

# 数値解析を用いた盤ぶくれの程度による トンネルインバート健全性の解明

持田 新太郎<sup>1</sup>・林 久資<sup>2</sup>・岡崎 泰幸<sup>3</sup>・進士 正人<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: a029veu@yamaguchi-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 山口大学大学院 助教 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 松江工業高等専門学校 助教 環境・建設工学科 (〒690-8518 島根県松江市西生馬町 14-4)

E-mail: okazaki@matsue-ct.jp

<sup>4</sup>フェロー会員 山口大学大学院 教授 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

山岳トンネルでは、盤ぶくれの生じる可能性のある地山条件下でのトンネル施工では堅固な地山であってもインバートの設置を行うことが多い。しかしながら、施工時にインバートが設置されたトンネルが盤ぶくれによりインバートに損傷を受けたケースも報告されている。そこで、本研究では、施工時にインバートが設置されたトンネルの供用中に、盤ぶくれ現象が生じた場合にインバートに与える影響について、数値解析を用いた検討を行った。その結果、盤ぶくれ量とインバートの損傷度合い、インバートの浮上がり量の関係を明らかにすることができた。また、インバートの改修などで曲率が異なるインバートが設置された場合の影響について解明することができた。

**Key Words:** heaving, numerical analysis, maintenance management, swelling, tunnel invert

## 1. はじめに

山岳トンネルでは、供用中に変状が発生することがある。中でも、盤ぶくれは車両の走行性に直結する変状であるため、変状が生じたトンネルには速やかな対策が必要となる。盤ぶくれとは、山岳トンネルの底盤の下部領域にて、地山の地圧等によってトンネルが内空方向に変形する現象である。供用中に盤ぶくれが発生したトンネルは、土被りが50m以上で地山強度比が低く、一軸圧縮強さが12MPa以下のような軟岩地山（特に、グリーンタフ地域）に多く見られる傾向にあることが報告されている<sup>1)</sup>。また、これらには軟岩の工学的性質であるスウェリング（地山に膨潤性粘土鉱物が含まれる場合に発生する吸水膨張）とスクィージング（地山の塑性化に伴う押し出し）が盤ぶくれに起因すると考えられている（図-1参照）。スクィージングは、地山の強度に対して発生応力が大きくなることで地山が塑性化し、トンネル内空方向に底盤部が押し出す現象である。スウェリングは、山岳トンネルの排水管のある路盤部に地下水が集まることに

よって路盤部に存在する膨潤性粘土鉱物が地下水を吸収し膨張する現象である。これらの現象によって発生する盤ぶくれに対して、盤ぶくれによる影響の発生が予想される凝灰岩や蛇紋岩等が含まれる地山では、地山等級Cに区分される比較的硬質な地山においてもインバートを施工することが原則として定められており<sup>2)</sup>、盤ぶくれ対策としてトンネル施工時にインバートを設置すること

