

変状トンネル覆工対策工の効果に関する比較解析

COMPARATIVE ANALYSIS FOR DEFORMED TUNNEL LINING COUNTERMEASURE EFFECT

朝倉俊弘*・小島芳之*・佐藤 豊*・三谷浩二**・松長 剛***

Toshihiro ASAKURA, Yoshiyuki KOJIMA, Yutaka SATO, Kouji MITANI, Takeshi MATSUNAGA

To clarify the deformed tunnel lining that has various countermeasures such as rock bolting, back-filling, inner reinforcing and etc., numerical analysis were carried out. Tunnel lining performance after cracking is estimated by frame analysis with assumed crack section stress flow. In the analysis, constant vertical and horizontal earth pressures were assumed and tunnel is being double truck tunnel. Consequently, estimation of deformed lining capacity with all countermeasures were successfully performed, and the increased capacity of the linings are discussed in this paper.

Keywords : deformed tunnel, frame analysis, lining capacity

1. まえがき

現在供用中の鉄道・道路トンネルでは、材料劣化や土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。トンネルの変状対策にあたっては変状原因と健全度に応じて適切な対策工を選定し、設計することが重要である。従来、トンネル覆工の変状対策工の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の力学的評価を設計に反映している事例は極めて少ない。これは、ひび割れが発生したトンネル覆工の力学的挙動を、解析により適切に把握することが困難であったことなどのためである。

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、覆工模型実験及び骨組解析等による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⁾²⁾。本研究は、その一環として変状トンネル対策工の解析的設計法を確立するためにひび割れを考慮した骨組解析手法を用いてパラメータ解析を行い、土圧形態の異なる変状トンネルに各種対策工を施した場合の効果について比較検討を行ったものである。なお、本解析では変状トンネル覆工の挙動を支配すると考えられるひび割れ断面をモデル化する手法³⁾を参考とし、ひび割れの発生および進展を表現することで変状トンネルの挙動を追跡した。

* 正会員 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部
** 正会員 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室
*** 正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) トンネル部

2. 解析方法

2.1 ひび割れの進展を考慮した骨組解析手法

本研究では、変状トンネルを想定してひび割れが発生した無筋コンクリート部材をモデル化し、ひび割れ発生およびその進展を考慮した骨組解析（以降、ひび割れ進展解析）を行っている。図1にひび割れ進展解析の解析フローを示す。

解析フローに示すように、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圧縮ひずみ限界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、ひび割れの進展については構造モデルにピン結合を設定して計算を継続し、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ものとする。

対策工解析については、対策工を施す変状段階（解析ステップ）を設定し、その解析ステップで構造モデルに対策工断面にすることで表現するものとする。そして対策後の解析ステップを対策工断面で計算し、無対策と各対策工について比較検討を行うものとする。

図1に示すような覆工部材の破壊判定を行うためには、ひび割れ発生断面力とひび割れ後の変形挙動を求める必要がある。本解析におけるひび割れ断面のモデル化については松岡ら³⁾の方法によった。松岡らはひび割れ断面におけるひずみ分布・応力－ひずみ関係を定め、また部材の引張側縁応力が引張強度に達した時点を部材のひび割れ発生と見なしている。この仮定により算出されるひび割れ発生断面力の概念図を図2に示す。骨組解析では、各解析ステップにおける結果を重ね合わせた断面力（曲げモーメント M 、軸力 N ）によって、ひび割れの発生を評価する。

また、松岡らはひび割れ発生後の変形挙動のモデル化に際し、等価塑性ヒンジ長という概念を導入している。すなわち、等価塑性ヒンジ長における部材の変形角はひび割れ開口によって生じるひび割れ面の回転角と等しくなる、という仮定である。この仮定から覆工部材の圧縮側縁ひずみとひび割れ回転角の関係を求め、ひび割れ断面における応力－ひずみ関係へ導入して、部材回転角と断面力の関係を算定する。このようにして算定したひび割れ後の変形挙動を用いて、圧縮側縁ひずみが限界ひずみ量（ $3500\ \mu$ ）に達した時を圧縮ひずみ限界（回転角限界）と設定している。ひび割れ発生後のひび割れ断面における変形挙動の概念図を図3に示す。このようにひび割れ後の変形挙動は軸力に依存し、軸力が小さいほど回転角の限界値が大きくなる。この関係を用いて、骨組解析で得られる断面力、回転角から圧縮ひずみ限界の評価を行う。

