

膨張性地山における トンネルの施工実績について

宮川 直也¹・樋口 哲哉²・兼安 英紀³

¹ 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 後志工事事務所ニセコ工事課
(〒060-0002 北海道札幌市中央区北二条西 1-1)
E-mail: miyakawa.nao-3x6x@jrtr.go.jp

² 正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 北斗・八雲工事事務所八雲工事課長
(〒049-3107 北海道二海郡八雲町本町 150-1)
E-mail: higuchi.tet-7x44@jrtr.go.jp

³ 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 八雲鉄道建設所長
(〒049-3107 北海道二海郡八雲町本町 150-1)
E-mail: kaneyasu.hid-8z76@jrtr.go.jp

立岩トンネルは北海道新幹線において新八雲（仮称）駅から長万部駅間の八雲方に位置する全長17,035mの山岳トンネルである。その中で立岩トンネル（立岩）他工区では、新函館北斗起点方坑口より約5kmを施工するものである。当該工区の地質は、新第三紀中新世の海成層である訓縫層が広く分布しており、玄武岩質火砕岩、緑色凝灰岩、頁岩、砂岩および礫岩等の堆積岩で構成される。また、当該工区の地山特性として、工区の大半を占める玄武岩は熱水変質を受けているため、スメクタイトの含有量が多量であり、膨張性地山に該当する。また、一軸圧縮強度が平均30N/mm²程度であり、土被りが200m程度であることから地山強度比は0.5~7.0程度と小さい値を推移する。本稿では、立岩トンネル（立岩）他工区における膨張性地山での掘削施工及び対策工の施工実績について報告する。

Key Words: expansive ground mountain, smectite, competence factor, displacement, constructive

1. はじめに

北海道新幹線は、青森市から函館市・小樽市を經由し、札幌市に至る路線である。2016年に新青森駅・新函館北斗駅間が開業しており、現在は、新函館北斗・札幌間の整備が進行中である。

新函館北斗・札幌間の工事延長は約211.9kmであり、2014年6月に工事実施計画の認可を受け、新青森・新函館北斗間の開業から概ね15年後の完成を予定して工事を施工している。工事の内訳は、路盤が約11.4km、橋りょうが約4.3km、高架橋が27.3km、トンネルが168.9kmである。新函館北斗・札幌間はトンネルが約80%を占めており、全17箇所のトンネルで構成されている。図-1に工事位置図を示す。立岩トンネルは、新八雲（仮称）駅から長万部に向かう最初のトンネルであり、全長17,035mの山岳トンネルである。立岩トンネル（立岩）他工区はその内、新函館北斗方坑口より函館方の路盤工20m、NATMによるトンネル5,015mを施工するものであ

る。線形はR=6,500mであり、新函館北斗方から掘削を行う。掘削方式は当初、機械掘削であったが、坑口から



図-1 工事位置図

1,178mより堅硬な地山への変化に伴い、発破掘削への変更を行った。しかしながら、途中最大 5,750L/min の多量湧水の発生区間で、-130mm の内空変位を観測し、その都度計測結果、地山試料試験、X線回析の結果を参考とし、鋼製ストラット、補強ロックボルト等の掘削補助工法を実施し、適切な掘削パターンを選定を行った。

2. 工事概要

本工区の地質状況は、図-2に示す通り、新第三紀中新世訓縫層が分布しており、坑口より約400mが安山岩質凝灰角礫岩 (LMt)，続いて約1,200mの区間に玄武岩質火砕岩 (LMb)，その後1,600mに渡り頁岩、凝灰質角礫岩、緑色凝灰岩が混在 (LM・LMt) しており、以降玄武岩質火砕岩 (LMb) の分布が想定されていた。

当初、想定されていた掘削標準支保パターンの一例として I_N の断面図を図-3に示す。

当該工区では、既往の地質調査により新青森起点208km600m付近から多量のスメクタイトを含んだ膨張性地山となることが想定されていた。実施工においては207km411m付近よりスメクタイト含有量39%の地山となり、さらに地山強度比2前後、含水比2~10%以上であることに加え、土被りが200mを超え地圧が大きくなりやすい条件が揃った膨張性地山となっている。

本工区では、スメクタイト含有量試験を50mに1回の頻度で実施し、地山強度比を10mに1回の頻度で算出している。

3. 実施工における地山の状況と対策

(1) I_{N1} から I_S へのパターン変更

207km400m付近の風化及び変質を伴う玄武岩を I_{N1} にて掘削したところ、初期変位速度が30mm/日に達した。当該地点の地山強度比は1.2~3.3を示し、切羽に出現している地山が風化した玄武岩であることから地山等級 I_S と判定し、鋼製支保工 H150 (ctc1.0m)，吹付コンクリート最小厚150mm，ロックボルト 3.0m×20本とした

