能で、掘削に悪影響を及ぼす断層破碎帯や地質境界面、さらには湧水の推定を弾性波反射法による3次元解析で行う。弾性波反射法は一般的な探査技術であるが、トンネルにフォーカスした最新のTSP303（以下「本システム」という）について紹介する。

キーワード：TSP303 切羽前方探査、P波速度、S波速度、弾性波反射法、3次元解析

1. はじめに

本システムは、アンベルグテクノロジー社（スイス）が開発した切羽前方の地質状況の探査を弾性波反射法に基づいて行うシステムである。測定から解析まで1日で作業ができ現場施工に直ちに有効な情報としてフィードバックできる。以下で、TSPの歴史、本システムの概要、実施例について紹介する。

2. TSPの歴史

1990年アンベルグテクノロジー社は、石油探査技術を応用しフェライナトンネル（スイス鉄道）の地質探査用としてTSPを開発した。初期のモデルはハーゲンバッハテストトンネルで繰返し実験が行われ1994年にTSP202として世に出た。TSP202は、2方向（X, Z）に加速度計を組込んだレシーバーを左右側壁に1本ずつ設置し、掘削地点での弾性波速度を基にそれぞれのレシーバー毎で2次元で反射面の位置を特定した。

2001年には2次元の解析結果を3次元で表示するTSP203が開発され、ゴツタルドベーストンネル（スイス鉄道）で実施に採用され、その後世界中で多くの実績を残した。TSP203は3成分（X, Y, Z）の加速度計を組込んだレシーバーを左右側壁に1本ずつ設置し、切羽前方の速度分布は、それぞれのレシーバーにおいて2次元で解析し反射面の特定、左右の結果を組み合わせる3次元的に表示している。

それに対して、最新の本システムは、同じく3成分（X, Y, Z）の加速度計を組込んだレシーバーを左右側壁に2本ずつ設置し、より3次元的にデータを取得できる。切羽前方の速度分布は3次元で解析し反射面の特定、湧水の可能性などをTSP203に比べて6倍のデータ量から解析を行う。

3. 既存技術との比較

切羽前方の地質を予測する場合は、掘削作業を一旦止めて切羽からボーリングを行うのが既存の調査方法である。ボーリングは実サンプルの評価が可能であるが前方地質を面では無く点で評価するのに対し、本システムは360度方向に広がる弾性波の反射波を捉え、3次元モデルを使った解析技術により切羽前方の弾性波速度分布を3次元的に把握し評価を行う。本システムには以下の特長がある。

- ①弾性波速度の値から地質状況を定量的に評価できる。
- ②切羽前方100～150 mの予測に、準備として1～2時間、探査として約2時間の作業で終える事ができ、トンネル施工への影響が少ない。
- ③解析に費やす時間は2～3時間で、施工に対して迅速なフィードバックができる。
- ④切羽周辺の地質変化を3次元的に把握し、トンネルルート周辺の地質性状や断層破碎帯等がルート上へ出現するか否かの予測ができる。
- ⑤トンネル設計時の地山区分に使用した弾性波速度と、本システムによる予測値との対比が可能で、地

山区分の評価が合理的に行える。特にトンネル掘削に悪影響を及ぼす断層破碎帯の規模を明らかにすることができる。

4. 本システムの概要

本システムを構成する機器類を写真—1に示す。



写真—1 本システムの機器類

(1) レイアウトの決定

既知の地質データ、トンネルの側壁状況を踏まえて図—1のように測線のレイアウトを決める。発振孔は事前の地質走向角度を基準に左右どちらかに決めるが、事前情報が無い場合や坑内の側壁に送水管や電源設備がある場合はこれに限らない。切羽に一番近い位置から1.5 m 間隔で24ヶ所の発振孔の位置をマーキングする。坑口側の最終発振孔から15 m 坑口側に戻り、受振孔の位置を左右にマーキングする。更に坑口側に5 m 戻り受振孔の位置を左右にマーキングする。探査に必要な測線は、約55 m になり受振孔、発振孔のマーキングは、計28ヶ所になる。

