

低土被りの山岳トンネル工事における調査・施工

－ 国道 6 号勿来トンネル工事 －

Survey and Construction a Mountain Tunnel with Low Earth Cover

土岐純也*1 桐木俊之*2

概 要

本工事は、国道 6 号の茨城・福島県境付近における渋滞緩和、津波浸水区間の回避を目的として整備が行われている勿来バイパスのうち、福島県区間のトンネル工事である。全長 L=779m のトンネルを NATM 工法で掘削するもので、全線において支保パターンは D I および DIII a となっており、低土被り区間が存在する。

本報では、低土被りのトンネルにおける地質調査・補助工法の選定およびインバートコンクリートにおける湿潤養生について報告する。

key words : 電磁探査、低土被り、早期閉合、インバート養生

1. はじめに

一般国道 6 号は東京都中央区から宮城県仙台市を結ぶ浜通り地方の主要幹線道路で、勿来バイパスは茨城・福島県境付近における渋滞緩和、津波浸水区間の回避を目的に茨城県北茨城市関本町関本中から福島県いわき市勿来町四沢鍵田までの延長 4.4km のバイパス事業である（図-1）。

本工事は、勿来トンネル（全長 779m）のうち、524.1m を NATM 工法で建設する工事である（図-2、写真-1）。地質は砂岩、シルト岩、シルト岩と砂岩の互層からなっており、地山強度は低いとの想定のもと、トンネルの支保パターンは全線において D I と DIII a で構成されている。

2. 工事概要

工事名称：国道 6 号勿来トンネル工事

施工場所：福島県いわき市勿来町関田地内

発注者：国土交通省東北地方整備局

工期：2021年2月26日～2023年8月24日

トンネル掘削：L=524.1m(全長 779m)

NATM 工法 機械掘削



図-2 勿来バイパス事業計画



図-1 施工位置図



写真-1 勿来トンネル坑口

*1 Junya TOKI

東北支店土木部 副所長

*2 Toshiyuki KIRIKI

東北支店土木部 作業所長

3. 低土被りトンネルの安定化対策

終点側の低土被り部(L≒200m、支保パターン：DIII a)では、縦断平面とも固結度の非常に低い砂岩とシルト岩・泥岩が互層・傾斜で分布し、また、断層の可能性が高い弾性波速度の落込みが2か所みられた。表層付近では断層の影響による崩壊跡・地すべり部もみられる複雑な地層構成となっていた。このため、トンネル掘削に先行してトンネル切羽前方の地質状況と断層破砕帯の有無を把握し、最適な支保パターンと補助工法の選定を行うためのデータ収集を行うこととした。また、トンネル中間の低土被り部では早期閉合を実施した。なお、インバートコンクリートは、湿潤養生(材齢28日)を実施した。

3.1 ドローンによる空中電磁探査

ドローン空中電磁探査は、時間領域電磁探査法(TDEM法[Time domain electromagnetic methods])の一つで、急激に変化する磁場を測定、解析することにより、地下の比抵抗構造を求める探査方法である(図-3)。

地上に設置した送信源から発生する誘導磁場を、ドローンから吊り下げた磁場センサーで磁場の過渡応答を連続測定し、GPSデータとともに収録する。可探深度は100~200m(地盤の比抵抗による)となる。測定飛行は、200m×80mの範囲とし、設定した測線に沿って対地高度30~50mで行う(図-4)。

使用する機器は、地上送信装置と空中の測定装置からなり(写真-2)、地上には送信源となる送信アンテナ(送信ケーブル)、送信電極、発電機等を設置し、送信機から大地に電気を流し測定する。

