山岳トンネルにおけるケーブルレス 弾性波探査システムの開発と適用

中谷 匡志1・山本 浩之2・桐原 章浩3・天童 涼太4・鈴木 雅行5

1正会員	安藤ハザマ	土木事業本部 土木設計部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20) E-mail: nakaya.masashi@ad-hzm.co.jp
2正会員	安藤ハザマ	土木事業本部 土木設計部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20) E-mail: yamamoto.hiroyuki@ad-hzm.co.jp
3非会員	安藤ハザマ	広島支店 土木部 (〒730-0051 広島県広島市中区大手町5-3-18) E-mail: kirihara.akihiro@ad-hzm.co.jp
4非会員	安藤ハザマ	広島支店 土木部 (〒730-0051 広島県広島市中区大手町5-3-18) E-mail: tendo.ryota@ad-hzm.co.jp
5正会員	安藤ハザマ	土木事業本部 技術第三部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20) E-mail: suzuki.masayuki@ad-hzm.co.jp

施工中の山岳トンネル坑内において、切羽近傍の定量的地山評価および切羽前方探査が可能となるケー ブルレス弾性波探査システムを開発した.本システムは、探査のための配線が不要であることに加え、支 保工ロックボルトを受振器に利用するなどシンプルなシステム構成とすることで、トンネル施工サイクル の中で高精度の探査が可能となる.

探査については、ハンマー打撃を起振源とした坑壁での屈折法弾性波探査により、切羽近傍の定量的地 山評価が可能となる. さらに、掘削発破で発生する弾性波を12回程度連続的に計測することで、反射法弾 性波探査による切羽前方探査(最大150m程度)が可能となる.

本稿では、開発したシステムの構成を示すとともに、施工中のトンネル工事において実施した適用事例 について、良好な結果が得られたことから報告する.

Key Words : mountain tunnel, seismic reflection method, seismic refraction method, cableless, excavation blasting

1. はじめに

国内の山岳トンネル工事における施工法ではNATMが 主流となっており、支保設計については、施工前に地表 で実施される地質調査結果に基づき設定される. 地質調 査については屈折法等の弾性波探査による地山の弾性波 速度分布が調査されることが一般的であるが、土被りが 大きいトンネルにおいては、探査の精度が低下すること が知られている.

そこで、トンネル施工中に切羽前方の岩盤状況を精度 良く把握することを目的に、切羽前方探査が実施される. 様々な切羽前方探査手法の中で、比較的一般化された TSP法¹⁰は、反射法弾性波探査による探査手法であるが、 探査のために掘削作業を一時的に中断するとともに、専 門技術者による取扱いが必要となる.

また、山岳トンネルの掘削では、岩盤が堅硬な場合の

標準工法として発破方式が採用されるが,掘削発破によ り発生する弾性波を計測し、トンネル坑内における地山 弾性波速度の把握や切羽前方探査の試みが行なわれてい る^{2,3)など}.しかし、これらにおいても探査機材の配置や 実施方法が大掛かりとなるため、トンネル掘削を一時的 に中断する必要があり、掘削工程に影響を与えるもので あった.

以上のような背景から、筆者らは支保工ロックボルト を受振器として利用するなど、実用性に特化したシステ ムとすることで、施工サイクルに影響を与えることなく 弾性波探査(屈折法および反射法)が可能な「TFT探査」 の開発を進めている⁴.

TFT探査では、定量的な地山指標を切羽評価に提供す ることが可能であるとともに、未掘削区間の断層などの 位置を予測する切羽前方探査が可能である.しかしなが ら、従来のTFT探査では機材配線が必要であったため、 発破による飛石などからケーブルを防護する養生作業な ど,設置作業にある程度の時間を要した.

そこで、本システムをケーブルレスシステムへと改 良することで、坑内作業を簡便にするとともに、複数の 受振器での計測を可能とした. ケーブルレスシステムの 概念図を図-1に示す.本稿では、システムの概要につい て示すとともに、実際のトンネル工事における適用事例 について報告する.



図-1 ケーブルレスシステム概念図

2. システム構成

本システムの構成を写真-1に、機材配置例(掘削発破 による切羽前方探査の場合)を図-2に示す。弾性波デー タを記録する「①ADユニット」は、地震計、ロガー、バ ッテリーおよび受信アンテナ(トリガー無線)などが一 体化されたもので、2基での探査を標準とする.また、 既設の支保工ロックボルトに固定用治具を用いて設置す ることで、坑壁に密着した確実な固定を行う. これによ り、発破振動による機械自体の共振を防ぐことで、ノイ ズの影響が少ない良好なデータを取得することが可能と なる. ADユニットの諸元を表-1に示す.

データの記録は、写真-1に示す「②トリガーセンサー」 が起振信号(屈折法:ハンマー打撃による起振信号,反 射法:発破点火時の電気信号)を捉えると、「③トリガ ーユニット」から「①ADユニット」にトリガー信号 (送信周波数:800MHz帯,通信距離:100m程度)を送 信し記録を開始する、なお「②トリガーセンサー」は、 起振源によって発破母線に設置する「掘削発破用」と, ハンマーに設置する「ハンマー打撃用」から選択する.

