発破振動弾性波を用いた 連続的トモグラフィ解析による切羽前方探査

青木 宏一1・片山 政弘2・石濱 茂崇3・手塚 仁4・三木 茂5

¹正会員 (株)熊谷組 土木事業本部 トンネル技術部 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1) E-mail: koaoki@ku.kumagaigumi.co.jp

²正会員 (株)熊谷組 土木事業本部 土木設計部 地質G (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1) E-mail: makataya@ku.kumagaigumi.co.jp

³(株)熊谷組 土木事業本部 土木設計部 地質G (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1) E-mail: sishiham@ku.kumagaigumi.co.jp

⁴正会員 (株)熊谷組 土木事業本部 トンネル技術部 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1) E-mail: htezuka@ku.kumagaigumi.co.jp

⁵正会員 基礎地盤コンサルタンツ(株) (〒136-8577 東京都江東区亀戸1-5-7 日鐵NDタワー12階) E-mail: miki.shigeru@kiso.co.jp

近年,GPSクロックなどを利用することで起振・受振の時刻を同期する技術が発達したことから、トン ネル掘削時の発破振動を利用して,坑内と地表面間の弾性波探査ならびにトモグラフィ解析が行われてい る.これら探査は切羽の発破による弾性波を地表面の多くの受振点で取得することを基本とするが,坑外 の受振点の設置には設置場所の制約や山岳地での設置作業の煩雑性・難渋性があるものと考える.

筆者らは、坑内と地表間での弾性波探査およびトモグラフィ解析の実施にあたり、地表面の受振点を極力減らし、掘削の進行に伴い発生する発破振動弾性波を地表面に据え置きしたGPS内蔵のデータロガーに 蓄積することで、波形を数多く取得し、トモグラフィ解析を連続的に実施することで高精度化を図り、切 羽前方地山の予測を行った。

Key Words: blasting, seismic prospection, tomography, GPS, tunnel

1. はじめに

山岳トンネルにおける事前地質調査では、地山状態を 把握することを目的として、地表面から起振した入力波 を利用した弾性波屈折法探査が一般的に行われている.

しかし、地質踏査などの結果とあわせて評価しても「調 査設計と施工が一致しないこと」が多くみられる.また、 地表面のみを起受振点とする弾性波探査のみでは、特に 土被りが大きいトンネルにおいて、トンネル深部の地質 構造を正確に把握することは困難であるともいわれてい る.

このような課題を改善するため、弾性波を利用したト ンネル前方地山探査としてTSPやHSPといった方法が用 いられてきた.しかしながら、これらの方法はトンネル 坑内で探査のための起振(発破)ならびに探査設備の設 置・撤去が必要なため、トンネル掘削を一時的に中断し ての調査となり、中断することなく調査が行える探査手 法の開発が求められている.

今回開発した手法は、掘削に用いる発破を利用することから、工程への影響がない探査方法であり、比較的簡便に切羽前方予測の精度向上が図れることが期待できる.

一方,トンネル坑内での発破を起振点,地表面を受振 点とした弾性波探査を実施するには,起受振点間の時間 同期を図る必要があるため,起受振点間を有線接続する 必要があった.山岳地での設置作業は,煩雑かつ難渋性 を伴うこと,また設置場所の制約を受けることもあり, 積極的な実施には繋がらなかった.

しかし,近年ではGPSクロックなどを利用することで 有線接続することなく,起振・受振の時刻を同期する技 術が確立されたことから,トンネル坑内と地表面間の弾 性波探査を行うことが,以前に比べ容易になってきた¹⁾.

また、弾性波屈折法探査の解析手法として、従来のは



ぎとり法に加え、コンピュータを利用したトモグラフィ 的解析法が多く用いられてきており、短時間で解析が実 施できるようになってきている².

本報告では、坑内での発破を起振点、地表面を受振点 とした発破振動弾性波探査を切羽の進行に合わせて継続 的に実施した.その得られた走時データを用いて、トモ グラフィ解析を連続して行い、切羽前方地山の予測を行 った.また、解析結果と掘削時の地山状況を比較し、予 測精度の検証を行った.

2. 探査システム概要

(1) 探查手法

本探査法では、図-1に示すように、坑内と地表間での 弾性波探査およびトモグラフィ解析の実施にあたり、地 表面の受振点を固定し、掘削の進行に伴い発生する発破 振動弾性波を地表面に据え置きしたデータロガーに常時 計測・蓄積していく.数多く波形データを取得し、トモ グラフィ解析を連続的に実施することで、探査精度の向 上を図る.

探査手法の手順を図-2および下記に示す.

