

# 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

若林 成樹<sup>1\*</sup>・西 琢郎<sup>1</sup>・中谷 篤史<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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。この手法を施工中の2箇所のレストラン現場に試験適用した結果を報告する。Hトンネルでは1日目と2日目の測定から推定された反射面位置は切羽進行に対応して移動し、複数回による確度向上を確認した。この反射面は後の切羽観察で確認された弱層部に対応していた。また、Kトンネルで推定された反射面位置は事前に実施されていた先進ボーリングで確認されていた地層境界面と一致する結果が得られ、手法の有効性が確認された。

**Key Words :** *in-situ test, seismic exploration method, vibration of excavation 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、ブレイカーやジャンボなどの掘削機械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2種類の手法<sup>1,2)</sup>を提示してきた。本報ではH、Kトンネルの2箇所の現場に適用した結果<sup>3)</sup>について報告し、適用性と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

掘削機械で発生した振動が切羽前方の反射面から戻ってくる一次反射波を利用する手法と、切羽と反射面間で

の多重反射波を利用する手法を以下に記す。

一次反射波を利用する手法では図-1 に示すようにこそく時のブレイカー打撃振動を切羽に与え、切羽後方に等間隔 $\Delta L$ で設置した受振センサにより、直接波と一次反射波を測定する。そして直接波の初動到達と直接波と一次反射波が重なった特徴的な波形を抽出する。図-2 に示すように各受振センサの直接波の初動到達時間差 $\Delta T1$ から岩盤の弾性波速度 $V$ は式(1a)のように求められる。また、一次反射波は直接波の到達から $\Delta T2$ 遅れて到達する。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、反射波は切羽と反射面間を往復するので切羽から前方の反射面までの距離 $L$ は式(1b)に示すように表される。

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

$$L = \Delta T2 \times V / 2 \quad (1b)$$

1回の測定で直接波と一次反射波が重なった特徴的な波形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うと、その特徴的な波形が切羽進行長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推定確度を上げていくことが可能となる。

また、多重反射波を利用する手法も測定方法は同じである。切羽前方に反射面が存在すると、切羽と反射面間

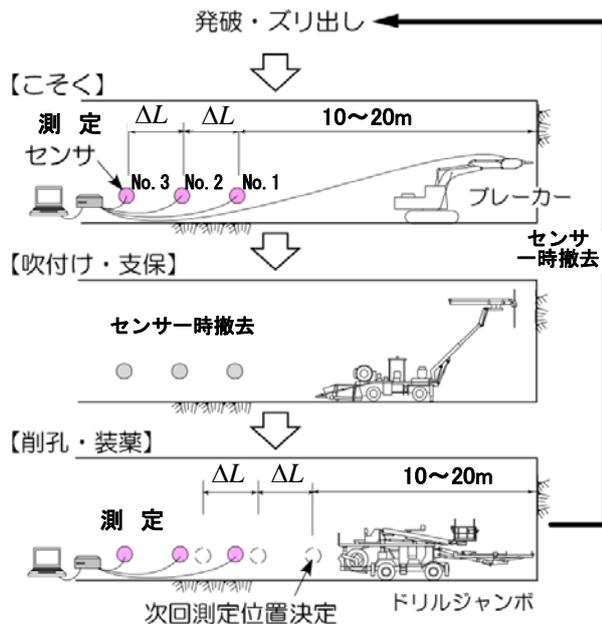


図-1 探査手法の概要

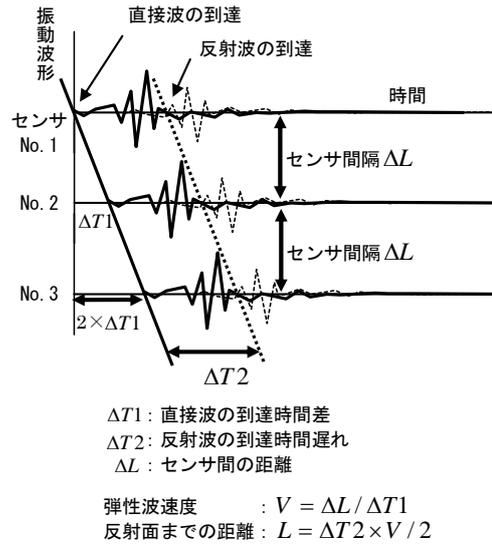


図-2 弾性波速度と反射面までの距離の算出法

で多重反射波が発生し、距離に応じた周波数成分が強調される。切羽から一定距離後方に設置した受振センサでドリルジャンボ等の削孔振動を測定してスペクトル解析を行うと、掘削に伴い反射面が近づくとき、徐々に高い周波数成分が強調される。この移動する周波数から反射面の位置を推定することが可能となる。

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-3 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を示す。

(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。受振センサー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ローカーに取り付けるため、センサ数は 4~6 個となる。表-1 にその他の測定仕様一覧を示す。

