

地山の時間依存性を考慮した変状対策工の 解析手法に関する検討

STUDY ON THE ANALYSIS OF COUNTERMEASURES FOR DEFORMED TUNNEL ACCOUNTING FOR THE TIME-DEPENDENCY OF ROCK MASS

松長 剛*・朝倉俊弘**・小島芳之***・熊坂博夫****

Takeshi MATSUNAGA, Toshihiro ASAKURA, Yoshiyuki KOJIMA and Hiroo KUMASAKA

An analysis of countermeasures for deformed tunnel accounting for the time-dependency of rock mass is developed and is applied to a deformed railway tunnel countermeasures. Comparative analyses are done to determine the effects of countermeasures.

The results are compared with the observed data of the tunnel and applicability of the method is studied finding that this analysis can evaluate the effect of these countermeasures.

Key Words: deformed tunnel, numerical analysis, long-term ground behavior

1. はじめに

わが国においては、道路・鉄道等のトンネルの総数が10,000箇所以上、総延長は4,000kmを越える状況となっている。この中には戦前に建設された古いトンネルが、現在も供用されているものもある。このため、長期に渡って供用されているトンネルに対する維持・管理は重要な課題となっている。

トンネルの維持・管理において実施する対策は、一般に二つに大別される。一つは、人工構造物である覆工の材料劣化を主体とした変状に対する補修である。もう一つは、トンネル周辺地山からの地圧の増大によるひび割れ、盤ぶくれ、内空縮小等の変状に対して、覆工耐力の向上や周辺地山の安定化を図る補強である。このうち、本研究では後者を対象としている。

補強を目的とした対策工を必要とする変状の原因には、地質的な要因による長期的な地山の変形があるが、その他に背面空洞や巻厚不足といった構造欠陥など様々な要因が複雑に関連している。筆者らは、これらの要因を考慮して変状の進展予測や対策工設計を解析的に扱う取り組みとして、梁ばねモデルによる解析手法^{1), 2)}の適用を提案している。この梁ばねモデルによる手法では、地山側の要因を地圧として荷重モデルで表現し、覆工側の要因を部材特性として構造モデルで評価している。また、覆工の現存耐力と対策工による増加耐力を比較することで、対策工設計の定量化を図ることができる。

一般に、変状の進展を評価する指標³⁾には内空変位速度が適用される場合が多く、変位速度の抑制を目的として対策工の採用が検討される。前述の梁ばねモデルでは、各種対策工による補強効果が地圧の増加に対する覆工耐力の向上で評価されるが、経時変化を扱えないために通常の管理に適用される変位速度による評価が難しい。そこで、梁ばねモデルでの変状の進展予測や対策効果の定量的評価といった特徴を生かし、地山の時間依存性を考慮した変状対策工設計を行う解析手法の検討³⁾を実施している。

* 正会員 パシフィックコンサルタンツ（株）交通技術本部 トンネル部

** 正会員 京都大学大学院 工学研究科

*** 正会員 （財）鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部

**** 正会員 清水建設（株）技術研究所 地下技術グループ

本論文では、地山挙動の長期的な時間依存性を考慮するために、地山の経時的な変形挙動を地山の強度低下で評価した地山劣化モデル³⁾について報告する。また、長期的な変状に対して段階的な対策を行っている六十里越トンネルに対して梁ばねモデルと地山劣化モデルを適用して、変状対策工設計への両解析手法の適用性について検討した結果を述べる。

2. 解析手法

ここでは、筆者らが提案している梁ばねモデルによる解析と今回検討した地山劣化モデルによる解析について概説する。

(1) 梁ばねモデルによる解析

梁ばねモデルによる解析^{1), 2)}では、地山をばね、覆工を梁とした骨組構造解析を適用し、図1に示した流れにしたがって解析を行う。本解析では地圧の増大に伴う発生断面力ごとにひび割れの発生を評価し、ひび割れ発生ごとに構造モデルを変更して計算を繰り返す。ここで、ひび割れは塑性ヒンジとしてモデル化し、ひび割れが生じるときの断面力・変位とひび割れをピン結合（または回転ばね）に変更して計算したモデルでの断面力・変位の増分を重ね合わせることで変状の進展を表現する。以上の繰り返し計算を行い、ひび割れ断面が圧縮損傷を生じた時点で覆工に圧ぎが生じたとして解析を終了とする。

