トンネル掘削振動を利用した前方探査手法の研究開発

西 琢郎*・若林成樹**

要 旨

トンネル切羽前方の地山状況を事前に把握することは、突発事象への対処を減らし、工事を安全に進めるだけでなく、より急速施工を実現してコスト低減にも寄与するものと考えられる。ここで述べる前方探査手法は、いわゆる反射法弾性波探査を応用したものであり、油圧ブレーカーが切羽面でこそく作業を行う際の打撃振動測定から切羽前方の地質境界や断層等の位置を推定するものである。振動を受振するセンサーは、坑壁ロックボルトの頭部に簡便に脱着できる設置具を介して固定し、坑内での機器設置～撤収までの時間は30分以内で、通常の施工サイクルをほとんど阻害することがない。データ解析は、事務所内のパソコンでフィルタ処理・地山弾性波速度推定・反射波の抽出を行い、複数のセンサーで受振した反射波の等走時楕円体が重なる共通点を見出すことから反射面位置を推定する。この作業を掘削進行に併せて繰り返し行うことにより、同じ地点に反射面が現れることを確認して探査精度を向上させていく。複数のトンネルにおいて現場適用実験を行った結果、本手法の有効性が確認できた。

Key words : 前方探査 exploration ahead of tunnel face, トンネル tunnel, 反射法探査 reflection method

1. はじめに

近年の山岳トンネル工事においては、トンネル1件当たり2種以上の補助工法が採用されており、工事の対象となる地山の硬軟に関する条件がより広がって、何らかの補強を要する軟質な地山での施工が増加している¹⁾。一方、トンネル切羽前方の地山状況を事前に把握することは、補助工法を必要とするような不良な地山はもとより、より良好な地山においても、工事を安全に進めるだけでなく、より急速施工を実現してコスト低減にも寄与するものと考えられる。

切羽前方の地山状況を把握する手段として、これまで各種の物理探査手法が実施されている。それぞれの手法には特徴があり様々な長所があるが、一般に物理探査はそれだけで完結するものではなく、最終的には先進ボーリングやさぐり削孔による地山の直接確認を併用することが望ましい。しかし、ある程度の掘進長を有する先進ボーリングは、掘削機を設置する必要上施工を一旦止めざるを得ず、頻繁な実施が難しい場合が多い。そこで筆者らは、先進ボーリング等のように確実ではあるが施工を止めざるを得ない詳細調査の実施地点を、如何に合理的に選定するかを課題とし、この解決に向け、施工を極力止めずに日常作業のなかで切羽前方の状況を概略探査する手法の研究開発を進めている。現在までにNATM工法による山岳トンネルを対象として、掘削機械によって発生する振動を利用した切羽前方探査手法を検討してきた^{例えば2), 3)}。本論では、この手法の原理・特徴と測定～データ処理方法について述べ、施工中のトンネル工事現場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述べる。

2. 探 査 方 法

2.1 測定原理と特徴

本手法は、いわゆる反射法弾性波探査を応用したものであり、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。

反射波は発・受振点の位置、地山弾性波速度、反射波の到達時刻が既知である場合、発振点と受振点を焦点とする等走時楕円体の面上にある点から発生したものみなされる^{4), 5)}。ここで、**図-1**に示すようにトンネル軸方向をX、横断方向をY、上下方向をZとし、発振点座標を(0, 0, 0)、反射点座標を(X_p , Y_p , Z_p)、受振点座標を($-XL$, 0, 0)とすると、打撃点～反射点～受振点の波線長 Lw は式(1)で示され、これを変形すると最終的に式(2)の楕円体の式となる。そして、切羽前方の地山弾性波速度 V を、直線上に配置された複数の受振点における直接波初動の到達時

* 清水建設(株)技術研究所 Shimizu Corporation, Institute of Technology. (会員)

E-mail: nishi_t@shimz.co.jp

** 清水建設(株)技術研究所 Shimizu Corporation, Institute of Technology.

図-1 等走時楕円体の概念 (左) と波の到達時刻差の模式図 (右)

