

トンネル前方探査における速度推定手法の試み

山本 浩之¹・中谷 匡志²・今村 杉夫³・太田 賢治⁴・谷口 翔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: yamamoto.hiroyuki@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: nakaya.masashi@ad-hzm.co.jp

³4Dジオテック (〒330-0064 埼玉県さいたま市浦和区岸町1-13-15-109)
E-mail: s-imamura@4d-geotek.com

⁴4Dジオテック (〒330-0064 埼玉県さいたま市浦和区岸町1-13-15-109)
E-mail: k-ohata@4d-geotek.com

⁵安藤ハザマ 九州支店二重峠トンネル作業所 (〒869-2301 熊本県阿蘇市内牧1128-2)
E-mail: taniguchi.sho@ad-hzm.co.jp

山岳トンネルの施工において、掘削用の発破を起振源とした反射法弾性波探査による切羽前方探査システム「トンネルフェイステスター (TFT探査)」の開発を進めている。この手法により、施工サイクルに影響せずに切羽前方100～150m程度の区間の断層や地質境界の位置を予測することを可能とした。

本検討では、さらに切羽前方の定量評価手法として、反射面前後の弾性波速度を算出する試行アルゴリズムを考案し、3次元粘弾性差分法 (3D-FDM) による理論波形による検証と実際のトンネル現場への適用を行い掘削実績との比較検証を行った。

本稿では、システムの構成、定量評価手法を示すとともに、理論波形による検証および施工中のトンネル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ここに報告する。

Key Words : mountain tunnel, seismic reflection method, 3D-FDM, elastic wave velocity

1. はじめに

山岳トンネル施工における事前の地質調査は、主にボーリング調査や弾性波探査などの物理探査が実施され、その結果に基づきトンネルの支保パターンが設計される。しかしながら、このような地質調査は、地表面からの調査が基本であり実施数量も限られる。さらに弾性波探査については、土被りが大きい場合や複雑な地質構造の場合、探査精度が低下することが知られている。

このような事前の調査不足や探査精度が低いと想定される場合、施工時に行われる切羽前方探査が重要となる。既往の切羽前方探査としては、調査ボーリングが最も確実で精度が良いものの、特に長尺の場合には、掘削を中断する時間が長期となり、探査事例の多いTSP法¹⁾の場合でも、起振源として探査用発破を用いるなど大掛かりな設備が必要となる。

そこで、筆者らは起振源として掘削発破を用いることで、施工サイクルに影響を与えずに、安全かつ迅速にトンネル坑内で探査が可能となる反射法弾性波探査手法に

よる切羽前方探査システム「トンネルフェイステスター (TFT探査)」の開発を進めている (図-1参照, NETIS登録: TH-170003-A)^{2,3)}。

しかし当手法の問題点として、反射面位置は特定できるものの定性的な評価であることから、反射面に相当する断層や地質境界の規模、強度などの定量的な指標が得られないという点が挙げられる。そこで、反射面前後の

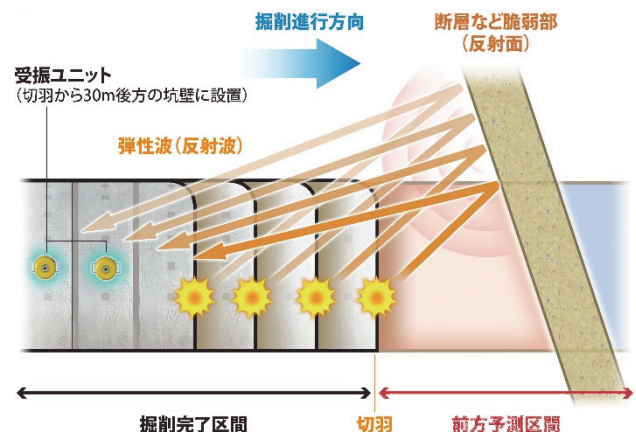


図-1 TFT探査概念図

弾性波速度を算出する試行アルゴリズム⁴を考案することにより、切羽前方地山の定量的な評価手法を検討した。

本報では、システム構成、定量的な評価手法を示すとともに、3次元粘弾性差分法によるシミュレーション波形での検証および実際のトンネル現場で適用し、掘削実績との比較検証をしたのでここに報告する。

