

矢板工法トンネルの盤膨れに対するインバート補強の検討

前川和彦¹・伊藤哲男²・海瀬忍³・國村省吾⁴・奥井裕三⁵・桑島滉⁶・蔣宇静⁷

¹正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)
E-mail:k.maegawa.aa@ri-nexco.co.jp

²正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)
E-mail:t.ito.ak@ri-nexco.co.jp

³正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)
E-mail:s.kaise.aa@ri-nexco.co.jp

⁴正会員 応用地質株式会社 メンテナンス事業部 (〒331-8688 埼玉県さいたま市北区土呂町2-61-5)
E-mail:kunimura-shogo@oyonet.oyo.co.jp

⁵正会員 応用地質株式会社 メンテナンス事業部 (〒331-8688 埼玉県さいたま市北区土呂町2-61-5)
E-mail:okui-yuzo@oyonet.oyo.co.jp

⁶正会員 応用地質株式会社 メンテナンス事業部 (〒331-8688 埼玉県さいたま市北区土呂町2-61-5)
E-mail:kuwashima-hirosh@oyonet.oyo.co.jp

⁷フェロー 国立大学法人 長崎大学 大学院工学研究科 (〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14)
E-mail:jiang@nagasaki-u.ac.jp

高速道路において、矢板工法で建設されたトンネルで供用後に盤膨れ対策を実施した事例はない。しかし、矢板工法により建設されたトンネルで最も新しいものでも30年以上が経過しており、インバートの設置が必要とされるトンネルも出てきている。

そこで、本検討では、矢板工法トンネルでの最適な追加インバートの断面形状を検討するために、NEXCO 以外での事例および NATM での対策事例を参考に断面形状を数案提案し、提案した断面形状に対して、二次元の数値解析を実施して得られた結果から、追加インバートに係る発生応力と路盤の変位量に着目し最適な断面形状の策定を行った。

また、策定した断面形状に対して一施工単位の検討を三次元解析にて実施し、覆工の水平変位や最大沈下量に着目し検討を行った。

Key Words : invert reinforcement, heaving, timbering support method, numerical analysis

1. はじめに

現在、東日本高速道路、中日本高速道路、西日本高速道路の3会社(以下「NEXCO」という。)は供用路線下でのトンネルの盤ぶくれ対策を実施している。

トンネルの盤ぶくれ対策の設計を実施するためには、既存の研究¹⁾²⁾、既存資料や点検結果を確認し、地質や周辺環境を調査したうえで、類似事例を参考に個々のトンネルで設計を実施している。

NEXCO においては、NATM トンネルでの盤ぶくれの事例はあり、それらに対策工の設計の際の類似事例として活用しているところである。

一方、NEXCO には矢板工法で建設されたトンネルで供用後に盤ぶくれ対策が施工された事例はないため、矢板工法トンネルで盤ぶくれ対策工を実施する場合の参考事例がない。

そこで本検討では、矢板工法トンネルにおける盤ぶくれ対策の検討の指標となるべく、追加インバートの断面形状や施工方法の選定について解析的手法を用いた詳細な検討を行ったので、検討内容と実施効果について述べる。

2. NEXCOの盤ぶくれ対策の現状

トンネルの盤ぶくれ対策は、追加インバートを設置することを基本としている。これは、過去にマイクロパイルを用いた路盤下補強工にて対策を実施した事例があるが、施工の結果、路面隆起が収束せず結果的に追加インバートを設置したことによる。

また、盤ぶくれが発生しているトンネルは、山間部が多く迂回路となる路線の許容交通量が小さいため、トンネル内を通行止にて対策工の施工を実施することが困難であることから、1車線を規制しての施工が一般的となっている。

