

トンネル掘削機の振動を利用した切羽前方探査方法

清水建設（株） 正会員 ○西 琢郎

清水建設（株） 正会員 若林成樹

1. はじめに

平成7年度をピークとして減少傾向が続いていた国内のトンネル工事量は、近年は漸減状態にあり、道路トンネル等ではここ数年むしろ増加傾向が続いている¹⁾。その中で、山岳トンネル工法の施工では、補助工法が採用された件数はトンネル数の1.8倍¹⁾となっており、先受け工等の何らかの補強を要する劣悪な地山状況における施工が増加している。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地山はもとより、より良好な地山においても、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。

切羽前方の地山状況を把握する手段として、各種の探査方法が実施されているが、最終的には先進ボーリングによる直接確認が最も確実性が高いものと考えられる。しかし、ある程度の長さを有する先進ボーリングは、機械設置の必要上施工を一旦止めざるを得ないので頻繁に実施することはできない。そこで筆者らは、施工を極力止めず日常作業のモニタリング的データとして切羽前方の状況を概略探査し、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いかに合理的に選定するかに関して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、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)}。本報告では、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、近畿地方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、今後の課題等について述べる。

2. 探査方法

(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。ここで用いる弾性波の振動源は、トンネル掘削では普通に使用される油圧ブレイカーで、「こそく作業」を行う時にブレイカーが切羽面を打撃する際の振動を、トンネル壁面に設置した加速度センサーで受振することにより探査を行う（図-1）。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せず、日常作業の中で実施できることが特徴であり、切羽の進行に伴ってモニタリング的に繰り返し実施していくことにより、反射面位置の推定精度の向上を図ることも狙いとしている。

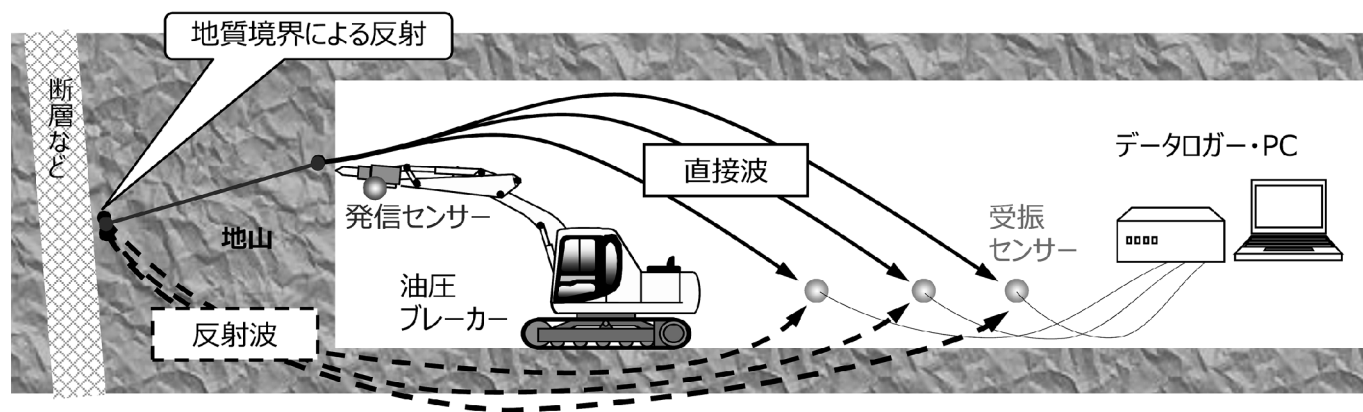


図-1 探査方法概念図

キーワード トンネル、切羽前方探査、反射法弾性波探査、物理探査

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設(株)技術研究所 TEL 03-3820-8369

(2) 測定仕様

測定に使用する機材は、通常の反射法弾性波探査で用いられるものと同様である。受振センサーの設置数は、作業をなるべく短時間で終わらせるため5点とし、切羽に最も近い測定点ではトンネル軸に対して直交する3成分方向の振動を計測、残り4測点では主にトンネル軸方向1成分の振動を計測する。また、ショットマーク計測用としてセンサー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、図-2、3 にセンサー設置状況を示す。

