

地山の長期的な健全性診断を目的とした 弾性波屈折法探査の適用実験

丹羽 廣海¹・村山 秀幸²・岡崎 健治³・大日向 昭彦⁴・伊東 佳彦⁵

¹正会員 株式会社フジタ 技術センター 土木研究部 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

E-mail:hiroumi.niwa@fujita.co.jp

²正会員 工博 株式会社フジタ 技術センター 土木研究部 (同上)

E-mail:murayama@fujita.co.jp

³正会員 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

E-mail:90185@ceri.go.jp

⁴国土交通省北海道開発局 室蘭開発建設部 苫小牧道路事務所 (〒053-0816 苫小牧市日吉町2丁目1-5)

E-mail:obinata-a22aa@hkd.mlit.go.jp

⁵正会員 工博 (独) 土木研究所 寒地土木研究所 (同上)

E-mail:yos-ito@ceri.go.jp

近年, わが国のトンネルにおいて, 地山の長期的な変状により, 路盤等のひび割れや変位が供用中に顕在化する事例が発生している. 供用中のトンネルでは, 覆工コンクリートや路盤の背面の地山状況を直接確認することが難しく, 地山の健全性を診断するための技術が無いのが現状である. 筆者らは, 繰り返しモニタリングができ, かつ同一の指標で施工段階から維持管理段階まで継続的に評価できる診断技術として, 弾性波屈折法探査に着目して現場適用実験を進めている. 実験対象トンネルは, 供用から30年以上にわたり長期的に変状が継続している旧トンネルと, その代替ルートとして新たに施工された新トンネルから構成される. 本報告では, 完成後の新トンネルにおいて弾性波屈折法探査を試行した結果について報告する.

Key Words : Seismic refraction survey, time-dependent behavior, tunnels in service
P-wave, S-wave

1. 背景

近年, わが国のトンネルにおいて, 地山の長期的な変状により, 路盤等のひび割れや変位が供用中に顕在化する事例が発生している. 供用中のトンネルでは, 覆工コンクリートや路盤の背面の地山状況を調査等で直接確認することが難しく, こうした地山に起因し時間経過とともに長期間にわたって進行する変状 (以下, 時間依存性変状と称す) に対する健全性を診断するための技術が無いのが現状である. 山岳トンネルの維持管理における日常点検や定期点検では, 覆工コンクリートや路盤あるいは坑内設備の変状を点検することに主眼が置かれており, 地山を対象とした調査等は変状が確認された後におこなわれるのが一般的である¹⁾²⁾. 地山の健全性を, 地山を直接観察, 確認することができる施工段階から, 供用中の維持管理段階まで継続的に診断するためには, 繰り返

しモニタリングができ, かつ同一の指標で継続して評価できる診断技術が求められる.

岩盤を掘削すると掘削面周辺の岩盤は応力解放による緩みを生じ, 強度の低下をはじめとする物性値の変化が起こることが知られている. 時間依存性変状を生じるトンネル周辺地山でも, 同様の物性値変化が発生していると考え, 対象とする地山を破壊することなく継続的に測定可能な物性値を指標としてその経年変化をモニタリングすることによって, 地山の健全性を診断できると考えられる. 筆者らは, 一般にトンネル建設前の事前調査で広く利用されていて, 施工中から維持管理段階まで継続的に測定が可能な弾性波探査に着目し, 地山弾性波速度の経年変化を指標とした時間依存性変状に対する地山健全性診断技術の調査, 研究を開始した.

