

弾性波速度を用いた時間依存性変状 に対する地質健全性評価法の検討

丹羽 廣海¹・村山 秀幸²・岡崎 健治³・山崎 秀策⁴・伊東 佳彦⁵

¹正会員 株式会社フジタ 技術センター (〒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 (同上)

E-mail:murayama@fujita.co.jp

³正会員 国立研究開発法人 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理博 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 (同上)

E-mail:yamazaki@ceri.go.jp

⁵正会員 工博 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 (同上)

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

近年, トンネル地質の長期的な劣化により路盤や覆工コンクリートのひびわれや変位が供用中に顕在化する時間依存性変状の事例が増えている. 時間依存性変状の発生または進行を継続的に監視するためには, 施工中から供用中まで同一の指標について繰り返しモニタリングできる診断技術が求められる. 筆者らは, 時間依存性変状が発生したトンネルで屈折法弾性波探査をおこなった. その結果から, トンネル路盤下の地山弾性波速度は, 時間依存性変状区間で低く健全部で高い傾向が確認され, とくに変状の大きかった区間では他の区間に比べて地山弾性波速度が深部まで著しく低下していることが明らかとなった. これより, 地山弾性波速度の低下率を指標として時間依存性変状に対する現状の地質の健全性を評価できる可能性が示唆された.

Key Words : Seismic refraction survey, seismic velocity, time-dependent behavior, tunnels in service

1. はじめに

いくつかの山岳トンネルにおいて, 地質の長期的な劣化により, 路盤等のひびわれや変位が供用中に顕在化する事例が発生している¹⁾²⁾. こうした地質に起因して長期的に継続する時間依存性変状に対しては, 覆工コンクリートや路盤背面の地質状況を直接確認することが難しく, 地質の健全性を診断するための技術がないのが現状である. トンネルの時間依存性変状の発生または進行を, 直接地質を観察, 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監視, 診断するためには, 施工中から供用中まで一定の診断方法で同一の指標について繰り返しモニタリングができる診断技術が求められる. 本研究では, 施工中から供用中にわたってトンネル地質の健全性を診断するための手法を開発し点検や維持管理に活用することを目的として, 地山弾性波速度を指標とした診断技術について検討をおこなっている. この取り組みの中で, 時間依存性変状の履歴を有するトン

ネルにおいて屈折法弾性波探査による適用実験をおこなった. 前稿では新トンネルでの探査について, 屈折法弾性波探査の診断技術としての適用性を検証した結果について報告した³⁾. 本稿では, 新旧トンネルでの弾性波屈折法探査によって得られた結果から, 地山弾性波速度を指標として時間依存性変状に対する地質健全性評価法を検討した事例について報告する.

2. 地山弾性波速度を指標とした診断技術

山岳トンネルの維持管理における調査, 診断は, 覆工コンクリートや路盤あるいは坑内設備を点検することに主眼が置かれており, 時間依存性変状の主な原因となる地質の状態は監視の対象となっていない⁴⁾⁵⁾. いくつかの時間依存性変状が発生したトンネルでは, 長期的な変位計測および覆工コンクリートや支保部材の応力測定によってトンネルの安全性を監視しながら供用している例が

ある¹⁾。こうした監視方法は点検等で明らかとなった時間依存性変状の発生個所において、変状の進行状況の監視、あるいは対策工の効果を確認するためには有効であるが、監視すべき位置が既知である必要があるとともに、線状構造物であるトンネルに対して得られる情報は計測対象断面のみの情報に限られる。

