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

丹羽 廣海1*·村山 秀幸¹·岡崎 健治2·大日向 昭彦³·伊東 佳彦²

¹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)
²独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)
³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: hiroumi.niwa@fujita.co.jp

近年、地山の長期的な変状により盤ぶくれや変位が供用中に顕在化する事例が発生している.筆者らは、施工中から供用中にわたって継続的に地質状態を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.本研究では、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をおこない、劣化の進行とともに超音波伝播速度が低下する傾向を確認した.また、新トンネルで弾性波屈折法探査を実施して、トンネル完成直後の地山弾性波速度を実測した.

Key Words: seismic refraction survey, time-dependent behavior, seismic velocity 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、盤ぶくれや変位が供用中に顕在化する事例が発生しているり、供用中のトンネルでは、覆エ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、覆エ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²⁾³⁾. 地山の健全性を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 と考えると、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、研究をおこなっている。

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 1.9 km のトンネル、新トンネルは NATM で施工された延長約 3.0 km 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 30 cm 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 10 cm 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。

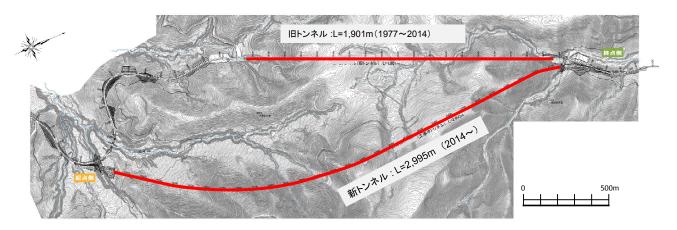


図-1 新旧トンネルの位置関係

2. 山岳トンネルの時間依存性変状事例と岩石の物性変化に関する既往研究

山岳トンネルにおける時間依存性変状に関しては、道 路トンネルや鉄道トンネルでいくつかの報告例4~5)があ り、それらの変状原因は、地山の塑性化による地圧の発 生, 膨潤性粘土鉱物の吸水膨張による地山の強度低下, あるいは両者が複合的に作用したと分析されるものがほ とんどである. これらの事例分析より, 時間依存性変状 を起こしたトンネルのほとんどは、背面地山の強度等の 物性値が低下していると考えられる. 一例を挙げると、 佐久間ら¹⁾は山形自動車道盃山トンネルの時間依存性変 状発生後の地質調査結果から、変状箇所の地質はI 期線 トンネルよりも変形係数や一軸圧縮強さおよび地山強度 比が著しく小さく、著しい膨張性を有すると評価された ことを報告している. また, 平井ら⁹は, 一般県道宮古 港線小山田トンネルで時間依存性変状が発生した箇所の 地質調査結果より、変状箇所の路盤下3 mまでの地山が 土砂状となり地山強度比が2~3程度と小さかったことを 報告している. しかし、これらの時間依存性変状に関す る事例報告の多くは、地質調査の結果等に基づいて変状 現象の原因について詳しく論じているものの、こうした 変状現象がなぜ供用前に発生せずに、時間経過後の供用 中になって顕在化したのか, すなわち, 変状現象が時間 依存性を持つことに対する原因を明確に特定していると は言いがたい.

岩石の物性変化に関する研究として、岩石の風化速度について議論した研究例が挙げられる。松倉⁷は、岩石の風化速度に関する既往研究成果を取りまとめ、岩盤の風化では、風化の初期に強度低下が起こっていること、化学種の変化は風化の初期には小さいが風化の進行にともない徐々に加速すること、が複数の研究成果から明らかになってきたことを示した。また、岩盤の表面は最も風化にさらされている時間が長く、深部ほどその時間が

短いことから、岩盤表面の物性は最も風化の進行した物性を示し、深部が風化初期の物性を示すと読み替えることができることを指摘したうえで、強度低下を考えるにあたっては、岩盤表面の強度低下の進行とともに、風化部と新鮮部の境界(風化前線:weathering front)が深さ方向に進行するモデルを考える必要性を示唆した.一方、野城ら8は、時間依存性変状を発生したトンネルを対象として、地山の強度低下を考慮した有限差分法(解析コード:FLAC)による解析をおこない、実際の内空変位計測結果と対比することによって、時間とともに変位速度が増加してゆくタイプの変状に対しては直線的または指数関数的な強度低下曲線が、変位速度が一定であるタイプの変状に対しては対数関数的な強度低下曲線が、実際の変状を良く再現できることを示した.