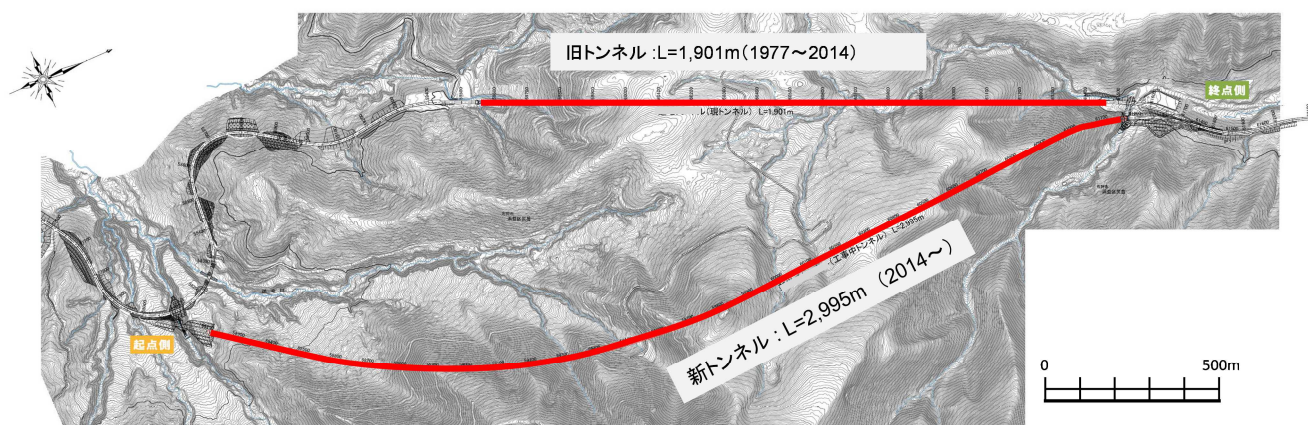


図-1 新旧トンネルの位置関係

2. 弾性波速度の経年変化に関する既往研究

弾性波速度の経年変化に着目した既往研究は、トンネル地山を対象とした例は少ないが、切土のり面を対象とした研究は古くからなされてきた。多賀ら³⁾、鈴木ら⁴⁾、菊池ら⁵⁾は、20年以上にわたり供用中の高速道路の切土のり面で地山弾性波速度を実測し、風化帯走時、風化帯層厚、風化帯の地山弾性波速度などの経年変化から風化の進行および斜面の安定性評価を試みた。これらの研究に共通する基本的な考え方として、岩盤の風化は地表から深部に向かって進行し、風化前線 (weathering front) と呼ばれる風化部と新鮮部の境界が時間の経過とともに深さ方向に移動して行くという点が挙げられる。また、風化による岩盤強度の低下をはじめとする物性値の変化は、掘削直後の初期に急激に起こり、時間の経過とともに次第に変化が小さくなる傾向があることを示した。これらの研究では、地山弾性波速度の実測に屈折法弾性波探査とボーリング孔を利用した孔内速度検層を採用しており、調査開始時と同一の測線、発震条件で測定したこと、測定時の季節、天候の条件をなるべく同一にしたことが報告されているが、実測された地山弾性波速度値、風化帯層厚の精度 (誤差) に対する評価はなされていない。一方で菊池らは、第1回目の測定からの経過年数が4年~9年を超えると、風化帯走時が前回の測定から減少し年変化率が負の値を取る異常値の発生が増加することを報告している。この原因として、風化が安定してくるのに伴い風化帯走時の変化が小さくなり、経年的な差を捕らえきれないためとして、すなわち物性値の経年変化に対して測定誤差の方が大きいことを指摘している。

以上より、地山弾性波速度を継続的に測定し、その経年変化から地山状態を評価するためには、探査測線配置や発震条件をできるだけ同一にして再現性を確保することに加え、その測定方法による地山弾性波速度値の精度

(誤差) がどの程度のオーダーで、経年変化がどの程度あれば有意な変化と評価できるのかをあらかじめ把握しておく必要があることを示唆している。

3. 実験対象トンネルの概要と探査方法

(1) 実験対象トンネルの概要

実験対象トンネルは北海道の道路トンネルで、供用から30年以上にわたり長期的に変状が継続している旧トンネルと、その代替ルートとして新たに施工された新トンネルから構成される。旧トンネルは矢板工法で施工された延長約1.9kmのトンネルで、新トンネルはNATMで施工された延長約3.0kmのトンネルで、図-1に示すような位置関係にある。トンネル地山を構成する地質は、新旧トンネルともに新第三系の熱水変質を受けた安山岩を主体とする。旧トンネルでは、完成から数年後にインバートや側壁の変状が顕在化し、約30cmの急激な路盤隆起が確認された後に数次にわたる対策工が施工されたが、30年以上にわたり緩慢な変状が継続している。一方で、新トンネルではインバートコンクリート打設後の施工中に、約10cmの路盤隆起を主体とする変状が確認され、縫返しを余儀なくされた区間がある。

本研究では、新トンネルの供用を開始して旧トンネルの供用を終了した後に、旧トンネル内で弾性波屈折法探査および調査ボーリングなどの現場実験を計画している。筆者らはこれまでに、室内での基礎実験として、新トンネルで施工中に実施された先進ボーリングコアを使用した超音波伝播速度の経年変化を測定した結果⁶⁾および、強度特性と超音波伝播速度の傾向についてまとめた結果⁷⁾について報告した。本報告では、旧トンネルでの現場実験に先行して新トンネルの供用開始前に、現場での基礎実験として弾性波屈折法探査を新トンネル内でおこなった結果について報告する。