この実態から、本検討の基本検討方針として、以下の二点に絞ることとした。

- ・追加インバートによる盤ぶくれ対策工
- ・1車線を規制しての施工

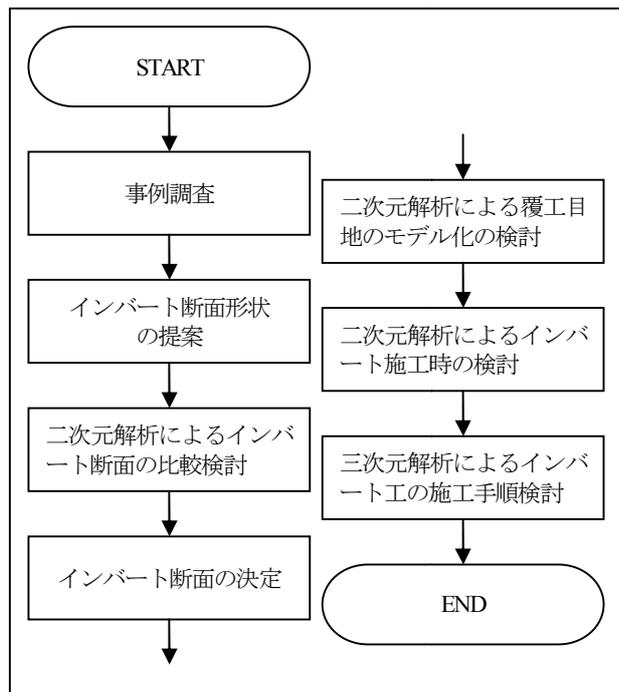


図-1 検討のフロー

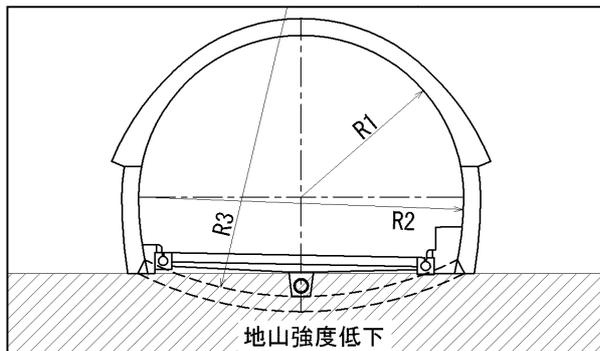


図-2 検討断面図

3. 検討の流れ

検討のフローを図-1に示す。

矢板工法で建設された高速道路トンネルで供用後に盤ぶくれ対策としての追加インバートの事例はないことから、まず、文献調査により他機関での実施事例を収集し、分析することとした。

4. 追加インバート断面形状の検討

(1) 事例の収集

文献等から他機関における対策事例について調査を実施し、5トンネルの事例を収集することができた。

覆工およびインバートの諸元を取りまとめて表-1に示す。インバート半径と覆工上半半径の比（以下、「半径比」という。）は概ね2.0を採用していることがわかった。

(2) 追加インバート断面形状案

NEXCO以外での事例およびNATMトンネルでの対策事例を参考にしながら、解析手法を用いて適切な断面形状について検討を実施した。

断面形状を検討するために、矢板工法トンネルにおいて盤ぶくれ対策のための事前調査を実施中のNEXCOのFトンネルの断面を検討断面とした。その断面形状は図-2および表-2のとおりである。

また、検討断面に用いるインバート形状については「半径比」を変えた3ケースについて、盤ぶくれの解析的検討で用いられる地山劣化モデルを用いて、インバート形状の違いによる変位抑制効果と発生応力を比較した。比較検討ケースの概要は表-3および表-4に示す。ケース1は「建設ときに採用されたインバート「半径比」に

表-1 他機関での矢板工法インバート補強の形状

トンネル	覆工		インバート		半径比 R3/R1
	半径 R1 (mm)	厚さ (mm)	半径 R3 (mm)	厚さ (mm)	
A	4800	600	9600	600	2.0
B	4500	600	9000	500	2.0
C	4250	450	10000	450	2.35
D	5100	600	10535	500	2.07
E	4450	800	8900	650	2.0

表-2 インバート形状検討断面諸元

覆工		インバート		半径比 建設時 R3/R1
半径 R1 (mm)	厚さ (mm)	建設時 半径 R3(mm)	建設時 厚さ (mm)	
5300	450	16855	500	3.18

表-3 インバート形状検討ケース断面図

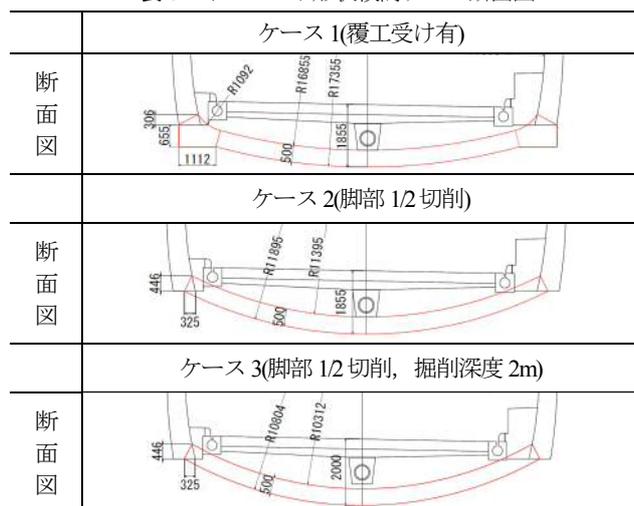


表-4 インバート形状検討ケース半径比

ケース	概要	半径比
1	覆工受けを設置する	3.2
2	覆工受けを設置しない	2.2
3	ケース 2 同様に施工. インバート施工時の最大掘削深さは2m	1.9

表-5 インバート形状検討時の解析条件

部材	要素	変形係数 (MN/m ²)	ポアソン比	単位体積重量 γ (kN/m ³)
覆工	コンクリート	22,000	0.2	23.0
インバート	コンクリート	22,000	0.2	23.0

近い形状」, ケース 2 は「他機関での矢板工法トンネルでの盤ぶくれ対策実績に近い半径比の形状」, ケース 3 については「安衛則上, 直掘りが可能な掘削高さ 2m までとした形状」とした。また, ケース 1 については「覆工脚部を掘削し覆工受けコンクリートを設置する方法」, ケース 2 および 3 は「覆工脚部を覆工厚さの 1/2 までとはつり, 覆工下部の掘削も覆工厚さの 1/2 までとし, インバートと覆工を接合する方法」とした。

