

トンネル漏水の水理地質点検手法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 27～令 1

担当チーム：防災地質チーム

研究担当者：倉橋稔幸、岡崎健治、

大日向昭彦

【要旨】

本研究では、トンネルの漏水の計測手法、ならびに漏水の水理地質評価手法の提案を目的として、平成 27 年～令和元年度にかけて、トンネルの漏水を比抵抗として計測するとともに、漏水の発生状況を連続撮影した画像を分析した。その結果、地下水の多い箇所を低比抵抗部として検知できることが確認でき、漏水の多い区間を相対的に特定できることが分かった。また、季別や降雨後の漏水量の変化を捉えることで、トンネル点検には適切な期間があることが分かった。さらに、漏水の痕跡等の変状、漏水させやすい地質及び比抵抗分布を三要素として、漏水変状を三段階に区分する評価方法を提案した。

キーワード：トンネル、地質、水理地質点検手法、漏水

1. はじめに

山岳トンネルの漏水は、覆工の耐力低下、覆工材料の劣化、坑内設備の機能低下、車両走行への影響を引き起こす。さらに、寒冷地では漏水の凍結によって、つららや側氷を生じ、運転保安、保守管理にとって大きな問題となる。特に矢板工法で建設された山岳トンネルは地山と覆工コンクリートが密着しておらず、水圧を考慮せず排水を前提とした設計とされていることから打継ぎ目や亀裂から漏水を生じさせやすい。

道路トンネル点検要領¹⁾では、漏水は変状のひとつと位置づけられ目視点検されている。しかし、覆工背面の水みちは特定されず根本的な漏水対策がなされていない。また、坑壁表面に漏水防止板が設置され、どこから漏水しているのか不明な場合も多い。併せて、維持管理段階では湧水や漏水もモニタリングされておらず、季節変化等の基本的な水文情報も不明なことがある。このため、漏水の区間を特定し、覆工背面の水理地質構造を考慮した漏水変状の評価と予防的対策を行うことがトンネルの長寿命化にとって重要である。

そこで、本研究では、まず北海道の 262 本の国道トンネルにおける漏水の点検結果を収集し、トンネル内で漏水が発生している部位や区間を分析した。次に、矢板工法で建設されたトンネルをモデルとして、水理地質構造を調べるとともに、坑内で電気探査を実施し、比抵抗分布と地質の関係から、漏水の多い区間を相対的に分析した。併せて、連続撮影した覆工表面の画像や動画を解析し、季別や降雨後の漏水量の変化を分析した。

さらに、壁面の漏水の痕跡や変状、漏水させやすい地質、比抵抗分布の関係を比較し、トンネル覆工コンクリート背面の水理地質構造を統合的に分析した。

2. 研究方法

2. 1 漏水の発生状況調査

北海道の国道 262 本のトンネル（矢板工法 136、山岳トンネル工法 126）の点検結果から、トンネル断面の漏水の発生部位をアーチ、側壁及び路面・路肩に分けて集計した。また、各トンネルの延長を縦断方向に 10 分割して漏水の発生箇所を集計した。これらの情報から、漏水が発生しやすい箇所を分析した。

さらに、矢板工法で建設された 132 本のトンネルの工事記録に残されていた 5,230 断面について、土被り厚さと支保工間隔を集計した。土被り厚さは、坑口周辺や沢の直下等で小さい場合、地表水が坑内に流入することが考えられる。また、支保工間隔は、トンネルの施工時に地質が悪い場合で 75cm 未満、良好な場合で 90cm 以上に設定されている。そこで、土被り厚さを 1D 未満 (D はトンネルの直径)、1D 以上～2D 未満、2D 以上の 3 区分、支保工間隔は、75cm 未満、75cm 以上～90cm 未満、90cm 以上の 3 区分として漏水の発生状況を分析した。

2. 2 漏水の現地計測

2. 2. 1 モデルトンネルの水理地質構造調査

北海道の日本海沿岸に位置する昭和 52 年に矢板工法で建設され、すでに廃道となった延長 1.9km のトンネルをモデルトンネルとして、水理地質構造を把握す

るため、水平ボーリング調査と掘削に伴う湧水量を測定した。なお、水平ボーリング調査をトンネルの起点側坑口から測点 800m 地点で実施した。トンネルの主な地質は、凝灰角礫岩、安山岩溶岩である。本トンネルでは、これまで路面の隆起等の変状が5つの区間で発生した。供用後、一部区間でインバートによる対策が行われた。さらに、変状が収束しない区間では数次にわたり対策が行われた。

本トンネルには、トンネル全長の約40%に漏水防止板が設置されている。覆工コンクリート表面に漏水が認められた箇所を対象にその発生状況を調べた。また、トンネル建設時の湧水箇所、変状対策時の漏水記録を調べ、後述する電気探査の比抵抗分布と比較した。

さらに、トンネルの起点側坑口から 800m 地点の毎分 10 リットル程度の漏水が発生している近傍で、水平方向に 40m のボーリングを掘削し、地山内部の地質の確認、湧水量の測定及びボアホールカメラによる孔内の亀裂状況を地質別に分析した。

2. 2. 2 坑内での電気探査

キャパシタ電極カップル型比抵抗探査として牽引式電気探査装置 OhmMapper を使用し、トンネル全線で電気探査を行った(写真-1)。本探査は乗用車やオペレータ自身が送受信機とダイポールケーブルを牽引して舗装面から非破壊で比抵抗を測定でき、2 極法やダイポールダイポール法による電気探査の結果とも整合するものである。

本探査では、電極間隔を 2.5m、5.0m、10.0m とし、電極離隔係数を 0.5~3 に設定して片側車線において 15 測線を測定した。測定データの平滑化処理及びノイズの除去後、見掛比抵抗を計算し、非線形の連続1次元逆解析を行った。その結果から、深度 8m までの2次元比抵抗断面図を作成した。また、岩種別にボーリングコアの比抵抗と飽和度を測定して含水状態の違いによる比抵抗分布と地質の関係を分析した。さらに、トンネル施工時に確認された湧水の発生箇所、漏水防止板設置前に確認された漏水の発生箇所、及び本調査時の漏水発生箇所と漏水防止板の設置区間を比抵抗の分布状況と比較することで漏水の多い区間を分析した。

