

# 時間依存型地山劣化モデルによる トンネル変状予測法の開発

野城 一栄\* 嶋本 敬介\* 小島 芳之\* 朝倉 俊弘\*\*

## Development of Prediction Method of Tunnel Deformation Using the Time-dependent Ground Deterioration Model

Kazuhide YASHIRO Keisuke SHIMAMOTO Yoshiyuki KOJIMA Toshihiro ASAKURA

Some mountain tunnels suffer from deformation and cracks caused by earth pressure. This deformation might progress along with the time passage for some tunnels. Because of existence of various uncertain factors of such time-dependent deformation and destruction behavior of a mountain tunnel, a maintenance management method has not yet been established currently. In this study, we focused on tunnels deformed due to earth pressure, and tried to apply a numerical analysis to the deformation. As the result of the study, we developed a prediction method of tunnel deformation using the time-dependent ground deterioration model, realized to simulate the behavior of tunnel deformation with time, and showed its applicability to decision of appropriate execution time and kind of countermeasures.

キーワード：トンネル，地圧，維持管理，補修・補強，数値解析

### 1. はじめに

山岳トンネルでは，完成後の地圧の作用により，変形，ひび割れなどの変状を生じることがある。新設による取替が困難なトンネルにおいてはこのような変状トンネルを適切に維持管理していく必要があるが，時間に依存した変形挙動については不明な点が多く，地圧により変状を生じているトンネルの維持管理法は確立されていないのが現状である。

このような背景から，筆者らは，地圧の作用により変状を生じているトンネルに対して長期的な維持管理法を提案することを目的として，時間依存型地山劣化モデルを用いた，トンネル変状の数値解析シミュレーション手法や，変状の予測法の研究を行っている<sup>1)～4)</sup>。本論文は，解析手法の妥当性の検証，解析手法の実務への適用について検討した結果について示すものである。

### 2. 解析手法

解析は地山劣化モデルを用いて実施した。本モデルは，地山の各要素の強度定数を変化させることで経年に伴う地山の強度の低下やトンネルの内空が縮小する挙動を表現するものである。

図1に地山の強度の低下の概念を示す。地山を Mohr-

Coulombの破壊規準に従う弾完全塑性体と仮定し，地山の強度が時間の経過に伴って低下する挙動を表す関数（図中「強度低下曲線」）を，坑内からのボーリング調査の結果やトンネルの変形の計測結果に基づき設定し，この強度低下曲線に基づき地山の強度を低下させていくという手順で解析を進めていく。

本研究においては，地山の強度として，内部摩擦角 $\phi$ は一定とし，粘着力 $c$ のみ低下することと仮定し，具体的な強度低下曲線として， $c=c_0 \times \exp(-At)$ を想定した。

ここで， $A$ ：係数， $t$ ：供用開始からの経過年数（年）， $c_0$ ：地山の初期強度（粘着力）である。 $c_0$ はボーリング調査により得られたコアの室内試験により決定し，係数 $A$ については現場で計測されたトンネル覆工の内空への押出し量と解析上得られたそれとが近い値になるよう決定する。ここで，地山についてはモデル化範囲全体で一律に強度を低下させるが，応力状態が安定しているトンネルから離れた領域においては，地盤の強度が相当量低下しても破壊が起きないため，影響はない。

地山劣化モデルによる再現解析自体は文献1)でも試みられているが，これは文献5)に示されている限られた情報（一軸試験結果等）に基づいて行ったものであり，重要な解析入力値である粘着力については文献6)～8)等を参考に推定するなど，十分な精度で解析を実施するには至らなかった。今回，新たに，地圧により変状を生じた履歴を有する田子倉トンネルについて，現地においてボーリング調査を追加実施し，詳細な再現解析を行い，解析手法の妥当性の確認を行うこととした。