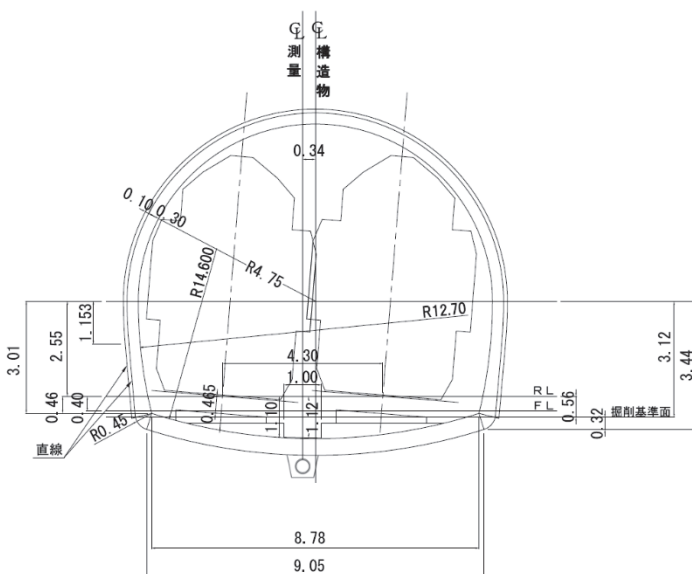


図-3 標準断面図

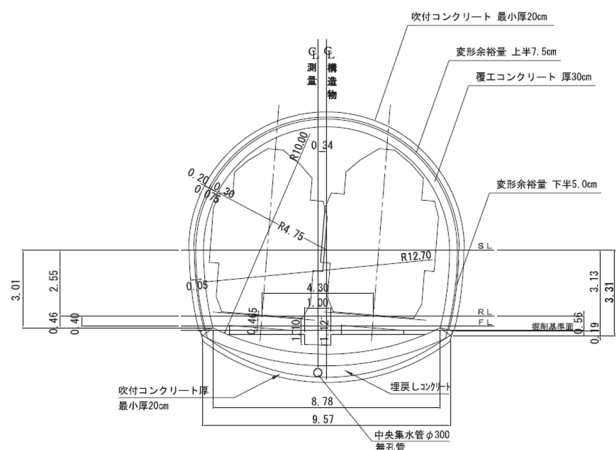


図-4 一次インポート採用標準断面図

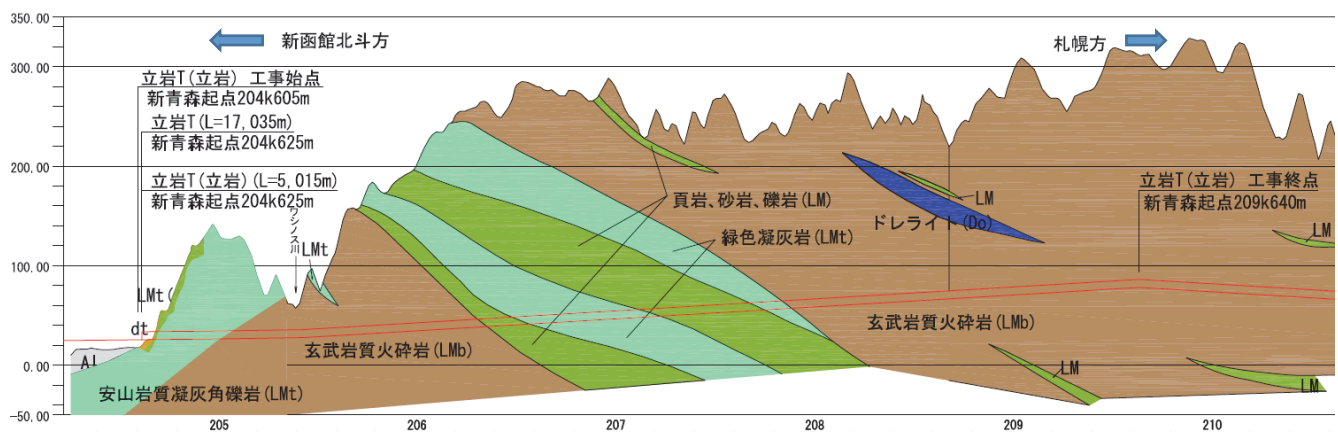


図-2 地質縦断面図

支保パターンの採用を行った。併せて早期閉合による変位抑制を図り、吹付コンクリートによる一次インバートを施工することとした。一次インバート採用標準断面図を図-4に示す。一次インバートの施工サイクルは、1D-2D以内での閉合を行うこととした。この結果、上半の側方変位は20mm程度で収束し一定の効果を得た。