2. 2. 3 暗視カメラによる画像撮影

モデルトンネルの漏水の発生箇所数は 2010 年 11 月の点検記録によると 105 箇所であった。このうち、漏水量の変化が調査時期によって異なる箇所を観察箇所として選定した。

漏水の観察箇所は、起点側坑口から 1,019~1,028m の区間に位置し、土被り厚さが 120m である(写真-2)。

この箇所で漏水はアーチと側壁の境界から浸出しており、側壁を湿潤させ、歩道部に至っていた。側壁に湿潤していない部分もあるが(写真-2の右側にみられる乾燥した部分)、漏水の痕跡を確認した。

その漏水を 2016 年 10 月~2017 年 7 月まで暗視カメラを反対側の側壁の上部に設置して 12 時間毎に自動撮影した。暗視カメラとしてサンコー社製赤外線自動録画監視カメラ mini(MPSC-26)を使用した。

撮影した画像については画像処理ソフトを使用して輝度を上げた後、白と黒に2値化し、各ピクセル数に占める割合を求めた。2 値化後の白色部はトンネルの覆工が乾燥した状態、黒色部は湿潤した状態に対応すると仮定して、撮影した画像ごとの黒色部の割合をトンネル覆工表面の湿潤割合として求めた。その経時変化とトンネル坑内の温度、湿度、外気温及び雨量との関係を分析した。なお、トンネル坑内の温度と湿度はトンネル中央付近で測定した。

2. 2. 4 車載カメラによる動画撮影

モデルトンネル全線の覆工表面を車載カメラで動画として 2017 年 10 月から 2018 年 8 月までに 6 回撮影



写真-1 トンネル坑内での電気探査の実施状況



写真-2 観察箇所における漏水の発生状況

した。撮影した動画から連続展開画像を作成して漏水防止板が設置されていない覆工表面の漏水面積を求め、撮影時期による違いを比較した。また、漏水面積と、各撮影日から3~28日前までの積算雨量及び実効雨量²⁾との相関係数を比較することで、降雨後の漏水の観察に適した時期について考察した。実効雨量は設定した日数を半減期としたトンネル地山中の降水量や連続した降雨の影響の評価に用いられる指標である。なお、積算雨量をトンネル近傍のアメダス観測点の日降水量から求めた。一方、実効雨量を設定期間ごとに日単位で計算するとともに、全撮影期間の降水量によるケースと、積雪や融雪時期を除いた期間の降水量によるケースに分けて求めた。

2. 3 漏水変状の評価区分

これまでのトンネル点検による漏水の発生状況、壁面の漏水の痕跡等の変状、漏水させやすい地質性状及び電気探査による比抵抗分布の関係を比較して、トンネル覆工コンクリート背面の水理地質構造を統合的に分析した。その結果から、トンネルの水理地質構造を踏まえた統合的な漏水変状を区分するための評価手法をフロー図としてまとめた。

3. 研究結果

3. 1 漏水の発生状況

3. 1. 1 漏水の発生箇所

図-1、図-2にトンネルの漏水の発生部位と発生割合、トンネルの縦断に10分割した各区分における614の漏水の発生数を示す。

トンネルの漏水は、その66%がアーチ部、31%が側壁部で発生していた。

トンネルの縦断方向別にみた漏水の発生区分は①と⑩の坑口部で230あり、全体の37%を占めた。

以上から、主に坑口付近やアーチ部で漏水の発生が多いという特徴があり、冬期間ではトンネル坑口周辺部の路面凍結による通行への影響、また、漏水の点検時に優先的に着目すべき場所であることが分かった。

3. 1. 2 土被り厚さと支保工間隔に応じた漏水

図-3に矢板で建設されたトンネルの土被り厚さと支保工間隔別の漏水の発生割合を示す。まず、土被り厚さが1D未満の場合、各支保工間隔での漏水の発生割合は63~71%、2D以上の場合は49~69%となり、前者で漏水の発生がやや多い傾向である。土被り厚さが1D未満で支保工間隔が75cm未満の場合、漏水の発生割合は71%である。この条件は地山の浅部であり、トンネル坑口周辺部等での掘削による緩みが大きい³⁾。

そのため、透水性が大きく、地表水がトンネルへ浸透しやすくなった場所と考えられる。土被り厚さが2D以上で支保工間隔が90cm以上の場合、漏水の発生割合は49%である。この条件は比較的地山の深部であり、支保工間隔が大きく地質も良好と想定される。ただし、トンネル周辺に地層境界や断層等に伴う地下水が存在すると³⁾、漏水としてトンネル内に現れていることが原因と考えられる。また、近傍での河川の存在や沢の

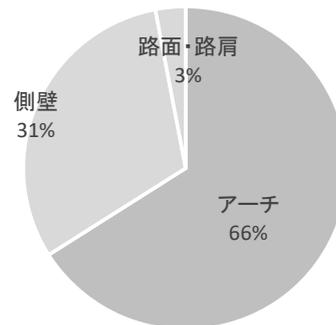


図-1 トンネルの漏水の発生部位と発生割合

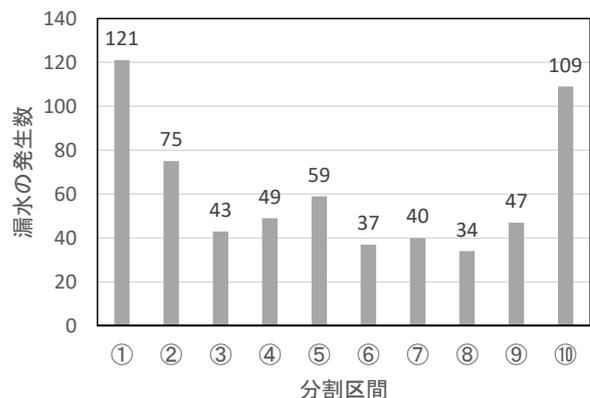


図-2 縦断方向に10分割した各区分の漏水の発生数

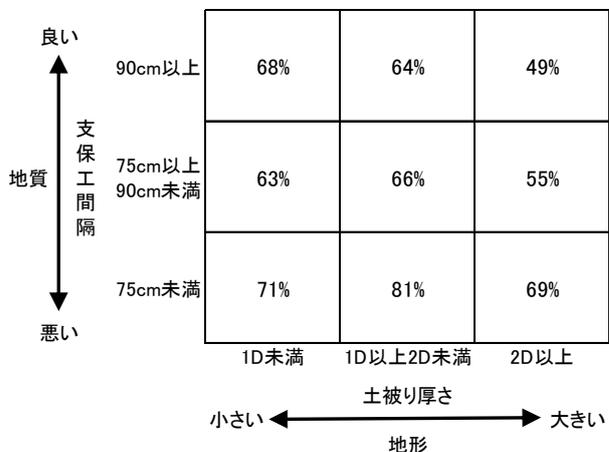


図-3 土被り厚さと支保工間隔別の漏水の発生割合

横断部であれば、地山の地下水が漏水としてトンネル内に現れる⁴⁾ことも原因と考えられる。また、支保工間隔が75cm未満の場合、各土被り厚さでの漏水の発生割合は69～81%、90cm以上の場合は49～68%となり、前者で漏水の発生がやや多い傾向である。

