

時間依存性変状トンネルの地山物性値と坑内環境

丹羽 廣海 村山 秀幸

新井 智之

概 要

筆者らは、トンネルの時間依存性変状に対する地質診断技術について、室内実験及び現場実験により検討を行ってきた。既報では、実際に時間依存性変状が発生したトンネルで坑内弾性波探査を実施した結果から、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を示した。本報では、室内試験および坑内弾性波探査で得られた弾性波速度から、弾性係数等の物性値を求め地山の物性値変化について評価した。また、トンネルの坑内環境を計測した結果から、地質の化学変化による長期的な劣化がトンネルの時間依存性変状に寄与している可能性が示唆される。

Mechanical properties and environmental conditions in aging tunnels with time-dependent deformation

Abstract

We have been carrying out a study of a diagnostic method for time-dependent deformations such as floor heaving and damage to the tunnel lining after the completion of construction, using laboratory tests and in situ surveys. The previous report shows that seismic velocity may serve as an effective index to monitor the long-term deterioration of tunnel ground, based on seismic data obtained in an actual tunnel in which time-dependent deformation occurred. This report evaluates the changing tendencies of ground mechanical properties, such as bulk modulus, estimated by the seismic velocity obtained in laboratory tests and in situ surveys. It also reviews the mechanism of time-dependent deformation through the environmental conditions measured in an actual tunnel. These results suggest that changes in the chemical composition of rock may contribute to time-dependent deformation of tunnels.

キーワード： 時間依存性変状、老朽化トンネル、
弾性係数、坑内環境

§1. はじめに

近年、山岳トンネルにおいて、地質の長期的な劣化により路盤の隆起や覆工コンクリートのひびわれなどの変状被害が供用中に顕在化する事例が多く報告されている¹⁾²⁾。筆者らは、施工中に顕在化する変状と区別して、こうしたトンネル供用中に地質劣化、周辺環境の変化などによる地質性状の変化に起因して発生する変状を時間依存性変状と称し、国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所と共同で現場実験等を実施してきた。実験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。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熱水変質を受けた新第三系の安山岩～デイサイト質の溶岩および凝灰角礫岩を主体とする火砕岩りなる。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、最も変状の大きい 4 ブロックでは約 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た。新トンネルでは、施工中の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た。既報³⁾では、新旧トンネルの坑内弾性波探査結果から、地山弾性波速度が低い範囲は時間依存性変状が発生した区間に概ね対応すること、地山弾性波速度の経時変化が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を報告した。本報では、室内試験および坑内弾性波探査で得られた弾性波速度から、弾性係数等の物性値を求め地山の物性値変化を評価する。また、旧トンネルの坑内環境計測結果から時間依存性変状メカニズムに関して考察する。

§2. 室内実験による岩石の劣化と物性値の変化

2.1 乾湿繰り返し実験の概要と弾性波速度の変化

既報³⁾では、岩石の劣化を促進するため、室内で供試体を乾湿繰り返し条件におき劣化させ、その過程で弾性波速度の変化を継続的に測定した。乾湿繰り返しは110℃の炉乾燥と20℃の恒温水槽にて水浸を繰り返すことによりおこなった。弾性波速度の測定は炉乾燥後および水浸後におこない、JGS 2110パルス透過法による岩石の超音波速度測定方法に準じおこなった。使用した試料は熱水変質を受けた安山岩と来待砂岩で、変質安山岩は新トンネルでインバート打設後に盤ぶくれを生じた箇所先の先進ボーリングコアである。試料は直径約50mm、長さ約100mmの円柱形に整形した。変質安山岩の試料No.1、No.2は約1日おきに乾湿を繰り返し、数サイクルでヘアークラックが生じ、最終的に試料は崩壊した。来待砂岩は数日おきに乾湿繰り返しをしたが劣化は認められなかった。弾性波速度測定時にノギスで試料の長さおよび径をあらかじめマーキングした位置で測定するとともに、電子天秤で質量を測定し見かけの密度を求めた。

八木・石井⁴⁾は、粘性土の乾燥過程におけるP波速度(V_p)、S波速度(V_s)を測定し、試料の含水比と弾性波速度について相関を報告している。すなわち、疎密波であるP波の速度(V_p)は材料の圧縮性に応じて変化するが、含水比が低くなると土粒子骨格の圧縮性は小さくなる一方で間隙水の圧縮性は大きくなり、両者を合成した圧縮性が最大となる中間の含水比でP波速度は最小の値となり、せん断波であるS波の速度(V_s)はせん断抵抗力を持たない間隙水の影響は受けずに、含水比が低下し土粒子骨格が強くなるにしたがって大きくなることを示した。八木・石井の実験は土質供試体によるものだが、新井ら⁵⁾は凝灰岩の大

