

# トンネル施工中の計測にもとづく 盤ぶくれの長期予測と対策工選定

木梨 秀雄<sup>1\*</sup>・伊藤 哲<sup>1</sup>・藤岡 大輔<sup>1</sup>・鈴木 拓也<sup>1</sup>・辻村 幸治<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 株式会社 大林組 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

<sup>2</sup> 株式会社 エス・ケー・ラボ (〒547-0011 大阪市平野区長吉出戸8-1-14-B)

\*E-mail: kinashi.hideo@obayashi.co.jp

供用中の道路や鉄道トンネルにおいて長期にわたり路盤が隆起し、交通に支障をきたす事態が発生している。これらを防止するには、当初の施工時にインバートの隆起量を把握し、有効な対策を施すことが重要となる。著者らは、トンネル施工中に重機等の車両通行に支障なく盤ぶくれを計測できるインバート変位計<sup>®</sup>を開発し、これまでに15現場での実績を積んできた。ここでは、膨張性地山において盤ぶくれを計測し、そのデータを活用して後続の残留変位を予測し、数値解析を介して対策工を選定する方法について述べる。また、数値解析においては膨張圧を模擬した要素応力の増大で再現し、対策工の構造を検討した結果について考察する。

**Key Words :** invert, squeezing, heaving, swelling, displacement sensor, numerical analysis

## 1. はじめに

近年、供用中のトンネルにおいて路盤が長期間にわたって隆起し、通行に支障が生じて補強対策やインバートの改築が必要となるケースが発生している<sup>1)~5)</sup>。その際は供用しながらの改築が望ましいが、写真-1のように狭隘なスペースでの作業となり、工事の難易度が高くなるとともに、利用者への影響も考慮せねばならない。供用後のこのような事態を防ぐには、トンネル施工中に盤ぶくれを把握して、有効な対策を講じることが重要と考えられる<sup>6)</sup>。一方、施工時の路盤は工事車両が往来するため基準点を設け難く、従来は計測が困難であった。そのため、盤ぶくれの計測を実施することなく、トンネルアーチ部の変位のみから盤ぶくれも含めた収束とみなしていた。しかしながら実際には、アーチ部の変位収束後に、インバート部のみが長期にわたり隆起するケースがあったものと思われる。また、施工中の路盤は埋め戻し土等であり、100mm 超級の隆起であっても変状の把握が難しい。

そこで、著者らは路盤下に埋設して工事車両の影響を受けずに盤ぶくれを計測できるインバート変位計<sup>®</sup>を開発した<sup>7)</sup>。これまでに15現場において適用した結果、数例以外は変位がごく小さく、短期間に収束を確認することができた。一方、膨張性を呈する地山においては著し

く大きな隆起を観測した。計測結果に基づいて対策工を検討するにあたっては、限られた期間の計測結果からの変位予測となるため、変位速度の経時変化に着目した検討が有効である。

本報では、施工中の路盤隆起の計測データを活用して将来の残留変位を予測し、解析により対策工を検証する方法について述べる。残留変位の予測には、変位速度の経時変化に着目して分析する方法を提案する。また、数値解析においてはインバート部地山の膨張を要素応力を増大することで仮想的に再現し、対策工の構造を検討した結果について考察する。



写真-1 狭隘なスペースでのインバート改築作業

## 2. 計測システムの概要

インバート変位計は、図-1 のように施工中の路盤下に水圧計と接続した水管を埋設し、地上部に設置した基準水槽との水頭差で隆起量を計測するシステムである。本システムにより、インバー

ト部地山の鉛直変位を自動計測でき、基準水槽をトータルステーション等によって計測することで、インバートの絶対変位量を把握できる。設置時期は、一次閉合のインバート吹付け時、インバートコンクリート打設前・打設後などに適宜実施することができる。また、本システムでは保護管から計器本体を出し入れが容易であり、繰返し転用が可能である。なお、計測装置の精度を室内検証した結果、100mm の変位に対し誤差は 0.5mm (0.5%) 未満であった。

