

特集：鉄道トンネルの設計技術

# 地山劣化法を用いた 山岳トンネル覆工およびインバートの性能照査法

嶋本 敬介\* 野城 一栄\* 岡野 法之\*\*

Performance Verification Design Method of Plain Concrete Lining and Invert  
Assuming Ground Displacement after Completion

Keisuke SHIMAMOTO Kazuhide YASHIRO Noriyuki OKANO

There are various structures in railway systems. It is required that structures have the same level of performance and that their performance should be verified quantitatively. Therefore, we proposed a method for verifying the performance of plain concrete lining and invert, and made a trial design assuming a mountain tunnel receiving ground deformation after completion. In the trial design, we estimated residual displacement from displacement speed, and imposed the corresponding displacement to the lining and invert using an analysis method of reducing the strength of the ground. As a result, it was found that the performance can be verified by the proposed method and that the required performance can be satisfied by adopting strong invert structures against heaving, even when large residual displacement exists to some extent.

キーワード：山岳トンネル，覆工，インバート，性能照査型設計法

## 1. はじめに

鉄道山岳トンネルの覆工およびインバートは、図1に示すように、

- 条件1：自重以外の常時の外力が想定される場合
- 条件2：完成後に地山から変位を受けることが想定される場合
- 条件3：上記以外

の3つの条件に応じて、構造や設計法を選択すればよい。構造、設計法は、条件1の場合は、鉄筋コンクリート(RC)構造として緩み土圧、全土圧、あるいは地震時の地盤変位を作用させた骨組解析を行って設計すれば良い。条件3の場合は、無筋コンクリート構造として、自重に対して問題ないことを確認することによれば良い。条件2の場合も、実務では、掘削時に十分な支保量の支保により地山の変形を確実に収束させた後に施工することとして条件3として取扱い、覆工およびインバートは無筋コンクリート構造とすることが多いと考えられる。

ただし、ここで、条件によっては、地山の変形の確実な収束を確認する前に、覆工およびインバートを打設する必要がある場合も考えられる。また、掘削時に、十分な支保量の支保とし、変形が確実に収束したことを確認した後に施工することとした場合でも、地質がかなり悪

いなどの特別な理由により、供用後の万一の変状の顕在化に備えることが求められる可能性も考えられる。さらには、このような場合を想定して、盤膨れに対応したインバート構造を新たに適合みなし仕様として設定する目的で、数値的な性能照査を行うことも考えられる。以下、条件2の場合で数値的な照査が求められる場合を想定し、完成後の地山変位を推定、考慮して、無筋コンクリートの覆工およびインバートの性能照査法の検討を行った。

## 2. 地山劣化法を用いた性能照査

### 2.1 概要

ここでは、覆工およびインバートが完成後に地山変位を受ける場合として、掘削時の地山変形の収束に長い時間を要し、僅かな変位速度が残っている状態で覆工およびインバートを打設する場合を仮定して照査を行うこととした。具体的には、地山劣化法により完成後の地山変位を推定し、これを作用地圧として無筋コンクリートの覆工およびインバートの照査を行う。

地山劣化法は、地山と、覆工およびインバートを一体としてモデル化し、掘削ステージと強度低下ステージを一貫して表現し<sup>3)</sup>、覆工およびインバートが完成後に地山から受ける作用を、掘削ステージにおける地山の緩みを考慮したうえで逐次表現する点が特徴である。

今回実施した、地山劣化法を用いた性能照査の流れを図2に、地山劣化法の解析モデルを図3に示す。まず、掘削ステージの解析を行い、その後、強度低下ステージ

\* 構造物技術研究部 トンネル研究室

\*\* 構造物技術研究部 トンネル研究室 (現 JR 東日本コンサルタンツ)