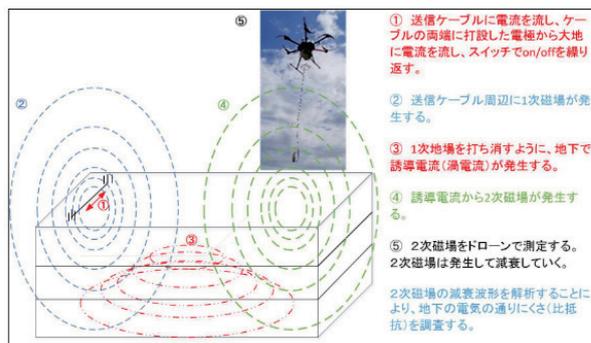


図-3 ドローン空中電磁探査測定原理

種別	測線数(本)	備考
測線本数	主測線(縦断)5本、交差測線(横断)11本	
測線距離	主測線 200m×5本=1000m 交差測線 80m×11本=880m	
測線間隔	主測線 20m、交差測線 20m	
調査範囲	200m×80m (16,000m ²)	



図-4 測線詳細、飛行測線平面図



写真-2 送信装置(左)、測定装置(右)

既往調査のトンネル地質縦断図と比較した比抵抗分布図を図-5に示す。比較図から、地質構造と比抵抗構造は調和的であり、比抵抗断面の低比抵抗部は地質断面ではシルト岩優勢砂岩互層に該当する。測点No.135付近の表層部分に高比抵抗が分布しているが、これは地質断面図ではシルト優勢砂岩互層の強風化部と判定されており、既往調査の地質縦断図と相違がないことが確認された。

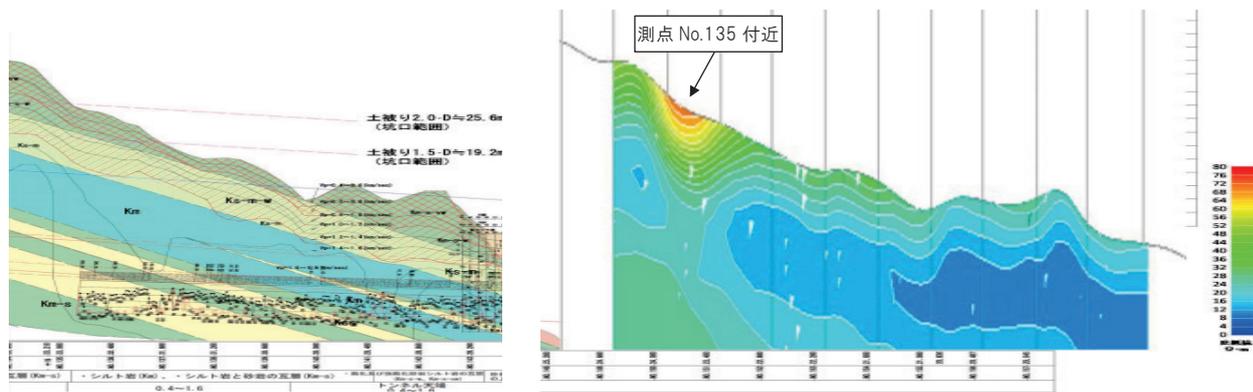


図-5 比抵抗断面図比較図

3.2 水平・放射ボーリング (PS-WL 工法)

トンネル切羽前方の地質状況の把握は、短時間で調査できるPS-WL工法による水平・放射ボーリングを行った。実施内容は、1回目 終了点坑外から起点側へ95m区間、2回目 坑内切羽から起点側へ95m区間でトンネル断面天端下から上向き2度(≒トンネル線形)で1本、断面側部左右から上向き2度、平面放射角10度(左右)で2本、計3本/回を2回(合計6本)のボーリングを実施した。水平・放射ボーリングの計画図を図-6に、坑内ボーリング実施状況を写真-3に示す。



