

盤膨れが発生した供用中のトンネルにおける 補強設計・施工計画

長谷川 慶彦¹・井上 彰²

¹株式会社オリエンタルコンサルタンツ 関西支店保全技術部 (〒530-0005 大阪市北区中之島3-2-18)
E-mail:hasegawa-yh@oriconsul.com

²株式会社オリエンタルコンサルタンツ 関西支店保全技術部 (〒530-0005 大阪市北区中之島3-2-18)
E-mail:inoue-ak@oriconsul.com

当該トンネルは、竣工から数年後に盤膨れによる変状が発生し、計測結果によってその進行性が確認された。変状は、その後も進行すると考えられ、対策工の実施が必要であった。対策工は、対策効果や信頼性からインバート工を採用した。本トンネルは、通行止めが困難であったことから、片側交互通行による施工計画を立案した。

本稿は、盤膨れによる変状が発生したトンネルに対する対策工の設計及び施工計画について報告するものである。

Key Words : *heaving, invert, reinforcement design, construction planning*

1. はじめに

一般国道369号梅坂トンネルは、奈良県宇陀市～曾爾村に位置する延長1,827mの道路トンネルである。平成17年に竣工し、竣工後数年経過後に監査廊のひび割れや路面隆起などの変状が確認された。変状確認後の計測において、変状が進行しており、進行状況によって交通障害やトンネル構造への影響が懸念されたことから、恒久対策として対策工の設計を行った。本報告では、盤ぶくれに対する対策工設計及び施工計画について報告する。

2. 地形地質概要

(1) 地形概要

梅坂トンネル周辺地域は、室生山地南端部に当たり、標高800～1000m程度の比較的標高の高い山地が広がっている。

トンネルの周辺には南北方向に発達する深い沢地形が形成されており、ほとんど蛇行は見られない。また、トンネルの中心部付近に集中するようにリニアメントが分布しており、沢地形はこのリニアメントの走向に沿う形で分布している。

(2) 地質概要

調査地付近には白亜紀に形成された領家帯変成岩が分布している。この変成岩類は主に片麻岩で構成され、しばしば花崗岩や塩基性岩を伴う。岩質の特徴としては、亀裂が著しく発達し、トンネルに平行して複数のリニアメントが存在しており、掘削時に破砕された岩盤層(破碎帯)がしばしば確認されている。

3. トンネルの変状発生状況

(1) 変状区間の施工状況

本トンネルは、終点側(曾爾村側)より NATM で施工されたもので、トンネルと並走する形で地質的弱線部(粘土層)が度々出現し、縫い返しや仮インバート等が実施された経緯がある。No.82+6.9～No.76+16.9 (L=110m) 区間には、切羽全体に粘土～未固結岩が出現し、左側壁部への増しボルト、上半部の縫い返し (L=5m)、下半の縫い返し (L=12m) が実施されている。

No.80+2.9 で実施された岩質判定においても、粘土～未固結岩が切羽の大部分を占めていたことから、設計 C II パターンに対し、変位の大きい左側壁部に長尺ロック

ボルトを配置したDIIパターンへの変更を実施している。

その後、切羽全体を占めていた粘性土が切羽の進行に伴い左側へ移行し、大半を良好な安定した岩盤が占有し、内空変位も許容値以内で収束することが確認されたため、岩質判定 (No.76+12.9) でDIパターンへ移行し、No.72+12.9地点での岩質判定により、当初設計のCIIパターンへの変更を行っている。

(2) 変状概要

平成17年10月の竣工から4年経過した平成21年に監査廊へのひび割れが発生していることが確認され、その後、内空変位計測や地中変位計等の調査を実施した。

(写真-1, 図-1 参照)

変状区間は、トンネル中央付近の約100m区間 (No67+10~72+10) で発生しており、調査の結果、No70+10地点で最も変位量が大きく、No68+10~No71+10区間では変位が増加傾向であった。また、地中変位計測の結果は、ほぼ全体で隆起方向の変位が認められた。ひび割れ幅については、計測期間内での変化は認められなかった。

