

連続発破弾性波トモグラフィ法を用いた トンネル切羽前方探査の開発と現場適用

片山政弘* 石濱茂崇* 濱田好弘* 青木宏一**

筆者らは、トンネル掘削時の発破振動を利用した弾性波探査手法として「連続発破弾性波トモグラフィ法」を開発した。本手法は、トンネル掘削時の発破振動を利用して、坑内と地表までの弾性波を数多く取得し、トモグラフィ解析を連続的に実施することで、トンネル切羽前方地山の予測精度を向上させるものである。本報告では、探査条件の異なる複数の現場にて、開発した探査法を適用しており、それぞれの現場において、事前予測と施工結果との比較を行いながら、その探査法の有用性について述べる。

キーワード：トンネル，弾性波探査，発破振動，トモグラフィ解析

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する弾性波探査（屈折法）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起振波が届かず、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 探査法や HSP 探査法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、起振点間の時間同期を図る必要があるため、起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、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、弾性波探査の解析手法として、従来のはざとり法による解析に加え、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いる²⁾。

本報告では、トンネル掘削時の発破振動を利用した弾性波探査手法として新たに開発した「連続発破弾性波トモグラフィ法」の概要について述べる。また、探査条件の異なる複数の現場にて適用を行い、それぞれの現場において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

2.1 探査手法

本探査法では、Fig.1 に示すように、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。数多くの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 Fig.2 および下記に示す。

- ① 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振点とした弾性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

* 土木事業本部 土木設計部 地質グループ

** 土木事業本部 トンネル技術部

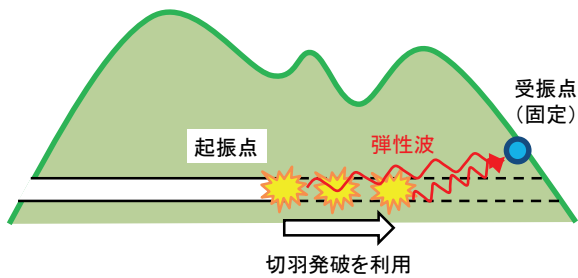


Fig. 1 探査手法の概念図

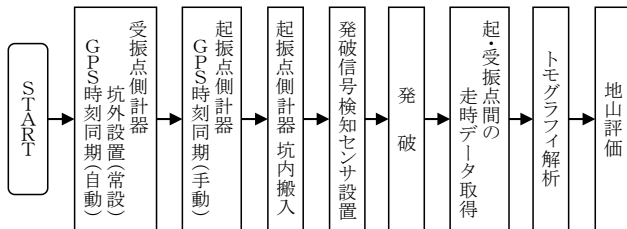


Fig. 2 探査手法の手順

前方地山の解析精度を向上させる。

2. 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 Table 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。

2. 3 受振点側計器

受振点側は、Fig. 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、トンネル線形上の地表面に任意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 (Photo. 1, Photo. 2)。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。

2. 4 起振点側計器

起振点側は、Fig. 4 に示すように、計測の度に発破器に

Table 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	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

