

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

若林 成樹^{1*}・西 琢郎¹・青野 泰久¹

¹清水建設株式会社 技術研究所 地下技術グループ（〒135-8530 東京都江東区越中島3丁目4番17号）
*E-mail: waka@shimz.co.jp

トンネル施工時のブレイカーの打撃振動による直接波と反射波を切羽後方に設置した受振センサで測定して反射面位置を推定する探査手法を提示する。この手法は施工サイクルを乱すことなく実施でき、切羽の進行に伴い複数回測定することで確度の向上が図れる利点がある。反射面の表示方法の改良を行い、2期線として施工中のYトンネル現場に試験適用した結果を報告する。現場試験は1期線工事や事前調査で地質境界の存在が推定され、弾性波速度が変化する箇所の手前で実施した。3日間の測定で推定された複数の反射面の内、2つの反射面はほぼ同位置に推定された。この反射面は後の切羽観察で確認された硬質岩帯に対応する結果が得られ、複数回測定による確度向上および手法の有効性が確認された。

Key Words : *in-situ test, seismic exploration method, vibration of breaker machine, forward reflective surface*

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等の反射法地震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本研究を進めている。現在までにNATM工法による山岳トンネルを対象とし、ブレイカーによって発生する振動を利用して切羽前方の地山状況を大まかに把握する探査手法¹⁾²⁾³⁾⁴⁾を提示し、3トンネルでの現場試験結果を報告してきた。本報では、反射面の表示方法を改良してデータ処理の迅速化を図り、2期線として施工中のYトンネルで現場試験した結果と適用性や今後の課題について述べる。

2. 探査手法の内容

(1) 探査手法の概要

ブレイカーで発生した振動が切羽前方の反射面から

戻ってくる反射波を利用する手法を図-1に示す。切羽こそく時のブレイカー打撃振動を切羽面に与え、切羽後方XLから等間隔 ΔL で設置した受振センサで振動を測定する。計測データは図-2のように周波数分析の上、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い、直接波と反射波を抽出する。データの分析・処理では、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/SU[®]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。また、前方の反射面がトンネル軸と直交する一次元状態を仮定すると、反射波は直接波の到達から各受振センサとも $\Delta T2$ 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くと、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確度を上げていくことが可能となる。

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

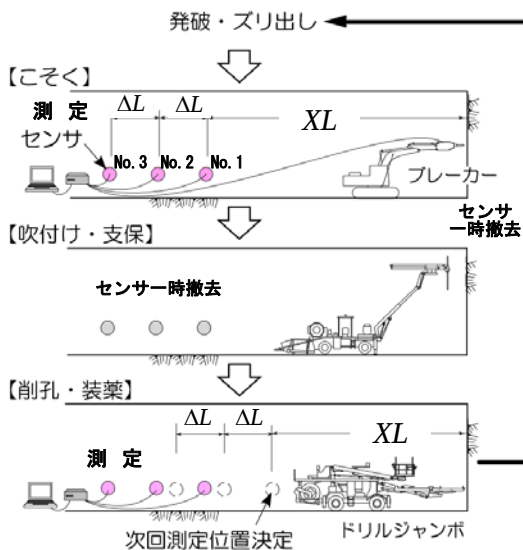


図-1 探査手法の概要



図-2 データ処理手順

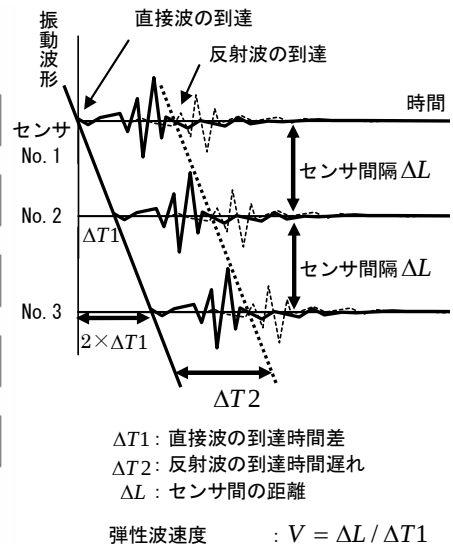


図-3 弾性波速度の算出法

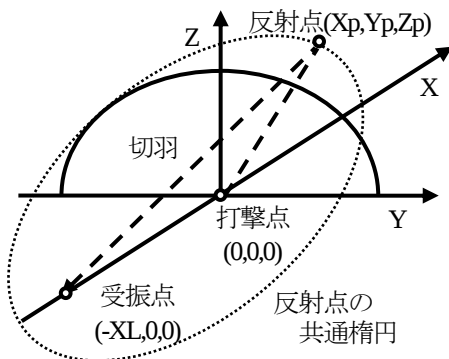


図-4 反射点の楕円表示

以下に反射面位置を楕円表示する方法を示す。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。打撃点～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式(3)の楕円の式となる。