以上から、土被り厚さと支保工間隔の関係にトンネルの地形地質情報を加味することで漏水させやすい地質を判断する目安になると考えられる。

3. 2 漏水の計測結果

3. 2. 1 モデルトンネルの地質と湧水量の測定結果

図-4に水平ボーリング調査によるコアの産状、湧水量、亀裂観察結果（割れ目頻度、開口幅）を示す。

ボーリング調査の結果、深度0～20mに自破碎安山岩、深度20～40mに安山岩が分布していた。自破碎安山岩は、熱水変質作用を受けて岩芯まで変質していた。また、安山岩は硬質で亀裂を多く有していた。

亀裂観察の結果、孔壁のヘアークラックは深度15mから多く、開口割れ目は深度22mから多くなった。また、湧水量は開口幅10mm以上の割れ目が存在する32～36m区間で最大毎分156リットルを示した。

以上のように、モデルトンネルの事例では、軟質で亀裂の少ない地質で湧水が少なく、硬質で亀裂の多い地質で湧水が多いという特徴がある。

3. 2. 2 坑内での電気探査結果

1) トンネル路盤下の比抵抗分布

図-5にトンネルの地質断面図、路盤下の比抵抗分布、トンネル施工時に確認された湧水の発生箇所を展開図、

トンネル漏水防止板設置前の漏水の発生箇所の展開図、及び本調査時の漏水発生箇所と漏水防止板の設置区間を示す。

トンネルの地質は起点側坑口から測点950m付近まで軟質な変質安山岩～凝灰角礫岩、950m付近から終点側坑口は硬質な安山岩溶岩が分布している。

比抵抗値の分布は、浅部2m程度までがトンネル全線が高く、2～4mで低い。この浅部の高い比抵抗部は舗装や路盤部に対応すると考えられる。また、測点230～320、420～500の深部でも相対的に高い区間がある。

併せて、測点850～1,400mの深部では、トンネルの地質断面図でも確認できるように安山岩溶岩の分布区間に対応して比抵抗値が高くなっており、これは、岩盤の劣化や風化の違い、異なる地質が分布している影響等、比抵抗値の違いは地質の違いに対応していると考えられる。ただし、変状箇所①～④の深部はインバートやアンカー等の変状対策に用いた部材が導電体となり、低い比抵抗値を示していることも考えられる。

2) 岩石の飽和度と比抵抗

図-6に24試料のコアにおける岩種別の飽和度と比抵抗値の測定結果を示す。岩種は安山岩、石英安山岩、及び変質した安山岩である。飽和度が高いと比抵抗値が低い傾向にある。また、石英安山岩でも変質したものは比抵抗値が低かった。