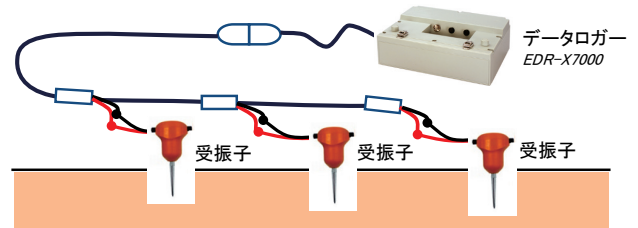


Fig. 3 受振点側計器の構成

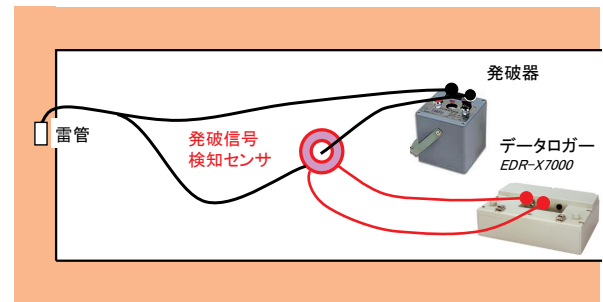


Fig. 4 起振点側計器の構成

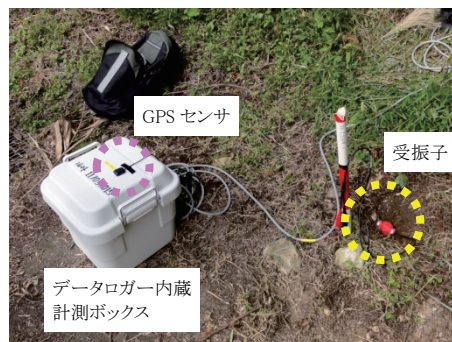


Photo. 1 受振点側 (坑外) の設置状況



Photo. 2 データロガー内蔵計測ボックス

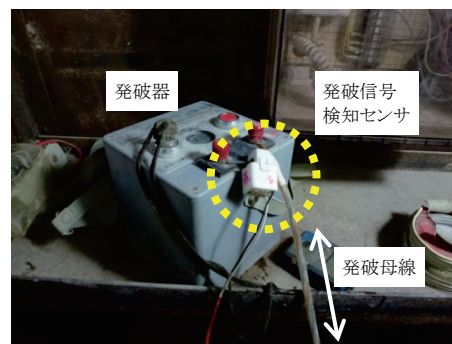


Photo. 3 発破信号検知センサー



Photo. 4 起振点側 (坑内) の測定機器

データロガーと接続した発破信号検知センサを使用して、発破時刻を正確に捉える。発破信号検知センサ (Photo. 3) 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 (Photo. 4)。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。

2. 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、再解析を実施することで地山の弾性波速度を取得する。

3. 現場適用事例

3. 1 適用現場における探査法の特徴

開発した本探査法を適用した現場における探査方法の特徴を下記に示す。

Aトンネル：受振点は終点側坑口に固定設置し、切羽の進捗に合わせて継続的に発破振動弾性波データを取得した事例

Bトンネル：用地的な問題もあり、継続的なデータの取得が難しく、散点的に本探査法を実施した事例

Cトンネル：調査段階での弾性波探査結果がトンネル線形の変更により一致しないため、新たに地表面に受振点を設置し、坑内からの発破振動弾性波を取得した事例

3. 2 Aトンネルでの事例³⁾

3. 2. 1 探査概要

Aトンネルは、トンネル延長1,581m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面図をFig. 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、TD. 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TD. 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TD. 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。

3. 2. 2 探査位置

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とした。

3. 2. 3 探査結果による切羽前方予測

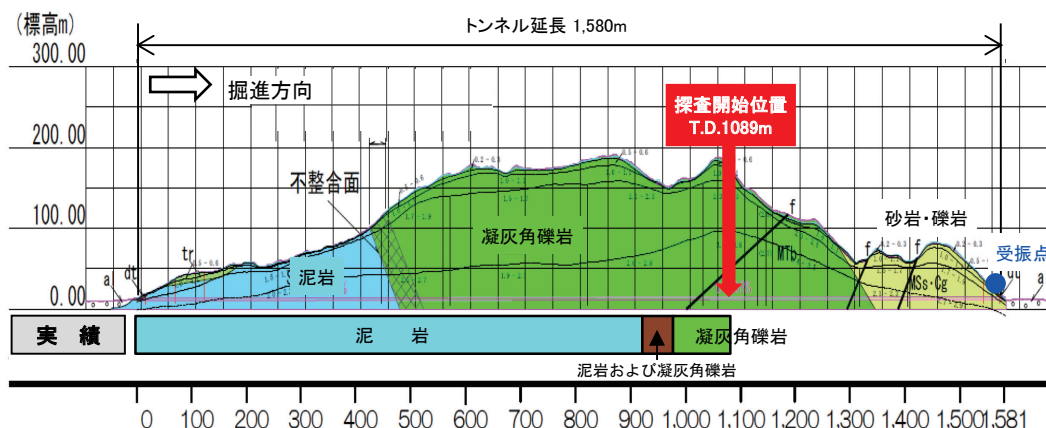
地表面の起受振点のみの弾性波を用いた「探査開始前」、本探査法をTD. 1089mから探査を開始し、測定回数4回目の「TD. 1126m」地点、同14回目の「TD. 1178m」地点、同25回目の「TD. 1250m」地点までの連続した発破掘削弾性波を用いた弾性波トモグラフィ解析結果 (上段：速度分布図、下段：トンネル天端位置における弾性波速度) をFig. 6に示す。

