

トンネル変状対策工の三次元的効果に関する解析的検討

鉄道総研 正会員 ○嶋本敬介
 JR 西日本 正会員 藤原申次
 京都大学 正会員 松長 剛
 京都大学 塚田和彦
 京都大学 正会員 朝倉俊弘

1. はじめに

我が国においては、供用中のトンネルに対する維持管理がますます重要な課題となっている。一般に、トンネル覆工に作用する地圧は長期に渡って変動するため、合理的な変状対策工を施工するためには、地山の経時的な変形挙動を適切に評価する必要がある。そこで、筆者らは、周辺地山の強度劣化によって変状が生じている山岳トンネルを対象とし、数値解析と現地計測を組み合わせることで変状現象の時間依存性を表現する検討を進めている¹⁾。本論文では、トンネルの経時的な変状挙動や対策工の効果を予測することを目的とし、対策工の施工範囲(区間長)とその効果が及ぶ範囲に着目して、数値解析による検討を行った結果について報告する。

2. 検討手法

筆者らが検討を行っている検討手法として、数値解析と現地計測を組み合わせることで変状現象の時間依存性を表現する手法について具体的に説明する。本手法では、地山の強度定数が初期強度から時間の経過と共に低下し、それに伴う塑性領域の拡大が塑性圧の発生を引き起こし、その作用によってトンネル側壁部が押し出しを受けるという強度劣化モデルの考え方を基本としている。解析においては、地山強度のうちせん断強度 c を徐々に低下させ、それに伴うトンネル内空変位の変化と現地で測定された内空変位の時系列データを照らし合わせることで、変状進展の予測手法に時間軸の概念を導入している。

なお、各ステップに関して、どのように強度を下げるかであるが、本研究においては里・亀村らの研究²⁾でも使用されている破壊接近度に応じて強度低下が起こるという考え方に則った。破壊接近度 R は、

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2c \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi} \quad (1)$$

で示される、Mohr-Coulomb の破壊条件への接近度を示す指標である。

具体的なせん断強度の低減手法であるが、まず、トンネル掘削前の安定した状態の破壊接近度 R_{mi} とする。そしてあるステップ n におけるある要素 m の低減率 RR を

$$RR(n, m) = \frac{R(n, m) - R_{mi}(m)}{1.0 - R_{mi}(m)} \quad (R(n, m) - R_{mi}(m) \geq 0) \quad (2)$$

$$RR(n, m) = 0 \quad (R(n, m) - R_{mi}(m) < 0)$$

と定義する。そして、ステップ n 、要素 m のせん断強度を、

$$c(n, m) = c(n-1, m) - \lambda_c \cdot RR(n, m) \quad (3)$$

とする。ここで λ_c は、強度低下量を決定する定数である。

地山の力学モデルには Mohr-Coulomb の弾塑性モデルを用いた。解析においては種々の入力物性値が必要となるが、施工年代の古い変状トンネルでは岩石試験による詳細な地盤物性は残っていない場合が多い。そこで、この問題の解決法として、アイダ、蔣らが提案する軟岩における一軸圧縮強度と各種の物性値の相関関係から地山の物性値を推定する方法^{3,4)}を用いた。

3. 解析対象トンネルの概要と解析条件

3-1 対象トンネルの概要

検討対象としたトンネルは、1960年代に竣工した鉄道(単線並列)トンネルであり、後で施工されたトンネル(以下、先行・後行トンネル)において側壁部の押し出しやひび割れ等の変状が発生した。この変状原因については、対象地質が低強度の泥岩であることから、塑性圧の作用と考えられている。また、変状発生時には覆工の天端背面に60mm程度の空洞が確認されており、この空洞のために覆工は地盤からの反力が受けられず、変状が進行しやすい状態にあった。

これらの変状に対しては、特に変状が激しい断面に関して1990年代から側壁の内空変位計測を開始し、段階的にロックボルト補強工(以下、RB工)、裏込注入工(以下、裏注工)が施工され、現在も変状の進行性や対策効果が継続的に観測されている。強度劣化モデルを用いた解析結果の評価においては、時間軸を導入する際に図-1に示す実測変位データを使用した。以下、変状が著しく、内空変位量を計測している本計測断面を変状断面と称する。なお、解析結果の評価では、著しい変状が確認された後行トンネルを対象としている。