\* 構造物技術研究部（トンネル）

\*\* 京都大学

特集：構造物技術

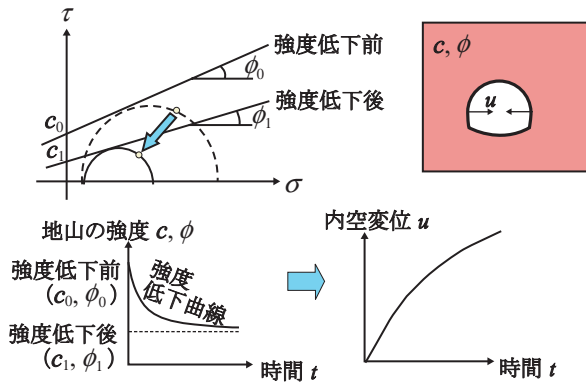


図1 地山の強度低下の表現の概念

表1 田子倉トンネルの諸元<sup>5)</sup>

延長	3,712m
しゅん功	1971年
掘削工法	在来工法（全断面工法）
地形・地質	新第三紀中新世の緑色凝灰岩，流紋岩
構造	巻厚23～45cm，インバート一部有り
補修歴	裏込注入，ロックボルト

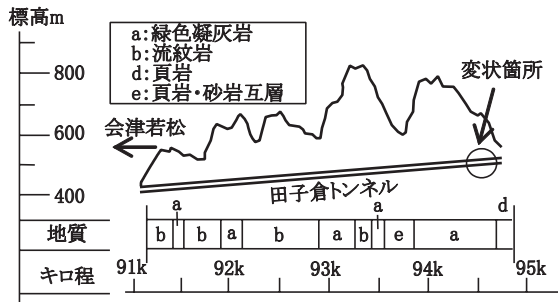


図2 田子倉トンネルの縦断図<sup>5)</sup>

3. シミュレーション解析

3.1 田子倉トンネルの概要

田子倉トンネル<sup>5)</sup>は新第三紀中新世の緑色凝灰岩，流紋岩からなる地山に位置する単線トンネルである。供用開始後まもなく会津若松起点94k590m付近で，水平内空の縮小（平均約15mm/年），ひび割れ，圧ぎ等の変状が生じた。表1に田子倉トンネルの諸元，図2に田子倉トンネルの縦断図，図3に内空変位の推移，図4にトンネルの変状模式図を示すが，変状の傾向や地形，地質から，変状の原因は覆工周辺地山の塑性化による塑性圧と考えられている。なお，裏込注入，ロックボルト等の対策工により現在は変状が収束している。

数値解析に先立ち，解析に必要な物性値を得るため，上記キロ程付近において坑内から地質ボーリング調査を実施した。地質調査の結果を図5に示す。地質は風化を生じやすい緑色凝灰岩，浮石質凝灰岩であり，天端～側壁部には厚さ50cm程度，路盤には2m程度の粘土化帯が

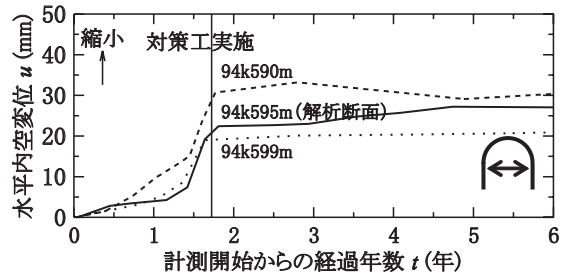


図3 田子倉トンネルの内空変位の推移<sup>5)</sup>

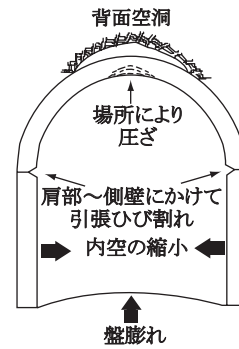


図4 田子倉トンネルの変状模式図（横断面）

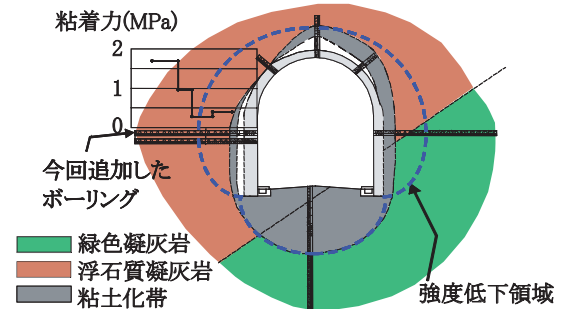


図5 地質調査の結果

確認され，左側壁部で実施した原位置試験，室内試験の結果を考慮すると，トンネル周辺には1～2m程度の強度低下領域があることが予想された。

3.2 解析条件

田子倉トンネルの解析モデルを図6に示す。モデル化は，軌道の通り変位が観測されなかったことから，対称性を生かして右半断面だけ行った。解析対象断面とした変状部の土被りは150mあるが，トンネル周辺の上下左右50mより外の範囲については，鉛直方向については自重，水平方向については鉛直荷重に側圧係数を乗じた荷重を境界部の節点に与えることにより表現している。