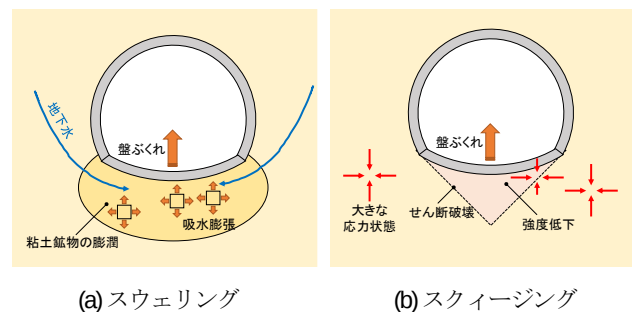


図-1 スウェリングとスクィージングによる盤ぶくれのイメージ  
図1)を一部加筆

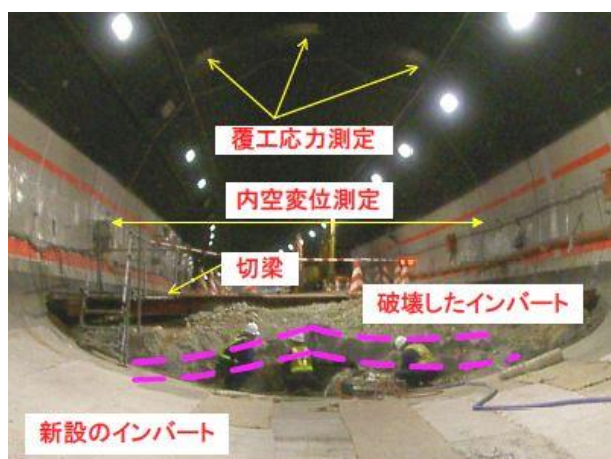


図-2 盤ぶくれによるインバートの損傷例<sup>4)</sup>

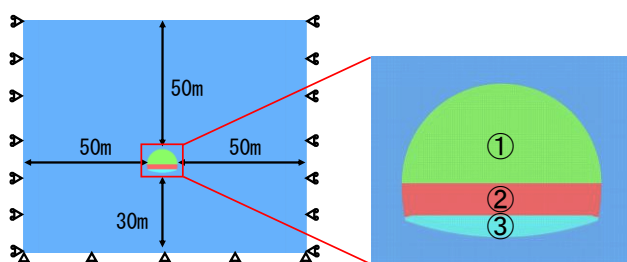


図-4 解析領域と掘削手順

が最も基本な対策となっている。しかしながら、施工時にインバートを設置したトンネルでも供用後の盤ぶくれによって、インバートの損傷が報告されており（図-2参照）<sup>3) 4)</sup>、維持管理において問題となっている。

盤ぶくれの発生要因は、前述した中でも主に地山のスウェリングであると考えられているが、岩種や風化度合い、地下水の供給量等によって異なり、盤ぶくれによる路盤隆起の有無やその規模をトンネル施工前の設計時において評価・把握しにくい。さらに、盤ぶくれによる影響が生じやすいインバート部は路面下部に位置しているため、トンネル供用中に状態を調査することが難しい。しかしながら、盤ぶくれの程度とインバート損傷状態の関係さらには、路面変状の発生量と盤ぶくれとの相関性が明らかになれば維持管理段階において極めて有益な情報となる。

そこで、本研究では、トンネル掘削時にインバートが施工されたトンネルを対象に、盤ぶくれの程度とインバートの状態の関係について、インバートの曲率を変更した場合の盤ぶくれ抑制効果について、数値解析を用いた検討を行った。

## 2. 数値解析による盤ぶくれ現象の表現

本研究では、トンネル掘削時にインバートが施工され

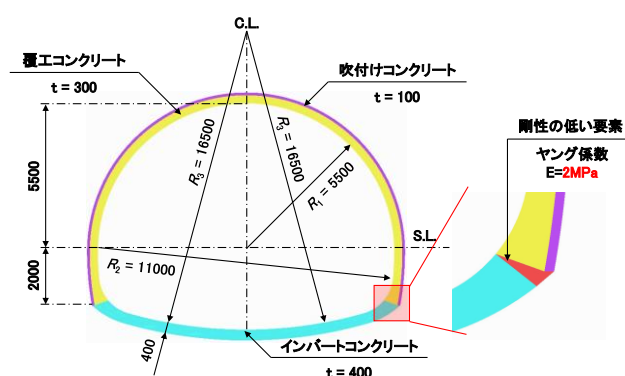


図-3 トンネル断面（インバート半径  $3.0 \times R_1$ ）

表-1 解析物性値<sup>5)</sup>

|                                      | 地山     | 吹付け   | 覆工    | インバート |
|--------------------------------------|--------|-------|-------|-------|
| 材料構成則                                | 弾完全塑性体 | 線形弾性体 |       |       |
| 単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 24.0   | 23.5  | 23.5  | 23.5  |
| ヤング係数 $E$ (MPa)                      | 1000   | 4000  | 20000 | 20000 |
| ポアソン比 $\nu$ (—)                      | 0.25   | 0.20  | 0.20  | 0.20  |
| 粘着力 $c$ (MPa)                        | 2.0    | —     | —     | —     |
| 内部摩擦角 $\phi$ (deg)                   | 35     | —     | —     | —     |
| 引張強さ $\sigma_t$ (MPa)                | 0.2    | —     | —     | —     |

