

時間依存性変状トンネルの 地中温度および地下水圧測定

丹羽 廣海^{1*}・村山 秀幸¹・岡崎 健治²・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: hiroumi.niwa@fujita.co.jp

近年、トンネル地質の長期的な劣化により盤ぶくれ等の変状が供用中に顕在化する事例が発生している。筆者らは、時間依存性変状メカニズムの解明および地質の健全性診断技術の開発を目指し、各種実験、測定を実施している。筆者らは、トンネル地山を構成する岩石の長期にわたる物理的、化学的な変化を理解するためには、その岩石を取り巻く周辺環境を把握することが有効であると考え、実トンネルにおいて坑内の温度、湿度や、覆工コンクリート背面の地中温度および地下水圧等を測定している。本稿では、これまでに得られた1年間程度の坑内環境測定結果を示し、岩石の長期的な劣化に影響を及ぼし得る環境因子の傾向について報告する。

Key Words : *time-dependent deformation, rock degradation, ground temperature, head of ground water*

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が供用中に顕在化する事例が全国的に多く報告されるようになり、維持管理の観点から問題になっている¹⁾²⁾。本稿では、トンネル施工中に顕在化する変状と区別して、供用中に発生する変状を時間依存性変状と呼ぶ。時間依存性変状のなかには、従来の地質評価指標や考え方だけでは説明の付かない事例がいくつかある。特に、なぜこれらの変状が掘削直後ではなく時間が経過した後の供用中に顕在化するのか、どのような条件の時に地質が時間依存性を持って劣化するのかといったメカニズムについては、明らかにされている事例は無い。また、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、トンネル周辺の地質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³⁾⁴⁾。そこで筆者らは、時間依存性変状に対するメカニズムの検討および維持管理段階に適用可能な合理的な地質診断技術の確立に向け、実際に時間依存性変状が発生したトンネルにおける調査、実験をおこなっている⁵⁾。

対象トンネルは、北海道に位置する延長約1.9kmの矢板工法で施工されたトンネルで、図-1に示すように地

質は新第三系の熱水変質を受けた安山岩、デイサイト、自破碎溶岩および凝灰角礫岩を主体とする火砕岩より構成される。本トンネルでは、施工中にもいくつかの箇所では地山の膨張による変状が確認され難工事の末に完成したが、完成から数年後にインバートや側壁の変状が再び顕在化し、約30cmの急激な路盤隆起が確認された。その後、数次にわたる対策工が施工されたが、記録によると30年以上にわたり緩慢な変状が継続した。現在は代替トンネルが開通したため本トンネルは供用を終えている。本稿では、時間依存性変状メカニズム解明に向けた基礎データとして、坑内の温度、湿度や、覆工コンクリート背面の地中温度および地下水圧等を1年間程度測定した結果について報告する。

2. 岩石の状態変化と作用因子

(1) 岩石の状態変化と作用因子に関する既往研究

本研究で対象とする時間依存性変状のメカニズム解明に向けて、岩石の膨張や劣化などの経時的な状態変化について考察する必要がある。地表面近くにおける岩石の経時的な状態変化は広義の風化に相当し、物理的、化学的、生物学的な変化によってもたらされる⁶⁾。Jenny⁷⁾は風化と土壌形成の因子として気候、母岩、生物活動、地形、