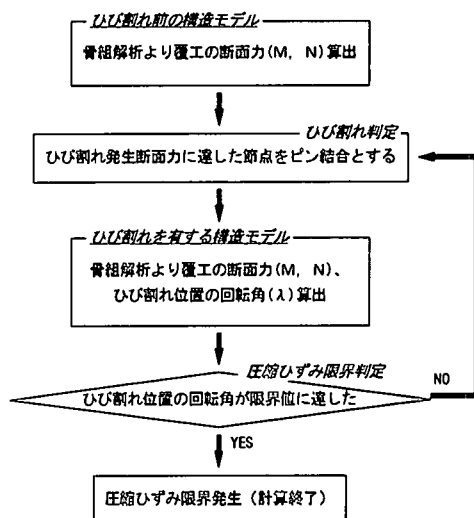


図1 ひび割れ進展解析フロー

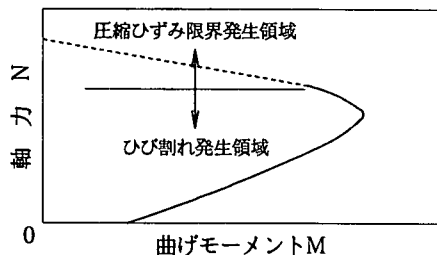


図2 ひび割れ発生断面力

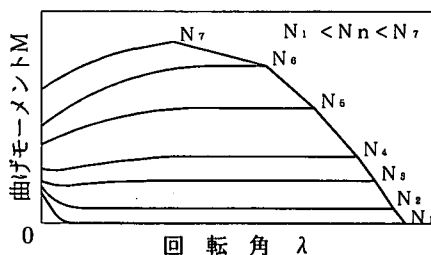


図3 ひび割れ発生後の変形挙動
(圧縮ひずみ限界発生回転角)

2.2 解析モデル

(a)トンネル覆工モデル

軟岩地山中の新幹線標準断面トンネル（高速道路2車線断面とほぼ同等）の覆工に変状が発生する場合を想定して、トンネル覆工モデルを作成する。なお、天端60°範囲に背面空洞を想定する解析ケースでは、土圧および地盤ばねを作用させないことで空洞をモデル化する。覆工モデルの諸元を表1、モデル図を図4に示す。

覆工に作用する土圧形態としては、図5に示すような鉛直土圧モデル、水平土圧モデルを設定する。

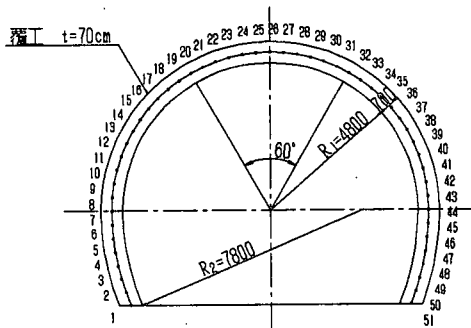


図4 トンネル覆工モデル

表1 覆工モデル諸元		
構造条件	設計基準強度	180 kgf/cm ²
	引張強度	18.5 kgf/cm ²
	覆工巻厚	70 cm
	弾性係数	2.1×10 ⁵ kgf/cm ²
	単位体積重量	2.35 tf/m ³
地盤条件	弾性係数	5000 kgf/cm ²

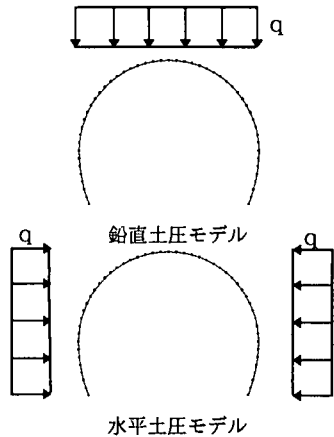


図5 土圧形態概略図

(b)対策工モデル

対策工としては裏込注入工、ロックボルト、内巻工、内面補強工、インバートを選定し、それぞれ既往の対策実績より一般的な諸元を設定してモデル化した。

①裏込注入工

・背面空洞範囲に注入するものとし、土圧と地盤ばねを考慮することで表現する。

②ロックボルト

- ・先端固定のボルトとし、弾性係数より算出したばねによってモデル化する。
- ・ボルトの耐力は18tfとし、ボルトの引張力が耐力を超えた場合にはばね値を変えて耐力低下を考慮する。
- ・ロックボルト打設位置の節点内側から、荷重としてプレストレス10tfを想定する。