3) トンネルの漏水状況と比抵抗分布

トンネルの施工時に湧水は起点側と中間付近で生じたほか、測点800m付近でも生じていた。一方、漏水

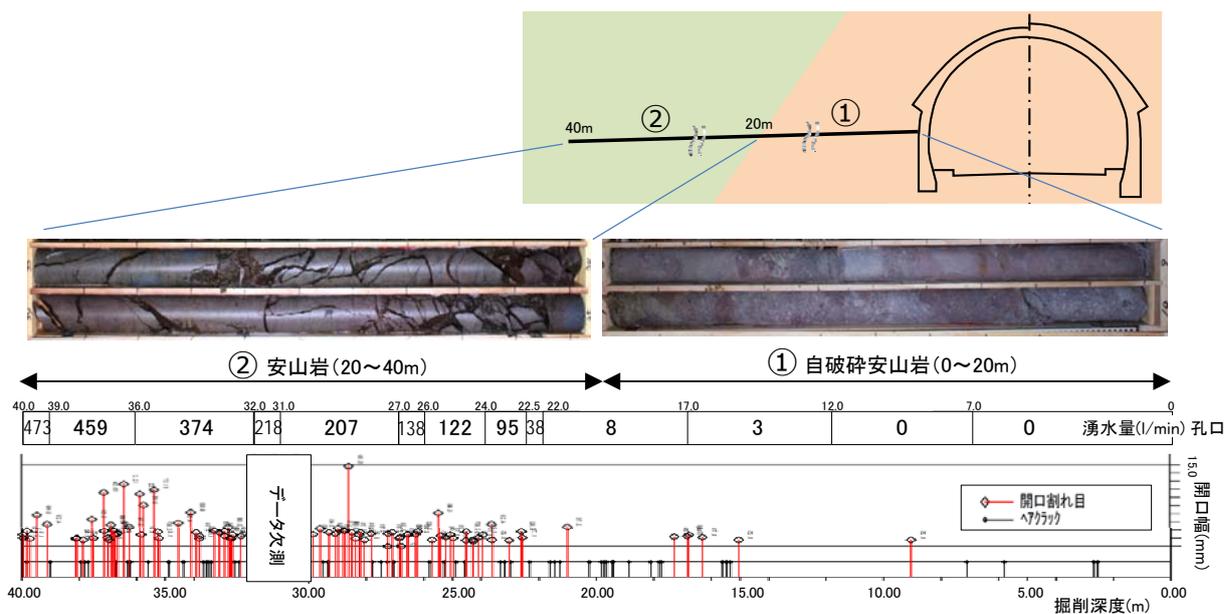


図-4 水平ボーリング調査によるコアの産状、湧水量、及び亀裂観察結果の比較

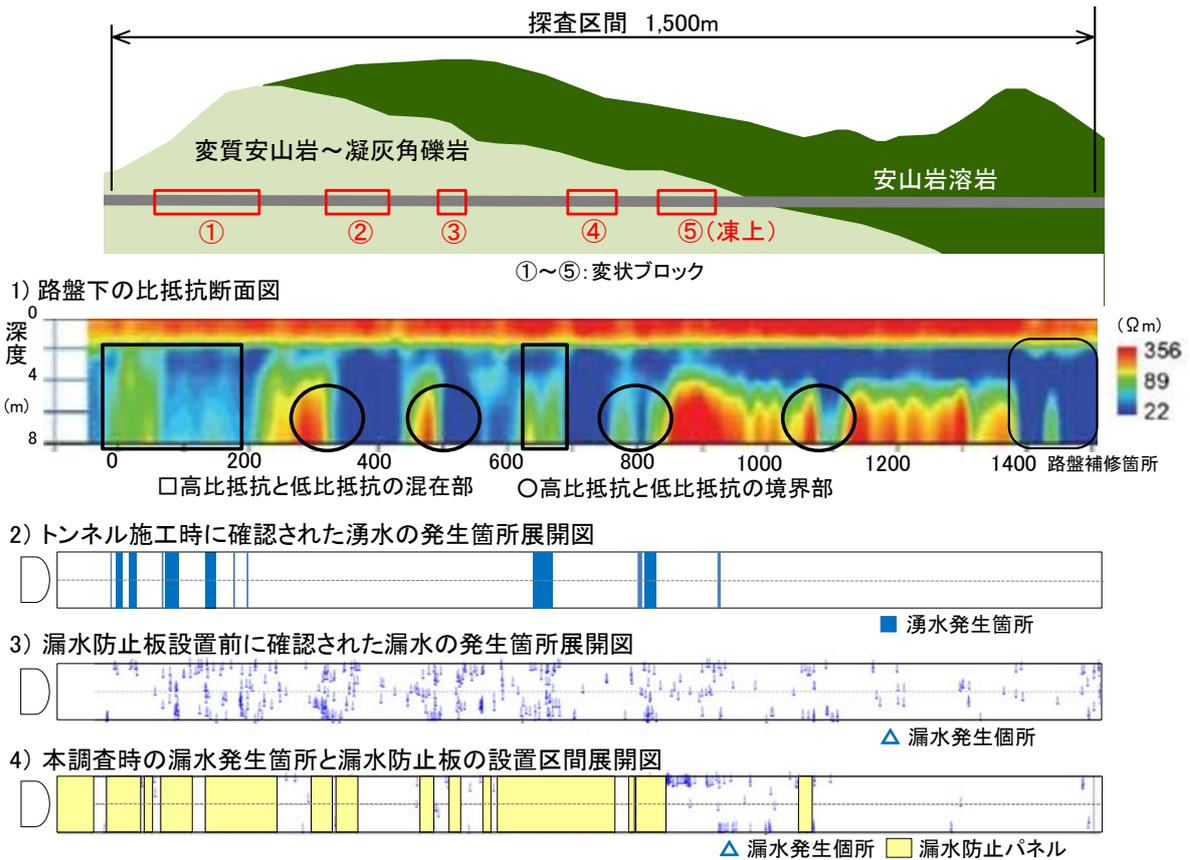


図-5 トンネルでの電気探査の結果と漏水の発生状況の比較

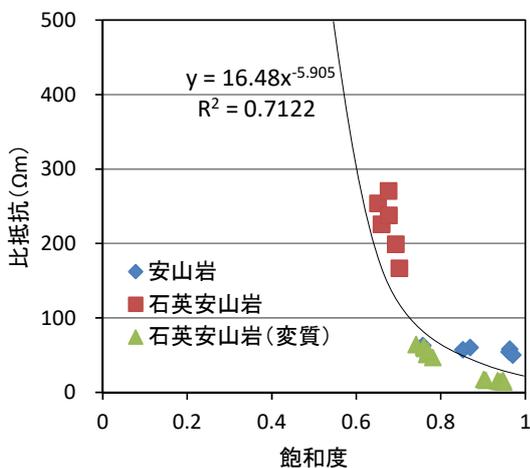


図-6 岩種別のコアの飽和度と比抵抗

防止板設置前に確認された漏水は、ほぼトンネル全線で確認されたが、トンネルの起点側～中間付近で多い傾向にある。このことは、現状の漏水発生箇所と漏水防止板の設置区間と調和的である。そこで、この湧水や漏水の発生箇所と、比抵抗の分布を比較した。起点側坑口～測点 200m までの坑口周辺部で施工時に湧水

が確認されたほか、過年度に覆工からの漏水があり、漏水防止板も設置されている区間である。この区間での比抵抗は概ね 100Ωm 以下であるが、相対的に高い値と低い値が混在している。このような漏水状況と比抵抗の状況は測点 620～700m でも同様な傾向である。

次に、測点 300～370m、及び 460～530m の区間では、施工時に湧水は確認されていないが、過年度に覆工での漏水が確認されたほか、漏水防止板も設置されている。両区間の比抵抗は、相対的に高い値の近傍に低い値が存在する境界部に対応した。前節で述べたとおり、変質や風化の進行した軟質な岩石の存在する区間では地下水が少なく、亀裂が多く硬質な岩石の存在する区間で地下水が多い状態である (図-4)。前者では比抵抗が低く、後者では比抵抗が高いことに対応していることは、岩種別のコアの飽和度と比抵抗の関係 (図-6) からも説明できる。すなわち、軟質で比抵抗の低い岩石が存在すると、その周辺では地下水の流動が妨げられ、選択的に流動しやすい経路を地下水が流れ、その経路にトンネルが存在すると坑内に漏水として現れると考えられる。ただし、施工時には湧水が確認されなかったことから、地下水の状態は経時的に変化してい