一方、トンネル掘削面周辺の岩盤は応力解放による緩みを生じ、強度低下などの物性値の変化が起こる。時間依存性変状のきっかけとなる地質の劣化が発生すればその進行とともに物性値は変化すると考えられ、その経時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、施工中から維持管理段階まで長期にわたり継続的に地山の物性値を測定することが可能な技術として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開発を目指している。図-1は地山弾性波速度を指標とした時間依存性変状に対する地質健全度評価の概念をあらわしたものである。図のとおり健全な地質の場合、物性値の低下は供用開始前までに収束するが、時間依存性変状地質の場合は供用中まで物性値の低下が継続し、やがてしきい値となる補修が必要となるレベルにまで達する。このように物性値の経時変化を継続的にモニタリングして、しきい値と対比することによって現状の健全度を評価することを想定している。このとき、時間依存性変状に対するしきい値をどのようにして合理的に設定するかがひとつの課題となる。

3. 屈折法弾性波探査

(1) 適用トンネルの概要

適用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1977年に完成した。旧トンネルの完成後2～4年の間に複数の個所において時間依存性変状が顕在化し、その後対策工が施工されたが、最も変状が顕著であったNo.4ブロックでは30年以上変状が継続することになる⁶⁾。新トンネルはNATMで施工され2014年に完成した。新トンネルでは

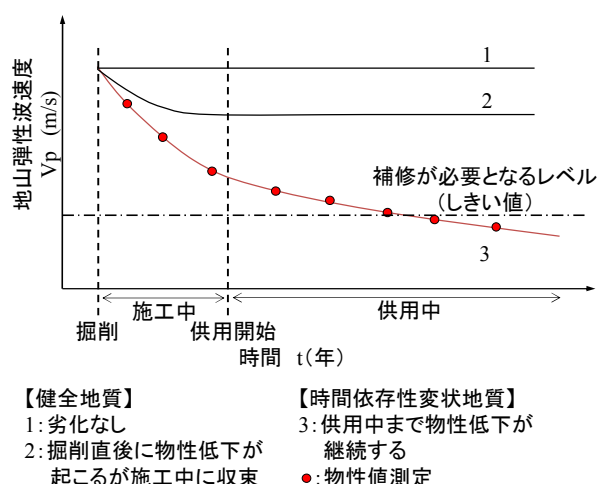
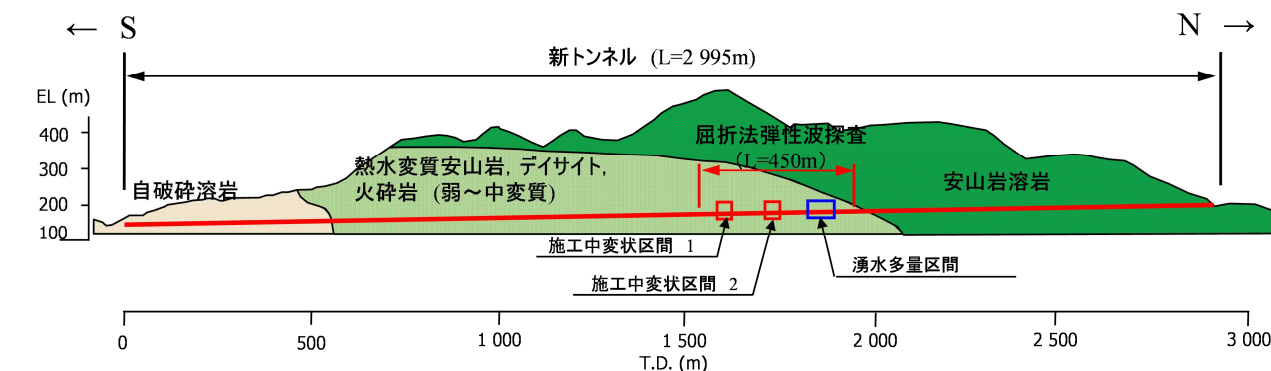
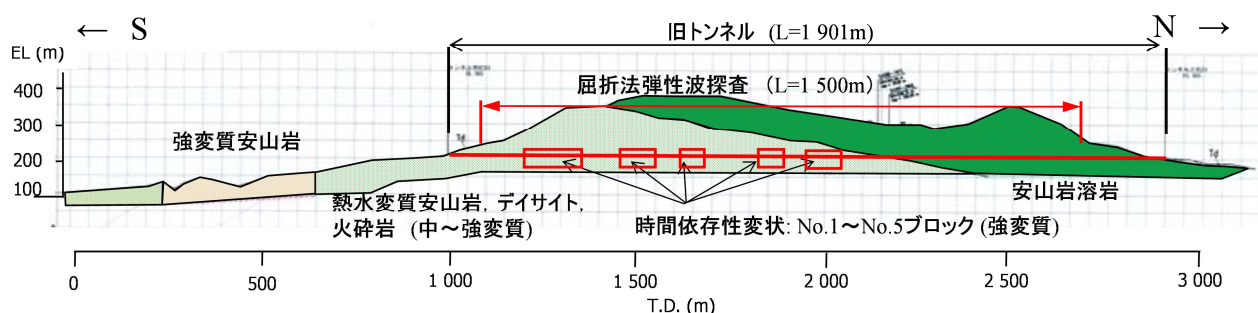