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るため壁面から1m以上の深さに設置される場合が多い。しかし、この方法ではセンサー設置孔を削孔する必要がある、切羽進行に合わせて都度センサーを盛り替えていくことは工程的に困難になる。そこで筆者らは、ロックボルトを受振スパイクとして利用することによってゆるみ域の影響をなるべく避けることとし、センサーをボルト頭部に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。

(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、受発振点位置等の測定ジオメトリの整理・ノイズ状況等の分析を行った上で、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いノイズを除去して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を読み取り、センサー間での到達時刻の遅れから地山弾性波速度を計算する。

表-1 測定仕様一覧

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 (1 c h 分はトリガー用)
測定周波数	10~20kHz
分解能	16bit
記録長	3sec (0.205sec@data)
プレトリガー	+2msec

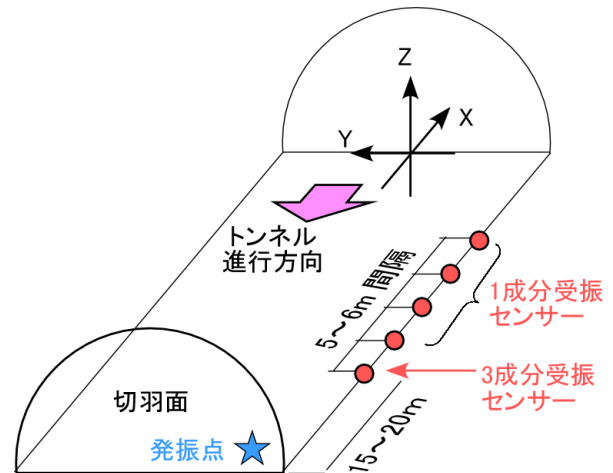


図-2 測定ジオメトリ鳥瞰図

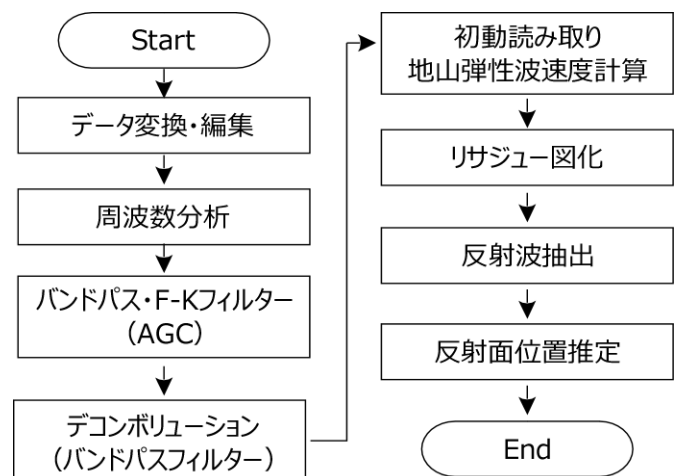


図-4 データ処理手順

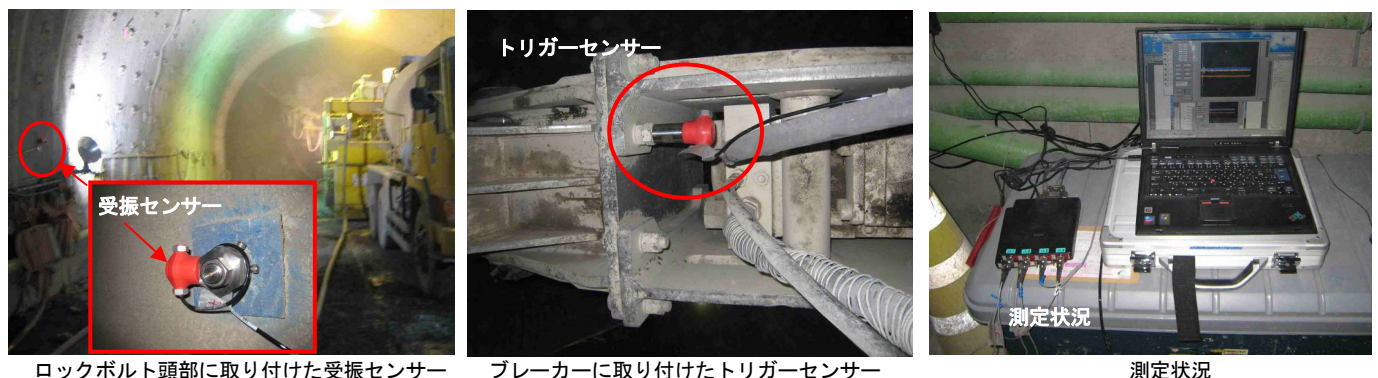


図-3 坑内での受振センサー、トリガーセンサーの設置状況と測定状況

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楕円体（走時楕円という）面上にある点から発生したものとみなされる（図-5）³⁾。そこで、センサー毎に反射波の走時楕円を描くと、同一の点からの反射波であれば走時楕円が重なる共通点が形成され、共通点と楕円体の接線が反射面となる。しかし、測定する振動成分が1成分のみである場合、複数形成されうる共通点のどれが反射点であったのが識別できない。そこで、図-2のようにト