(3) 数値解析による形状検討

形状検討は, 二次元 FEM 弾塑性解析にて実施した。なお, 解析ソフトは ISNA-FEM(応用地質株式会社)を使用した。

解析手順としては, 自重解析→トンネル掘削解析→支保工の設置, 覆工の設置のステップで建設時の状態を再現した後, 変状調査で得られた盤ぶくれ量, 覆工応力測定結果を再現するように地山の強度を低下させた再現解析を実施した。最後にインバート工の効果確認のため, 地山の強度をさらに低下させて変状の将来予測も行った。地山強度を低下させる領域は, 調査結果から図-2 に示すようにトンネル底盤部とした。

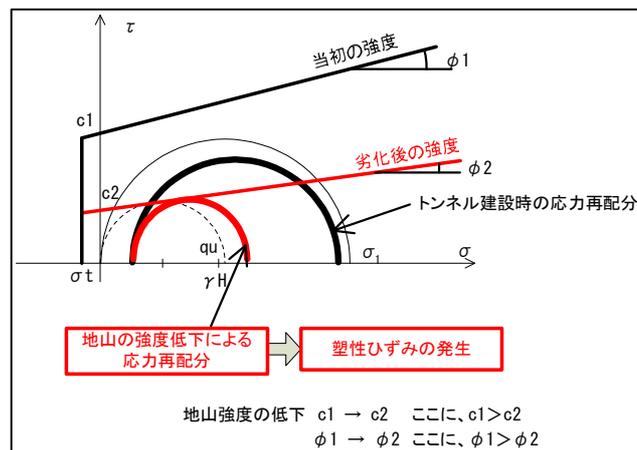


図-3 地山の強度低下

表-6 インバート形状検討時の入力物性値

	建設再現	現状再現ケース			将来予測
		1	2	3	
変形係数 MN/m ²	2000	2000			2000
粘着力 kN/m ²	2120	577	570	548	250
内部摩擦角 ϕ	23.2	11.6			11.6
単位体積重量 kN/m ³	20	20			20
ポアソン比	0.35	0.35			0.35

解析領域の設定は, NEXCO の「トンネル数値解析マニュアル」¹⁾に記載の一般的な側方領域 5D (D: 掘削幅) を左右に取り, 下方領域は 4D とし, 解析条件は表-5 のとおりとした。なお, 地山の強度低下のモデル化は, 図-3 に示すように簡易なせん断強度低減法を用いた。

トンネル建設時の地山物性値については, ボーリングや岩石試験から得られた比較的深部の試験値を用いた。また, 再現解析については, 内部摩擦角を建設時の 1/2 に固定して粘着力を変化させて, 実際に計測された路盤隆起量 108mm を再現できる物性値をパラメトリックスタディで設定した。

将来予測については, 粘着力と内部摩擦角を低下させることにより表現した。

なお, 構造の差異に着目するため, 将来予測およびインバート工の効果確認の入力物性値は, 粘着力を現状再現の約 1/2 とし, インバート効果が確認しやすい値とした。

使用する入力物性値は表-6 にまとめて示す。

(4) 数値解析検討結果と考察

数値解析の結果を図-4 および表-7 に示す。覆工およびインバートの発生応力と路盤の変位量から判断すると, ケース 1 に比べケース 2, 3 が有利である。さらに, ケ