刻の差 $\Delta T1$ と、受振点間の距離 ΔL から式(3)によって求めた速度と同一と仮定し、 Lw がある受振点での直接波初動の到達時刻と反射波の到達時刻との差 $\Delta T2$ を用いて式(4)であらわすことにより式(2)の等走時楕円体を描くことができる。

$$Lw = \sqrt{Xp^2 + Yp^2 + Zp^2} + \sqrt{(Xp + XL)^2 + Yp^2 + Zp^2} \quad (1)$$

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

$$V = \Delta L / \Delta T1 \quad (3)$$

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

ここで、 ΔL ：受振点の間隔、 $\Delta T1$ ：隣り合う複数受振点における直接波初動の到達時刻の差、 $\Delta T2$ ：ある受振点での直接波初動の到達時刻と反射波到達時刻との差

ある反射波が等走時楕円体面上のどの場所から反射したものであるのかは、複数の受振点における等走時楕円体を描き、それらが重なる共通点反射点を見出すことによって識別することができる。但し、複数の等走時楕円体を重ねると、本来の反射点とは異なる場所において楕円体が近接し、見かけ上共通反射点に近いものになってしまうことがある⁵⁾。このような偽像による誤判断を防ぐため、少なくとも1測点において3成分の振動測定を行い、データから3成分のリサージュ図形を描いて波の到来方向を推定⁶⁾し、その方向とマッチする共通反射点を見出すか、芦田ほか⁵⁾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共通反射点位置を強調表示する。

本論で述べる探査方法の概要を図-2に示す。ここで用いる弾性波の振動源は、トンネル工事では普通に使用される

図-2 探査方法の概念図

油圧ブレーカーで、ブレーカーが「こそく作業」を行う時に切羽を打撃する際の振動を、トンネル壁面に設置したセンサーで受振することによって探査を行う。従って、本手法では探査のための特殊な機材や工程をほとんど必要としない。日常作業の中で実施できることが特徴であり、探査を一種のモニタリングとして掘削進行に伴って繰り返し実施していくものである。探査を繰り返すことにより、常に同一の地点からの反射を示唆する結果が得られれば、その推定確度はより高いことが期待できる。

2.2 測定仕様

測定に使用する機材は、地表における浅層反射法や坑内簡易弾性波探査法など、一般的な弾性波探査で用いられるものと同様（受振用ジオフォン、データロガー、パソコン等の記録装置）である。但し、起振は前述のとおり油圧ブレーカーを用いる。受振センサーの設置数は、一般には多数にすれば受振精度もより良いとされているが⁷⁾、設置数が多くなれば準備に要する時間も長くなり、その間のトンネル掘削作業に支障を及ぼす可能性もある。本手法では掘削作業を極力止めないことが主目的の一つであるので、設置作業をなるべく短時間で終わらせるために受振センサーは5点としている。切羽に最も近い測定点では、トンネルに対して直交する3成分方向の振動を計測し、残り4測点ではトンネル軸方向1成分の振動を計測する。図-3に本手法による発・受振点の配置を示す。受振点はトンネル側壁沿いの同一高さに直線状に配置し、発振は受振点を設置した側壁と同じ側の切羽面上で、浮石を避けつつできるだけ受振点と同じ高さで行う。これにより図-1の座標系に則った状態での測定とする。また、計測開始のトリガー用としてセンサー1個をブレーカーに取り付ける。表-1にその他の測定仕様一覧を示す。

一般に、トンネル内での弾性波探査においては、坑壁周辺に形成されるゆるみ域の影響を避けるため、受振センサーの設置深度を坑壁面から1m以上の深さにすることが多い。しかしこの場合、センサー設置孔を新たに削孔する必要が生じる。前述の通り、本手法では掘削作業に支障を

図-3 本手法における発・受振点の配置

表-1 測定仕様

センサータイプ	動電型
センサー固有振動数	28Hz
チャンネル数	8 (1chはトリガー用)
測定周波数	20kHz
分解能	16bit
プレトリガー	20msec