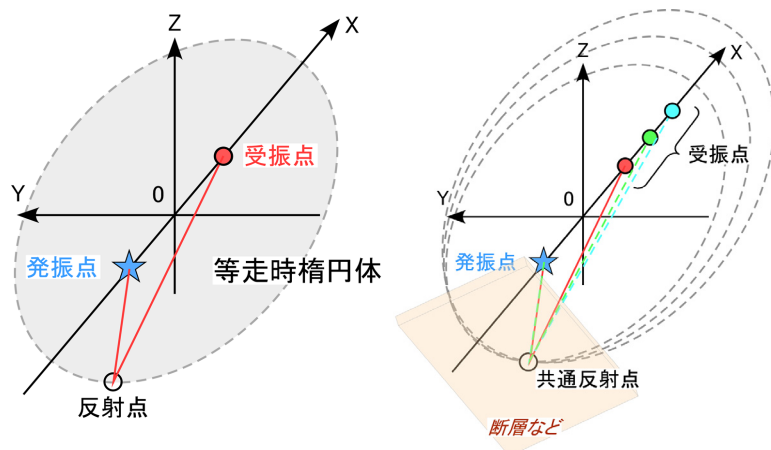


図-5 反射波の等走時楕円体の概念 ^{3)に加筆}

ンネル進行方向が主軸X方向となる座標系において、発・受振点をできるだけX軸に沿うように配置し、少なくとも1測点において3成分の測定を行えば、振動データから3成分のリサージュ図形を描いて波の到来方向を推定することにより共通反射点の位置を推定することができるようになる。

以上の処理手順を踏まえて切羽前方の反射面位置を推定し、更に掘削進行に追従して測定ジオメトリを保持しつつ測定を繰り返し、反射面が同じ位置に現れることを確認して推定精度を向上させていく。なお、上記のデータの分析・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/SU³⁾を用い、直接波初動の読み取り・弾性波速度計算と走時楕円の描画では、局所ARモデルによる初動の自動読み取り機能を備えた専用ソフト（自社開発）を用いた。

3. 現場適用実験

(1) 実験内容

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。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、岩盤等級は坑口部を除きCM～CH級と比較的硬固な状況であった。

実験は、事前探査によりトンネル内に想定されていた低速度域（距離程260m付近：図-6）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。

(2) 実験結果

図-7(a, b)に受振波形記録の一例を示す。Trace 1～5はX成分（トンネル軸方向）の振動であり、切羽に近いものから順に並べてあり、Trace 6, 7は切羽に最も近い測点のY成分（トンネル横断方向）とZ成分（鉛直方向）振動である。図-7(b)のフィルター処理後の波形では、各Traceで比較的分明な初動が現れている。Trace 1～5の初動到達時刻の遅れ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-