以上のように、岩石の強度は、松倉の研究成果から、岩石が風化する場合には初期に大きく低下し時間とともにその変化は小さくなる対数関数的な傾向をたどることが一般的であるが、野城らの研究成果からは、山岳トンネルを対象とした場合には直線的に強度が低下する場合があることが示されている.これより、時間依存性変状トンネル周辺地山の物性値の経年変化は、地山の塑性化、膨潤性粘土鉱物の吸水膨張、または風化などといった変状メカニズムの相違によって、傾向が異なる可能性が示唆される.よって、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山の健全性を診断するためには、地質や変状メカニズムに応じた地山弾性波速度の経年変化傾向を把握しておく必要があると考えられる.

3. 地質の劣化を模擬した室内実験による超音波伝 播速度の経年変化傾向

(1) 岩石試料の長期劣化

新トンネルで施工中に実施された先進ボーリングのコ

掘削直後 掘削から668日経過後 11 12 3 4 5 6 7 8 9

図-2 時間の経過とともに劣化したボーリングコア

アを用いて地質の劣化を模擬した室内実験⁹をおこなっ た. 室内実験に適用したボーリングコアは、中新統の安 山岩質溶岩で、熱水変質作用による珪化や粘土化を被っ ている. これらの岩石のなかには、ボーリングによって 採取した直後は棒状, 健全であったボーリングコアが, 時間の経過とともに試料箱の中で膨張し、図-2に示すよ うにやがて砕片状あるいは粘土状に劣化するものが所々 に認められる. このような劣化は、ボーリングコアの目 視観察では岩種や岩相が同一に見えても発生する箇所と 発生しない箇所が混在している. また, 同一の試料箱で 同一の環境条件に置かれていたものでも、劣化を生じる 部分と生じない部分が確認された. これらのボーリング コアは、木製の試料箱にブルーシートを2重にかけた状 態で野外に約1.5 年間保管されていた. 本実験に供した 試料は、図-2に示したボーリングコアのうち、比較的新 鮮で棒状の形状を留めている部分をサンプリングして使 用した.

(2) 実験方法

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回の頻度で超音波伝播速度(P波伝播速度: VpおよびS波伝播速度: Vs)を繰り返し測定する方法でおこなった。超音波伝播速度の測定は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、超音波伝播速度測定の都度、ノギスで試料の長さおよび径をそれぞれ3箇所で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。

(3) 超音波伝播速度の経時変化

図-3にそれぞれの暴露ケースにおける経過日数と超音

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)

波伝播速度のうちP波伝播速度(Vp)の関係を示す. 気 中および水中に暴露した試料は、体積変化、P波伝播速 度の低下がともに顕著ではない. ただし、実験初期と最 終段階を比べると、非常に小さい変化だがP波伝播速度 の減少傾向が認められるため、現在、より長期的な傾向 を把握するための長期暴露実験を実施中である. 水中に 暴露した試料では測定当初にP波伝播速度の増加が認め られるが、最初の水浸時に試料の含水状態が大きく変化 したことにともなう変化と考えられる. 一方で乾湿繰り 返しをおこなった試料では、P波伝播速度およびS波伝 播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、乾湿繰り返しにともな う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、超 音波伝播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波伝播速度の低下率に着目すると、試 料1ではP波伝播速度低下前にVp=3 000 (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, 70%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3 500 (m/s)から1 600 (m/s)まで低下しており、低下 率は54%程度と試算される. さらに、P波伝播速度は体 積の膨張に先行して低下が始まる傾向が確認された. ま た, 現時点でのデータでは, 超音波伝播速度の低下が開 始してから測定不能となるまでの測定点数が少ないが、 超音波伝播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

