

インバート変位の長期予測と 解析による対策工の検討

宮沢 一雄¹・木梨 秀雄²・秋山 剛史³・伊藤 哲⁴・奈良田 恵佐⁵

¹正会員 東日本高速道路(株) 関東支社 (〒300-2435 茨城県つくばみらい市筒戸1606)
E-mail:k.miyazawa.aa@e-nexco.co.jp

²正会員 (株)大林組 生産技術本部 トンネル技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)
E-mail:kinashi.hideo@obayashi.co.jp

³正会員 (株)大林組東北支店三吉山トンネル (〒999-3221 山形県上山市関根字三島648-8)
E-mail: akiyama.takashi@obayashi.co.jp

⁴正会員 (株)大林組 生産技術本部 トンネル技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)
E-mail:ito.s@obayashi.co.jp

⁵正会員 オズベック株式会社 (〒105-0013 東京都港区浜松町一丁目29-10)
E-mail:k.narata@t_ospec.co.jp

供用中のトンネルにおいて長期間にわたり路盤が隆起し、インバートが破壊するケースが発生している。その場合、インバートの改築が必要となり、交通への支障も発生する。このような事態を防止するためには、トンネル施工時にインバートの隆起を計測して対策を施すことが重要である。そこで、当初のトンネル掘削時にインバート部の変位を計測できるシステムを開発し、これまでに10現場での実績を積んできた。

本報では、施工中の計測データを活用して将来変位を予測し、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。将来変位の予測には、収束に長時間を要する場合でも変位速度の経時変化に着目して分析できる方法を提案する。また、数値解析においては地山の経時的な盤ぶくれを要素応力の増大で表現することで再現し、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 sencer, numerical analysis

1. はじめに

山岳トンネルのインバートは、道路では地山等級D以下の脆弱な地山や膨張性を有するような岩種において適用されており、鉄道でもインバートを採用することが多い。しかしながら、これまでに道路・鉄道ともに、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たため、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¹⁾²⁾。その際は供用しながらの改築が必要となるため、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。このような事態を回避するためには、トンネル施工中に盤ぶくれを計測・把握して、有効な対策を講じる必要がある³⁾。ところが、施工時の路盤は工事車両が往来するため基準点を設けにくく、従来は計測が困難であった。そのため、従来はA計測による変位のみから収束を確認していた。しかしながら実際には、インバートの隆起が長期間にわたり進行し、供用後に顕在化していたものと考えられる。施工中の路盤は埋め戻し土等であり、よほど大きな隆起がない限り

少々の変位では感知できない。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技術を開発した⁴⁾。これまでに10現場においてインバート変位計を適用した結果、それらのほとんどは変位が数mm程度であり、短期間に収束を確認することができたが、膨張性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長期にわたる変位を予測するため、変位速度に着目した検討が有効であった。また、隆起に耐えうるインバートの構造検討には数値解析を用いるが、計測で得られるのは変位であり、これを解析に反映するためには工夫が必要となる。

本報告では、まず計測システムの概要を述べてから、これまでの計測結果を総括し考察する。つぎに、施工中の計測データを活用して将来の残留変位を予測し、数値解析を介して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、計測期間内に変位が収束しない場合でも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。

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。本システムにより、インバート部地山の鉛直変位を常時自動計測できる。また、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。計測データは無線 LAN により転送するとともに現場ではLED色により変位のレベルを表示することも可能である。

本システムの設置は、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・打設後に適宜実施することができる。写真-1は、インバートストラットへの設置例である。

なお、本システムは写真-2のように保護管からの出し入れが可能で、繰返しの転用も容易である。

計測装置の精度については、室内において微小な昇降調節が可能な装置を用いて検証した。高精度の CPD 変位計を真の変位とみなして段階的に変位を増加させたところ、100mm の変位に対しインバート変位計の誤差は0.5mm (0.5%) 未満であった。