3. 測定結果

現在、前述の探査手法を複数のトンネル現場に試験適用して有効性を検証中であるが、その中から2箇所のト

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機会が多い。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

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)



ロックボルト頭部に取り付けた受振センサ

ブローカーに取り付けたトリガセンサ

測定状況

図-3 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

ンネルで一次反射波を利用した探查結果を以下に記す。

### (1) Hトンネル

Hトンネルは新第三紀中新世の泥岩と玄武岩質火砕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2.0~2.1km/secの泥岩主体で所々粘土化帯（脆弱部）を伴う区間で行った。受振センサは切羽から約15m後方から5m間隔で5個を坑壁のロックボルト頭部のナットに固定した。測定は2日間行い、2日目は1日目から切羽が約4m進行した状況で測定した。

図-4 に 1 日目のこそく時のブレーカーの打撃振動の測定例を示す。受振センサの波形には高周波のパルス状のノイズが含まれ、15m、20m、25m の地点までは打撃振動が到達しているのは判別できるが、30m、35m 地点ではノイズのために不明瞭である。そこで 0.01~500Hz を通過させるバンドパスフィルター処理を行い、主に高周波成分を取り除いた。その結果を図-5 に示す。ノイズが除去された効果で 5 地点の受振センサに打撃振動の直接波が明瞭に到達していることが確認でき、黒線の勾配から弾性波速度は 2.2km/sec が得られた。20m 地点の最初の黄色の破線枠で囲った直接波の波形と類似する波形が次の黄色の破線枠に現れており、これが反射波と考えられる。直接波が到達して 0.01897sec 後に反射波が到達している。切羽前方の弾性波速度が 2.2km/sec で同じと仮定すると、この時間遅れから反射面位置は切羽の前方 20.9m と推定される。各受振センサには黒の破線で示す位置に反射波が到達することになる。15m 地点では反射波と推定されるやや大きな振動が到達しているが、25m、30m、35m 地点では反射波は不明瞭である。

図-6 に同様にバンドパスフィルター処理を行った 2 日目のブレーカーの打撃振動の測定例を示す。切羽自体は前日より約 4m 進行している。反射波と推定される直接波に類似した波形は、1 日目より早く、直接波が到達してから 0.01588sec 後に到達しており（赤枠）、この時間遅れから反射面位置は切羽前方 17.5m と推定され、約 4m の切羽進行と対応している。

切羽観察から反射面と想定される付近には軟弱層が存在していた。このように測定を複数回行うことにより測定精度が上がる事が確認できた。

### (2) Kトンネル

Kトンネルは新第三紀中新世の一部変質した安山岩と泥岩からなる地山である。試験は事前調査による弾性波速度が2.0~3.8km/secの安山岩の区間で行った。受振センサは切羽から約16m後方から6m間隔で3個を坑壁のロックボルト頭部のナットに固定した。掘削作業が中断していたため、測定は1回のみ行った。

同様にバンドパスフィルター処理を行ったこそく時の

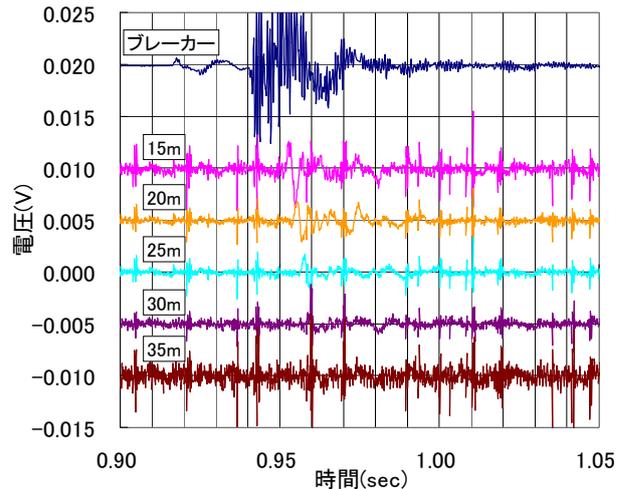


図-4 一日目のブレーカ打撃振動の測定例  
(Hトンネル, 1日目)

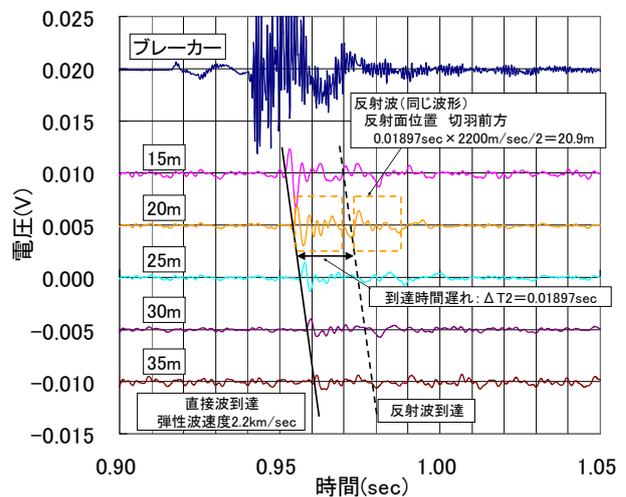


図-5 バンドパスフィルター処理後の振動波形  
(Hトンネル, 1日目)