地山の解析入力値を表2に示す。入力値は主に地質調査の結果を基に設定している。すなわち，地山の強度の初期値には未風化部の地山のデータを用いることとした。

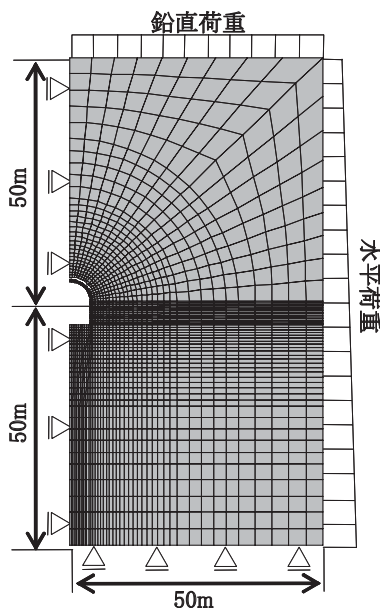


図6 解析モデル

表2 解析入力値（地山）

項目	入力値	設定方法
単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	20	室内試験
弾性係数 $E$ (MPa)	1,700	孔内水平載荷試験 (未風化部)
ポアソン比 $\nu$	0.33	室内試験 (未風化部)
粘着力 $c$ (MPa)	1.7	室内試験 (未風化部)
	0.3	室内試験 (風化部)
内部摩擦角 $\phi$ (°)	10, 20	一般的な値
側圧係数 $K$	0.8, 1.0	一般的な値

表3 解析入力値（覆工）

項目	入力値	備考
巻厚 $t$ (mm)	300	一般的な値
弾性係数 $E$ (MPa)	$2.1 \times 10^4$	$\sigma_a = 18\text{N/mm}^2$ 想定
ポアソン比 $\nu$	0.2	
粘着力 $c$ (MPa)	5.2	
引張強度 $\sigma$ (MPa)	1.6	
内部摩擦角 $\phi$ (°)	30	
背面空洞	あり	無物性要素により表現
インバート	なし	

覆工の解析入力値を表3に示す。対策工は実トンネルと同様にして裏込注入+ロックボルトを設定した。解析上は、裏込注入については背面空洞に地山の要素を付加すること、ロックボルトについてはケーブル要素によりモデル化し、実際と同様、70kN/本のプレストレスをかけている。対策工の施工時期に関しても、実際の施工時期と同時期とした。対策工の解析入力値を表4に、対策工モデルを図7に示す。

表4 解析入力値（対策工）

項目	入力値		備考
裏込注入		—	空洞に地山要素を付加
ロックボルト	弾性係数 $E$ (MPa)	$2.1 \times 10^5$	径:25mm, 10本/断面, c. t. c = 1.5m, L=4m プレストレス 70kN/本

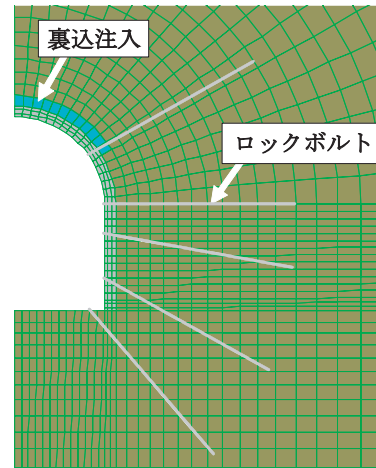


図7 対策工モデル

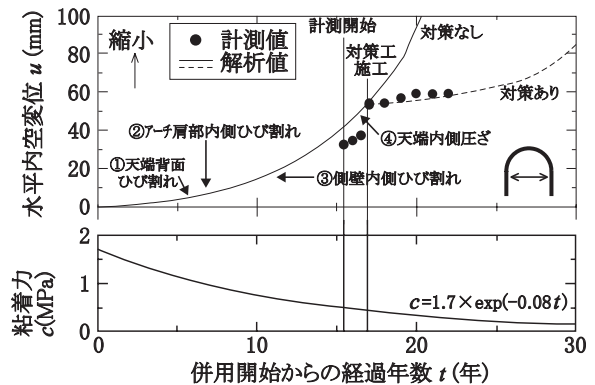


図8 再現解析の結果

### 3.3 シミュレーション解析

これら物性値を用い、計測値の再現解析を実施した。2. 解析手法で示した手法により、今回は粘着力  $c$  が、 $c = 1.7 \times \exp(-0.08t)$  に従って低下すると仮定した。