3. 既往の計測結果の考察

これまでの実績から代表的な 6 現場の計測データをまとめて示したものが図-2 である。S1 と S2 の凝灰岩は膨張性鉱物を含有しており、他に比べると著しく大きな隆起が発生した。それ以外のケースでは最終変位が 5mm 未満であり、計測期間内に収束が確認されている。計測期間については最長 6 か月のケースまであった。

これら過去の実績から、インバート変位の経時変化パターンを、図-3 のように分類することができる。TypeI は、計測期間中に収束が確認できるものである。計測期間は図-2 にも示したように、一般的に数か月から半年程度である。TypeII 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、TypeIII 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、時間が無限大になれば変位はある値に収束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いる。TypeI のように短期間で収束する場合は問題ないが、TypeII, III のように長期にわたる場合は収束時期や最終変位量を予測する必要がある。

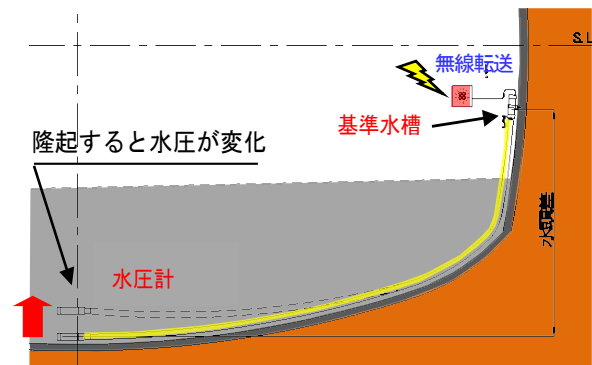


図-1 インバート変位計の概要



写真-1 インバートストラットへの設置状況



写真-2 保護管への計器挿入状況

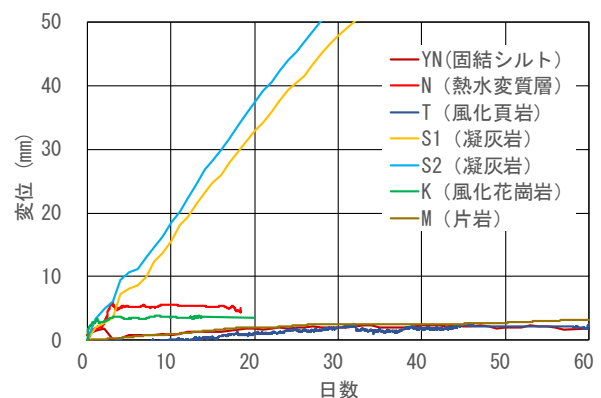


図-2 インバート変位計による計測実績

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-4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。まだデータが少ないが、点線は一次閉合なしのケースでの推定ラインである。青丸のように吹付コンクリートやインバートストラットで閉合して収束した場合は、閉合なしの点線レベルより上側に位置する。

一方、赤丸は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。一方で、青丸のケースでは初期変位速度がやや大きいもののインバートストラットと吹付で収束に至った。仮に一次閉合していなければ、青丸のデータはグラフ上を右上にスライドするものと考えられる。今後のデータ蓄積により、初期変位速度から長期的な収束性や残留変位などをある程度予測できる可能性はある。

4. インバート変位の長期予測

先述したように図-2のType IIおよびIIIのケースでは、盤ぶくれが短期間で収束しないため、対策工検討のために収束時期や残留変位の予測が必要となる。

Type IIのような経時変化を辿るモデルとしては、図-5に示すようなバネとダッシュポットを並列に配したvoigt(フークト)型のモデル⁸⁾で表現することができる。このモデルは、ある作用応力に対する粘弾性の変形を表現しており、次式で示すことができる。

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (1)$$

ここで、Eはばね定数、 η は粘性率を表す。

一定の応力 σ_0 が作用する場合の時間依存挙動は、以下の式で表される。

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta}t} \right) = \varepsilon_0 (1 - e^{-\alpha t}) \quad (2)$$