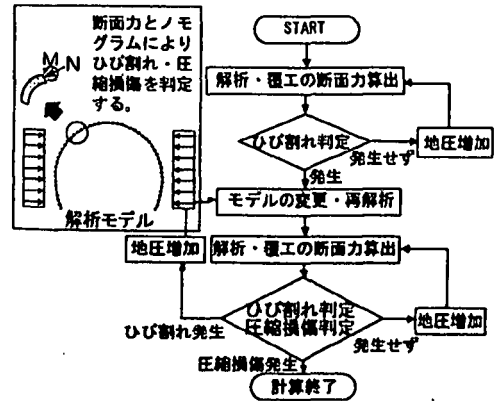


図1 梁ばねモデルによる解析の流れ

(2) 地山劣化モデルによる解析

地山劣化モデルによる解析³⁾では、右図のように地山の強度定数が時間とともにピーク強度から残留強度までに低下すると仮定し、トンネルの周辺地山に応力再配分 ($\sigma_{l,peak} \rightarrow \sigma_{l,res}$) が生じることで経時的なトンネルの変形挙動を表現している。ここでは、地山の劣化を経時的な強度低下として捉え、地下水による影響については考慮していない。

本解析によって、強度低下と経過時間の関係から、長期的なトンネル、周辺地山の挙動を検討することが可能となる。なお、経時的な強度低下が不明な場合には、内空変位速度の計測結果から解析で変位と時間の関係をシミュレートして地山強度を同定することとなる。以上のように、本解析では覆工の発生応力や変形量とともに周辺地山の応力状態や劣化状況（塑性領域）等が評価され、覆工だけでなく地山への補強の必要性についても取り扱うことが可能となる。

また、覆工に発生するひび割れや圧ざといった変状については、覆工要素の発生応力に対して梁ばねモデルと同様にコンクリートの引張強度と圧縮強度で判定を行う。ここで、覆工にひび割れが発生した場合には発生箇所インターフェイス要素を設定してひび割れの開口を表現し、圧ざが発生した場合にはコンクリートの材料非線形を考慮して部材剛性の低下を図っている。

なお、今回は上記地山劣化モデルを検討するために有限差分法を用いて解析を行った。

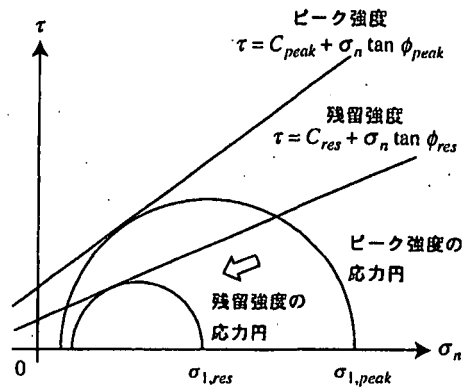


図2 Mohr の応力円による強度低下のモデル化

表 1 両解析手法の特徴

	梁ばねモデル (骨組構造解析)	地山劣化モデル (有限差分法など)
地山	地盤反力をばね(圧縮、せん断)でモデル化	Mohr-Coulomb の降伏規準で地山劣化をモデル化
覆工	梁部材でモデル化(ばね切りで背面空洞を評価)	非線形材料でモデル化(インターフェイス要素で空洞を評価)
ひび割れ	コンクリートの引張強度で評価、塑性ヒンジでモデル化	引張強度で評価、開口をインターフェイス要素でモデル化
圧さ	コンクリートの圧縮限界で評価、解析を終了*	圧縮強度で評価、材料非線形を考慮
解析結果	変状箇所、作用地圧と変位	変状箇所、変位と経過時間、地山の応力状態

