

数値解析による供用トンネルインバートの変状予測に関する研究

山口大学大学院 学生会員 ○持田新太郎  
 山口大学大学院 正会員 林 久資  
 松江工業高等専門学校 正会員 岡崎 泰幸  
 山口大学大学院 フェロー会員 進士 正人

1. はじめに

山岳トンネルは供用後に変状を発生することがあるが、その要因はさまざまである。トンネルの変状を抑制するためにインバートを施工する事例も多いが、それでも供用後に盤ぶくれが報告されるケースがみられる。そのため、凝灰岩や蛇紋岩といった潜在的に盤ぶくれの発生が懸念されるような地山では、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>1)</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が最も基本的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に盤ぶくれによるインバートの損傷が報告されている<sup>2)</sup>。また、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困難であり、盤ぶくれの程度とインバートの状態の関係を知ることは難しい。

そこで、本研究では、インバートが施工されたトンネルに盤ぶくれが生じた場合の盤ぶくれの程度とインバートの状態の関係について、数値解析を用いた検討を行った。

2. 数値解析の各種条件

2.1 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-1(a)のような地山等級 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-1(b)のように土被り 50m の奥行 1m の二次元平面ひずみモデルとした。本研究では、地山材料構成則を弾完全塑性体とし、吹付け、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>3)</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

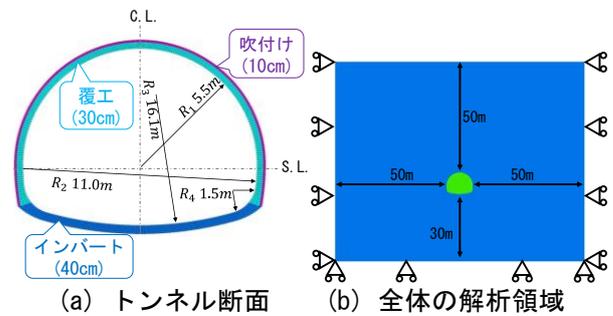


図-1 解析モデル

表-1 解析物性値<sup>3)</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		
弾性係数 $E$ (MPa)	1000	4000	20000	
ポアソン比 $\nu$	0.25	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	—	—	—

力やせん断力の算出値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を設けた。解析モデルの境界条件については、図-1(b)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た。

2.2 解析手順

図-1(b)に示す解析モデルに初期応力解析を実施し、次にトンネル掘削解析を以下の手順で実施した。

- ① 上半掘削：トンネル上半掘削（上半応力開放率 40%）。その後、上半吹付け（上半応力開放率 100%）。
- ② 下半掘削：トンネル下半掘削（下半応力開放率 40%）。その後、下半吹付け（下半応力開放率 100%）。
- ③ インバート掘削：トンネルインバート部分を掘削（インバート部分の応力開放率 100%）。
- ④ 覆工・インバート施工：覆工とインバートを一括で打設し、覆工とインバートには地山からの外力が

キーワード 山岳トンネル, インバート, 膨ぶくれ, 数値解析

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学大学院 創成科学研究科 TEL 0836-85-9332

作用していない状態を再現した。

さらに、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、本研究では、図-2 に示す荷重(以下、盤ぶくれ相当圧とする)をインバートに作用させる解析<sup>4)</sup>を実施した。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、盤ぶくれ相当圧を0.67MPaまで徐々に増加させた。また、本研究では、盤ぶくれによるインバートの引張り破壊を模擬するために、インバート部の要素における引張応力を算出し、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た。これによって、盤ぶくれによってインバートに発生する損傷の表現を試みた。

### 3. 数値解析結果およびまとめ

図-3 に、盤ぶくれ相当圧を徐々に増加させた場合の各ケースにおけるA点の鉛直変位の変化を示す。図-3より、全ケースにおいてA点の鉛直変位は盤ぶくれ相当圧の増加に伴い、徐々に増加していることがわかる。また、盤ぶくれ相当圧の作用領域の違いに着目すると、全体(case1)に盤ぶくれ相当圧が作用した場合が最も鉛直変位が大きく、片側のみ(case3)に作用させた場合がA点の鉛直変位が最も小さくなることがわかった。

次に、A点の浮上がり量の違いによるインバートの応力状態について着目した。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において、鉛直変位量 $u=20\sim 100\text{mm}$ の時のインバートの引張応力のコンターを図-5に示す。図-5より、A点の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る。現状、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いので、供用中のトンネルでの盤ぶくれ量を計測することにより、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。今後は、他の支保パターンにおける数値解析を実施していきたいと考えている。

### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 例えば、渡邊ら：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,

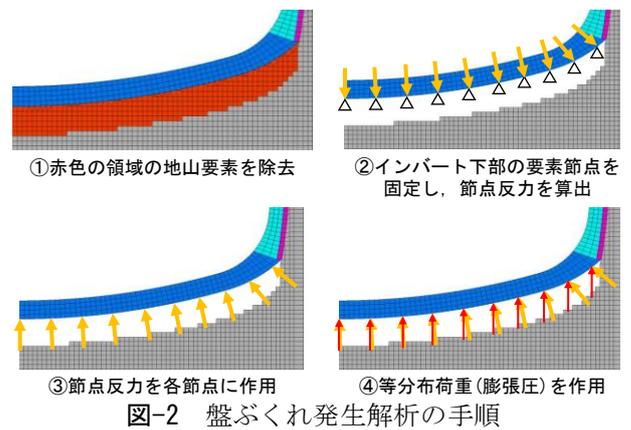


図-2 盤ぶくれ発生解析の手順

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
荷重条件			

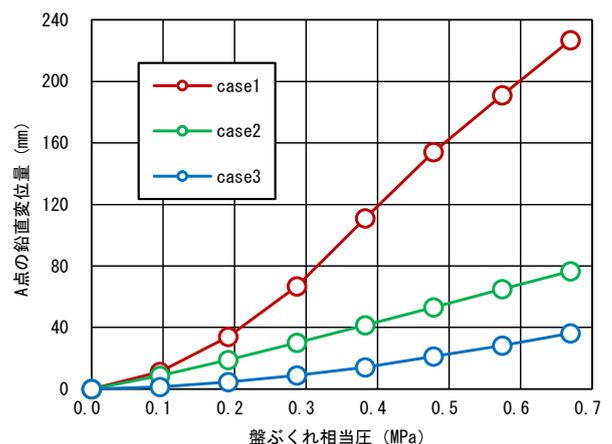


図-3 A点の変位量と盤ぶくれ相当圧の関係

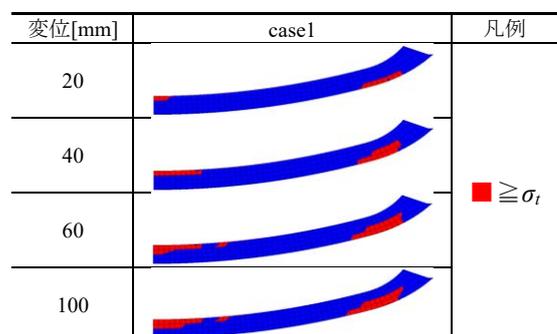


図-4 case1におけるインバートの引張応力<sup>5)</sup>

No.10, pp.19-30, 2020.

- 3) 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.
- 4) 例えば、持田ら：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.
- 5) 土木学会：2017年コンクリート標準示方書[設計編], pp.34-43, 2017.