たトンネルを対象に、盤ぶくれの程度とインバートの状態の関係を明確にするため、三次元有限差分法コード FLAC3D（ITASCA 社製）を用いて解析を行った。数値解析の概要を以下に記述する。

### (1) 解析モデルと解析条件

本研究の数値解析におけるトンネルの断面形状は、凝灰岩質の地山に二車線道路トンネルが施工されることを想定し、図-3に示すような地山等級C程度の地山にインバートを設置する支保パターンとした。解析領域は図-4のように設定した。土被りについては、供用中に盤ぶくれが発生したトンネルにおける土被りは50m以上<sup>9)</sup>であることから、その最小値である50mを解析モデル上の土被りとし、奥行1.0mの二次元平面ひずみモデルとした。本研究では、地山の材料構成則を弾完全塑性体とし、吹付けコンクリート（以下、吹付けとする）、覆工、インバートの材料構成則を線形弾性体としてモデル化を行った。また、解析物性値については、地山等級C程度の地山物性を既往の文献<sup>5)</sup>を参考に表-1の通り設定した。また、インバートと覆工の打継ぎ目をモデル化するか否かによって軸力やせん断力の計算結果が変化することが想定できる。そこで、本研究では、インバートと覆工をモデル化する際、覆工とインバートの接続部の打継ぎ目を考慮し、接続部に剛性の低い要素（ヤング係数  $E=2.0\text{MPa}$ ）を設けることで、覆工とインバートの打継ぎ目を簡易的に表現した（図-3内赤色の要素）。解析モ

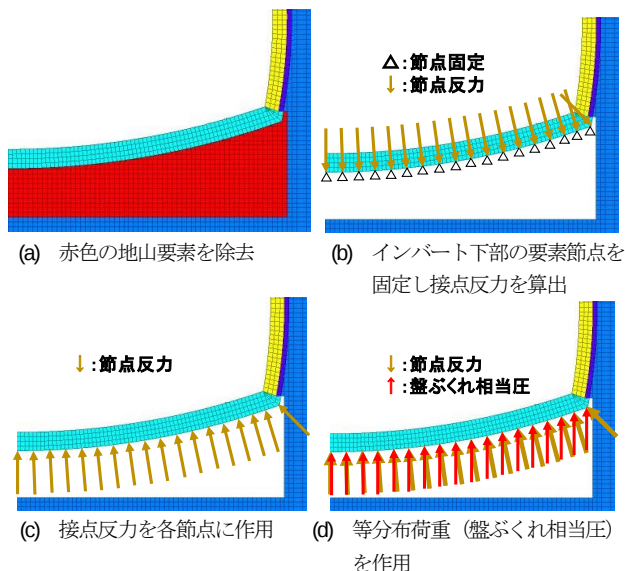


図-5 盤ぶくれ発生解析のプロセス図

デルの境界条件については、図-4に示すように、解析モデルの上面以外をローラー支持として設定した。

## (2) トンネル掘削解析

図-4に示す解析モデルに対して初期応力解析を実施した。その後、応力解放率を用いた二次元トンネル掘削解析を実施した。以下にトンネル掘削解析の手順について記述する。

### a) 上半掘削

トンネル上半 (図-4内①) を掘削し (上半の応力解放率 40%)、その後、上半の吹付けを設置 (上半の応力解放率 100%) する。

### b) 下半掘削

トンネル下半 (図-4内②) を掘削し (下半の応力解放率 40%)、その後、下半の吹付けを設置 (下半の応力解放率 100%) する。

### c) インバート掘削

インバート部分 (図-4内③) を掘削する。このとき、インバート部分の応力解放率は 100%とした。その後、覆工とインバートを一括で設置し、覆工とインバートには地山からの外力が作用していない状態を再現した。