2. システム構成

TFT探査のシステム構成を写真-1に、受振ユニットの設置状況を写真-2、装置緒元を表-1に示す。

写真-1に示す弾性波データを記録する受振ユニットは、地震計、ロガー、バッテリーなどが一体化されたもので、2箇所での計測を標準とする。受振ユニットは、既設の支保工ロックボルトをウェーブガイドとして固定するものとし、専用の固定用治具を用いることで、坑壁に密着した設置を行う。

計測時には、発破退避時に起動スイッチを遠隔操作（送信周波数：426MHz、通信距離：最大150m）することにより機材の起動を行い、記録後は自動停止する。これにより、消費電力を低減し無給電での連続探査が1ヶ月程度可能となる。なお、解析に必要なデータ数については、原則20データ（3日程度の計測）とし、この期間は機材の移設は行わない。

データの記録については、発破母線に取り付けたトリガーセンサーが起振信号を捉えると、トリガーユニットから受振ユニットに無線信号（送信周波数：800MHz帯、通信距離：最大110m）を送信することで記録を開始する。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タブレットPC（Panasonic社製、FZ-G1）で行い、Bluetoothによる無線でデータ収集後、1時間程度の解析作業で予測結果が出力可能となる。

解析は、図-2に示す解析フローに基づき、上述したタブレットPCを用いて、直達波より切羽近傍の弾性波速度の算出および発破データに含まれる反射波を抽出することで切羽前方の反射面の位置を予測する。このようにして得られた切羽前方探査結果例を図-3に示す。

図-3に示す前方探査結果については、反射面強度をカラーコンターで描画し、暖色系の区間が反射面すなわち断層・破碎帯などの地山不良部の予測位置となる。



写真-1 TFT探査システム構成



写真-2 受振ユニット設置状況

表-1 受振ユニット緒元

成分	1成分(トンネル軸方向)
センサー	GS-20D(28Hz)
サンプルレート	20kHz
A/D分解能	24ビット
外寸	底面直径:150mm 最大直径(ハンドル):244mm 厚さ:117mm