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

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

表-1 測定仕様一覧

受振センサ数	3～5個
トリガセンサ数	1個
測定周波数	10kHz
測定時間	3sec
分解能	16ビット
センサ固有振動数	28Hz(動電型)

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、楕円が確定される。

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

ブレーカーと各受振点の座標を入力すれば反射面を楕円表示でき、データ処理の迅速化が図れる。

(2) 測定仕様

測定に使用する機材は、通常の反射法地震探査で用いるものと同様である。受振センサは設置をなるべく短時間で終わらせるために 3～5 個としている。さらに別のセンサ 1 個をトリガとしてブレーカーに取り付けるため、センサ数は 4～6 個となる。表-1 に測定仕様一覧を示す。



ロックボルト頭部に取り付けた受振センサ



トリガセンサ

ブレーカーに取り付けたトリガセンサ

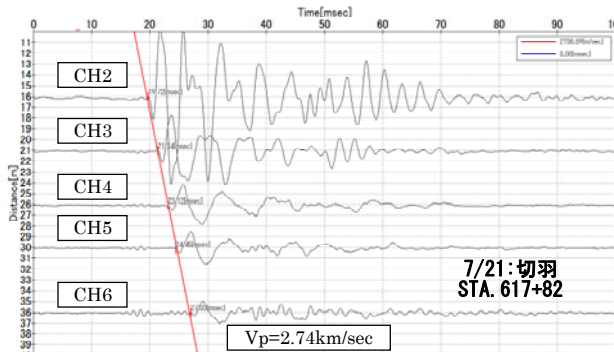


測定状況

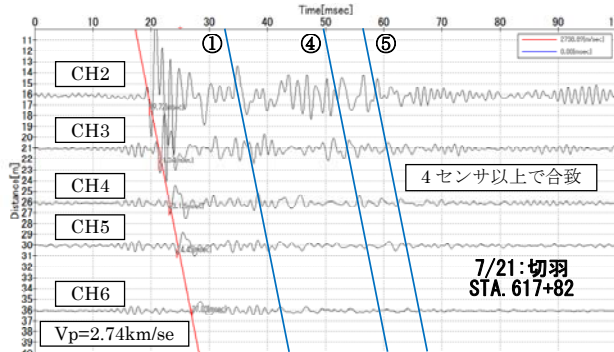
図-5 坑内での受信センサ、トリガセンサの設置状況と測定状況

表-2 切羽と受振センサの位置 (STA. 617)

計測日	CH1 トリガ 切羽位置	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6
7/21	+82	+66	+61	+56	+52	+46
7/22	+85	+68	+63	+58	+53	+48
7/23	+88	+72	+67	+62	+57	+52



バンドパスフィルタによるノイズ除去



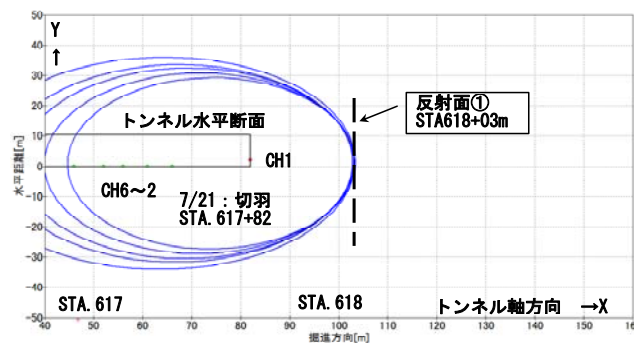
デコンボリューションによる反射波強調処理

図-6 波形処理結果と弾性波速度算出と反射面抽出

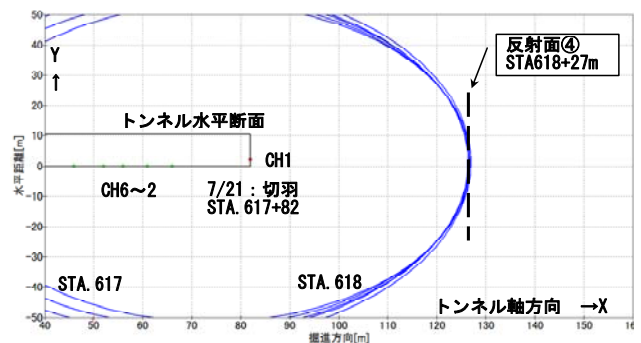
従来の反射法地震探査では、受振センサは坑壁近傍のゆるみ域を避けて壁面から 1m 以上の深さに設置する場合が多い。しかし、この方法ではセンサ設置孔を削孔する工程が必要となり、切羽進行に合わせて都度センサを再設置することは困難になる。そこで、筆者らはゆるみ域の影響をなるべく避けるために、ロックボルトを受振スパイクとして利用することとし、センサを簡易に脱着できる治具を作成した。センサを固着した治具は、ねじによりロックボルト頭部のナットに短時間で確実に固定される。図-5 に坑内での受振センサ、トリガセンサの設置状況と測定状況とを示す。