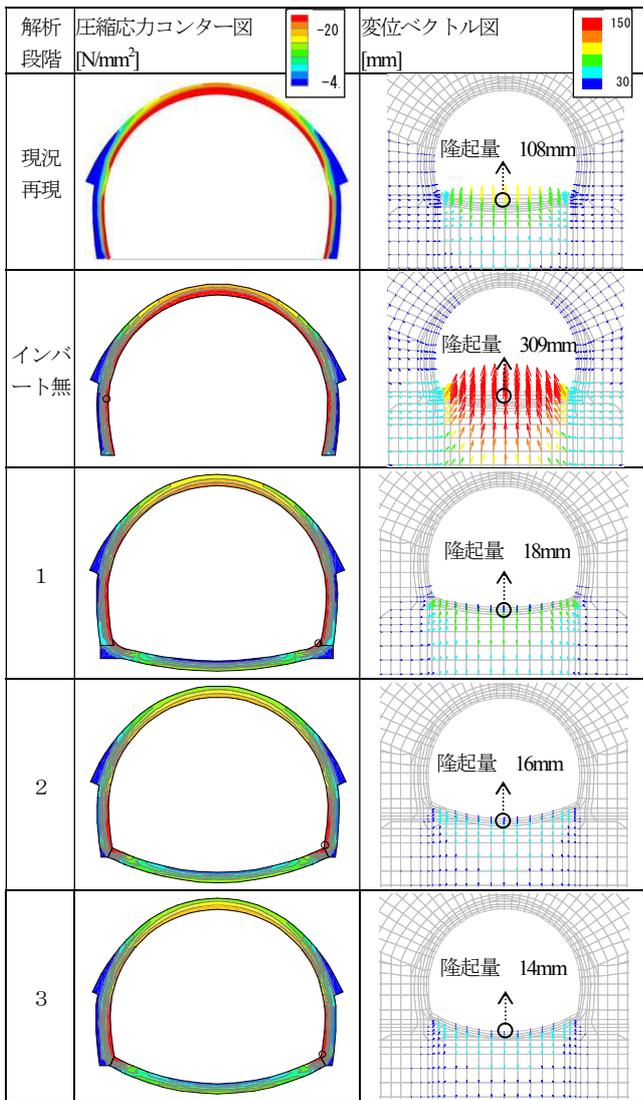


図4 数値解析結果図

ケース2に比べケース3が若干有利であるが、大きな差異は見られない結果となった。

施工性については、覆工脚部の切削、覆工脚部下の掘削（足付けの有）、インバート掘削から判断すると、ケース2とケース3は同程度である。しかし、ケース1は覆工脚部の切削と覆工脚部下の掘削（足付けの有）により施工手間がかかる。

経済性については、施工量（掘削量）から判断すると、ケース2が最も有利である。

以上の比較検討から、変位量と施工性が同程度で、より掘削数量が少ないケース2を決定断面とした。

5. セメ部の数値解析による評価

(1) 検討の目的

矢板工法トンネルについては、上半アーチ部（図5「格子部」）と側壁部に水平打継ぎ目（以下、「セメ部」）

表-7 解析結果表（応力）

解析段階	圧縮応力 (N/mm ²)				
	天端	肩部中央部	側壁上部	側壁脚部	バト中央部
現況再現	-17.3	-16.0	-16.7	-18.6	—
インバート無	-23.5 (-6.4)	-23.0 (-7.0)	-26.2 (-9.5)	-23.4 (-4.8)	—
1	-19.4 (-2.3)	-21.6 (-5.6)	-25.8 (-9.1)	-30.9 (-12.3)	-2.1
2	-17.5 (-0.2)	-18.9 (-2.9)	-24.6 (-7.9)	-35.6 (-17.0)	-4.7
3	-17.8 (-0.5)	-19.7 (-3.7)	-24.5 (-7.8)	-33.1 (-14.5)	-5.2

※ () の値は、現況再現との差分

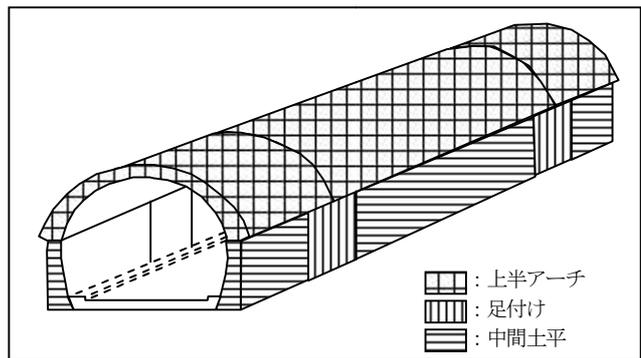


図-5 矢板工法トンネルの覆工

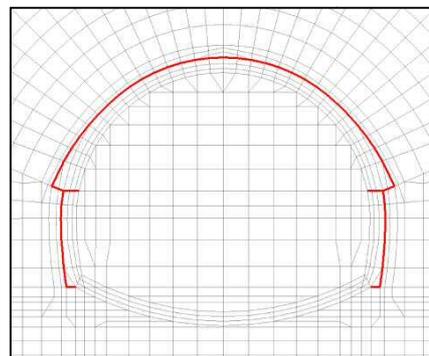


図-6 インターフェースモデル図

という。)および足付けコンクリート（図5「縦縞部」）と中間土平コンクリート（図5「横縞部」）の打継ぎ目（以下、「鉛直目地」という。）が存在し、NATMトンネルに比べ目地が多い。

そこで、施工時の検討を実施する前に矢板工法トンネルを数値解析する際に問題となると思われる「セメ部」のモデル化について検討することにした。

(2) セメ部のモデル化

数値解析ソフトは、トンネルの三次元解析でよく使用されているFLAC 3D(ITASCA)を用いており、目地を考慮するために接合条件を反映できるインターフェース要素を用いて表現することとした。

覆工目地を考慮したモデル図を図-6に示す。

(3) 検討条件

数値解析は、インバート掘削による目地を考慮した変形挙動を確認することとし、三次元数値解析を実施する前にインターフェース要素を取り入れた二次元数値解析により挙動の確認を実施した。なお、インバートの変形傾向を把握するためにインターフェースの粘着力と内部摩擦角、引張耐力をゼロとして解析を行った。

解析ケースとして、地山と覆工間にインターフェース要素を入れ、インターフェース要素無しモデル（目地間は剛結）、目地とセメ部にもインターフェース要素を入れた場合（上下半分離モデル）、セメ部にインターフェース要素を入れない場合（上下半一体モデル）の3ケースとした。

