

変状を伴う老朽化トンネルの地質評価・診断技術の開発

丹羽 廣海 村山 秀幸
笹谷 輝勝

概 要

近年の老朽化トンネルでは、長期的な路盤の隆起や覆工コンクリートのひびわれ等が供用中に顕在化する変状事例が全国的に多く報告されるようになり、維持管理コストの面から問題となっている。これらの時間依存性変状の多くは地質に起因するものと考えられるが、従来の考え方や評価指標では説明の付かない事例がいくつかある。筆者らは国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所と共同で、2013年度から2014年度の2カ年にわたり国土交通省建設技術研究開発助成制度の補助金交付を受け、「変状を伴う老朽化トンネルの地質評価・診断技術の開発」と題した研究開発を実施した。本研究結果より、弾性波速度が長期的な地質劣化の進行程度を監視するための有効な指標となる可能性があることが分かった。よって、弾性波速度低下率の経時変化をモニタリングすることが、時間依存性変状に対する地質健全度の診断のための一つの手法として適用可能と考えられる。

A method for diagnosing geological soundness for aging tunnels with time-dependent deformation

Abstract

Time-dependent deformations such as floor heaving and damage to the tunnel lining after the completion of construction have become a serious issue in Japan. Although geological features are cited as causes of the majority of these time-dependent deformations, there are several cases that can't be explained by any conventional geological evaluation methods or indexes. Fujita and CERI (Civil Engineering Research Institute for Cold Region) have conducted a joint study titled "Development of a diagnostic method of geological soundness for aging tunnel with time-dependent deformation" with a help of grants from MLIT (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism). The study results suggest that seismic velocity may be a useful property for estimating the degree of progression in geological degradation. And the soundness of tunnel ground may be evaluated by a decrease in the ratio of surface seismic velocity to that of the deep zone.

キーワード： 時間依存性変状、老朽化トンネル、
診断技術、地山弾性波速度低下率

§1. 研究の概要

1.1 背景

近年、山岳トンネルにおいて、地山の長期的な変状により路盤の隆起や覆工コンクリートのひびわれが供用中に顕在化する時間依存性変状の事例は全国的に多く報告されるようになり、維持管理コストの観点から問題になっている¹⁾。時間依存性変状とはトンネル施工中に顕在化する変状と区別して、トンネル完成後または供用中に地質劣化の進行、または周辺環境の変化などを要因とした地質性状の変化に起因して発生する変状を指す。山岳トンネルの維持管理における日常点検では、覆工コンクリートなどの構造物や坑内設備の変状を点検することに主眼が置かれており、地質を対象とした点検、診断は特別な場合を除きおこなわれていない²⁾。また、時間依存性変状の多くは地質に起因するものであるが、従来の地質評価指標や考え方では説明の付かない事例がいくつかある。そこで、筆者らは国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所と共同で、山岳トンネルの時間依存性変状に対する地質に起因する変状メカニズムを解明し、地質評価指標および診断技術を新たに確立することを目標とした研究に取り組んできた。この一連の活動のなかで、国土交通省建設技術研究開発助成制度に基づく補助金交付を受け、2013年度から2014年度の2ヵ年にわたり「変状を伴う老朽化トンネルの地質評価・診断技術の開発」と題した研究開発を実施した。研究開発の目的は、将来の時間依存性変状を予測するための新しい地質評価指標を構築することと、時間依存性変状に対する地質診断技術を開発することである。

1.2 弾性波速度を指標とした地質診断技術

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、強度の低下など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、継続的に測定可能な物性値を指標として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。このような物性値の経時変化に対して、許容可能なレベルを設定することができれば現状の地質の健全度を定量的に評価できると考えられる。本研究では、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時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。

1.3 対象トンネルの概要

研究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た旧トンネルと、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、新トンネルはNATMで施工された延長約3.0kmのトンネルである。トンネル地山を構成する地質は、図1に示すように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、デイサイトおよび凝灰角礫岩を主体とする火砕岩よりなる。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年以上緩慢な変状が継続している。一方で、新トンネルでは施工中、インバートコンクリート打設後に約10cmの路盤隆起が確認され縫い返しを余儀なくされた区間がある。