写真-1 受振センサー設置状況およびデータロガーと記録用パソコン

きたすような工程を極力なくすことを目標にしていることから、センサー設置孔は設けずロックボルトを受振針として利用することとしている。これによってゆるみ域の影響をなるべく避ける。また、切羽進行に合わせて発・受振間隔が常に一定になるようセンサー設置場所を都度盛り替え、発・受振点間隔が広がることによる波の減衰の影響を低減させる。更に、設置作業をより簡便に行うため、センサーをボルト頭部にねじによって簡易に脱着できる治具を作成した。写真-1にセンサー設置状況と測定機材の写真を示す。

2.3 データ処理

収録されたデータは、約0.2秒分を1データセットとして取り出し、図-4に示す手順に沿って処理を行う。

まず、受発振点位置等の入力データの整理・ノイズ状況の分析等の前処理を行った上で、バンドパス・利得補正 (AGC)・デコンボリューション等の数値フィルター処理を行ってノイズを除去し受振波形を強調する。次に、各受振センサーでの直接波初動の読み取り・直接波初動の到達時刻差と受振点間距離による地山弾性波速度の計算を行う。そして、3成分のデータを用いX、Y、Z方向の波の振幅値を図化したりサジュー図を作成して波の到来方向を確認すると共に、芦田ほか⁵⁾による波の到来方向に応じた振幅値の重みづけを行って走時楕円体上の反射点を抽出する。そして、反射点において等走時楕円体に接する平面を反射面とする。

以上の処理手順を踏まえて切羽前方に出現するであろう

図-4 データ処理フロー

反射面位置を推定し、発・受振点の相対的位置を保持しつつ掘進に追従して測定を繰り返す。なお、上記のデータの分析・フィルター処理では、コロラド鉱山大学からフリーで配信されているCWP/SU⁸⁾を用い、直接波初動の自動読み取り・弾性波速度計算と走時楕円の描画・強調では、自社開発のソフトを用いた。

3. 現場適用実験

本手法の適用性を検証するため、建設中のトンネル工事現場にて適用実験を行った。本論では、比較的硬質な地山であるTトンネル、および軟質な地山であるYトンネルでの実施結果について述べる。

3.1 Tトンネル実施結果⁹⁾

Tトンネルは近畿地方南部に位置する道路トンネルで、地山は新第三紀堆積岩類の中・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級と比較的硬質な状況であった。

実験は、事前の物理探査によりトンネル内に想定されていた低速度域 (STA.400+75m付近：図-5) の約40m手前から4回、切羽が計16.8m進行する間に行った。測定では、発破後ズリ出しが終了した直後に発・受振センサーを取り付け、切羽をブレイカーで1～3回打撃することを10回程

図-5 Tトンネルの概略縦断面図と測定区間

繰り返す間の振動を計測した。計測に要した時間は、設置→計測→撤去までで30分以内であった。

図-6に受振波形をフィルター処理した結果の一例を示す。Trace 1～5は受振点1～5のX成分（トンネル軸方向）の振動であり、各Traceで比較的明瞭な初動が現れている。Trace 1～5の直接波初動の到達時刻の差から地山弾性波速度は3.3km/sと推定され、これは事前探査での弾性波速度（図-5中に記載の3.1km/s）とほぼ一致していた。また、初動から0.04秒以降は波の減衰が大きくなっていることが読み取れる。

図-6のTrace 6と7は、受振点1におけるY・Z成分の振動である。同図からも傾向がうかがわれるが、3成分の振動を用いて描いたりサージュ図形の分析⁹⁾から、今回測定された波形は概ね全てX成分の振幅が大きく、トンネル前方からの波の到来が示唆された。そこで、切羽前方1次元方向での反射波の伝搬を仮定し、受振点4点以上で地山弾性波速度に応じた到達時刻差をもって到達する波群を抽出した。図-6に到達時刻遅れの勾配を示す直線と、この勾配と概ね一致すると判断した波形の立ち上がり点（図中の矢印）を示す。同図では一致が不明瞭なもの（図中の破線矢印）も多いが、ここではA～Eの5つの波群を反射波候補として選定した。

翌日の第2回測定では、切羽が6.0m進行した状態で発・受振ジオメトリーを同じにして測定を行った。波形群A～Eがもし同一の反射点から伝播した反射波であれば、前日の位置より6.0m分早く到達することになる。前日と同じく4受振点以上で想定した走時に波が到達している場合を○、3測点では△、2測点以下は×と評価し、3日目、4日目も同様の測定を繰り返した。

