

ブレイカー振動を利用したトンネル切羽前方探査システム

若林 成樹 西 琢郎 青野 泰久 中谷 篤史
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Development for the System of Hydraulic-Breaker Exploration Ahead of Tunnel Face

Naruki Wakabayashi, Takuro Nishi, Yasuhisa Aono and Atsushi Nakaya

トンネル現場ではブレイカーで切羽面を打撃して浮石の除去を行う。この打撃振動を受振センサーで測定し、反射法により切羽前方の反射面位置を探査する S-BEAT を開発した。受振センサーは既設置のロックボルトのナットに容易に着脱でき、1回の測定は30分程度である。特殊な装置も不要なので施工サイクルを乱すことなく測定できる。また、切羽の進行に伴い繰返して測定することで探査精度の向上が図れる利点がある。3成分受振センサーを用いることで反射波の到来方向を推定することができ、反射面位置を3次元的に把握することも可能である。複数のトンネルに適用した結果、50m前方まで探査でき、本手法の有効性が確認できた。

In the tunnel site, a breaker hits the tunnel surface to perform the removal of loose rock. The impact vibration is measured by some seismic sensors, we have developed S-BEAT (Shimizu hydraulic-Breaker Exploration Ahead of Tunnel face) for predict reflective surface positions with a reflection method. Seismic sensors can be easily attached and detached the already installed rock bolt nut. Since one measurement is about 30 minutes and the special equipment is also unnecessary, measurement can be carried out without disturbing the construction cycle. In addition, there is an advantage that can be improved exploration accuracy by repeated measurements.

By using 3-component geophone sensors, it is possible to estimate the arrival direction of the reflected wave, it is possible to grasp the reflecting surface position in three dimensions. As a result of the field application at multiple tunnels, this method can be exploration of up to about 50m ahead of tunnel face.

1. はじめに

トンネル切羽前方の地山状況を事前に把握することは、各種対策工や支保工の選定を合理的に行い、工事を安全に進めるだけでなく、急速施工やコスト低減のためにも重要である。比較的精度が見込める前方探査手法には TSP や HSP 等の反射法弾性波探査や先進ボーリングなどがあるが、特殊な機材を準備し、探査時には施工を一時休止する必要がある。そこで筆者らは施工サイクルを極力乱さず、施工のモニタリング的なデータから探査実施地点を選定する手法を得ることを目的に開発を進めている。

この手法は NATM 工法による山岳トンネルを対象とし、切羽前方の反射面位置を大まかに把握する探査手法で、S-BEAT (Shimizu hydraulic-Breaker Exploration Ahead of Tunnel face) と称す。現在までに NATM 工法によるいくつかの山岳トンネルの現場で探査手法を検討^{1),2)}してきた。本論文では、

手法の測定原理、測定仕様と特徴を述べ、施工中の比較的硬質な地山における T トンネル、および軟質な地山である Y トンネルにて実施した現場適用実験の結果と今後の課題について報告する。

2. 探査手法の概要

2.1 測定原理

本手法は、いわゆる反射法弾性波探査を応用したもので、地山を伝播する弾性波が岩盤性状（主に岩盤の硬さ）の変化点で反射する現象から切羽前方の地山状況の変化点を推定するものである。浮石の除去を行う際のブレイカーの打撃振動を図-1に示す様に、切羽後方 XL から等間隔 ΔL で側壁に設置したトンネル軸方向の受振センサーで測定する。計測データは図-2の波形処理手順に従い、周波数分析、バンドパスによるノイズカット、利得制御(AGC)、デコンボリューションによる反射波強調処理等を行