図-1 地山弾性波速度を指標とした診断技術の概念図



(a) 新トンネル地質縦断面図



(b) 旧トンネル地質縦断面図

図-2 新旧トンネルの地質縦断面図および屈折法弾性波探査測線

トンネル完成後の時間依存性変状は確認されていないが、2箇所で行ったインバートの隆起等の変状が認められた。2014年3月に新トンネルの供用が開始され、旧トンネルは廃道となった。屈折法弾性波探査は新トンネルでは路盤のコンクリート舗装が完成した直後の供用開始前の段階に、旧トンネルでは供用を終えたのちに実施した。

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し、一部にデイサイト質の部分、火砕岩である凝灰角礫岩を挟在する部分が認められる。また、変状の発生していない北側の区間には堅硬な安山岩溶岩が確認されている。屈折法弾性波探査測線は図-2に示すように、新トンネルでは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掘削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。旧トンネルでは、時間依存性変状の発生した5つの区間を含め両坑口部を除くほぼ全線を網羅するような形で延長1500mの測線を展開した。

(2) 屈折法弾性波探査方法

新旧トンネルにおける屈折法弾性波探査の発震点、受振点の配置と変状発生区間との平面的な位置関係を図-3に示す。受振器は3成分MEMS型(Micro Electro Mechanical Systems)受振器を使用し、探針機はSERCEL428XL DSUを使用した。探査測線は、両トンネルとも舗装された路盤に受振点を直線的に展開し、受振点測線と平行に発震点測線を設けた。舗装面上での受振器の設置には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³⁾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。本探査における弾性波の発震は、鉛直下向きに打撃するP波発震と、ピストンの打撃角度を左右に鉛直から35°傾けて打撃するS波発震を併用し、S/N比を向上させる目的で1箇所あたりそれぞれ3回ずつスタックした。探査測線は、新トンネルでは延長L=450 mで、受振点間隔は6 m、発震点間隔は3 mとした。旧トンネルでは延長L=1 500 mで、受振点間隔は6 m、発震点間隔はNo.4ブロック、No.5ブロックを含む測線中央の区間は3 m、その他の区間は6 mとした。なお、旧トンネルにおける受振点測線の1回あ