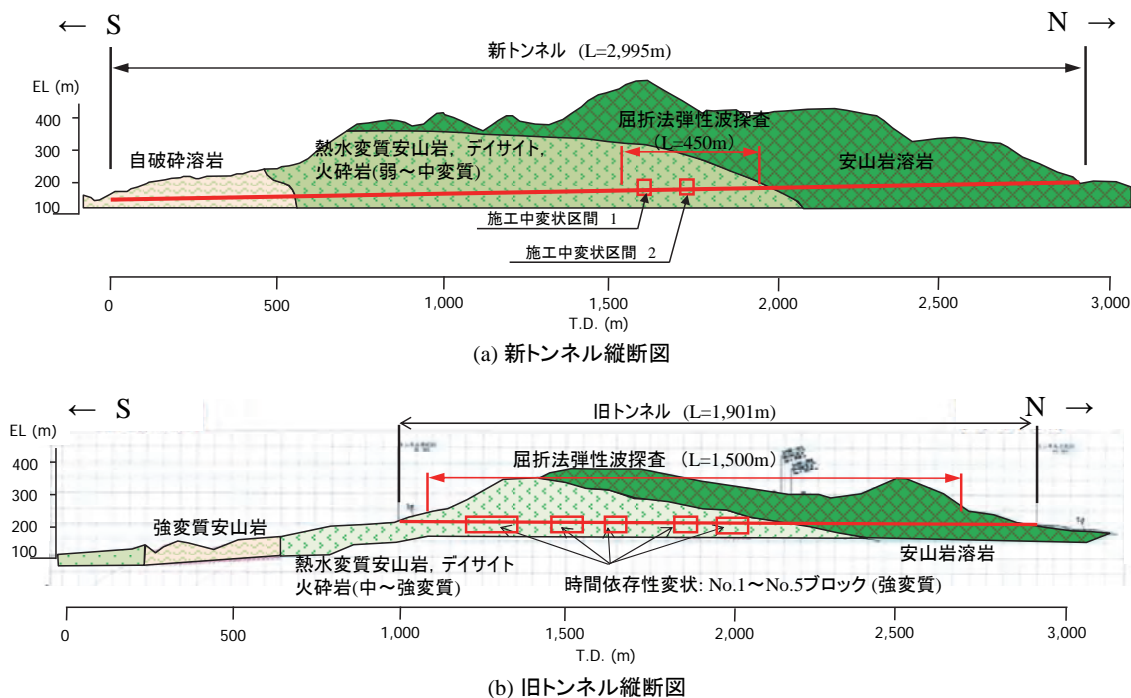


図1 新旧トンネルの地質縦断面図、変状発生区間および屈折法弾性波探査測線

§2. 時間依存性変状に対する地質評価指標の検討

2.1 岩石の経年劣化の評価法に関する検討

新トンネルで施工中に実施された先進ボーリングのコアを用いて地質の劣化を模擬した室内実験³⁾をおこなった。室内実験に適用したボーリングコアは、熱水変質作用を被った安山岩、凝灰角礫岩である。本実験は、表1に示す3ケースで暴露した試料に対して、1日に1回の頻度で弾性波速度(P波速度:VpおよびS波速度:Vs)を繰り返し測定する方法でおこなった。弾性波速度の測定は、JGS 1220に準じておこなった。また、試料の膨張を観察するために、弾性波速度測定の都度、ノギスで試料の長さおよび径をそれぞれ3箇所測定するとともに重さを測定し、試料の体積と湿潤密度を記録した。ノギスでの測定には、毎回同じ位置を測定できるようにあらかじめ試料に測定位置をマーキングしておいた。

2.2 弾性波速度の経時変化

図2にそれぞれの暴露ケースにおける経過日数と弾性波速度(P波速度:Vp、S波速度:Vs)の代表的な試験結果を示す。気中および水中に暴露した試料は、体積変化、P波速度の低下がともに顕著ではなくほとんど劣化が進んでいないものと考えられる。一方で乾湿繰り返しをおこなった試料では、P波速度およびS波速度が次第に低下してゆく傾向が確認されるとともに、体積は増加する傾向が認められ、劣化および膨張が確認できた。これらの試料は、膨張とともに目視でもヘアークラックの発生が観察され、やがて弾性波速度が測定できない状態となり最終的には崩