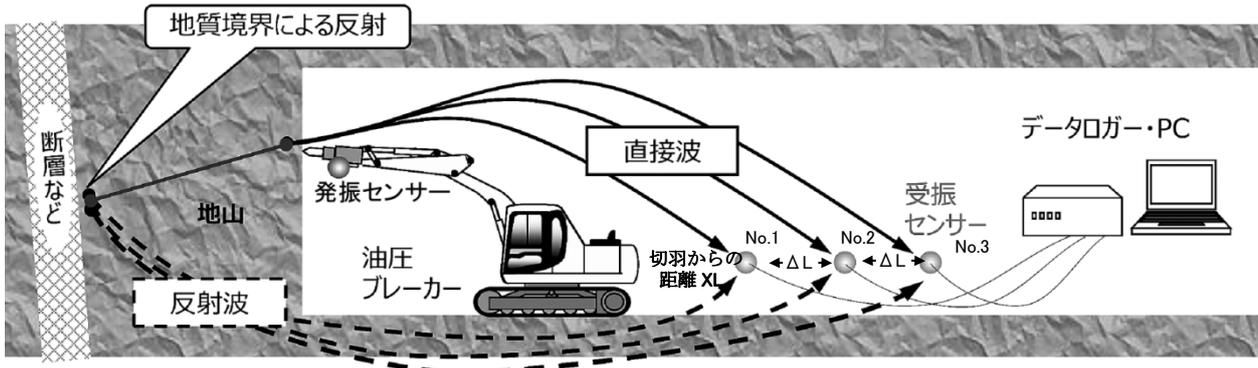


図-1 探査手法の概念図

い、直接波と反射波を抽出する。波形処理に関しては、反射法探査解析用としてコロラド鉱山大学からフリーで配信されているCWP/SU³⁾を用いた。直接波の初動の読み込み、弾性波速度の算出や結果表示に関しては自社開発ソフトを用いた。

図-3に示すように岩盤の弾性波速度 V はバンドパスによるノイズカットを施した各受振センサーの直接波データの初動到達時間差 $\Delta T1$ から式(1)の勾配で求められる。反射面がトンネル軸と直交する一次元を仮定すると、反射波は直接波の到達から各受振センサーとも $\Delta T2$ 遅れて到達する。デコンボリューションによる反射波強調処理後の波形を用いて、初動到達から弾性波速度と同じ勾配で $\Delta T2$ 遅れて到達する反射波の並びを抽出する。1回の測定で反射波の並びが不明瞭な場合でも、切羽と受振センサーとの距離を一定に保持した上で同様の測定を切羽の進行に伴い複数回行うと、その反射波の並びが切羽進行に伴って移動することで判別が可能になる。このように掘削の進行に伴い、複数回測定することで推定精度を上げることが可能となる。

$$V = \Delta L / \Delta T1 \quad (1)$$



図-2 波形処理の手順

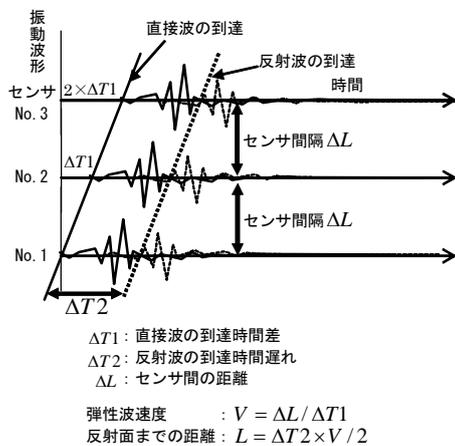


図-3 直接波と反射波の抽出

次に反射点の表示方法を示す。図-4に示す様にトンネル軸方向を X 、直交方向を Y 、上下方向を Z とし、ブレーカーの打撃発振点座標を $(0,0,0)$ 、反射点座標を (Xp, Yp, Zp) 、受振点座標を $(-XL, 0, 0)$ とする。発振点～反射点～受振点の距離 Lw は式(2)で示され、変形すると最終的に反射点は発振点と受振点を焦点とする式(3)の楕円体となる⁴⁾。

$$Lw = \sqrt{Xp^2 + Yp^2 + Zp^2} + \sqrt{(Xp + XL)^2 + Yp^2 + Zp^2} \quad (2)$$

$$\frac{Xp^2}{Lw^2} + \frac{Yp^2}{Lw^2 - XL^2} + \frac{Zp^2}{Lw^2 - XL^2} = \frac{1}{4} \quad (3)$$