路面の隆起傾向は、トンネルの左右で異なる傾向にあり、右側で隆起量が多い傾向であった。右側の円形水路の隆起量は、計測開始時点から31.0mmの値を示した。なお、設計値に対しての隆起量は、105mmとなっている。(図-2, 図-3 参照)



写真-1 監査廊の浮き上がり状況

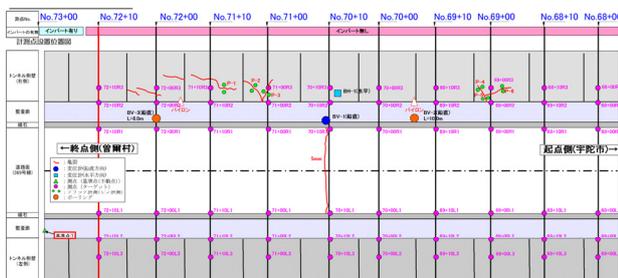


図-1 計測位置図

(3) 変状発生原因の推定

地質調査結果からトンネル底盤付近では、破砕帯が分布していると推察される。破砕帯を構成する岩級区分は、最も変位が大きな測点No70+10付近で黒色粘土層を含むD級岩を主体とする(図-4参照)。その他、調査結果の整理を以下に示す。

- ①変状に影響する地質は黒色粘土層である。
- ②黒色粘土層を含め破砕帯部周辺(片麻岩D~CL部)には以下の特性があり、膨張性土圧による影響は少なく、地山強度比が小さいことから、塑性土圧による押し出しが発生する可能性が高い。
 - ・地山強度比0.1<2と小さく、押し出し性~膨張性がある。(片麻岩のD, CL級岩盤も同様)
 - ・膨張性を示す鉱物が混入しているが、膨張性を持つ粘土鉱物(スメクタイト)の含有量は10%未満と少ない。
 - ・浸水崩壊度試験によりスレーキング特性を有している。(湿潤・乾燥により亀裂が発達している)
- ③路面変状と降雨との対比から、降雨量が少ない時期に変状進行が緩慢になる傾向がある。

黒色粘土層~片麻岩D・CL岩盤部では、トンネル掘削に伴い発生した水みちから、地下水により湿潤・乾燥を繰り返し、徐々に粒子間の結合力が弱くなり細片化することで強度低下を伴っている。