(2) 削岩機による削孔

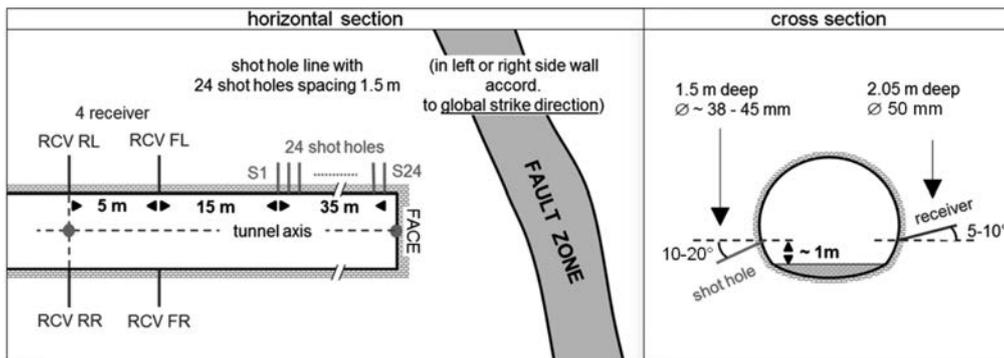
マーキングした発振孔及び受振孔を、削岩機を使用して削孔する(写真—2)。発振孔は、 $\phi 38 \sim \phi 45$ mm、深さ1.5 ~ 2 m、下向き10度(水を溜め込物にする)で24孔、受振孔は、 $\phi 51$ mm、深さ2 m、上向き10度(地山の水を抜く)で4孔である。受振孔は削孔後レーザーを挿入し固定する為、地山状況による穴荒れや曲りに注意を払い削孔する。穴荒れや曲りが確認された場合は穴の位置を前後にずらし再度削孔を行う。削孔後はローディングパイプなどで穴荒れを保護することも重要である。



写真—2 受振・発振孔削孔状況

(3) レーザーの設置、火薬装填、結線

レーザーは、切羽掘削による地山の緩み領域の影響を受け難い深さ2 m の位置に設置する。レーザーの地山への固定は水を含ませたチューブ状の即硬モルタル(写真—3)を孔内に挿入し(写真—4)、孔底に到達したチューブ状のモルタルをレーザー先端に取付けた鋭利なダウエル(写真—3)で破り混ぜ地山に密着させる(写真—5)。ダウエルのみの固定なのでレーザーは探査終了後に回収できる。次に記録装置にPC、レーザー4本、トリガーBOX、発破器を接続する。削孔作業を除く準備時間は約30分である。使用する火薬は爆速5000 m/s 以上のものを100 g (地



図—1 本システム測線レイアウト

山状況による) 使用し雷管は瞬発雷管を使用する。装填は、切羽側、坑口側のどちらからでも良く装填後に水で満たす。



写真-3 ダウエル，即硬モルタル

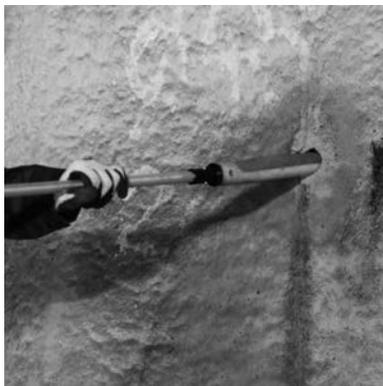


写真-4 即硬モルタルの挿入



写真-5 レシーバーの挿入，モルタルの密着

(4) 測定，撤収

発破器を使い火薬を順に発破する。4本のレシーバーは、直接波及び切羽前方の地山不連続面から反射された反射波形を24回の発破毎に記録する(写真-6)。サンプリング周波数は最大で48kHz、データ長は500msまたは1000msである。記録された波形データの品質(最大振幅、初動、ノイズ)はPC上で直ちに確認でき(図-2)、不具合がある場合、再測定や除去できる。測定終了後、孔内に固定したダウエルからレシーバーを抜き回収する。