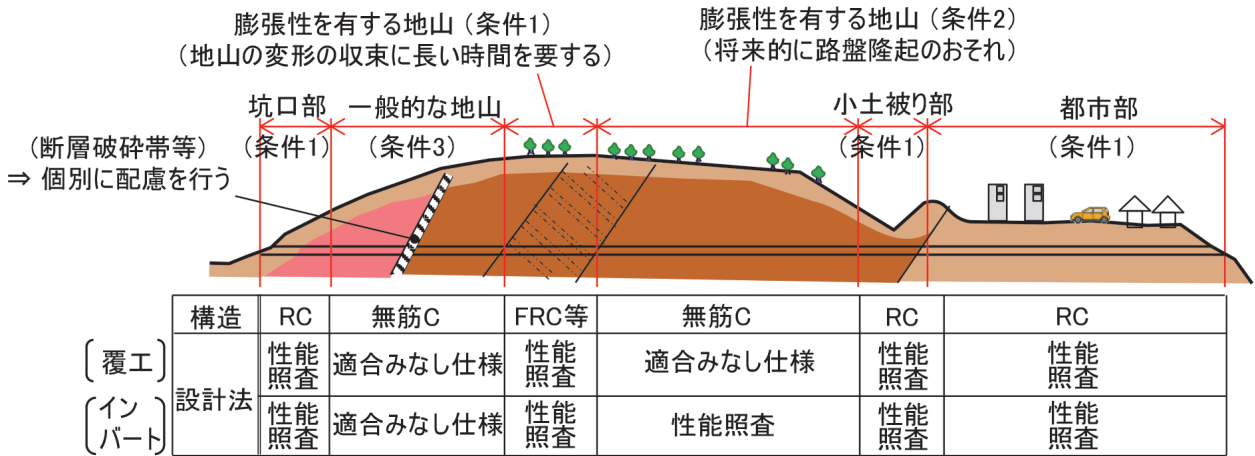


図1 鉄道山岳トンネルの覆工およびインバートの設計法の分類<sup>1)</sup>

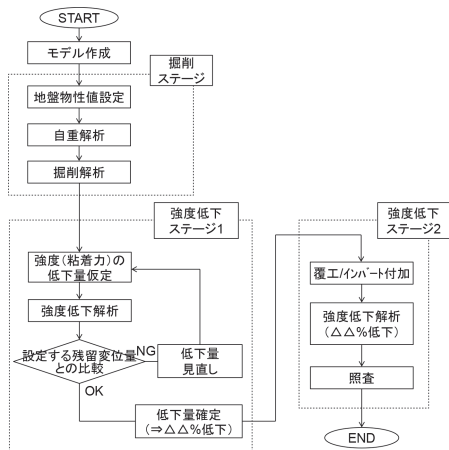


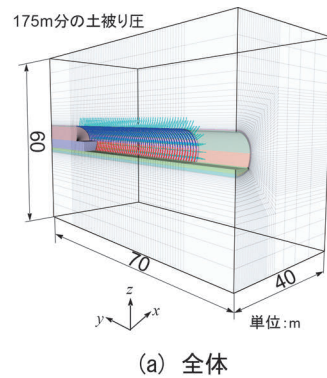
図2 地山劣化法を用いた性能照査の流れ<sup>2)</sup>

の解析を行う。強度低下ステージでは、ステージ1として、覆工やインバートを設置しない状態で、地山の強度を低下させることにより強度低下解析を行う。このとき、地山の強度は、後述する所定のトンネルの変位（残留変位）が得られるまで低下させる。次に、ステージ2として、覆工やインバートを設置した状態で、改めて、上記と同様の低下量だけ地山の強度を低下させて、覆工およびインバートに変形を生じさせる。その後、発生応力の照査を行うというものである。

## 2.2 照査の条件

表1に解析に用いた物性値を示す。膨張性地山を表現するために、地山は強度の小さい軟岩とし、山岳トンネル設計施工標準・同解説<sup>4)</sup>を参考として、掘削時の内空変位として100mm程度の水平内空変位が出るように、各種物性値を設定することとした。

地山はMohr-Coulombの破壊規準に従う弾完全塑性体としてモデル化した。鉄道山岳トンネルにおける地山等級I<sub>s</sub><sup>4)</sup>を想定し、単位体積重量200kN/m<sup>3</sup>、土被り200mとし