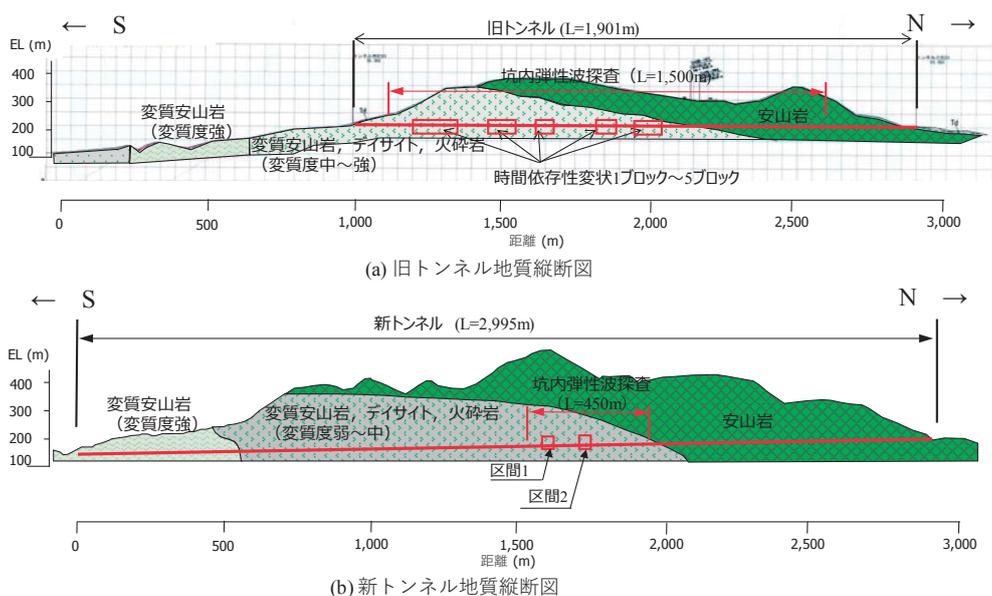


図1 新旧トンネルの地質縦断面図、変状発生区間および坑内弾性波探査測線

谷石を用いて含水比を変化させながら弾性波速度を測定し、土質供試体と同様にP波速度はある中間の含水比の時に最低値を示し、S波速度は含水比が上昇するに従い低下する傾向を岩石においても図2に示すように確認した。以上より、岩石の弾性波速度は含水状態によって有意に変化すると考えられる。

2.2 乾湿繰り返しによる劣化と物性値の変化

図3に乾湿繰り返しにもなうP波速度、S波速度および見かけの密度の変化を時系列で示す。図より変質安山岩 (No.1、No.2) はP波速度、S波速度ともに次第に低下する傾向が認められるが、来待砂岩 (No.3) は変化が小さい。変質安山岩は劣化の進行ともない弾性波速度が低下していると考えられるが一般的な低下傾向ではなく逆に上昇することがある。図4は試料No.1とNo.2について、P波速度とS波速度の相関をグラフにプロットしたもので、炉乾燥直後に測定した値は白抜きのプロット (○) とし試料の飽和度は0%と考えた。また、塗りつぶしたプロット (●) は、水浸直後に測定した値で飽和度は100%に近い状態にあると考えた。図より、含水比が高いほどP波速度に対しS波速度が小さい傾向が認められ、八木・石井の実験で示された含水比最大でS波速度最小となる傾向と一致する。

等方均質完全弾性体の場合、弾性波速度と体積弾性係数、せん断弾性係数は式(1)、式(2)の関係にある。

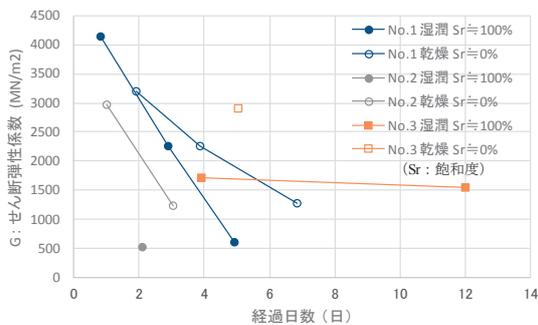
$$V_P = \sqrt{\frac{\kappa + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad (1)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

ここに、 V_P : P波速度、 V_S : S波速度、 ρ : 密度、

κ : 体積弾性係数、 G : せん断弾性係数

測定された弾性波速度から、式(1)、(2)によって求めたせん断弾性係数と弾性波速度との相関を時系列 (横軸は乾湿繰り返し回数) として図5に示す。図より含水状態で区別して見れば、変質安山岩の試料No.1、No.2では劣化の進行ともないせん断弾性係数、体積弾性係数ともに低下していることが明瞭に読み取れる。