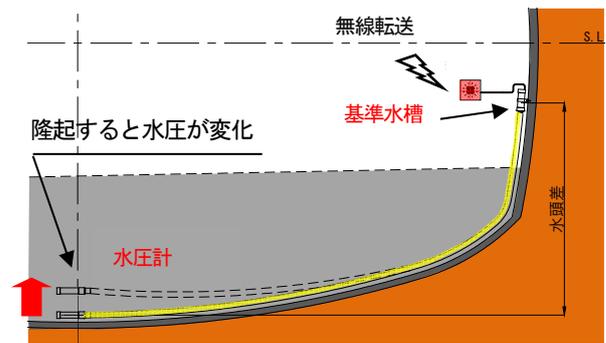


図-1 インバート変位計の概要



図-2 インバート変位計の実績とグリーンタフ地域

## 3. 既往の計測結果の考察

これまでに図-2 に示す 15 現場でインバート変位計を適用してきた。赤色の数字は盤ぶくれが観測された現場である。また、過去に盤ぶくれが発生し、インバートの改築もしくは増設が行われた所を×で示した。これらのトンネルは膨張性を呈するグリーンタフ地域とよく一致していることがわかる。インバート変位計を適用した現場の約半数もグリーンタフ地域となっている。

つぎに、これまでの実績から代表的なインバート隆起の計測データを示したものが図-3 である。S1 と S2 の凝灰岩はスメクタイトを多量に含有しており、他に比べると著しく大きな隆起が発生してインバート吹付けコンクリートが破壊したため、ストラット閉合を行った。また、K1～K3 もスメクタイトを含有しており、計測期間内での収束傾向が認められなかったため、ストラットによる一次閉合を行った。それ以外のケースでは最終変位が 5mm 未満であり、計測期間内に収束を確認できた。

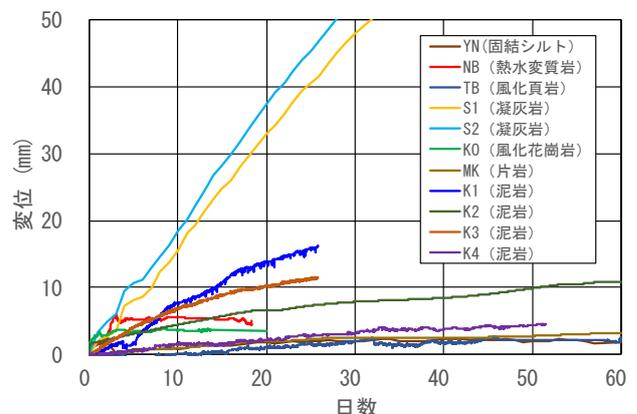


図-3 インバート変位計による計測実績

これらの実績から、インバート変位の経時変化パターンは、図-4 のように分類することができる。Type I は、限られた計測期間中に収束を確認できるものである。Type II は、変位速度の低下傾向はあるものの、長期にわたり収束確認が困難なケースである。また、Type III は一次閉合などにより収束に向かう途中で耐力を超え、再び変位が加速するタイプである。いずれの場合も、経時的に変位速度は減少するものと考えられるが、判定に許される期間は限られており、Type II, III のケースでは収束時期や最終変位量を予測する必要がある。