## (3) 盤ぶくれ発生解析

本研究では、盤ぶくれによってインバートに作用する膨張圧を簡易的に表現し、膨張圧がインバートに与える影響を把握するために、図-5に示す荷重 (以下、盤ぶくれ相当圧とする) をインバートに直接作用させる解析<sup>9)</sup>を実施した。まず、インバート下部の地山要素 (図-5(a)内の赤色の地山要素) を取り除き、吹付け下部の要素の各節点の変位を固定する (図-5(b))。なお、図-5(a)のとき、地山要素を取り除く領域は、表-2 のように

表-2 解析ケース

| 解析条件  |       |       |
|-------|-------|-------|
| Case1 | Case2 | Case3 |
| ①全体   | ②中央付近 | ③片側のみ |
|       |       |       |

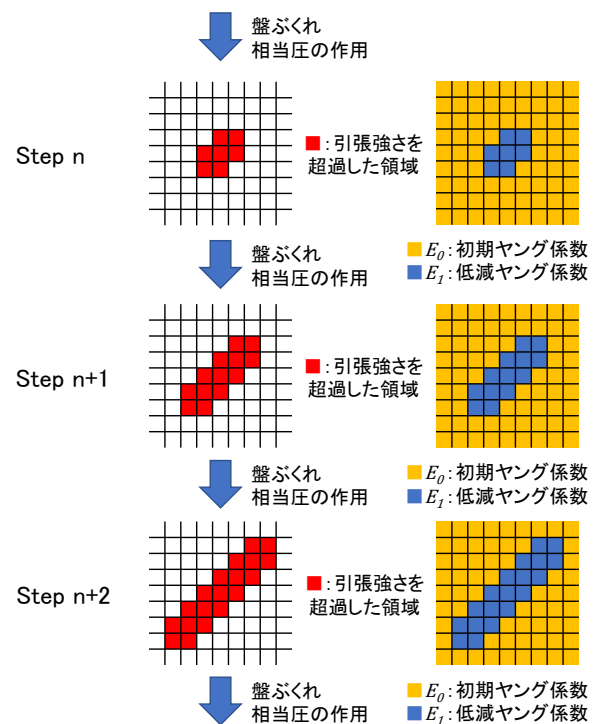


図-6 インバート損傷表現のプロセス図

Case1 (インバート全体) は全体を、Case2 (インバート中央付近) は中央部のみ、Case3 (インバート片側のみ) は片側のみ (図-5(a)内の赤色の地山要素を削除した。その後、固定した吹付けの節点の水平・鉛直方向の反力を算出する。算出した節点荷重を、地山要素を取り除いた状態での吹付けの各節点に作用させることで、要素を除去する前の吹付け要素の応力状態を再現する (図-5(c))。その後、吹付けの下部に等分布荷重を鉛直上向きに作用させることで、インバートに盤ぶくれ現象に伴う膨張圧を想定した荷重を作用させる (図-5(d))。なお、盤ぶくれ相当圧を作用させる領域は表-2に示す計3パターンを実施した。また、盤ぶくれ相当圧の値については、トンネル建設時あるいは建設完了後に変状が生じた区間から採取した試料について岩石試験を行った研究より、最大で約 650kPa の吸水膨張圧が確認されている<sup>9)</sup>。そこで、本研究では、盤ぶくれによる膨張圧が最大で約 650kPa まで作用すると仮定した。そして、盤ぶくれ相当圧を約

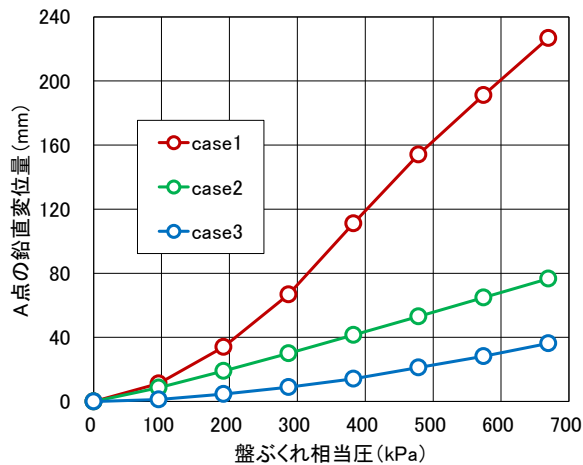


図-7 インバート中央部 A 点の鉛直変位

650kPa 程度まで徐々に増加させる解析を行うことで、盤ぶくれによってインバートに作用する膨張圧を簡易的に表現し、膨張圧がインバートに与える影響を把握することを試みた。