(a) せん断弾性係数

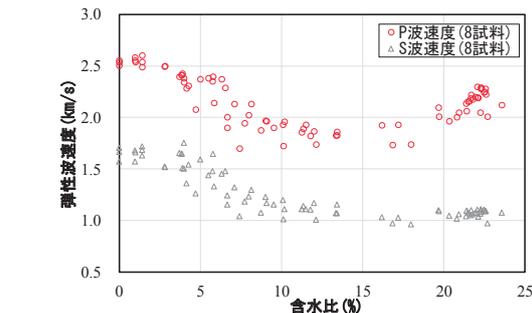


図2 大谷石 (凝灰岩) の含水比と弾性波速度の相関

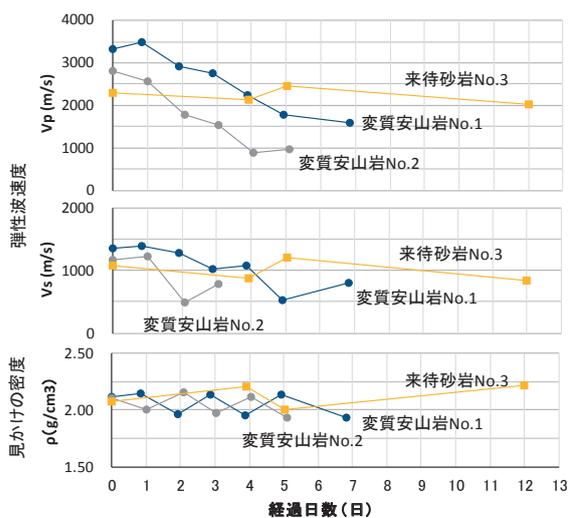


図3 乾湿繰り返し条件における弾性波速度の変化

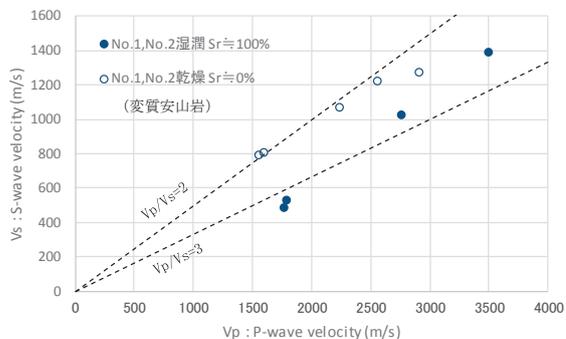
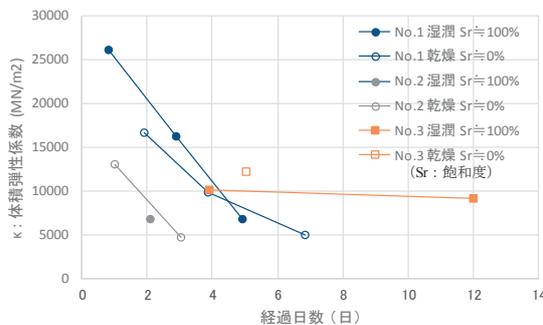


図4 含水状態に応じたP波速度とS波速度の相関



(b) 体積弾性係数

図5 含水状態に応じたせん断弾性係数、体積弾性係数の変化傾向

また、劣化が確認されなかった試料 No.3 ではせん断弾性係数、体積弾性係数ともほぼ一定と評価できる。以上より、弾性波速度は、岩石の含水状態によって有意な影響を受けるが、地山の劣化の傾向を正確に把握するためには含水状態に応じて結果を整理することが有効である。

§3. トンネル地山の物性値

3.1 坑内弾性波探査の概要

既報³⁾では、屈折法弾性波探査で得られたP波速度構造から、時間依存性変状に対する地質の健全性評価を試行したが、本報ではP波速度およびS波速度から求められる弾性係数について検討する。対象とした旧トンネルは、1977年に完成した矢板工法のトンネルで、完成後2~4年の間に時間依存性変状が顕在化し、その後1ブロックから5ブロックに対して対策工が施工されたが、

最も変状が顕著であった4ブロックでは30年以上変状が継続した。屈折法弾性波探査は、延長L=1,500mで、受振点間隔は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。受振器は3成分MEMS型(Micro Electro Mechanical Systems)受振器を使用し、舗装された路盤に3点式のスタンドを使用して固定した。探鉦機はSERCEL428XL DSU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、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発震する油圧インパクトを使用した。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比を向上させるため1箇所あたりそれぞれ3回ずつスタックした。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3m×3mの格子形とし、初期モデルランダム化によるモンテカルロ確度解析⁹⁾を実施した。