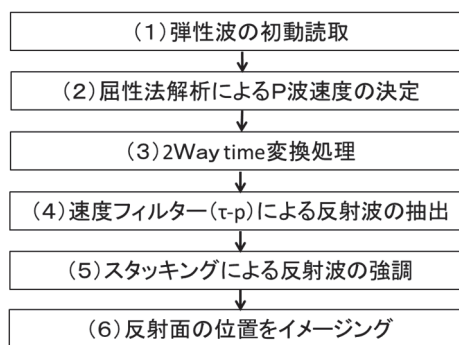


図-2 前方探査解析フロー

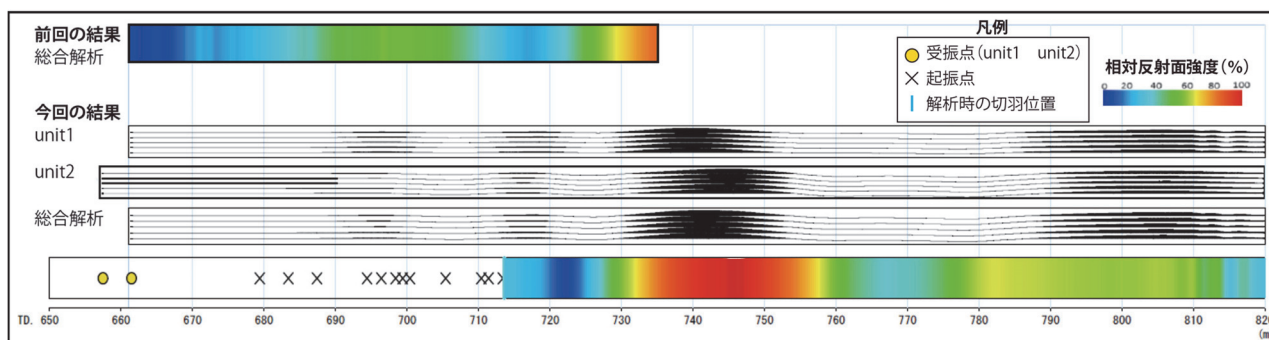


図-3 切羽前方探査結果例

3. 切羽前方の弾性波速度推定について

(1) 弾性波速度の推定手法

TFT 探査は、切羽より20～30m手前2箇所を受振器を固定し、掘削発破の弾性波を記録する。切羽が進行すると共に起振点（掘削発破地点）が前方移動することで、多地点で起振した波形を取得できる。多地点起振の波形が得られた場合、直達波と反射波に波動場を分離することが可能となり、反射波の発生地点を速度不連続面の位置とする（図-1参照）。

ここで切羽から最初速度不連続面までは、初動走時の傾きから得られる速度と同一とみなせるが、さらに前方の速度が問題となる。

そこで、反射波の振幅情報から切羽前方の速度を推定することを試みた。具体的には、一般に平面境界への垂直入射では反射波の振幅 A_R は式(1)のように表される。ここで、 Z_1 は入射側のインピーダンス、 Z_2 は透過側のインピーダンスを示す。なお、式(1)の右辺は反射係数である。

$$A_R = A \cdot \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1)$$

式(1)より、 $Z_2 < Z_1$ の場合（速度不連続面の前方が低インピーダンス）の反射波形は正負が逆転する。図-4に速度構造と反射係数および想定される波形の関係を示す。 i 層中の入射波振幅を $A_{T(i)}$ 、反射波振幅を $A_{R(i)}$ とすれば、 $Z_{(i+1)}$ は式(2)より算出できる。

$$Z_{(i+1)} = Z_{(i)} \cdot \frac{A_{T(i)} + A_{R(i)}}{A_{T(i)} - A_{R(i)}} \quad (2)$$

すなわち、密度は変化しないと仮定した場合、 V は初動走時の傾きで与えられるので、反射波と直達波の振幅の比が得られれば V が計算できる。図-5に弾性波速度推定の基本的なフローを示す。

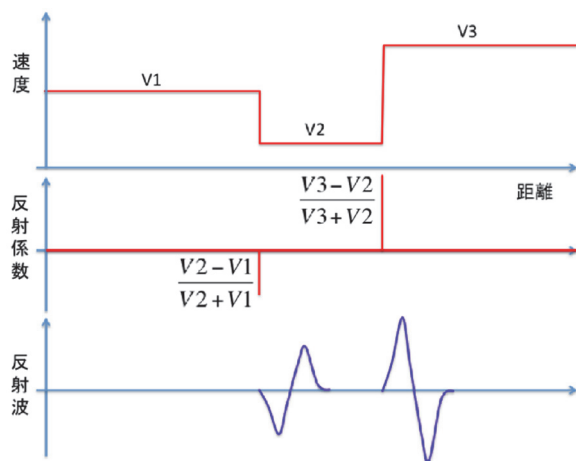


図-4 速度分布と反射波の概念図（密度一定の場合）

図-5に示す(1)前処理には速度フィルターやバンドパスフィルター、幾何減衰の補正等、(2)ではFKフィルターや τ -Pフィルター、各種重合処理等が含まれる。(3)を行うことにより、起振力のばらつきが補正されると期待される。(4)(5)に関しては、コンボリューションモデル等のフォワードモデルを設定してインバージョンによって求める。

(2) 単純化した弾性波速度推定方法

(1)項で示した速度推定方法の基本的な考え方より、TFT探査では単純化し、解析パラメータを変えて試行錯誤的に解析を行わない方法として、図-6に示すフローに基づく弾性波速度推定方法を試行した。なお、図-6に示すアルゴリズムでは、以下のような工夫を加えている。

- ・主要イベントを抽出するためエンベロープを使用
- ・反射位相の判定を容易にするため変位波形を使用
- ・反射係数はエンベロープの比で算出
- ・反射位相の判定は波形の相関係数を利用