壊した。ここで、P波速度の低下率に着目すると、試料1ではP波速度低下前にVp=2,700(m/s)程度であったものが崩壊直前には900(m/s)程度まで低下しているため、66%程度の低下があったものと試算される。同様に、試料2では3,300(m/s)から1,600(m/s)まで低下しており、低下率は52%程度と試算される。同様の方法で、これまでに室内実験でのP波速度低下率は48%~66%の範囲で得られている。また、弾性波速度の低下が開始してから測定不能となるまでの測定点数が少くないものの、弾性波速度はひとたび低下が始まると急激に進み、測定不能となる直前にはその変化はP波、S波ともに緩やかになる傾向が認められる。以上より、この試料の場合、大気や水に長期間晒されても劣化はそれほど進行せずに弾性波速度の変化も見られないが、乾湿繰り返しを受けると弾性波速度の低下をともないながら劣化が進行しやがて崩壊にいたる傾向が把握できた。よって、岩石の弾性波速度の経時変化は、地質劣化の進行程度を監視するための有効な指標となることが分かった。

表1 実験ケース

暴露ケース	実験条件
①気中	20℃恒温室にて大気中に暴露
②水中	20℃恒温水槽にて水中に暴露
③乾湿繰り返し	20℃恒温水槽⇄110℃炉乾燥にて暴露 (1日おきに水浸と炉乾燥を繰り返し)