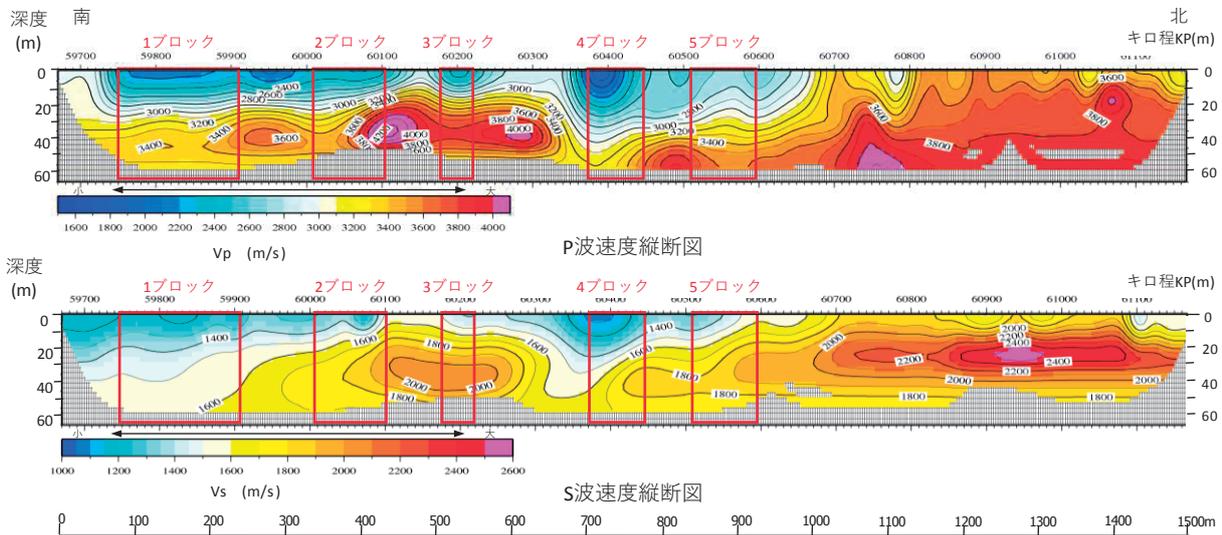


図6 屈折法弾性波探査結果

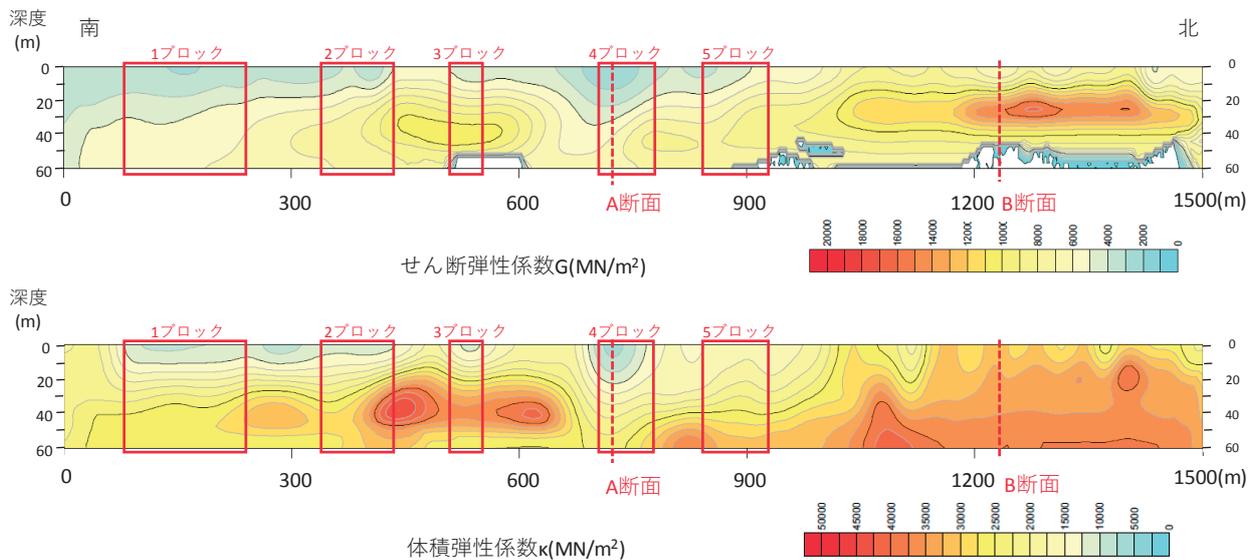


図7 屈折法弾性波探査により求めたせん断弾性係数および体積弾性係数の縦断分布

3.2 坑内弾性波探査による弾性係数

屈折法弾性波探査の結果から得られたP波速度、S波速度を図6に示す。図の深度0mは路盤表面を表している。図より、1ブロックから5ブロックにかけて表層部の弾性波速度はP波速度、S波速度ともに低く、特に変状の顕著だった4ブロックでは弾性波速度の低いゾーンが深部まで至っていることが分かる。また、時間依存性変状が発生していない北側の1,000m～1,500mの範囲では、南側に比べて表層部の弾性波速度が高い。S波速度は、北側の区間と3ブロック付近の深度30m付近で最高値を示し、そこから深度を増すと低下する傾向が認められるが、これらの区間の30m以深においてはS波の波線密度がまばらな区間に相当し、トモグラフィ解析の初期モデルを修正するための情報が少ないことから解析結果の信頼性が低い可能性がある。

図7に式(1)、式(2)により求めたせん断弾性係数および体積弾性係数の縦断分布を示す。計算に必要な密度 ρ は、Gardnerら⁷⁾の提案した式(3)によりP波速度から推定した。

$$\rho = 0.3 W_p^{0.25} \quad (3)$$

図8は、図7に示したA断面およびB断面におけるせん断弾性係数および体積弾性係数を、深度を縦軸として示したグラフである。A断面およびB断面は、それぞれ時間依存性変状が最も顕著だった4ブロックと変状の発生していない健全部に相当する。図より体積弾性係数に着目すると、4ブロックでは深度が浅いほど体積弾性係数が小さい傾向にある。一方で、健全部では体積弾性係数の変化は小さく、ほぼ一定の値を示す結果となった。なお、せん断弾性係数は、健全部で深度30m付近を最高値とする深度ごとの変動が見られるが、式(2)のとおりせん断弾性係数はS波速度に依存することからS波速度が高く得られた影響を強く受けているためと考えられる。せん断弾性係数の値としては、4ブロックでは2,000～6,000MN/m²の範囲にあり、健全部では6,000～15,000MN/m²の範囲にある。前章の図5に示した室内実験に使用した試料は、新トンネルの先進ボーリングコアで地質は同様である。室内実験結果では、試料No.1とNo.2のせん断弾性係数は500～4,000MN/m²の範囲にあり、4ブロックにおける現場での測定による値と近く、室内実験と現場での測定結果にある程度整合性があると考えられる。