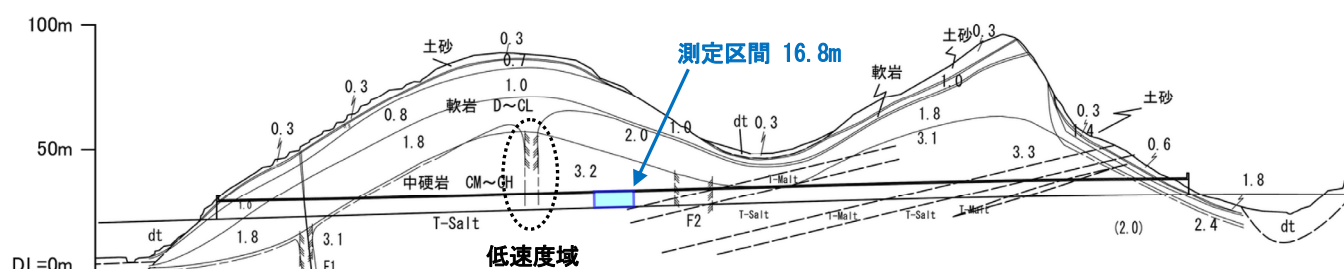


図-6 Tトンネル縦断面図

（図中数値：弾性波速度(km/s) , T-Salt：砂岩優勢泥岩互層, T-Malt：泥岩優勢砂岩互層, dt：崖錘堆積物）

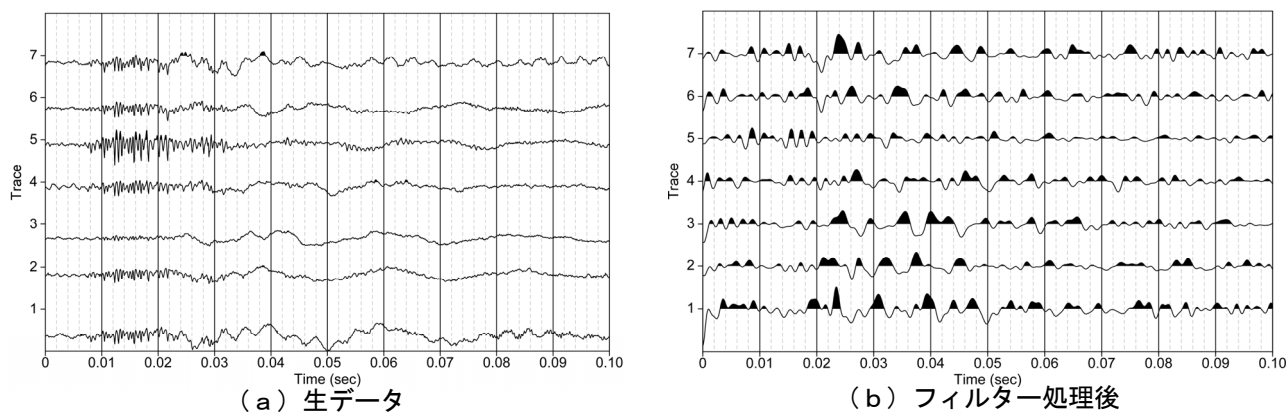


図-7 測定波形記録の例（第1回測定）

6 : 3.2km/s) とほぼ一致する。また、フィルター処理後波形からは、0.04 秒以降は初動から続く振幅の大きな直接波が少なくなり、反射波とみられるやや振幅の小さなピークが散見されることが読み取れる。

図-8 に、フィルター処理後のX・Y・Z成分波形から描いたリサージュ図形の一部を示す。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入射が示唆される。