ここで Lw は弾性波速度 V 、反射波の到達遅れ $\Delta T2$ 、受振点と切羽までの距離 XL から式(4)で表され、楕円体が確定される。

$$Lw = \Delta T2 \times V + XL \quad (4)$$

複数個の受振センサーの反射点の楕円体をすべて描き、楕円体が重なる共通反射点を抽出し、その接面として反射面の3次元的位置を推定することがで

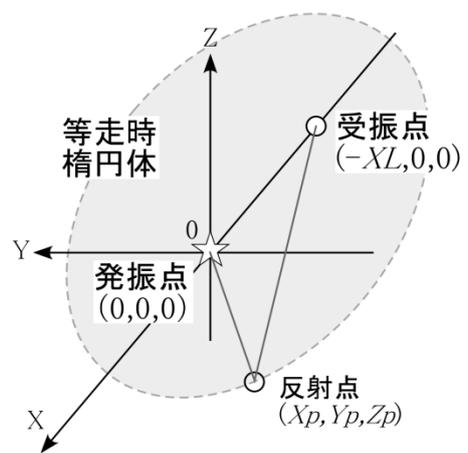


図-4 反射点位置の楕円体表示

きる。しかし、実際には多数の反射波を処理すると共通反射点が近接する部分が多数形成され、共通反射点の特定が困難となる。そこで、切羽面に最も近い位置にX,Y,Z方向の3成分受振センサーを用い、反射波のリサージュ処理により、反射波の到来方向を推定し⁵⁾、その方向と反射楕円の交点を反射点とし、その接面を反射面とするか、芦田ほか⁶⁾による3成分振幅値を用いた重みづけ処理などを行うことによって反射点位置を強調表示し、反射面の3次元的位置を推定することができる。

2.2 測定仕様と特徴

測定に使用する機材は、通常の反射法弾性波探査で用いるものと同様である。受振センサーの数が多いほど測定精度も上がるが、設置や撤去に時間を要する。そこで、本手法ではなるべく短時間で設置や撤去ができるように5点とし、切羽面に最も近い位置に3成分受振センサーを配置した。さらに別のセンサー1個を計測開始のトリガとしてブレーカーに取り付ける。使用する受振センサー数は8個である。表-1に測定仕様一覧を示す。

従来の反射法弾性波探査では、受振センサーは坑壁近傍のゆるみ域を避けて壁面から1m以上の深さに設置する場合が多い。しかし、この方法ではセンサー設置孔を削孔する工程が必要となり、切羽進行に合わせて都度センサーを再設置することは困難になる。そこで、筆者らはゆるみ域の影響をなるべく避けるために、ロックボルトを受振スパイクとして

表-1 測定仕様一覧

センサータイプ	動電型
固有振動数	28Hz
センサー数	8個(内1個はトリガー)
測定周波数	20kHz
分解能	16ビット
プレトリガー	20ms

利用することとし、センサーを簡易に脱着できる治具を作成した。センサーを固着した治具は、ねじによりロックボルト頭部のナットに短時間で確実に固定される。図-5に坑内での受振センサー、トリガセンサーの設置状況と測定状況を示す。

受振センサーやデータロガー、パソコンとも市販品で入手も容易であり、打撃に使用する機械もトンネルであれば常備されている油圧ブレーカーである。特殊な機材を用いることもなく、短時間での計測が可能で、現場の施工サイクルに影響を与えない探査手法であることが最大の特徴である。

3. 現場適用実験

3.1 Tトンネルでの実施結果^{7),8)}

Tトンネルは近畿地方南部に位置する道路トンネルで新第三紀中新世の砂岩層や礫岩層の中・硬質岩からなり、電中研式岩盤分類では坑口部を除きCM~CL級と比較的硬質な地山である。実験は、図-6に示す様に事前の物理探査で想定されていた低速度域(STA.400+75m付近)の約40m手前から4回、切羽が計16.8m進行する間に行った。発破後のズリ出しが終了した直後に受振センサーを取り付け、切羽をブレーカーで1~3回打撃することを10回程、計測した。計測に要した時間は、設置、計測から撤去まで概ね30分以内であった。