※ 圧さを断面剛性の低下でモデル化することも可能であるが、解析上構造が不安定となりやすい。そこで、圧縮限界を覆工構造の断面耐力と位置付けて解析を終了している。

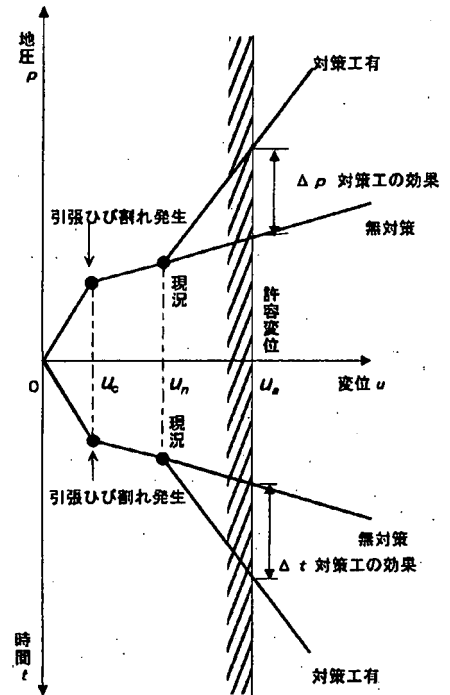
(3) 解析における対策効果の評価

解析手法を適用した変状対策工設計では、解析による現況のシミュレーション(無対策モデルで実施)を行い、無対策モデルと対策工モデルの解析と比較することで対策の時期や工種の比較検討を行っている。この場合、梁ばねモデルと地山劣化モデルには、対策効果の評価方法にそれぞれ以下のような特徴がある。

梁ばねモデルでは、解析で地圧—変位関係が得られるため、設計上の許容変位に対する耐力余裕(作用地圧)の向上で対策効果(図3における ΔP)が評価できる。しかしながら、実務上のトンネル管理では地圧の測定が困難であるため、計測値との直接的な比較ができず、解析で得られた対策効果を相対的に評価することになる。また、本解析では時間をパラメータとして取り込んでいないため、経年変化に伴う挙動を評価する点が課題がある。

一方、地山劣化モデルは、内空変位速度の計測結果から周辺地山の劣化の進行を仮定して解析するため、トンネルの変位—時間関係が算定される。このため、対策工を考慮した解析を行うことで、内空変位速度の抑制効果が直接評価できる。

また、解析結果として周辺地山の応力状態が算定されるため、長期的な観点で地山の安定性を評価することができ、地山に対する補強工(地山改良やアンカー工など)について検討が可能となる。

図3 変位勾配による対策効果の評価²⁾

3. 変状のシミュレーションと対策工の比較検討

JR 只見線六十里越トンネル^{4),5)}では、右図のように側壁部の押し出しやひび割れ、圧さなどの変状が発生したため、内空変位の抑制を目的とした変状対策工が段階的に行われている。また、本トンネルでは内空変位の増大を管理するために10年以上の長期に渡って内空変位が測定されており、対策前の内空変位速度だけでなく、対策後の変位の抑制効果についても計測が実施されている。

そこで、六十里越トンネルに梁ばねモデル、地山劣化モデルの両解析手法を適用し、変状進展のシミュレーションおよび対策工の比較解析を実施した。



図4 六十里越トンネルの主な変状状況

3.1 六十里越トンネルの概要

(1) 地形・地質および変状状況

解析対象とした六十里越トンネルは、建設直後から盤膨れや側壁の押し出しに伴う内空断面の縮小（数 mm/年）といった変状が観測され、裏込注入工、ロックボルト打設、ストラット補強等の対策工が段階的に実施されている。これらの変状はトンネル周辺地山の塑性化（塑性圧の作用）によるものと考えられており、塑性圧を考慮した梁ばねモデル、周辺地山の塑性化を取り扱った地山劣化モデルを検証する目的で解析に適用することとした。