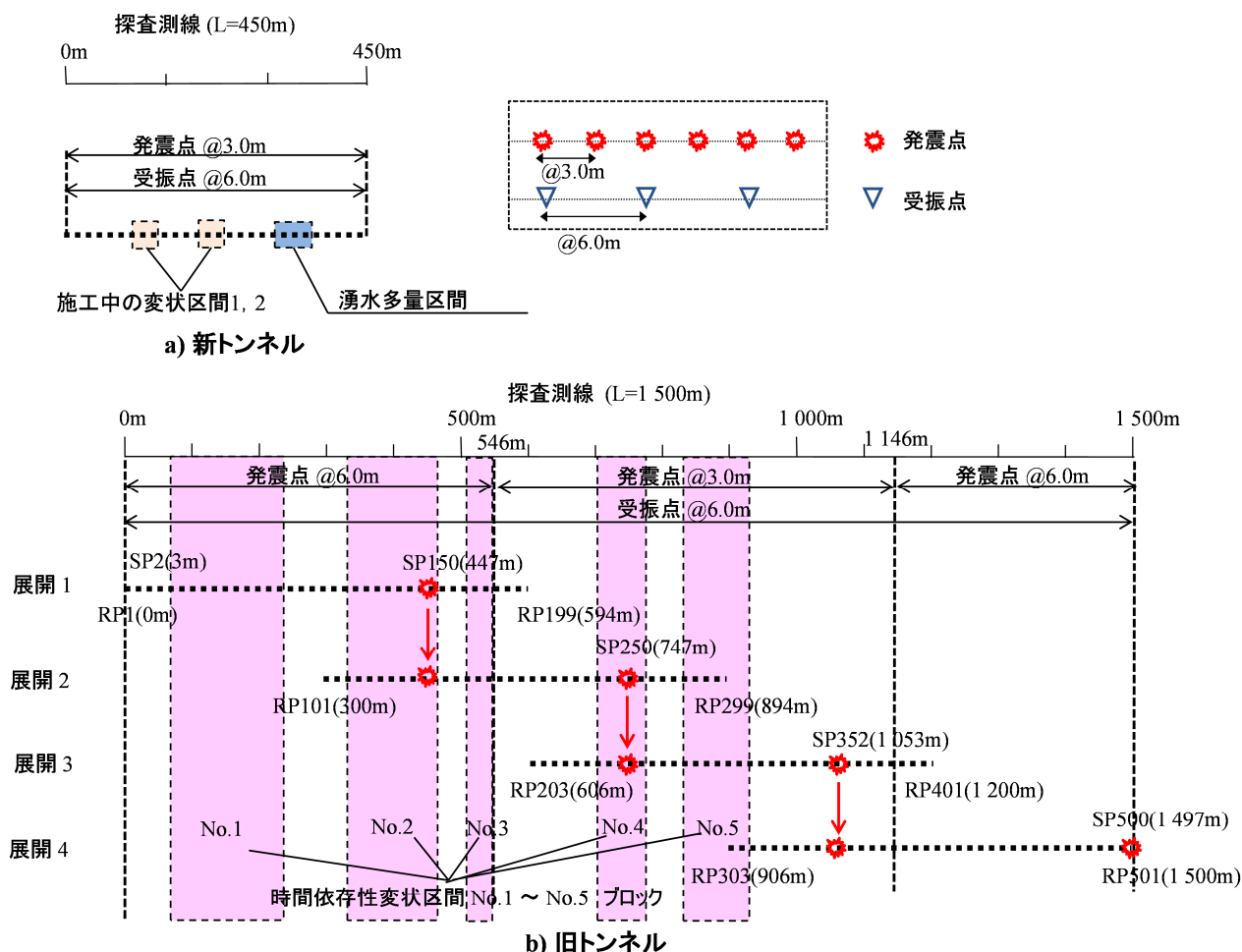


図-3 新旧トンネルの屈折法弾性波探査測点配置

たりの延長は約500 mとして4回の展開に区分した。受振点測線を展開後、起点から順次発震をおこなうが、受振点測線が発震点から残り150 mに達した時点で受振点測線を終点側に展開移動する手順を繰り返した。

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。解析メッシュは両トンネル3 m×3 mの格子形とした。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、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。