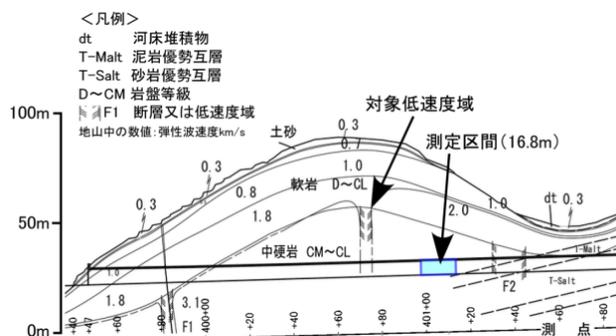


図-6 Tトンネルの概略縦断図と測定区間



ロックボルトに取り付けた受振センサー

ブレーカーに取り付けたトリガセンサー

測定状況

図-5 坑内での受振センサー、トリガセンサーの設置状況と測定状況

表-2 反射面位置と推定確度および劣化部との対応

測定位置	反射面位置				
	A:青	B:緑	C:茶	D:紫	E:桃
TD220.6 (切羽前方 m)	○ (20)	○ (34)	○ (46)	○ (64)	○ (74)
TD226.6	○	△	×	△	×
TD231.4	○	△	△	○	△
TD237.4	△	△	×	△	△
推定確度	高	高	低	高	中
TD237.4からの 推定反射面位置	3m	17m	29m	47m	57m
TD237.4からの 実際の劣化部位置	一致 7.2m	一致 18~19.2m	無し	概ね一致 42.0、 45.6m	概ね一致 52.8、 61.2m

No.1~No.5の受振センサーは切羽後方20~25mから概ね6m間隔でロックボルトに設置した。図-7の最上図に1日目のブレーカーの打撃振動を示す。その下に順に1~4日目の打撃振動に一連の波形処理を施した結果を示す。この現場では3成分センサーのY、Z成分の振幅が小さく、反射波は主にトンネル軸方向であるX方向からの到来であったので、1次元を仮定して反射波の抽出を行った。

1日目の結果から地山の弾性波速度は3.3km/sと推定され、事前調査の3.1km/s(図-6中に記載)とほぼ一致していた。また、弾性波速度と同じ勾配を示す反射波と推定されるA~Eの波形の並び(○:4センサー以上で合致、△:3センサーで合致、×:左記以外)が見られる。各反射面の位置は図中に示すように切羽面から20~74m前方と推定された。2日目は切羽が6.0m進行した状態で同様の測定を行った。反射面A~Eは前日の位置(破線)より6.0m移動した実線付近に反射波形が並ぶことになる。A、B、Dでは3センサー以上で合致した。同様に3日目はA~Eの全て、4日目はC以外で3センサー以上が合致した結果となった。

表-2に4日間の推定結果を総合して推定確度を高(×無し)、中(×が1日)、低(×が2日以上)と分類した結果を示す。C以外は中以上の推定確度となり、反射面と推定される。後日の切羽観察結果で認められた地山の劣化部の位置(TD237.4からの距離)との対応も表に示した。推定確度が中以上の反射面は5m程度以内で劣化部(切羽評価点2以上または観察時に切羽全面風化、切羽の抜け落ちの記載がある箇所)の位置と良く一致していた。概ね50m前方まで探査でき、前方探査手法の有効性が確認できた。

3.2 Yトンネルでの実施結果^{9),10)}

Yトンネルは北陸地方に位置する道路トンネルで、新第三紀中新世の安山岩質凝灰岩、変質凝灰岩、流紋岩質凝灰角礫岩が主体の地山である。事前調査による地山弾性波速度は1.9~2.8km/sと軟質であり、