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。

(1) TD. 1100m～1300m付近 (着目点①)

探査開始前の解析結果では、TD. 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



※ 図面の尺度の縦横比は任意

Fig. 5 トンネルの地質縦断面図 (当初設計と実績)

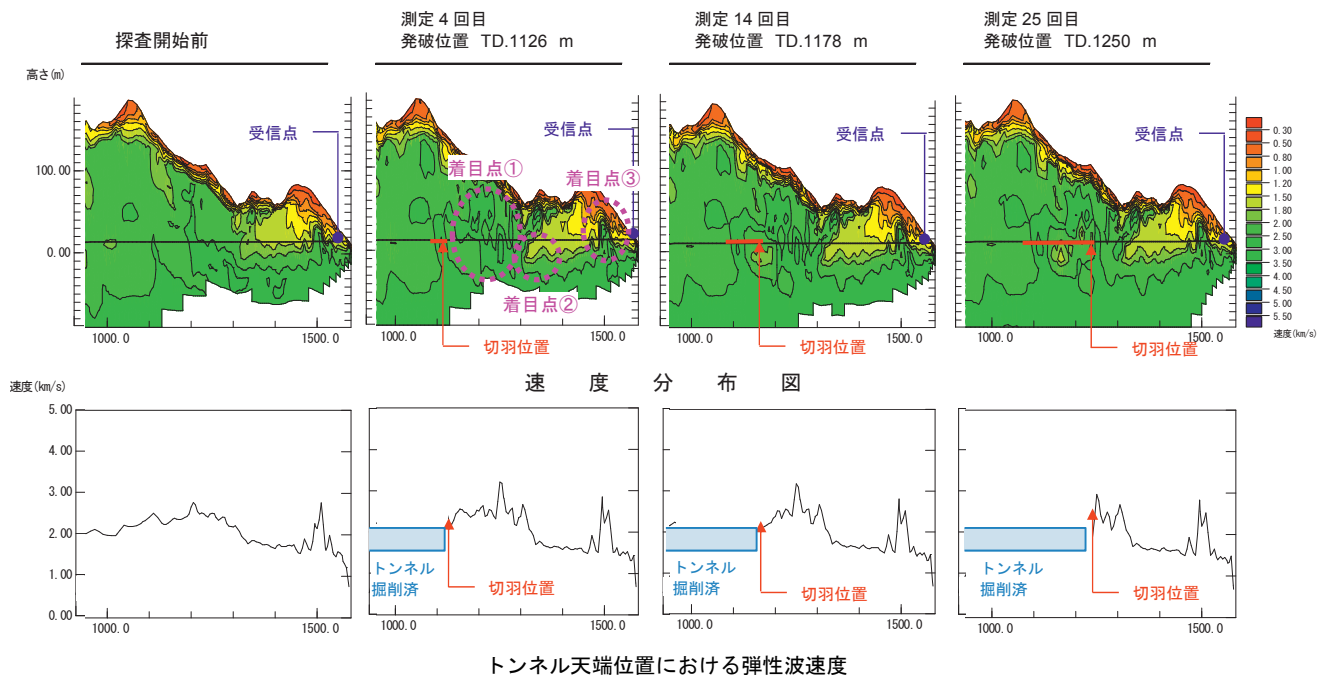


Fig. 6 弾性波トモグラフィ解析結果

かった。

しかし、TD. 1126m の解析結果では、TD. 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。

(2) TD. 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、TD. 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 TD. 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。

(3) TD. 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. 2. 4 施工実績との比較

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 TD. 1100m 付近より硬質な安山岩に進入し、TD. 1130m で安山岩の割れ目からの突発湧水を確認した。その後、TD. 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 TD. 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する。

着目点③の TD. 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。

以上より、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。また、坑内からの発破振動弾性波を連続的に取得す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も確認できた。