以上より、室内実験で劣化にともなうせん断弾性係数の変化傾向を把握することにより、現場で測定されるせん断弾性係数と対比して現状の物性値がどの程度のレベルにあるのかを把握することができ、トンネル周辺地質の長期的な健全性を判定するための有効な指標となり得ると考えられる。

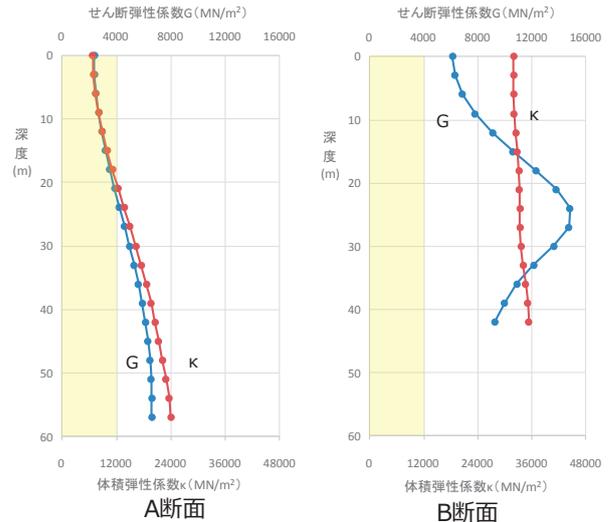


図8 代表断面のせん断弾性係数と体積弾性係数

§4. 坑内環境と考えられる変状メカニズム

4.1 旧トンネル坑内環境測定の概要

旧トンネル坑内には、覆工背面からの湧水が多く確認され、冬季に凍結して氷柱を形成する箇所も確認されている。よって、周囲の地下水賦存状況や、凍結融解の影響を把握することが、時間依存性変状メカニズムを考察するにあたって有効と考え坑内環境測定をおこなった。旧トンネルにおける計測項目と配置を表1および図9に示す。旧トンネルは南北方向に伸びるトンネルで、西側は約2kmで海に至り東側には開析の進んだ山地が広がっている。坑内の気温、湿度、風速、風向の測定には複合気象観測装置を使用した。地山の凍結融解が発生している可能性が考えられたため、時間依存性変状が最も顕著だった4ブロックで、側壁から山側へ向かってほぼ水平に20m掘進したボーリング孔内で、表に示す深度に温度計を埋設して地中温度を測定した。別途、山側および海側の側壁からそれぞれ調査ボーリングをおこない、地下水賦存状況を確認するとともに湧水圧測定孔とした。山側の調査ボーリング孔では、掘進中には湧水がほとんど確認されなかったが、掘進が終了しケーシングパイプを抜管した後に毎分1リットル程度の湧水が確認された。そこで、ストレーナ加工を施した保孔管をボーリング孔に挿入し、孔口において水圧を測定できるよう圧力変換器を取り付けた。なお、覆工コンクリートと地山の間からの漏水を防止するために、孔口から4mまでの間は無孔管とし、無孔管と地山の間に吸水膨張性高分子材料の遮水材を設置した。一方、海側に掘進したボーリング孔の掘削は、毎日の掘進長を5m程度として、その日掘進した区間の湧水圧測定を実施し、地下水の賦存状況を詳しく調査した。その結果、12m以深から湧水量は増加する傾向となり、特に20mから35mの間で地下水圧が高いことが明らかとなった。

この区間の最大湧水量は毎分約370リットルである。そこで、ボーリングコアの状態から亀裂の少ない位置を選んで、その深度に遮水材を設置した保孔管をボーリング孔に挿入し、深度21.35mから35.00mまでの区間の水圧測定を実施できるように仕上げ、孔口に圧力変換器を取り付けた。

表1 旧トンネル坑内環境計測等一覧表

測定場所	測定項目	センサー位置	計測機器
4ブロック	気温	山側側壁	複合気象観測装置 WTX510
	湿度		
	風速		
	風向		
	覆工表面温度	山側側壁	温度計 KT-110A
湧水圧	山側側壁 ※覆工表面から4.00~40.00m	圧力変換器 PG-5KU	
	海側側壁 ※覆工表面から21.35~35.00m	圧力変換器 PG-10KU	

4.2 地質の劣化要因に着目した坑内環境の傾向

坑内環境測定結果を時系列で図10に示す。図は約1年間のデータである。図には、複合気象観測装置で測定されたトンネル坑内の2015年6月から2016年5月の年平均気温