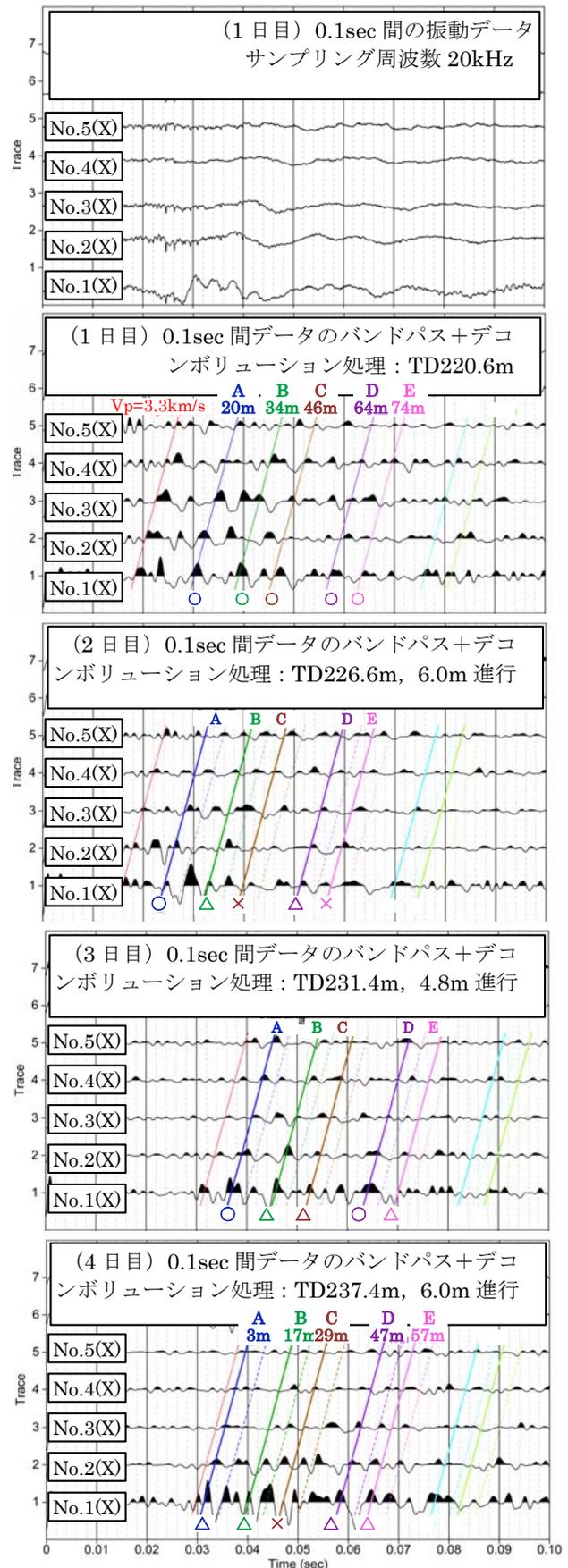


図-7 波形処理結果と反射面(○:4センサー以上で合致、△:3センサーで合致、×:左記以外)

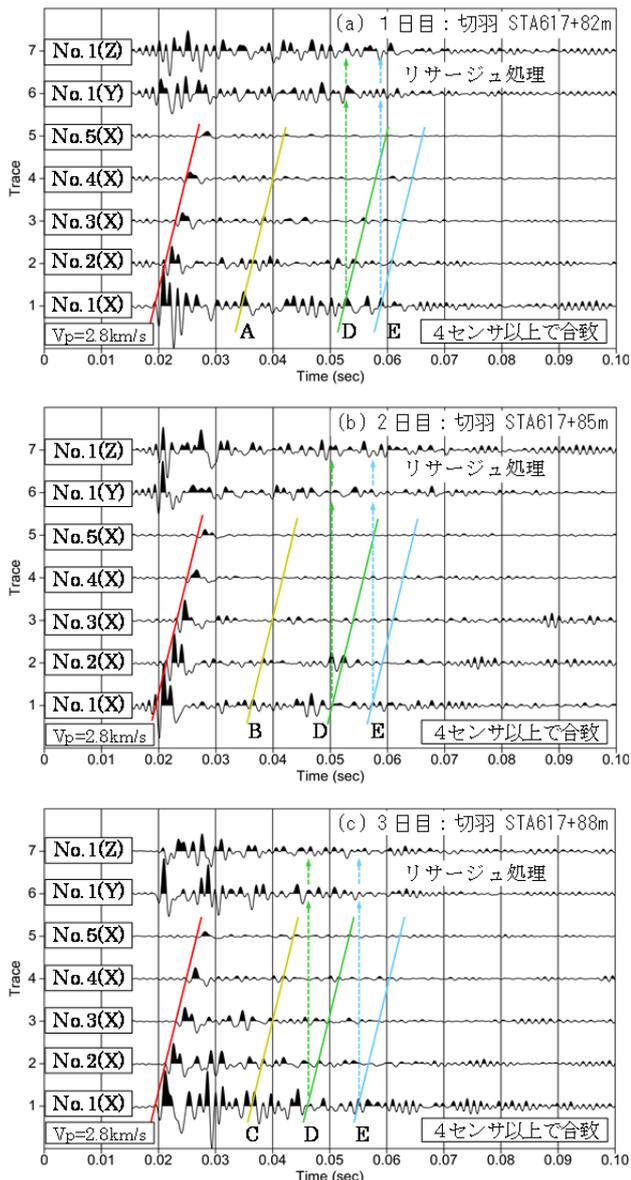


図-8 波形処理結果と反射面
(上から順に1~3日目)