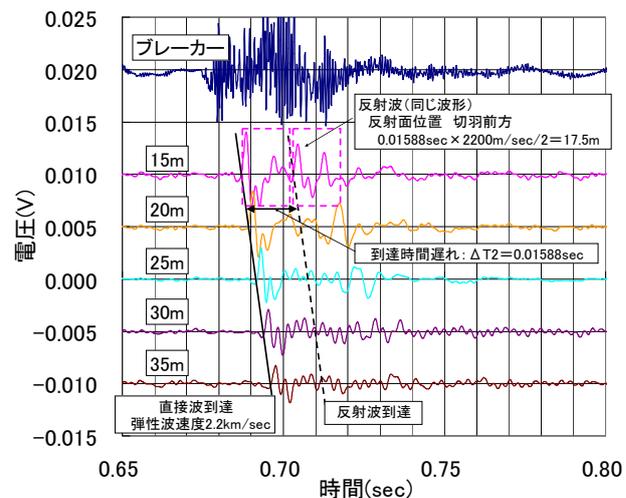


図-6 バンドパスフィルター処理後の振動波形  
(Hトンネル, 2日目: 切羽4m進行)

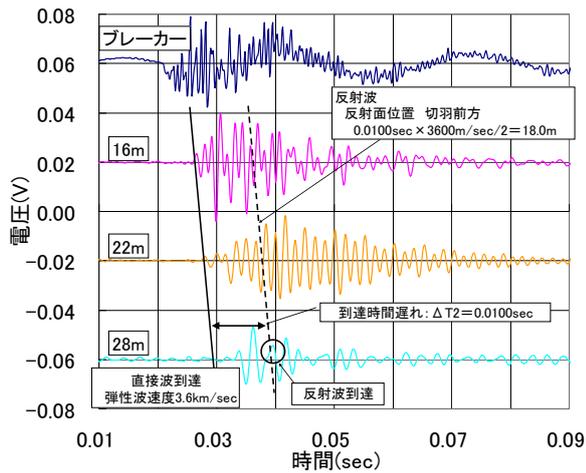


図-7 バンドパスフィルター処理後の振動波形 (Kトンネル)

ブレーカーの打撃振動の測定例を図-7に示す。黒線で示す直接波の初動到達時の勾配から弾性波速度は3.6kmが得られた。初期の直接波に類似した反射波と推定される波形は明瞭ではない。しかし、28m地点の受振センサの初動到達後0.0100secに波形の乱れ(図中の○印)が見られ、反射波の重なりによる影響と推定される。その反射波は16m、22m地点の受振センサには黒破線の位置に到達しているはずであるが、直接波に重なって不明瞭となっている。○印の乱れを反射波の影響とすると弾性波速度が3.6km/secなので、反射面は切羽の18m前方となる。

試験を行った区間では図-8に示すように先進ボーリングが実施されており、18m前方は安山岩から泥岩に変わる地層境界面となっていた。

#### 4. おわりに

一次反射波、多重反射波を利用する切羽前方探査手法を提示し、施工中の2箇所トンネルで現場試験を行っ

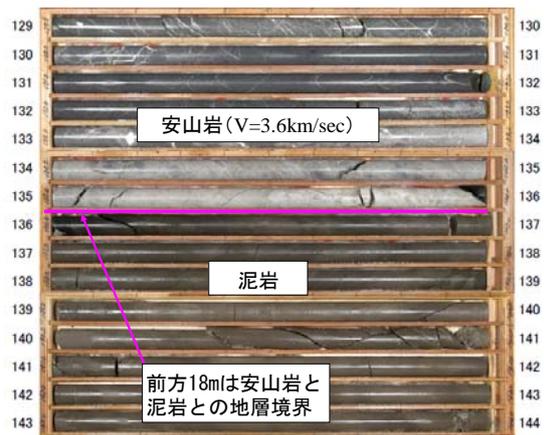


図-8 先進ボーリングコア写真

た。2日間の測定では反射面位置は切羽進行に伴って移動し、複数回測定することで測定精度を上げることができると得られた。また、推定された反射面の位置は弱層部や地層境界面と一致しており、前方探査手法としての有効性を確認した。今後はデータ処理方法の更なる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: トンネル掘削時の振動を利用した前方探査手法に関する室内試験, 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集, No.VI-029, pp.57-59, 2012.
- 3) 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.

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

Naruki WAKABAYASHI, Takuro NISHI and Atsushi NAKAYA

A seismic exploration method using the vibration generated by the tunnel excavation 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 weak plane or the stratum border plane.