さらに本研究におけるインバートは、盤ぶくれによる損傷を模擬できるようにした。まず、インバート部の各要素内の引張応力を算出し、コンクリートの引張強さに達した場合は、その要素のヤング係数を大幅に低下させることでインバートの損傷をモデル化した。さらに、損傷領域の進展を模擬するために、コンクリートのヤング係数を 20000MPa ( $E_0$ : 初期ヤング係数とする) から 2MPa ( $E_1$ : 低減ヤング係数とする) まで低減させた (図-6 参照)。なお、コンクリートの引張強さは以下の式(1)に基づいて算出した<sup>9)</sup>。

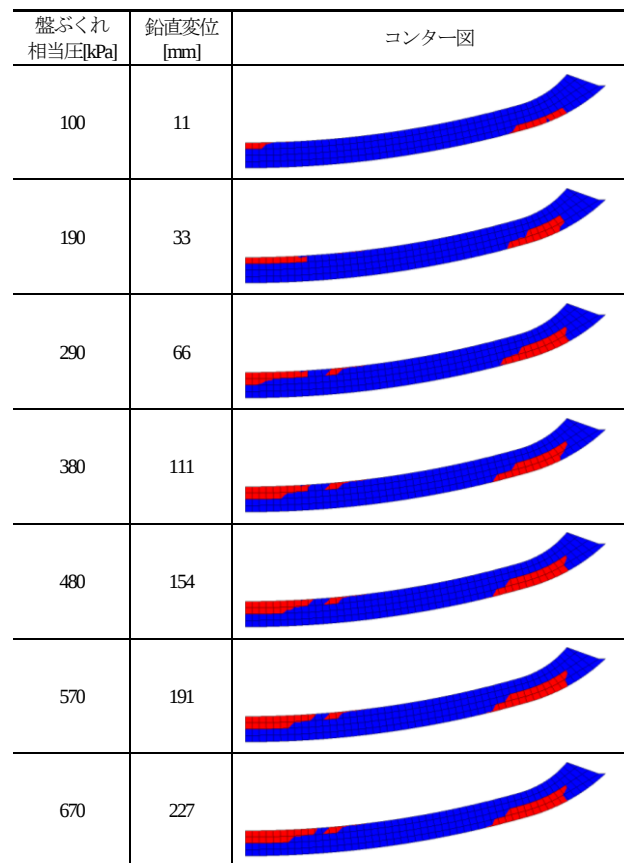
$$f_t = 0.23f_c'^{2/3} \quad (1)$$

ここで、 $f_t$ : コンクリートの引張強さ (MPa)、 $f_c'$ : コンクリートの一軸圧縮強さ (MPa) である。

### 3. 解析結果と考察

#### (1) インバート A 点の鉛直変位

図-7 に、盤ぶくれ相当圧が 100kPa, 190kPa, 290kPa, 380kPa, 480kPa, 570kPa, 670kPa の時の盤ぶくれ相当圧とインバート中央部 A 点の鉛直変位の関係を示す。図-7 より、盤ぶくれ相当圧が増加していくと、インバート中央部 A 点の鉛直変位は徐々に増加していることがわかる。この結果より、盤ぶくれ相当圧が作用するとインバート中央が徐々に隆起し、インバートを変形させることがわかった。また、盤ぶくれ相当圧の作用する領域の違いについて着目すると、Case1, Case2, Case3 の順にインバー