(a) 全体

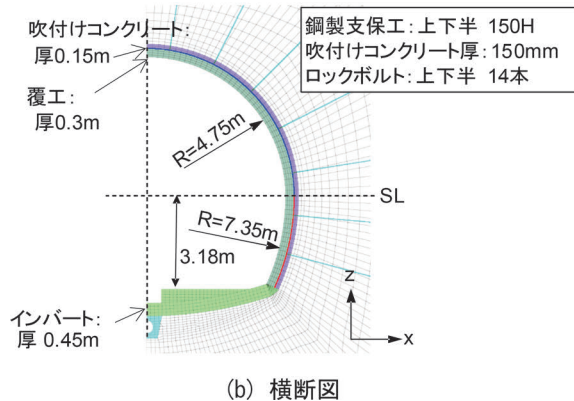


図3 地山劣化法における解析モデル<sup>2)</sup>

た場合に、解析上の地山強度比が0.5となるよう、地山の軸圧縮強さを2.0MPaとしている。その他の物性値についてはアイダシラ<sup>7)</sup>、赤木ら<sup>8)</sup>、蔣ら<sup>9)</sup>が示した軟岩の軸圧縮強さと各種物性値との相関関係より設定している。なお、過去の解析事例<sup>5)6)</sup>より、上記の値を用いると、掘削時に100mm程度の水平内空変位が生じることが確認されている。

解析対象としたトンネルは、最近の鉄道トンネルで建設される数量が多く、代表的な構造であると考えられる、新幹線標準断面（図4）とした。覆工は無筋コンクリート製の巻厚 $t=30\text{cm}$ 、インバートは無筋コンクリート製

表1 解析に用いた物性値<sup>2)</sup>

	物性		単位	物性値
	地山	土被り	$h$	m
想定一軸圧縮強さ		$q_u$	MPa	2.0
地山強度比		$C_f$	-	0.5
単位体積重量		$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	20
弾性係数		$E$	MPa	206 <sup>*</sup>
ポアソン比		$\nu$	-	0.36
粘着力		$c$	kPa	580 <sup>*</sup>
内部摩擦角		$\phi$	°	31
ダイラタンシー角		$\lambda$	°	10
側圧係数		$K_0$	-	1.0
覆工 インバート	掘削時の内空変位		mm	100程度
	弾性係数	$E$	MPa	22,000
	ポアソン比	$\nu$	-	0.20
	単位体積重量	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	23.5

※ アイダマン・蒋関係式<sup>7) 8) 9)</sup>より算定

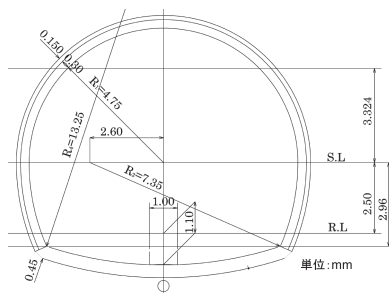


図4 解析に用いた断面<sup>2)</sup>

の巻厚  $t=45\text{cm}$  ( $I_N$  インバート<sup>4)</sup> と称される) である。

支保 (吹付けコンクリート, ロックボルト, 鋼製支保工) は地山等級  $I_S$  における標準的な支保パターン<sup>4)</sup> とし, これから算出される各種物性値を用いている。

支保のコンクリートは Mohr-Coulomb の破壊規準に従う弾完全塑性体としてモデル化し, 引張破壊による軟化についても表現することとした。覆工コンクリート, インバートコンクリートは弾性体としてモデル化した。

### 2.3 要求性能

山岳トンネルの覆工およびインバートは, 使用性については, 文献1で示したように, これまでの実績により, 適切な施工が行われれば使用上の不具合が生じていないこと, 性能が実績等により確認された防水工・排水工が用いられる場合は使用性が満足されると考えられることから, ここでは安全性 (破壊) を取り上げることにした。なお, 安全性 (破壊) の照査は覆工およびインバートが破壊しないことの確認を基本原則とするが, 実際の無筋コンクリートにおける覆工およびインバートの破壊は複雑な挙動を示し, 現状では破壊の評価手法は確立されていない。そのため, 安全側の評価として覆工に引張りひび割れが一つでも発生しない (引張応力を設計引張強度で除した照査値が1を下回る) ことを確認することとした。設計にあたり用いる安全係数を表2に示す。なお, 安全係数についても, 現時点では不明点が多く確立され

表2 検討に用いた安全係数<sup>2)</sup>

要求性能	作用係数	構造解析係数	材料係数	部材係数	構造物係数
	$\gamma_f$		$\gamma_m$		
安全性	1.1	1.0	1.3	1.1	1.2

たものが提示されていない。上記を踏まえてすべて1.0とすることも考えられるが, ここでは, 安全側の検討となるよう, RC 構造として性能照査を行う場合の各安全係数を準用することとした。