3. 測定結果

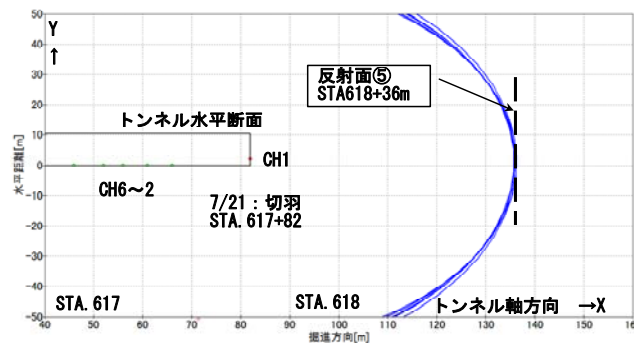
Yトンネルは新第三紀中新世の石英安山岩質凝灰岩、変質凝灰岩、流紋岩質凝灰角礫岩が主体の地山である。試験は事前調査による弾性波速度が2.6~2.8km/secの石英安山岩質凝灰岩から1.9~2.0km/secの変質凝灰岩に変化する地質境界面 (STA.618+30付近) の手前約50m付近から



反射面① (STA618+03m)



反射面④ (STA618+27m)

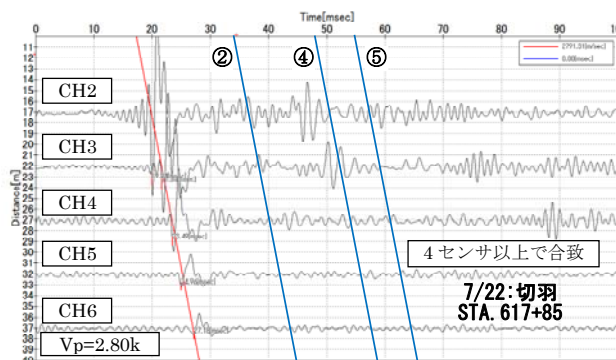


反射面⑤ (STA618+36m)

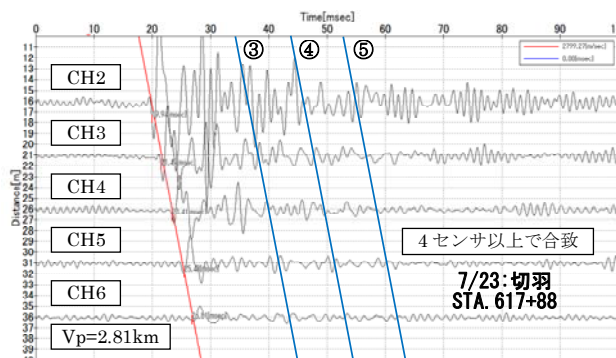
図-7 反射面①、④、⑤の楕円表示

3日間実施した。受振センサのCH1はトリガとしてブレーカーに装着、CH2~CH6は切羽後方16~17m (XL) から5~6m (ΔL) 間隔で側壁ロックボルトに固定した。測定時の切羽と受振センサの位置を表-2に示す。

図-6 の上図に 1 日目 (7/21) のブレーカーの打撃振動を 0.01~500Hz を通過させるバンドパスフィルター処理した結果を示す。CH2~6 の受振センサ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として 2.74km/sec が得られた。次に下図に示すデコンボリューションによる反射波強調処理後の波形から、弾性波速度と同じ勾配で遅れて到達する反射波が 4 つ以上のセンサで合致する反射面を抽出した結果、①、④、⑤の 3 つが推定された。前述の式(2)~(4)に基づき、トンネルの水平断面 (XY 面) に反射面を楕円表示した結果を図-7 に示す。反射面①は STA618+03m、④は STA618+27m、⑤は STA618+36m 付近に存在すると推定された。