(4) 解析の結果

図-7 にその解析結果を示す。3 ケースを比較検討した結果、下記のことが分かった。

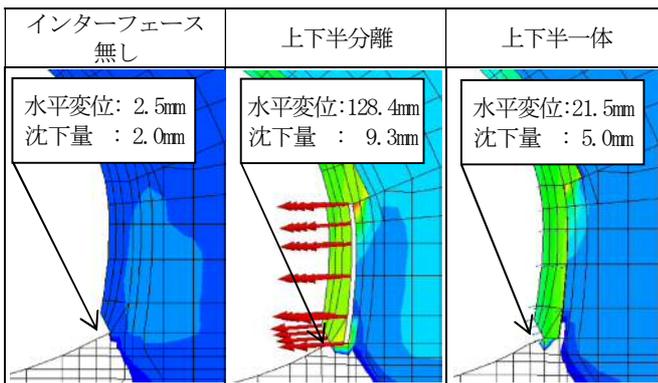


図-7 インバート掘削時の変形図（側壁周辺）

- ・上下半分離モデルでは、側壁部の脚部が地山から分離して内空方向へ大きく変位する。
- ・上下半一体では、変位量が小さく覆工目地の影響が顕著に表れない。

以上より、以後の検討では、より傾向が正確に把握できる上下半分離モデルを採用し、インバート施工時の影響を検討していくこととした。

6. 施工手順の検討

三次元数値解析モデルを図-8 および図-9 に、入力物性値を表-8 に、解析条件を表-9 に示す。

解析領域の設定は、土被り 100m とし、二次元数値解析時と同様で、NEXCO の「トンネル数値解析マニュアル」³⁾に記載の一般的な側方領域 5D を左右に取り、下方領域は 4D とした。トンネル縦断方向は 4 スパンを評価対象とし掘削時のモデル境界の影響を受けないように両側に 2 スパン程度設けて 78m とした。（図-9）

地山物性値は、建設時よりも地山が劣化し、盤ぶくれ

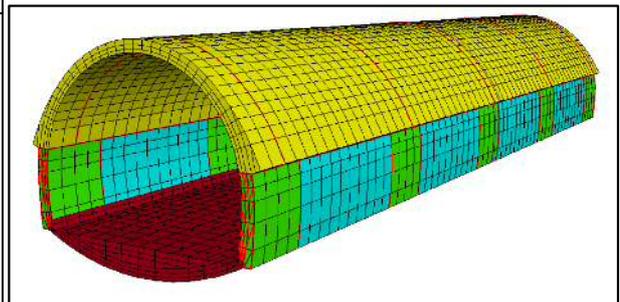


図-8 覆工目地を考慮したモデル図

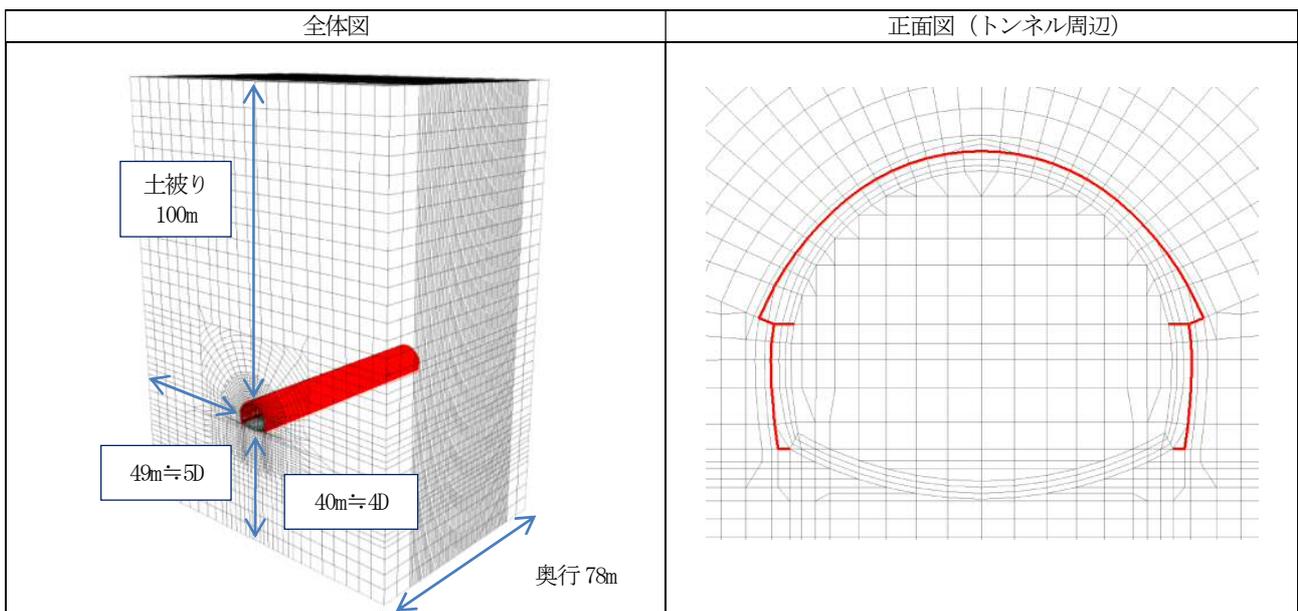


図-9 三次元数値解析時のモデル化領域

表-8 三次元解析時の入力物性値

解析段階	適用箇所	変形係数 (MN/m ²)	ポアソン比	粘着力 (kN/m ²)	内部摩擦角 φ (°)	引張強度 (kN/m ²)
自重解析	地山	500	0.49			
上半掘削時	地山	500	0.35	400	35	80
下半掘削時	覆工	22,000	0.2			
現状の変状再現時	地山 (劣化)	500	0.35	170	35	80
	覆工	22,000	0.2			