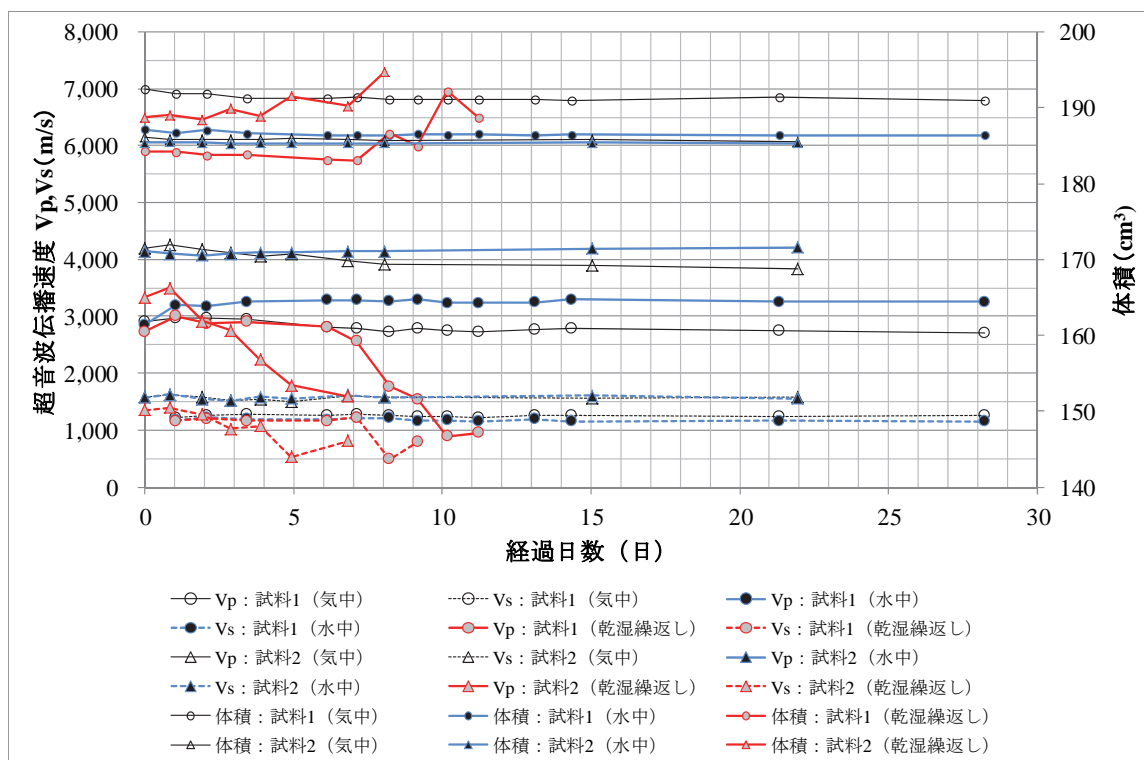


図2 室内暴露実験にともなう弾性波速度の経時変化

§ 3. 時間依存性変状に対する診断技術の検討

3.1 新旧トンネルにおける弾性波探査

時間依存性変状に対する診断技術は、弾性波探査によって地山弾性波速度の経時変化を追跡する方法を想定しており、新旧トンネルにて弾性波屈折法探査を施行した。新トンネルにおける弾性波屈折法探査は、供用中に継続して同一条件にて測定することを考慮して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。また、新トンネルでは、供用中における現場での診断技術の適用性を評価するため、舗装を傷つけることなく弾性波発震が可能であることの確認、片側交互通行下で交通振動ノイズのある条件での探査品質の確認および探査結果の再現性の確認をおこなった⁴⁾。新トンネルにおける探査状況を写真 1 に示す。受振器は 3 成分 MEMS 型 (Micro Electro Mechanical Systems) 受振器を使用し、探査機は 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、図 3 に示すように新トンネルでは延長 L=450m、受振点間隔 6m、発震点間隔 3m とし、旧トンネルでは延長 L=1,500m、受振点間隔 6m、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 3m、その他の区間は 6m とした。なお、旧トンネルにおける受振点測線の 1 回あたりの延長は約 500m 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 150m 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。