(2) 弾性波探査方法と測線配置

新トンネルでの弾性波屈折法探査は、トンネル完成直後の地山弾性波速度を実測し、後に実測する旧トンネルの時間依存性変状を実際に生じた区間における経年後の地山弾性波速度と対比することをおもな目的として実施したが、供用を開始した後の維持管理段階において、構造物を傷つけることなく弾性波屈折法探査を現場で適用可能か否かを検証することを目的のひとつとした。供用開始後に継続して同一条件にて測定することを考慮して、新トンネルにおける弾性波屈折法探査は覆工コンクリートおよび路盤の舗装が完了した後に実施した。舗装はコンクリート舗装である。受振器は3成分MEMS型(Micro Electro Mechanical Systems)受振器を使用し、探鉱機はSERCEL428XL DSUを使用した。本システムは、受振器とケーブルが一体となっておりRSU(Remote Station Unit)およびバッテリーを必要としないため、従来のアナログ受振器を使用したシステムに比べて軽量で測線展開作業も容易である。舗装面上での受振器の設置には図-2に示す3点式のスタンドを使用した。弾性波の震源には舗装面の損傷を避けるため発破震源ではなく機械震源である油圧インパクトを使用した。油圧インパクトは小型油圧ショベルをベースマシンとした自走式震源で、ピストンの打撃をベースプレートに伝えることにより弾性波を地盤へ発震する。油圧インパクトによるP波の発震は鉛直下向きに打撃することによっておこなうが、ピストンの打撃角度は左右に鉛直から 35° まで傾けることができ、ベースプレートを傾斜方向から打撃することにより、S波発震用震源としてせん断波を地盤に伝播させることができる(図-3参照)。新トンネルにおける弾性波屈折法探査では、鉛直下向きのP波発震および、測線方向に向かって左右からそれぞれS波発震(ピストン打撃角度は約 35°)をおこない、S/N比を向上させる目的で1箇所あたり3回ずつスタックした。

探査測線は延長 $L=450\text{m}$ で、受振点間隔は 6m (76点)、発震点間隔は 3m (151点)とした。新トンネルではトンネル完成後の変状は確認されていないが、2箇所で施工中にインバートの隆起等の変状が認められた。

弾性波屈折法探査測線は、図-4に示すように施工中に変状が認められた区間(変状区間①および変状区間②)と、施工中に湧水が多かった区間(湧水多量区間)を網羅して展開した。変状区間①はインバートコンクリート