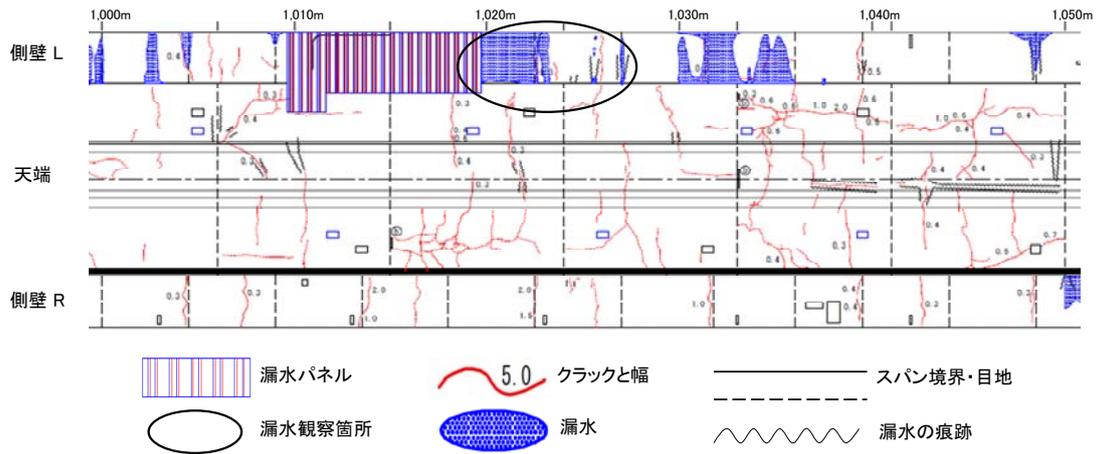


図-7 トンネルの点検結果の展開図（起点坑口から 1,000～1,050m の区間）と漏水の観察箇所

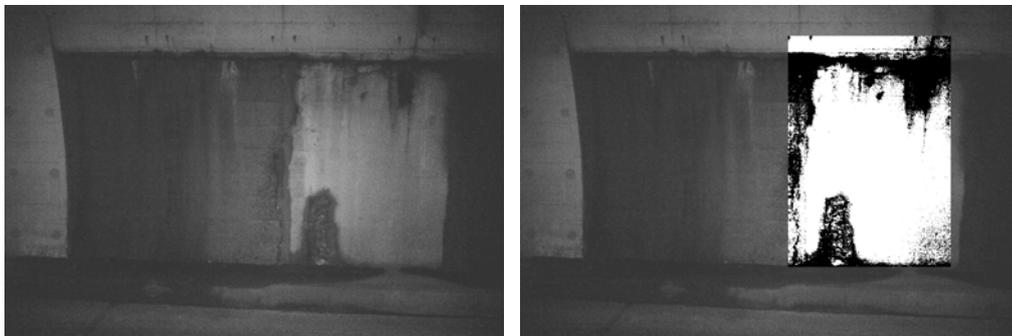


写真-3 撮影画像の処理例（撮影画像と分析範囲（左）、2 値化後の状況（右））

ると考えられる。

その他、測点 800m 周辺では施工時に湧水が確認され、漏水防止板が設置されている。また、測点 1,100m 周辺では、施工時に湧水は確認されていないが、漏水防止板は設置されている。これらの区間も相対的に高い値の近傍に低い値が存在する境界部に対応する。このような高い比抵抗のなかで低い比抵抗として確認できる箇所では漏水が生じていた。

以上から、モデルトンネルにおける漏水は、比抵抗が相対的に混在する区間、また高比抵抗と低比抵抗の境界部において発生していることが分かった。

3. 2. 3 暗視カメラによる画像撮影結果

図-7、写真-3 に画像撮影箇所とその周辺のトンネル点検結果の展開図及び撮影画像の解析処理例を示す。

撮影箇所では漏水防止板の近傍で常時漏水が発生していた。この箇所で撮影した画像を 2 値化すると、湿潤状態に対応する黒色部のピクセル数が面積に占める割合は 28.1%であった。

図-8 の上段にトンネル坑内の温度、湿度及び外気温

を示す。測定期間の外気温は、最高 30.5℃、最低-15.6℃、平均 7.1℃であった。また、トンネル坑内の温度は最高 20.8℃、最低-6.8℃、平均 5.8℃であり、5 月中旬まで外気温よりも高いが、その後、低い状態が多く続いた。

また、トンネル坑内の湿度は最高 94.1%、最低 27.1%、平均 69.7%であり、5 月中旬まで概ね 40～80%であったが、その後、90%を超える状態が多く続いた。

その他、本トンネルの地山の温度は、覆工表面から 8m 以上の深部において、年間を通じて 13℃程度と一定しており⁵⁾、その近傍の湧水の温度も 10℃程度と一定しており、大きな変化はなかった。

図-8 の下段及び写真-4 の a) ～f) に、トンネル覆工表面の湿潤割合と雨量、トンネル坑内の観察箇所における漏水の変化状況を示す。トンネル覆工表面の湿潤割合は、10 月上旬から 5 月下旬まで概ね 20%以下であった。また、湿潤割合は、11 月中旬に高い値を示したが、12 月中旬に低い値となるような長期的な変化を繰り返していた。