表-9 三次元解析時の解析条件

部材	要素	変形係数 (MN/m ²)	ポアソン比	引張降伏強度 (kN/m ²)	断面積 (m ²)
ロックボルト	ケーブル	210,000	—	170	0.00113
覆工	ソリッド	22,000	0.2	—	—
インバート	ソリッド	22,000	0.2	—	—

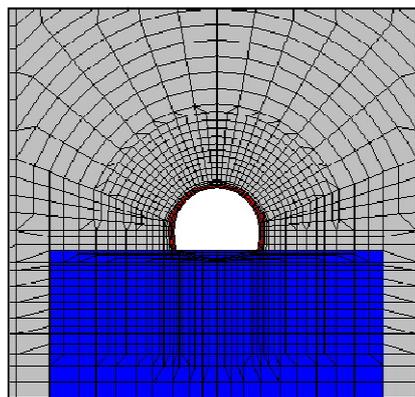


図-10 地山劣化範囲

表-10 インターフェースの入力物性値

	ばね定数 k (MN/m)	粘着力 c (MN/m ²)	内部摩擦角 φ (°)	引張耐力 (MN/m ²)
自重解析時	5,000	10,000	60	10,000
現況再現時	5	0	60	0
インバート施工時	5	0	60	0

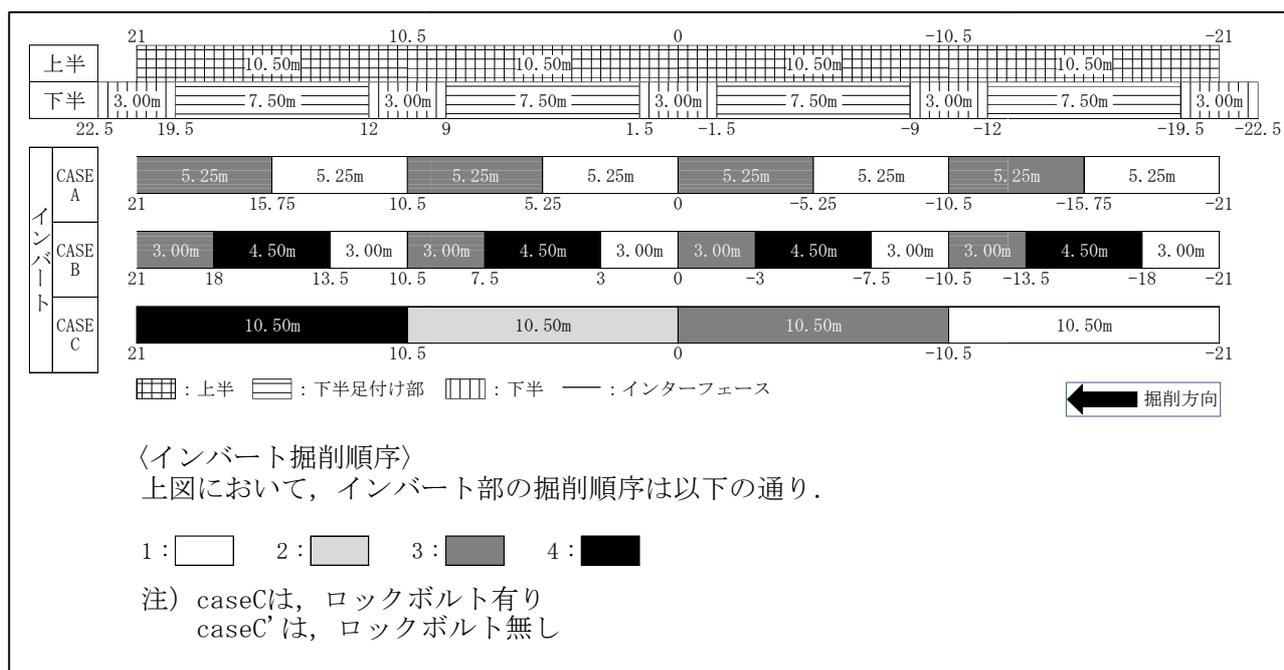


図-11 解析検討ケース (一施工単位)