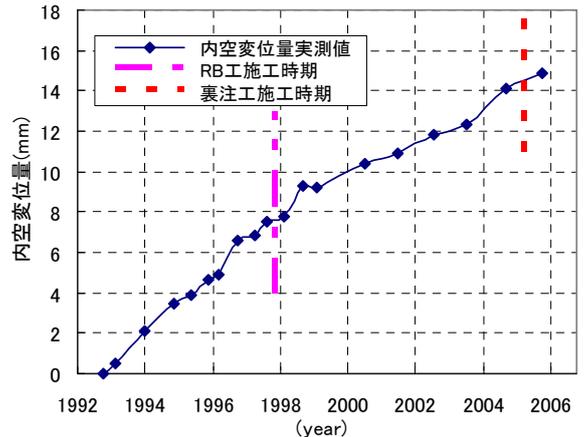


図-1 内空変位量の実測データ

キーワード 変状トンネル 三次元解析 対策工評価

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 鉄道総合技術研究所構造物技術研究部 TEL:042-573-7266

3-2 解析モデル

解析には有限差分コード **FLAC^{3D}** を適用した。対象トンネルを検討するに当たっては、先行トンネルの影響も考慮するため、上下線ともにモデル化を行った。解析領域は、トンネルの直径を **D** としたとき、境界の影響を無視できるよう **5D** を目安にトンネル水平方向 **80m**、鉛直方向 **60m** をモデル化した。延長方向に関しては変状断面を中心として **60m** をモデル化し、図-2 のように **x,y,z** 軸を設定した。なお、変状断面はモデル中央 **y=30m** の位置に設定した。トンネル掘削前の初期応力は、地形に応じた土被り荷重により決定した。境界条件は底面、側面をローラー支持とし、上面に土被り荷重に相当する外力を与えた。

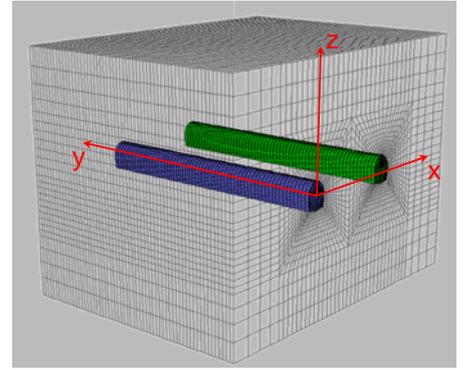


図-2 モデル図

3-3 地山物性値

本解析では、後行トンネルの **y=30m** を変状断面と定義したが、変状状況を再現するために後行トンネルに背面空洞(天端背面にアーチ中心から約 **65°** の範囲)をモデル化した。更に、変状断面近傍の **y=27~35m** における地盤剛性、強度を他の領域よりも小さく設定した。以下、**y=27~35m** を劣化領域、その他の領域を健全領域と定義する。

各種地盤物性値については、アイダンや蔣らが整理した軟岩における一軸圧縮強度と各種の物性値の相関関係を参考に、現地の一軸圧縮強度から表-1 のように設定した。なお、本解析においては内部摩擦角の劣化は考慮せず、地山のせん断強度のみが **24** ステップかけて破壊接近度に応じて強度低下するものとした。

表-1 解析に用いた地盤物性値

物性	単位	健全領域	劣化領域
初期一軸圧縮強度	MPa	3.11	0.84
単位体積重量	MN/m ³	1.95 × 10 ⁻²	1.78 × 10 ⁻²
弾性係数	MPa	351	73
ポアソン比	-	0.30	0.30
内部摩擦角	°	30	30
ダイレイタンス角	°	15	15
初期せん断強度	MPa	0.86	0.25
最終せん断強度	MPa	0.0344	0.01