写真-6 測定データの収集

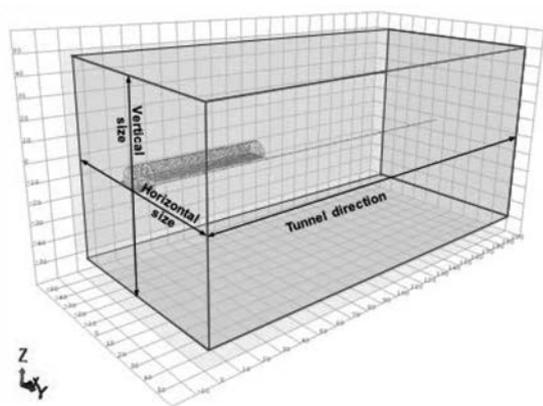


図-2 データ収集 PC 画面

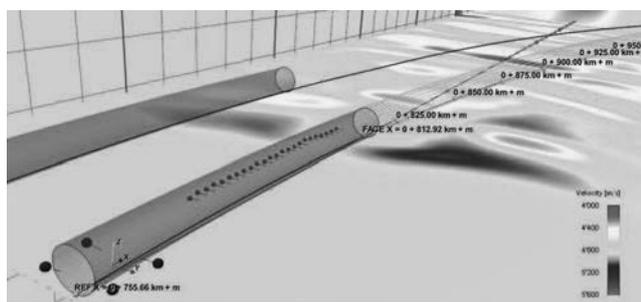
(5) 解析

解析は20のステップから成り、主な内容は以下のとおりである。

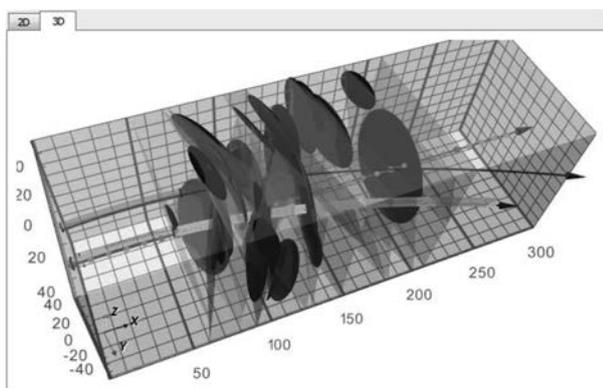
- ①トンネルジオメトリーの入力：左右レシーバーに伝わる直接波の伝達経路の計算
- ②オフセット計算：トンネルジオメトリーによるデータの配列
- ③データの回転：加速度計の向きの補正
- ④空中ノイズの除去：トンネル内空を伝わる発破音の除去
- ⑤バンドパスフィルター：ノイズの除去
- ⑥直接波のピック：直接波のP波、S波の特定と伝播速度の算出
- ⑦反射波の抽出：エネルギーの距離減衰を補正
- ⑧P波、S波の分離：反射波をP波、SV波、SH波に分離
- ⑨3次元速度解析
レシーバーから200m(前方)×100m(水平)×100m(垂直)の領域を、1000×200×200のグリッドに分け速度モデルを作成(図-3)
- ⑩反射面の特定と速度分布
マイグレーション処理によりP波、S波の反射面の特定(図-4)
- ⑪反射体の抽出
P波、S波それぞれの速度マップ、マイグレーション



図一三 3次元弾性波速度モデル



図一四 3次元P波速度マップ



図一五 3次元反射体の抽出

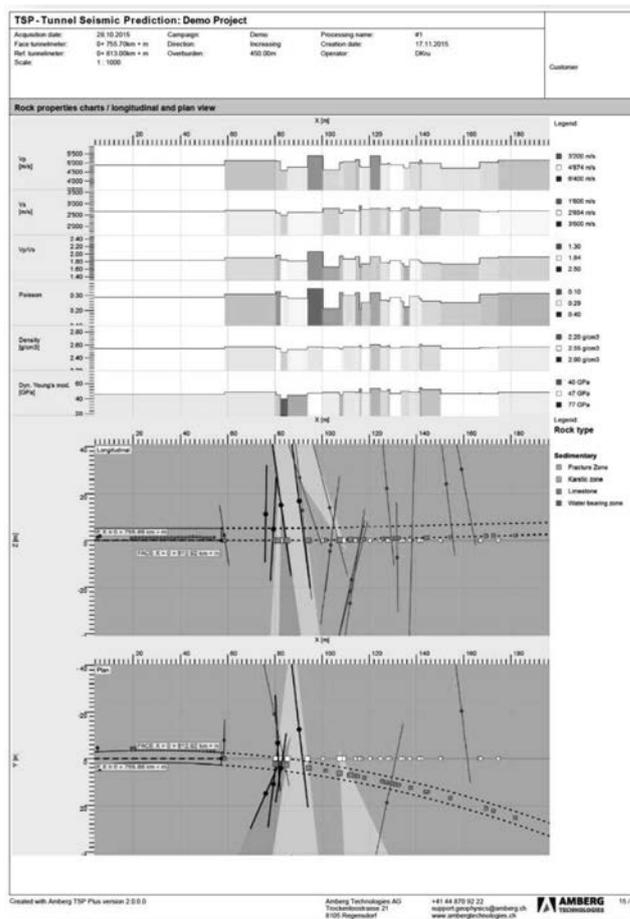
ン処理から反射体の位置、大きさを特定 (図一五)