トンネルの地質は、新第三紀中新世の緑色凝灰岩と同時期に貫入した流紋岩が主体であり、一部蛇紋岩と頁岩の区間が存在する。この緑色凝灰岩は、膨潤性粘土鉱物であるモンモリロナイトを多量に含んでおり、浸水崩壊度試験においても浸水崩壊度D（原形を留めない）を示し、脆弱化、粘土化しやすい岩盤である。

また、変状の著しい区間では、側壁からアーチ肩部にかけて水平ひび割れが多数発生しており、天端に圧ざが観測されている。変状原因としては、ひび割れや圧ざ、内空の縮小等の変状状況、変状区間の地山強度比(1.6～1.9)、トンネルの断面形状（側壁直）から、トンネル周辺の地山が塑性化し、卓越した塑性圧が作用したためと推定される。

(2) 対策工の実施

変状発生区間のトンネルの構造的な原因としては、インバート無、側壁直の断面形状、施工当時の技術的な問題による巻厚不足等がある。数 mm/年を超えるような卓越した内空変位が確認された区間では、変位の抑制を目的とした対策工として、まず裏込注入工+側壁部ロックボルトがなされた。しかし、一部では内空変位速度が十分に抑制できなかったため、アーチ部ロックボルト+ストラットを追加して対応を図っている。これにより、全体的に内空変位速度が大幅に抑制された。

3.2 変状進展のシミュレーション解析

段階的に対策工 A、対策工 B が実施された断面形状が側壁直の区間に対して、梁ばねモデル・地山劣化モデルを適用して変状状況のシミュレーション解析を行った。

(1) 解析モデル

対象区間のトンネル構造および地質状況から、覆工および地山の基本的な入力物性値を表 3 のように設定した。

表 2 六十里越トンネル諸元

建設時期	1966 年 8 月～1970 年 9 月
延長	6359m
断面形状	単線 2 号型 側壁直区間 1542m 馬蹄形区間 4817m
構造	コンクリート造り 巻厚 23～45 cm 一部インバート有り
掘削	全断面工法 5849m 底設導坑先進掘削工法 510m
地形・地質	新第三紀中新世の緑色凝灰岩、凝灰角礫岩および同時期に貫入した流紋岩などからなる。 最大土被りは 680m で変状箇所 の土被りは 300m を越える。
地山強度比	1.6～1.9
構造欠陥	天端外側に背面空洞

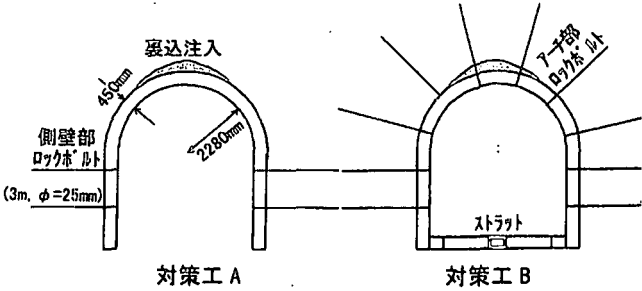


図 5 段階的に実施された対策工

表 3 基本的な入力物性値

覆工巻厚	t = 450mm
弾性係数	E _c = 2.1 × 10 ⁴ N/mm ²
単位体積重量	γ _c = 23.5 kN/m ³
構造欠陥	天端 60° 範囲に背面空洞
地山	緑色凝灰岩
変形係数	E=500 MPa
地山強度	C=1.3→0.433MPa, φ=30°

六十里越トンネルにおける内空変位の計測結果を図6に示す。図のように測定開始後3年間で継続して顕著な内空変位が計測されたため、4年目の前後に対策工を実施して変位が抑制されている。そこで、地山劣化モデルによる解析では、内空変位速度を平均的な6mm/年として変位の進展をシミュレートした。