観測箇所においては、12 月下旬から 3 月中旬では

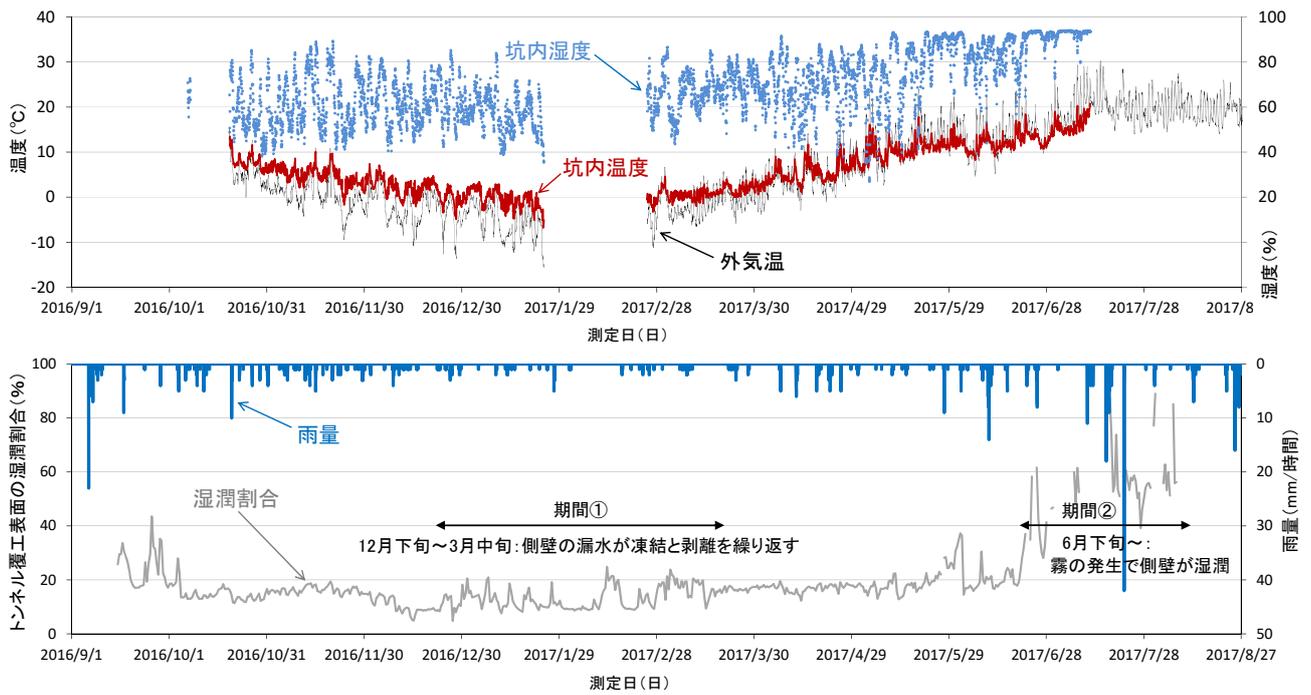


図-8 トンネル坑内の温度、湿度、外気温（上）、観察箇所のトンネル覆工表面の湿潤割合と雨量（下）

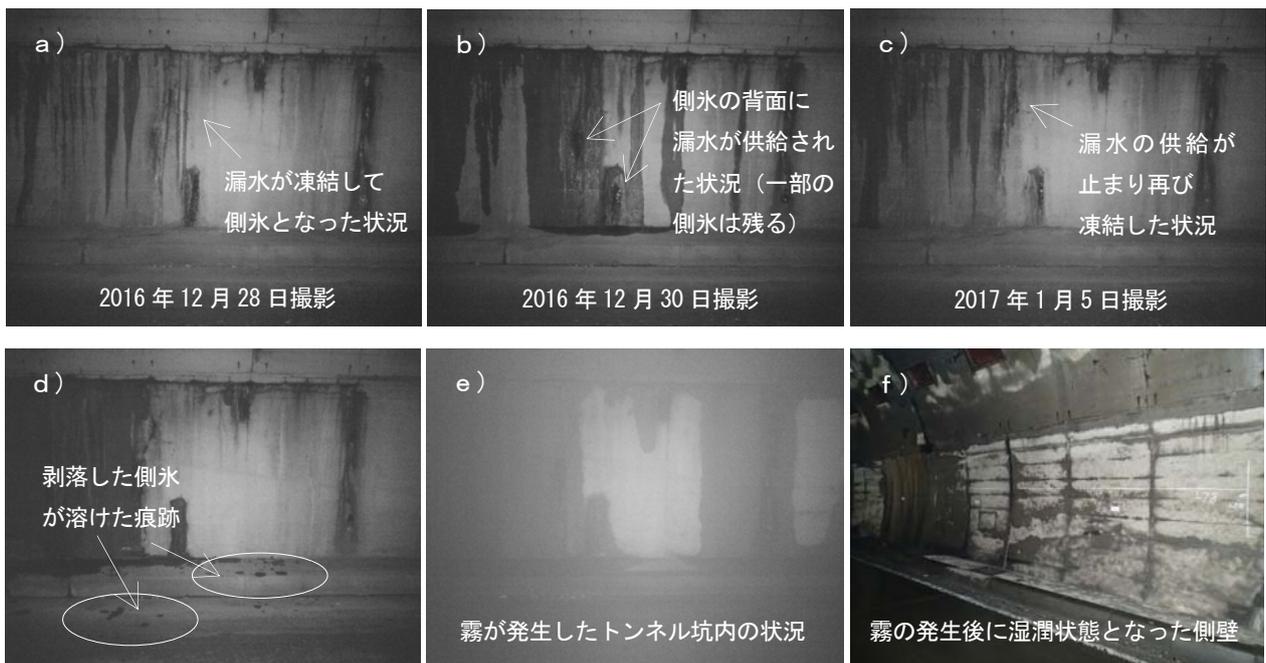


写真-4 観察箇所における漏水の変化状況

（期間①）、漏水が凍結と剥離を繰り返す状況を撮影画像で確認した（写真-4 a）～c）。この期間はトンネル坑内の温度が 0°C よりも低くなることが多く、漏水は凍結するが、その背面に 0°C 以上の漏水が供給される。坑内の温度は 0°C より高くなることもあり、凍結した側氷は側壁から分離剥落したと考えられる（写真-4

d）。また、湿潤割合は、低い値から高い値に変化し、その後、再び低い値となるような変化を 3～9 日の周期で繰り返し生じていることを確認した。ただし、この観察箇所では、これまでの調査で常時漏水の発生を確認していた。しかし、本研究で連続かつ長期に漏水量を調査したことで、漏水量の変化が繰り返され、凍結

と剥離が周期的に繰り返されていることが分かった。

次に、3月中旬以降では、漏水は凍結せず、トンネル覆工表面の湿潤割合は、5月中旬まで徐々に増加した。その後、坑内の湿度は高くなり、気温は外気温よりも低い状態となった。

さらに、6月下旬以降、湿潤割合は、より高い値を示した(期間②)。この期間は、トンネル坑内に霧が発生することが多く、暗視カメラで漏水状況を撮影できないことがあった(写真-4 e)。また、この時期は、霧による細かな水滴が覆工表面に付着して湿潤割合が高くなり(写真-4 f)、漏水の発生状況を把握できないことがあった。なお、今回の観察箇所では、湿潤割合と雨量に明瞭な相関はみられなかった。

以上から、このような定点での計測や観察を長期に

行うことで、漏水の発生状況をよりの確に把握でき、維持管理の上で補修や対策を検討する際の有用な情報になることが分かった。また、不定期な点検で見逃されていた可能性がある漏水の特徴や発生箇所を把握することもできる。

3. 2. 4 車載カメラによる動画撮影結果

表-1に各撮影日における漏水面積と、任意に設定した期間毎の積算雨量及び実効雨量を示す。トンネル坑内の漏水面積は撮影日③で189 m²と最小であり、雨撮影日⑤で463 m²と最大であった。

写真-5に撮影日③と⑤の同一区間における連続展開画像を示す。撮影日③は積雪期であり、地下水の供給は少なかったと考えられる。一方、撮影日⑤は夏季で⑤にはトンネル深部(起点側坑口から300m周辺)で