写真-3 坑内ボーリング実施状況

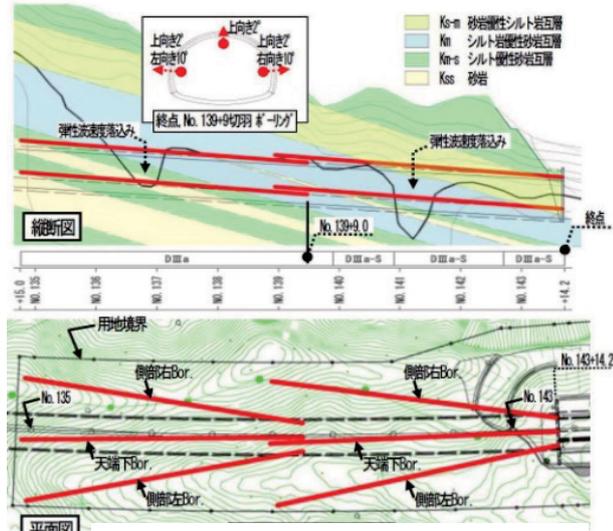


図-6 水平・放射ボーリング計画図

1回目の先進ボーリングC(中央)の砂質土、砂岩を含む深度0~57m間は、砂優勢シルト岩層(Ks-m)の分布域に、シルト岩が主体となる深度57~90m間はシルト岩優勢砂岩互層の分布域となっていた。また、先進ボーリングの深度0~57m間では所々コアが採取できていない区間が見られたが、先進ボーリングC(中央)は、地質および風化の傾向とも概ね一致していると判断した。

2回の先進ボーリングでは大半に砂質土が分布している。また、切羽観察の結果からNo.140+10付近より砂岩が分布する結果となっていた。したがって、詳細設計時はNo.137~140付近でKm(シルト岩優勢砂岩層)を想定しているが、この区間にも、砂岩が分布する可能性が高いことを確認した。