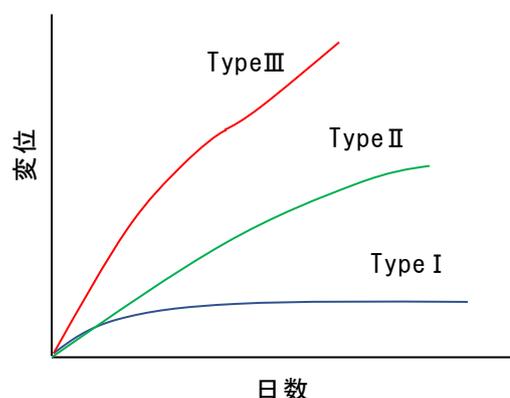


図-4 インバート変位の経時変化パターン

つぎに、各ケースの初期変位速度に着目し、最大変位との関係でプロットしたものが図-5 である。この図にも示されるように、大きく隆起する場合には初期の変位速

度も大きくなる傾向にある。現状ではデータ数が十分とは言えないが、図中の点線はインバートの隆起が収束する推定境界ラインである。このラインより下側にある緑丸と紫丸は、図-4のType Iに相当するものであり問題なく収束が確認された。また、青丸で示したように、インバートストラットにより一次閉合した場合も、点線の収束境界線より上側に位置しても剛な構造により収束を確認できた。これらのケースでは一次閉合していなければ、グラフ上を右上にスライドして未収束となることが予想される。一方、赤丸は吹付コンクリートで閉合したにもかかわらず、隆起が進行しインバート吹付けが破壊したケースである。このグラフに示したように、インバート変位計測の初期変位速度から長期的な収束性（Type I～III）を予測できる可能性がある。今後はデータ蓄積により、残留変位についてもある程度の精度で予測を目指す。

#### 4. 膨張性地山における長期変位の予測

膨張性を呈する凝灰岩地山の区間において、局所的に300mm超の顕著な内空変位が発生した<sup>8)</sup>。当該区間の地質はほとんどが安山岩であったが、局所的に想定外の凝灰岩のゾーンがトンネル近傍に分布していた。変状箇所から採取した試料の試験から、極多量の膨脹性粘土鉱物（スメクタイト）が検出された。この変状区間は、吹付けコンクリートによる一次閉合を実施後も盤ぶくれの発生が疑われたため、インバート変位計を埋設して観測を開始した。その結果、インバート吹付けにより内空変位は収束したが、図-6のように100mm超の大きな盤ぶくれの発生していることが分かった。盤ぶくれが長期にわたり収束傾向が認められなかったが、変位速度を経時変化で整理すると収束傾向を把握しやすくなる。図-6の×印はインバート吹付けが破壊したと推定される箇所を示している。図-7は、図-6の計測開始初期の変位速度の経時変化を示したものである。供用中に盤ぶくれを起こした過去の計測事例によると、変位速度は年間あたり数mm～数十mm程度であったが、図-7では一日あたり数mmと著しく大きいことがわかる。すなわち、施工中は変位の総量も大きく、インバート変位計測の実施により盤ぶくれ現象を捕らえやすいと言える。また、図-7では図-8の式を微分した関数で回帰している。これを積分した式に相当する変位-時間関係から、対策後の一次インバートに作用する残留変位を図-8の点線のように予測できる<sup>9)</sup>。この結果、長期にわたる変位を推定し、予測結果を対策工検討の解析に反映できる。図-8の点線が、収束するまでの残留変位の予測を示したものである。この結果から対策工の実施時期を考慮し、新しい対策構造が負担する残留変位を46mmと想定した。