表-3 推定された反射面位置

日付	切羽位置 STA.617	反射面 (STA618)				
		A	B	C	D	E
1日目	+82	+03			+27	+36
2日目	+85		+08		+27	+37
3日目	+88			+12	+25	+37

自由断面掘削機による機械掘削で施工された。

ここでの実験は、事前調査によって弾性波速度が2.6~2.8km/sの比較的硬質な安山岩質凝灰岩から1.9~2.0km/sの軟質な変質凝灰岩に変化することが予想されていた地点(STA.618+30m)の約50m手前から、切羽の進行に合わせて3回、切羽が計6m進行する間に測定を行った。

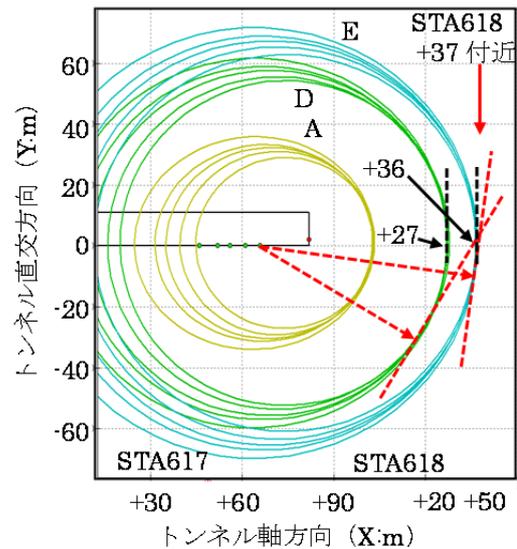


図-9 反射面の楕円体表示：1日目(XY面)

No.1~No.5の受振センサーは切羽後方16~17mから5~6m間隔でロックボルトに設置した。図-8の上図に1日目の打撃振動に一連の波形処理を施した結果を示す。No.1~5の受振センサーに打撃振動の直接波が明瞭に到達しており、赤線の勾配から弾性波速度は約2.8km/sとなり、事前調査とほぼ一致していた。1次元を仮定し、弾性波速度と同じ勾配で遅れて到達する反射波が4つ以上のセンサーで合致する反射面を抽出した結果、A、D、Eの3つが推定された。前述の式(2)~(4)に基づき、受振点を通るトンネルの水平断面(XY面)に反射面を楕円体表示した結果を図-9に示す。反射面AはSTA618+03m、DはSTA618+27m、EはSTA618+36m付近に存在すると推定された。No.1~5で計測された反射波から表示した楕円体は前方の±40°程度の範囲で重なり、共通反射点を特定することは難しい状況である。

図-8に示す2日目の波形処理結果から、B、D、Eの3つ、3日目の波形処理結果からC、D、Eの3つの反射面の存在が推定された。同様に反射面楕円体を計算し、3日間の反射面位置をまとめた結果を表-3に示す。3日間の測定でA~Cの反射面位置は一致しなかったが、DはSTA618+25~27m、EはSTA618+36~37mで一致し、前方に2つの反射面の存在が推定された。

No.1にはX,Y,Z方向の3成分センサーが設置されており、図-8のように明瞭な波形が測定されている。この測定結果からD、Eからの反射波の到来方向をリサージュ処理によって推定した結果を図-10に示す。反射波Dは切羽の右前方31°、下向き37°の方向から、反射波Eは切羽の右前方8°、上