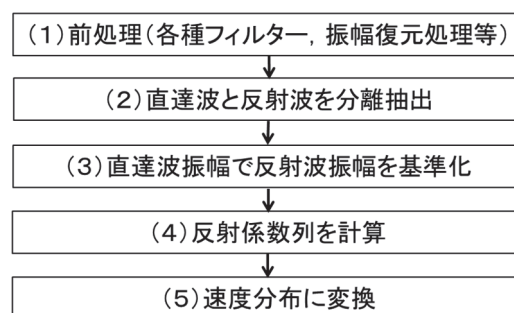


図-5 弾性波速度推定の基本的なフロー

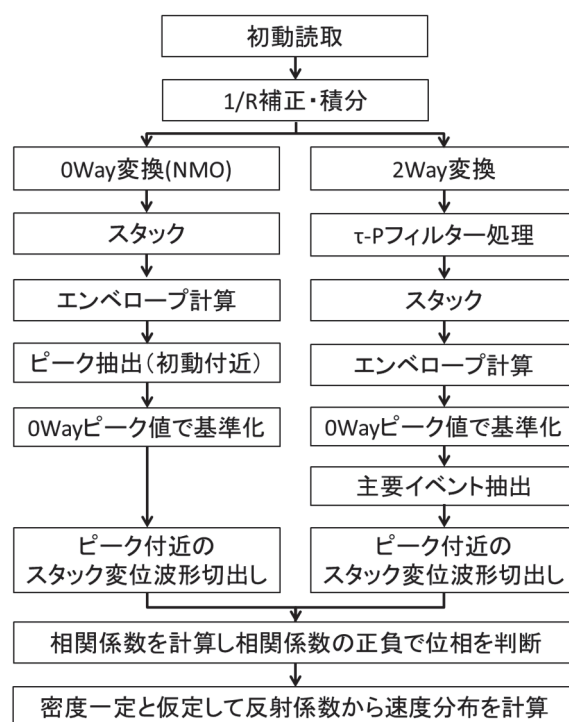


図-6 TFT探査における弾性波速度推定フロー

4. 理論波形による検証

単純化した弾性波速度推定方法の検証として、3次元粘弾性差分法（3D-FDM）によるシミュレーション波形を計算し、本手法の適用性について検証した。検討モデルを図-7、8に示す。

図-7のModel-Aは、地山の弾性波速度が異なる地層が2層分布する構造、図-8のModel-Bは、低速度帯が挟在する構造で、かまぼこ型断面のトンネル空洞をモデル化している。地質構造は、トンネル軸方向と直交しているものし、受振点はTD.120mの右側壁中央の坑壁から1m奥とし、起振点はトンネル切羽中心の3m奥とし、掘削発破により切羽がTD.150～196mまで2m毎に進行するものとし、合計24ケースでモデル化し波形を計算した。なお、震源関数は中心周波数200Hzのリッカーウェーブレットとした。