元々地山強度比が小さく、押し出し性の高い岩盤であったため、強度低下に伴い地圧による押し出しがさらに加速し、トンネルへの塑性土圧として作用したと推定した。

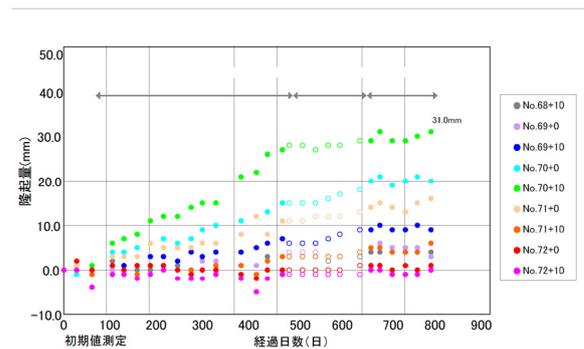


図-2 路面隆起状況

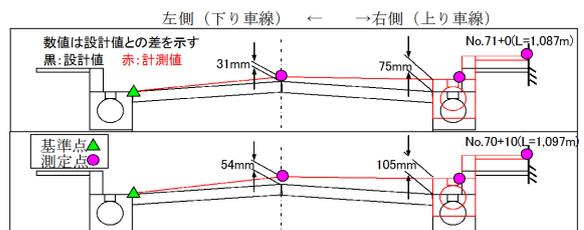


図-3 最大変状部分の模式断面図

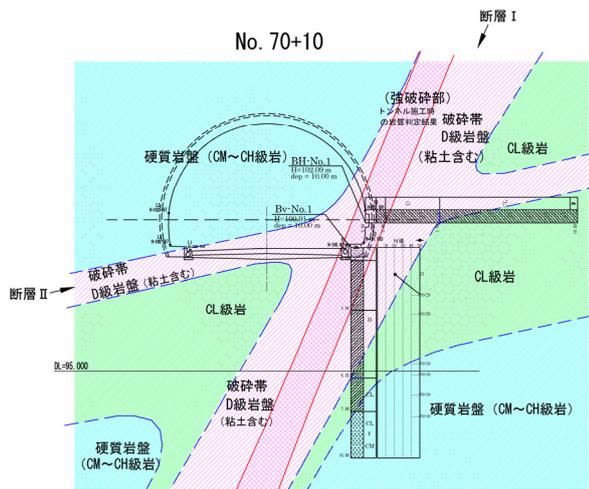


図-4 横断面図

4. 対策工の設計

(1) トンネル変状解析

本トンネルについては、供用後に舗装版隆起等の変状が発生しており、変状計測からその進行性も確認された。今後の変状進展によっては、交通阻害やトンネル構造の不安定化も懸念されたため、以下に示す解析的検討によって、現状の変状再現、今後の変状進展を予測するとともに、有効な対策工について検討した。

解析的検討の検討フローを図-5に示す。進行中の舗装版隆起量を2次元FEM粘弾性解析にて再現するとともに、対策工の効果を評価した。2次元FEM粘弾性解析を行うにあたって、計測した舗装版隆起量を整理し、その時系列データから今後の隆起量を予測する回帰式を求め、求めた回帰式中の定数 α 、 β を2次元FEM粘弾性解析に用いた。ここで、2次元FEM粘弾性解析では粘性挙動をVoight型モデルで表現した¹⁾。

解析モデルの領域は、側面境界までの範囲をトンネル壁面から左右に約5D(D:掘削幅)とし、底面境界までの範囲をトンネル底面から5D(D:掘削幅)、上面までは100mとした。解析断面の土被りは100m以上あるが、残りの土被りは、モデル上面に相当の分布荷重を載荷して初期応力計算を行った。なお、境界条件は底面を固定、側面を鉛直フリー、水平固定とし、上面はフリーとした。

解析断面は、以下の2断面を対象に行った。

- ・No70+10 (変状規模最大地点)
- ・No72+10 (側壁ひび割れ発地点)

変状再現の結果、右側の円形水路端部における隆起量は、最新の計測結果から、No70+10地点で100mmの隆起となると予想された。さらに、二次覆工応力は、舗装

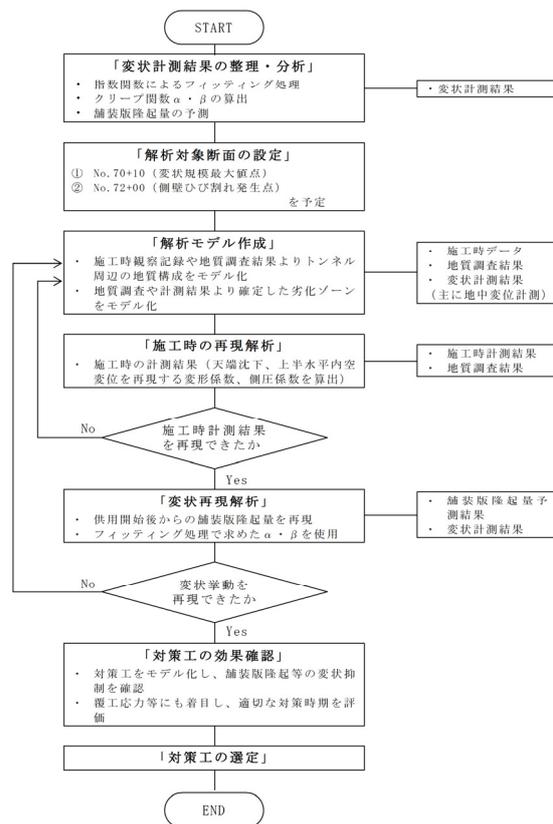


図-5 検討フロー

版隆起量が顕著な右脚付近で大きく、10,000日経過時点でコンクリートの引張強度を超過する引張応力が発生すると予測された。なお、コンクリートの引張応力は、調査によって得られた圧縮強度(27N/mm²)を換算した値を用いた。