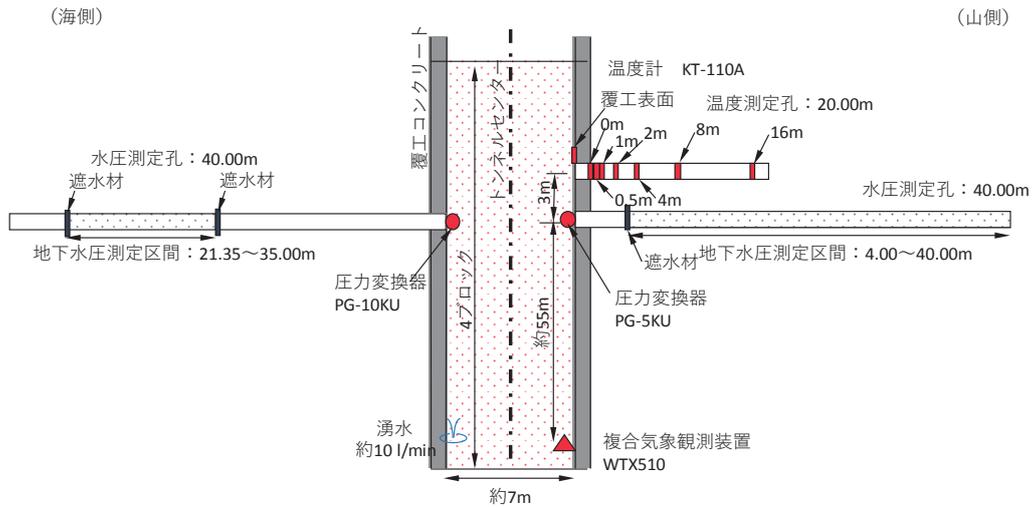


図9 旧トンネルの坑内環境計測配置図

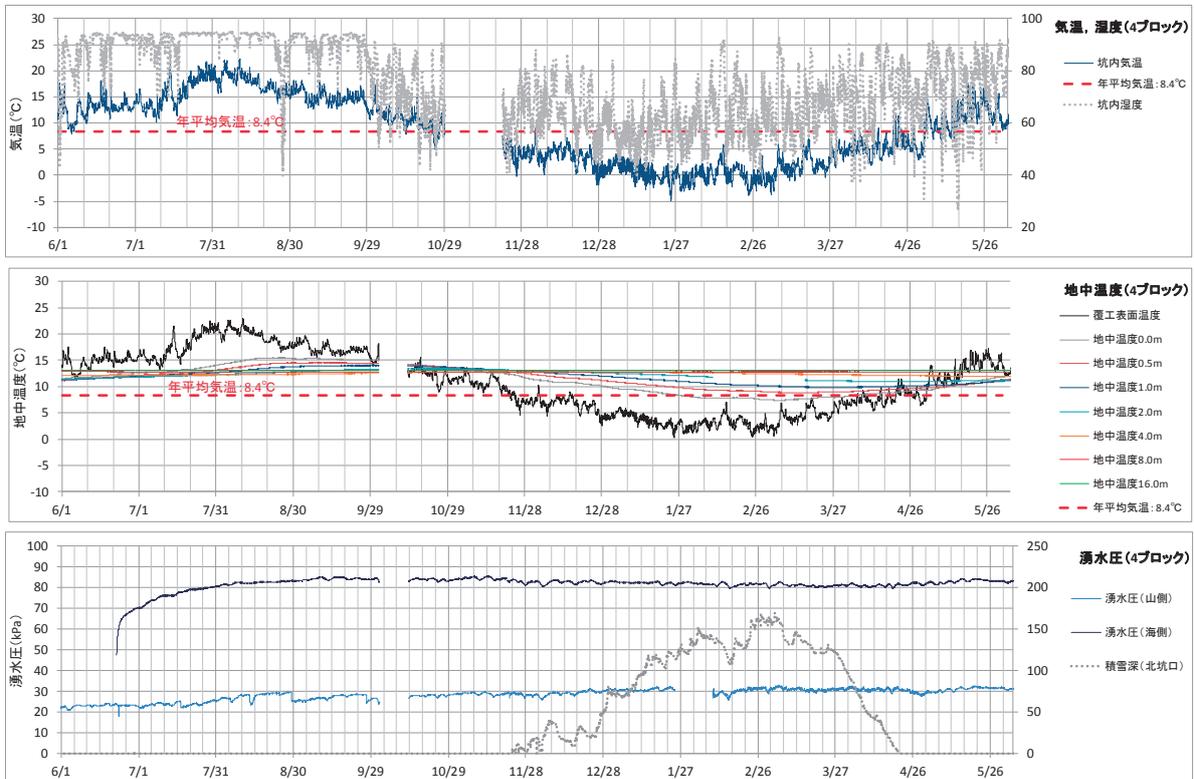


図10 坑内環境計測結果

(約8.4℃)を併記した。坑内気温は、11月下旬から3月下旬の間には氷点下に低下することがあり、計測期間中の最低気温は-5℃程度である。また、坑内気温は8月上旬ごろに最も高く、最高気温は22℃程度である。本トンネルの北側坑口近傍の気象観測データより、坑外の気温は坑内の気温に比べて変動が大きい、年平均気温は坑内よりやや低く7.3℃である。また、坑外の年降水量は1,426mmであった。覆工表面温度は気温と同様の傾向で推移するが、冬季は気温より覆工表面温度が1~2℃程度高く、夏季にはその差は小さくなる。一方で、地中温度は深度0~4mの間では冬季に低く夏季に高い傾向がわずかに認められ、浅所ほどその傾向は強い。しかし、深度8mを超えると年間を通してほとんど変動が無く13℃程度で一定している。観測期間中における、深度8.0mから16.0mの平均地中温度は13.0℃であった。よって、地中温度が外気温の影響を受けない境界の深度は4mから8mの間にあると考えられる。坑内の湿度は、夏季に高い傾向が認められ、7月中旬から8月下旬にかけて100%に近い値を示す。一方で冬季には湿度は比較的低い傾向を示す。湧水圧は山側では2014年12月から、海側では2015年6月から測定を開始した。