(3) 屈折法弾性波探査結果

新旧トンネルにおける屈折法弾性波探査で得られた地山弾性波速度のうち、P波速度の縦断分布を図-4に示す。図は探査測線直下のP波速度分布を示しており、深度0 mはトンネル舗装面に相当する。新トンネルの施工中に変状が起こった2つの区間、旧トンネルの時間依存性変状が起こった5つの区間を併記した。この結果より、P波速度は旧トンネルの時間依存性変状が発生したNo.1ブロックからNo.5ブロックの間で比較的低く、旧トンネル北側の健全区間と新トンネルで高い傾向が確認できる。とくに旧トンネルのNo.4ブロックは、時間依存性変状による路盤の隆起や側壁の押し出しが最も顕著であった区間に相当するが、路盤直下の表層部を中心に深部まで、周囲に

比較してP波速度が著しく低いゾーンが明瞭に確認できる。No.4ブロックでは、これまでに側壁からの水平ボーリングや路盤下の鉛直ボーリングなどがおこなわれており、コア観察結果からトンネル付近の地質が多くの個所で粘土化していることが分かっている⁷⁾。No.4ブロック周辺の地質が、トンネル掘削前から初生的に粘土化していてそのために時間依存性変状が発生したのか、トンネル掘削に伴う応力解放や地下水への暴露などにより二次的に粘土化して時間依存性変状が発生したのかについては、施工時の切羽状況などの記録が残されていないため不明であるが、地山弾性波速度は現状の地質状態をよく反映していると評価できる。

4. 地質健全性評価方法の検討

トンネル掘削時の応力解放等による緩みおよび時間依存性変状によってトンネル掘削面周辺地質の地山弾性波速度が低下したものと考え、深部の地山弾性波速度が高い個所はトンネル掘削の影響を受けていない本来の地山弾性波速度であるものと仮定すると、地山弾性波速度の低下率が求められる。言い換えると、時間依存性変状が発生した区間周辺の路盤付近などに認められたP波速度の低いゾーンは、もともと深部に見られる高いP波速度を有していたが、トンネル掘削の影響によりP波速度が低下したものと考え、その低下率を深部のP波速度との比によって求めようという考え方である。トモグラフィ