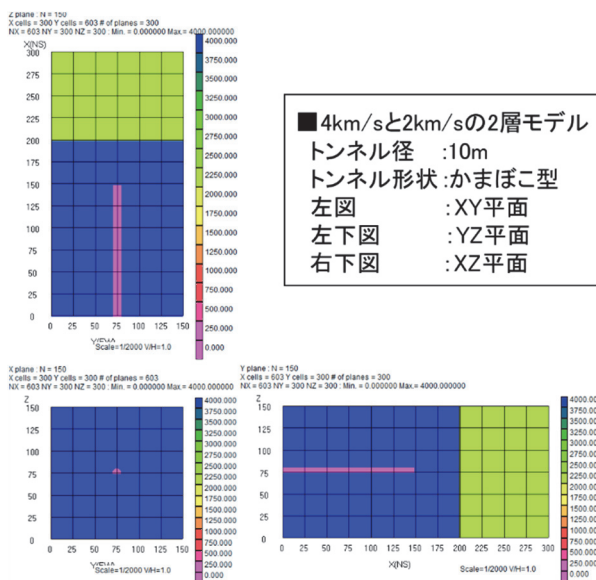


図-7 Model-A（地層が2層分布する構造）

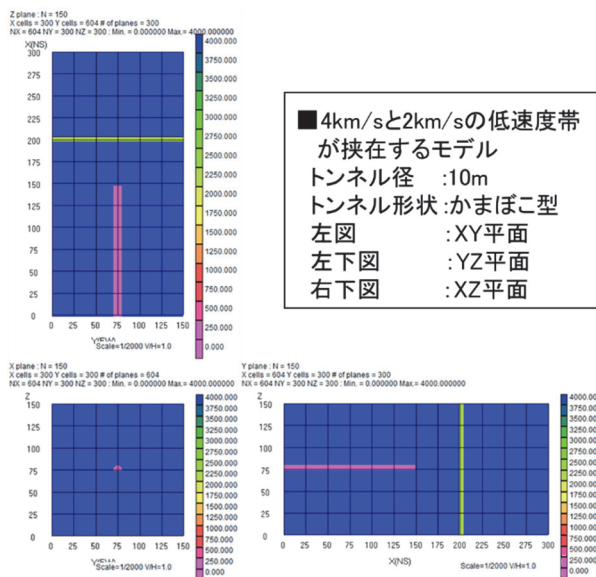


図-8 Model-B（低速度帯が挟在する構造）

図-9に、Model-Aで計算された各シミュレーション波形(a)～(c)を示す。具体的には、(a)は変換処理前の速度振幅の計算波形であり、これを積分して変位波形に変換し幾何減衰補正をしたのち、初動時刻を揃えるようにシフトしたものを(b)、2way変換したものを(c)に示している。

図-10は図-9中の(b)をスタックした波形とそのエンベロープ、図-11は図-9中の(c)をスタックした波形とそのエンベロープを示しており、図-10の波形を直達波、図-11の波形を反射波と見なすことができる。ここで図-11の星印は、検出された反射波ピークの位置を表しており、赤色は同位相、青色は逆位相を表している。なお、0.02秒付近および0.07秒付近の同位相のピークは、直達波の除去が不完全なための誤認識である。

図-12に、図-6のフローに基づき計算された反射係数列と推定速度モデルを示す。図-12より、誤認識があるものの、0.04秒付近の速度境界は明瞭に捉えているものと考えられる。

さらに、図-13にModel-Bで計算された変換処理前のシミュレーション波形（速度振幅の計算波形）、図-14に2way変換後のスタック波形とエンベロープ、図-15に反射係数列と推定速度モデルを示す。

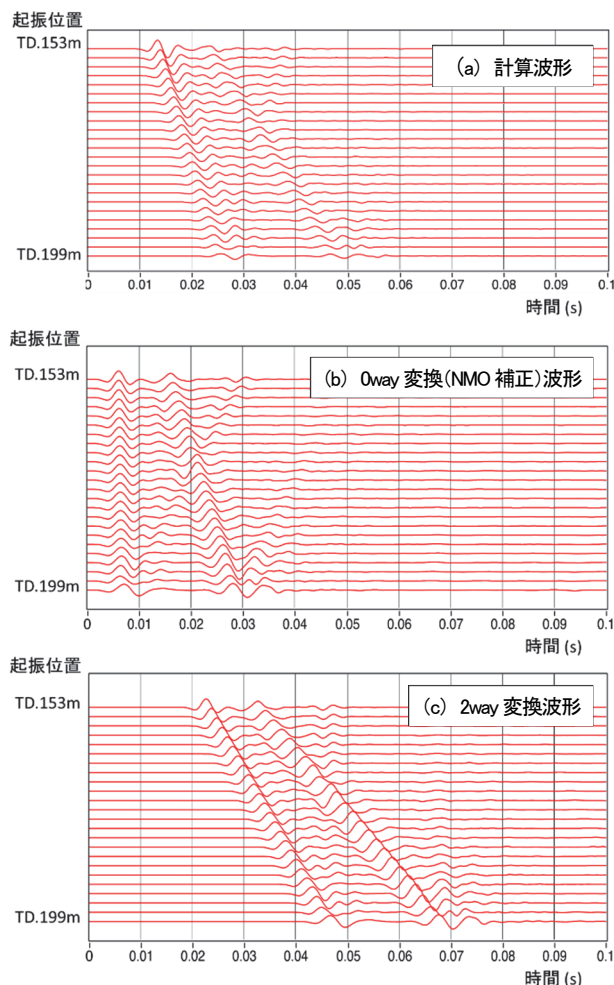


図-9 シミュレーション波形 (Model-A)