図8に再現解析における変位、変状の進展グラフを、図9に覆工の塑性化領域の進展（白色部：ひび割れあるいは圧ざ）を示す。ここで、解析における変状（ひび割れ）の進行については、覆工要素に働く引張応力がコンクリートの引張強度に達した時をひび割れの発生と、圧縮側の縁ひずみがコンクリートの圧縮限界ひずみである  $3500 \mu$  に達した時を圧ざの発生と、それぞれ判定することとした。図8、図9より、変状は「①天端背面ひび割れ」→「②アーチ肩部内側ひび割れ」→「③側壁内側ひび割れ」→「④天端内側圧ざ」と進行することがわかる。これらの変状は図4に示した変状模式図と一致する。

特集：構造物技術

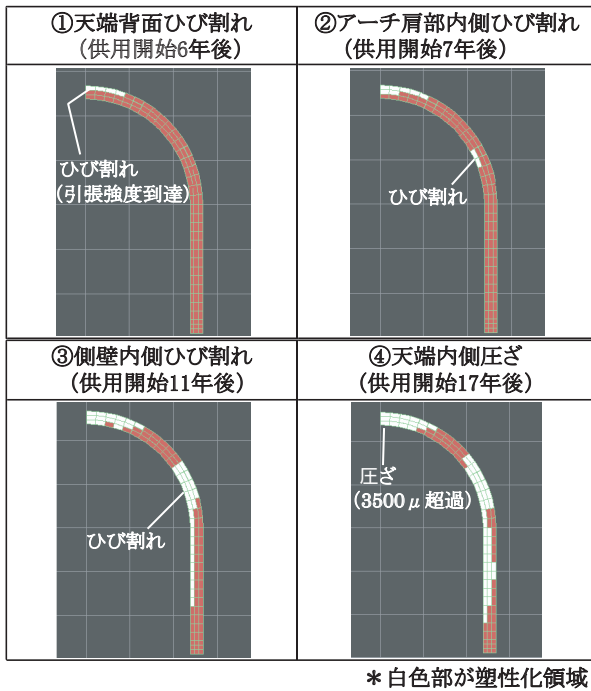


図9 覆工の塑性化領域の進展

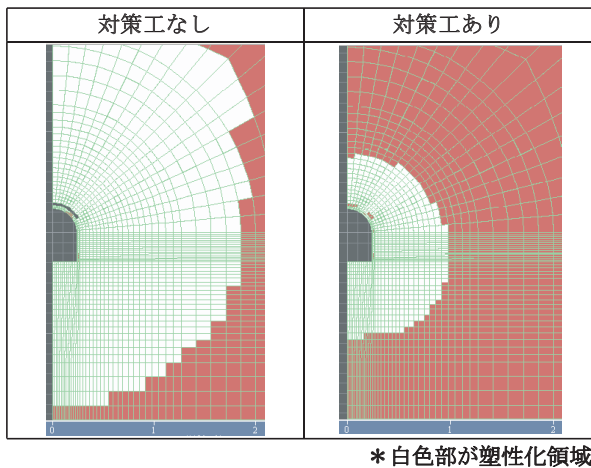


図10 対策から15年後の塑性化領域

3.4 対策工の効果

図8には対策工の施工による内空変位の変化も示している。図上、実線が対策なしの場合、点線が対策ありの場合の解析結果を示している。対策なしの場合においては、変形が急激に増加するが、対策ありの場合、対策工の施工によって変位を抑制できていること、実測値を適切に再現できていることが確認できる。

図10に対策から15年後の塑性化領域（白色部：劣化により弾性係数が低下している領域）を示す。ここで、表より、裏込注入等の対策工によりトンネル構造体だけでなく周辺の地山の劣化（緩み領域の拡大）も抑制されていることがわかる。トンネルの構造体だけに着目した今までの解析法では表現できなかった、地山の劣化（緩み領域の拡大）の抑制といった裏込注入の効果も、本解析法では新たに表現できることが確認できる。