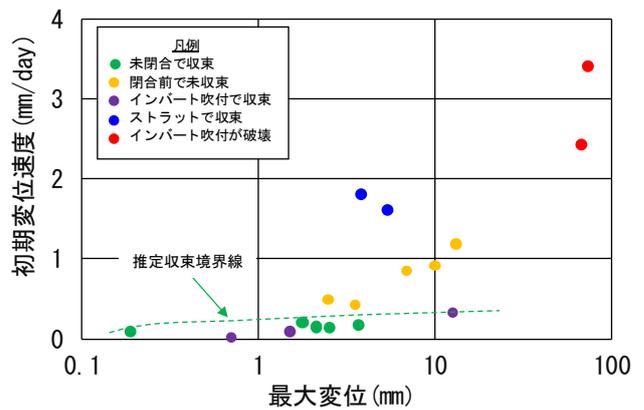


図-5 最大変位と初期変位速度の関係

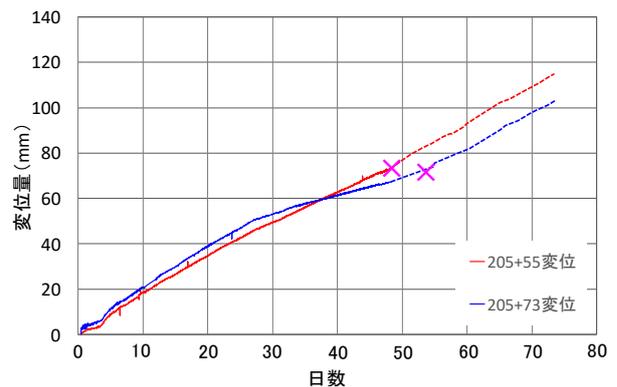


図-6 インバート変位計測結果

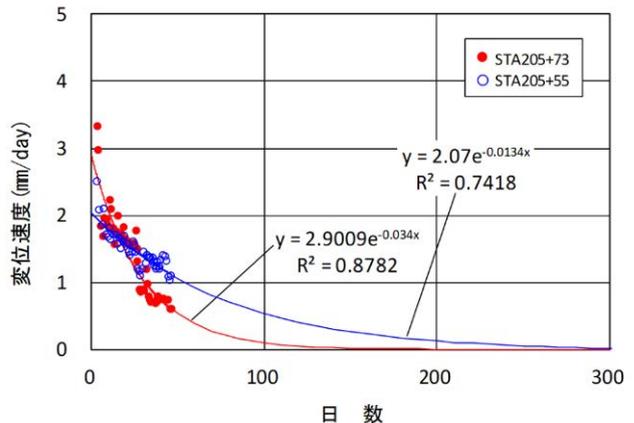


図-7 変位速度の経時変化とその回帰

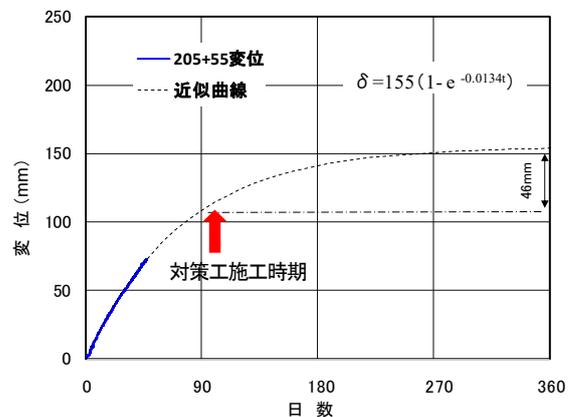


図-8 残留変位量の予測

## 5. 対策工の簡易な検討手法

盤ぶくれの対策工としては、インバートの形状、ストラットのサイズや吹付けの厚さ等を検討する必要がある。その手順としては、施工中のある程度の期間にインバート変位を計測し、残留変位を予測して解析により対策工を検討するものである。図-7の膨張性地山のケースでは、当初インバート吹付けで一次閉合していた状態でのフレーム構造に、計測で得られた残留変位が発生する外荷重を算定した。この荷重を図-9のようなインバートストラットと吹付けコンクリートの構造に負荷することにより応力照査を行った。対策結果として図-10のように当初の盤ぶくれを抑制し、インバートの安定化を図ることができた。

一方、インバート変位の計測時に一次閉合を実施していない場合や、本インバート打設までを検討する場合は、フレーム構造での解析は難しく、FEM等による数値解析を実施する必要がある。数値解析による盤ぶくれの予測に関しては、最近では塑性化の進展による地山強度の劣化<sup>10) 11)</sup>や、地山の時間依存的なクリープ現象を扱った研究<sup>12)</sup>がなされている。ここでは、図-7のように計測結果から予測した残留変位を対策工検討に迅速に反映できることを念頭に置いた手法を検討した。