計測時は、「④起動スイッチ」を遠隔操作(送信周波 数:426MHz,通信距離:最大150m程度)することによ り機材①③の起動を行い、記録後は自動停止する、この ように、計測時のみ機材を起動することで、消費電力を 低減し、1ヶ月程度の無給電での連続探査を可能とした. なお、切羽前方探査の解析に必要なデータ数について は、原則24データ(12発破、2~3日程度の計測)とし、



写真-1 システム構成



図-2 機材配置例(平面図,掘削発破利用時)

表-1 ADユニット諸元

成分数	1成分(水平切羽方向)
センサー	GS-20D(28Hz)
サンプルレート	5kHz,10kHz,20kHz
A/D分解能	24ビット
外寸	底面直径280mm,厚さ64mm

この期間は機材の移設は行わない.また、解析時のデー タ収集および解析作業は、専用ソフトウェアをインスト ールした「⑤タブレッドPC (Panasonic社製, FZ-G1)」を用 いて行い、Bluetoothによるデータ収集後、1時間程度の 作業で解析結果が出力可能である.

3. 施工中のトンネル工事における適用事例

(1) 探査概要

国土交通省中国地方整備局発注の鳥取自動車道下味野 トンネル工事(延長L=822m, 断面A=62m²)は, 鳥取自 動車道の付加車線の設置に伴うトンネル工事である.本 トンネルを構成する地質は、新第三紀安山岩質凝灰角礫 岩を主体とし、安山岩や流紋岩が部分的に分布している. 本トンネルの地質縦断図を図-3に示す.

このような状況において、本システムを適用すること により、支保パターンの妥当性を検討するための切羽近 傍の定量的地山評価を実施するとともに, 未掘削区間の 地質境界を把握するための切羽前方探査(探査距離



図-3 地質縦断図(当初)

100m程度)を実施した.なお両探査での受振点は同位置とし、計測中は受振器の移設は行っていない.

(2) 探査結果

a) 屈折法による定量的地山評価

受振点となるADユニットは、TD.607.2m(ADユニットNo.1)およびTD.605.2m(ADユニットNo.2)2箇所の支 保工ロックボルトを利用して坑壁に設置した.また,起 振点はTD.608.2~617.2m区間の坑壁とし、大ハンマーに よる打撃起振を行い(1.0m間隔,10点)、2基のADユニ ットで同時に計測した.計測状況を写真-2、最大振幅値 を一定とした計測波形を図-4に示す.

図-4より、ノイズの少ない明瞭な弾性波波形が得られていることがわかる.また、専用ソフトウェアを用いて各データの初動を読取った結果(走時曲線)を図-5に示す.なお図中、ハンマー起振による走時に加え、切羽での掘削発破((2)節b)項参照)で得られた結果も合わせて示している.

図-5より、各データのばらつきを示す相関係数は r=0.99を示し、精度良く探査が実施できているものと考 えられる.また、回帰直線勾配の逆数から求められる弾 性波速度については、ハンマー起振の場合はVp1=2.3~ 2.4km/s、掘削発破の場合でVp2=3.2~3.3km/sとなった. 探査を実施した区間の実績支保パターンはDIパターン となっており、本システムのハンマー起振で得られた Vp1=2.3~2.4km/sは、DIパターンの設計基準である Vp=3.0km/s以下と合致した結果であった.また、同一区 間における地表からの事前調査では、トンネル基面の弾 性波速度はVp=1.7~5.5km/sとされており、掘削発破で得 られたVp2=3.2~3.3km/sと概ね同程度の結果であった.

これらの結果について整理すると、屈折法弾性波探査 のハギトリの原理から、弾性波の伝播距離に対応した速 度層として、坑壁周辺の第1速度層(Vpl)および地山 深部の第2速度層(Vp2)を捉えているものと考えられ る. すなわち、受振点に対して伝播距離がL=17m程度以



写真-2 計測状況 (ハンマーによる起振)



図-4 ハンマーデーター覧 (AD ユニット No.2)



- 3 -



図-6 掘削発破データ一覧(正規処理)



図-7 解析フロー



図-8 反射面の抽出 (τ-Pフィルター)





写真-3 TD.677.7m 切羽状況

下であったハンマー起振では、トンネル掘削の影響による緩み領域(第1速度層)を捉えており、伝播距離が L=30~50m程度の切羽における掘削発破では、地山深部 (第2速度層)を捉えているものと考えられる。

b) 反射法による切羽前方探査

ADユニットはa)項の探査と同一位置となるTD.607.2m (No.1) およびTD.605.2m (No.2) に設置した(図-3参 照).また、トリガーユニットについては、TD.571m付 近の発破母線にセンサーを設置し、発破点火時の電流を トリガーとして捉えた.掘削発破データの計測は、 TD.637.7~656.7m区間の原則全ての掘削発破で行った(計 測データ数:24データ).計測された弾性波波形のうち、 初動の振幅値で正規化したADユニットNo.1の結果を図-6に示す.なお本システムでは、瞬発雷管による発破

(次段起爆まで250ms)のみを解析データとしており, 図中の0.09ms以降の高周波成分については起爆による爆 音が伝播したものであると考えられる.