(2) I_Sから特Sへのパターン変更

I_Sにて掘削した207km486mのA計測において、50mm/日程度の初期変位を記録した。切羽写真を図-5に示す。切羽は引き続き風化・変質した玄武岩であり、切羽の湧水量は1.6ℓ/分程度あり、湧水による劣化も見られた。先進ボーリングのコアを用いて行ったX線回析の結果からは、当該区間でスメクタイト含有量39~55% (Ca型)を検出し、更に地山強度比も1.0~2.5と依然として小さく、想定よりも早く既往の地質調査で確認された膨張性地山に突入したものと考えられた。

内空変位の挙動を見てみると、図-6に示すように支保工全体が内側に縮小する傾向が見られた。これは地山の塑性化により地圧が大きいことに加え、岩盤自体が湧水による劣化が顕著であるため、地山を掘削した際の応力解放により周囲の地圧を受け変形したためと考えられた。

このため、支保パターンを見直し、特Sパターンを採

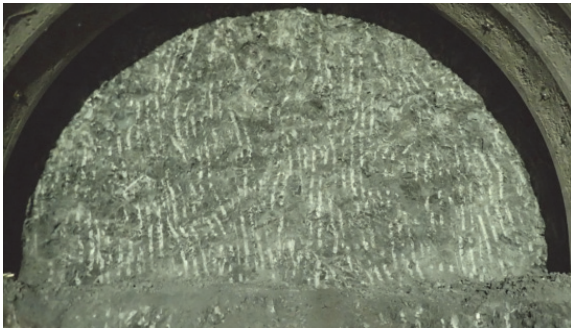


図-5 切羽写真 (207km490.5m)

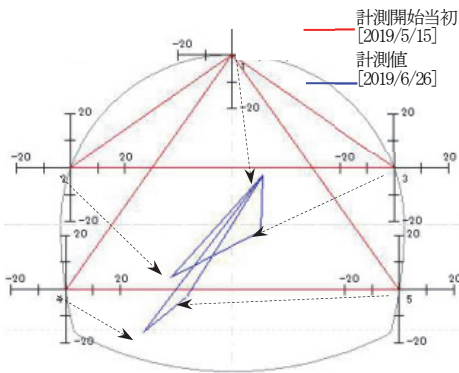


図-6 内空変位ベクトル (207km486m)

用した。特Sパターンでは、鋼製支保工をH200とし、吹付コンクリート厚も最小厚200mm、ロックボルトは20本のうち側方の12本を6mとし、側方変位の抑制を図った。さらに、インバート部においても一次インバートの早期閉合を図った。特Sパターンの支保パターン図を図-7に示す。

(3) インバートストラットの採用

前述のように剛性を高めた構造を採用したものの、パターン変更後の上半掘削完了時の側方変位は初期変位速度65mm/日程度と大きく、掘削を中断している間も変位が止まらず、掘削再開後も引き続き急激な変位を生じた。このため、下半掘削後切羽からの離れ1D以内で直ちにインバート部を掘削し、インバートストラット(H200)を施工して一次インバートの剛性の向上を図り、早期閉合を行った。インバートストラットを採用した際の標準断面図を図-8に示す。

