トンネル掘削機の振動を利用した 切羽前方探査の適用実験

西 琢郎1·岩橋 輔2

¹清水建設(株)技術研究所 社会基盤技術センター (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)
²清水建設(株)大阪支店 土木部 (〒541-8520大阪市中央区本町3-5-7 御堂筋ビル).

筆者らは、トンネル切羽前方探査手法の一つとして、掘削機械が発した振動を利用する反射 法地震探査の研究開発を進めている.近畿自動車道紀勢線 十九渕第一トンネル工事現場にて実 施した現場適用実験では、8チャンネルのセンサーを油圧ブレーカーおよびロックボルトに設置 し、ブレーカーが切羽面でこそく作業を行う際に振動測定を行った.測定データに各種数値フ ィルター処理を施して切羽前方からの反射波を抽出し、反射波の走時楕円を描くことによって 切羽前方約50m間での共通反射面を複数推定した.想定された反射面は、風化が局所的に進行 した岩盤劣化部に相当しており、本手法の有効性が確認できた.

キーワード 新技術, 切羽前方探査, 山岳トンネル, 反射法弾性波探査, 調査・計測

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, 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.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の中から,切羽前方の状況 を概略探査し,先進ボーリング等の詳細調査を実施する 場所を合理的に選定する方法を得るための研究開発を進 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,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1)}.

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、近畿自動車道紀勢線十九渕第 ー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

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行われる「こそく 作業」で使用される油圧ブレーカーで、ブレーカーが切 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とこ ろが特徴であり、また切羽の進行に伴ってモニタリング 的に複数回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可能である.



図-1 探查方法概念図

(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5箇所に設置とし、切羽に最も近 い受振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箇所では主にトンネル軸方向1成分 の振動を計測する.また、トリガーとして別のセンサー 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,図-2,3にセンサー設置状況を示す.

受振センサー数	7個
トリガセンサー数	1個
測定周波数	10~20kHz
測定時間	3sec
分解能	16ビット
センサー固有振動数	28Hz (動電型)

测学开展



従来の反射法地震探査では、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 孔する必要があり、切羽進行に合わせて都度センサーを 再設置することは工程的に困難になる. 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、 0.25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.



図-4 データ処理手順

まず、受発信点位置等の測定ジオメトリーの整理・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.

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 したものとみなすことができる². 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 時楕円が重なる点が形成され、反射面位置の推定ができ る.ここで、図-2のようにト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て測定を行えば、3成分振動デー タからリサジュー図形を描いてX軸方向の振動が卓越す



ロックボルト頭部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ーセンサー

測定状況

図-3 坑内での受信センサー、トリガーセンサーの設置状況と測定状況

る波を抽出すると切羽前方からの反射波である可能性が 高まる.X軸方向の振動が卓越する波であれば共通節点 は切羽前方にあり、反射面が鉛直に近いほど各センサー での波の到達時刻遅れは弾性波速度に応じて線形に現れ る.これは波形記録を並べることによっても確認できる.

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、更に掘削の進行に伴って測定ジオメトリーを保持しつつ測定を繰り返していく.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/SU³⁰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. 適用実験

平成25年8月,近畿自動車道紀勢線 十九渕第一トンネ ルにおいて,本手法の現場適用実験を行った.このうち, ブレーカーを用いた切羽面の打撃による探査では,4日 間の測定によって前方約60m区間内において4か所の地 山性状変化点を予測した.実験内容についてまとめる.

(1) 十九渕第一トンネルの概要

近畿自動車道紀勢線は、大阪府松原市を起点とし紀伊 半島を回り三重県多気郡多気町に至る延長335kmの高速 自動車国道である.現在、起点から和歌山県田辺市まで が供用されており、南紀田辺ICからすさみIC(仮称)に 至る区間(延長38km)の建設が平成27年の開通に向け進 められている。

十九渕第一トンネル工事は上記工事の一部で、日本三 古湯の1つである南紀白浜において延長388m,掘削断面 積約80m²のトンネルを建設するもので、平成24年11月よ り工期スタート、平成25年1月からの仮設備等の工事を 経て、4月中旬から本格的に発破掘削を開始、10月末に 貫通した(図-5).地山の地質は、新第三紀田辺層群 白浜累層の砂岩泥岩互層からなり、支保パターンはCII、 DI、DIIIからなるが、比較的岩質は硬固であった.しか し、到達側(起点側)坑口部は崩積土、破砕帯が厚く堆 積し、設計変更によりシリカレジンを注入材とする注入 式長尺鋼管先受工法が採用された.

(2) 実験内容

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-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、切羽をブレーカーで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.

(3) 実験結果

図-6にデコンボリューション処理を終えた受振波形 記録の一例を示す.波形は下から順に切羽面に近いもの から並んでおり、上2つの波形(Trace 6, 7)は測点1 におけるY成分とZ成分である.いずれも比較的明瞭な 初動が現れている.初動の到達時刻の遅れから地山弾性 波速度は3.3km/sと推定されるが、これは事前探査での 弾性波速度(図-5)とほぼ一致する.また、波形記録 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 ほぼ見られなくなり、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ようになる.



図-6 第1回測定結果(フィルター処理後)

図-7に、フィルター処理後のX・Y・Z成分波形から描いたリサジュー図形の一部(0.04~0.07秒分のみ)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.

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-8(a) に示したA~E の5つの波形の並びが選択された.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







図-7 測定結果(第1回,フィルター処理後)のリサジュー図形(右:xy,中:xz,右:yz成分)

反射面までの距離を同図に示す.翌日の第2回測定では, 切羽が6.0m 進行した状態で同様の測定行った.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測点 以上で合致した.同様に3日目は全て,4日目では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),中(×が1 日),低(×が2 日以上)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良く一致し ており,前方探査手法としての有効性が確認できた.

4. まとめと今後の課題

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、切羽前方探査を行う方法の研究開発を行った. + 九渕第一トンネルでの現場実験では、4日間の測定で切 羽前方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. 今後は反射面の3次元形状をより高精度 に評価する手法の改良に取組む所存である.

謝辞:紀勢線監督官詰所の中村恭介監督官には、本実験 を行うにあたりご協力頂いた.ここに深く感謝の意を表 します.

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 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.