- 地表部に受振点側計器を常設する.なお、GPS時刻 同期は自動的に行う.
- ② 坑外にてGPS時刻同期を行った起振点側計器を坑内 に搬入し,発破時に発破信号検知センサーを取り 付け,発破時刻を取得する.なお,計器は発破後 に坑外に搬出し,再びGPS時刻同期を行う.
- ③ 受振点側計器の発破振動の波形データを取り出し, 起受振点間の走時データを取得する.
- ④ 調査段階で実施される地表面を起受振とした弾性

表-1 測定機器の諸元

測定機器	数量	メーカー・型番
GPS同期データ収録装置	2台	稠密地震観測用データロガー 近計システム EDR-X 7000
発破信号検知センサー	1個	超小型クランプ式交流電流センサ
受振子	3個	OYOジオスペース社ジオフォン 28HZV GS-20HPCランド型



図-3 受振点側計器の構成



図-4 起振点側計器の構成

波探査よりトモグラフィ解析を行った結果に、③ で取得した追加走時データを加えて、再度トモグ ラフィ解析を実施し、地山の弾性波速度分布図を 得る.

掘削の進行に伴い②~④の作業を繰り返し行い,切羽 前方地山の解析精度を向上させる.

(2) 測定機器の諸元

本探査法で使用する測定機器の諸元を表-1に示す.

起振側と受振側のデータロガーは、地震計測用のもの を使い、電源は単2型乾電池8本で約3週間の連続計測が 可能である.また、起振側と受振側のデータロガーの時 刻を精緻に一致させる必要があるため、GPSクロックに よる時刻同期を採用した.GPSクロックによる時刻同期 は、地震探査では広く用いられ、上空が開けた状態のと ころであれば計器の設置場所を問わないため、比較的簡 便に時刻同期が可能である.これにより、msec単位の時 刻精度を確保することができる.

(3) 受振点側計器

受振点側は、図-3に示すようにデータロガーと受振子の構成となる.受振子は、トンネル延長上に最大15m程



写真-1 受振点側計器の設置状況

写真-2 発破信号検知センサー

写真-3 起振点側計器の収納状況



度の間隔で地中に埋め込む形で3点設置する.計器設置 後は、受振子にて振動を常時計測している.データロガ ーは、計測ボックスに収納した据え置き型とする.なお、 GPSセンサにより時刻同期を行うため、測定箇所はGPS が常時受信できる状態の箇所である必要がある.

(4) 起振点側計器

起振点側は、図-4に示すように、計測の度に発破器に データロガーと接続した発破信号検知センサーを使用し て、発破時刻を正確に捉える.発破信号検知センサー (写真-2)は、発破母線に干渉しない形式であり、電流 が流れるとセンサー内のコイルに電流が励起され、これ をデータロガーで記録する仕組みとなっている.

受振点側では据え置き型のため、データロガーはボッ クスに収納したが、発振点側では計測の度に坑内に持ち 運ぶため必要があるため、リュックサックにデータロガ ーを収納した(写真-3). なお、起振点側計器は坑内で 使用するため、GPSを受信することができないので、1 日あたり1回は坑外へ搬出し、数時間程度はGPSが受信 できる状態に時刻補正を行う必要がある.

(5) 弾性波の解析手法

最初に調査・設計段階での地表面を起受振点とした弾 性波探査結果のみで弾性波トモグラフィ解析を行い,発 破振動弾性波による走時データを順次追加し,再解析を 行った.

3. 弾性波トモグラフィ解析による切羽前方地山 の予測結果

(1) 適用現場の概要と探査位置

本探査法を適用した現場は、トンネル延長1581mの新 第三紀堆積岩類の発破掘削のトンネルである. 当初設計 時の地質縦断図を図-5に示す.

このトンネルは、出現する地質構造が当初設計と異なっており、今後も複雑な地質構造であると判断していた.特に、T.D.1300m付近から断層や地質境界が想定されており、それらの出現位置を把握することを目的としてT.D.1089m付近より前方地山探査を開始した.

今回据え置き型の計測となる受振点側は,終点側坑口 部T.D.1567m付近の斜面に,トンネル縦断方向に受振子 を約5m間隔,高低差8mで3点設置した.

また,発破振動の測定は,TD.1089m~1350m間でおお よそ1回/日の頻度で実施し,計25回の測定を行った.な お,終点側坑口に設置した受振点の周囲では,明かり部 の掘削作業等が行われていたため,他作業に起因する振 動が発破振動と混在しないように,夜間時の発破振動を 計測することした.



図-6 弾性波トモグラフィ解析結果

(2) 解析結果による切羽前方予測

地表面の起受振点のみの弾性波を用いた「探査開始 前」,本探査法をT.D.1089mから探査を開始し,測定回 数4回目の「T.D.1126m」地点,同14回目の「T.D.1178m」 地点,同25回目の「T.D.1250m」地点までの連続した発 破掘削弾性波を用いた弾性波トモグラフィ解析結果(上 段:速度分布図,下段:トンネル天端位置における弾性 波速度)を図-6に示す.

解析結果より得られた弾性波速度分布をみると,探査 開始前と本探査法適用後では,異なっている部分がみら れた.

また、切羽の進行に合わせて継続して探査を行うこと により、弾性波速度の境界の形状がより細かく表現され るようになり、前方地山の弾性波速度分布がより高精度 に把握できたと考える.

次に,解析した結果を用いて,切羽前方地山の予測を 行った.

a) T. D. 1100m~1300m付近(着目点①)

探査開始前の解析結果では,T.D.1350m付近までのトンネル天端位置における弾性波速度は2.5km/sec前後を安定して推移しており,大きな速度変化の特徴はみられなかった.

