

(15)トンネル覆工のひび割れ進展シミュレーション

(財) 鉄道総合技術研究所	正会員 朝倉俊弘 安東豊弘
東日本旅客鉄道(株)	正会員 小島芳之
(株) 富士総合研究所	正会員 伊東淳 ○山本晃司

Computer Simulation of Crack Propagation Analysis for Tunnel Lining

Toshihiro ASAKURA, Toyohiro ANDO, Railway Technical Research Institute
Yoshiyuki KOJIMA, East Japan Railway Company
Jun ITOH, Koji YAMAMOTO, Fuji Research Institute Corporation

Tunnel lining is not designed so precisely in comparison with other concrete structures and real acting loads are not estimated so clearly. And there is no established standard to estimate soundness and to determine necessity of countermeasures for tunnel lining which has cracks or other kinds of deterioration, especially in case of neighboring constructions. So designers are required to have high ability to carry out technical decision making. In view of these situation, authors have engaged mechanical analysis of tunnel lining behavior with model experiments and computer simulations in order to establish the estimation standard of soundness and design one of countermeasures for the deformed lining.

Mechanical behavior of those linings under various conditions has been clarified by model experiments and considered in the previous papers based on the numerical simulation results with the framework modeling and parameter analysis.

In this paper, a crack propagation analysis using a fiber model is described by comparing with the experimental results of the single and double track tunnel models under various load directions.

1. はじめに

トンネル覆工は、他のコンクリート構造物に比較して厳密な設計がなされておらず、また実際の作用荷重も推定しがたいため、供用中にひび割れ等の変状が発生した場合や、近接工事が計画されている場合の健全度評価、対策工の要否の検討には、確立された手法もなく、高度な技術的判断を要する。このような状況に鑑み、筆者らは覆工の力学的健全度の評価法の確立と、さらに変状トンネル対策工の設計法の確立を目的として、模型実験とそのシミュレーション解析を中心とした力学挙動解析を進めている¹⁾。

既報では、各種条件化における覆工の力学挙動特性を模型実験によって明らかにし、骨組み解析によるシミュレーション結果とパラメータ解析結果を基に考察を加えた^{2),3)}。

本論文では、複線・単線トンネル覆工の載荷位置を変化させた実験を基にファイバーモデルを用いたひび割れの進展シミュレーション結果について述べる。

2. トンネル覆工模型実験

2.1 実験装置

実験装置は複線用と単線用があり、載荷板により直接載荷する立体的な装置である(図-1)。複線用は新幹線標準断面の1/30²⁾、単線用は在来線単線1号型の1/20³⁾の覆工断面を想定している。両装置とも、載荷用部材(載荷板、ばね材(皿ばね)、二重構造の載荷用ボルト)、反力フレーム、側壁脚部ストッパー、脚部沈下機構等からなり、載荷板の内側に覆工(モルタル造)がセットされる。装置の機能・特徴の詳細については、既報^{2),3)}を参照されたい。

2.2 実験ケース

実験は、2次元あるいは3次元モデルで、種々のパラメータで比較実験を行なっている。本論文では、2次元モデルで載荷位置（鉛直、斜め、横）をパラメータとした6ケース（表-1）の実験結果について述べる。これらのケースの側壁脚部固定条件は、インパートの無い場合を想定し可動（覆工に側壁脚部ストッパーのゴム面をセット）とした。

2.3 実験材料

覆工材料のモルタルは、一軸圧縮強度 $\sigma_c = 360 \text{ kgf/cm}^2$ 、変形係数 $E = 1.7 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、法線方向地盤ばねは、皿ばねを10枚重ねで表現し、そのばね定数は $K_1 = 1900 \text{ kgf/cm}$ （変位量0.4mmまでは1100kgf/cm）である。側壁脚部ストッパー（ゴム製）のばね定数は $K_2 = 400 \text{ kgf/cm}$ である。

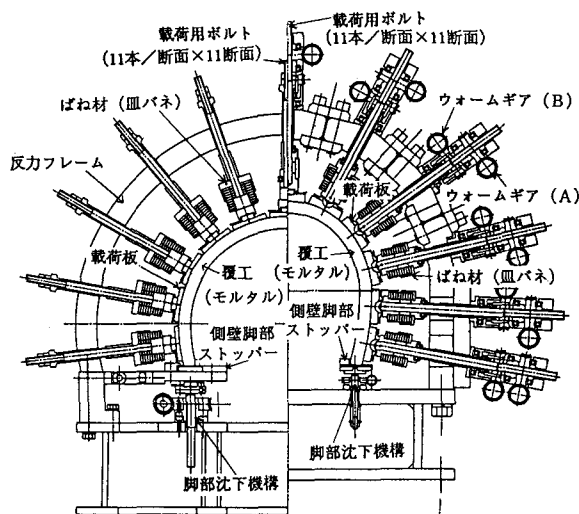


表1 実験ケース

ケース番号	覆工断面	載荷位置
D01	複線	鉛直
D02	複線	斜め
D03	複線	横
S01	単線	鉛直
S02	単線	斜め
S03	単線	横

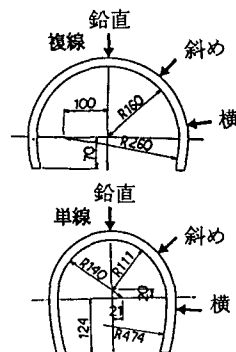


図1 トンネル覆工模型実験装置の概要（断面）

2.4 実験手順

実験は次の手順により行なう。(1)28日間養生した覆工（モルタル）にひずみゲージを貼付後、実験装置にセットし、その外周に載荷板及びばね反力測定用小型ロードセルをセットする。(2)載荷は、変位制御による段階載荷を行う（複線は0.02mm/ステップ、単線は0.04mm/ステップ）。(3)載荷後観察しながら2分間放置し、その後計測データの読み込み（覆工内空変位、覆工壁面ひずみ、載荷重、ばね反力）を行なう。(4)載荷終了は、①覆工模型の終局的破壊（圧さ部の剥落、せん断破壊発生等）、②載荷用ボルトのストローク限界、③載荷重値の設計限界（載荷板1枚で1t・f）のいずれかによるが、今回のケースでは、①により判断した。