前述のとおり、山側のボーリング孔では掘進中に湧水はほとんど確認されなかったが、12月から8月上旬にかけてゆっくりと上昇した後に、30kPa付近でほぼ一定となった。海側のボーリング孔では、測定開始当初から湧水圧は大きく上昇し、数日で上昇速度はやや遅くなったものの、さらに上昇を続けた後に約1ヶ月程度で収束に向かい、現在のところ80~85kPa程度で推移している。なお、これまでのところ、湧水圧は山側、海側ともに、目立った季節変動は確認されておらず、年間の変動は5kPa程度以内である。

Peltier⁸⁾は、年平均気温および年平均降水量と、機械的風化の程度および化学的風化の程度の関係を図11のように表した。Peltierは、機械的風化は凍結作用によるものが大部分を占めると考えた上で、風化の程度は氷点付近での温度変化、凍結融解の頻度に最も支配され、図のように年平均気温が低くなるにつれて機械的風化度が強くなる傾向にあるが、地盤が一度凍結したら融解しないほどにまで気温が低くなると弱くなるとした。一方化学的風化の程度は、気温が高くなると化学反応速度は増加する傾向があることから、年平均気温の上昇にしたがって化学的風化度が強くなる傾向が示されている。また、溶解や酸化と還元、加水分解などほとんどの化学的風化に水が不可欠であるため、年平均降水量が増加するにつれて化学的風化度が強くなる傾向が示されている。すなわち、図11における黄色に着色した領域では岩石の劣化因子として化学的作用が卓越し、水色に着色した範囲は凍結融解による機械的作用が卓越すると考えられる。山崎ら⁹⁾は、岩石組織の顕微鏡観察と鉱