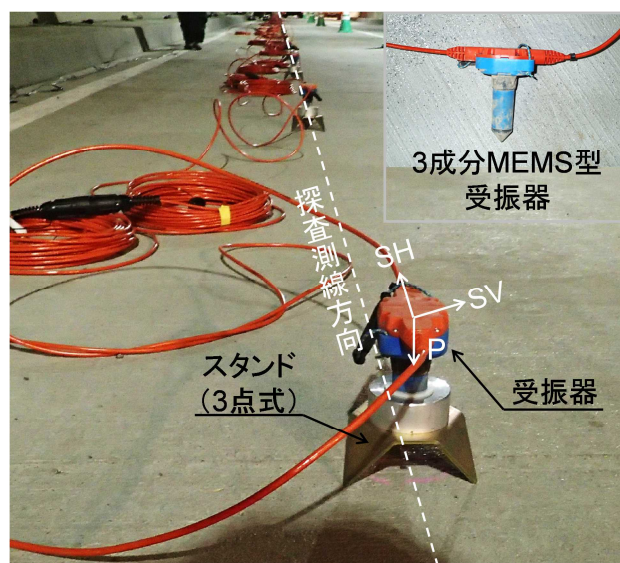


図-2 3成分MEMS型受振器の舗装面への設置状況

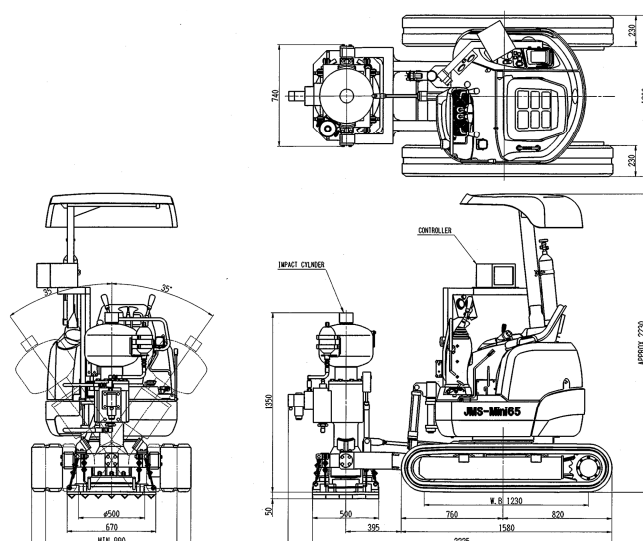


図-3 油圧インパクト

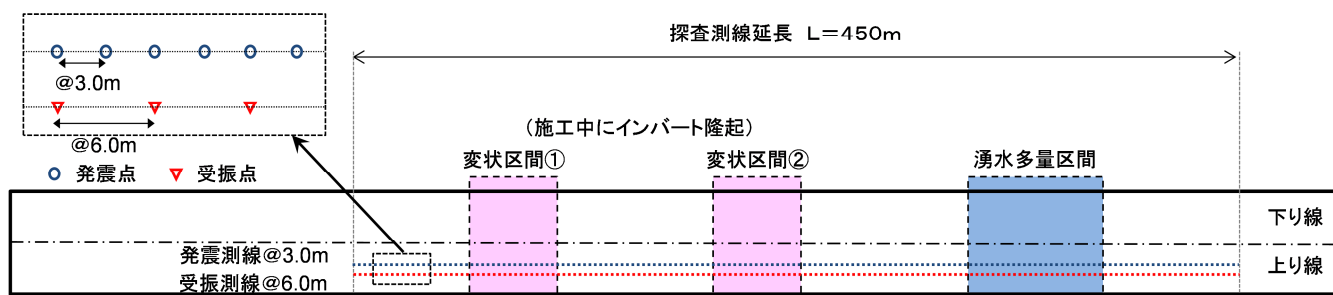


図-4 探査測線配置平面図

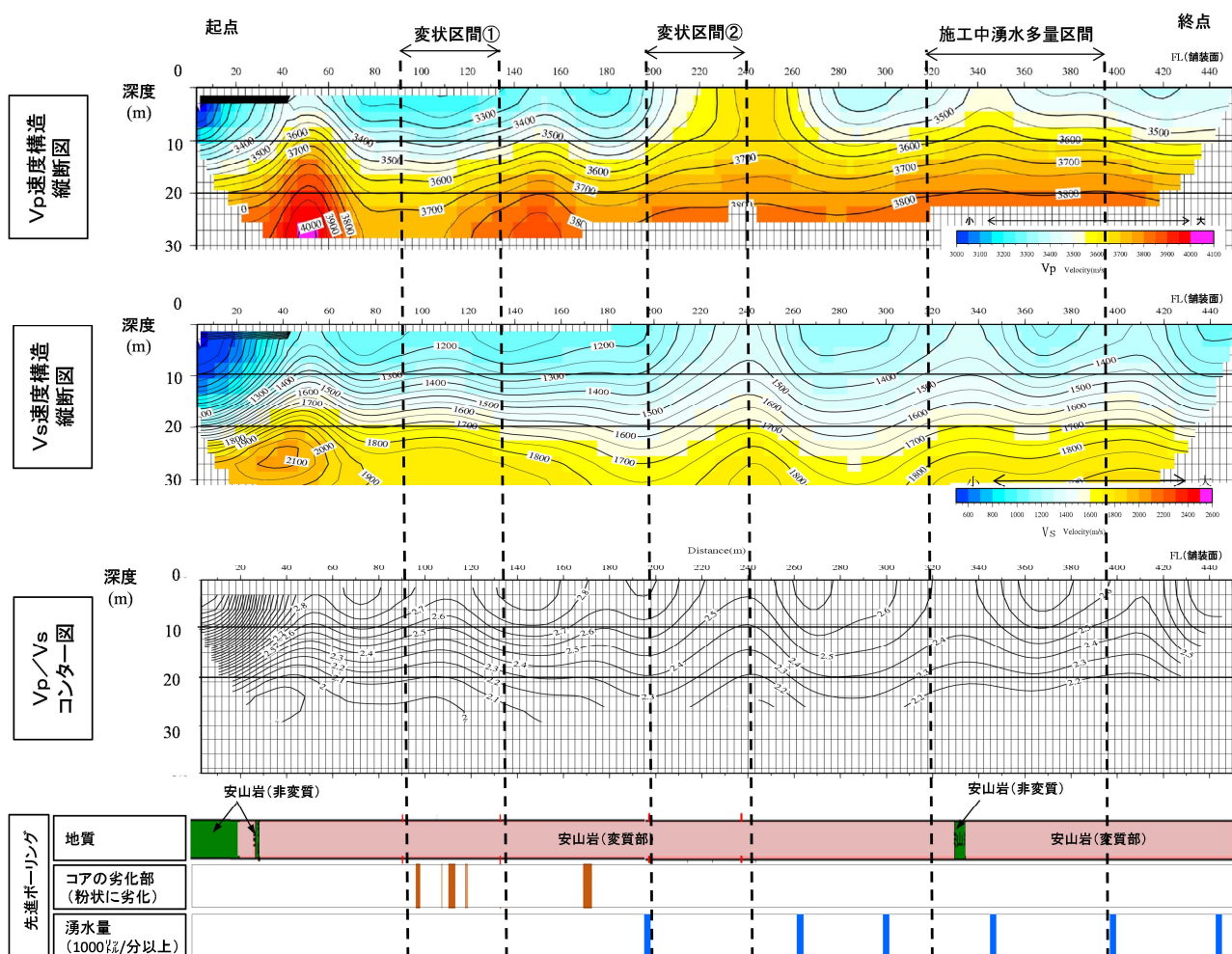


図-5 地山弾性波速度（ V_p 、 V_s ）のトモグラフィ解析結果と先進ボーリング結果の対比

打設後に時間経過とともに緩慢な動きで隆起が発生した区間で、一方、変状区間②は、起点側からと終点側からの両押し施工による貫通点近傍に位置し、インバートコンクリート打設後に急激に隆起が発生した区間である。