しかし, T.D.1126mの解析結果では, T.D.1300m付近ま で弾性波速度の分布が複雑な結果が得られている. この ことは探査開始前と異なり,地山の硬軟の変化が激しく なるものと予測した.

b) T.D. 1300m~1500m付近(着目点2))

探査開始前の解析結果からも弾性波速度の低下が見られていたが,T.D.1126mの解析結果では弾性波速度

1.8km/sec以下の領域が50m手前のT.D.1300m付近に伸びて きており、その後の解析でも領域に変化がないことから、 この位置が地質境界となっており、脆弱な地質の出現の 確度が高いものと判断した.

c) T.D. 1500m付近(着目点③)

探査開始前および開始後の解析結果からも継続して, 弾性波速度3.0km/secの領域が出現しており,この区間で は硬質な地質が存在するものと予測した.

(3) 掘削実績との比較

前節で予測した着目点についてのトンネル掘削時の地 質状況と比較を行った.

着目点①では,探査開始直後のT.D.1100m付近より硬 質な安山岩に進入し,T.D.1130mで安山岩の割れ目から の突発湧水を確認した.その後,T.D.1300m付近までは, 中硬質な凝灰角礫岩を主体としながらも,軟質な泥岩や 硬質な安山岩が混在する区間が続いた.

着目点②のT.D.1300m付近では、予測どおりにバック ホウで掘削することができる程度の軟質な未固結砂層が 現れ、その直後には弾性波分布と調和的な傾斜となる流 れ盤断層が現れた.

このことは、探査開始前の解析結果からでは明瞭でな かったものが、本探査法の適用により、切羽前方地山の 予測精度の向上が図れたものと考える.

着目点③のT.D.1500m付近では、受け盤の堆積軟岩を 確認、その後硬質な凝灰角礫岩を確認した.

次に,弾性波トモグラフィ解析より得られたトンネル 天端位置の弾性波速度と実際の地山状況を表す指標とし て掘削に使用した1m³当たり爆薬量との比較を図-7に示 す.この図より、一部で相違は認められたが、本探査法 を適用した場合の解析により得られた弾性波速度と使用 した爆薬量は、概ね同じような傾向を示しており、掘削 前に地質状況を把握できたものと考える.

4. まとめ

GPSクロックを内蔵した地震計測用データロガーを使用して、坑内と地表面間での掘削時の発破による弾性波の簡易な取得を行い、その結果を用いた連続的なトモグラフィ解析を実施し、切羽前方地山の予測を行った。

以下に、今回の現場適用試験により、得られた知見を 示す.

- ・簡易に据置き可能なGPSクロック地震計測用のデータ ロガーを利用することで、起受振点の計器間のワイヤ レス化が図れ、継続的なデータ収集が可能となった.
- ・本試験で得られたデータをもとに実施したトモグラフィ解析による前方地山予測と実際の地山状況は良く対応した。
- ・今回実施した坑内からの発破振動弾性波による探査手 法が切羽前方地山を予測するうえで有用であることが 確認できた.

今後は、他岩種における本探査法の適用を考えている. また、今回の試験では、受振点は固定していたが、シン プルで移動可能な測定設備である特徴を活かし、受振点 側も移動させて弾性波の地山内の通過経路を増やすこと で、地山の予測精度のより一層の向上を図っていくつも りである.



図-7 弾性波トモグラフィ解析結果の弾性波速度 と使用火薬量の比較

参考文献

- (篠原茂,塚本耕治,浜田元:トモグラフィ的解析手法によるトンネル切羽前方の弾性波速度分布の予測, 土木学会トンネル工学報告集,第14巻,報告集
 (12), pp.77-82, 2004.11.
- 三木茂,吉田幸信,井上浩一,中川浩二:トモグラ フィ的弾性波探査手法によるトンネル地山調査の評 価,土木学会論文集,第707巻,VI-55号 pp.111-124, 2002.6.

(2014.9.15受付)

EXPLORATION AHEAD OF TUNNEL FACE BY CONTINUOUS TOMOGRAPHIC IMAGES BUILT BY SEISMIC WAVES GENERATED BY TUNNEL BLASTING

Koichi AOKI, Masahiro KATAYAMA, Shigetaka ISHIHAMA, Hitoshi TEZUKA and Shigeru MIKI

Recently, by applying GPS Clock, the simultaneous observation of the generation of tunnel blasting and detection of its blasting waves could have been made possible. This has also made possible the seismic exploration and the tomographic analysis, of ground conditions between the tunnel face and the ground surface ahead.

This exploration is carried out by detecting on the ground surface such blasting vibration generated in the tunnel face. However, the setting of detecting points on the ground surface is not an easy task because of irregular surface conditions and shapes.

We, therefore, purposely reduced and minimized the setting points of detector on the ground surface and left them so that the blasting vibration waves could have been recorded by Data Logger with a builtin GPS as the tunnel progresses. This led us to a continuous and a highly précised tomographic images of the ground conditions ahead of the working tunnel face.