※  $\blacksquare \geq f_t = 0.23f_c'^{2/3}$

図-8 case1 におけるインバートの引張応力の変化

ト中央部 A 点の鉛直変位が大きいことがわかる。特に、Case1 については、盤ぶくれ相当圧が 190kPa を超過した時点からインバート中央部 A 点の鉛直変位の増加が Case2, 3 と比べ顕著になって表れていることがわかる。また、Case1 は最大で約 240mm 程度の変形が生じていることが読み取れるが、日本の道路トンネルでは、盤ぶくれによる変形の総量が約 200mm 程度での対策を実施したケースが多く報告されている<sup>10)</sup>ことから、Case1 のようにインバート全体に盤ぶくれ相当圧が作用し、盤ぶくれ相当圧が約 670kPa 程度の場合は、200mm 以上の変形が発生しているため、早期の対策を施す必要があると考えられる。一方で、Case2, Case3 については、インバート中央部 A 点の鉛直変位は線形的に増加しているが、最大で Case2 は 80mm, Case3 は 40mm となり、Case1 よりも比較的小さいことがわかる。また、Case2, Case3 では A 点の鉛直変位が Case1 のように急激に増加するような傾向は見られなかった。このことから、Case2, Case3 のような領域の盤ぶくれ、かつ盤ぶくれ相当圧が約 670kPa 以下の場合は、トンネル内を走行する車両等に与える影響は Case1 に比べて小さいと考える。

#### (2) インバート損傷領域の推定

本研究では、A 点の浮き上がり量の違いによるインバ

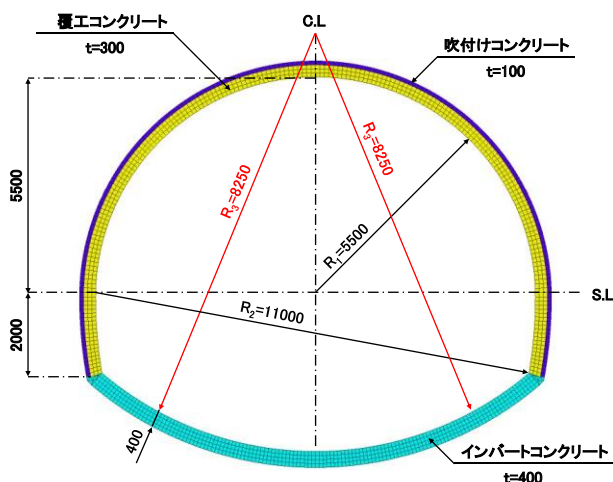


図-9 トンネル断面図（インバート半径  $1.5 \times R_1$ ）

ートの損傷領域の変化について着目した。ここでは特に解析結果の中でも、盤ぶくれ相当圧に対するA点の変位量が大きいCase1について着目する。図-8に、Case1の作用する盤ぶくれ相当圧に対するインバート中央部A点の鉛直変位と、その際のインバートの引張応力のコンターを図-8に示す。なお、図-8は、コンクリートの引張強度を超過した箇所を赤色で示している。図-8より、A点の鉛直変位量が大きくなると、引張応力を超過した領域がC.L.近傍の内空側とインバートの曲率が小さい箇所の背面で徐々に増大していることがわかる。このことから、盤ぶくれ相当圧が増大すると、インバートの損傷が進み、インバート中央部（A点）が押し上げられていく様子が再現されていることがわかる。

#### 4. インバート曲率の違いによる盤ぶくれ抑制効果の検討

3章の解析結果より、Case1のようにインバート全体に盤ぶくれ相当圧が作用する場合、200mmを超えるような浮き上がりが生じるため、インバートの改修等の盤ぶくれ対策が必要となってくる。例えば、供用中のトンネルでの盤ぶくれ対策として、下向きロックボルト工<sup>4)</sup>や、インバートの形状を変更する対策<sup>9)~15)</sup>が検討されている。そこで、本研究では、施工時の盤ぶくれ対策としてインバートの曲率を  $3.0 \times R_1$  から  $1.5 \times R_1$  へ変更した場合の盤ぶくれ抑制効果について検討を行った。具体的には、2.(3)項の盤ぶくれ発生解析の中でも最もインバート中央部A点の鉛直変位が大きかったCase1（インバート全体）についてインバートの半径を従来の  $3.0 \times R_1$  から  $1.5 \times R_1$  へ変更し、盤ぶくれ発生解析を実施した（図-9参照）。そして、インバート中央部A点の鉛直変位を計測し、3.(1)項のCase1の数値解析結果と比較することで、インバート半径  $1.5 \times R_1$  の場合の盤ぶくれの抑制効果につ