⑫最終結果の表示

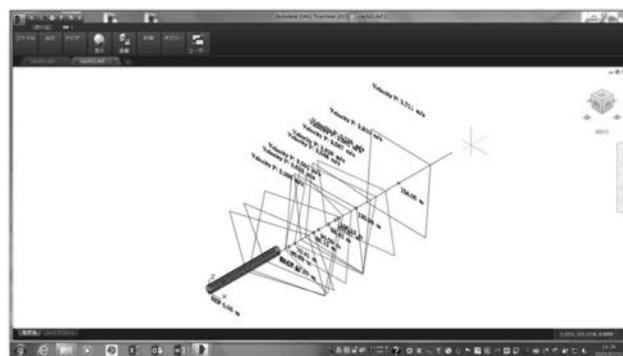
P波およびS波の速度分布、およびそれらの値から計算した V_p/V_s 比、ポアソン比、密度、弾性係数などの物性値の表示と、速度分布や反射面の位置、断面図、平面図の表示 (図一六)

⑬最終結果の出力

最終結果はCADファイル(.dxf)に出力でき、他ソフトウェアに反射境界面の情報を出力することが可能 (図一七)



図一六 反射面の結果、物性値の出力



図一七 反射面体のCAD出力

5. 海外での実施例

南米コスタリカ水力発電プラント工事での本システム探査実績について紹介する。図一八に示すように谷部付近に存在する断層帯手前で探査を行っている。

図一九は、解析結果から特に注意を要するS波の低速度帯 (S波=2040 m/s以下)をレンダリングした図で、切羽近くにS波速度1700 m/s程度の低速度帯が確認でき、またその先にS波速度1900 m/s程度の位置が確認できる。

図一十は、切羽から前方90 mまでのコアボーリ

ングの結果と本システム解析結果を対比したもので、本システム解析結果では切羽3m先からP波の落ち込みが約18m間、S波の落ち込みが約33m間、顕著に確認でき、これはコアボーリング結果と対比する

と非常に良く整合した結果になっている。特に断層位置に関して非常に精度良く探査出来たことを示している。

図-11は図-10の探査結果を3次元で表示したもので、岩盤タイプ別に色分けし反射面の走向、傾斜

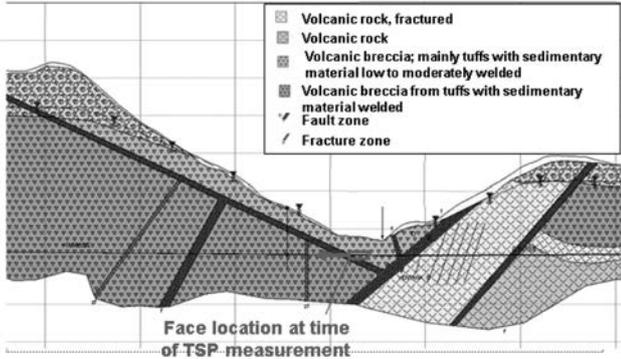


図-8 地質縦断面図及び TSP 探査位置

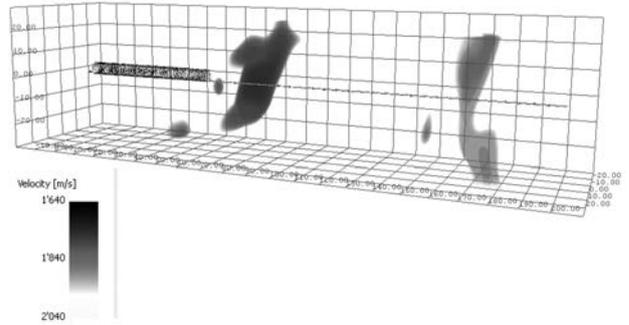
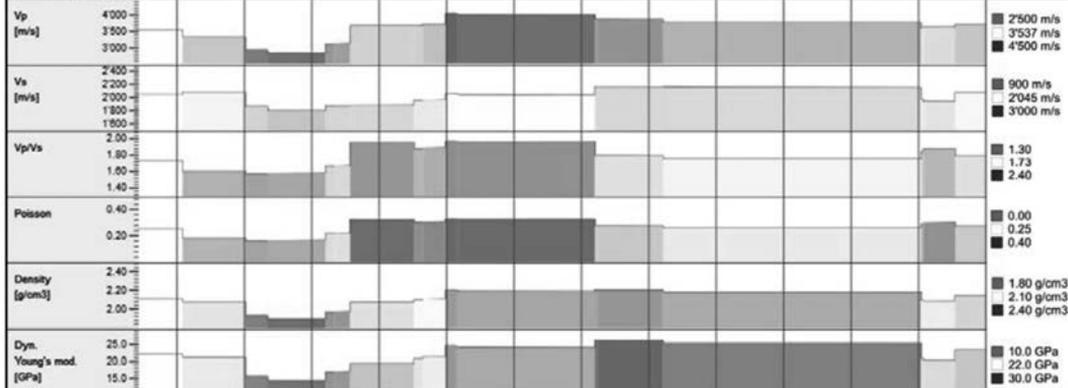