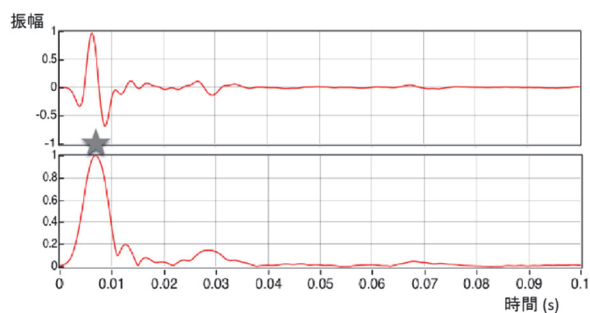


図-10 スタック波形とエンベロープ
(0way 変換, NMO 補正後) (Model-A)

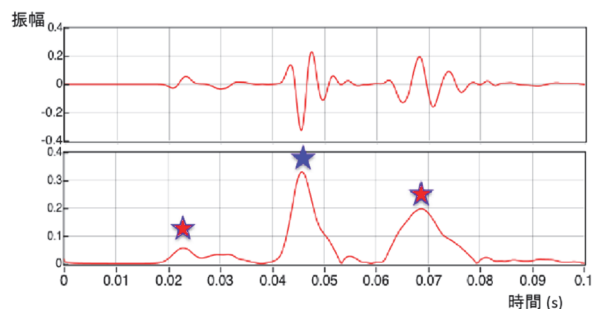


図-11 スタック波形とエンベロープ
(2way 変換後) (Model-A)

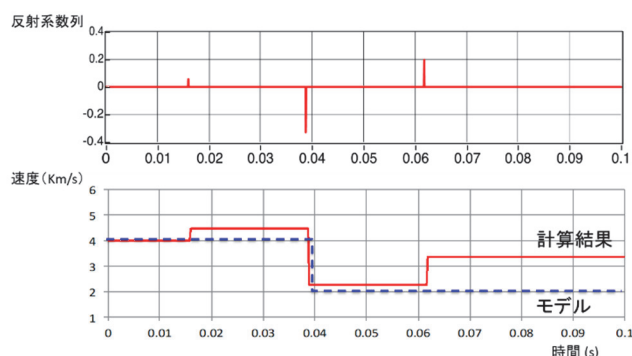


図-12 反射係数列と速度推定モデル (Model-A)

図-14より、0.05 秒付近に図-11では存在しなかった同位相の反射波ピークが検出されており、図-15より、誤認識があるものの、0.04 秒付近の低速度帯は明瞭に捉えられているものと考えられる。

5. 実際のトンネル現場への適用例

施工中のトンネル現場において、本検討の試行アルゴリズムで得られた弾性波速度と切羽評価点（実績）との関係を図-16に示す。解析においては、TD496.6～535.6m 区間の 18 回の掘削発破データを使用し、切羽前方 TD.535.6～639.0m 区間の弾性波速度を算出した。

当該トンネルの地質構成は、第四紀安山岩（塊状および自破碎）、凝灰角礫岩、火山礫凝灰岩などから構成されており、図-16には実際の切羽写真と連続的に 3 回実施した TFT 探査結果（反射面を赤色で表示）も合わせて示