### 2.4 掘削解析

図3に示した解析モデルにおいて, 要素の除去により掘削を, また, 要素の付加により支保 (鋼製支保工, 吹付けコンクリート, ロックボルト) の設置を表現する。掘削, 支保は, 切羽の進行に合わせて実施し, 段階的なトンネルの掘削を精緻に表現することとした。図5に掘削ステージの解析結果を示す。これらより掘削時に水平内空変位が100mm程度発生していることがわかる。ここで, 水平内空変位は上半切羽が通過してすぐに計測開始する場所として, SL+1.5m高さでの値としている。これより, 表1で示した地山の解析入力値は, 地山等級  $I_S$  程度の地山を表現するものとして妥当と判断した。

### 2.5 作用

今回の性能の照査においては僅かな変位速度が残っている状態で覆工およびインバートを打設したことに起因する覆工への地圧の作用に対して, 限界状態に達しないことを確認する。想定する僅かな変位速度として, 覆工打設可否判断の目安である1mm/月の変位速度が残っている状態でインバート, 覆工が施工される状況を想定する。なお, 今回の検討においては変位はいずれ収束するものとし, 基準<sup>4)</sup>における参考資料-8.3.2「応力解放率によるFEM解析の概要」に示されるトンネル内空変位の近似関数を参考とし, 内空変位が式(1)のVoigtモデルに従い発生するものとした。

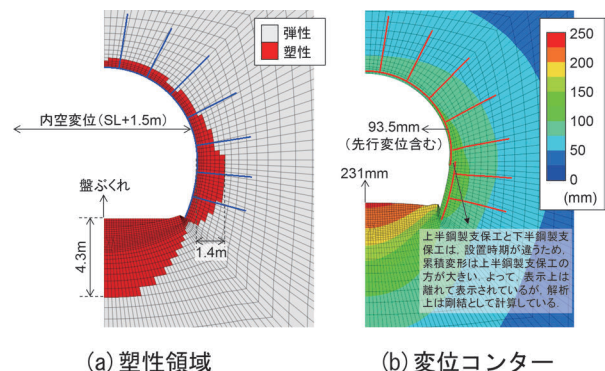


図5 トンネル掘削解析結果<sup>2)</sup>

$$u = u_0(1 - \exp(-at)) \quad (1)$$

ここに、

- $u$ ：水平内空変位量 (mm)
  - $u_0$ ：最終内空変位量 (mm)
  - $a$ ：収束係数 (1/日)
  - $t$ ：計測開始からの経過日数 (日)
- 内空変位速度は式 (2) で示される。

$$\frac{du}{dt} = u_0 \cdot a \cdot \exp(-at) \quad (2)$$

内空変位速度が 1mm/月 (= 1/30mm/日) 以下となる時の経過日数  $t_1$  は、式 (3) より式 (4) となる。

$$u_0 \cdot a \cdot \exp(-at_1) \leq \frac{1}{30} \quad (3)$$

$$t_1 \geq \frac{1}{a} \ln(30 \cdot a \cdot u_0) \quad (4)$$

経過日数  $t_1$  以降に発生する変位 (残留変位)  $u_{res}$  は、式 (5) により表される。

$$u_{res} = u_0 - u_1 = \frac{1}{30a} \quad (5)$$

ここに、 $u_1$ ：経過日数  $t_1$  時点の内空変位  
 ここで、収束係数  $a$  は過去の事例から設定することとした。図 6 に、過去に、完成後に盤ぶくれを生じた箇所掘削時に計測された内空変位の実測データを示す。これを式 (1) の  $a$  をパラメータとして最小二乗法でフィッティングしたところ、この例では、 $u_0 = 117.7$ 、 $a = 0.065$  が得られ、この時の残留変位  $u_{res}$  は 0.51mm となる。なお、表 2 に示すように、作用係数を  $\gamma_f = 1.1$  としているので、解析上で