まず、図-8で予測した残留変位を用いて、新たな対策工に作用する外力を算定した。ここでは、インバート部地山の膨張を要素応力の増加で表現できるものと仮定し、まず計測時のインバート吹付けでの隆起を再現した。すなわち、予測された残留変位が発生する要素応力を探った。図-11は、計測されたインバート部の変位分布を有限差分法 (FLAC) で再現したものである。計測値はインバート変位計と併設した加速度式変位計 (@0.5m) によるものである。計測結果のように、端部から中央部に向かい隆起が大きくなるような分布を再現できている。この解析では、図-12に示すようなインバート部の領域(赤色)に仮想的な応力を増加することで、観測された現象と類似した隆起の分布が再現できた。なお、赤色の領域は、実際に膨張している領域に対応するものではなく、解析上の仮想的な領域であり、計測された隆起量を再現できればどのような大きさでも解析結果に影響はない。

つぎに、上記の手法を用いてインバート形状の優位性について複数ケースのケースを解析し比較を試行した。検討したケースは、図-9に示す実際に施工したインバートの形状と一次閉合構造を基本とし、インバートの深さを+1m, +2m, ほぼ円形とした場合の4ケースである。

図-7の残留変位に対応する応力増分を作用させて各ケースを解析した結果から、隆起量とストラット応力の最大値を比較すると図-13のようになる。図中の隆起量は

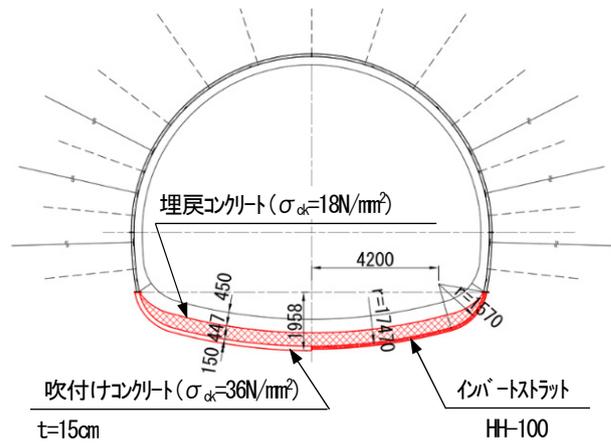


図-9 盤ぶくれ対策工

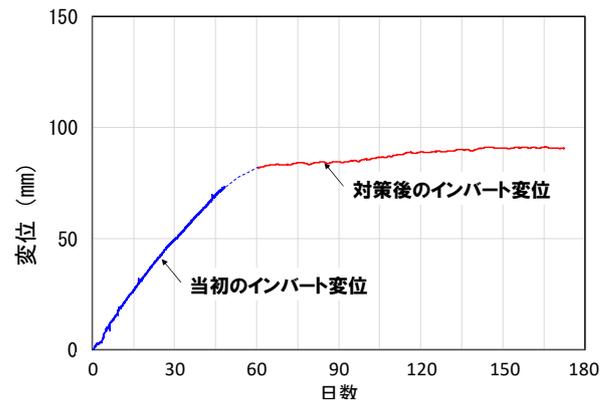


図-10 対策前後のインバート変位比較

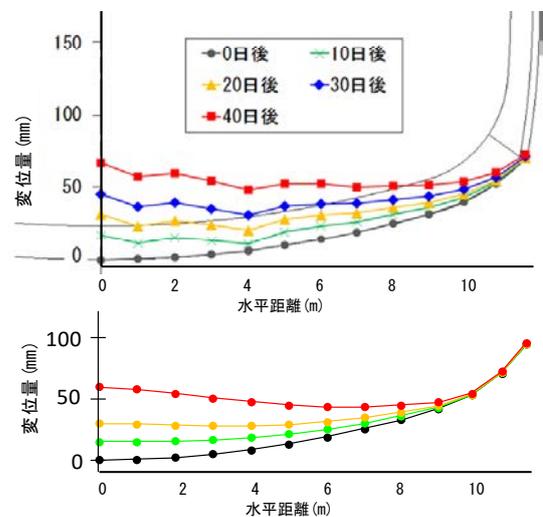