③内巻工

- ・重ね梁でモデル化し、覆工と内巻部材の間は圧縮のみを伝達するものとする。
- ・内巻工として内巻コンクリート、内巻コンクリート+セトル補強を設定する。セトル部材は鋼製支保工（H-125）を想定する。
- ・内巻コンクリートはひび割れを考慮し、ピン結合とする。
- ・セトルのピッチは1mとする。

表2 ロックボルトモデル諸元

材質	STD52（ねじり棒鋼）
長さ	4.0 m
呼び径	TD24
打設範囲	鉛直：天端4本，水平：S.L.左右4本
ばね値	1.85×10 ⁴ kgf/cm

表3 内巻工モデル諸元

内巻工種	内巻コンクリート	内巻コンクリート+セトル
部材	コンクリート	コンクリート，H-125
内巻工巻厚	12.5 cm	12.5 cm
曲げ剛性	コンクリート	コンクリートとセトルの合成
ひび割れ	ピン結合でモデル化	考慮しない

④内面補強工

- ・覆工内側ひび割れを包含する範囲に設置し、ひび割れ箇所のピン結合を剛結とすることでモデル化する。
- ・内面補強工として炭素繊維シート接着、鋼板接着を設定する。
- ・補強覆工の耐力はコンクリートの圧縮ひずみ限界と補強工の降伏強度で判定する。
- ・覆工外側ひび割れは無筋コンクリートと同様に計算する。

表4 内面補強工モデル諸元

補強工種	炭素繊維シート接着	鋼板接着
部材厚	0.165 mm × 2 層	4.5 mm
弾性係数	$2.35 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$	$2.10 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
引張強度	35500 kgf/cm ²	2500 kgf/cm ²
降伏後特性	応力を保持しない	応力を保持

⑤インバート

- ・水平土圧、背面空洞有のケースでのみ解析を行う。
- ・弾性係数、部材厚より算出したばねでモデル化する。
- ・ばねはインバート軸線方向（インバートR=16 m）に設置する。

表5 インバートモデル諸元

弾性係数	$2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
インバート巻厚	50 cm

3. 解析結果

土圧形態、背面空洞の有無の組合せで3ケースの対策工解析を行い、対策効果を比較検討した。トンネルの変状調査では覆工内側のひび割れしか確認できないことを想定し、対策工解析では内側ひび割れが発生する段階で対策工を設定した。

対策工による補強効果の評価は、覆工の圧縮ひずみ限界が発生する時の作用土圧（耐力）と変位で行った。耐力については無対策覆工の耐力に対する耐力増加率を算出し、変位については圧縮ひずみ限界が発生する時の変位 u を耐力 q で除した u/q を算出して対策効果を比較した。

3.1「鉛直土圧、背面空洞無」における対策工解析結果

このケースの無対策覆工は、まず天端内側にひび割れが発生し、ひび割れが進展せずに天端外側で圧縮ひずみ限界が発生する破壊形態となる。ロックボルト、内巻工についても同様の破壊形態となるが、内面補強工ではアーチ肩部外側にひび割れが進展し、そこで圧縮ひずみ限界が発生する破壊形態となる。

各対策工を耐力増加率で評価すると、内面補強工の対策効果が卓越している。これは、内面補強工がひび割れの開口に対して引張部材として作用することによると考えられる。また、 u/q の抑制効果にも同様の傾向が表れており、内面補強工がひび割れの開口を軽減することで天端沈下が抑えられている。