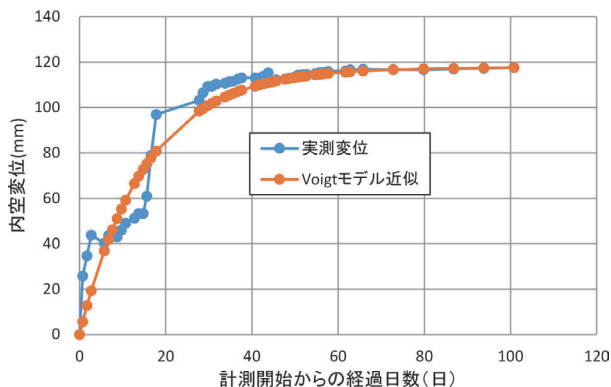


図 6 実測内空変位の Voigt モデル近似の一例<sup>2)</sup>

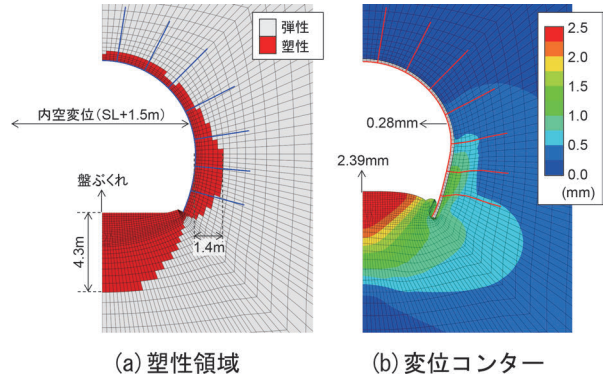


図 7 塑性領域および変位コンター<sup>2)</sup>  
 (強度低下ステージ 1・掘削完了時の変位=0 で表示)

目標とする残留変位は  $0.51 \times 1.1 = 0.56\text{mm}$  とした。

上記の考えに基づき、強度低下ステージ 1 として、上下半掘削後、インバート未掘削の状態地山のせん断強さを低下させた。ここで、地山の粘着力  $c$  を初期値から 0.61% 低下させたとき、内空変位 (縮小) が 0.56mm に到達した。図 7 に強度低下ステージ 1 の結果として地山の粘着力を 0.61% 低下させたときの塑性領域と変位コンターを示す。

最後に、強度低下ステージ 2 の解析を行った。すなわち、インバート部を掘削し覆工やインバートを打設した後に、前述したように地山のせん断強さの低下率である 0.61% だけ地山の粘着力を低下させることにより、覆工やインバートに発生する応力を算出した。

## 2.6 性能照査

以下、応力に対し、照査を行う。照査ケースを表 3 に示す。インバートのみの Case1 と、覆工とインバートの両方がある Case2 の 2 ケースについて応答値の算出と照査を実施した。なお、通常はインバートが施工されてからある程度期間が空いて覆工が施工されるが、ここでは覆工がインバートと同時に打設されるとした。

覆工およびインバートの要素毎に、照査値 (応答値と限界値との比) を整理した。ここでは、前述したように、引張応力について確認した。図 8 に照査値 (引張応力) を示す。図 8 より、照査値 (引張応力) は 1 を下回り、ひび割れが発生せず、要求性能が満足されるという結果であった。

参考として、地山の粘着力が 0.61% 低下したときの変位量を図 9 に示す。Case1, 2 いずれも、変位はほとんど生じなかった。

表 3 照査ケース<sup>2)</sup>

	インバート	覆工	備考
Case0	(未掘削)	なし	強度低下ステージ 1
Case1	あり	なし	強度低下ステージ 2
Case2	あり	あり	

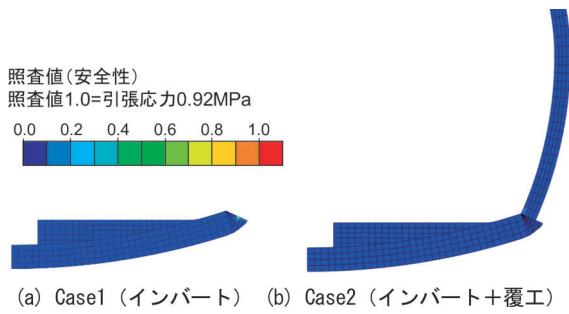


図8 照査値(引張応力)<sup>2)</sup>

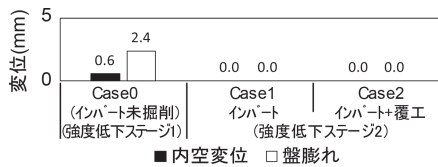


図9 発生変位量<sup>2)</sup>

### 3. 地山条件の差異の影響

#### 3.1 照査の条件

2章で示した照査結果の例は、図6に示したように、地山の変形が比較的小さい場合のものであり、覆工やインバートにひび割れ等は発生しないという結果となった。一方で、地山強度比がこれよりも小さい等、地山の条件がさらに悪い場合、残留変位がこれよりも大きくなることも考えられる。