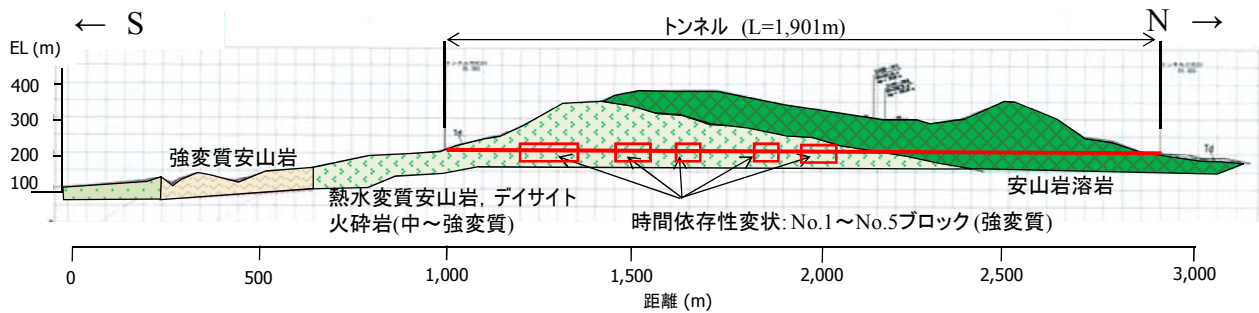


図-1 対象トンネルの地質分布状況

時間を挙げた。山岳トンネルの時間依存性変状を対象とした場合、これらの因子のなかでも気候、母岩、時間が特に重要であると考えられ、気候の影響が岩石の状態変化を規制する重要な因子となる可能性がある。よって、対象トンネルの時間依存性変状のメカニズムを考察するにあたって、トンネル坑内あるいは地中における温度、湿度、地下水状況などを把握することが有効であると考えられる。

Peltier⁹⁾は、年平均気温および年平均降雨量と、機械的風化の程度および化学的風化の程度を図-2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、機械的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、年平均降雨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。

以上の考え方から、地表においては、主に凍結融解による機械的風化の程度は湿潤な亜寒帯地域で最も強く、化学的風化の程度は湿潤熱帯地域で最も強いと考えられる。図-2は気温および降水量と、機械的風化および化学的風化の程度を概念的に分類したもので、母岩（地質）の相違や生物活動による風化については考慮されていないが、気候条件によりどのような機構の風化が卓越するののかの目安を得るためには参考になると考えられる。

(2) 本トンネルの坑内環境

本トンネルでは、湧水が生じている箇所が数多く確認される。これらの湧水の多くは、側壁コンクリートとアーチコンクリートの打ち継ぎ目の周辺で多く観察される

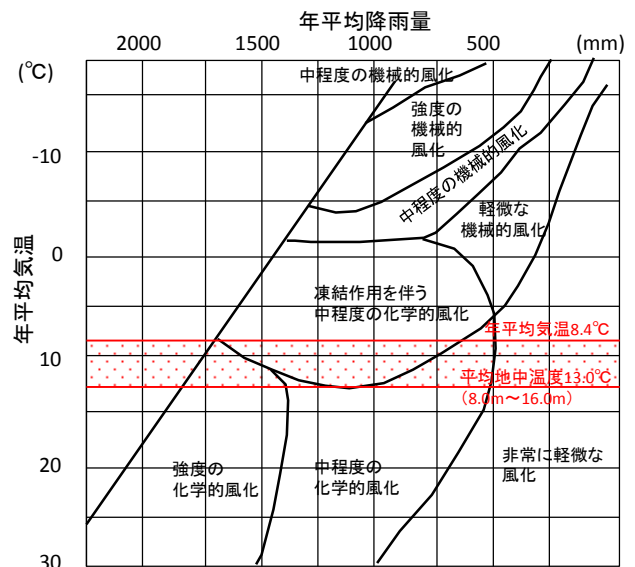


図-2 気温、降雨量と風化機構および風化程度の関係⁹⁾に加筆修正



写真-1 冬季の側壁に見られる氷柱

が、覆工コンクリートに発生したひび割れに沿って浸み出してくるようなものも認められる。湧水量としては毎分1リットル未満のことが多いが、最も時間依存性変状の大きかった区間では、側壁のボーリング孔から年間を通して毎分10リットル程度の湧水が確認される箇所がある。また、坑内では側壁からの湧水が冬季に凍結して氷