写真 1 新トンネルにおける弾性波速度測定状況

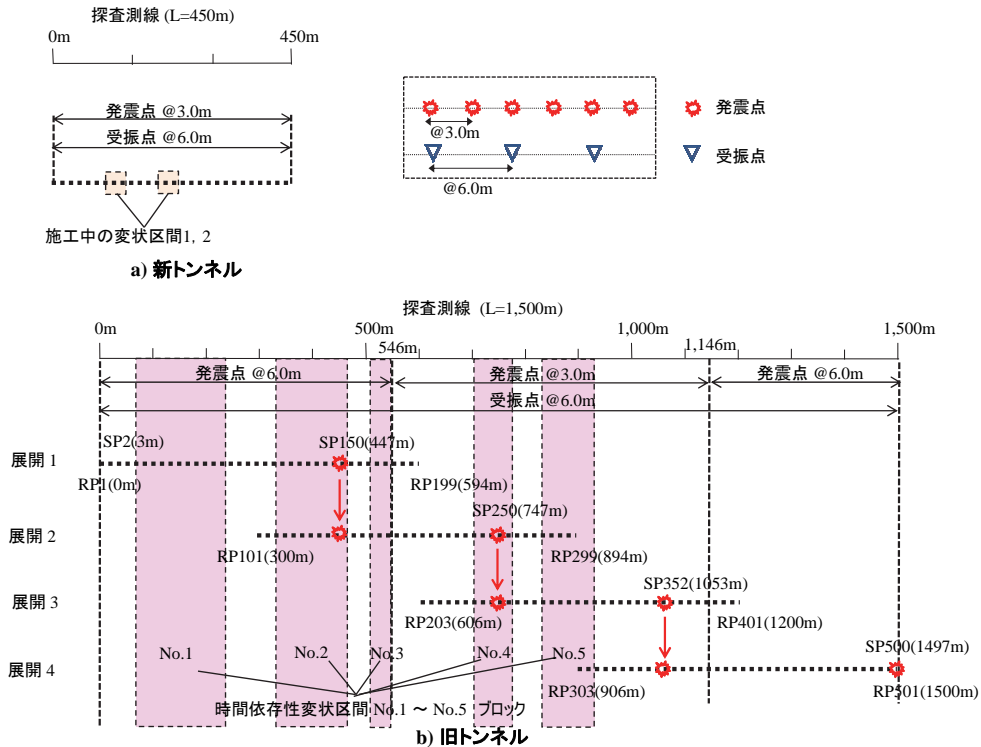


図 3 新旧トンネルの弾性波屈折法探査測点配置

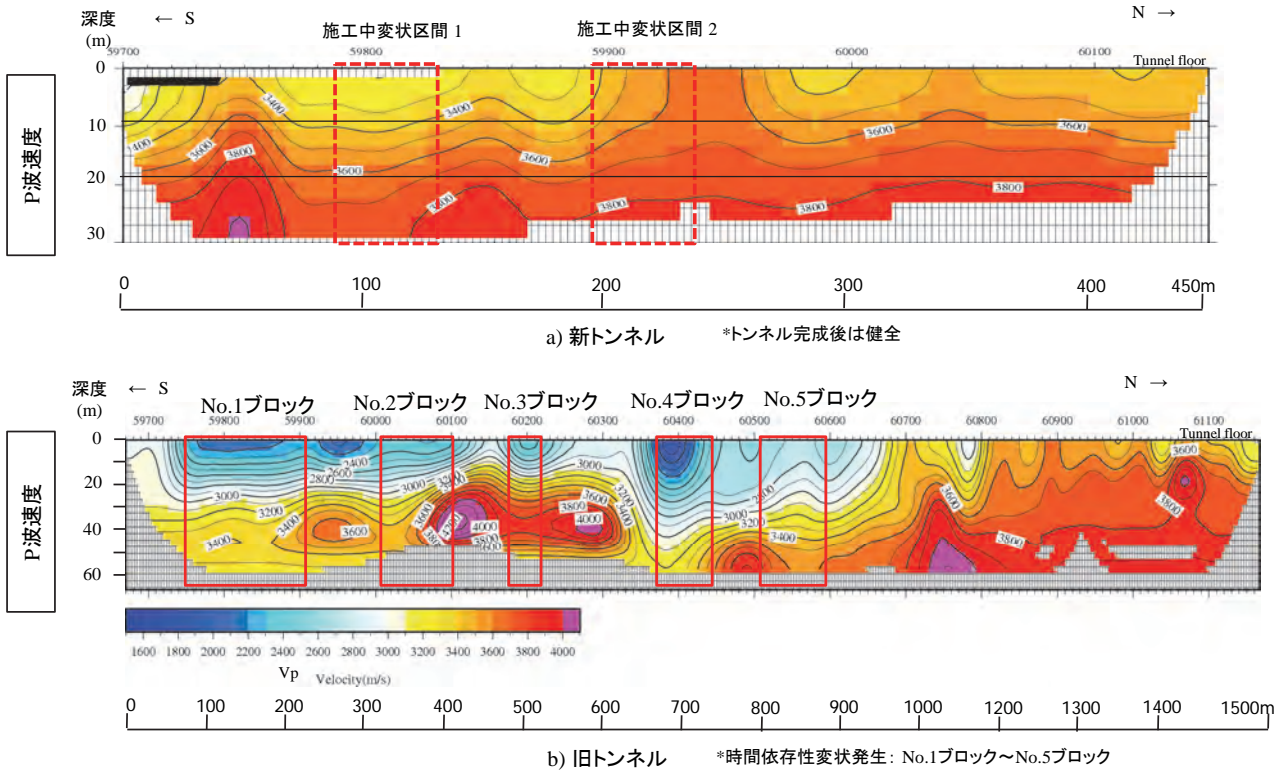


図4 新旧トンネルのP波速度分布縦断面図

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。

3.2 新旧トンネルのP波速度構造

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0mはトンネル路盤に相当する。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の発生した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。特に旧トンネルの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され、実際の変状発生状況と整合する結果が得られた。新トンネルでは、施工中の変状区間1と2でインバート打設後に盤ぶくれが確認されたことからある程度は緩みが生じていると考えられるが、旧トンネルで時間依存性変状が発生した区間と比べると物性値の低下は小さいと評価できる。

§4. 診断技術の検討

時間依存性変状あるいは、応力解放にともなう緩みによるP波速度の低下は、トンネル周囲から、すなわち深度0mから深部に向かって次第に進行すると考えると、深部ほど掘削の影響を受けていない地山本来のP波速度に近い値を示すと考えることができる。つまり、表層のP波速度の低い領域は、もともとは深部の高いP波速度を有していたはずだが、トンネル掘削にともなって現在の値まで低下したと考えられる。このように仮定すると、表層部のP波速度が深部のP波速度との比率で何%低下しているかを求めることによって、現状のトンネル周囲の地質の健全度を評価することができる。P波速度低下率 ΔV_p を深部のP波速度に対する表層部のP波速度との差の比として、新トンネルの施工中変状区間1、2と旧トンネルのNo.1ブロック~No.5ブロックおよび健全部について求め図5に示した。ここで、グラフの横軸はトンネル掘削開始からの経過時間を概念的に示している。また、グラフには室内実験で得られた新トンネルのボーリングコアを使用した暴露試験で、試料が崩壊に至る直前のP波速度の低下率を併記した。図示したとおり、健全部ではP波速度低下率が8%~16%と小さいのに対し、時間依存性変状発生箇所では1ブロック~4ブロックで36%~44%、5ブロックは他のブロックに比べて小さいが25%と試算される。なお、P波速度低下率が最も大き