本章では、ある程度大きな残留変位が作用する場合について、同様の手法で照査を試みることにする。ここでは、残留変位を0.56mmより増加させ、3mmと仮定して性能の照査を行った。ここで、残留変位3mmは地山の粘着力の低下率3%に相当する。

なお、発生する応力が大きくなると考えられるため、盤膨れに対応したインバート構造<sup>3)5)</sup>として、 $I_N$ インバートのほか、 $I_{NAIP}$ インバート、 $I_{SIP}$ インバート(図10)についても比較のために設定した。照査ケースを表4に示す。

2章と同様に、照査に当たり設定した要求性能は、安全性である。また、安全係数、数値解析モデル、解析入力値、解析の流れ、掘削解析についても同様である。作用の算出についても2章と同様に実施するが、地山の粘着力の低下率が0.61%から3.0%に、残留変位が0.56mmから3mmに増加している点が異なる。

図11に強度低下ステージ1の結果として地山の粘着力が3.0%低下したときの塑性領域と変位コンターを示す。

#### 3.2 照査結果

2章と同様に、覆工およびインバートの要素ごとに、引張応力について照査値(応答値と限界値との比)を整理した。インバートのみのCase11~13について図12

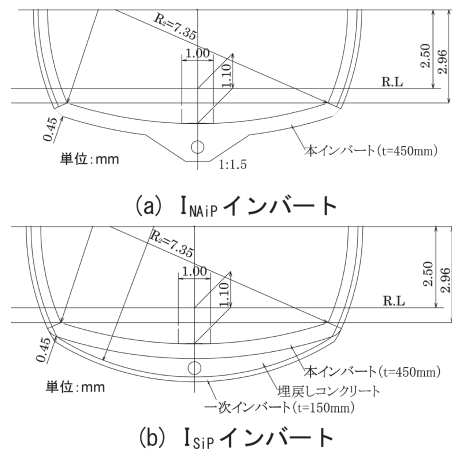


図10 盤膨れに対応したインバート構造<sup>2)</sup>

表4 照査ケース<sup>2)</sup>

	インバート	覆工	備考
Case10	なし	なし	強度低下ステージ1
Case11	$I_N$ インバート	なし	強度低下ステージ2
Case12	$I_{NAIP}$ インバート	なし	
Case13	$I_{SIP}$ インバート	なし	
Case14	$I_N$ インバート	あり	
Case15	$I_{NAIP}$ インバート	あり	
Case16	$I_{SIP}$ インバート	あり	

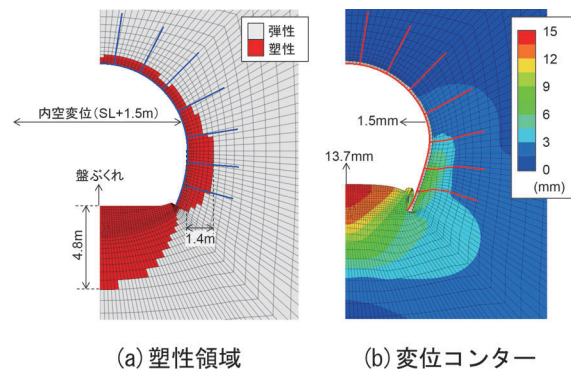


図11 塑性領域および変位コンター(残留変位3mm時)<sup>2)</sup>  
(強度低下ステージ1・掘削完了時の変位=0で表示)

に照査値(引張応力)を示す。図12より以下のことがわかる。

- ・Case11 ( $I_N$  インバート) の場合、中央通路に照査値が1を超える領域(引張ひび割れが発生する領域)が発生した。なお、吹付けコンクリートとインバートの接合部にも照査値が1を超える領域が発生している。これは、上記接合部においては、接合部分の面積が小さく、局所的に応力集中が発生することによるものと推察される。
- ・Case12 ( $I_{NAIP}$  インバート) の場合、中央通路の照査値が1を超える領域が見られなくなるが、吹付けコンクリートとの接続部においては、Case11と同様の理