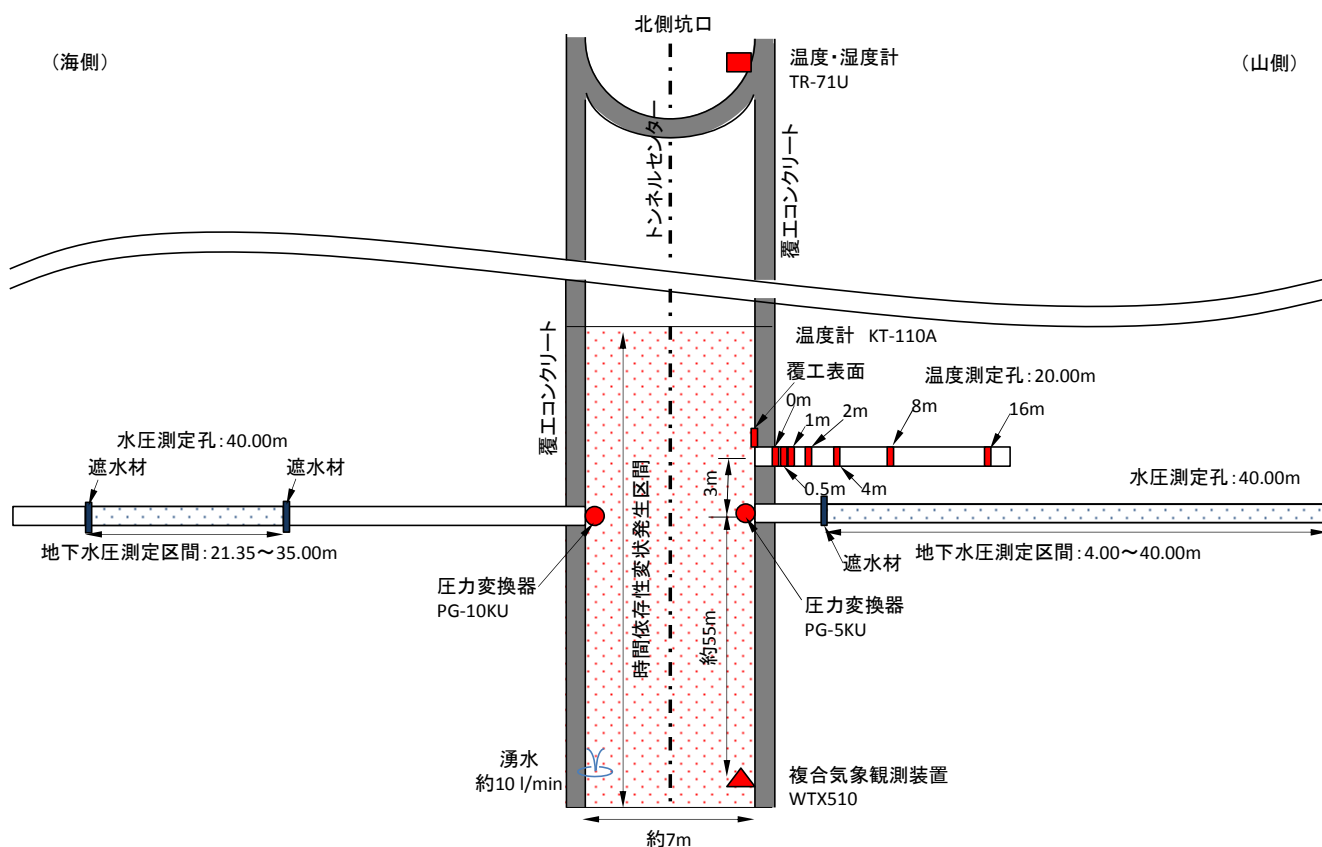


図-3 測定機器配置平面図

柱を形成する箇所も確認されている（写真-1）。以上より、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。

3. 坑内環境の測定方法

トンネル坑内における測定機器の平面配置を図-3に、測定項目を表-1にまとめて示す。本トンネルは南北方向に伸びる直線のトンネルで、西側は約2 kmで海に至り、東側には開析の進んだ山地が広がっている。図-3における左側は海側に相当し、右側は山側に相当する。測定には気温、湿度、風速、風向を測定可能な複合気象観測装置を使用した。地中温度は、時間依存性変状が発生した区間で、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に、温度計を埋設して測定した。温度計の埋設深度は、覆工コンクリートと地山の境界を0 mとして、0 m、0.5 m、1 m、2 m、4 m、8 m、16 mの位置に埋設し、ボーリング孔はセメントミルクで充填した。地下水に関しては、構成鉱物の溶解等による化学的な劣化への影響および、水圧が外力としてトンネルに作用している可能性について把握することを目的として、調査