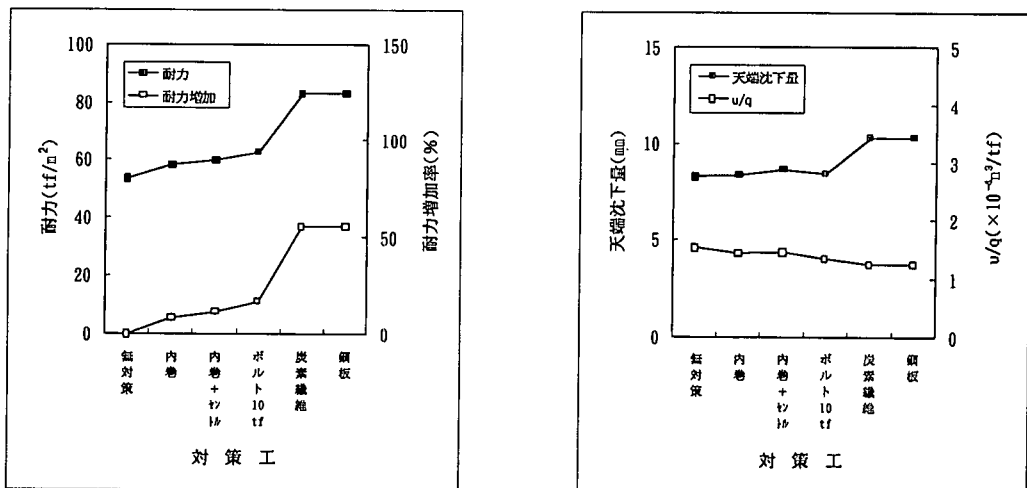


図6 「鉛直土圧、背面空洞無」における対策効果

3.2「水平土圧、背面空洞無」における対策工解析結果

このケースではまず SL 部内側にひび割れが発生し、鉛直土圧と同様にひび割れが進展せずに圧縮ひずみ限界に至っている。

各対策工を耐力増加率、SL 部水平変位についての u/q の抑制効果で評価すると、鉛直土圧と同じ傾向となっている。これらの結果から、覆工内側に発生したひび割れに対しては引張部材として作用する内面補強工が最も効果的であり、ひび割れの開口を抑制することでトンネル構造全体の耐力増加、ひび割れ箇所での u/q の抑制が期待できると考えられる。

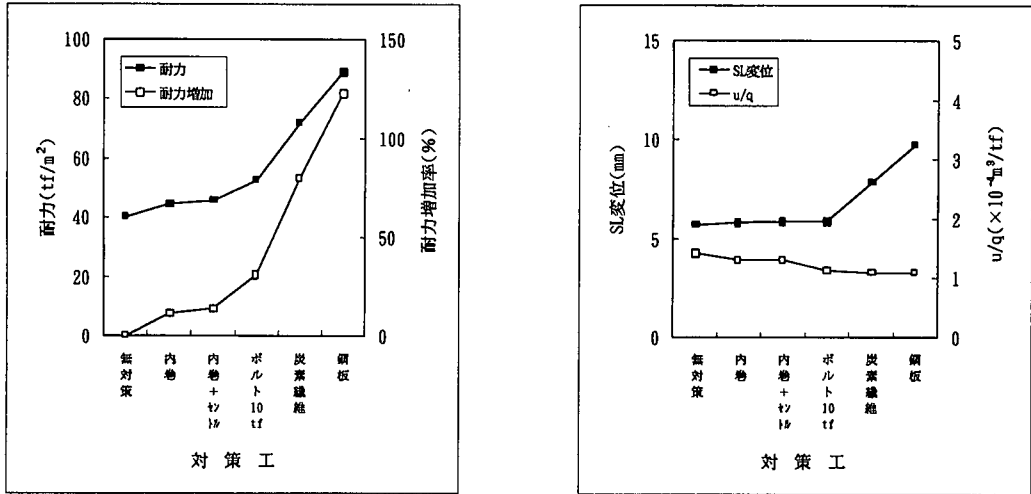


図7 「水平土圧、背面空洞無」における対策効果

3.3「水平土圧、背面空洞有」における対策工解析結果

このケースでは天端外側に背面空洞を想定しているため、まず天端背面にひび割れが発生し、SL 部内側、アーチ肩部内側へとひび割れが進展して、天端内側が圧縮ひずみ限界に至る破壊形態となっている。そこで、SL 部内側にひび割れが発生する段階で対策工を設定し、対策工解析を行った。

対策工解析では裏込注入工の対策工モデルを設定し、裏込注入工との組合せによる対策効果についても検討した。また、「背面空洞無」よりも顕著な変状が見られることから、補強ランクとして最も大きいと考えられるインバート施工についても解析を行った。

各対策工の耐力増加率を比較すると、裏込注入工の対策効果が顕著に表れている。また、他の対策工については単独では十分な補強効果が得られず、裏込注入工と組合せることによって比較的效果を発揮している。裏込注入工と組合せた対策工では、「背面空洞無」の場合と同じような傾向の対策効果が表れている。

単独の対策工ではロックボルトの効果が比較的大きく、次いでインバートの効果が大きい。また「背面空洞無」では顕著な対策効果が見られた内面補強工の耐力は小さく、覆工背面のひび割れにはあまり効果が期待できないと考えられる。