3. 3 Bトンネルでの事例⁴⁾

3. 3. 1 探査概要

Bトンネルは、起点側・終点側の両坑口より施工を行うトンネル延長 1,985m の花崗閃緑岩の発破掘削のトンネルである。

本探査法では、坑外に設置する受振点側のデータローガーは、計測ボックスに収納して一定期間据え置きとし、切羽からの発破振動を受振するものである。

しかし、用地等の問題により長期間の据置きが困難な場所やトモグラフィ解析後にデータを補完したい任意の場所にて即座に発破弾性波を受振することを目的に、Photo. 5 に示す「ポータブル受振システム」を適用した。

このシステムは、受振子とデータローガーをリュックサックに格納し、GPS 測量機にて測点位置を記録し、任意の地表位置で散点的に切羽からの発破振動弾性波のデータを収集しながらトンネル線形上を探査する方法である。

また、Bトンネルが起点側・終点側の両坑口から掘削している特長を活かし、両切羽間を起受振点とした弾性波探査も併せて実施した (Photo. 6)。

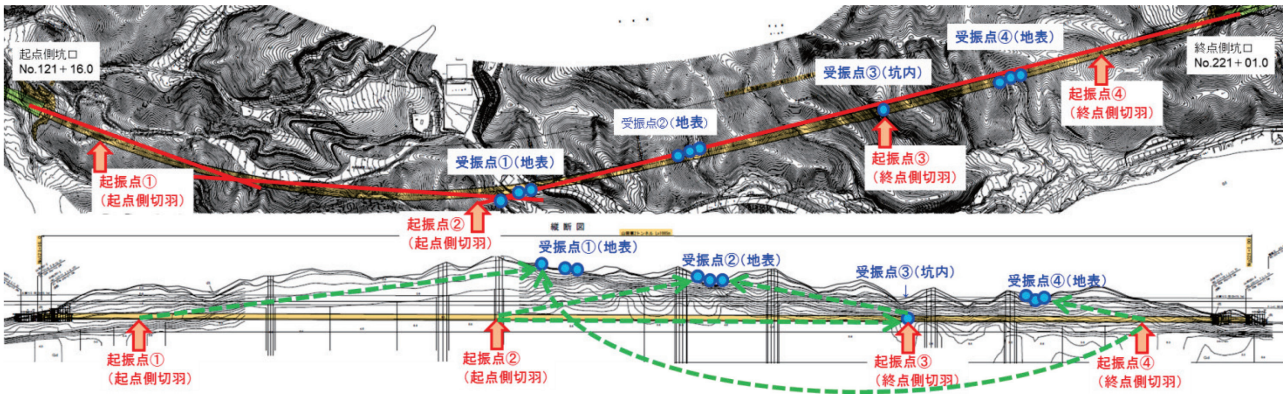


Fig. 7 起振点および受振点位置図および対応関係 (平面図, 縦断面図)