取得された記録を用いて、屈折波トモグラフィ解析を実施した。屈折波トモグラフィ解析の結果に対する信頼性の評価を与える方法として、初期モデルランダム化によるモンテカルロ確度解析を実施した。この手法では、一定の条件下でランダムに生成した多数の初期モデルに対してトモグラフィ解析を実施し、すべての結果を平均化した速度分布およびその平均値からの偏りを示す標準偏差分布が得られる。これにより得られた平均速度構造をもっともらしい初期モデルとして採用し、再度トモグラフィ解析を実施してその結果を最終速度構造とした。初期モデルとしては、深度0m、60mにおいて、それぞれ速度範囲1500～3000 (m/s)、3000～4500 (m/s)と設定し、一様乱数によってそれぞれの深度での速度値を決定し、線形な勾配を持つ一次元速度モデルをランダムに生成し、50個の速度モデルを用意した。

4. 弾性波屈折法探査結果

(1) 地山弾性波速度構造

弾性波屈折法探査によって得られた地山弾性波速度（ V_p ）の縦断分布を図-5に示す。図には施工中に実施された先進ボーリングによる地質区分と、ボーリングコアの劣化部、ボーリング孔からの湧水量が1000リットル/分以上であった区間を併記した。

図より、舗装面から10m程度以内の表層部では、 V_p 値で3200～3600 (m/s)程度の範囲で地山弾性波速度が縦断方向に変化することが分かるが、おおむね10m以深では縦断方向の変化が少ない傾向が認められる。

地山弾性波速度は、P波（ V_p ）、S波（ V_s ）ともに変状区間①およびその周辺の表層部では低い傾向が認められ、地質状態が比較的軟質になっている可能性が示唆される。一方で、変状区間②は、起点側では比較的低い地山弾性波速度を示すものの、終点側はどちらかというと高く、変状区間①とは傾向が異なる。これは変状区間①と変状区間②では地質状態が異なることを示唆しており、変状発生メカニズムなどに違いがある可能性が考えら