詳細設計と調査結果の比較を図-7に示す。

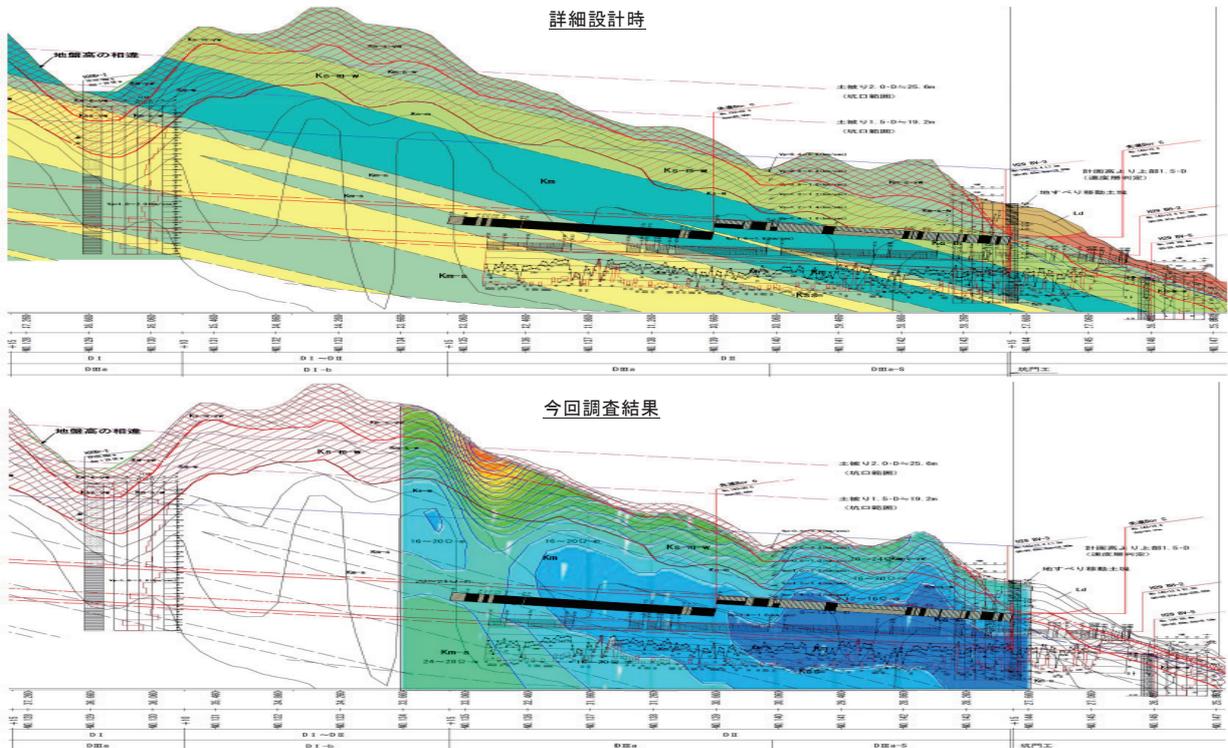


図-7 詳細設計(上段)と調査結果(下段)の比較

調査の結果、設計時点のボーリング結果とドローンによる空中電磁探査および水平放射ボーリングの結果を照合すると、詳細設計時の地質と一致しており概ね相違はないものと判断した。

補助工法の検討は詳細設計の地山物性値を基に地山の安定性の検討を行い、長尺鋼管先受工 (L=12.5m 25 本 ϕ 114.3mm t=6mm) と長尺鏡ボルト工 (L=12.5m 15 本 ϕ 73.3mm t=5.2mm) を実施することで切羽の安定が確保される検討結果となり、実際の施工において補助工法 (長尺鋼管先受工、長尺鏡ボルト工) を実施し (図-8) 切羽の安定を図り安全に施工することができた。

3.3 低土被り区間の早期閉合対策

トンネル No. 127+15.0~No. 130+10.0 の 55m 区間に存在する中間低土被り部は、断層破砕帯と推定され、近傍地表部には常時の湧水池もあり、掘削時にランドアーチが形成されず、泥濘化、膨張圧作用により変位が増大して天端崩落、出水を誘発し切羽が崩壊する等の懸念があった。

そこで、瞬結高強度吹付コンクリートを鏡吹付や上半仮インバート吹付にも使用し、下半インバートストラットの設置を実施して早期閉合しながら安全に掘削を進めた (図-9)。

具体的には、上半掘削 1m 毎に鏡吹付 (t=5cm) とアーチ側部一次吹付とともに、上半仮インバート吹付 (t=15cm)

を施工して上半掘削範囲を拘束・補強し変位を抑えた。また、上半切羽から 6m 以内で下半を 2m 機械掘削し、その後方 2m 範囲でインバート部を本設インバートの外側 (+25cm) まで機械掘削し、下半仮インバート (インバートストラット H-200 を支保鋼材と連結、下半インバート吹付 t=25cm) を施工して上下部全体を環状に閉合した。閉合後、下部仮インバートを埋戻した。以上を切羽後方 10m (0.8D) 以内で行い掘進した (図-10)。

早期補強・閉合の効果を監視するため、自動追尾トータルステーションを使用しての 3 次元リアルタイム A 計測およびレーザー距離計を使用しての鏡面の多点同時計測を行った。自動 A 計測には、トンネル坑内に常設している CyberNATM (山岳トンネル情報化施工支援システム) を用い、5m 毎の計測断面を 10 時間おきに計測した。FEM 解析を実施した断面と同じ断面にて計測を実施した。また、計測結果を、事前に実施した FEM 解析の結果と比較を行い、変位収束が遅延する場合には追加の変位抑制対策を検討するものとしたが、変位は比較的早期に収束した。

鏡面の変位計測には、レーザー距離計を 3 台使用し、鏡面の天端・左側・右側の押し出し変位をリアルタイムで計測したが、押し出しは見られず、鏡吹付の増し吹きは行わなかった。内空変位計測結果を図-11 に示す。