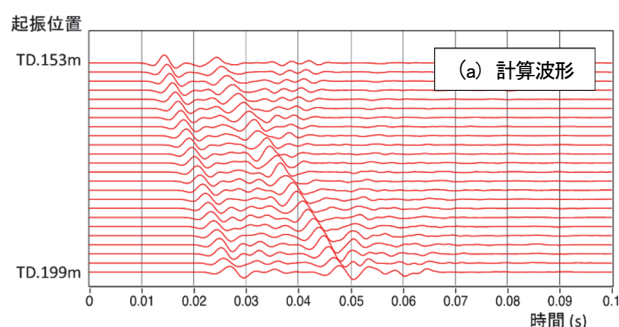


図-13 シミュレーション波形 (Model-B)

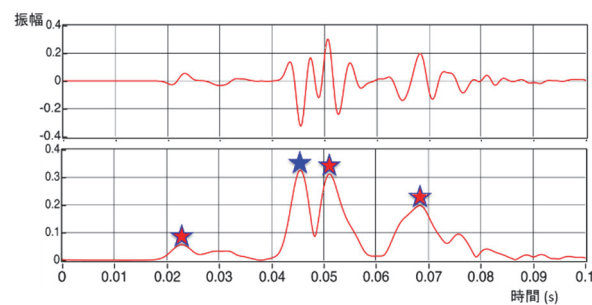


図-14 スタック波形とエンベロープ
(2way 変換後) (Model-B)

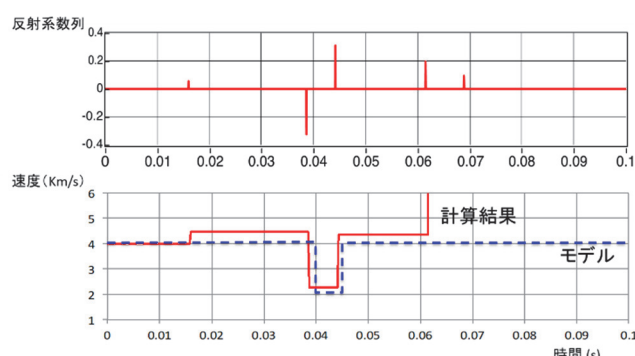


図-15 反射係数列と速度推定モデル (Model-B)

している。

図-16より、採用された支保パターンは D I パターン（設計弾性波速度：2.5～3.2km/s）に対して、本検討で得られた弾性波速度は 3.0km/s 前後であり、概ね同程度の結果が得られている。また、切羽評価点に変化する位置で弾性波速度値の変化を捉えており、定量的な評価の一指標として有効であるものと考えられる。

6. おわりに

掘削用の発破を起振源とした反射法弾性波探査による切羽前方探査システム「トンネルフェイステスター（TFT 探査）」において、反射面前後の弾性波速度を算出する試行アルゴリズムを考案し、3次元粘弾性差分法（3D-FDM）による理論波形による検証と実際のトンネル現場への適用を行い掘削実績との比較検証を行った。