ここで、 ε_0 は $t \rightarrow \infty$ におけるひずみを示す。また、 α の逆数 η/E は緩和時間と呼ばれ、これが大きいほど変位の収束に時間を要することとなり、粘土鉱物を含む地山の挙動を表現できる。以上より、式(2)を用いることで経時的なインバート変位を予測することができる。なお、Type IIIの場合は、一次閉合構造破壊前の変位データから残留変位の予測が可能である。

以下の予測では、応力-ひずみを荷重-変位に置き換えて検討する。

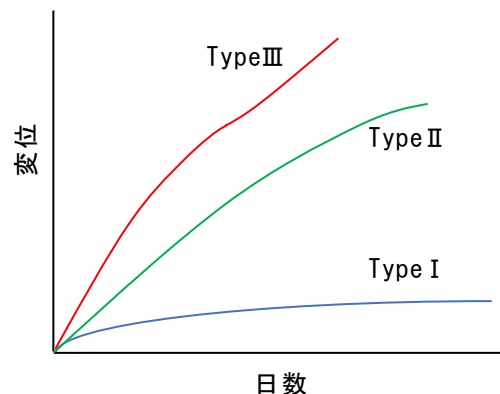


図-3 インバート変位の経時変化パターン

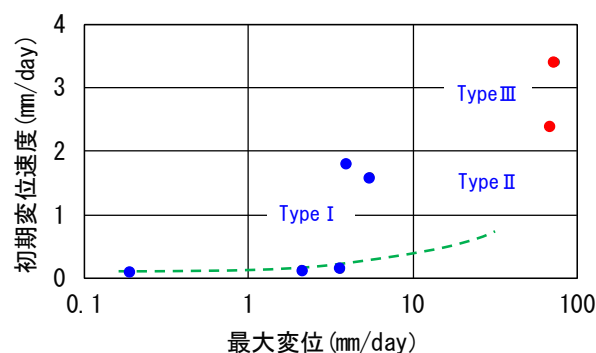


図-4 最大変位と初期変位速度の関係

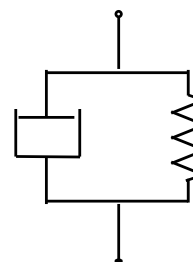


図-5 voigt (フークト) モデル⁸⁾

5. 膨張性地山における適用

東北中央自動車道三吉山トンネルの膨張性地山区間において局所的に変状し、300mm 超の顕著な内空変位が発生した。当該区間の地質は安山岩であったが、局所的に凝灰角礫岩のゾーンがトンネルを横切っていた。

そこで、変状箇所付近から採取した試料を用いて、8項目の膨張性指標の試験を実施し、水による影響度と粘土鉱物の含有量を調べた。試験結果のオクトダイアグラムを図-6に示す。試料は①、②が凝灰角礫岩で③が安山岩であった。X線回折および CEC 試験どちらの試験結果も、全試料において極多量の膨張性粘土鉱物（モンモリロナイト：Ca 型）が検出され、浸水崩壊度も基準値

を超える結果となった。また、凝灰角礫岩 (①, ②) は吸水膨張率が基準値前後の値を示しており、安山岩よりも相対的に高い。以上より、当該区間の凝灰角礫岩は膨張性地山の可能性が高いと判断した。なお、安山岩は膨張性粘土鉱物を含有しているが、岩片強度が高いためトンネル変状は発生しなかったと考える。

この変状区間は吹付けコンクリートによる一次閉合と縫返しを実施したが、盤ぶくれが進行している可能性が疑われたため、2 か所においてインバート変位計を埋設して隆起の観測を行った。

計測の結果、図-7のような著しい盤ぶくれを観測した。これら2か所は20mの離間があったが、非常に似通った経時変化を辿っている。また、50日目ごろまでは図-2のTypeIIの傾向を呈する挙動であるが、それ以降は点線のように再度変位速度が増している。これは、再施工時に判明した写真-3のようなインバート吹付け破壊時の挙動と推定される。