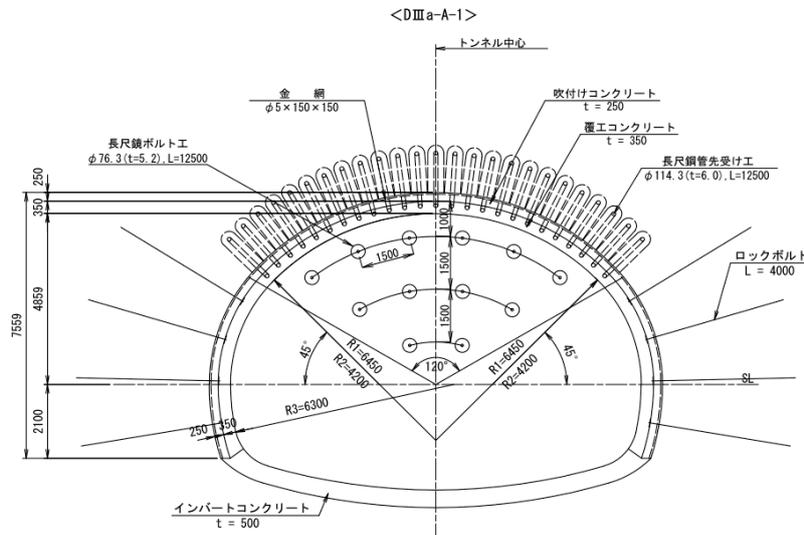


図-8 補助工法 (長尺鋼管先受工、長尺鏡ボルト工) 標準断面図

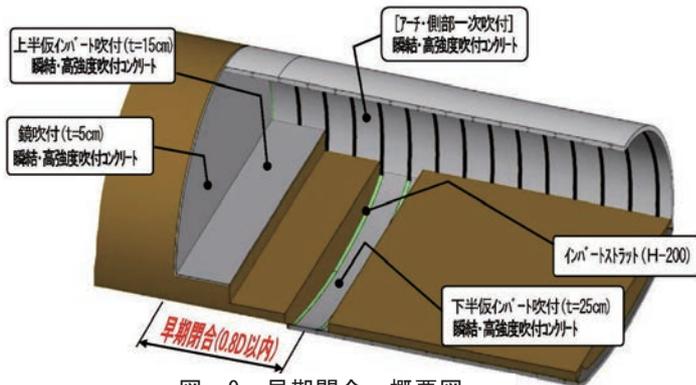


図-9 早期閉合 概要図

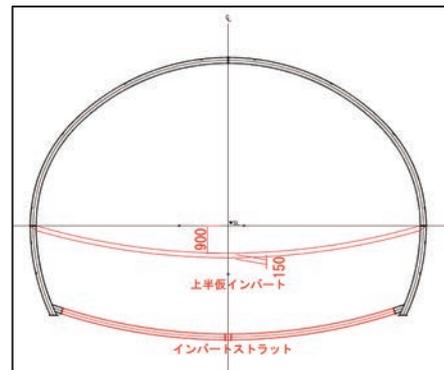


図-10 仮閉合断面図

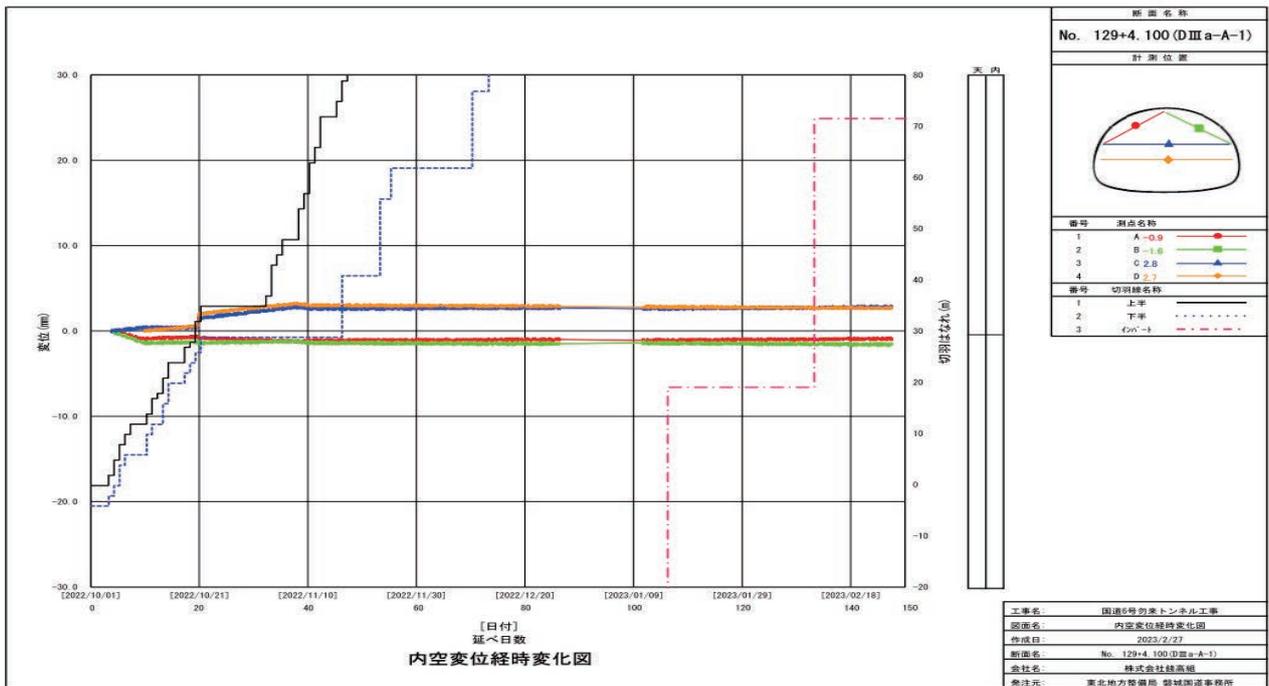


図-11 内空変位計測結果

3.4 インバートコンクリートにおける長期湿潤養生

トンネル全体の安定性を確保するためには、インバートの耐久性を高めて支保機能を向上させることが重要である。しかし、インバートコンクリートは通常、材齢 2 日程度で埋め戻すことから養生が不十分となりやすい。また、寒冷地で冬期の強度不足も懸念されるため養生対策が重要となる。そこで、材齢 28 日までの長期保温・湿潤養生により耐久性向上対策を行うこととした (写真-4)。