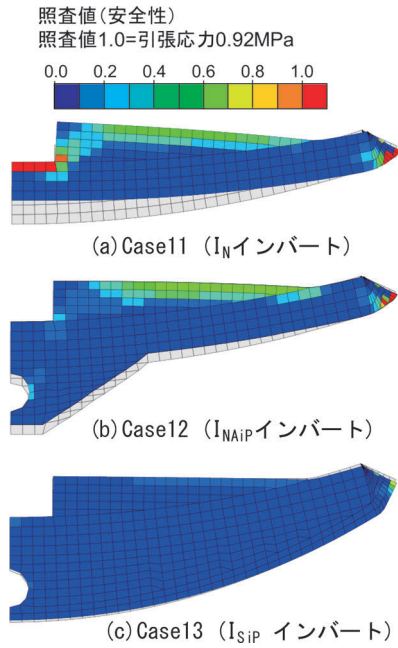
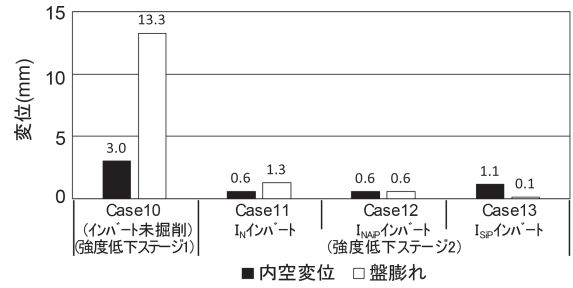


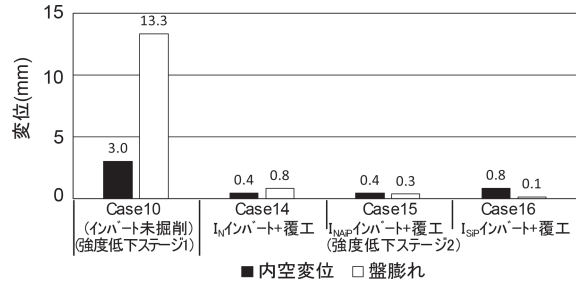
図12 照査値(引張応力)(Case11~13)<sup>2)</sup>  
(変形倍率200倍表示)

由により、照査値が1を超える領域が発生している。  
・Case13 ( $I_{SiP}$ インバート)の場合、中央通路、接続部、いずれも照査を満足している。

インバート+覆工のCase14~16について、図13に照査値(引張応力)を示す。インバートに加えて覆工を施工する場合、照査値はCase11~13と比較して全体的に小さくなるが、Case14では、覆工および吹付けコン



(a) Case11~13: インバートのみ



(b) Case14~16: インバート+覆工

図14 発生変位量<sup>2)</sup>

クリートとインバートの接合部において照査値が1を超える領域が発生している。一方、Case15, 16では、照査値が1を超える領域は発生せず、盤膨れに対応したインバート構造の効果が見取れる。