TypeIIの挙動では、長期間変位が漸増するため収束判定が難しいが、変位速度で整理すると収束傾向が比較的明瞭になる。図-8は変位速度の経時変化を示したものである。このように変位速度は時間とともに減少しており、長期間経過後には収束に至るものと考えられる。過去に供用中盤ぶくれを起こした事例の計測データによると、変位速度は年間数 mm～数十 mm 程度であったが、図-8では一日数 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、計測で盤ぶくれ現象を捕らえやすいと言える。図-8では式(2)を微分した関数で回帰している。これを積分した式(2)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-9の点線のように、実測値によくフィットしたものを予測できている。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-10は、最終変位の大きい STA205+55 の残留変位予測の全体を示したものである。点線が残留変位であり、1 年程度かけて収束することが推定された。なお、この

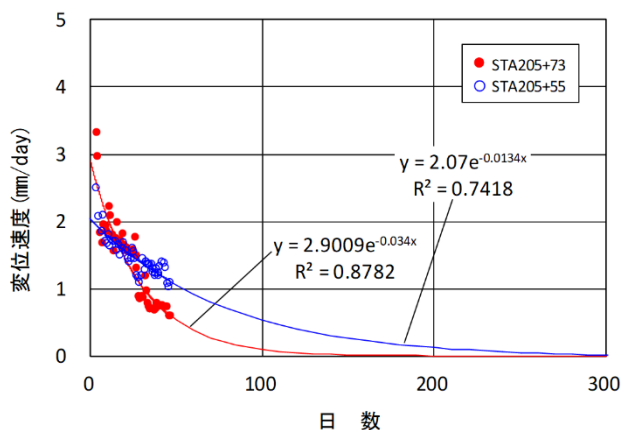


図-8 変位速度の経時変化とその回帰

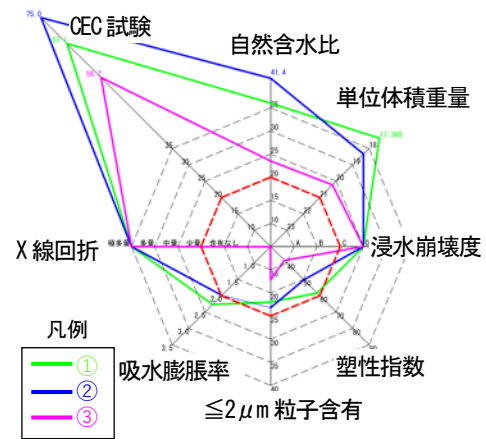


図-6 膨張性試験のオクトダイアグラム

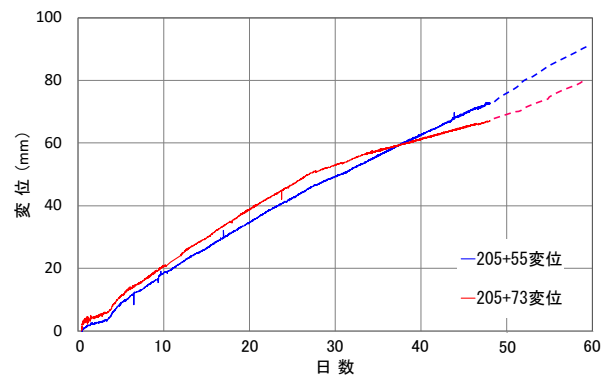


図-7 インバート変位計測結果



写真-3 インバート吹付けのクラック

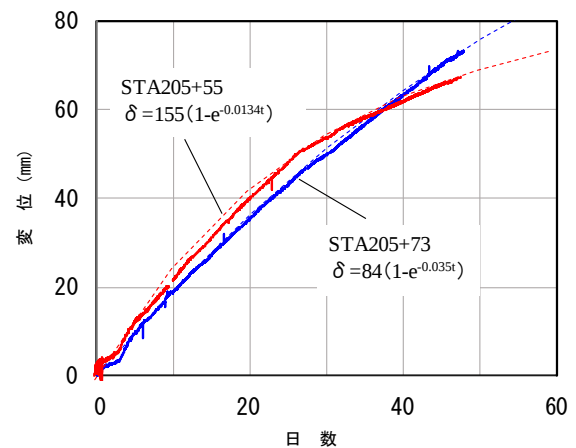


図-9 インバート変位の近似曲線

予測はインバート吹付けが破壊せずに時間が経過することを仮定している。この結果、新しい対策構造が負担する残留変位は46mmと推定された。

6. 解析による対策工の検討