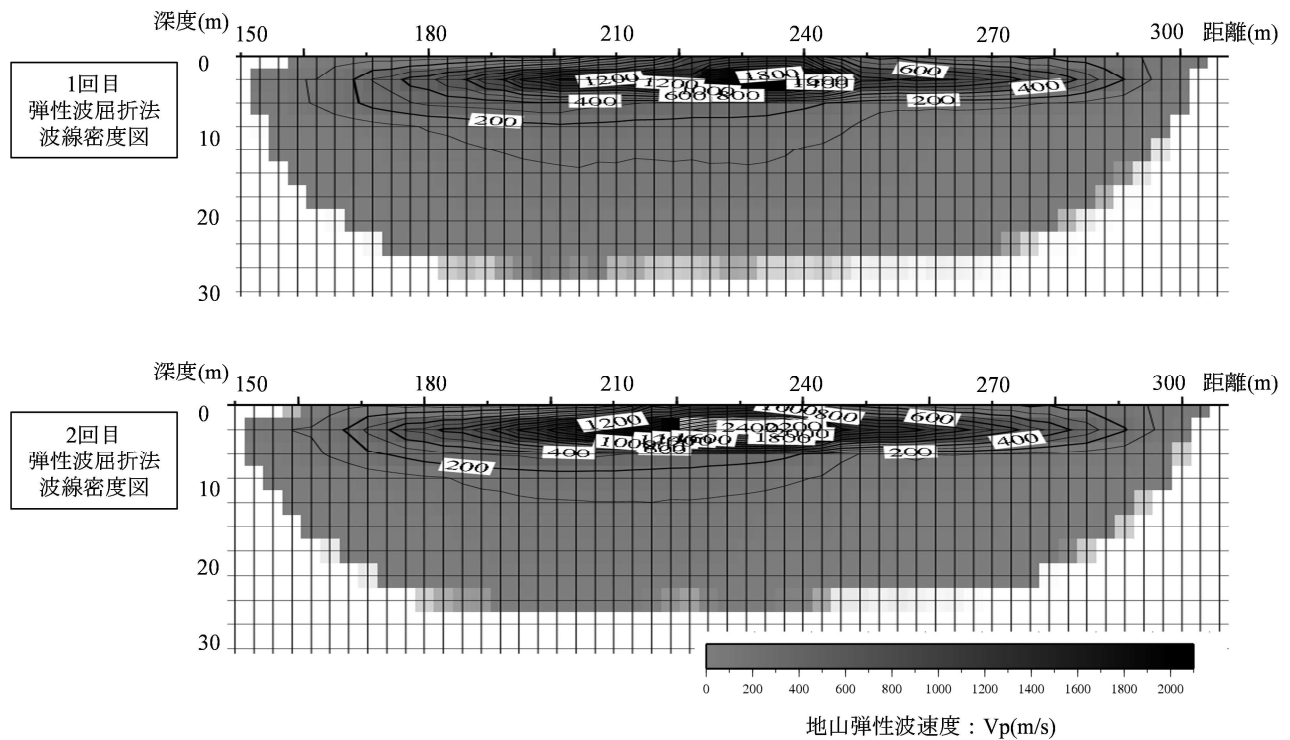


図-6 弾性波屈折法探査1回目および2回目の波線密度コンター図の対比

れる。先進ボーリングコアの観察結果から、変状区①では採取直後は硬質だったボーリングコアが、時間経過後に粉状となる劣化がところどころで確認されているが、変状区②ではそのような傾向は確認されていない。また、ボーリング孔からの湧水についても、変状区①では少なく、変状区②の起点側で多く両者には相違がある。なお、距離 0～30 m 間の深度 15 m 程度までの範囲は、地山弾性波速度値が V_p 、 V_s とともに非常に低い結果となっている。この範囲は測線の起点側端部にあたり起点側からの波線経路が少ないために、初期モデルで与えた速度値を修正するための情報が少ない箇所と推定される。初期モデルは表層の深度 0 m に速度範囲 1 500～3 000 (m/s)、深度 60 m に 3 000～4 500 (m/s) を与え一様勾配でランダム化しており、波線が少ない起点側では初期モデルの影響が比較的に強く残ったため、表層で速度が低く深部で高い結果になったと考えられる。

図-5にはP波とS波の伝播速度の比 (V_p/V_s) を併記して示した。 V_p/V_s の値は深度方向に向かって次第に小さくなる傾向が認められ、表層ほど V_p 値が V_s 値に比べて相対的に高いことが読み取れる。また、舗装面から10 m 程度以内の表層部では、縦断方向の V_p/V_s 値の変化が大きいが、10 m以深では比較的变化が小さい傾向が認められる。上記の V_p/V_s 値の傾向から、P波伝播速度値 (V_p) とS波伝播速度値 (V_s) の変化は一定の比率に沿って変化しているわけではなく、地質等の変化に対して V_p 値または V_s 値のどちらかが相対的に感度が高いことが示

唆される。この原因や物理的意味についてはさらなる考察を要するが、P波とS波を併用することによって何らかの有用な情報が得られる可能性があると考えている。

(2) 弾性波屈折法探査の適用性実験

弾性波屈折法探査により、トンネル施工中から供用中の維持管理段階まで地山弾性波速度を継続的に測定し、その経年変化から地山状態を評価することを念頭に置き、地山弾性波速度値の精度（誤差）がどの程度のオーダーで、経年変化がどの程度あれば有意な変化と評価できるのかを把握することを目的として、2回目となる弾性波屈折法探査をおこなった。2回目の探査は測点位置が同一となるように、1回目にマーキングしておいた受振点位置に受振測線を展開し直した上で、同様にマーキングしておいた発震点位置にて発震をおこなった。発震は1回目と同様に油圧インパクトでおこない、2回目はP波（鉛直方向の発震）のみの3回スタックとした。探査測線は図-3に示した延長 450 m の測線の中央部の延長 150 m 区間で、受振点間隔は 6 m (26 点)、発震点間隔は 3 m (51 点) とした。トモグラフィ解析は、1回目の探査は延長 450 m のうち中央部の 150 m 分の受振、発震データを切り出しておこない、屈折波トモグラフィ解析条件およびランダムに生成する初期モデルの条件、モデル数は1回目と2回目とも同一として、得られた地山弾性波速度値を V_p 値で対比した。