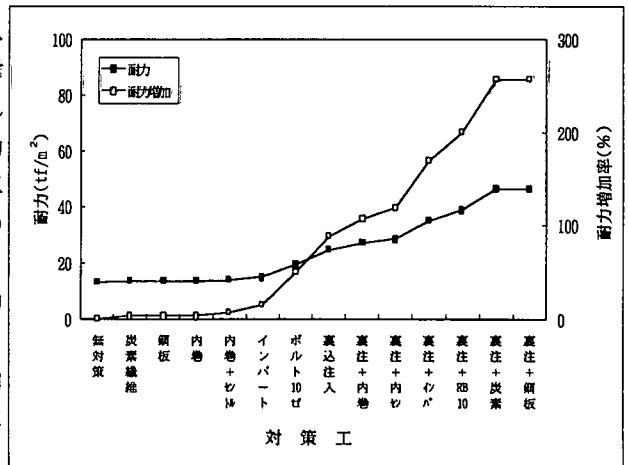


図8 「背面空洞有」における耐力改善効果

SL部水平変位についての u/q の抑制効果においても、裏込注入工の効果が表れており、背面空洞を有する変状トンネルでは裏込注入工を前提とした対策工設計を行う必要があるといえる。

「背面空洞有」でのみ設定したインバートを裏込注入工と組合せた場合の u/q の抑制効果は最も大きく、側壁押し等の変形が大きく発生している変状トンネルには適切な対策工であるといえる。

このように、背面空洞を有する変状トンネルでは各対策工の耐力改善効果と u/q の抑制効果が異なる傾向となるため、期待すべき効果によって適切な対策工を選定する必要があると考えられる。

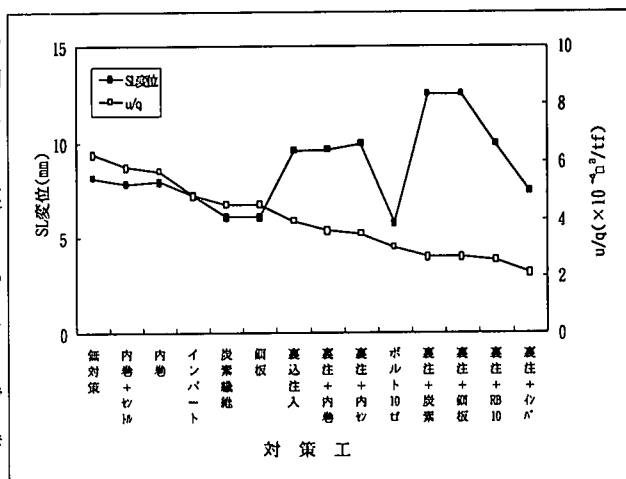


図9 「背面空洞有」における変位抑制効果

4. まとめ

本研究では、ひび割れの発生および進展を考慮した骨組解析により、土圧形態の異なる変状トンネルに各種対策工を施した場合の耐力増加および u/q の抑制効果について比較した。その結果をまとめると次のようになる。

- (1)背面空洞が無い場合には、内巻工の効果もある程度期待できるが、背面空洞がある場合にはほとんど期待できない。
- (2)背面空洞がある場合には、インバート、ロックボルトを除いてどの対策工も補強効果はほとんど期待できない。
- (3)背面空洞の有無が覆工耐力に与える影響が大きく、裏込注入工が非常に有効である。
- (4)内側ひび割れに対しては、ひび割れの開口を直接抑制できる内面補強工の効果が非常に高い。
- (5)背面空洞がある場合ではS.L.変位量が大きく、インバートやロックボルトによる変位抑制効果が高い。

以上の結果から、覆工に作用する土圧形態を推定すれば、本研究の解析手法によって変状対策工の効果を力学的に評価することができるものと判断された。ただし、①ロックボルトの周辺地山補強による土圧の軽減効果や、②インバート閉合による補強効果は今回の解析では十分に考慮されていないものと考えられ、今後検討が必要と考えている。また、変状トンネルに作用する土圧形態の推定法や、設計に用いる際の許容耐力についても検討を行う必要がある。さらに、これらの研究成果は「変状トンネル対策工の設計マニュアル(仮題)」として集約する予定である。

なお、本研究は(財)鉄道総合技術研究所と日本道路公団試験研究所の共同研究の成果の一部をとりまとめたものである。最後に、本研究にご協力頂いた日本道路公団 中田雅博氏、鉄建建設(株) 松岡 茂氏、益田彰久氏、パシフィックコンサルタンツ(株) 小林伸治氏、山本秀樹氏、ショーボンド建設(株) 佐野 正氏、(株)間組 鈴木雅行氏に深甚なる謝意を表する次第である。

5. 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)朝倉俊弘、小島芳之、中田雅弘、若菜和之、松岡 茂：トンネル覆工の力学挙動評価への有限要素法解析の適用性に関する研究、トンネル工学研究発表会論文・報告集第5巻、1995.11
- 3)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(投稿中)