盤ぶくれによるインバート変位の対策工は、インバートの形状やインバートストラットのサイズ、インバート吹付の厚さを検討することになる。その手順としては、**図-11**のように、施工中に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フローとなる。

対策工の検討に用いる解析は、フレーム解析や有限要素法（FEM）等による数値解析が適用可能である。このうちフレーム解析による方法は、比較的迅速に実施できる。**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-12**のような対策工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-13**に示すように盤ぶくれを抑制し、インバートの安定化を図ることができた。

一方、FEM 等数値解析による場合は、地山をモデル化して掘削過程を考慮できる。また、インバート変位計測時に一次閉合構造がない場合には、盤ぶくれしているインバート部には地山しかないため、フレーム解析は適用できない。このため、FEM 等の数値解析を実施する必要がある。

以下では数値解析による膨張性地山区間での盤ぶくれ変位の再現と、対策工の検討について考察する。

数値解析によるインバート盤ぶくれの予測に関しては、最近でも塑性化の進展による地山強度の劣化^{9) 10)}や、地山の時間依存的なクリープ現象を扱った研究¹¹⁾がなされている。ここでは、**図-10**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。

インバート変位計で計測した際の支保構造で再現する残留変位をもとに、新たな対策工としての構造での解析を行うために、作用荷重を算定した。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、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-14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