インバートストラット施工後は、収束傾向となり、剛性の向上を確認したことで最終変位量30-50mmに抑制

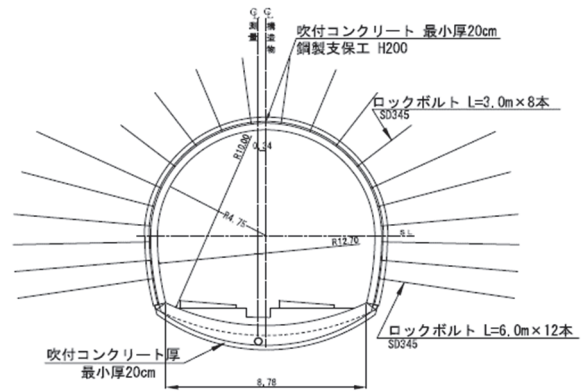


図-7 特S支保パターン図

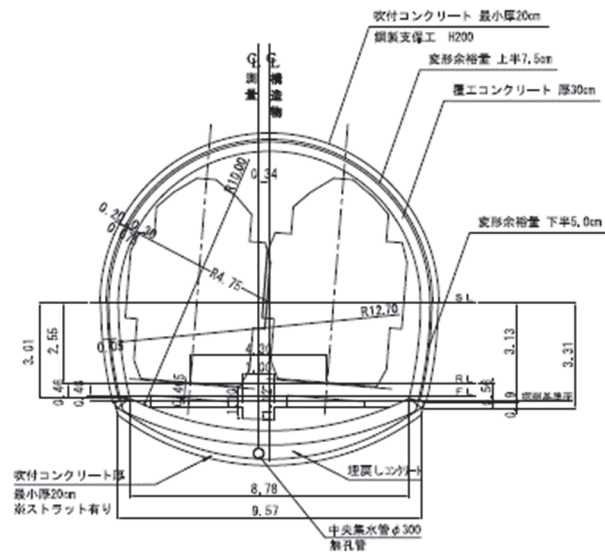


図-8 インバートストラット採用標準断面図

されており、効果を確認することができた。

(4) I_{NAIP}の採用

208km553m以降において、スメクタイト含有量は依然として30~80%と高い値を示していたが、地山強度比は2~12と小さい値ではあるものの、工区として上昇する結果となった。これを受け、インバートパターンはI_{NAIP}（中央集水管のコンクリート抱込式）を採用し、掘削を行った。I_{NAIP}の支保パターン図を図-9に示す。

これにより、早期閉合は行わないが、膨張性地山への不必要な導水を防止することが可能となり、施工後の盤膨れを防止することが期待できる。

4. インバート形状の選定

(1) インバート部における対策

整備新幹線の一部トンネルでは、本インバート施工後に盤膨れが原因とみられるクラックや変状が発生し、この対策に多大な手間を要している事例が見られた。

この結果を踏まえ、インバート部の変状が懸念される膨張性地山に対しては、地山試料試験を実施し、内空変位計測の結果を基に適切にインバートの形状を変更することとしている。

(2) 判定指標

鉄道・運輸機構では、盤膨れが懸念される地山に対する地山試料試験の指標として以下の3つの項目を設定している。

- ・地山強度比が2未満であること
- ・浸水崩壊度が3以上であること
- ・上記2項目に該当しない場合で地山強度比が4未満かつスメクタイト含有量が20%以上であること

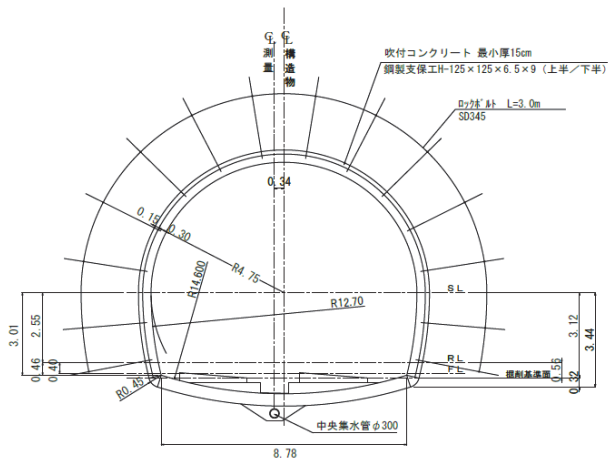


図-9 I_{NAIP}支保パターン図

これらを基に施工の計画を行うことを基本としている。

(3) 地山試料試験結果による対策

先進調査ボーリングを活用し実施した地山試料試験では、前述のとおり、盤膨れ判定指標として設定された「地山強度比が2未満であること」、「地山強度比が4未満かつスメクタイト含有量が20%以上」の値を示す範囲が存在した。