コンクリート打設後、アクアマット SP タイプで保温養生と湿潤養生を材齢 28 日まで実施した。温度・湿度の計測管理を実施して保温・湿潤状態を維持した。材齢 28 日までの養生には設定した管理値に対して養生水を自動給水できるシステム「養生ヘルパー」を使用した (図-12)。



写真-4 インバート湿潤養生状況

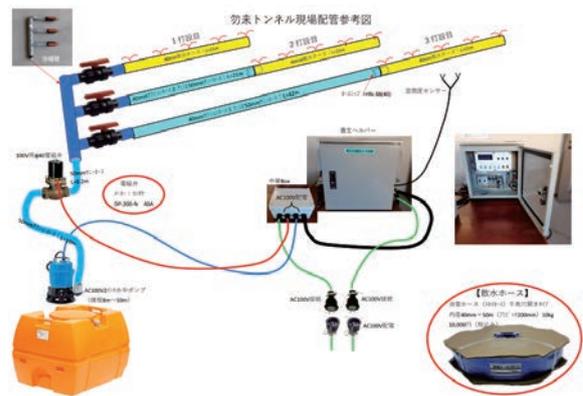


図-12 給水システム「養生ヘルパー」概要図

コンクリートの表面湿度を 95%以下で管理するためには、インバート上端(左右 2 か所)のマット内側に湿度センサーを設置し 1 分間隔で連続計測し、坑内側部に配置した給水システム配管から自動で給水した。

温度センサーも同位置に配置して、担当職員が管理用端末で保温状態(コンクリート内部・表面・坑内温度)、表面湿度、自動給水システムの稼働状況を 2 回/日確実に養生が行われていることを確認した。

また、冬期については、急激な温度低下を防ぐため養生水には温水を使用し、水温調節して表面温度 5℃以上を維持した。インバートの温度、表面湿度計測結果を図-13 に示す。

