

Ⅲ-B81 変状トンネル対策工の骨組解析によるシミュレーション

パシフィックコンサルタンツ 正員 松長 剛*
 鉄道総合技術研究所 正員 朝倉俊弘**
 同 上 正員 小島芳之**
 同 上 正員 佐藤 豊**
 日本道路公団 試験研究所 正員 三谷浩二***

1. まえがき

現在供用中の鉄道・道路トンネルでは、材料劣化や地圧等の外力により覆工にひび割れ等の変状が生じているものがあり、これらの中には対策を要するものも少なくない。従来、変状トンネルの対策工設計は経験的な判断に基づいて行われることが多く、対象とする覆工に発生している応力状態等を力学的に評価し、設計に反映している事例は極めて少ない。筆者らは覆工の力学的健全度の評価および変状トンネル対策工の設計法の確立を目的として、模型実験及び数値解析によって覆工の力学挙動の検討を進めている¹⁾。本報告は、実際のトンネルに発生している変状を骨組解析を用いてシミュレートし、ひび割れの発生から進展及び構造破壊に至るまでを数値解析によって追従するものである。

2. 解析手法

ひび割れの発生、進展を考慮した解析手法²⁾によって変状トンネルをモデル化し、解析を進めた。このひび割れ進展解析の解析フローを図-1に示す。図に示すように、ひび割れ進展解析では断面力によってひび割れの発生を評価し、ひび割れ発生段階（解析ステップ）ごとに構造モデルを設定して覆工部材が構造破壊に至るまで繰り返し計算を行う。ひび割れは安全側を考慮してピン結合によってモデル化し、その進展については各解析ステップでの断面力、変位等の計算結果を重ね合わせることで表現する。また、覆工の圧縮側縁ひずみが限界ひずみ量（ 3500μ ）に達した時点を押縮損傷（解析上の構造破壊）と定義し、覆工構造の外力に抵抗しうる能力として圧縮損傷発生時に覆工に作用している地圧を構造耐力としている。

3. 解析に適用したトンネル（六十里越トンネル）

福島県会津若松と新潟県小出を結ぶJR只見線のルート上にある六十里越トンネルでは、側壁の内空への押し出しやひび割れ等の変状が生じ、段階的に対策工を施工している。変状区間の地質は緑色凝灰岩が主体であり、発生原因は耐力以上の塑性圧が作用したためと推定される。また、トンネル覆工の構造的な要因として、側壁直、インバート無等がある。

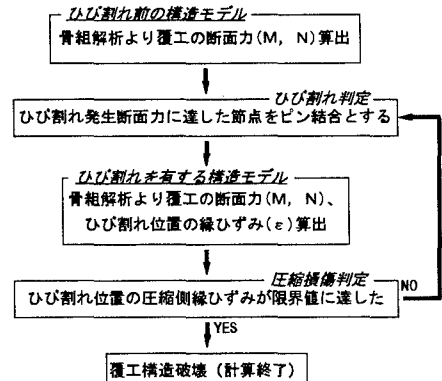


図-1 ひび割れ進展解析フロー

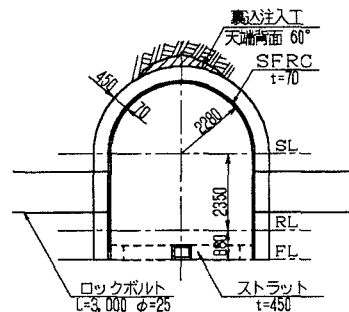


図-2 六十里越トンネル対策工断面図

変状トンネル 骨組解析 覆工耐力 ひび割れ 圧縮損傷

*	〒163-07	新宿区西新宿 2-7-1	TEL 03-3344-1903	FAX 03-3344-1906
**	〒185	国分寺市光町 2-8-38	TEL 0425-73-7266	FAX 0425-73-7248
***	〒194	町田市忠生 1-4-1	TEL 0427-91-1621	FAX 0427-91-3717

4. 解析条件

解析では、六十里越トンネルの現況を忠実にモデル化し、変状の進展や対策工の効果を力学的に評価するものとする。対策工の解析ケースは補強程度（ランク）に応じて以下の4パターンを組み合わせ設定する。