(2) 対策工の選定

対策工は、道路トンネル変状対策工マニュアル(案)²⁾を参考に、以下の3種類の対策工について対策効果を確認し、比較を行った。比較表を表-1に示す。

- ①インバート工
- ②地盤改良(薬液注入)
- ③ロックボルト工

対策工の効果検証の結果、インバート工が最も路面の隆起を抑えることができることを確認したため、対策工としては、インバート工を選定した。

なお、対策対象区間は、黒色粘土層が分布するNo67+10~DI区間となるNo72+129までの区間とした。

(3) インバート構造の検討

対策工の施工時期を考慮し、インバートの構造を検討した。インバートの設置時期は、変状確認から3,000日経過の時点として、施工後にインバートに発生する応力の確認を行った。

インバート構造の検討ケースを表-2に示す。上記の検討

ケース①, ②において, インバートに発生する最大引張応力が許容値を超過する結果となり, インバートの長期的安定性に問題があると判断した. そのため, インバート構造としては, ケース③の内側D19@250, 外側D25@250 (複鉄筋)を採用した.

5. 施工計画

(1) 施工スパンの検討

インバートの設置にあたっては, 舗装版の撤去やインバート掘削が必要であり, その際にはトンネル内空側への変位, 覆工応力の増加が考えられる. また, トンネル延長方向の舗装版の撤去延長についても覆工コンクリートに与える影響度合いが異なるため, 舗装版撤去スパンについての検討を行った. 舗装版撤去スパンを表-3に示す.

3次元シェルばねモデルにある荷重を作用させ, そのモデルの中間付近で異なる舗装版撤去の状態を設け, その撤去区間の脚部水平変位を抽出した. 次に, 全舗装版撤去モデルでの脚部水平変位を基準に各未設置スパンの水平変位を正規化すると未設置区間が短いほど水平変位は小さくなる事が分かる. この水平変位の比率を2次元FEM解析の応力解放率として表現することで, 異なる舗装版撤去スパンの挙動を確認した.

その結果, 覆工1/3スパン (3.5m) 以外においては, 舗装版撤去, インバート掘削によって覆工コンクリートには, 引張強度以上の引張応力が発生するため, 舗装版撤去スパンは, 覆工1/3スパン (3.5m) として計画した.

(2) 施工計画

本トンネル周辺道路は, 迂回路の幅員が狭く, 大型車の離合が困難であったため, 終日片側交互通行による施工計画を行った. 本トンネルでは, 大型バスの通行があるため, 片側ずつの施工に際しては, 幅30m以上, 高さ40m以上の通行帯を確保できるようにした. 施工手順を図-6に示す.

インバート掘削にあたっては, バックホウまたはブレイカーを用いて行うものとし, 施工箇所が狭いため, ブレイカーは800kg級, バックホウは0.2m³で計画し, 重機の入れ替えは非常駐車帯を利用することとした.

表-3 3次元シェルばねモデル結果

モデル中央舗装版未設置延長	脚部水平変位	全長未設置に対する比
全長	82.7mm	1.00
覆工1スパン(10.5m)	27.6mm	0.33
覆工1/2スパン(5m)	5.1mm	0.06
覆工1/3スパン(3.5m)	2.1mm	0.03