そのため、図-10に示す通り、一次インバートの施工及びI_{NAIP}の施工を盤膨れ対策断面としてインバートの形状を決定している。

5. 初期変位及び地山試料試験を用いた推定式

(1) 推定式を活用したパターン選定

当工区では、II_N~特Sまで各種支保パターンを採用しており、掘削完了まで地質状況の変化は多岐にわたることが想定された。ここで、当工区における支保パターン毎の地山強度比と初期変位量に対する最終変位量の相関に着目し、最小二乗法を活用した回帰分析を行った。この結果、次に示すように計測開始後24時間後の内空変位量、地山強度比とスメクタイト含有量から最終変位量を推定する予測式を得た。

$$A = a \times x + b \times y + c \times z + d$$

A : 予測最終変位量 (mm)

x : 24時間後の内空変位量 (mm)

y : 地山強度比

z : スメクタイト (%)

a, b, c, d : 各種パラメータ

パターン	概要図
I _{NAIP}	
I _{SIP}	

図-10 インバート対策フロー

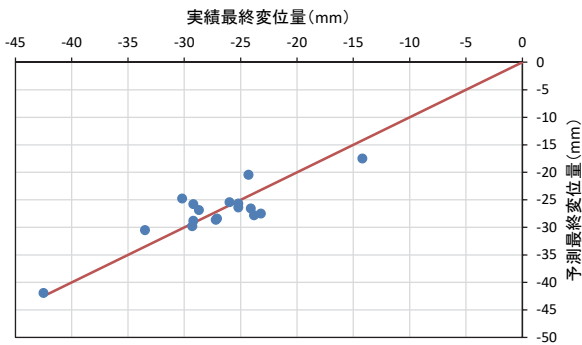


図-11 予測変位量と実績変位量の関係（I_Sパターン）

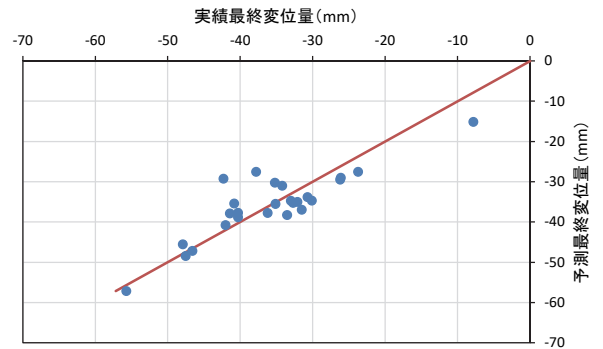


図-13 予測変位量と実績変位量の関係（I_{N1}パターン）

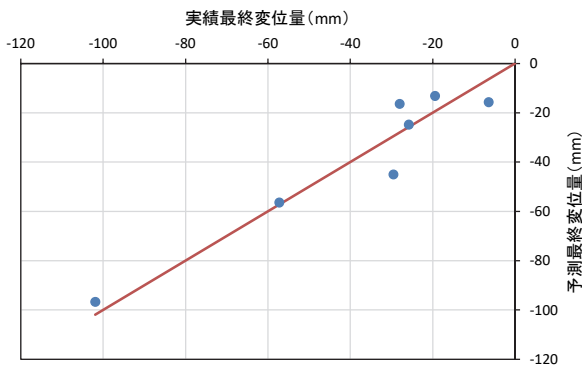


図-12 予測変位量と実績変位量の関係（特Sパターン）

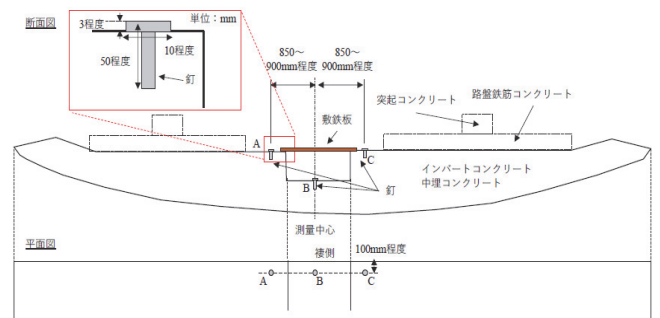


図-14 インバート高さ計測位置

を下回る結果となったことを受け、10mm 超の初期変位がありながら I_{N1}パターンへのランクダウンを行った。結果として、最大最終変位量を 40mm 程度と第Ⅱ管理基準値内に変位を抑えることができた。

(3) 推定上の課題

今回、推定式に用いたパラメータとして、24 時間後の内空変位量、地山強度比及びスメクタイトの計測値を使用している。膨張性地山であることを確認した後の立式であり、掘削の支保パターンの選定等について活用してきた。また、立式当初はサンプル数が少ないこともあり推定の精度が課題であった。

今後の展望としては、他の膨張性地山の計測結果をさらに取り込むことで、推定精度の向上につながると思われる。

6. 今後の対応

現在、当工区の掘削は完了しており、インバート及び覆工の施工を継続して行っている。

また、インバート施工完了区間においてもインバート隆起の発生状況を確認するため、図-14 に示す通り、インバート部に釘を設置することで測定の実現性を確保したうえで、インバート計測を行い、施工後の盤膨れ状況の把握に努めている。現在の計測結果からは、特段の変