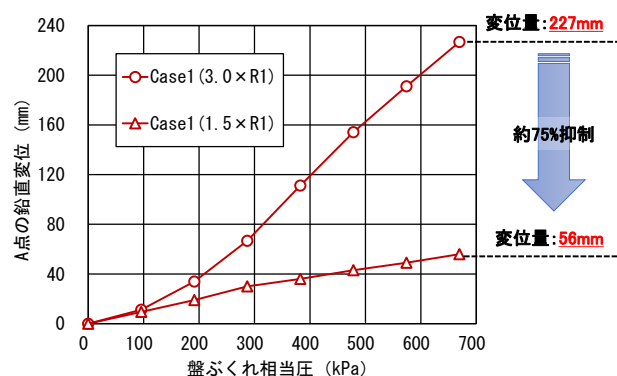


図-10 インバート半径の違いによるA点の鉛直変位の比較

いて考察した。

図-10に表-2内のCase1（インバート全体）のインバート半径  $3.0 \times R_1$  と  $1.5 \times R_1$  の場合における盤ぶくれ相当圧とインバート中央部A点の鉛直変位の関係の比較を示す。図-10より、Case1（ $1.5 \times R_1$ ）では、盤ぶくれ相当圧が約650kPa時点のA点の変位量は56mmとなり、これはCase1（ $3.0 \times R_1$ ）における盤ぶくれ相当圧が約650kPa時点での変位量227mmと比較すると、Case1（ $1.5 \times R_1$ ）はCase1（ $3.0 \times R_1$ ）よりも約75%A点の鉛直変位を抑制できていることがわかる。このことから、インバート全体に盤ぶくれ相当圧が作用した場合、インバート半径を  $1.5 \times R_1$  で施工すれば、将来的なインバートの変形量を約75%抑制できることがわかった。また、インバートの曲率を  $1.5 \times R_1$  にして施工すると、同じ盤ぶくれ相当圧が作用すると仮定しても、A点の鉛直変位量が200mmを超えるような盤ぶくれは生じないことがわかる。また言い換えると、インバートに生じる盤ぶくれ相当圧を何らかの方法で予め予測することができれば、設計時に曲率を小さくしたインバートを盛り込むことも考えられる。

#### 5. まとめと今後の課題

本研究では、トンネル掘削時にインバートが施工されたトンネルを対象に、盤ぶくれの程度とインバートの状態の関係について、インバートの曲率を変更した場合の盤ぶくれ抑制効果について、数値解析を用いた検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 盤ぶくれ相当圧が作用するとインバート中央部が徐々に隆起し、インバートを変形させることがわかった。また、盤ぶくれ相当圧の作用する領域の違いについて着目すると、Case1、Case2、Case3の順にインバート中央部A点の鉛直変位が大きかった。
- (2) A点の鉛直変位量が大きくなると、引張応力を超過した領域がC.L.近傍の内空側とインバートの

曲率が小さい箇所の背面で徐々に増加していることがわかった。このことから、盤ぶくれ相当圧が増大すると、インバートの損傷が進行し、インバート中央部 A 点が押し上げられていく様子を再現できていることがわかった。

- (3) インバート全体に盤ぶくれ相当圧が作用し、改修が必要となった場合、インバート半径を  $1.5 \times R_i$  で改修すれば、インバートの変形量を約 75%抑制できることがわかった。

トンネルの維持管理においてインバートは路面下部に位置しており、トンネル供用中での状態を調査することは難しく、供用中のトンネルでの盤ぶくれ量を計測し、本研究の数値解析結果と比較することで、トンネル供用中のインバートの損傷度合いを判定できる可能性が示唆された。また、インバートの曲率を小さくして施工すると、本研究と同等の盤ぶくれ相当圧が作用すると仮定しても、インバートの変形を抑制できるため、盤ぶくれを考慮したトンネル設計に寄与できると考えられる。今後は、他の支保パターンにおける解析の実施、実現象との整合性について検討していきたいと考えている。