表-1 測定項目一覧表

測定場所	測定項目	センサー位置	開始時期	計測機器
北側坑口付近	気温	山側側壁	2014.5	温度・湿度計 TR-71U
	湿度		2014.5	
時間依存性 変状箇所近傍	気温	山側側壁	2014.9	複合気象観測装置 WTX510
	湿度		2014.9	
	風速		2014.9	
	風向		2014.9	
	覆工表面温度	山側側壁	2014.12	温度計 KT-110A
	地中温度	山側地中 ※覆工背面から 0m, 0.5m, 1m, 2m, 4m, 8m, 16m	2014.12	
	湧水圧	山側側壁 ※覆工表面から 4.00~40.00m	2014.12	圧力変換器 PG-5KU
		海側側壁 ※覆工表面から 21.35~35.00m	2015.6	圧力変換器 PG-10KU

ボーリングによって地下水賦存状況を確認するとともに湧水圧を測定した。調査ボーリングは、時間依存性変状が発生した区間のうち、前述の毎分10リットル程度の湧水が確認されている箇所からトンネル縦断方向に約55 m離れた位置で、側壁から両側に2箇所、図-3に示すようにほぼ水平方向に実施した。山側に掘進した調査ボーリ

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4 m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5 m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、12 m以深から湧水量は増加する傾向となり、特に20 mから35 m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遮水材を設置し、深度21.35 mから35.00 m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。

4. 坑内環境測定結果

(1) 湧水区間の地質状況

調査ボーリング実施時に湧水が多かった海側のボーリングコア写真を図-4に示す。図は深度19 mから36 mまでの区間を抜粋したものである。湧水が多かった深度20 mから35 mの区間の地質は、非変質の安山岩溶岩で開口亀裂が多く発達している。安山岩は湧水が比較的少ない深度19.8 m以浅では自破碎している。自破碎溶岩は安山岩溶岩との境界部で赤色に変色しており溶岩が高温で酸化した痕跡と考えられる。自破碎溶岩および山側に向かって掘進したボーリングコアでは、熱水変質を受けて粘土鉱物が生成されている部分が見られるのに対して、安山岩溶岩は熱水変質をほとんど受けていない。以上より、周辺の地下水は、非変質の安山岩溶岩の亀裂中に賦存していると推定できる。

(2) 坑内環境測定結果

坑内環境測定結果を時系列で図-5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2014年9月から2015年9月の年平均気温（約8.4℃）を併記した。坑内気温は、12月上旬から3月上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