長期養生時の工事車両走路を確保するため、コンクリートを保護するエスレンブロックを配置し、その上に敷鉄板を設置した。事前解析で工事車両走行に必要なコンクリート強度を求め、熱電対による積算温度で強度を確認した後、大型車の走行を許可し、切羽作業を続けた。

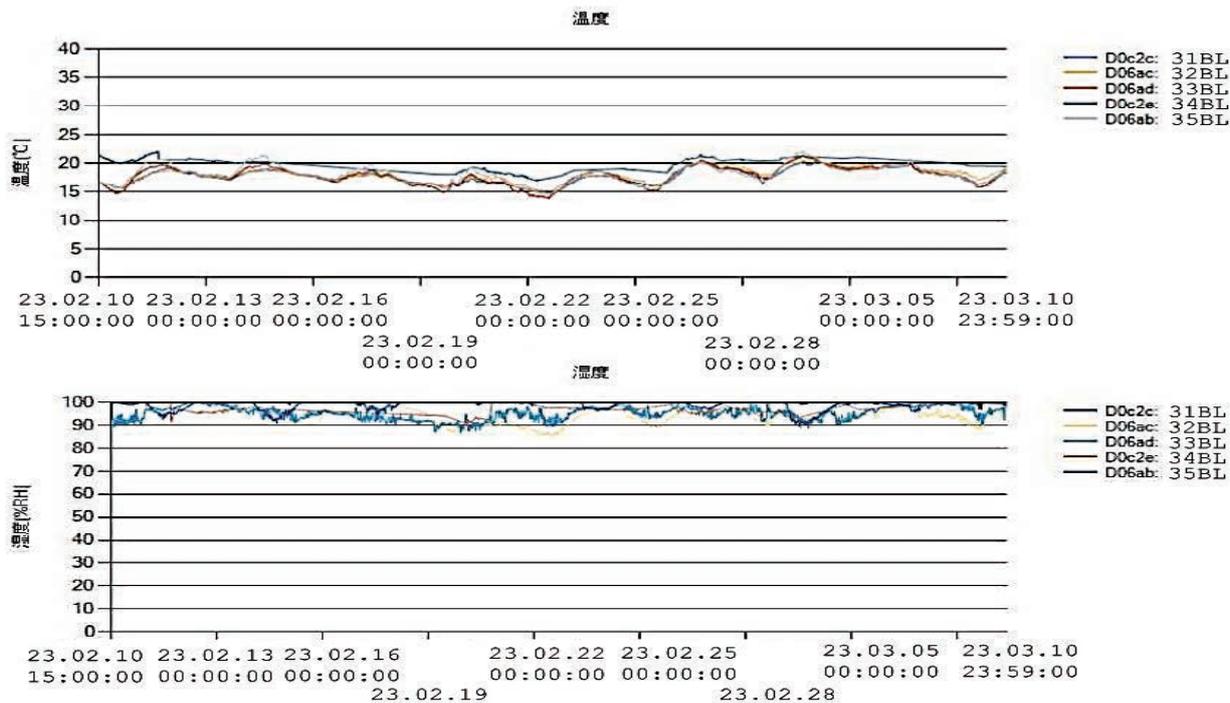


図-13 インバート温度、表面湿度計測結果

4. おわりに

低土被りが存在し、地山強度の低いと想定される場所でのトンネル施工は、事前の適切な調査・検討・対策を行うことが重要であると実感した。当初は全長 L=779m を施工予定だったが、諸事情により 524.1m までの施工となり貫通できなかったことは残念に思う。

最後に本工事に際し、ご指導・ご協力を頂いた関係者各位に対し、ここに記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 土木学会：2016 年制定トンネル標準示方書[共通編]・同解説/[山岳工法編]・同解説、2016.08
- 2) 土木学会：トンネルライブラリ第 20 号山岳トンネルの補助工法 -2009 年版- 2009.09
- 3) 日本道路協会：道路トンネル技術基準（構造編）・同解説、2013.12
- 4) 近畿地方整備局：NATM 補助工法の手引き（案）
- 5) 厚生労働省：山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン（平成 30 年 1 月 18 日改正版）