が発生していると想定し地山等級 D I 相当と考え、NEXCOの「トンネル数値解析マニュアル」³⁾の物性値を採用した。

現状の変状再現は路面隆起量を 100mm と設定し、図-10 に示すトンネル路盤部より下の領域について地山劣化 (強度低下) を想定し、地山の粘着力を低下させることにより路盤隆起量 100mm を再現できる物性値をパラメトリックスタディで設定した。

三次元数値解析に使用するインターフェース要素の入力物性値の設定については、セメ部と鉛直目地の実現場における物性が不明確であることを考慮し、挙動確認と同様に最も活動しやすい物性値を採用した。その物性値を表-10 に示す。なお、別途解析した結果、内部摩擦角が 60 度未満の場合には、上半に実現場では考えにくい沈下傾向が見られたことから 60 度を採用している。

(1) 解析ケース

解析ケースは、一施工単位を変化させて図-11 のとおり設定した。caseA は鉛直目地を跨いだ形で覆工上半 1 スパンの半分の延長を一施工単位とした抜き掘り施工、caseB はさらに一施工単位を短くしての抜き掘り施工、caseC は覆工上半 1 スパンの延長を一施工単位とした連続施工で、側壁に事前補強としてロックボルトを施工したもの、そして caseC' はロックボルトを施工しない caseC に相当する。

caseC のロックボルトについては、市場性を考慮し設計耐力 170kN とした。施工箇所は図-12 のとおり側壁部左右に 2 本を周方向 12m 奥行き 1.0m 間隔で打設することとした。なお、ロックボルトのモデル化はケーブル要素を使用した。

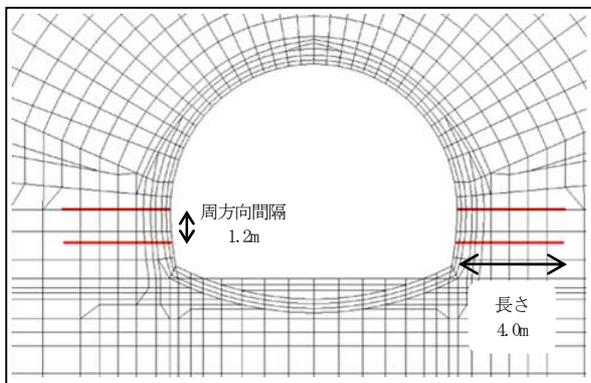


図-12 ロックボルト配置検討図

(2) 数値解析の結果と比較検討

図-13 は、インバート掘削～インバート埋戻し後の覆工および周辺地山の水平変位をコンターで示したものである。また、表-11 に水平変位の数値をまとめて示す。

解析の結果より以下のことが分かった。

- caseA および caseB の抜き掘り施工は caseC および caseC' の連続施工に比較して水平変位（地山）で 2 倍程度、水平変位（覆工）で 5 倍程度の変位抑制効果があった。
- caseA は caseB に比較（抜き掘りの一施工単位）して変位抑制効果が若干劣るがその差は小さい。
- caseC と caseC' を比較しても変位にほとんど差が見られず、数値解析上ロックボルトの効果は、地山および覆工の水平変位で 1mm 程度の抑制効果であった。
- インバート掘削の地山に与える影響度合いは、caseB < caseA < caseC < caseC' の順となっている。

表-11 解析変位量 (DI 地山相当)

	単位 : mm			
	最大水平変位		最大隆起量	最大沈下量
	地山	覆工	地山	覆工
caseA	8	3	16	1
caseB	6	1	13	1
caseC	14	13	26	5
caseC'	14	15	26	5