参考として、地山の粘着力が3.0%低下したときの変位量を図14に示す。図14より、地山の粘着力が3.0%低下した場合、インバートを施工することで、特に盤ぶ

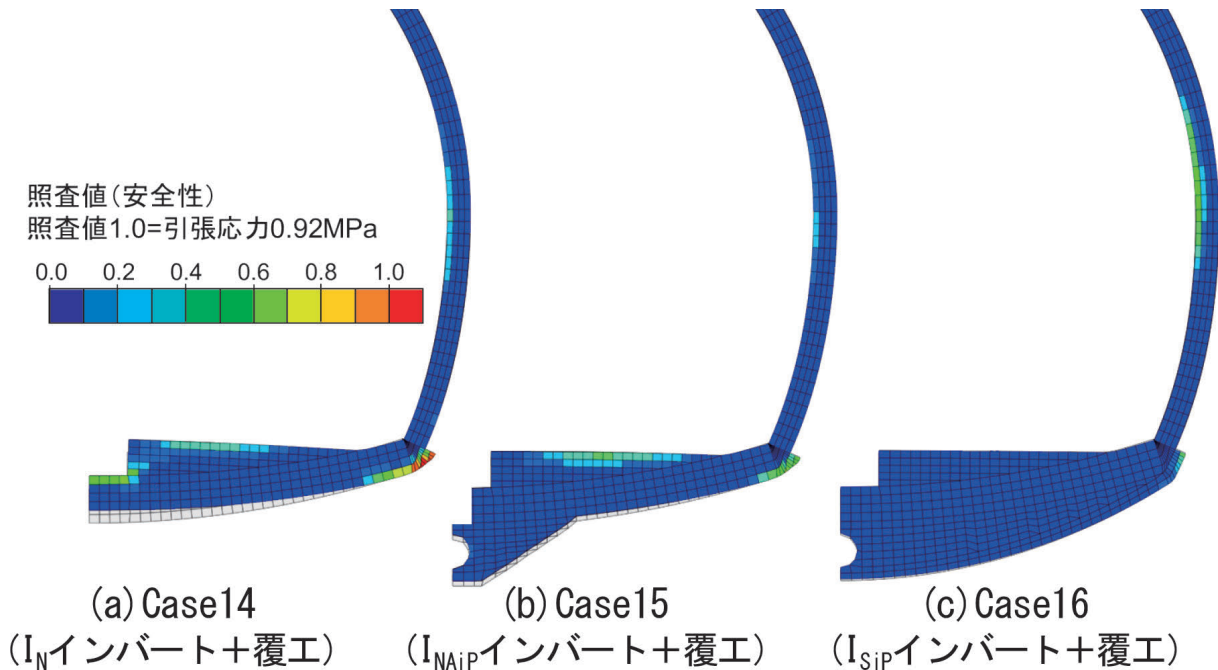


図13 照査値(引張応力)(Case14~16)<sup>2)</sup>  
(変形倍率200倍表示) インバート+覆工

くれを大きく抑制できていることが確認できる。Case12 ( $I_{NAIP}$  インバート), Case13 ( $I_{SIP}$  インバート) を採用することでより盤ぶくれを抑制できることがわかる。ただし, Case13 ( $I_{SIP}$  インバート) は, Case11~12 に比べ, 掘削時に路盤部を大きく掘削することになるので, 側壁背面地山の緩みが発生し, 内空変位については, Case12 ( $I_N$  インバート), Case13 ( $I_{NAIP}$  インバート) よりも大きくなった。また, Case14~16 より, インバートに加え, 覆工を施工した場合においても, インバートのみ施工した場合と同様の傾向が確認できる。

#### 4. まとめ

山岳トンネルの性能照査型設計法への移行の検討の一環として, 完成後に地山から変位を受けることが想定される山岳トンネルを設定し, 無筋コンクリートの覆工およびインバートの性能照査法を提案するとともに, その試行を行った。以下に得られた結果をまとめる。

- 1) 変位速度から残留変位量を推定し, これに相当する変位を, 地山の強度を低下させる数値解析手法により表現して覆工やインバートに与える手法により, 応答値の算出や照査が可能であることがわかった。
- 2) 1mm/月の内空変位速度時に相当する残留変位 0.56mm を設定した場合は, 標準的なインバート ( $I_N$  インバート) でも性能を満足することを確認した。
- 3) ある程度大きな残留変位として 3.0mm を設定した場合は, 盤膨れに対応したインバート構造 ( $I_{NAIP}$  インバートや  $I_{SIP}$  インバート) を採用することで要求性能を満足することを確認した。

#### 文 献

- 1) 嶋本敬介, 川越健, 野城一栄, 上野光: 山岳トンネル覆工

およびインバートの適合みなし仕様の提案, 鉄道総研報告, Vol.36, No.5, pp.21-27, 2022

- 2) 野城一栄, 嶋本敬介, 岡野法之: 完成後の地山変位を想定した無筋コンクリートの覆工およびインバートの性能照査法, トンネル工学報告集, Vol.29, 2019
- 3) 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
- 4) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構: 山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008
- 5) 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.I\_96-I\_107, 2016
- 6) 小林寛明, 井浦智実, 上野光, 渡辺和之, 嶋本敬介, 伊藤直樹: 山岳トンネルの盤ぶくれとその対策に関する基礎的研究, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.71, No.3 (特集号), pp.I\_80-I\_93, 2015
- 7) アイダノオメール, 赤木知之, 伊藤孝, 川本眺万: スクイーピング地山におけるトンネルの変形挙動とその予測手法について, 土木学会論文集, No.448/III-19, pp.73-82, 1992
- 8) 赤木知之, アイダノオメール, 伊藤孝, 川本眺万: スクイーピング地山におけるトンネル壁面変位の予測と支保の設計, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.719-724, 1994
- 9) 蔣宇静, 江崎哲郎, 横田康行, 禿秀和: 地山特性曲線に影響を及ぼす要因の定量的分析, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.767-772, 1994