図-6に、1回目と2回目の弾性波屈折法探査における波

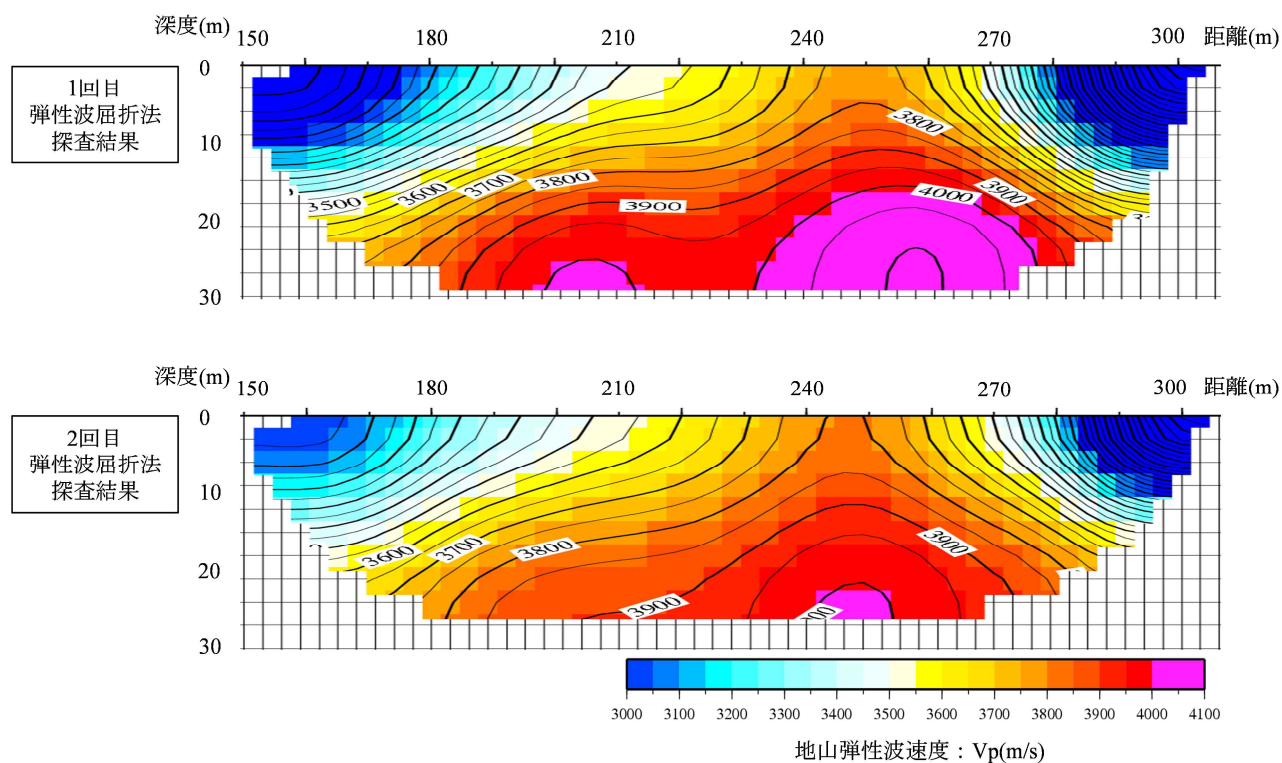


図-7 弾性波屈折法探査1回目および2回目の地山弾性波速度（Vp）値の縦断分布の対比

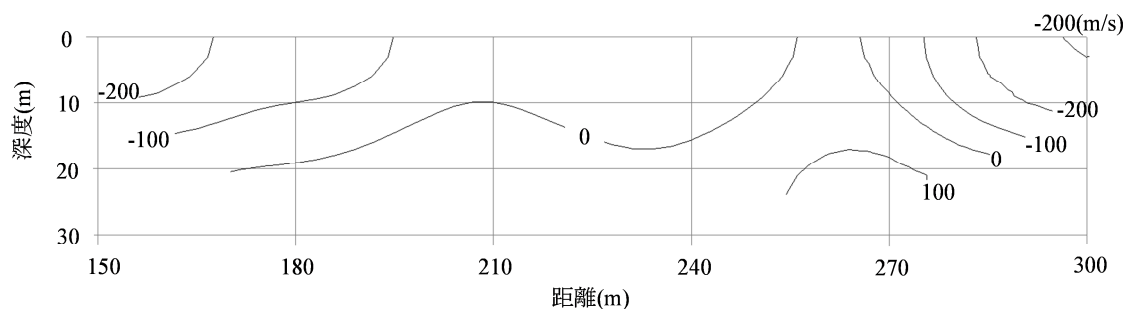


図-8 地山弾性波速度の差分（1回目と2回目のVp値）

線密度をコンター図にして示す。図より、波線は表層部10 m以浅に集中している傾向が見られるものの、1回目と2回目の波線密度の縦断的分布は非常に類似しており、受振点および発震点の位置および間隔を同一とした条件で探査をおこなった場合には同様の波線経路をたどっていることが推定される。この結果より、1回目と2回目の弾性波屈折法探査方法には再現性があると考えられ、結果の信頼性が確保できていると評価する。

図-7に1回目と2回目のP波速度値（Vp）の縦断分布を示し、図より、地山弾性波速度（Vp）値の縦断分布は、1回目と2回目の探査結果とも距離250 m付近の表層部にVp=3 800 (m/s)程度のピークが確認されるとともに、深度30mの深部では距離250～260 m付近にVp=4 000～4 100 (m/s)程度のピークが確認され、類似した傾向

を示すことが分かる。なお、測線両端部の距離150～170 m、280～300 mの表層部は、地山弾性波速度が低い結果となっているが、それぞれ起点側、終点側からの波線が少ない区間に相当するため、解析結果の精度は比較的低いと考えられる。

図-8に同一グリッドにおける1回目と2回目のVp値の差分をコンター図にして示す。図より、1回目と2回目の探査結果において、地山弾性波速度（Vp）値は全く同一にはならないが、同一グリッドにおけるその差分は、概ね±100 (m/s)以内で、Vp=3 200 (m/s)の地山と考えると3 %程度のばらつきに相当する。この結果より、本地山では、時間経過後にVp値で200 (m/s)以上の地山弾性波速度値の差が確認されれば、地質状態が変化したことによる有意な差である可能性があると考えられる。ま