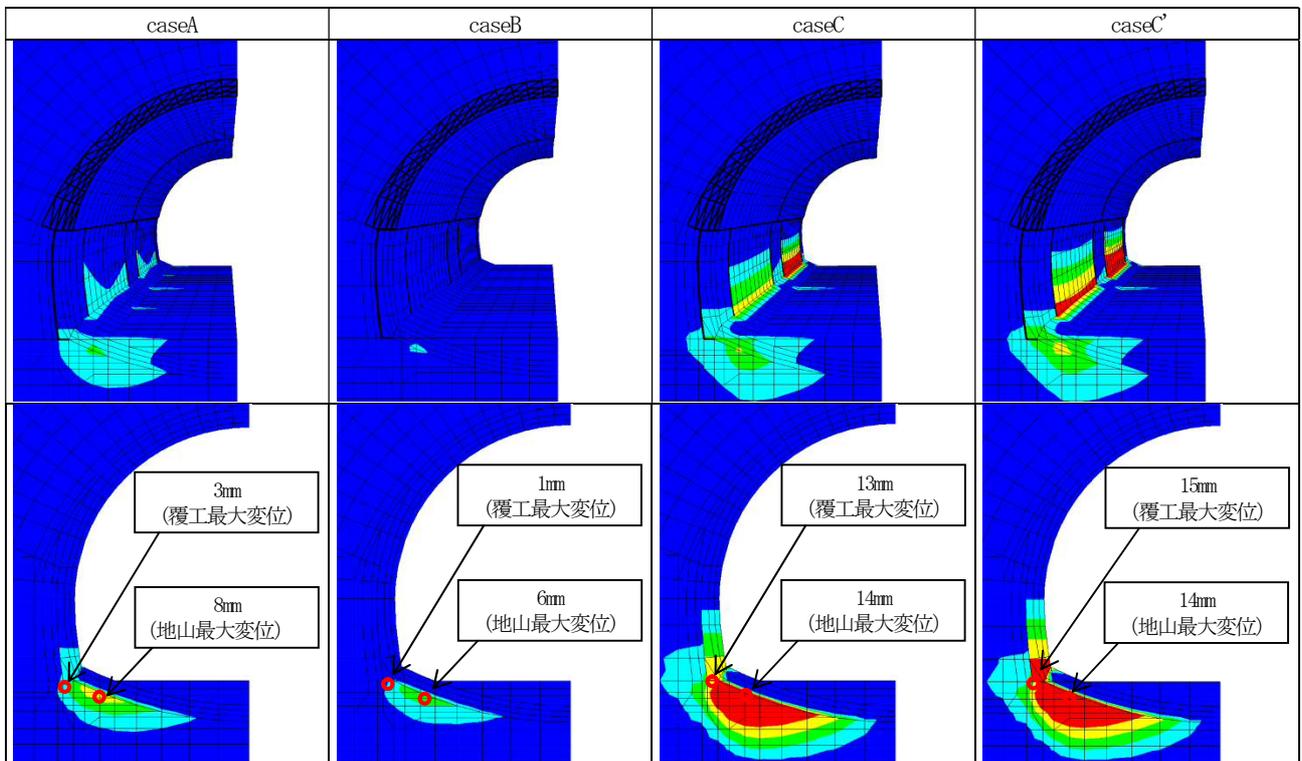


図-13 水平変位のコンター図

7. おわりに

NEXCO においては、矢板工法で建設された供用トンネルへの盤ぶくれ対策工の実績がないことから、今後、NEXCO における矢板工法トンネルの盤ぶくれ対策設計の指標とするべく検討を行った。

インバート形状が異なる 3 ケースを設定して比較検討を行った。その結果、対策工完了時の覆工応力や変位は、表 4 に示すケース 2 および 3（つまり、覆工脚部を覆工厚さの 1/2 まではつり、覆工下部の掘削も覆工厚さの 1/2 までとし、インバートと覆工を接合する方法）が有利であることがわかり、掘削数量が少なく経済的なケース 2 を決定断面とした。

三次元数値解析の結果から、caseA と caseB の抜き掘り施工については変位の差も少なく両ケースともに地山等級 D I 相当に適用できると考え、地山等級 D I 相当については施工上、工期の観点から基本パターンとして caseA、また、地山等級 D I 相当より地山が悪いと判断される場合は、変位抑制効果が若干高い caseB の適用を提案する。

また、事前に施工するロックボルトの補強効果については解析上明確に評価することができなかったが、他機関の事例および施工中の不測の事態を考慮すると必要であると考えられる。

施工時の補助工法の採用は、変位の進行の程度、インバート掘削順序、覆工受けコンクリート等の対策と併せて検討する必要がある。

本検討では検討上の課題も判明した。接合状況を反映できるようにインターフェース要素を用いてセメ部をモデル化し、なおかつ、施工法の違いが明確になるように解析で採用した物性値は、安全側の値であることから、結果は過大評価となっている可能性がある。また、解析上ロックボルトの補強効果を表現できていない可能性があり、それらの課題については、今後実施工における計測等により効果の検証を実施する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 前川和彦, 八木弘, 海瀬忍, 國村省吾, 奥井裕三: 矢板工法トンネルの盤膨れに対するインバート補強の検討, 土木学会第 72 回年次学術講演会, VI-615, 2017.
- 2) 前川和彦, 伊藤哲男, 海瀬忍, 國村省吾, 奥井裕三: 矢板工法トンネルの盤膨れに対するインバート補強の検討, 第 32 回日本道路会議, 論文番号 6038, 2017.
- 3) 東・中・西日本高速道路株式会社: トンネル数値解析マニュアル, 2018.

(2018. 8. 10 受付)

CONSIDERATION ON INVERT REINFORCEMENT FOR HEAVING OF CONVENTIONAL TUNNELING METHOD

Kazuhiko MAEGAWA, Tetsuo ITO, Shinobu KAISE, Shogo KUNIMURA, Yuzo OKUI, Hiroshi KUWASHIMA and Yujing JIANG

In service tunnel of rib and lagging method on Expressway, there is no case of the countermeasure of heaving. However, more than 30 years have passed even for the most recent tunnel constructed by rib and lagging method, and some tunnels are in need of installation of invert. Therefore, the sectional shape of the optimum additional invert in rib and lagging method tunnel was examined. Several sectional shapes of invert were proposed based on cases other than NEXCO and countermeasures at NATM. For the proposed sectional shape, the optimum shape was selected from the result of the two-dimensional numerical analysis focusing on the generated stress in additional invert and the amount of displacement of the roadbed. In addition, for optimum shape, one cycle length was examined by three-dimensional analysis focusing on horizontal displacement and maximum settlement of lining.