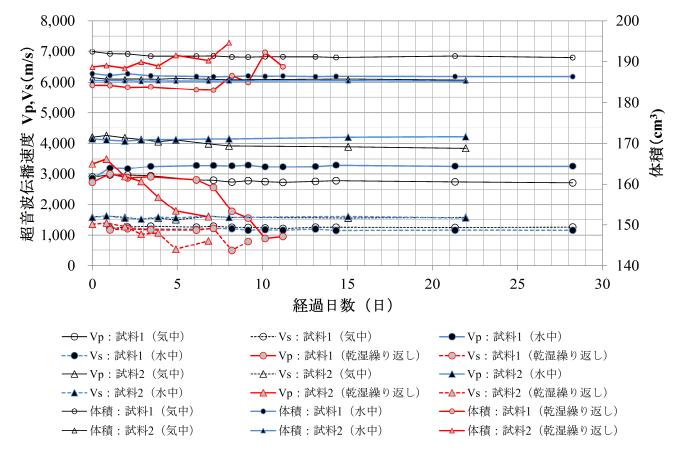


図-3 超音波伝播速度の経時変化

やかになる傾向が認められる. 今後, 超音波伝播速度の 低下傾向をより詳しく把握するために, 試料の劣化速度 をより緩やかにするための暴露方法などを検討する必要 がある.

以上の結果より、地山弾性波速度の経年変化をトンネル点検時などに継続的にモニタリングすることによって、地山劣化の進行を示す有効な指標が得られると考えられる.

4. 完成トンネルにおける地山弾性波速度

(1) 弾性波探查方法

覆エコンクリートおよび路盤のコンクリート舗装が完成した直後の新トンネルで、弾性波屈折法探査を実施し地山弾性波速度を実測した¹⁰⁾. 新トンネルでは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、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. 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. 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タを使用した.油圧インパクタは 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、SN 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. 探査測線は延長 L=450 mで, 受振 点間隔は 6 m (76 点), 発震点間隔は 3 m (151 点) と 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.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、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

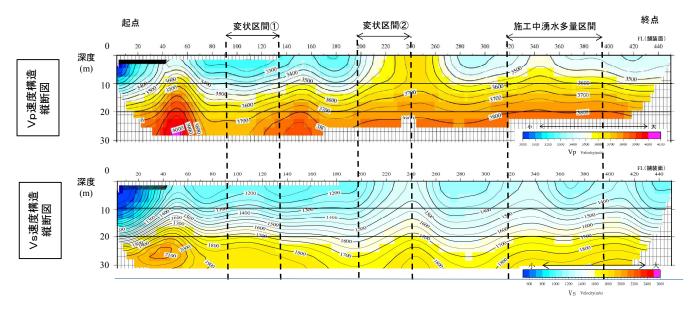


図-4 新トンネル施工中に変状を起こした区間周辺の地山弾性波速度構造縦断図

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 0 m, 60 m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。

(2) 弹性波屈折法探查結果

弾性波屈折法探査によって得られた地山弾性波速 度 (Vp, Vs) の縦断分布を図-4 に示す. 図より, P波伝播速度, S波伝播速度ともに舗装面から 10 m 程度以内の表層部では, 起点から 50 m, 240 m, 340 m 付近で弾性波速度が高く、それ以外の範囲で 低い傾向が確認され、縦断方向の地山弾性波速度の 変化が大きい. 一方で深度 10 m 以深では, P 波伝 播速度, S 波伝播速度ともに縦断方向の変化が小さ く深度方向におおむね一様に弾性波速度が高くなる 傾向を示す. なお, 起点から 0~60 m間の範囲では, 表層で地山弾性波速度値が Vp. Vs ともに非常に低 く、深部で高い結果が得られている.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が少ない ために、初期モデルで与えた条件(深度0m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)の影響が比較 的強く残ったためと考えられる.

施工中に変状が発生した区間の地山弾性波速度に着目すると、P波伝播速度(Vp)、S波伝播速度(Vs)ともに変状区間①およびその周辺の表層部では相対的に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,変状発生のメカニズムなどに違いがある可能性が考えられる.