一方、梁ばねモデルによる解析では、地圧増加に伴う変位の進展や変位の発生をシミュレートし、実現象の再現性について検討した。

(2)シミュレーション解析結果

本トンネルでは、変状区間の詳細な地山物性値が求められていなかったため、地山劣化モデルではアイダシら⁶⁾、⁷⁾や蔣ら⁸⁾の研究成果を参考に地山のせん断強度を $C=1.3 \rightarrow 0.433\text{MPa}$ と低減させて地山の強度低下を表現した。その結果、無対策の場合は最終的な内空変位が21年で130mm程度となり、実際に発生した顕著な変位を解析で表現できることが確認された。

図6の計測結果から内空変位速度を一定(6mm/年)とすると、解析で得られた変位とせん断強度の関係から経時的なせん断強度の低下は図7のようになる。その結果、せん断強度は初期段階(約5年間)で顕著に低下し、その後は緩やかになることが分かる。よって、地山劣化モデルを適用することで、周辺地山の強度低下に対して合理的に補強の時期を検討することが可能となる。

次に、梁ばねモデル、地山劣化モデルの変状進展シミュレーション解析結果を表4、図8に示す。

梁ばねモデルでは、ひび割れ・圧縮損傷の発生箇所と変状発生時の作用荷重、内空変位が算定される。また、地山劣化モデルでは、ひび割れ・圧縮破壊箇所と経過年数、内空変位が算定され、圧縮破壊後の解析を継続することができる。

変位の発生状況としては、両解析手法とも第1→第2ひび割れとひび割れが進展し、ひび割れ発生箇所において圧縮破壊が発生して実現象に近い変状状況が再現されている。また、「梁ばねモデル：第1ひび割れ」、「地山劣化モデル：第2ひび割れ・第2圧縮破壊」と両解析手法とも側壁部で変位が生じた後に内空変位が増大しており、側壁直の断面形状において発生しやすい構造上の問題が解析で再現されている。

表4 シミュレーション解析結果

(a)梁ばねモデル				
変状ステップ	地圧 P(kN/m ²)	内空変位 u(mm)	変形性 u/P(10 ⁻³ m ³ /kN)	
1第1ひび割れ 側壁	41.00	2.26	0.06	
2第2ひび割れ 天端	56.00	6.68	0.29	
3第1圧縮損傷 側壁	65.00	9.64	0.33	

(b)地山劣化モデル				
変状ステップ	経過年数 t(年)	内空変位 u(mm)	内空変位速度 u/t(mm/年)	
1第1ひび割れ 天端	1.30	7.78	6.00	
2第2ひび割れ 側壁	2.54	15.25	6.01	
3第1圧縮破壊 天端	7.62	45.70	6.00	
4第2圧縮破壊 側壁	10.13	60.76	5.98	
5最終地山劣化	21.77	130.60	5.99	