#### 参考文献

- 1) 嶋本敬介, 野城一栄, 小島芳之, 中西祐介, 塚田和彦, 朝倉俊弘: 地山の塑性化に伴う山岳トンネルの路盤隆起現象とその対策工に関する研究, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.69, No.1, pp.54-72, 2013.
- 2) 日本道路協会: 道路トンネル技術基準 (構造編) ・同解説, pp.125-131, 2003.
- 3) 渡邊長浩, 吉田祐一, 尾崎裕司, 太田敬一: プレキャストインバートを用いた供用中のトンネルの盤ぶくれ対策, トンネルと地下, Vol.51, No.10, pp.19-30, 2020.
- 4) 奥井裕三, 鶴原敬久, 太田裕之, 佐久間智, 中田主税: 盃山トンネルに発生した急激な路盤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.
- 5) 土木学会: トンネル・ライブラリー第 16 号 山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務, pp.152-153, 2006.
- 6) 小林寛明, 上野光, 磯谷篤実, 嶋本敬介, 岸田潔: 完成後の盤ぶくれを防ぐ新たなインバートの抑制効果, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.75, No.1, pp.116-129, 2019.
- 7) 持田新太郎, 岡崎泰幸, 林久資, 進士正人: インバートが設置されたトンネルに変状が生じた場合の覆工への影響に関する一考察, 第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演集, pp.109-113, 2021.
- 8) 川越健, 嶋本敬介, 野城一栄: 泥岩中の割れ目の密集部がトンネルの変状に与える影響の検討, 第 44 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.295-300, 2016.
- 9) 土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編], pp.34-43, 2017.
- 10) 土木学会: トンネル・ライブラリー第 25 号 山岳トンネルのインバート—設計・施工から維持管理まで—, pp.210-211, 2013.
- 11) 嶋本敬介, 野城一栄, 小島芳之, 塚田和彦, 朝倉俊弘: 地山の吸水膨張による山岳トンネルの路盤隆起現象とその対策工に関する研究, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.68, No.3, pp.165-179, 2012.
- 12) 嶋本敬介, 野城一栄, 小島芳之, 塚田和彦, 朝倉俊弘: 建設時の影響を考慮した山岳トンネルの路盤隆起現象とその対策工に関する研究, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.69, No.2, pp.105-120, 2013.
- 13) 小林寛明, 下津達也, 上野光, 渡辺和之, 嶋本敬介, 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, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.72, No.3 (特集号), pp.196-1107, 2016.
- 14) 中野清人, 森田篤, 西村和夫: 施工事例に基づく早期閉合の支保構造の分析と支保の効果に関する考察, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.75, No.1, pp.7-25, 2019.
- 15) 中野清人, 安積淳一, 宮沢一雄, 渡邊浩之, 土門剛, 西村和夫: 盤ぶくれ現象を考慮した対策インバート構造の合理化に関する研究, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.75, No.1, pp.40-55, 2019. (2021. 8. 6 受付)

## CLARIFICATION OF TUNNEL INVERT HEALTH USING THE HEAVING LEVEL OF NUMERICAL ANALYSIS

Shintaro MOCHIDA, Hisashi HAYASHI, Yasuyuki OKAZAKI and Masato SHINJI

In mountain tunnels, the construction of tunnels often includes the invert, even on hard ground, when the ground conditions are such that heaving can occur. However, it has been reported that some tunnels in which inverts were constructed during the construction process have suffered damage to the invert due to heaving. In this study, the effects of heaving phenomenon on the invert of a tunnel with an invert at construction were studied using numerical analysis. As a result, the correlation between the amount of heaving, the damage level of the invert and the amount of lift of the invert was clarified. In addition, the effect of the construction of an invert with a different radius of curvature was clarified.