図-9 低速度帯のレンダリング (S波 2,040 m/s以下)

a) Geological forecast

Rock type	Volcanic breccia weathered	Fault zone	fractured	Volcanic breccia	Fracture zone	Volcanic breccia
Probe drill	Tunnel			End of drill		
Classification RMR	III-IV 35-40 fair to poor	V <20 very poor	IV 21-40 poor	II 61-80 good	IV	III
Fracturing	strong		mod	little	strong	moderate
RQD%	0-4%			43%		
Water presence	1.25l/s			dry	possible	dry

b) Rock property charts



c) Seismic result accord. to Dyn. Youngs Modulus (longitudinal view)

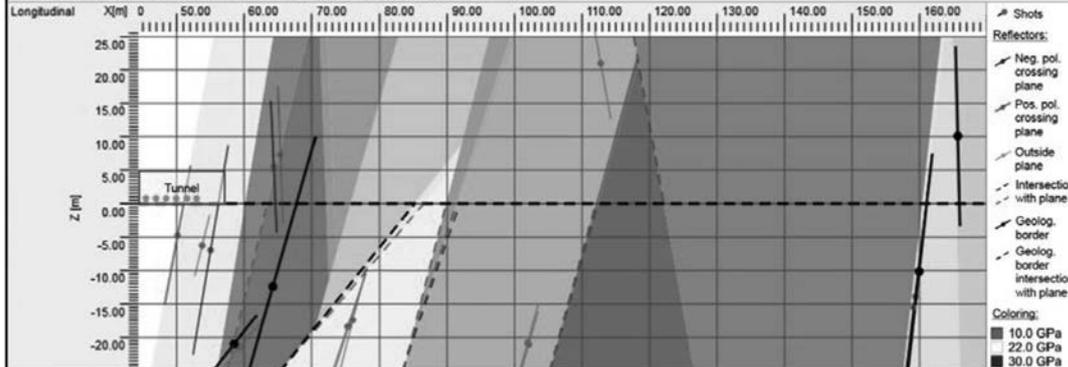


図-10 ボーリング結果と本システムの結果比較 (岩盤物性値グラフ及び反射面側面図)

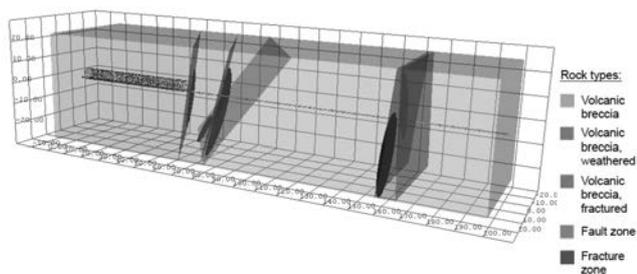


図-11 3次元反射面探査結果

が視覚的に確認できる。また、強い反射エネルギー部には楕円状の反射体キューブも表示し、より注意すべき位置を表示している。ソフト上では現場のニーズに合わせた結果出力が可能になっている。

6. おわりに

本システム TSP303 は初期のモデルから2世代進化し熟成された技術となった。解析技術の向上とそれを実行する PC 等も格段に性能が向上し完全な3次元で

切羽前方の領域を評価する。本システムは短時間での探査が可能で、既存の探査技術と上手く融合し、より精度の高い地山評価が可能になると考えられる。リニア中央新幹線の工事が待ち構える中、安全に高速に工事を進める上で本システムが役立てられることを期待している。

JCMA

[筆者紹介]



四塚 勝久 (よつづか かつひさ)
エフティーエス(株)
特機営業部
リーダー



篠原 茂 (しのはら しげる)
エフティーエス(株)
技術部