以上4日間の推定結果をまとめたものが表-2である。推定確度を高（○が3日以上）、中（△が2日以上）、低（×が2日以上）と分類すれば、当初想定した波群の内C以外は中以上の推定確度となった。これらを後日の掘削結果と対比すると、推定確度中以上の反射面では推定位置より

図-6 Tトンネル探査結果から反射波の選択（矢印：地山速度勾配に一致とみなした点）

5 m程度の範囲内で風化が進んだ岩盤劣化部（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）が出現し（図-7）、切羽前方50m程度における探査としての有効性が確認できた。

3.2 Yトンネル実験結果

Yトンネルは北陸地方に位置する道路トンネルで、地山は新第三紀中新世の石英安山岩質凝灰岩、変質凝灰岩、流紋岩質凝灰岩角礫岩を主体とする。事前調査による地山弾性波速度は1.9～2.8km/secと全体に軟質であった。

ここでの実験は、事前調査によって比較的硬質な安山岩質凝灰岩から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（トンネル距離程STA.618+30m）の約50m手前から、切羽の進行に合わせて計測点を前進させつつ3日

表-2 選択した波群の評価

測定位置	A	B	C	D	E
TD220.6	○	○	○	○	○
TD226.6	○	△	×	△	×
TD231.4	○	△	△	○	△
TD237.4	△	△	×	△	△
推定確度	高	中	低	中	中
TD237.4からの 反射面位置	3m	17m	29m	47m	57m
実際の劣化部 (TD237.4～)	概ね一致 (7.2m)	一致 (18～ 19.2m)	なし	概ね一致 (42.0, 45.6m)	概ね一致 (52.8, 61.2m)

図-7 Tトンネル探査結果のまとめ

図-8 Yトンネル探査記録例（バンドパスフィルター処理後）

間、計3回の測定を行った。

図-8にバンドパスフィルター処理後の波形例を示す。Trace 1～5は図-6と同様に切羽から近い受振点の波形であるが、地山が全体に軟質であることから、切羽から離れるにつれて波の減衰が大きかったことが判る。Trace 1～5の初動到達時刻の遅れより地山弾性波速度は2.7km/sと推定され、これは事前探査での弾性波速度2.6～2.8km/sとほぼ一致していた。また、図-8のTrace 6, 7は切羽に

最も近い受振点のY成分（トンネル横断方向）とZ成分（鉛直方向）の振動である。

ここでの実験では、3成分センサーによる測定結果から、反射面の3次元分布を推定することを主な目的とし、芦田ほか⁵⁾による3成分振幅の重みづけ強調によるイメージング処理を行った。図-9(a)～(f)に処理結果図を示す。図-9(a)は距離程STA.617+82mにおける測定結果で、XY面（受振点を通る水平面）での結果であり、同(b)

図-9 Yトンネル探査結果の3次元表示

はXZ面（受振点を通る鉛直面），同（c）は受振点から左右100m，上下±60m，奥行き100m範囲の結果をブロック状に示したものである．赤と青は波動の押し引きの違いを示し，色が濃いものほど波形の変位量（振れ幅）が大きいことを表している．

図-9（a）より，切羽から15m程度以内の近傍を除けば，概ねSTA.618+00m～5m付近の切羽前方左下とSTA.618+20m～30m付近の前方～右下からの反射波が存在すると推定された．同様の測定を切羽が3mずつ進んだSTA.617+85mとSTA.617+88mにおいて行い，その結果の例としてXY面での分布図をそれぞれ図-9（d）（e）に示す．図-9（d）ではSTA.618+00m付近の反射波はあまり明瞭ではないが，STA.618+20m付近の反射が顕著である．また，図-9（e）では再びSTA.618+0～10m付近とSTA.618+20mの反射波が顕著である．以上3日間の測定結果を受振点1を起点に図として重ねて表示したものが図-9（f）で，全体としてSTA.618+0～15m付近とSTA.618+20～30m付近からの反射波が到来したと考えられた．また，STA.618+30m以遠では顕著な反射波が認められなかった．