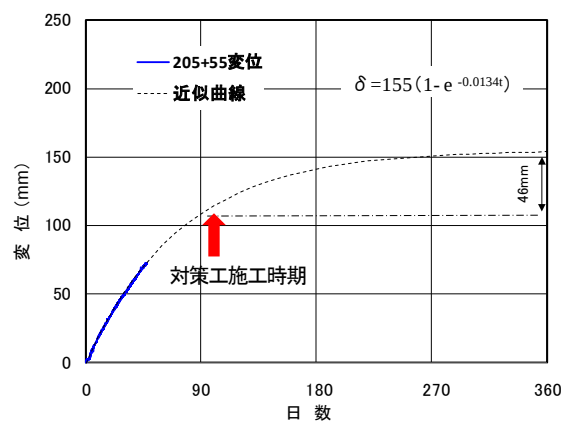


図-10 残留変位量の予測

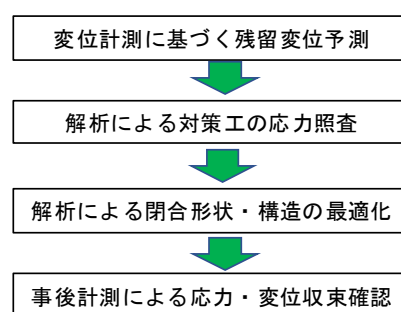


図-11 盤ぶくれ対策の検討フロー

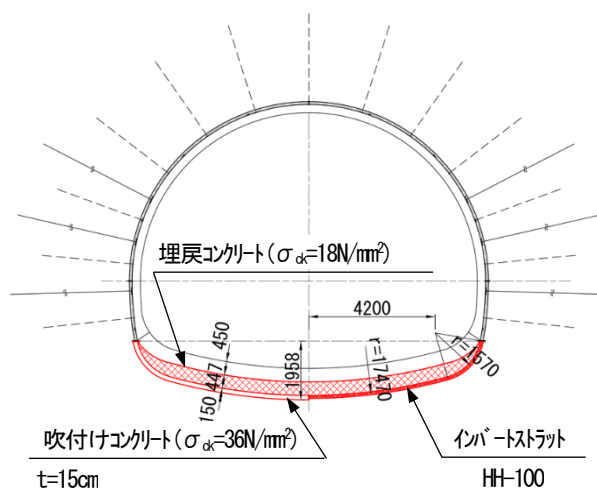


図-12 盤ぶくれ対策工

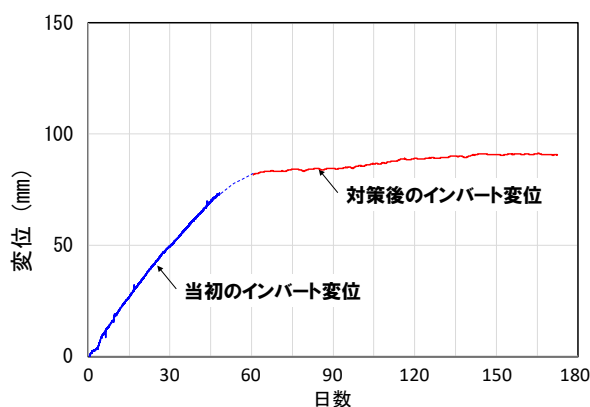


図-13 対策前後のインバート変位比較

解析では、図-15 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。また、ここでは膨張する地山領域を固定して、隆起量を再現することを主眼にした。解析で計測値を再現する要素応力の増分は16.5MPa となった。ただし、現実的な膨張する領域の大きさや膨潤圧などの対応は今後の課題とする。計測や予測された変位に対応する要素応力を用いることで、複数の仕様のインバート変状対策工を比較検討が可能となる。

つぎに、事後検討ではあるが、上記の手法を用いてインバート形状の優位性について解析により複数ケースの比較を試行してみる。検討したケースは、実際に施工したインバートの形状と一次閉合構造（図-12）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-10 の残留変位に対応する上述の地山応力増分は16.5MPa であった。この応力増分を用い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比較を図-16 に示す。図中の隆起量は初期形状を青色、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は引張であり、隆起量と同様に深型になるにつれて減少するが、今回の条件ではケース1 であっても降伏応力の440N/mm² より十分小さい値となった。