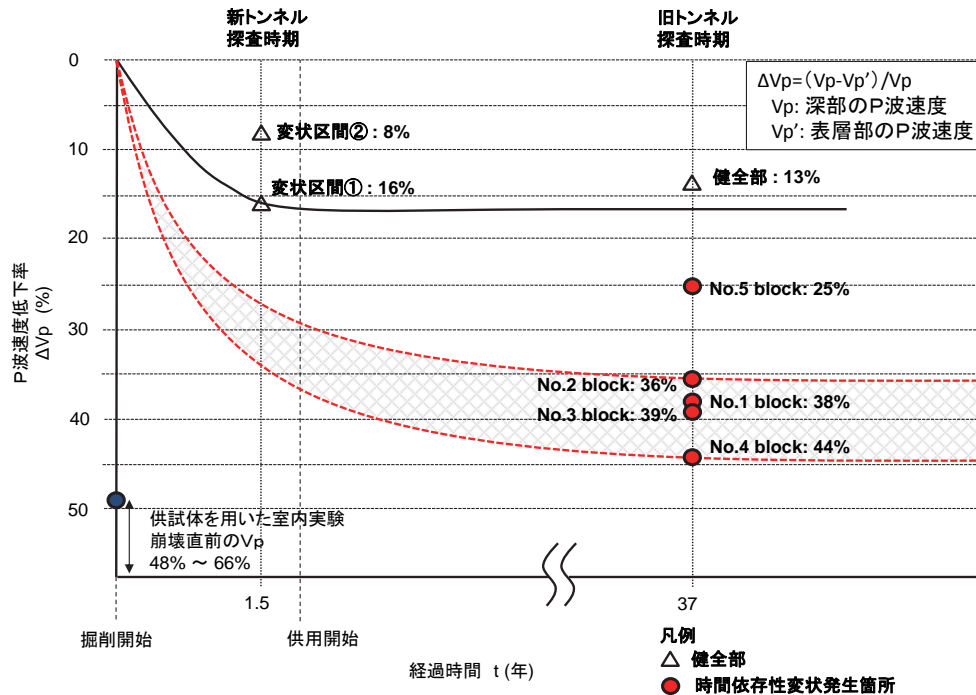


図 5 時間軸を考慮して整理した新旧トンネルの P 波速度低下率

旧トンネルの 4 ブロックでもその値は 44%程度であり、測定方法が異なるため単純に比較できるものではないものの、室内試験で崩壊した試料の P 波速度低下率と比べるとやや小さい値となることが確認された。図のように弾性波速度低下率の経時変化を追跡することは、時間依存性変状に対するひとつの地質健全度診断手法になり得ると考えられる。

§5. まとめ

将来の時間依存性変状を予測するための新しい地質評価指標と、時間依存性変状に対する診断技術に関する研究を実施し、以下の知見を得た。

- ・弾性波速度の経時変化は地質劣化の進行程度を監視するための有効な指標となる可能性がある。
- ・弾性波速度低下率の経時変化を追跡することは、時間依存性変状に対するひとつの地質健全度診断手法になり得る。

今後は本トンネルの時間依存性変状メカニズムの解明に向けて、地下水状況や鉱物組成等についても分析し検討を重ねてゆく。

謝辞: 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。研究にあたり多大なるご尽力をいただいた寒地土木研究所伊東佳彦地質研究監、倉橋稔幸上席研究員、岡崎健治主任研究員に深い謝意を表

します。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。

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) 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.
- 3) 丹羽廣海、村山秀幸、岡崎健治、大日向昭彦、伊東佳彦:地山弾性波速度を指標としたトンネル地質の健全性評価の試行、第 43 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp.25-30、2015.
- 4) 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.

ひとこと



土木構造物の老朽化にともない、時間依存性変状の事例は増えていく可能性が高い。合理的な地質健全性診断技術の確立に向けて今後も検討を重ねてゆきたい。