- 裏込注入工：背面空洞範囲への注入を想定している。
- ロックボルト：鋼材の弾性係数から算出したバネを設置する。
- 内面補強工：SFRCの代替として炭素繊維シート接着を想定し、ひび割れをピン結合→剛結としてモデル化する。
- ストラット：コンクリートストラットを想定し、コンクリートの変形係数から算出したバネを覆工脚部内側に設置する。

5. 解析結果

無対策ケースでは「①側壁部内面ひび割れ→②天端背面ひび割れ→③アーチ肩部背面ひび割れ、④側壁部背面圧縮損傷（計算終了）」と変状が進展した。実際に六十里越トンネルでは側壁部にひび割れが発生しており、解析で同じ状況をシミュレートすることができた。また、覆工背面の変状については実際に確認していないが、解析結果から六十里越トンネルでは天端背面にひび割れの存在が予想される。

これらの結果を踏まえ、対策工施工時の変状状況を想定し、天端背面ひび割れ後に対策工断面を設定して対策工ケースでの解析を行った。その結果を覆工に作用する荷重（地圧）と変位（側壁部内空変位、天端背面への押し出し）によって図-3に示す。図のように、対策工を設定すると覆工構造全体の剛性が向上している。特に内面補強工、ストラットによる効果が卓越しており、構造の耐力増加が顕著に表れている。

6. まとめ

ひび割れ進展を考慮した骨組解析によりトンネルの変状をシミュレートし、更に対策工効果に関する比較解析を実施した。その結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 実際の変状トンネルを想定して解析を行い、変状状況をシミュレートできた。
- (2) 本解析手法により、対策工の効果を構造の耐力増加、剛性増加等で力学的に評価することができた。
- (3) 六十里越トンネルでは裏込注入、ロックボルト、SFRC→ストラットと段階的に対策工を実施し、ストラット施工時に変状が顕著に抑制された。解析においてもストラット設定段階で顕著な耐力増加となり、実際に近い傾向が表れている。

以上の結果から、本解析手法により覆工の変状状況及び対策工による効果を力学的に評価することができると判断された。ただし、本解析手法ではクリープや周辺地山のゆるみを考慮できないため、変位が実測値よりもかなり小さい。これらの条件の解析への適用については今後の課題といえる。

【参考文献】

- 1) 朝倉俊之、小島芳之、安東豊弘、佐藤 豊、松浦章夫：トンネル覆工の力学的挙動に関する基礎的研究、土木学会論文集、No.493/Ⅲ-27、1994.6
- 2) 松岡 茂、益田彰久、松尾庄二、柳 博文：ひび割れを考慮したトンネル覆工解析に関する研究、土木学会論文集、No.554/Ⅲ-37、1996.12

表-1 解析条件

構造	覆工巻厚	45 cm
	欠陥	天端 60° 範囲に背面空洞
地盤	地山	緑色凝灰岩
	変形係数	5000 kgf/cm ²
	地圧	塑性圧（水平地圧としてモデル化）

表-2 解析ケース

解析ケース	対 策 工
無対策	無
対策工Ⅰ	裏込注入工
対策工Ⅱ	裏込注入工+ロックボルト
対策工Ⅲ	裏込注入工+ロックボルト+内面補強工
対策工Ⅳ	裏込注入工+ロックボルト+内面補強工+ストラット

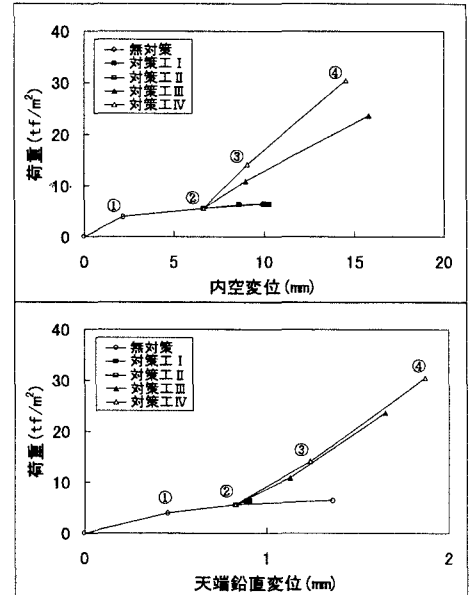


図-3 対策効果（荷重-変位関係）