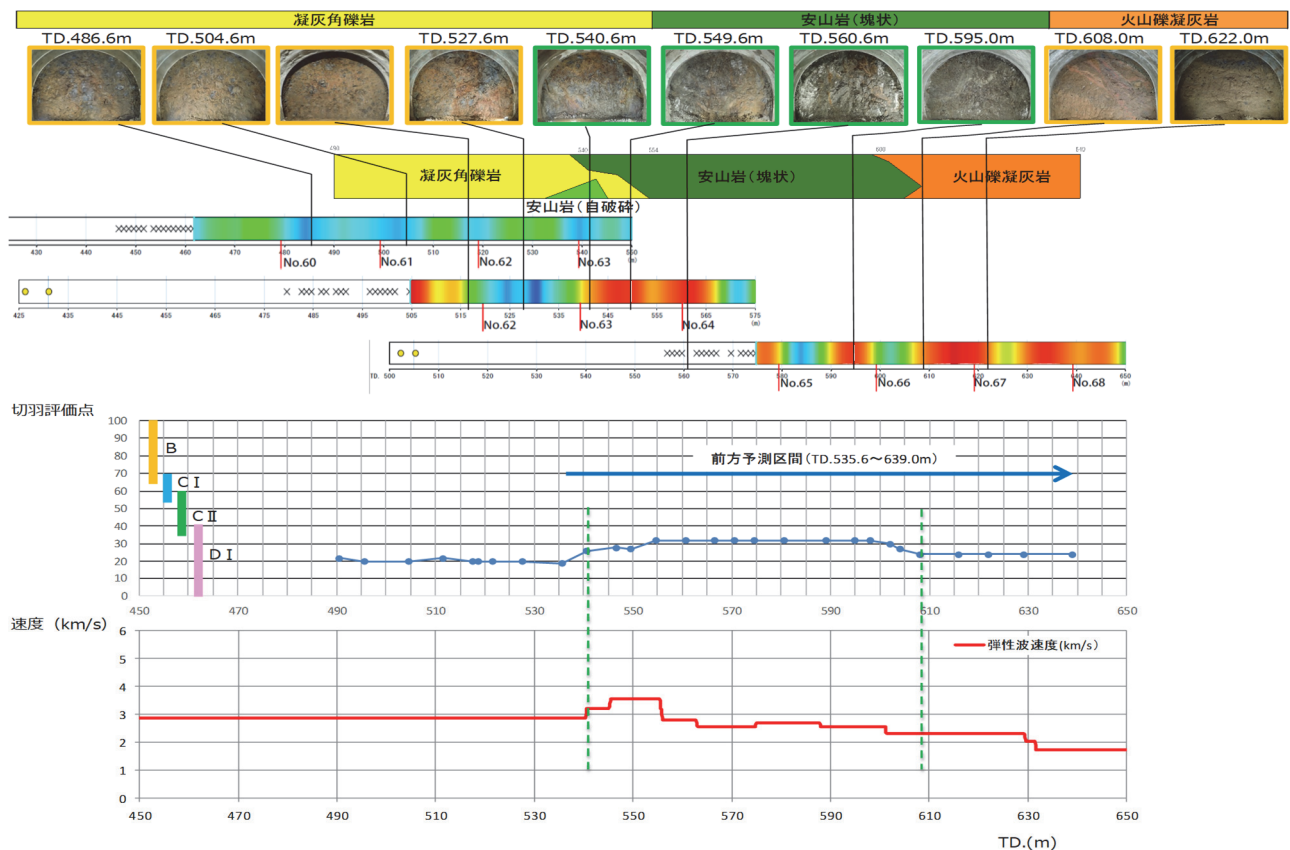


図-16 弾性波速度と切羽評価点との関係 (TD.535.6~639.0m)

その結果、掘削実績と比較し概ね良好な結果が得られた。今後、さらにデータ検証を行い試行アルゴリズムを改良し、切羽前方の予測精度の向上を図る必要がある。

参考文献

- 1) G.Sattel, P.Frey and R.Amberg : Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods, *First Break*, Vol.10, No.1, 1992.
- 2) 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.

- 3) 中谷匡志, 山本浩之, 桐原章浩, 天童涼太, 鈴木雅行 : 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, 土木学会トンネル工学報告集, Vol.26, I-38, 2016.
- 4) 今村杉夫, 山本浩之, 中谷匡志, 太田賢治 : 切羽での掘削発破を起振源とするトンネル前方探査における切羽前方速度推定手法の簡略化, 物理探査学会第 138 回学術講演会講演論文集, No.25, pp.95-98, 2018.

(2018. 8. 10 受付)

AN ATTEMPT OF VELOCITY ESTIMATION METHOD ON A TUNNEL FORWARD EXPLORATION

Hiroyuki YAMAMOTO, Masashi NAKAYA, Sugio IMAMURA, Kenji OHTA and Sho TANIGUCHI

A tunnel face tester (TFT exploration) is developed a forward facing exploration system based on reflection method elastic wave exploration using excavation blasting as a vibration source in mountain tunnel construction. In this study, an algorithm for estimation of velocity behind tunnel face is developed and implemented in this system. The algorithm is based on the ratio between the amplitude of forward going wave and reflecting wave. The method is evaluated using simulated waveforms calculated by 3D FDM on two models and the results showed the possibility of actual application. In addition, it was applied to the actual tunnel site, compared with the actual excavation results, and good results were obtained.