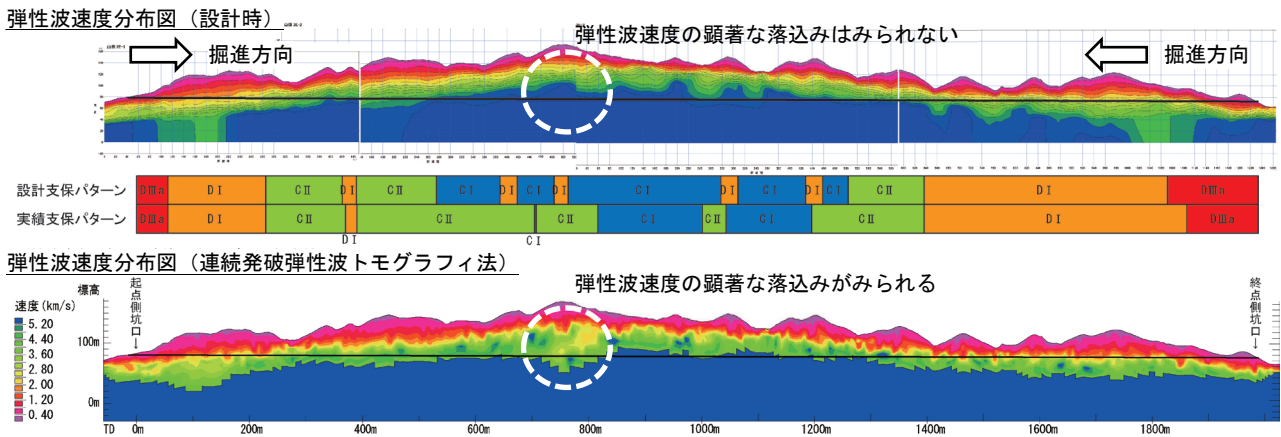


Fig. 8 設計時及び連続発破弾性波トモグラフィ法の弾性波速度分布の比較

3. 3. 2 探査位置

本現場で実施した連続発破トモグラフィの受振点は、設計時の弾性波探査測線上に設定した。各起振点と受振点との対応を Fig. 7 に示す。受振点は、トンネル線形上の地表面に受振点①②④の 3 箇所、終点側切羽に受振点③の計 4 箇所とした。起振点は、切羽の進捗に合わせて起終点側の各々の切羽で時期を替えて 2 点ずつ、計 4 点で実施した。

受振点③では、坑内に受振点を設け、起点側切羽（起振点②）からの発破振動弾性波を受振し、両切羽間の探査を実施した。なお、この方法では、地表に受振点を設置した場合に探査が欠損しやすいトンネル中央付近の弾性波を捉えることができた。

3. 3. 3 探査結果および施工実績との比較

設計時及び連続発破弾性波トモグラフィ法による探査結果を Fig. 8 に示す。探査結果より、高精度なトモグラフィ解析結果を得ることができたと考える。特に、TD. 800m 付近の弾性波速度の顕著な落込みがみられる箇所は、設計時のトモグラフィ解析では捉えられていなかった。掘削実績に基づけば、当該箇所は、設計で C I パターンであったのに対して、実施工では C II パターンとなり、本探査の結果と実績の支保パターンとが良い対応関係を示した。また、その他の箇所についても概ね良好