解析は、専用のタブレットPCを用いて行い、発破デ ータに含まれる反射波を抽出することで反射面の位置を 予測した.解析フローを図-7,信号処理により反射面が 抽出された波形を図-8,解析結果を図-9に示す.

図-9より,比較的大きな反射面(赤色表示)がTD.670 ~680m区間において確認された.この結果に対し,同 一区間において安山岩の分布が想定されていることから

(図-3参照),これを反射面として捉えているものと考 えられた.なお、実際に掘削を進めたところ、反射面が 想定された区間において、安山岩の貫入および貫入の影 響による破砕部が確認されており精度良く探査できてい るもの判断された.当該区間の切羽写真を**写真-3**に示す.

4. まとめ

1) ケーブルレス弾性波探査システムの開発

施工中の山岳トンネル坑内において,施工サイクルの 中で弾性波探査(屈折法および反射法)を可能とするケ ーブルレス弾性波探査システム「TFT探査」を開発した. 本システムは、支保工ロックボルトを受振器として利用 するとともに、機材配線を不要としたことで坑内作業を 簡略化し、複数の受振器による計測が可能となった.

これにより、従来機と比較して短期間の設置作業と計 測で精度の高い弾性波探査を可能とした.また起振源と しては、ハンマー打撃と掘削発破を利用することができ るため、切羽近傍の弾性波速度による定量的地山評価お よび切羽前方探査を同一システムで実施することが可能 となった.

2) 屈折法による定量的地山評価

本システムの適用により、切羽近傍においてハンマー

打撃を起振源とした屈折法弾性波探査を可能とした.

今回,切羽後方10m程度の区間において探査を実施し たところ,トンネル掘削の影響を受けた坑壁周辺の緩み 領域(第1速度層)と考えられる速度層を捉えることが できた.なお得られた弾性波速度は,同一区間の実績支 保パターンに対応する弾性波速度と合致することが確認 された.

これにより、本システムを用いた屈折法弾性波探査を 切羽近傍で実施することにより、定量的な地山評価をリ アルタイムに実施し、合理的な支保パターン選定におい て有意なデータを提供できるものと考えられる.

3) 反射法による切羽前方探査

同様のシステムを用いて、切羽での掘削発破を連続的 に計測(12発破、24データ程度)することで、発破デー タに含まれる反射波を抽出し、長距離の切羽前方の地質 状況を予測することを可能とした.

今回,20m程度の切羽進行区間の掘削発破を計測した 24データを用いて,専用の解析ソフトウェアによる解析 を行った.その結果,切羽前方20m程度に比較的大きな 反射面が予測され,実際の掘削においても予測された反 射面の位置で、安山岩の貫入および貫入の影響による破 砕部が確認された.

今後、本システムによる反射法弾性波探査を施工サイ クルに組み込むことで連続的に高精度の切羽前方探査が 可能になるものと考えられる.

参考文献

- 1) Sattel, G., Frey, P. and Amberg, R. : Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods, *First Break*, Vol. 10, No. 1, 1992.
- 2) 村山秀幸,丹波廣海,野田克也,藤原明,東中基 倫:切羽前方探査における S 波探査と地震波干渉法 について、トンネル工学報告集,第 24 巻, I-22, 2014.
- 3) 栗原啓丞、山本拓治、横田泰宏、宮嶋保幸:トンネルトモグラフィ探査手法の開発と現場適用事例、トンネル工学報告集、第24巻、I-27,2014.
- 中谷匡志,大沼和弘,山本浩之,西川篤哉,新妻弘明:トンネル掘削発破で発生する弾性波を用いた地山評価手法と切羽前方探査の検討,土木学会論文集 F1(トンネル工学), Vol.72, No.2, pp.53-66, 2016.

(2016.8.5受付)

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF CABLELESS SEISMIC SURVEY SYSTEM IN MOUNTAIN TUNNELING

Masashi NAKAYA, Hiroyuki YAMAMOTO, Akihiro KIRIHARA, Ryota TENDO and Masayuki SUZUKI

An underground seismic wave exploration system was developed during the construction of a mountain tunnel. This system utilizes hammer sources which allows the quantitative evaluation of the geological condition of the tunnel face. Additionally, it is possible to explore the tunnel face forward using the reflected waves generated by the excavation blasting. The main feature of this system is that it uses the excavation blasting as a wave source and the rock-bolts which are supporting the tunnel as measuring sensor. Furthermore, this technology provides a cableless measuring system which does not interrupt the construction works of the tunnel.