た、時間経過にともなう地質状態の変化による V_p 値の変化が 200 (m/s)以上発生すれば、弾性波屈折法探査によって検出できると考えられる。

5. まとめ

山岳トンネルの時間依存性変状に対する地山の健全性診断に用いる目的で、地山弾性波速度の経年変化を指標とした評価・診断技術に関する基礎実験として、供用開始前の完成トンネルで弾性波屈折法探査をおこない、以下の知見を得た。

- ① 舗装完了後の新設トンネルにおいて、構造物を傷つけることなく、油圧インパクトおよび3成分MEMS受振器を使用した弾性波屈折法探査を実施した。
- ② 舗装面から深度10 m以浅の地山弾性波速度は、縦断方向に変化がある傾向が確認され、施工中に変状が発生した区間の一部では周辺に比べて表層の地山弾性波速度が低い傾向が確認された。
- ③ P波伝播速度 (V_p) とS波伝播速度 (V_s) の変化は一定ではなく、どちらかが地質等の変化に対して相対的に感度が高いことが示唆されるが、その原因等についてはさらなる考察を要する。
- ④ 受振点および発震点の位置および間隔を同一にすることにより、探査方法の再現性は確保できると考えられる。
- ⑤ 弾性波屈折法探査による地山弾性波速度のばらつきは、 $V_p=300$ (m/s)程度の地山では100 (m/s)程度と評価され、時間経過にともなう地質状態の変化による V_p 値の変化が200 (m/s)以上発生すれば、有意な差として検出できると考えられる。

現在、本研究では、実際に時間依存性変状を発生した旧トンネルにおいて、調査ボーリングおよび弾性波屈折法探査の現場実験等を進めている。今後は、新旧トンネルの地山弾性波速度の現場実測データおよび、ボーリングコアを使用した超音波伝播速度試験結果等から、地質劣化にともなう弾性波速度の経年変化傾向を整理し、地質の健全性評価指標について検討を進めてゆきたい。

謝辞： 本研究成果の取りまとめにあたっては「トンネルの変状調査計測技術に関する検討委員会」（委員長：北海道大学大学院児玉淳一准教授）から多くの貴重なご意見を賜りました。現場実験にあたっては国土交通省北海道開発局の関係各位に多大なるご協力を賜りました。また、屈折法弾性波探査の実施および解析にあたっては株式会社地球科学総合研究所の石川浩司氏、野田克也氏をはじめとする関係者の方々にご指導およびご協力を賜りました。ここに深謝致します。なお、本研究は、国土交通省建設技術研究開発助成制度における「変状を伴う老朽化トンネルの地質評価・診断技術の開発」の補助金で実施した。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧，pp.59-74，1993.
- 2) 土木学会：トンネルライブラリー14号 山岳トンネルの維持管理，pp.27-90，2005.
- 3) 多賀直大，田山聡，奥園誠之，八木沢孝哉：長期追跡調査による切土のり面の風化の進行と安定性，土と基礎，Vol.39，No.6，pp.41-47，1991.
- 4) 鈴木立実，成瀬隆弘，田山聡：長期追跡調査による切土のり面の風化と安定性の検討，日本道路公団試験研究所報告，Vol.29，pp.107-116，1992.
- 5) 菊池英明，古川浩平，河村浩恵，奥園誠之，田山聡：長期追跡データを用いた切土のり面崩壊に与える風化の影響に関する一考察，土木学会論文集 No.588/VI-38，pp.151-164，1998.
- 6) 丹羽廣海，村山秀幸，岡崎健治，大日向昭彦，伊東佳彦：熱水変質作用を受けた岩石の劣化に伴う超音波伝播速度の経時変化，土木学会第69回年次学術講演会講演概要集，pp.407-408，2014.
- 7) 岡崎健治，大日向昭彦，伊東佳彦，丹羽廣海，村山秀幸：熱水変質作用を受けた岩石コアにおける物理強度特性の変化に関する検討，土木学会第69回年次学術講演会講演概要集，pp.419-420，2014.

(2014.9.15 受付)

A FIELD EXPERIMENT TO APPLY THE SEISMIC REFRACTION SURVEY FOR LONG TERM HEALTH MONITORING OF TUNNEL GROUND

Hiroumi NIWA, Hideyuki MURAYAMA, Kenji OKAZAKI Akihiko OBINATA
and Yoshihiko ITO

Recently, the continuous ground displacements have resulted in damage to the lining of, or floor heaving in several Japanese tunnels. Since there is no diagnostic method for these long-term ground deformations, a technical method for evaluating the health of ground is needed. A diagnostic method is required that uses a standard index to evaluate the ground condition continuously from construction stage through maintenance stage. The seismic exploration is an effective method for evaluating the ground health in this way. It is necessary to secure the reproducibility to evaluate the results of seismic exploration repeatedly. We had applied a field experiment of seismic refraction survey in order to evaluate the applicability for long term ground health monitoring. The study area consists of an old tunnel which time-dependent deformation is continuing over 30 years, and a newly constructed tunnel as the alternative route. This paper describes the result of seismic refraction survey carried out in the new tunnel after completion.