トンネル掘削時の応力解放等による緩みによって 表層部付近の地山弾性波速度が低下したものと考え, 深度30m付近の地山弾性波速度が掘削の影響を受け ていない本来の地山弾性波速度と仮定すると、トン ネル掘削による緩み等の影響範囲は、地山弾性波速 度が縦断方向に変化している深度10m程度までの範 囲であると考えられる. また, この場合, 表層部の 地山弾性波速度はP波伝播速度でもっとも低いとこ ろで3 200 (m/s)で, 深度30 m付近で3 800 (m/s)であ ることから低下率としては最大でも16%程度と考え られる. この物性値の低下はトンネル掘削時の緩み による低下と考えられる. 前述のとおり, 先進ボー リングコアを使用した室内実験結果では, 崩壊に至 る直前の超音波伝播速度(P波)の低下率が50%~ 70%であった. 現場での弾性波探査と室内実験の超 音波伝播速度測定では測定方法が異なるため単純に 比較できるものではないが、新トンネルの施工中変 状筒所における地山物性値の低下は現在のところ相 応に低いと言え、健全な状態で供用している事実と 整合する. 今後, 時間経過とともに地山弾性波速度 の低下率を追跡してゆくことにより、時間依存性変 状に対する地質の健全性を評価できる可能性がある 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評価指標を得る目的で,室内実験として数ケースの暴露条件下における超音波伝播速度の経時変化測定を実施するとともに,現場実験としてトンネル完成直後の地山弾性波速度測定をおこない,以下の

知見を得た.

- ① 現状ではデータ数が少ないものの,室内実験で超音波伝播速度の低下は初期に急激に進み崩壊の直前に緩やかになる傾向が認められた.
- ② 地山弾性波速度の経年変化をモニタリングする ことにより地山劣化の進行を示す有効な指標が 得られると考えられる.
- ③ 新トンネルの施工中に変状が発生した区間周辺において、表層部の地山弾性波速度が低下したものと仮定すると、トンネル掘削による緩み等の影響範囲は最大で深度10m程度までと考えられる.
- ④ 新トンネルの掘削時の緩みにともなうP波伝播速度の低下率としては最大16%程度で、室内実験で得られた試料崩壊直前の超音波伝播速度の低下率と比較すると相応に低い.

現在、本研究では、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さらに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.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) 例えば、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ー 山形自動車道盃山トンネル(上り線)ー、トンネル と地下、第40巻12号、pp.27-37、2009.
- 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) 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.
- 4) 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
- 5) 小島芳之,太田岳洋:地圧の作用による山岳トンネルの変状対策のあり方,応用地質,第54巻,第6号,pp.251-263,2014
- 6) 平井公康, 鈴木照行, 秋月亨, 八重樫栄: 供用中の NATMトンネルの盤ぶくれ 一般県道宮古港線 小山田 トンネル, トンネルと地下, 第 26 巻 12 号, pp.19-25, 1995
- 7) 松倉公憲:斜面を構成する岩石・岩盤の風化速度, 応用地質,第38巻,第4号,pp.224-231,1997.
- 8) 野城一栄,嶋本敬介,小島芳之,高橋幹夫,松長剛,朝倉俊弘:地山劣化モデルによるトンネル変状の再現解析とその長期予測への適用,土木学会論文集 C, Vol.65, No.1, pp.107-119, 2009.
- 9) 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.
- 10) 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. (投稿中)

AN EXPERIMENTAL STUDY FOR EVALUATION OF TUNNEL GROUND HEALTH USING TIME-DEPENDENT CHANGES OF SEISMIC VELOCITY

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

Recently, the continuous ground displacements have resulted in damage to the lining, or floor heaving in several tunnels. Since there is no diagnostic method for these time-dependent ground deformations, a technical method that enables to evaluate continuously the ground condition is needed. This study aims to develop a diagnostic method for the time-dependent behavior of tunnel ground using seismic velocity. The laboratory experiments simulating the time-dependent behavior of core samples were carried out. Along with rock weakening, the tendency of reducing seismic velocity was confirmed. And the seismic refraction survey was carried out in the tunnel immediately after tunnel completion.