4. 実務への適用に関する検討

本章では、対策工の工種や施工時期検討の実務に対する本手法の適用可能性について検討を行うことにする。

4.1 解析条件

解析は、田子倉トンネルのモデルを用いて行うこととした。

ここでは、対策工をパラメータにとり、一般的に用いられている裏込注入、ロックボルト、ストラットを取り上げることとし、実務上よく用いられる組み合わせとして、表5に示すような組み合わせを考えた。対策工のモデル化に関して、裏込注入、ロックボルトに関しては3.における検討と同様のモデル化、ストラットに関しては、トンネル路盤部でH-250鋼製ストラットが1.4m間隔で敷設されることを想定してモデル化した。

次に、実務を想定して、対策工の施工時期を変化させることとした。対策工の施工時期としては、実際の対策時期（供用開始17年後）を基本とし、それより2年早い場合、2年遅れた場合を想定して設定した。対策工の施工時期を表6に示す。解析ケース数は対策なしを含め全部で13ケースとなる。

4.2 対策工の効果

4.2.1 内空変位

解析から得られた内空変位の推移を図11に示す。対策工施工前後の内空変位速度（施工前約2年間、施工後約2年間の平均値）の変化を図12に示す。両図より、どのケースも対策工の施工により内空変位速度が低下することが確認できる。特に、ストラットを採用した組み合わせ4の場合は、供用開始から30年が経過し、粘着力が初期値の1/10以下になった場合でもトンネルの内空変位速度は小さいままであり、対策工の効果を引き続き発揮できていることがわかる。

表5 対策工の組み合わせ

組み合わせ	裏込注入	ロックボルト	ストラット
1	○		
2		○	
3	○	○	
4	○	○	○

表6 対策工の施工時期

時期	対策工の施工時期
1	(対策なし)
2	供用開始15年後に対策工を施工
3	供用開始17年後に対策工を施工 (実際の田子倉トンネル相当)
4	供用開始19年後に対策工を施工

覆工の破壊については後述するが、圧ぎに関しては、図11に示したように、対策なしの場合で供用開始16年

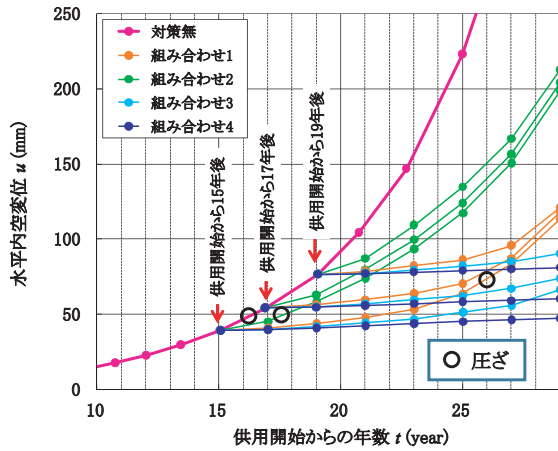


図11 内空変位の推移

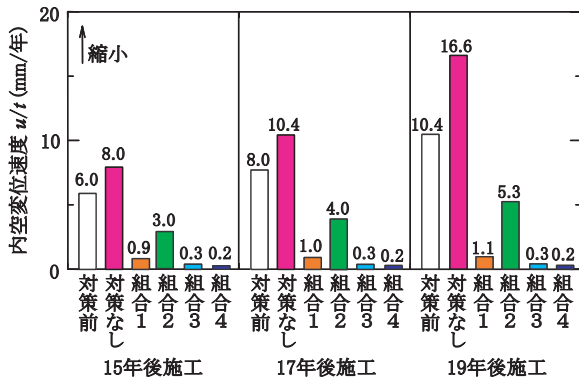


図12 対策工施工前後の内空変位速度の変化 (施工前約2年間, 施工後約2年間の平均値)