表-1 対策工比較表

対策	インバート工	地盤改良(薬液注入)	ロックボルト工
対策概要図			
対策効果	10,000日後においても路面隆起量も小さく(1.4mm)、覆工許容値を上回らないため、対策効果あり	10,000日後の路面隆起量200mm以上(242.1mm)となり、覆工引張応力が許容値を超えるため、対策効果なし	鋼管φ114.3mm、t=6mm、L=8m 10,000日後の路面隆起量161.2mmとなり、覆工引張応力が許容値を超えるため、対策効果なし
経済性	○	×	×
評価	<ul style="list-style-type: none"> 対策効果、経済性ともインバート新設が最適である。 地盤改良については、改良時の変形係数が小さく、改良範囲を広げても対策効果は期待できず、不経済となる。 ロックボルト工については、施工ピッチに制約があり、これ以上の施工は対策効果が薄れる。また、最大限の対策においても一次的な効果はあるものの、将来的な鋼材腐食等の懸念もある。 		

表-2 インバート構造検討ケース

検討ケース	インバート構造	設計基準強度
①	巻厚40cm, 無筋	18N/mm ²
②	巻厚50cm, 無筋	18N/mm ²
③	巻厚40cm, 複鉄筋	24N/mm ²

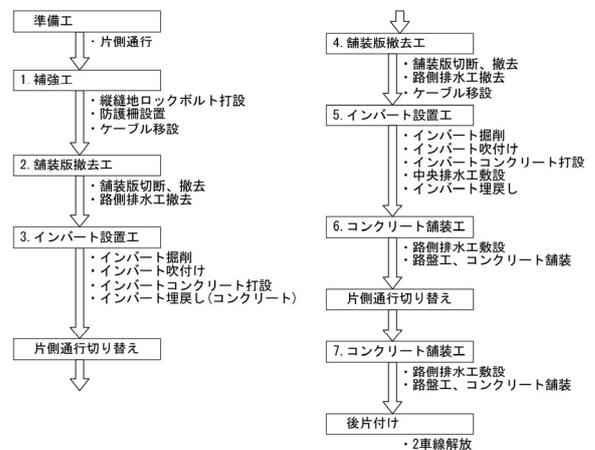


図-6 施工手順

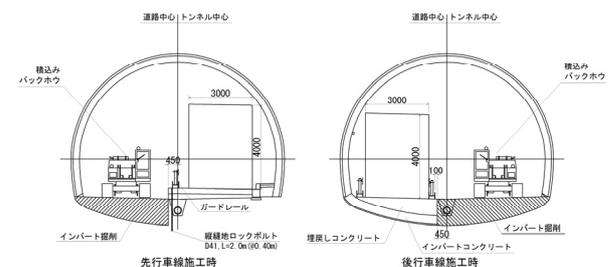


図-7 施工概要図

先行施工車線のインバート掘削時の崩壊防止として、掘削前に縦縫地ボルト (D41@0.4m) による事前補強を行い、安全確保を図った。さらに、コンクリートは早強コンクリートを用い、先行施工側車線の埋め戻しにもコンクリートを用いることで、後行車線施工時の安全確保と一般車両の通行を可能とした (図-7参照)。

6. おわりに

盤膨れが生じたトンネルに対して、対策工として、インバート工の設計・施工計画立案を行った。施工スパンを3.5mとすることやインバート構造を複鉄筋構造とする

ことで、施工時における覆工コンクリートへの影響や長期的なインバートの安定性を考慮した設計が行えた。

また、片側交互通行という施工条件の中で、通行車両等の安全確保や施工者の安全を確保できるような施工計画を立案した。

参考文献

- 1) 日本道路公団試験研究所：技術資料第 358 号トンネル数値解析マニュアル, p6-15, 1998.
- 2) 土木研究所：道路トンネル変状対策工マニュアル (案), p17, 2003.

(2017.8.11受付)

REINFORCEMENT DESIGN AND CONSTRUCTION PLANNING FOR TUNNEL IN SERVICE WITH HEAVING DEFORMATION

Yoshihiko HASEGAWA, Akira INOUE

A heaving occurred in the tunnel several years after the completion. Its progression has been confirmed by the measurement results. Implementation of the reinforcement was required. Invert reinforcement works are adopted in consideration of countermeasure effect and reliability. As this tunnel can not be closed, we designed a construction plan on one side alternate traffic.

In this paper, reinforcement design and construction planning for tunnel with heaving deformation are explained.