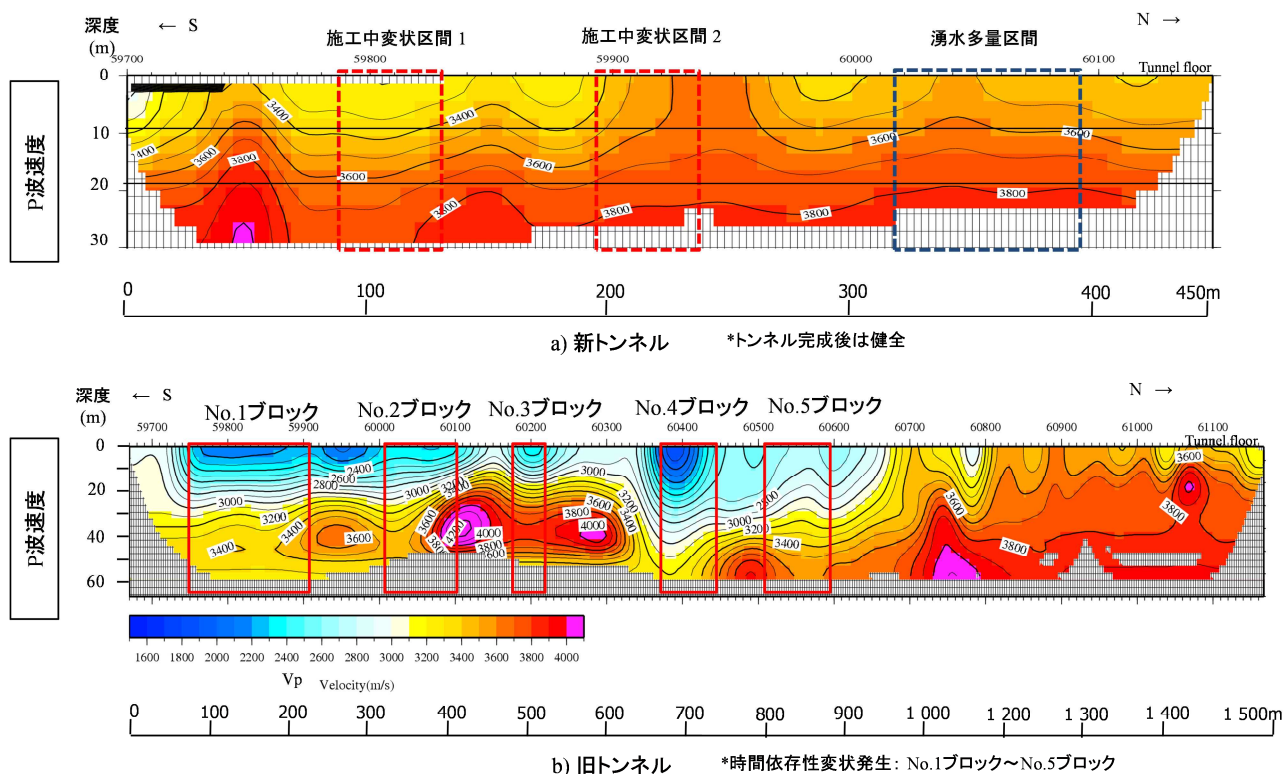


図-4 新旧トンネルの屈折法弾性波探査結果縦断図

解析で求められた各メッシュのP波速度 V_p' と、その断面で最も高いP波速度 V_p の差を求め、その差分を V_p で除した値をP波速度低下率 ΔV_p として、その縦断分布を図-5に示す。本トンネルの地質は変質の程度に応じて軟質部分と硬質部分があり、地山本来の弾性波速度にもばらつきがあると考えられる。ここでは同一断面の地山弾性波速度はもともと鉛直方向に一定だったと仮定して低下率を求めることにした。図より、時間依存性変状が発生した旧トンネルのNo.1ブロックからNo.5ブロックにかけて、P波速度低下率が比較的大きくその他の区間では小さいことが分かる。新トンネルではP波速度低下率が

20%を越える箇所は認められない。一方で、旧トンネルでP波速度低下率が20%を超える範囲は、No.1ブロックからNo.4ブロックよりやや南側にかけては路盤下20m程度まで、No.4ブロックからNo.5ブロックにかけては路盤下30m程度まで広く認められる。ただし、旧トンネルでは、それぞれの時間依存性変状が発生したブロックの間や、距離100m付近などにP波速度低下率の比較的大きい区間が認められる。これらの区間では時間依存性変状の報告はなくP波速度が低下している原因が不明確であるが、路盤下の地質の劣化が生じている可能性があるため、施工記録の再調査を含めて今後の調査課題としたい。