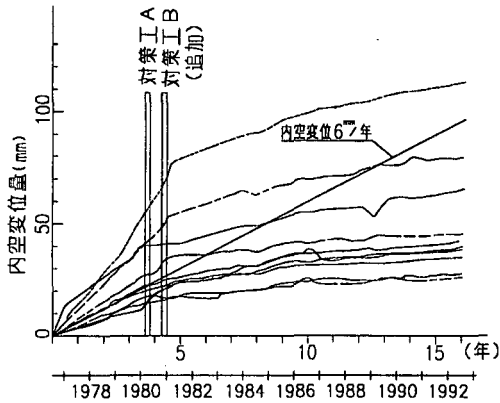


図6 内空変位計測結果⁵⁾

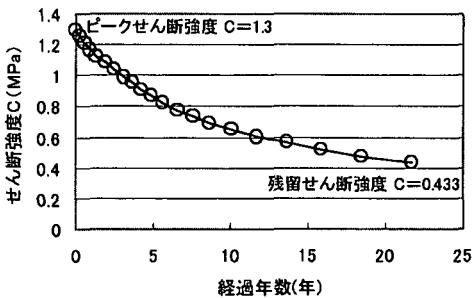


図7 地山劣化モデルにおける経年劣化の状況

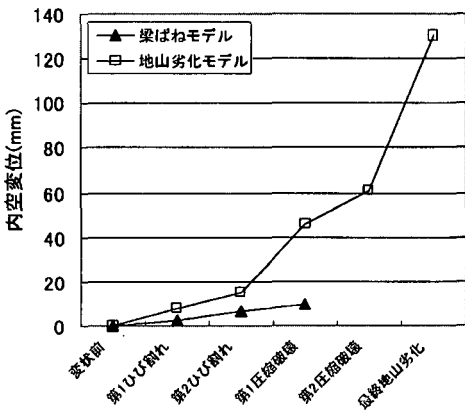


図8 変位の進展と内空変位の発生

両解析手法とも、実際に確認された内空変位モードやひび割れ、圧縮箇所等がほぼ一致していることから、現状での変状のシミュレーションや将来的な進展の予測に対しては適用性があることが確認できた。また、両解析手法の相違点として内空変位に大きな差が生じた。特に第2ひび割れ以降の変位量には大差があり、圧縮破壊に対する評価や覆工と地盤の相互作用に関するモデル化の違いが大きく表れる結果となった。

3.3 変状対策工の比較解析

(1) 対策工モデル

対策工解析では、各対策工の補強効果を評価するために、実際に施工された4工種を段階的に組み合わせて解析ケースを表5のように設定した。これにより、採用された対策工の補強効果を解析で表現できるかを検証した。各対策工については、下表のように実際に施工された部材に準拠して設計値を定めてモデル化を行った。

表 6 解析手法における対策工のモデル化

対策工種	設計値	梁ばねモデル	地山劣化モデル
裏込注入工	—	背面空洞箇所の覆工背面において地圧と地盤ばねを復元	背面空洞箇所（インターフェイス要素）に地山要素を設置
ロックボルト	$E=2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $L=3\text{m}$, $\phi=25\text{mm}$	弾性係数・長さ・径から算出したばねを設置	設計値に準じたケーブル要素を設置
ストラット	$E=2.1 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, $t=450\text{mm}$	コンクリートの変形係数・巻厚から算出したばねを覆工脚部内側に設置	コンクリートの変形係数を反映した要素を設置

(2) 対策工の比較解析結果

1) 比較解析結果

対策工施工時に確認された変状状況から、地山劣化モデルでは天端に圧縮破壊が発生した時点で対策工をモデル化して解析を行った。また、梁ばねモデルでは圧縮損傷発生後を解析で取り扱うことができないため、側壁と天端にひび割れが発生した後で対策工をモデル化した。

対策工モデルの解析結果として、梁ばねモデルで得られた地圧—内空変位の関係を図9、地山劣化モデルで得られた経過年数—内空変位の関係を図10に示す。

対策工モデルの解析結果を内空変位抑制の観点で考えると、梁ばねモデルでは地圧に対する変形性（ w/p ）、地山劣化モデルでは内空変位速度（ w/t ）で評価することができる。梁ばねモデルでは、対策工を設定することで変形性 w/p が抑制されており、地圧の増加に対する内空変位の増大が軽減されることが確認できる。また、地山劣化モデルでは、対策工による内空変位速度 w/t の軽減傾向が確認できる。一般に変状の進行性が確認されているトンネルでは内空変位速度が管理指標となることから、対策工の実施時期を検討する場合には地山劣化モデルの適用性が高いと言える。

表 5 解析ケース

解析ケース	対策工の組み合わせ	備考
無対策	無	
対策工Ⅰ	裏込注入	
対策工Ⅱ	裏込注入＋側壁RB	対策工A
対策工Ⅲ	裏込注入＋全周RB	
対策工Ⅳ	裏込注入＋全周RB＋ストラット	対策工B