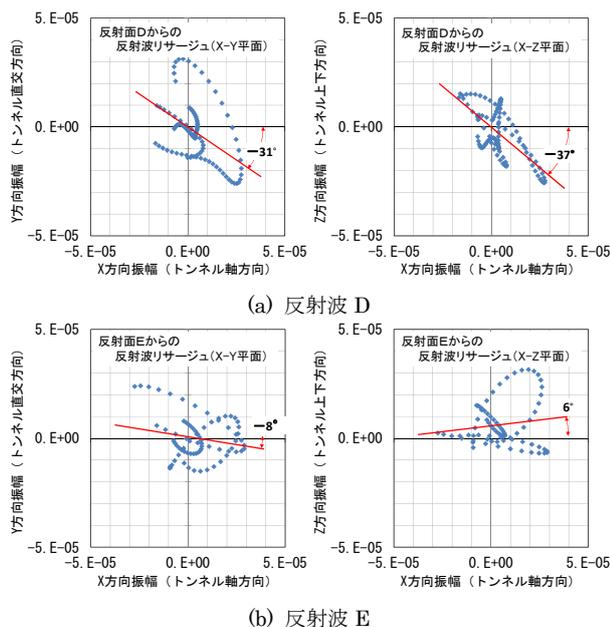


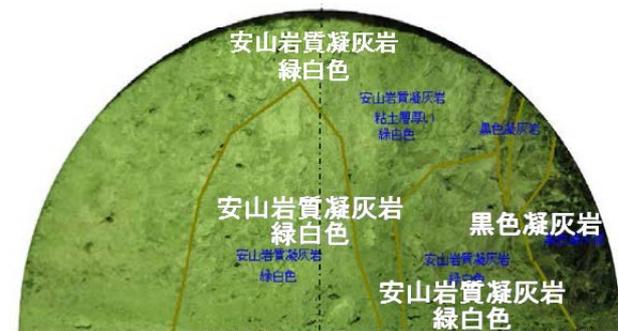
図-10 反射波 D、E のリサーチ処理結果

向き 6° の方向から到来していることが推定された。反射楕円体と反射波の到来方向の交点が反射点と考えられ、その接面が反射面位置となる。図-9 に示した反射楕円体に赤破線矢印で反射波の到来方向を示し、接面を同じく赤破線で示した。反射面 D、E は切羽右方向から出現し、STA618+37 付近で両者が重なると推定された。

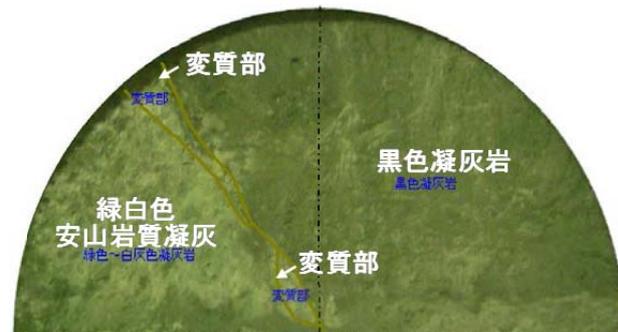
実際の切羽観察結果を図-11 に示す。測定を開始した STA617+82 付近から STA618+22m 付近までは(a)に示すような緑白色の安山岩質凝灰岩で、亀裂は細かく方向は不規則で、亀裂に粘土層を介在する地山であった。一部切羽右側に亀裂が少なく硬質な黒色凝灰岩が出現していた。STA618+13~33m では切羽右側部に硬質な黒色凝灰岩が不規則に分布し、(b)に示す STA618+29m 付近では黒色凝灰岩が切羽右側から広範囲に出現し、推定された反射面 D に対応すると考えられた。また、STA618+35m 以降では徐々にやや軟質な角礫凝灰岩が出現し始め、STA618+37m 付近からは(c)のように切羽全面がやや軟質な角礫凝灰岩となり、推定された反射面 E に対応すると考えられた。

推定された反射面 D、E は STA618+29m 付近を中心に切羽右側から出現した硬質な黒色凝灰岩の範囲に概ね対応していたと考えられる。この現場でも3日間の測定で切羽前方、約 50m までの2つの反射面位置を3次元的に推定できたと考えられる。

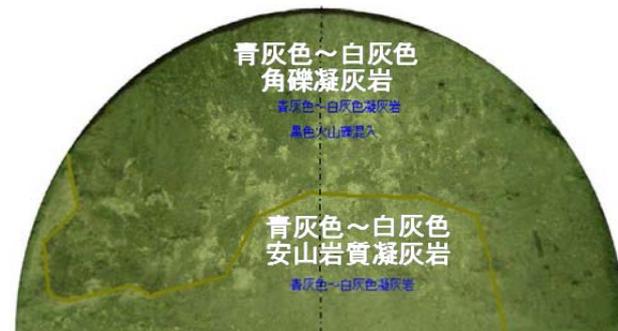
また、芦田ほか⁶⁾による3成分センサーの反射波の振幅値の重みづけ処理による3次元表示手法も開発している。結果の評価については稿を改めるが、



(a) STA.618+02m (緑白色安山岩質凝灰岩)



(b) STA.618+29m (硬質な黒色凝灰岩)