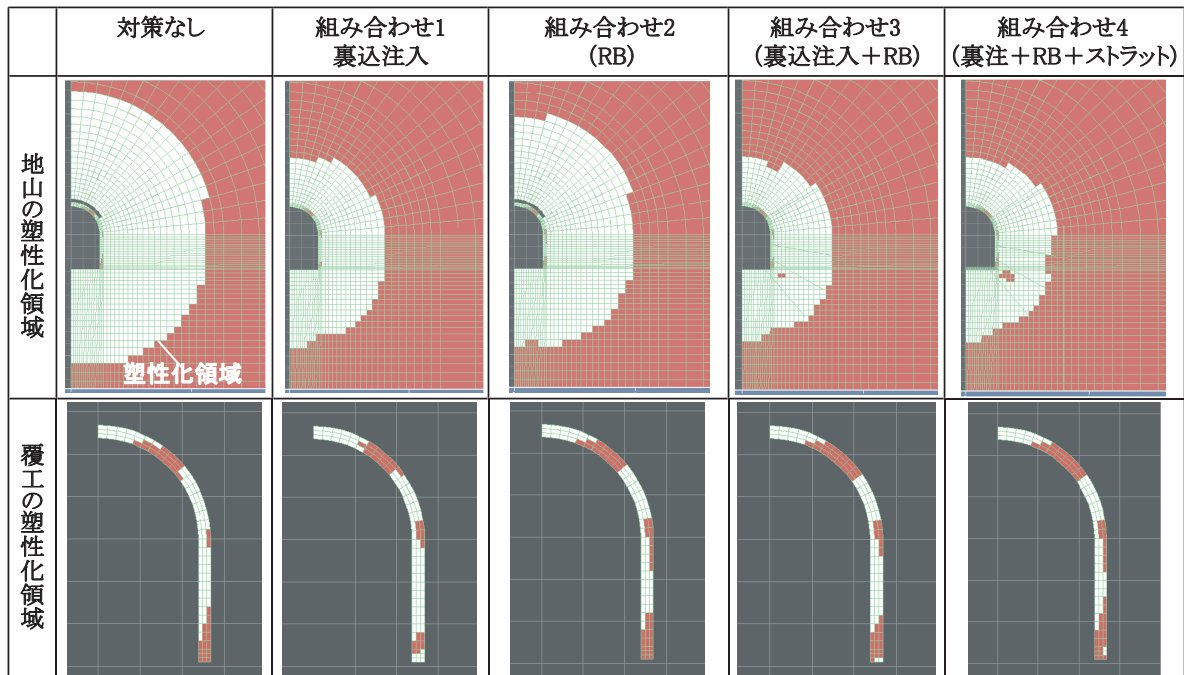
後、ロックボルトだけの場合で同17年後、裏込注入だけの場合で同27年後に天端内側の縁ひずみが3500 $\mu$ を超え、圧ぎの危険性が出てくるが、組み合わせ3, 4ではその値を超えることはなく、対策工の効果が確認できる。

4.2.2 地山の破壊状況

対策工の施工時期2(供用開始15年後に対策工を施工)の場合で供用開始25年後に着目した、地山の塑性化領域を図13上段に示す。図14にSL部水平方向、および鉛直方向の塑性化領域を示す。4.2.1で示した内空変位同様、対策工により、いずれのケースも地山の塑性化領域の拡大を抑制することができる。特に、裏込注入工を用いた組み合わせである1, 3, 4では、水平方向、鉛直方向共に地山の塑性化領域の拡大を抑制する効果が大きいことがわかる。

4.2.3 覆工の破壊状況

同様に、覆工の塑性化領域(ひび割れ発生領域)を図13下段に示す。また、図15に、覆工のアーチ部、側壁部それぞれについて、全要素数に対する塑性化した要素の割合を指標として、塑性化領域の相対評価を試みた。覆工の塑性化領域についてもこれまでと同様の傾向であるが、ロックボルト(RB)を施工した組み合わせ2~4で、その拡大を抑える効果があることがわかる。一方で、組み合わせ1(裏込注入工)は、アーチ部のひび割れ進展を抑える効果はあるものの側壁のひび割れの進展の抑制に関しては4.2.1, 4.2.2で見られたほどの効果はみられず、側壁部についてはかえってひび割れが増加する結果となった。これは、組み合わせ2~4ではロックボルトのプレストレス効果により覆工を地山に縫い付け、ひび割



\* 白色部が塑性化領域

図13 対策工による塑性化領域の変化(対策工の施工時期=2, 供用開始25年後)