Photo. 5 ポータブル受振システム

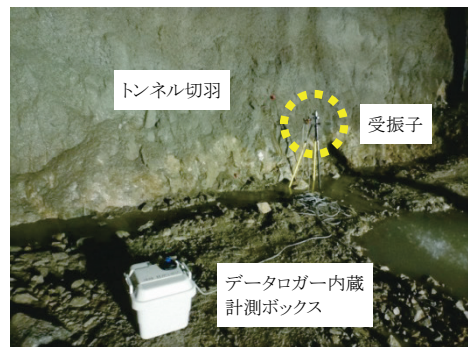


Photo. 6 トンネル切羽に設置した受振点

な対応関係を示した。

また、今回はポータブル受振システムを考案し、GPS を利用して測点位置を計測して探査を実施した。結果とし

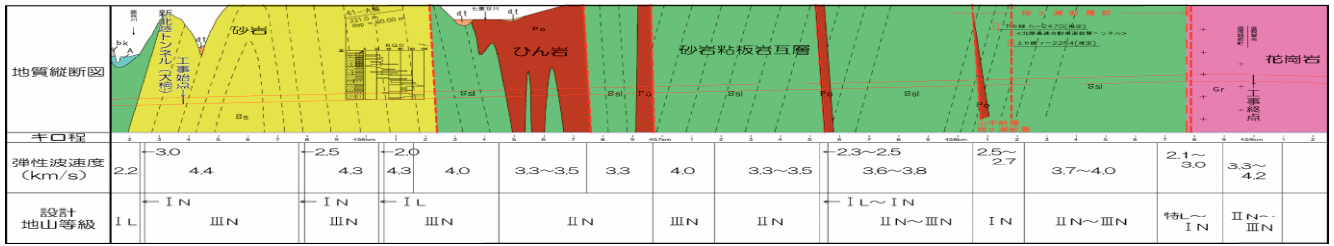


Fig. 9 Cトンネルの地質縦断面図

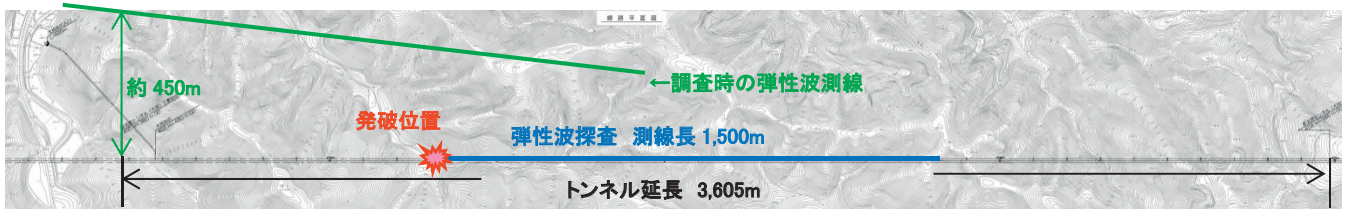


Fig. 10 地山弾性波探査の範囲

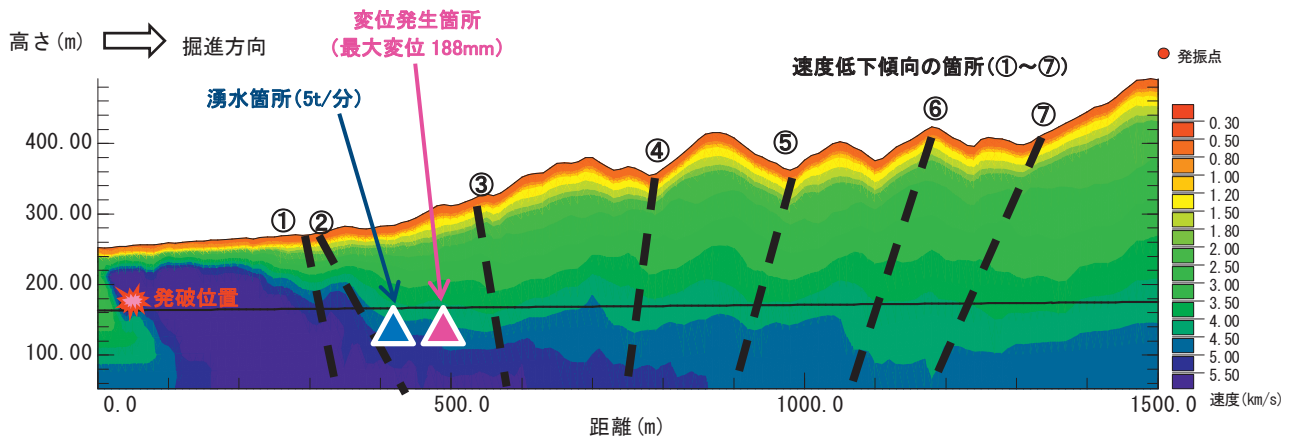


Fig. 11 掘削時の発破振動を起振とした地山弾性波速度モデルの基図と施工実績

て、散点的に多くの地点で探査が可能となり、効率的な探査が実施できることを確認した。

3. 4 Cトンネルでの事例⁵⁾

3. 4. 1 探査概要

Cトンネルは、トンネル全長約20kmのうち、本坑延長3,605m、斜路延長485mである。地質は、美濃帯の堆積岩類（砂岩、粘板岩等）を主体とし、これらに貫入した白亜紀の花崗岩類や新第三紀のひん岩も出現する。なお、地質縦断面図（Fig. 9）には地山弾性波速度モデルはなく、弾性波速度値のみが示されている。

通常、トンネル工事においては、計画や調査段階で地表面での発破を起振とし、線形上で弾性波探査が実施されていることが多い。しかしながら、計画段階から認可まで長年の年月を要する新幹線トンネル工事においては、計画段階の線形と現在の線形とが異なる場合がある。本工事においても計画段階と現在とで線形が異なっており、弾性波探査結果については、設計・施工上の影響は少ないと判断され、計画段階の線形で実施された弾性波速度を用いている。

本手法では、調査段階で実施された弾性波探査結果による地山弾性波速度モデルを「基図」とし、施工中の発

破を用いた探査により地山弾性波速度モデルを修正し、前方地山予測の高精度化を図るものである。よって、本工事のように弾性波測線と現在の線形とが一致しない場合は、本探査法を適用することは困難である。

そこで、切羽前方地山予測の高精度化を図ることを目的とし、以降の区間での本探査法の適用を見据え、一般的な事前調査で行う地表面を起振とした弾性波探査ではなく、掘削中の発破を起振とした弾性波探査を行い、地山弾性波速度モデルの構築を試みた。