前述の通り，本トンネルの事前調査ではSTA.618+30m付近に硬質岩→軟質岩への境界の存在が予想されていたが，実際の掘削では，硬質な黒色凝灰岩がSTA.618+02m付近から切羽右側の一部に出現するようになり，STA.618+13mで切羽面の約50%を占めるようになった．そしてこれ以降，硬質な黒色凝灰岩は不規則に出現しながらSTA.618+20mで切羽面の約70%を占めるようになった．更に，STA.618+32m付近からは徐々に減少し，STA.618+35m付近で切羽全面が軟質な凝灰角礫岩へと移り変わった．この地質状況の変化と反射面推定位置の関係を図-10に示す．本手法による予測では，これらの地質変化とあまりよい一致は示さなかったが，STA.618+0～15m付近の反射波は切羽右から出現した硬質な黒色凝灰岩と，STA.618+20m付近の反射は，この硬質な黒色凝灰岩が不規則に分布する

図-10 反射面位置の推定と掘削実績

状況に対応しているものと考えられる．また，STA.618+30m以降で反射波の減衰が大きくなった点は，軟質な凝灰角礫岩に全面的に移り変わったことに対応するとみられる．以上により，本手法による測定で，地層の3次元分布に対応しうる反射波分布が得られることが確認でき，3次元予測への可能性が示されたと考えられる．

4. まとめと今後の課題

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方法の原理・特徴と測定～データ処理方法について述べた．また，建設中の道路トンネルにおける本手法の現場実験では，3～4日間の測定で切羽前方約50m間での複数の地山変化点の存在を予測して手法の有効性を確認し，地層の3次元分布予測への可能性を示した．

筆者らは，ここで紹介した現場以外においても引き続き本手法の適用実験を重ねている．今後は，ブレーカーが切羽を連続的に打撃する際のデータを利用してスタッキングを行いS/N比の向上を図ること，切羽進行に伴うデータのスタッキングも自動処理化すること，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，開発を継続していく所存である．

謝辞 現場適用実験を行うにあたり，Tトンネル，Yトンネル工事作業所ならびに監督官関係各位には多大なるご協力を頂きました．ここに深く感謝の意を表します．

引用文献

- 1) 日本トンネル技術協会（2010）：山岳トンネル工事の推移と災害発生状況（第2章），pp.1～13.
- 2) 西琢郎・若林成樹・中谷篤史（2011）：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.
- 3) 若林成樹・西琢郎・青野泰久（2015）：ブレー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.
- 4) 廣岡知・芦田譲・佐々宏一（1991）：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.
- 5) 芦田譲・松岡俊文・楠見晴重（2001）：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.
- 6) 石山宏二・土屋彰義・千田敬三・中村康夫（1994）：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.
- 7) 稲崎富士・トンネルHSP共同研究会（1997）：切羽前方地山の亀裂評価と施工管理の技術（トンネルHSP），土と基礎，Vol.45，no.5，pp.13～16.
- 8) 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.

た切羽前方探査法, 土木建設技術発表会2014概要集,
pp.120-125.

- 9) 西琢郎・若林成樹 (2014): トンネル掘削機の振動を利用し

(2015年 9 月 8 日受付, 2015年12月17日受理)

Jour. Japan Soc. Eng. Geol., Vol.56, No.6 pp.343-349, 2016

Research and Development of an Exploration Method using the Vibration During the Excavation Work

Takuro NISHI and Naruki WAKABAYASHI

Abstract

Knowing the geological condition ahead of a tunnel face can reduce to unexpected events, and it can also contribute to cost-reduction and to achieve more rapid construction. Exploration technique described here is an application of the so-called reflection method. The estimation of a geological changing point was carried from the measurement of striking-vibration by a hydraulic rock-breaker when performing excavation work. The receivers are fixed on the head of rock bolts via installation tools, so it is never almost inhibit usual construction cycles. The reflecting position was estimated from the finding a common point on travel-time ellipses. By repeating this work while the excavation work, the exploration accuracy can be expected to improve. As a result of the field experiment in some tunnels, effectiveness of this method was confirmed.

Key words : exploration ahead of tunnel face, tunnel, reflection method