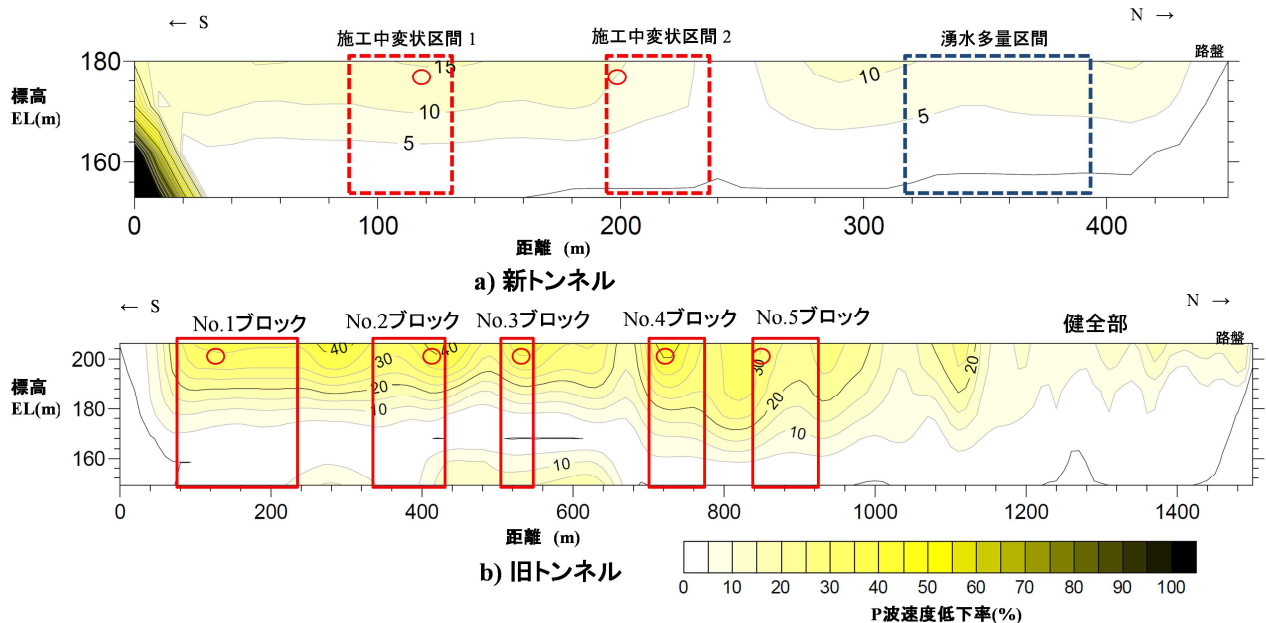


図-5 新旧トンネルのP波速度低下率の縦断分布

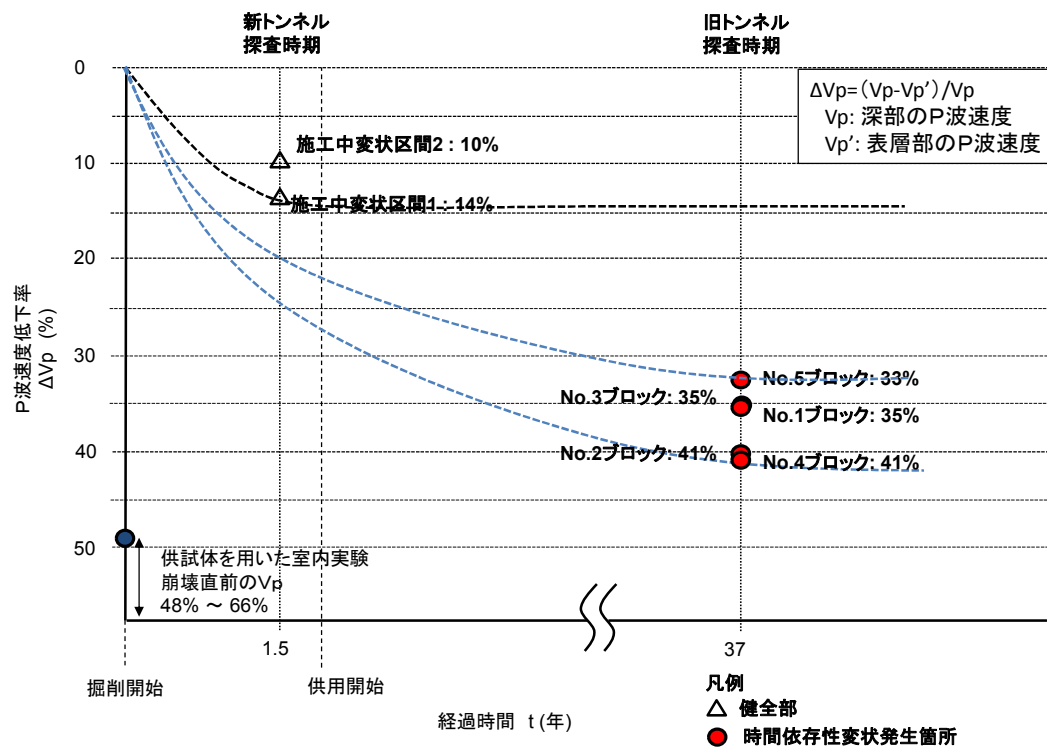


図-6 時間軸を考慮して整理した新旧トンネルのP波速度低下率

旧トンネルの時間依存性変状区間No.1ブロックからNo.5ブロック、新トンネルの施工中変状区間1, 2のうち、最もP波速度低下率が大きい個所（図-5の赤丸）の値を抜粋して図-6に示した。図の横軸はトンネル掘削からの経過時間を概念的に表している。また、前稿³⁾で報告した、新トンネルで採取されたボーリングコアを用いた室内暴露試験による供試体崩壊直前の弾性波速度を併記した。時間依存性変状が発生したNo.1ブロックからNo.5ブロックのP波速度低下率は33%~41%を示し、新トンネルの施工中変状区間の10%~14%に比べて大きい。図のようにP波速度低下率の経時変化を整理することによって、時間依存性変状に対する現状の地質の健全度を評価することができる可能性が示唆される。

5. おわりに

新旧トンネルで、屈折法弾性波探査による時間依存性変状に対する地質の健全性診断技術の適用実験を施行し、以下の知見を得た。

- ・トンネル周辺地山のP波速度は、時間依存性変状区間では低く、それ以外で高い傾向が確認された。とくに、変状の大きかった区間周辺では、他の区間に比べても弾性波速度が深部まで著しく低下していることが明らかとなった。
- ・ただし、これまでに時間依存性変状の報告がない区間でもP波速度低下率が大きい区間が確認されたことから、今後それらの区間の現状の地質状況について確認することが課題となった。
- ・P波速度低下率を指標として時間依存性変状に対する現状の地質の健全性を評価できる可能性が示唆された。以上より、山岳トンネルの時間依存性変状に対し、継続的に地山弾性波速度を測定することが有効であると考え

えられる。さらに、トンネルの供用前に地山弾性波速度の初期値を計測しておくことで、時間経過に伴う物性値変化をより詳しく追跡できると考えられる。

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。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) 土木学会：トンネルライブラリー第25号 山岳トンネルのインバート，pp.295-319，2013
- 2) 佐久間智，菅原徳夫，多田誠，遠藤祐司：供用中に発生した急激な盤ぶくれ変状を復旧する一山形自動車道盃山トンネル（上り線）一，トンネルと地下，第40巻12号，pp.27-37，2009
- 3) 丹羽廣海，村山秀幸，岡崎健治，大日向昭彦，伊東佳彦：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，トンネル工学報告集，Vol.24，2014.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Murayama, H., Niwa, H., Ito, Y.: Project study of tunnels with time-dependent behavior – Records of planning and construction, *ITA WTC 2015 Congress and 41th general assembly*, pp.440-441, 2015.
- 7) Niwa, H., Okazaki, K., Murayama, H., Ito, Y., Sasaya, T., Kura-hashi, T.: Case study of the soundness diagnostic method by monitoring the time-dependent behaviour around the tunnel ground, *Proceedings of 10th Asian regional conference of IAEG*, 2015. (Submitting)

(2015.8.7受付)

STUDY OF A GROUND SOUNDNESS DIAGNOSTIC METHOD AGAINST TIME-DEPENDENT DEFORMATION USING SEISMIC VELOCITY

Hiroumi NIWA, Hideyuki MURAYAMA, Kenji OKAZAKI Syusaku YAMAZAKI 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 soundness of ground is needed. A diagnostic method is required that is able to provide constant and reproducible monitoring from construction stage to maintenance stage. The seismic exploration is an effective method for evaluating the ground soundness in this way. We found it is possible to estimate the soundness of tunnel ground using seismic velocity by a series of field experiment of actual tunnel with time-dependent deformation. And the soundness of tunnel ground may be evaluated by a decrease in the ratio of surface seismic velocity to that of deep zone. It is confirmed that decrease in P-wave velocity in the zone with time-dependent deformation is higher than other zones.