3. 4. 2 探査位置

今回の地山弾性波探査は、施工開始後の実施であることから周辺環境の諸条件が制限され、地表面から起振となる発破ができない状況であった。このため、今回の探査は、起振点を地表に設けずに坑内の発破のみを起振点として探査を行うこととなり、起振を測線の片側のみから行う「片走時」となった。探査範囲は、Fig. 10に示す1,500mの区間で、地表面の受振点間隔は10mとし、1回あたりの計測長が470mのために探査は4回に分けて行った。なお、計画段階の弾性波探査は、現在の線形より最大で約450m離れた位置で実施されている。

3. 4. 3 探査結果および施工実績との比較

地山弾性波探査結果によって得られた地山弾性波速度モデルはFig. 11に示す。今回の探査は、前述のように片走時であることから、探査精度が相対的に低いと考えられる。また、一般的な弾性波探査結果と比較すると発破位置から離れるに従って速度が低下する傾向がみられた。このような場合、相対的に低速度の箇所と相対的に高速度の箇所とのコントラストが顕著とならないことから、速度低下位置が明瞭ではない。ただし、図中に示す7箇所①～⑦においては、やや不明瞭であるものの速度低下の傾向がみられる箇所を抽出することができた。

抽出した速度低下の傾向がみられる箇所について、掘削が完了した探査距離500m付近までの施工結果との対比を行った。当該区間の掘削中では、距離400m付近において大量の湧水(5t/分)がみられ、距離500m付近において比較的大きな変位(最終変位188mm)が認められた。探査結果より速度低下傾向がみられた箇所②からは50m程度離れているものの、一般的にやや弾性波速度が低い区間であった。また、湧水箇所奥についても弾性波速度が比較的遅い区間が続いており、変位箇所においても弾性波速度が比較的遅い区間となっている。

以上より、今回実施した探査によって得られた地山弾性波速度モデルは、一般的な地表面を起振とした探査と比較するとやや精度は低いものの、大局的には当該地山状況を反映していると考えられる。

本工事のような、調査・計画段階の弾性波探査が施工段階の線形とは異なる位置で実施されている場合においては、本方法は前方の地山状況を概略で捉えるためには有用と考えられる。

現在施工中である本工事では、今後、連続発破弾性波トモグラフィ法を継続的に実施し、切羽前方地山の予測精度の向上を図っていく予定である。

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う「連続発破弾性波トモグラフィ法」を開発した。

探査条件の異なる複数の現場に適用した結果、いずれの場合も本探査法で得られた結果は、実際の地山状況を良く対応していることがわかった。

以上より、開発した本探査法は、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。

今後も様々な山岳トンネル現場での適用を考えており、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。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 青木宏一・片山政弘・石濱茂崇・手塚仁・三木茂：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：土木学会トンネル工学報告集，第24巻，I-28，2014.12.
- 4) 山本憲一・高橋望・小西克典・青木宏一・石濱茂崇：ポータブル受振システムを活用した連続発破トモグラフィによる切羽前方探査事例，土木学会 第71回年次学術講演会 講演概要集，VI-382，pp.763-764，2016.9.
- 5) 小林寛明・滝澤日香里・若林功起・中本大悟・石濱茂崇・青木宏一：掘削時の発破を起振とした地山弾性波速度モデルの構築と施工との対比，土木学会 第72回年次学術講演会 講演概要集，VI-213，pp.425-426，2017.9.

Development and application of prediction ahead of tunnel face by using the continuous blasting seismic tomography method

Masahiro KATAYAMA, Shigetaka ISHIHAMA, Yoshihiro HAMADA and Koichi AOKI

Abstract

The authors developed "The continuous blasting seismic tomography method" as a seismic prospection tool that uses the blasting vibration during tunnel excavation. This method improves the prediction accuracy for natural ground ahead of tunnel face by receiving a large number of elastic waves from underground to ground surface and the continuously conducted tomographic analysis using the blasting vibration during tunnel excavation.

In this report, the authors describe the usability of the method by comparing with the preliminary prediction and the result of tunneling for each construction site where the developed method was applied.

Keywords: Tunnel, Seismic prospection, Blasting vibration, Tomography