(c) STA.618+37m (やや軟質な角礫凝灰岩)

図-11 切羽観察結果(切羽写真)

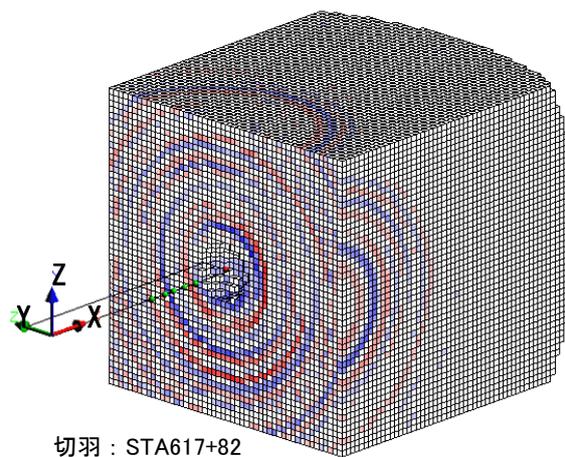


図-12 反射面の3次元表示例(1日目)

例として1日目のNo.1の3成分センサーで計測された全ての反射波から得られた反射楕円を左右±50m、上下±50m、奥行120mの範囲に表示した結

果を図-12に示す。青と赤は反射波の押し引きの違いを示し、色が濃いものほど反射波の振幅が大きいことを表している。また、任意の断面での表示も可能である。この方法によれば反射波の抽出が不要であり、整理が迅速に行え、客観的に評価できると考えられる。

4. おわりに

反射法弾性波探査を応用し、日常的なトンネル掘削作業において使用する機材を利用して切羽前方探査を行う手法の測定原理、測定仕様と特徴を述べた。

建設中の2つの道路トンネルにおける現場実験では、3～4日間の測定で切羽前方、約50mまでの反射面を予測し、本手法の有効性を確認した。

筆者らは、これ以外のトンネル現場においても本手法の適用実験を重ねている。今後はさらなる改良を重ね、一連の処理をパッケージ化し現場における日常管理のツールとすること等を課題としている。

謝辞

現場実験において、Tトンネル、Yトンネル工事作業所ならびに監督官庁関係各位には多大なるご協力を頂いた。ここに記して御礼申し上げる。

<参考文献>

1) 西琢郎, 若林成樹, 中谷篤史: トンネル掘削時の振動を利用した前方探査手法の研究, 日本応用地質学会平成23年度研究発表会講演論文集, pp.113-114, 2011.

- 2) 若林成樹, 西琢郎, 中谷篤史: トンネル施工時の機械振動を利用した切羽前方探査の現場試験, 第42回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.280-283, 2014.
- 3) Cohen, J. K. and Stockwell, Jr. J. W.: CWP/SU: Seismic Unix Release 43: a free package for seismic research and processing, Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines, 2011.
- 4) 廣岡知, 芦田讓, 佐々宏一: 等走時面の利用によるオフセットVSPデータの深度変換, 物理探査, Vol. 44, No.5, pp. 266-274, 1991.
- 5) 石山宏二, 土屋彰義, 千田敬三, 中村康夫: 弾性波によるトンネル切羽前方探査の現地適用実験(1), トンネル工学研究発表会論文・報告集, Vol.4, pp.439-444, 1994.
- 6) 芦田讓, 松岡俊文, 楠見晴重: 弾性波3成分受振によるトンネル切羽前方の高精度イメージング, 土木学会論文集, No.680/III-55, pp.123-129, 2001.
- 7) 西琢郎, 若林成樹: トンネル掘削機の振動を利用した切羽前方探査法, 土木建設技術発表会2014概要集, pp.120-125, 2014.
- 8) 若林成樹, 西琢郎, 青野泰久: トンネル施工時のブレイカー振動を利用した前方探査手法の現場試験, 土木学会第69回年次学術講演会講演概要集, No.VI-033, pp.65-66, 2014.
- 9) 若林成樹, 西琢郎, 青野泰久: ブレイカー振動を利用したトンネル切羽前方探査の現場試験, 第43回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.222-226, 2015.
- 10) 若林成樹, 西琢郎, 青野泰久: ブレイカー振動を利用したトンネル切羽前方探査手法の3次元化の検討, 土木学会第70回年次学術講演会講演概要集, No.VI-677, pp.1353-1354, 2015.