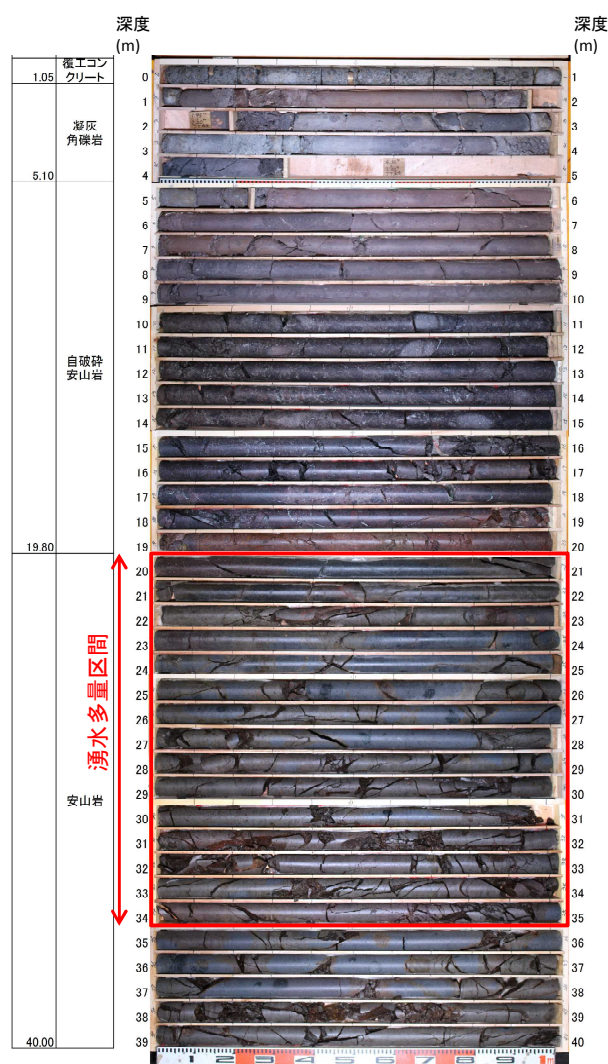


図-4 海側水圧測定孔のボーリングコア状況

は坑内と同程度で 8.3℃である。また、年降水量 1,286 mm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 0～4 m まで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 8 m 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 8.0 m から 16.0 m 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くなる境界の深度は 4 m から 8 m 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が、4月下旬から5月上旬に最も低下する傾向にある。本トンネルは積雪寒冷地にあり、この時期は融雪期に相当する。冬季に湿度が低下する明確な原因は現在のところ不明であるが、今後の測定によって再現性について確認したい。湧水圧は山側では