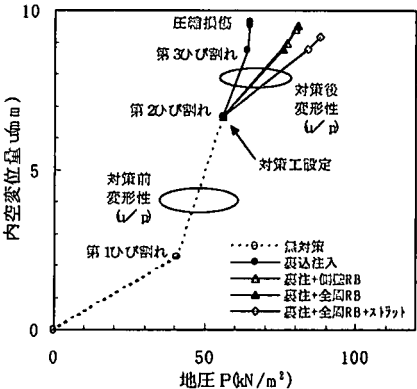


図 9 梁ばねモデルによる対策工解析結果

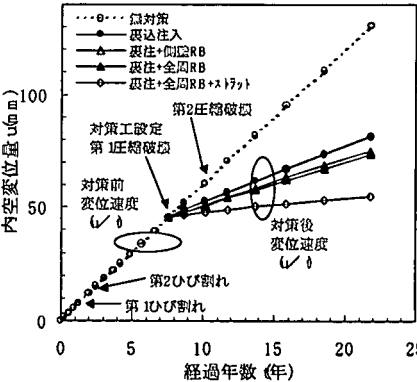


図 10 地山劣化モデルによる対策工解析結果

2) 対策工ごとの変位抑制効果の評価

六十里越トンネルのように、変状トンネルでは一般に内空変位速度で変状の進行が管理されていることが多い。したがって、地山劣化モデルを適用した内空変位速度 (u/t) で対策工の効果を検討することが有効と言える。しかしながら、梁ばねモデルについても、比較的簡易な手法として取り扱うことができるため、実務への適用性が期待される。そこで、梁ばねモデルの変形性 (u/p) による対策効果の評価を、地山劣化モデルの内空変位速度 (u/t) による評価と比較し、対策工設計への適用性について検証した。

変状対策工に関する実績分析やモデル実験、数値解析等の既往の研究から、変状トンネルの地圧—変位関係と変位—時間関係には図 3 に示した相関性があると考えられている。そこで、両解析手法で得られる変位勾配を用いて対策効果の比較を行うこととした。ここでは、両解析手法の対策効果として「梁ばねモデル：対策前後の変形性 (u/p)」、「地山劣化モデル：対策前後の内空変位速度 (u/t)」を指標とし、解析を実施した対策工ごとの変位抑制効果について比較した。

解析で得られた各対策工の内空変位抑制効果を図 11 に示す。ここで、図中の変形性比は梁ばねモデルで算定された対策後の変形性 u/p の低減比率を示し、内空変位速度比は地山劣化モデルで算定された対策後の内空変位速度 u/t の低減比率を示している。したがって、ここでは変形性比、内空変位速度比ともに値が小さい方が対策工による効果が大いこととなる。

両解析手法とも、側壁部ロックボルト、ストラットを追加した段階で内空変位の抑制効果が現れており、アーチ部ロックボルトを追加しても顕著な効果が得られていない。このように、4 段階で対策工を追加する比較解析を実施した結果、両解析手法とも効果的な対策工は一致する結果となった。

同様に変形性比と内空変位速度比を用いて、実際に変状対策工として採用された対策工 A（裏込注入工+側壁部ロックボルト）と対策工 B（裏込注入工+全周ロックボルト+ストラット）について、解析結果と計測結果を図 12 のように比較した。このように、対策工 A では解析で得られた対策効果がやや大きく評価されているものの、対策工 B では内空変位の抑制効果が実際の計測値に近い結果となっている。

以上、両解析手法では効果的な対策工が一致し、ともに実際の計測値に近い内空変位の抑制効果が算定された。したがって、両解析手法ともに、対策工の比較検討に対して適用性が高いことが確認された。

また、簡易な手法の梁ばねモデルでは、対策工の比較検討において変形性 (u/p) による評価を行うこととなるが、上記検討結果から便宜上対策による内空変位速度 (u/t) の抑制効果に置き換えて評価できるものと考えられる。