表-1 係数の値

支保パターン	a	b	c	d
特S	1.525	12.803	-1.106	2.639
I _S	1.325	-0.219	-0.035	-6.531
I _{N1}	1.145	1.675	-0.010	-15.013

支保パターン	(参考) 重相関 R ²
特S	0.913
I _S	0.758
I _{N1}	0.746

上式中、各種パラメータの値は表-1のとおりである。

また、各掘削パターンにおける予測最終変位量と実績最終変位量の間を図-11~13に示す。

これを採用することで、初期変位の段階で支保パターンの妥当性の確認を行うことができた。

(2) 推定式の活用事例

208km300m 付近において、従前の I_Sパターンでの掘削を行っていたが、推定式の結果より、I_{N1}パターンでの予測最終変位量は岩石試料試験結果の出ている切羽近傍区間において約 23mm 程度と第一管理基準値の 33mm

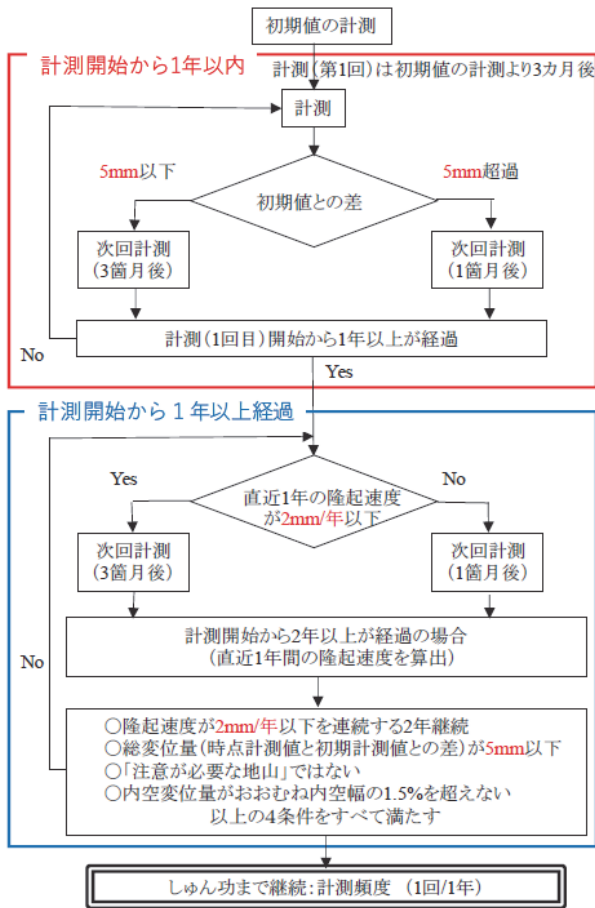


図-15 インバート高さ計測フロー

(2022. 8. 26 受付)

位は確認されていない。また、確認できる範囲でのクラックの発生も生じていない。工事のしゅん功に至るまで

の期間、図-15のフローにより計測を継続的に実施していく。

7. まとめ

計測結果及び予測式の活用を行うことで、支保ランクの適切な選定、インバートストラット及び一次インバートの施工判断を早期に行い、変位の収束を確認し、変位の抑制を適切に行うことができた。

既開業区間では、しゅん功後に盤膨れ対策工事を実施したケースもあることから、施工中の段階からの対策が必要であると考え、内空や天端沈下を含めた A 計測での初期変位及び収束変位量の把握を適切に行うことで、効果的な施工方法の実施を行うことができた。

また、インバート施工完了区間において、インバート隆起の発生状況を確認するため、インバート計測を継続的に行うことで、施工後の盤膨れ発生状況の把握に努めている。

参考文献

- 1) 鉄道・運輸機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説（平成 20 年）
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書（平成 18 年）。

TUNNEL CONSTRUCTION RESULTS IN EXPANSIVE GROUND MOUNTAINS

Naoya MIYAKAWA, Tetsuya HIGUCHI and Hidenori KANEYASU

By utilizing the prediction formula estimated from the measurement results and the initial displacement in the ground containing a lot of smectites, appropriate selection of support ranks, construction decisions for inverted struts and primary inverts were made at an early stage, convergence of displacement was confirmed, and displacement was suppressed. In order to confirm the occurrence of invert upheaval, we will strive to understand the occurrence of board swelling after construction by continuously performing invert measurement.