4. 解析結果と考察

4-1 対策工による変位速度抑制効果

対策工モデルによる解析では、実施工に準じて **RB** 工を **4** 本/断面、**1.2m** ピッチ、計 **16** 本モデル化し、裏注工として **y=0~42m** 区間の空洞にモルタル物性値の要素を配置することで表現した。

図-3 に内空変位量と時間の関係を示す。裏注工の効果を確認する期間が短いものの、**RB** 工、裏注工ともに計測データに近い変位抑制効果を再現することができた。

4-2 裏注工区間の比較検討

裏注工の施工範囲に関して、実際に実施された **y=0~42m** と施工区間を短縮した **y=23~39m**、**y=30~31m** の計 **3** ケースを比較検討した。

図-4 に裏注工施工後に発生した変位の比較を示す。解析結果から、裏注工が施工されている範囲では変位が抑制されていることが分かる。また、**y=0~42m** のケースの結果から、裏注工による効果は地山の劣化状況に影響を受けず、安定した効果を発揮していることが確認できる。また、変状断面の変位抑制効果には大差がないという結果となった。

5. まとめ

数値解析と現地計測を用いた本手法により、変状の進行や対策工の効果を再現することができた。また、今後の変状の進行に関する算定結果が得られたため、継続的な計測管理と組み合わせることで、長期的な補修・補強計画を進める上での基礎資料が得られた。

本トンネルでは、予防保全の観点から変状区間を包含した全空洞区間に裏注工を実施したが、対策工による影響区間を評価できることが確認されたため、今後はより合理的な対策区間の検討が可能となった。

本検討により、対策工の工種、実施時期、実施区間等を検討する際の一評価法を示すことができた。今後も様々な条件化における変状トンネルに本手法を適用し、更なる予測精度の向上に向けて検討を進める予定である。また、検討実績を重ねていくことで、長期の計測データが得られていない場合にも変状の進行予測を可能にしたいと考えている。

参考文献

- 1) 松長 剛, 熊坂博夫, 小島芳之, 朝倉俊弘: 地山強度の経時劣化を考慮したトンネル変状の予測と対策に関する検討, 土木学会論文集 No.799/III-72, pp.75-88, 2005
- 2) 里優, 竹田直樹, 亀村勝美: 強度の時間依存性に着目した岩盤の解析, 第18回土質工学研究発表会, pp.817-820, 1983.
- 3) アイダンオメール, 赤木知之, 伊東 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, pp.73 - 82, 1992
- 4) 蔣 宇静, 江崎哲郎, 横田康行, 禿 英和: 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

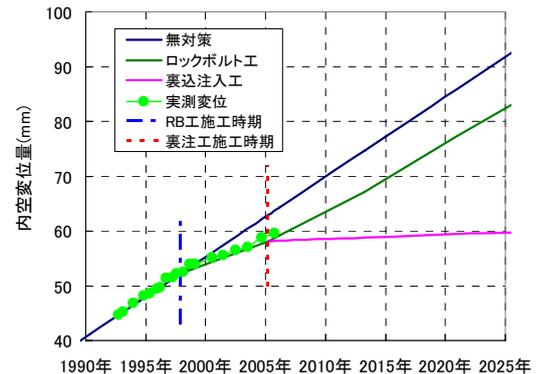


図-3 対策工による変位速度の抑制効果

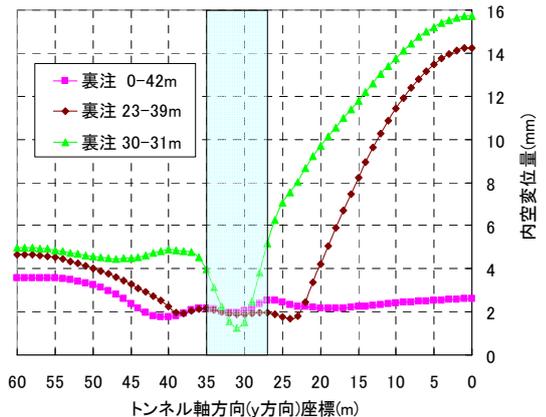


図-4 裏注区間の比較