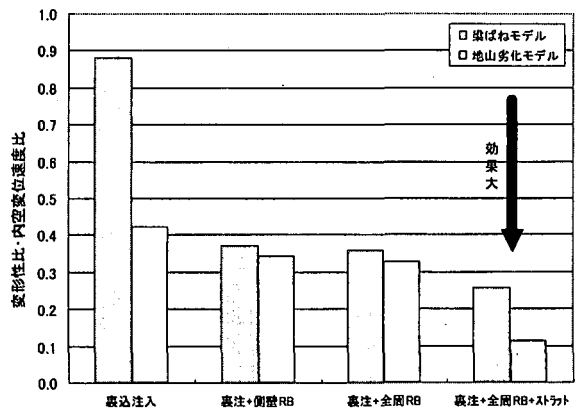


図 11 解析による各対策工の変位抑制効果

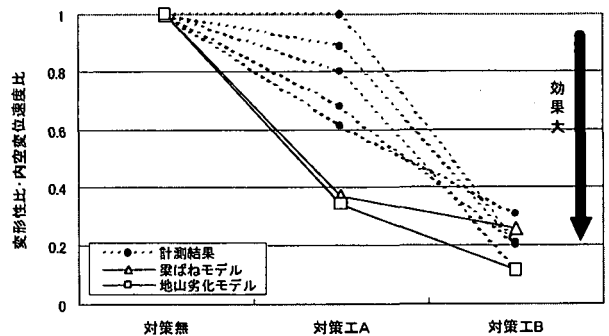


図 12 計測結果と解析結果の比較

4. まとめ

筆者らが梁ばねモデルを用いて提案した解析による変状の進展予測や対策効果の定量的評価に、更に地山の時間依存性を考慮した変状対策工の解析手法として地山劣化モデルについて検討した。今回の検討では、梁ばねモデルと地山劣化モデルを実際の変状トンネルに適用し、変状状況のシミュレーションおよび対策工の比較解析を行った。その結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 実際の変状トンネルを想定して解析を行い、両解析手法とも実際に近い変状状況（内空変位モードやひび割れ発生箇所など）およびその進展を表現することができた。
- (2) 対策工モデルによる比較解析において、両解析手法とも実際に採用された対策工の内空変位に対する抑制効果を評価することができた。
- (3) 内空変位速度の計測結果が得られていれば、地山劣化モデルを適用することで内空変位の将来予測や対策工による内空変位の抑制効果が定量的に評価できることが確認された。
- (4) 梁ばねモデルには経時変化を扱えない、実際よりも変位が小さいといった課題もあるが、変位勾配による対策効果の評価を導入することで変状原因の推定や対策工の比較検討等に適用できることが確認された。

今後の研究課題として、地山劣化モデルについては初期地圧や地山強度等による影響を整理し、適用範囲に関する検討を進めていくことを計画している。また、梁ばねモデルについては、圧縮損傷の評価や変位量の取り扱い等の課題に関して検討を進めていく予定である。

なお、本検討は土木学会岩盤力学委員会トンネル変状メカニズム研究小委員会における活動の一環として実施したものであり、多くの知見を与えていただいた委員の方々に感謝の意を表します。また、計測データの使用をご快諾頂きました JR 東日本構造技術センターの関係各位に感謝の意を表します。

5. 参考文献

- 1) 朝倉俊弘, 小島芳之, 佐藤 豊, 三谷浩二, 松長 剛: 変状トンネル覆工対策工の効果に関する比較解析, トンネル工学研究発表会論文・報告集 第5巻, pp.205 - 210, 1996.
- 2) 鉄道総合技術研究所: 変状トンネル対策工設計マニュアル, pp.213 - 227, 1998.
- 3) 熊坂博夫, 朝倉俊弘, 小島芳之, 松長 剛: 地山の時間依存性を考慮したトンネル変状解析手法の適用性に関する検討, 岩盤力学に関するシンポジウム(投稿中), 2003.
- 4) 吉川恵也, 北川修三, 川上義輝, 馬場富雄: トンネルの変状傾向(2), 鉄道技術研究報告 No.1293, pp.24 - 31, 1985.
- 5) 野澤伸一郎, 伊藤忠八, 竹内定行: 既設トンネルの膨圧を克服—只見線六十里越・田子倉トンネル—, トンネルと地下 第23巻 第10号, pp.17 - 22, 1992.
- 6) 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.
- 7) 赤木知之, アイダンオメール, 伊東 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.