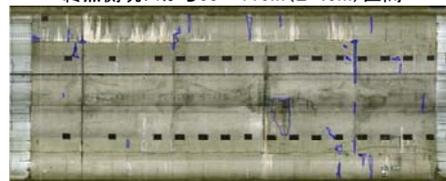
表-1 トンネル覆工の漏水面積と降水量

撮影日	期間	漏水面積 (m ²)	各設定期間の降水量(積算雨量と実効雨量:mm)											
			3日		5日		7日		14日		21日		28日	
			積算	実効	積算	実効	積算	実効	積算	実効	積算	実効	積算	実効
① 2017/10/31	秋季	299	28.0	20.3	28.0	23.0	28.5	24.6	71.0	50.9	103.5	74.1	106.5	81.8
② 2017/11/29	秋季	322	4.5	2.3	8.0	4.9	26.5	15.4	66.5	42.9	132.0	85.0	144.5	144.5
③ 2018/1/24	積雪	189	5.0	3.7	7.5	5.6	11.0	8.0	41.5	27.5	79.5	53.2	96.0	67.7
④ 2018/4/20	融雪	355	0.0	0.0	7.0	3.5	7.0	4.3	13.5	9.3	18.5	13.3	22.0	16.2
⑤ 2018/7/17	夏季	463	51.5	32.8	53.0	40.1	80.0	57.6	179.0	118.9	237.5	169.1	251.5	190.9
⑥ 2018/8/23	夏季	325	38.0	27.5	38.5	31.6	65.5	47.0	135.0	95.3	135.0	106.4	135.0	112.7

a) 2018年1月24日撮影(③) 起点側坑口から220~300m(L=80m)区間



終点側坑口から65~110m(L=45m)区間



b) 2018年7月17日撮影(⑤) 起点側坑口から220~300m(L=80m)区間



終点側坑口から65~110m(L=45m)区間

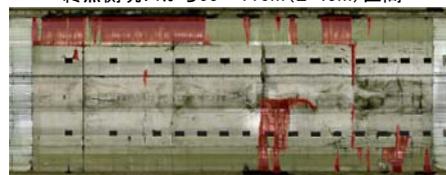


写真-5 トンネル覆工表面を撮影した連続展開画像の例(着色部:面積を求めた漏水の発生箇所)

表-2 降水量とトンネル漏水面積との相関係数

ケース	使用データ	設定期間(日)	3	5	7	14	21	28
A	全撮影結果 ①②③④⑤⑥	積算雨量(mm)	0.51	0.58	0.59	0.58	0.58	0.55
		実効雨量(mm)	0.48	0.54	0.57	0.57	0.58	0.54
B	積雪・融雪期を除く 撮影結果 ①②⑤⑥	積算雨量(mm)	0.59	0.63	0.69	0.75	0.89	0.88
		実効雨量(mm)	0.52	0.58	0.67	0.73	0.88	0.85

あり、降雨の影響が強いと考えられる。また、撮影日あるが、漏水が発生している。

表-2 に各ケースの降水量（積算雨量と実効雨量）と漏水面積の相関係数を示す。まず、各ケースの積算雨量と実効雨量別の相関係数をみると、ケース A の積算雨量は 0.51～0.59、実効雨量は 0.48～0.58 であり、積算雨量で大きかった。しかし、必ずしも相関が良いとはいえない。この原因は、ケース A の撮影日③と④のような積雪期や融雪期の情報、すなわち、地盤に融雪水や降雨が浸み込まない時期の情報を含んでいることに一因がある。

そこで、ケース B において、融雪や降雨が浸み込まない時期を除き、積算雨量と実行雨量を計算した。その結果、ケース B の漏水面積との相関係数は、積算雨量で 0.59～0.89、実効雨量で 0.52～0.88 であった。両者の値は同程度であるが積算雨量で大きい傾向であった。しかも、ケース B において、設定日数ごとの積雪雨量と実効雨量の相関係数をみると、ともに設定日数の増加にあわせて値が大きくなることから、降雨と関係していることを確認できた。また、21 日目の値が大きかった。これは、本トンネルでは 21 日間の降水量が漏水の発生と関係が強いことを示している。

したがって、積雪や融雪以外の時期に 21 日間で 100～240mm 程度の積算雨量があれば（表-1）、本トンネル坑内では漏水量が多くなる状態になると考えられる。そのタイミングで漏水の観察を行うことで、効率的に漏水の特徴等の情報を取得できると考えられる。

3. 3 漏水変状の評価

3. 3. 1 漏水変状の評価区分

トンネルの長寿命化のためには、トンネルの漏水に着目した点検の頻度や質を高めること、対策実施の優先度の高い場所を計測や連続監視することによって、より精度良く漏水変状の区間を選定することが必要である。そこで、現状のトンネル点検において、漏水の発生場所、主な発生現象、漏水の度合い及び利用者への影響の組み合わせから判定された結果を優先するものであるが、本研究では、そこにトンネルの覆工背面の地山における水理地質構造を踏まえた統合的な漏水変状を加味した評価区分を提案した。

トンネル覆工表面の漏水や痕跡等の変状の有無、漏水させやすい地質の存在及び低い比抵抗が分布する現地の状態を要素として区分した（図-9）。これらの三要素は、点検や調査計測時点において、背面地山の有する漏水の発生ポテンシャルを推定するための要素として選定した。