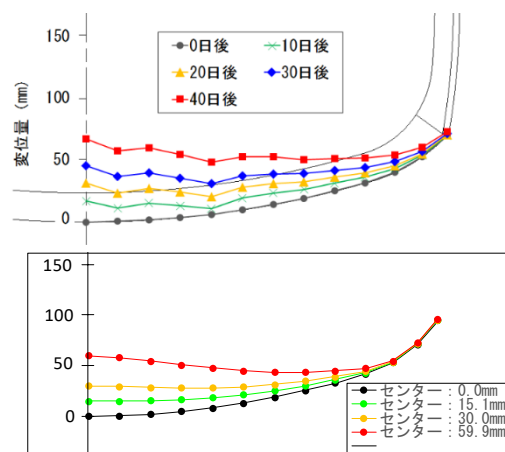


図-14 盤ぶくれの計測値（上）と解析値（下）の比較

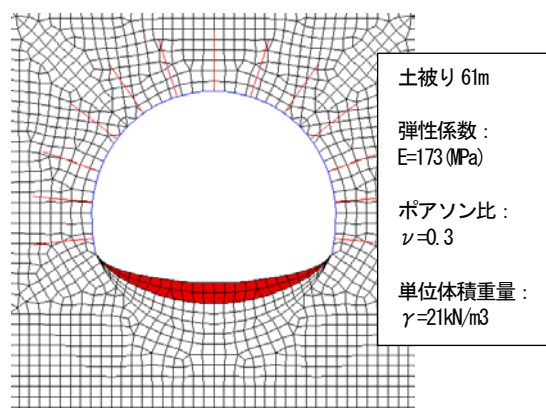


図-15 解析メッシュと膨張領域

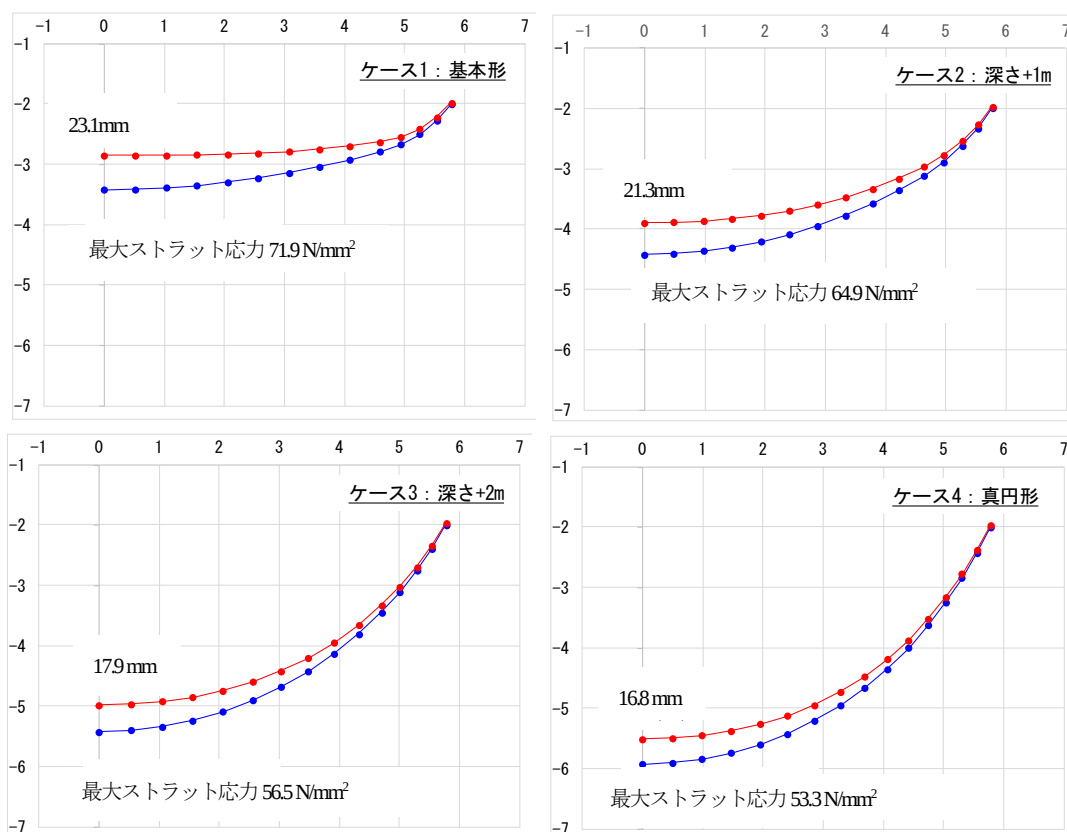


図-16 インバート形状による隆起量とストラット応力の比較

7. 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をもとに、対策工を選定して施工する手法について述べた。通常のA計測でも微小な変位が長期にわたり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。掘削時に変位があった個所で今回の手法を適用して対策することで、供用後において路盤が変位することを防げるものと考えられる。

また、FDM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議論の余地はあるが、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。

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位を復旧する, 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) 山口梅太郎, 西松裕一: 岩盤力学入門, pp.32-40, 1976.
- 9) 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位の計測および解析による変位メカニズムの考察, トンネル工学報告集, 第19巻, pp.173-180, 2009.
- 10) 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.
- 11) 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.

(2018. 8. 10 受付)

LONG-TERM PREDICTION OF HEAVING AND ITS COUNTERMEASURES BY NUMERICAL ANALYSIS IN MOUNTAIN TUNNELS

Kazuo MIYAZAWA, Hideo KINASHI, Takashi AKIYAMA Satoshi ITO
and Keisuke NARATA

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 have been observed. Reflecting this measurement result, we investigated an inverted structure that can counteract the squeezing by numerical method.