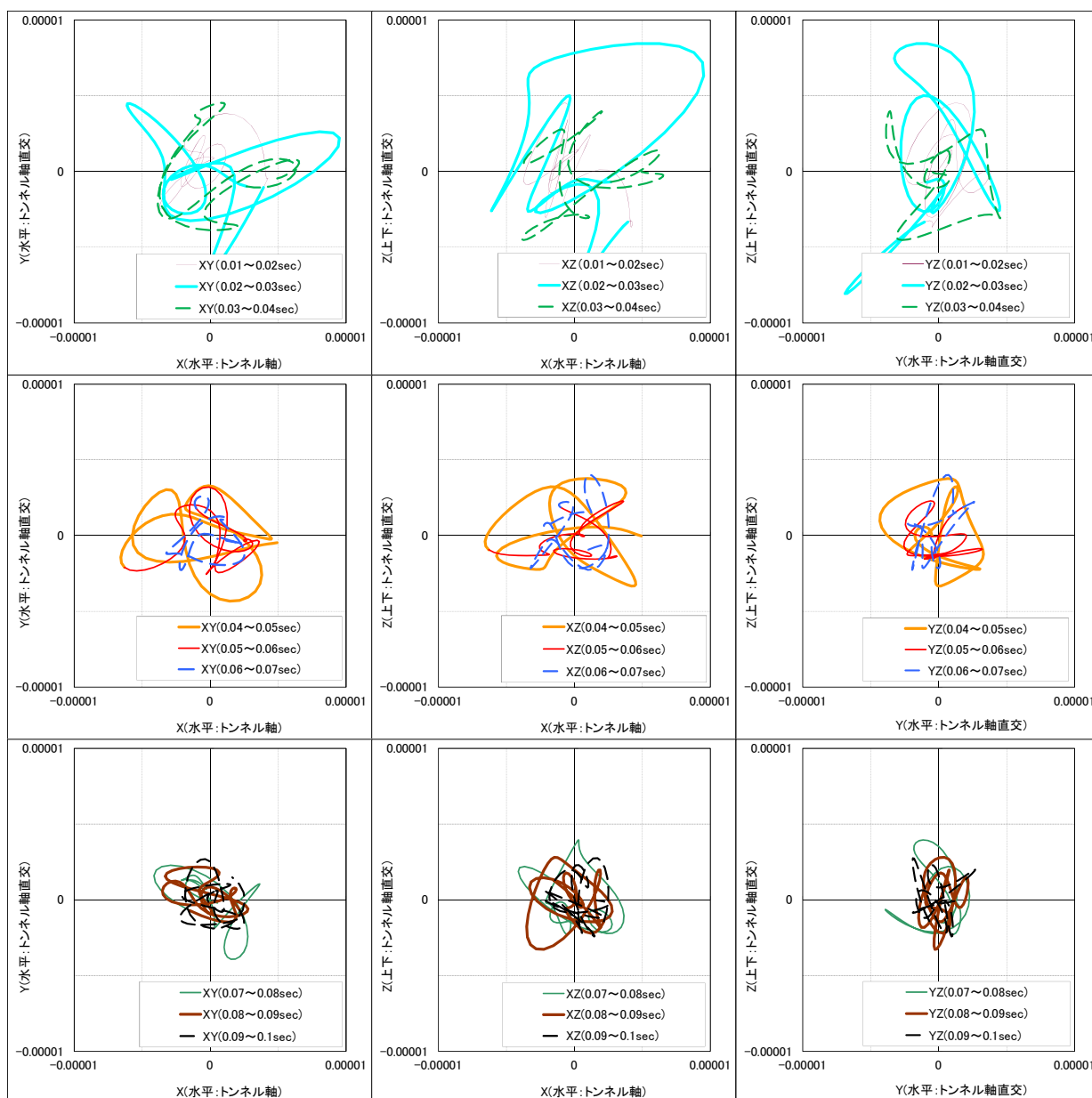


図-8 測定結果（第1回、フィルター処理後）のリサージュ図形（左：x y，中：x z，右：y z 成分）

そこで、トンネル軸方向1次元での波の伝搬を仮定し、弾性波速度に応じた到達時刻遅れの勾配を持つ反射波を抽出（4 測点以上で勾配に乗るものを選択）すると、図-9(a)に示したA～E の5つの波形の並びが選択された（実線：波形位置の並び）。これを共通反射面からの反射と想定し、走時楕円から求めた反射面までの距離を同図に示す。翌日の第2回測定（図-9(b)）では、切羽が6.0m 進行した状態で同様の測定を行った。反射波形A～Eは前日の位置（破線）より6.0m 移動した実線付近に並ぶことになる。A、B、Dでは3 測点以上で合致した。同様に3 日目（図-9(c)）は全て、4 日目（図-9(d)）ではC以外は3 測点以上で合致した結果となった。

以上4 日間の推定結果を総合すると、推定確度を高（×無し）、低（×が2 日以上）、中（左記以外）と分類すれば、C 以外は中以上の推定確度となる。これを後日の掘削結果で見出された地山劣化部の位置と対比すると、推定確度が中以上の反射面では劣化部の位置と概ね一致しており（表-2）、前方探査手法としての有効性が確認できた。