特集：構造物技術

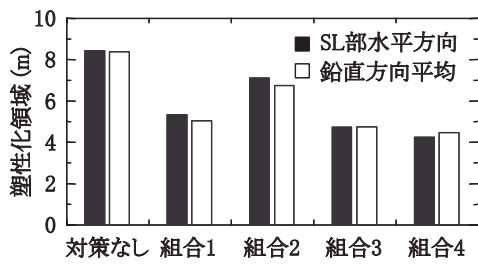


図14 地山の塑性化領域の変化

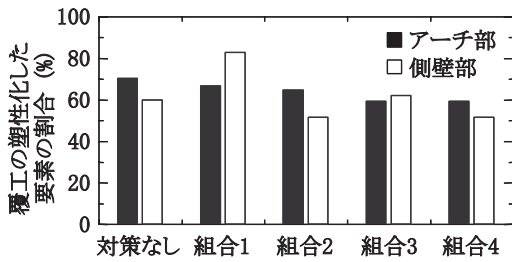


図15 覆工の塑性化領域の変化

れの発生を抑制しているためと考えられる。ただし、図11でも示したように、ロックボルトは内空変位そのものを大きく抑制できているわけではないことに注意が必要である。

4.2.4 対策工の施工時期の検討への適用

最後に、本手法により、対策工の施工時期の検討を行うことを試みる。

トンネルに対して要求性能に基づく限界値を設定して検討を行うことはまだ研究レベルであり、確固たる方法が提示されるまでには至っていないが、ここでは、仮に、供用開始30年後時点での圧ぎの発生を防ぐことを設計条件とするのであれば、図11より、供用開始15年後までに組み合わせ3(裏注+RB)が必要ということになる。また、圧ぎについては剥落対策工で対応することとして許容するが、供用開始30年後時点で内空縮小を80mm以内に抑えることを設計条件とするのであれば、供用開始17年後までに組み合わせ3(裏注+RB)が必要となる。ここで、対策工の施工が遅れて供用開始19年後になった場合は、組み合わせ4(裏注+RB+ストラット)が必要となる。あるいは、重要線区で将来的に変形を完全に停止させたいのであれば、根本的な対策として、組み合わせ4(裏注+RB+ストラット)が必要となる。

以上より、時間の概念を考慮することのできる本手法を用いて、対策工やその施工時期をパラメータとして解析を行うことにより、対策工の施工時期の検討が可能となることがわかった。

5. まとめ

本研究では、地圧の作用によりトンネルが変状する場合に着目し、時間依存型地山劣化モデルを用いた解析に

より、解析手法の妥当性の検証、解析手法の実務への適用について研究を行った。その結果、以下の成果を得た。

- (1) 対策工の効果については、今までは変位～応力の関係で評価していたが、本手法により、時間～変位の関係で評価できるようになった。
- (2) 変位に関する限界値や、圧ぎを発生させないなどの限界値を設定して、それを満足するために必要な対策工の施工時期の検討を行うことができるようになった。

今後は、構造物の維持管理のこれまで以上の効率化が求められ、さらにはアセットマネジメント手法の導入も行われると予想されるが、本手法はその手段の一つとして利用できる可能性があると考えられる。解析精度を向上させて適用事例の数を増やし、実用的なモデルとすべく研究を深度化して行きたいと考えている。

謝 辞

本研究の遂行にあたってご協力頂いた、川上義輝氏(ジェイアール総研エンジニアリング)、重田佳幸氏(ダイヤコンサルタント)、松長剛氏(パシフィックコンサルタンツ)に深甚なる謝意を示す次第である。

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研究, 土木学会論文集, No.799/Ⅲ-72, pp.75-88, 2005.9
- 2) 高橋幹夫, 野城一栄, 清水満, 嶋本敬介, 松長剛, 朝倉俊弘: 地山強度の経時劣化を考慮した既設トンネルのシミュレーション解析, 第41回地盤工学研究発表会, 2006.7
- 3) 野城一栄, 高橋幹夫, 小島芳之, 嶋本敬介, 松長剛, 朝倉俊弘: 地山強度の経時劣化を考慮した変状トンネルのパラメータ解析, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, 2006.9
- 4) 野城一栄, 高橋幹夫, 小島芳之, 渡邊恭崇, 松長剛, 朝倉俊弘: 地圧により変状が進行するトンネルのシミュレーション解析, 土木学会第62回年次学術講演会講演概要集, 2007.9
- 5) 野澤伸一郎, 伊藤忠八, 野沢定行: 既設トンネルの膨圧を克服, トンネルと地下, 1992.10
- 6) アイダンオメール, 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, 1992.6
- 7) 赤木知之, アイダンオメール, 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
- 8) 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