図-11 盤ぶくれの計測値(上)と解析値(下)の比較

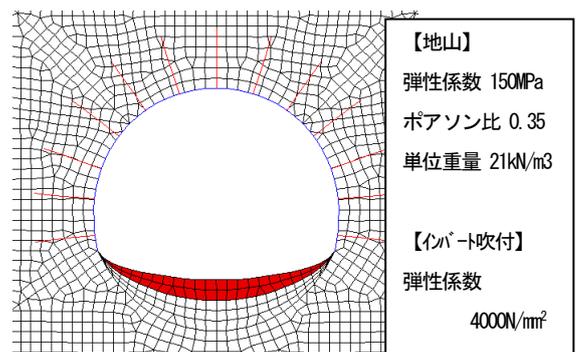


図-12 解析メッシュと膨張領域

初期形状を青色、隆起後を赤色で表示している。隆起量は、インバートが深型になるにつれて減少し、真円形では約3割減少した。一方、ストラット支保工の応力 $\sigma_i$ は曲げ引張であり、隆起量と同様に深型になるにつれて減少するが、今回の条件ではもっとも扁平なケースであっても降伏応力の $440\text{N/mm}^2$ より十分小さい値となった。実際の施工時には、地盤条件などにより隆起量や支保構造に作用する応力値が左右されるものと考えられ、これらの解析結果を参考に、かつインバート掘削の労力も勘案して形状を選定する必要がある。

## 6. まとめ

本報では施工中にインバートの隆起を計測した結果にもとづき、対策工を選定して施工する手法について述べた。通常の内空変位計測でも長期にわたり微増が継続することがあるが、インバートの変位計測は通常行われていないうえに、目視で察知することが非常に難しい。また、実際に内空変位が収束してもインバートのみが隆起したことも把握できた。大きな変状があった個所で今回の手法を適用して対策することで、供用後の路盤変状を防げるものと考えられる。また、解析によりインバートの支保構造を反映し、複数の形状を比較検討できることを示した。盤ぶくれのメカニズムについては未解明な点が残されているものの、計測結果を迅速に対策へと反映できるものと考えている。膨張する地山の領域やその圧力については、更なる検討の余地が残されており今後の課題とするが、適用事例をさらに増やし分析を発展させたい。