反射波強調処理後（7/22）：反射面②，④，⑤



反射波強調処理後（7/23）：反射面③，④，⑤

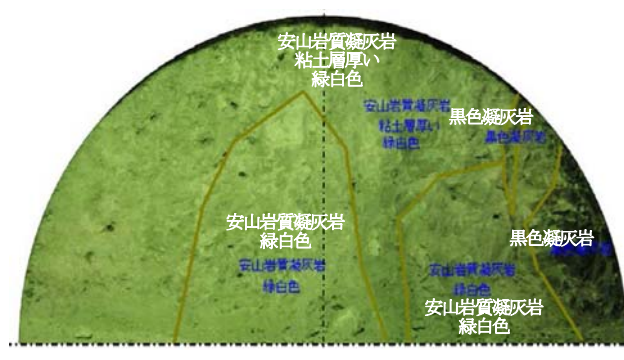
図-8 弾性波速度と反射面抽出

表-3 推定された反射面の位置

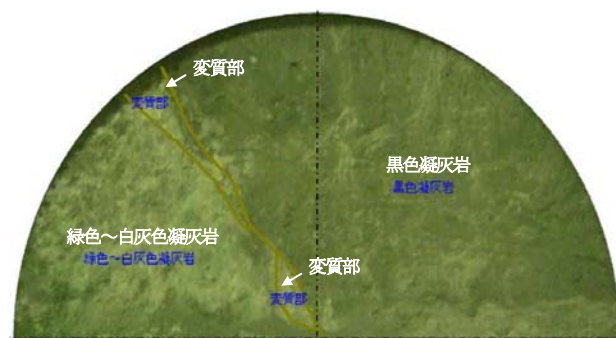
計測日	切羽位置 STA.617	反射面（STA618）				
		①	②	③	④	⑤
7/21	+82	+03			+27	+36
7/22	+85		+08		+27	+37
7/23	+88			+12	+25	+37

図-8 に示す 2 日目（7/22）のデコンボリューションによる反射波強調処理後の波形から，②，④，⑤の 3 つ，3 日目（7/23）の処理後の波形から③，④，⑤の 3 つの反射面の存在が推定された．同様に反射面精円を計算し，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①～③の反射面位置は一致しなかったが，④は STA618+25～27m，⑤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．

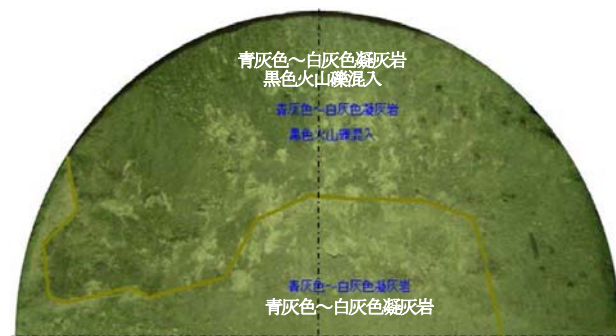
図-9 に切羽観察時の写真を示す．測定を開始した STA617+82 付近から STA618+22m 付近までは上図に示すような緑白色の安山岩質凝灰で，亀裂は細かく，方向は不規則で，亀裂に粘土層を介在する地山であった．STA618+23～33m では亀裂が少なく硬質な黒色凝灰岩が分布し，中図に示す STA618+29m 付近では黒色凝灰岩が広範囲に出現し，推定された反射面④に対応すると考えられた．また，STA618+34m 以降では徐々にやや軟質な角礫凝灰岩が出現し始め，STA618+37m 付近からは下図のように切羽全面が角礫凝灰岩となり，推定された反射面⑤に対応すると考えられた．



STA. 618+02（安山岩質凝灰岩）



STA. 618+29（硬質な黒色凝灰岩）



STA. 618+37（やや軟質な角礫凝灰岩）

図-9 切羽観察結果（切羽写真）

推定された反射面④，⑤は STA618+29m 付近の硬質な黒色凝灰岩帯の範囲に概ね対応していたと考えられる．このように測定を複数回行い，一致する反射面を抽出することにより測定確度を上げることができ，前方探査手法としての有効性を確認した．

4. おわりに

一次反射波を利用する切羽前方探査手法の提示と反射面の表示方法の改良を行い，施工中の Y トンネルで現場試験を行った．3 日間の測定で前方に 2 つの反射面の存在が推定された．推定された反射面は硬質な黒色凝灰岩帯の範囲と概ね一致していた．複数回の測定で測定確度を上げることができ，前方探査手法としての有効性を確認した．今後は 3 次元化の検討と地山条件の異なるデータを蓄積して精度の向上を図る予定である．

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: トンネル施工時の振動を利用した前方探査手法の現場試験, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, No.VI-379, pp.757-758, 2013.
- 3) 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, pp.280-283, 2014.
- 4) 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.
- 5) Cohen, J. K. and Stockwell, Jr. J. W., (2011) : CWP/SU: Seismic Unix Release 43: a free package for seismic research and processing, Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.

AN IN-SITU TEST ON SEISMIC EXPLORATION METHOD USING THE VIBRATION GENERATED BY THE TUNNEL BREAKER MACHINE

Naruki WAKABAYASHI, Takurou NISHI and Yasuhisa AONO

A seismic exploration method using the vibration generated by the tunnel breaker machine is described. A direct wave and a reflected wave are measured by some seismic sensors, and a reflective surface position is presumed. This method can be measured without disturbing the excavation cycle, and improvement in accuracy can be aimed at by measuring two or more times.

As a result of in-situ test on two tunnels, the reflective surface position checked the validity of the technique in accordance with the geological hard zoon.