表-2 探査結果まとめと掘削実績との比較

測定位置	A : 青	B : 緑	C : 茶	D : 紫	E : 桃
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)

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。建設中の道路トンネルにおける本手法の現場実験では、4 日間の測定で切羽前方約60m 間での複数の岩盤劣化部の存在を予測し、手法の有効性を確認した。

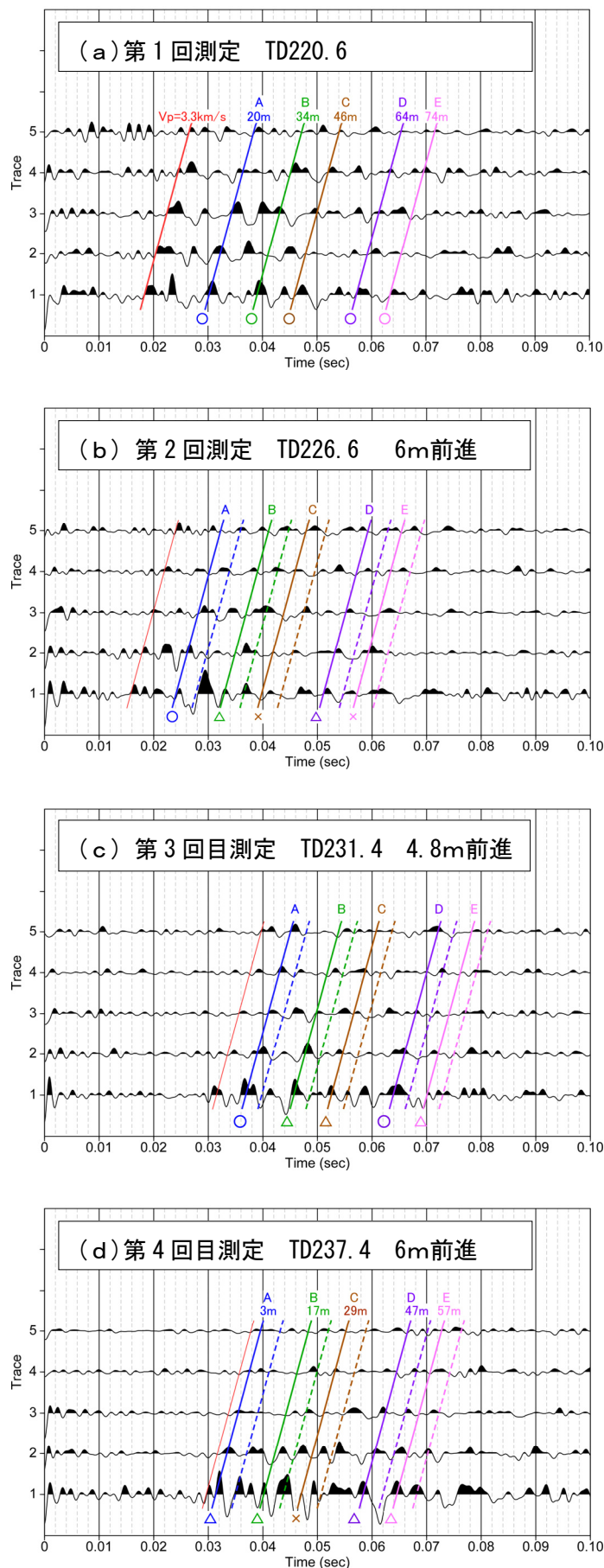


図-9 波形記録（0.1 秒分）と反射面位置

（○：4 測点で合致，△：3 測点で合致，×：左記以外）

（実線：反射波形位置 破線：前日の波形位置）

筆者らは、ここで紹介した現場以外においても引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、反射面の 3 次元形状をより高精度に評価すること、一連の処理をパッケージ化したツールの作成などを課題としている。

謝辞：現場適用実験を行うにあたり、T 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頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本トンネル技術協会：トンネル年報 2014, p.109, 2014.
- 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) 芦田譲, 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.
- 4) 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.