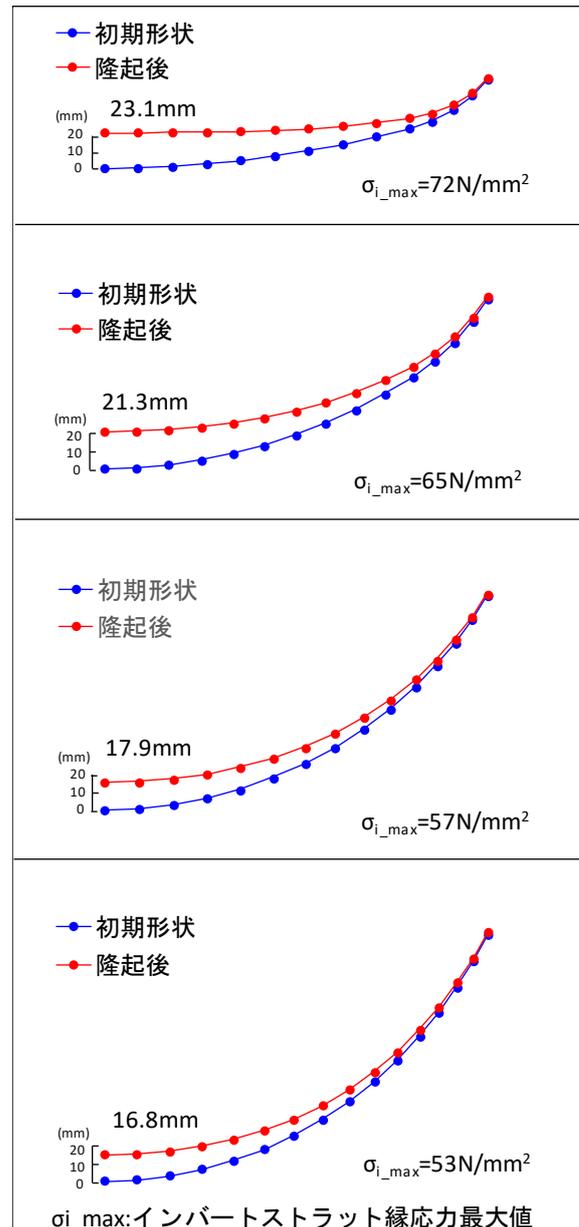


図-13 インバート形状による隆起量の比較

## 参考文献

- 1) 宮沢一雄, 安田賢哉, 須山恭三, 渡辺淳: 昼夜連続通行止めによる全断面連続片押し工法でインバートを新設, トンネルと地下, 第47巻8号, pp.7-18, 2016.
- 2) 丸山勝, 中野清人, 天野浄行, 下村哲雄: 61日間連続車線規制によるインバート再構築工事, トンネルと地下, 第44巻12号, pp.17-28, 2013.
- 3) 佐久間智, 菅原徳夫, 多田誠, 遠藤祐: 供用中に発生した急激な盤ぶくれ変状を復旧する, トンネルと地下, 第40巻12号, pp.27-37, 2009.
- 4) 久保原猛, 若林秀明, 鈴木延彰, 齋藤貴: 供用中のトンネルで未収束の変位に挑む, トンネルと地下, 第45巻9号, pp.45-53, 2014.
- 5) 三浦貴幸, 柿崎昌志, 湊敦之, 田湯正孝: 開業直前にインバート盤ぶくれ対策を施工, トンネルと地下, 第46巻6号, pp.7-16, 2015.
- 6) 北村元, 岩尾哲也, 増田弘明, 奥井裕三: 盤ぶくれ対策の手引き書の検討, トンネル工学報告集, 第25巻, 2015.
- 7) 木野村有亮, 木梨秀雄, 伊藤哲, 辻村幸治: インバート隆起計測システムの開発, 土木学会第70回年次学術講演会, VI-686, pp.1372-1373, 2015.
- 8) 宮沢一雄, 木梨秀雄, 秋山剛史, 伊藤哲, 奈良田恵佐: インバート変位の長期予測と解析による対策工の検討, トンネル工学報告集, 第28巻, I-24, 2018.
- 9) 山口梅太郎, 西松裕一: 岩石力学入門 (第2版), pp.32-40, 東京大学出版会, 1976.
- 10) 奥井裕三, 太田裕之, 佐久間智, 田中主税: 盃山トンネルに発生した急激な路面隆起変状の計測および解析による変状メカニズムの考察, トンネル工学報告集, 第19巻,

pp.173-180, 2009.

- 11) 小林寛明, 下津達也, 上野光, 渡辺和之, 嶋本啓介, 朝倉俊弘: 長期的な盤ぶくれに対するインバート構造の抑制効果に関する基礎的研究, トンネル工学報告集, 第26巻, 2016.

- 12) 中岡健一, 畑浩二, 蔣宇静: 岩石のクリープとひずみ軟化を評価する数値モデル, 土木学会論文集F1 (トンネル工学), Vol.70, No.3, pp.43-56, 2014.

## LONG-TERM PREDICTION OF HEAVING AND ITS COUNTERMEASURES BASED ON FIELD MEASUREMENT IN TUNNELS

Hideo KINASHI, Satoshi ITO, Daisuke FUJIOKA, Takuya SUZUKI  
and Koji TSUJIMURA

In order to prevent the long-term floor heaving, it is necessary to take measures the uplift observation during tunnel construction. Therefore, authors developed a system that can measure the displacement by burying under the tunnel floor.

In this paper, we describe a method to predict future displacement by utilizing measurement data under construction and select countermeasures through numerical analysis. In the squeezing green tuff, significant uplift has been observed. Reflecting this measurement result, we investigated an countermeasure structure that can support the uplift force by the result of numerical analysis.