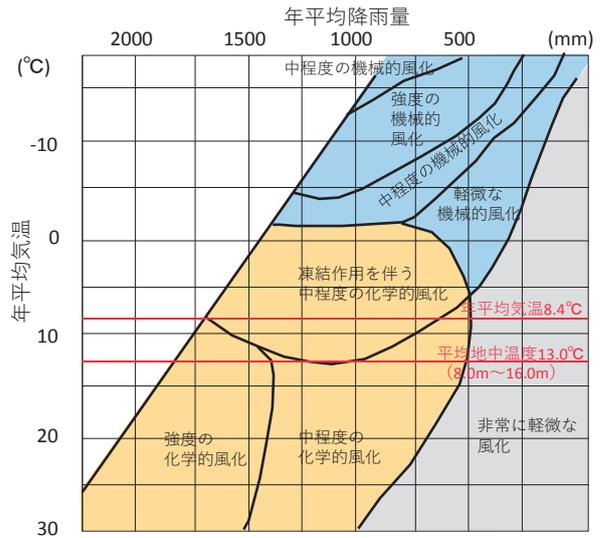


図11 岩石の風化機構の一般的分類と坑内環境⁸⁾に加筆修正

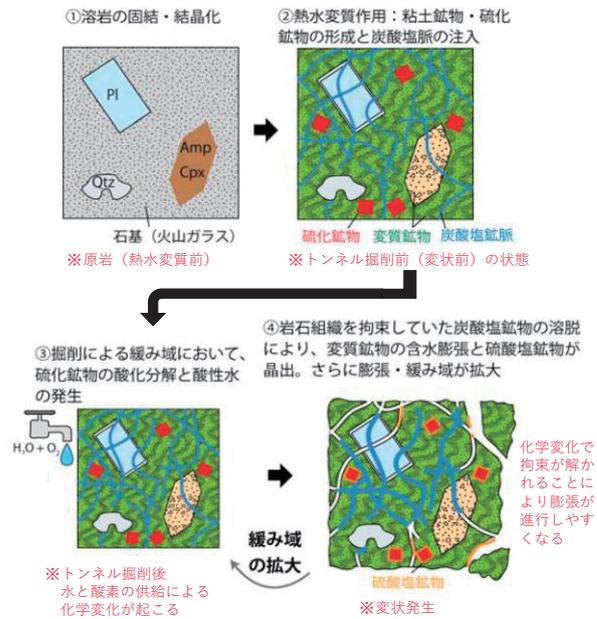


図12 山崎らによる時間依存性変状プロセス⁹⁾に加筆

物組成解析結果から、時間依存性変状の発生の要因として、硫化鉱物を含む地質を掘削し酸素と水が供給されることにより硫酸性水が発生し、その硫酸性水が岩石組織を拘束していた方解石等の炭酸塩鉱物を溶脱することで、硫酸塩鉱物の生成と膨張性粘土鉱物の含水膨張が促進され、時間遅れを伴う膨張が発生したと考察している(図12)。計測結果より、旧トンネル坑内の年平均気温は8.4℃で、4ブロックの深度8m以深の年平均地中温度は13.0℃程度である。図11における年平均気温8.4℃から13.0℃の領域は、「凍結作用を伴う中程度の化学的風化」と、「強度の化学的風化」

の境界領域付近に相当する。前述のように機械的風化は凍結融解によるものが大部分を占めるが、坑内気温、地中温度から岩石の長期的劣化メカニズムを考えると、凍結、融解による機械的な劣化の影響よりも、溶解、酸化・還元、加水分解等の化学的な影響が大きいと考えられる。このように、坑内の環境条件は、山崎らの考察と調和的であると言える。

また、調査ボーリング掘進中の地下水状況および、湧水圧測定結果より、同一断面の山側と海側において湧水量ならびに湧水圧が大きく異なることが明らかとなった。一般的には、地下水位標高は山側のほうが海側に比べて高く、湧水圧が大きいと考えられるが、時間依存性変状が発生した調査断面では逆の傾向となり地形標高に対して調和的ではない。この原因としては、地下水経路の相違や、難透水層の存在によるダムアップなどが考えられるが、現在のところ明確になっていない。しかし、旧トンネルの時間依存性変状発生区間周辺の地下水は、一様な帯水層に賦存するものではないこと、地下水圧の季節変動は小さいことなどが明らかとなった。

§5. まとめ

新トンネルの先進ボーリングコアを用いた室内試験および、旧トンネルの坑内弾性波探査で得られたP波速度、S波速度から、せん断弾性係数、体積弾性係数を求め地山の物性値変化について評価した。また、トンネルの坑内環境計測結果から考えられる変状メカニズムについて検討した。その結果、以下の知見を得た。

- ・乾湿繰り返しによる室内実験で得られた弾性波速度から求めたせん断弾性係数および体積弾性係数は、劣化に伴い低下してゆく傾向が明瞭に確認できた。

- ・坑内弾性波探査による弾性波速度から求めた体積弾性係数は、変状部では深度が浅いほど小さい傾向、健全部では浅部でも大きい傾向が確認された。また、せん断弾性係数の値は、室内実験により求めた値とおおむね整合した。

- ・坑内環境計測結果から、旧トンネルの環境は化学的な風化が卓越する環境にあることが示唆され、既往研究で指摘される変状メカニズムと調和的である。

今後は、地質の化学組成、鉱物組成と物性値の関係および劣化の進行に応じた物性値の変化傾向を把握することにより、地質健全性診断技術の確立に向けて検討を重ねてゆく計画である。

謝辞: 本研究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実施し、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、山崎秀策研究員に多大なるご尽力をいただきました。また、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。本研究の一部は、国土交通省建設技術研究開発助成制度の補助金で実施しました。

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，笹谷輝勝：変状を伴う老朽化トンネルの地質評価・診断技術の開発，フジタ技術研究報告第 51 号，pp.9-14，2015.
- 4) 八木則男，石井義明：土または岩石における超音波伝播速度とその力学特性，京大防災研究所年報第 12 号 B，pp.77-88，1969.
- 5) 新井智之，丹羽廣海，岡崎健治：劣化の著しい岩石に対する乾湿繰り返し試験装置の性能試験，第 72 回年次学術講演会講演概要集，pp.637-638，2017.
- 6) 白石和也，阿部進，岩崎貴哉，斉藤秀雄，佐藤比呂志，越谷信，加藤直子，新井隆太，川中卓：屈折初動走時トモグラフィ解析における初期モデルランダム化による解の信頼性評価，物理探査，第 63 巻，第 4 号，pp.245-356，2010.
- 7) Gardner, G.H.F., Gardner, L.W. and Gregory, A.R., : Formation velocity and density –The diagnostic basics for stratigraphic traps, *Geophysics*, Vol.39, No.6, pp.770-780, 1974.
- 8) Peltier, L., :The geographic cycle in periglacial regions as it is related to climatic geomorphology, *Ann. Assoc. Amer. Geog.*, 40, pp.214-236, 1950.
- 9) 山崎秀策，岡崎健治，倉橋稔幸：山岳トンネルにおける時間依存性変状区間の検出－火山岩地山の先進ボーリングコア試料を用いた全岩化学組成分析－，第 59 回北海道開発技術研究発表会，2016

ひとこと

少しずつですが時間依存性変状の発生条件などがわかってきたように思います。道半ばですが、現在よりも合理的なトンネル地質評価に向けて検討してゆきます。



丹羽 廣海