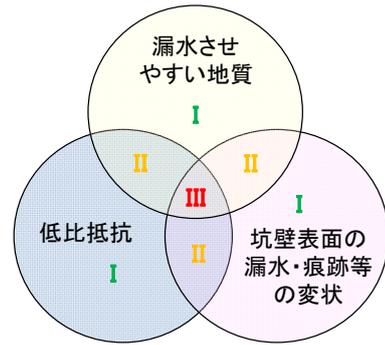


図-9 トンネルの漏水の発生に関わる要素

表-3 トンネルの漏水変状の評価区分

区分	対応
I	漏水は少ないが重点的に点検する区間
II	漏水させやすく重点的に監視する区間
III	漏水が著しく対策の検討が必要な区間

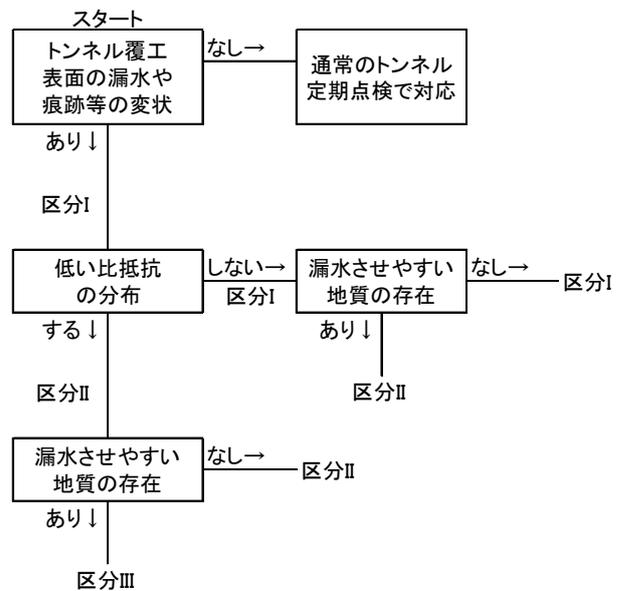


図-10 トンネルの漏水変状の評価区分のフロー図

表-3 に漏水変状の評価区分を示す。評価区分は I～III の 3 つの区分とした。図-9 に示すように、三要素の組み合わせから、漏水の状態とその状態に基づく対応が必要となる区間として示した。なお、区分 I は各要素が複合していない状態であり、漏水は少ないが重点的に点検する区間とした。次に、区分 II は 2 つの要素が組み合わせられる状態であり、漏水させやすく重点的に監視する区間とした。さらに、区分 III は 3 つの要素が全て組み合わせられる状態であり、漏水が著しく対策の検討が必要な区間とした。ただし、個々のトンネルで

の漏水の発生状況や、その特徴は異なる場合があるので、今後、適用例を増やし検証が必要である。

3. 3. 2 漏水変状の評価フロー図の提案

前項で示した3つの要素をもとに評価区分するためのフローを示す(図-10)。

まず、フローではトンネル覆工表面の漏水や痕跡等の変状の有無をもとに通常のトンネル定期点検で対応する区間、または区分Ⅰの区間となる評価区分を判定する。この判定では、事前に入手可能な既存の調査や点検に関する資料、地形地質情報、補修履歴や発生位置の情報をを用いる。また、必要に応じて本研究で示した方法等によって、季別や降雨後の漏水量、漏水発生箇所の変化を調べるとともに、その結果を判定のための情報とする。

次に、区分Ⅰに判定後の点検において、漏水量や発生箇所が増加する傾向が確認される場合、必要に応じて本研究で示した非破壊での電気探査によって比抵抗分布を調べ、不可視部分の地山の地質性状を推定するとともに、相対的に低い比抵抗が分布するかどうかを判定する。この判定で、低い比抵抗や高い比抵抗との混在部、両者の境界部など分布が分かれば、評価を区分Ⅱの区間とする。

さらに、トンネル覆工背面の地質状況を、ボーリング調査、コア等による地質状況の確認、湧水量や湧水圧の確認等により、調査時点におけるトンネルの覆工背面の地山の地質状況を明らかにすることで、漏水させやすい地質であるかどうかを判定する。この判定で、漏水させやすい地質であることが分かれば、評価を区分Ⅲの区間とし、対策を必要とする区間やその方法について検討する。

これらの区分により、トンネルの漏水に着目した点検の頻度や質を高めるとともに、漏水の対策実施の優先度の高い場所を選定することが必要である。

4. まとめ

本研究で得られた知見は次のとおりである。

1) 北海道の国道262本のトンネルの点検結果から漏水の発生箇所を分析した結果、漏水の点検時において優先的に着目すべき箇所は、坑口周辺部や土被り厚さの小さい区間であることが分かった。また、河川近傍や沢の横断部でも漏水を発生させやすいと考えられる。さらに、暗視カメラや動画撮影等によって漏水変状を観察することで、点検で見逃されていた漏水の発生の特徴や発生箇所を抽出できることが分かった。

2) トンネルの掘削で緩みが生じている箇所、断層や地層境界部が存在するなどの地質情報を加味することで漏水させやすい地質を判断する目安になる。

3) モデルトンネル坑内で電気探査を行い、得られた比抵抗分布と坑内の漏水発生状況を比較した結果、比抵抗が相対的に混在する区間や、高比抵抗と低比抵抗の境界部で漏水が発生していることが分かった。特に、軟質で比抵抗の低い岩石が存在すると、そこでは地下水の流動が妨げられ選択的に流動しやすい周辺での経路を地下水が流れ、坑内に漏水として現れる。

4) 以上の結果から、トンネル覆工表面の漏水や痕跡等の変状の有無、漏水させやすい地質の存在、低い比抵抗の分布状況の三要素をもとに、漏水変状の評価区分とフロー図を提案することができた。

今後は、多様な地質を地山とするトンネルでの調査、また、トンネルの漏水に着目した点検の高度化や長寿命化に向けて、道路パトロールや雪庇処理等の作業時に発生場所や漏水状況等の情報を効率的に蓄積することについても研究を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局国道・防災課：道路トンネル定期点検要領，pp.47-50，2014.
- 2) 矢野勝太郎：前期降雨の改良による土石流の警戒・避難基準雨量設定手法の研究，新砂防，Vol.43，No.4，pp.3-13，1990.
- 3) 土木学会：トンネルの地質調査と岩盤計測，pp.35-46，pp.170-181，1983.
- 4) 大島洋志：トンネル掘削に伴う地下水問題，応用地質，Vol.38，No.5，pp.312-323，1987.
- 5) 丹羽廣海・村山秀幸・岡崎健治・伊東佳彦：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，土木学会，第44回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.143-148，2016.

A STUDY ON HYDROGEOLOGICAL INSPECTION METHOD OF LEAKAGES BEHIND THE TUNNEL WALL

Research Period : FY2015-2019

Research Team : Cold-Region Construction
Engineering Research Group
(Geological Hazards)

Author : KURAHASHI Toshiyuki
OKAZAKI Kenji
OBINATA Akihiko

Abstract : In this study, we conducted the electrical resistivity survey on the tunnel pavement and monitored leakages on the tunnel wall by night vision camera. It resulted that the low resistivity values corresponded with leakages and the trace of leakages. We clarified the hydrogeological structure of the tunnel ground that causes water leakage behind the tunnel wall. Besides, we proposed a tunnel hydrogeological inspection method.

Key words : tunnel, geology, hydrogeological inspection method, leakage