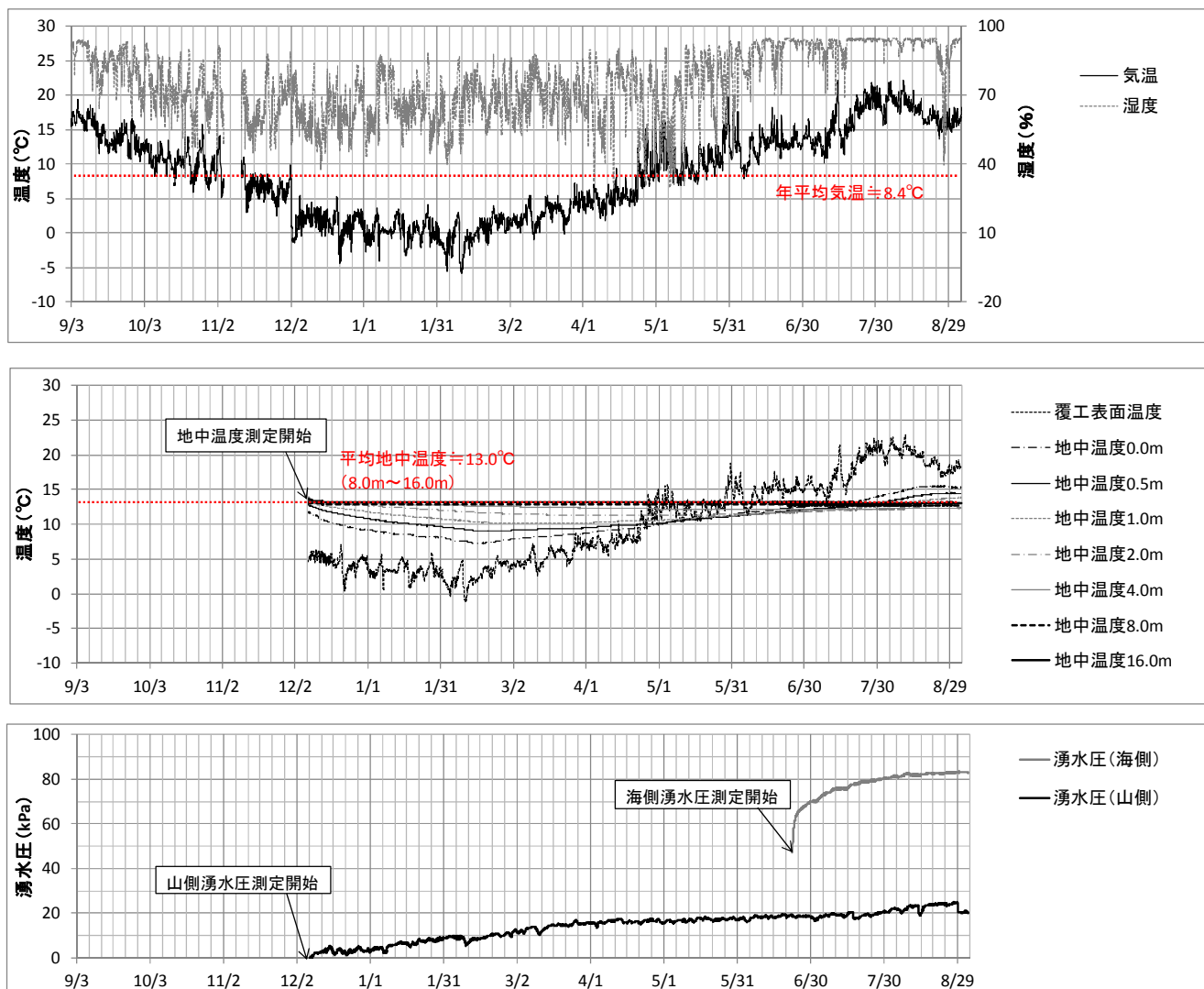


図-5 気温、湿度、地中温度、湧水圧測定結果

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3月中旬までゆっくりと上昇した後に、20～25 kPa 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 80～85 kPa 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いない。

(3) 地質の劣化要因に着目した坑内環境の傾向

本トンネルの時間依存性変状発生区間における坑内環境の測定結果について、前掲した図-2の風化機構および風化程度の分類と対比する。測定データから得られたトンネル坑内の年平均気温は8.4℃で、深度8m以深の地中温度は13.0℃程度である。図-2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風化」と、「強度の化学

的風化」の境界領域付近に相当する。よって、本トンネル周囲の岩石の長期的劣化メカニズムの検討にあたっては、凍結、融解による機械的な劣化の影響だけではなく、溶解、酸化・還元、加水分解等の化学的な影響についても考慮する必要があると考えられる。

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、本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がわかった。今後も継続的に計測をおこなうことによって、地下水圧の季節変動傾向を把握したい。

5. おわりに

時間依存性変状メカニズム解明に向けた基礎データを収集するためにトンネル坑内環境測定を実施し、以下のような知見を得た。

- これまでの計測結果では、坑内の最低気温は-5℃程度、最高気温は22℃程度、年平均気温は8.4℃であった。地中温度は5～8 mより深くなると一定となり、8 m以深の平均地中温度は13.0℃であった。
- これまでの坑内環境の測定結果から、本トンネルの岩石の長期的劣化メカニズムの検討にあたっては、凍結、融解による機械的な劣化の影響だけではなく、化学的な影響についても考慮する必要があると考えられる。
- 本トンネルの時間依存性変状区間の地下水は、地形標高に対して調和的でなく、一様な帯水層に賦存するものではないことが明らかとなった。

今後は、坑内での測定を継続し坑内環境の季節変動傾向等をより詳しく把握するとともに、地質の化学的な変化に関連する検討をあわせておこなうことにより、時間依存性変状メカニズムの解明を目指したい。

謝辞：本研究の一部は、国土交通省建設技術研究開発助成制度（変状を伴う老朽化トンネルの地質評価・診断技術の開発）の補助金を使用した。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。

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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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, 土木学会第 43 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.25-30, 2015.
- 6) C. D. Ollier：風化-その理論と実態, pp.145-166, ラテイス, 1971.
- 7) Jenny, H., :*Factors of soil formation*, p.281, Mc Graw Hill, 1941.
- 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.

MEASUREMENT OF GROUND TEMPERATURE AND GROUND WATER PRESSURE OF TUNNEL WITH TIME-DEPENDENT DEFORMATION

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

Recently, the continuous ground displacements have resulted in damage to the lining, or floor heaving in several tunnels. We are carrying on a series of experiments using actual tunnel with time-dependent deformation aiming to develop of geological soundness diagnosing method. It is useful to recognize surrounding environment in order to grasp the time-dependent behaviour of rocks in physical and chemical changes. This paper shows about 1 year monitoring results of air, ground temperature, humidity and ground water pressure in the tunnel. And it also shows tendency of environmental factors which can influence the rock degradation.