2.5 実験結果

実験結果を図-2、図-3に示す。図-2は各ケースのひび割れ進展とそのひび割れの種類、載荷位置の覆工内面の法線方向変位 u が2mmの時の変形状況、図-3は各ケースの載荷重 P と u の関係を示したものである。以下に、実験での覆工挙動と載荷位置をパラメータとした比較結果について述べる。

(1)実験でのひび割れ挙動

初期ひび割れ発生までは覆工は弾性的に挙動し、初期ひび割れ発生後は構造系が変化し、新たなひび割れの発生や初期ひび割れの閉合が見られる。載荷重の増加率はひび割れ進展に伴い若干低下するが、（全体的な構造系としての）剛性は保持される。またひび割れの進展に伴い構造系が変化しながらも、アーチ作用によりかなりの変形量まで耐力を維持する。

(2) 載荷位置の違いによる影響

ひび割れ発生前・発生後を通じて、載荷位置が鉛直に近いほど載荷位置での変形量が小さく、覆工耐力も大きい。また、縦長な形状の単線タイプは、側壁の曲率が小さいため複線タイプに比べ、側圧に対する剛性・耐力が小さい。

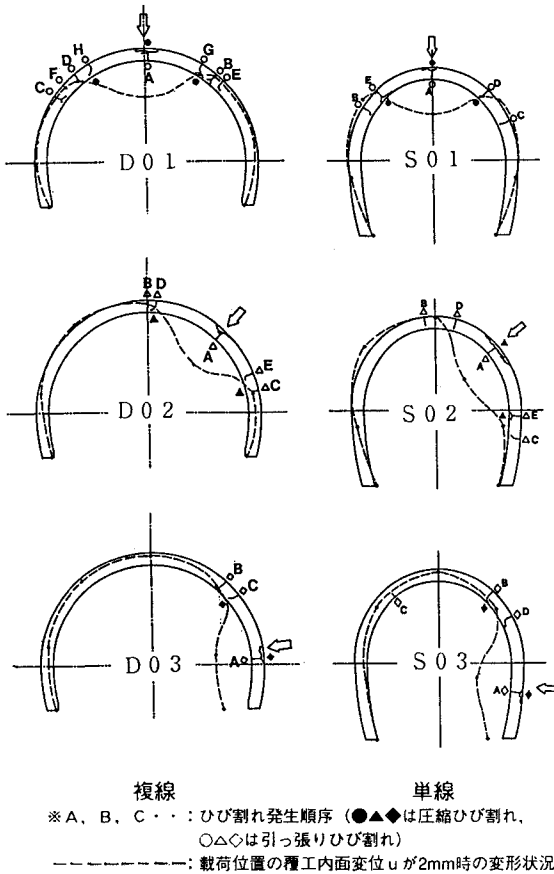


図2 ひび割れ進展および変形状況

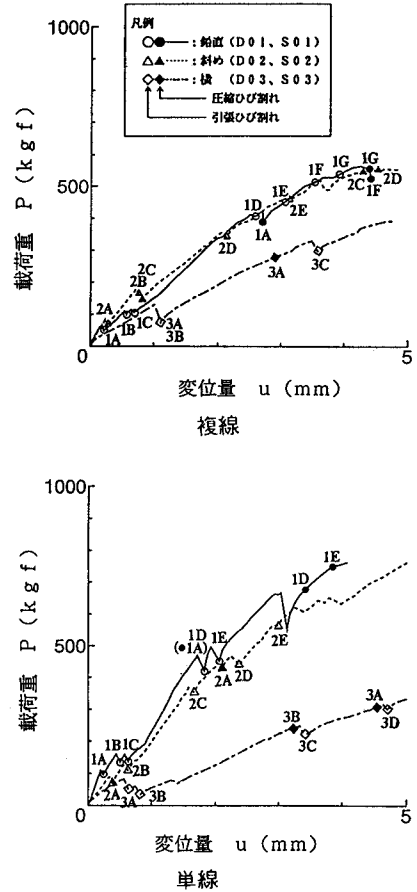


図3 載荷位置の覆工内面変位量と載荷重の関係

3. 数値シミュレーション

3.1 解析手法

覆工コンクリートのひび割れ解析を実施するために、複合部材解析プログラムFBSP-3Dを用いた。本プログラムは、複合部材の断面を有限個のファイバーの組み合わせでモデル化し1つのはり要素とみなすアルゴリズム (ファイバーモデル) にコンクリートのひび割れ処理を組み合わせで解析するものである。

ファイバーモデルでは、要素の断面はファイバーの集まりとして表現され、各ファイバーはそれぞれの断面内の座標と物性値を持っており、これらの値からモデルと等価な単純はり要素の断面積、弾性定数、断面2次モーメントを計算する (図-4)。軸力と曲げ変形によって各ファイバーは軸方向の応力を持つことになり、これが与えられた限界応力に達したとき、そのファイバーは塑性または破断したと判断する。ここで用いるプログラムのひび割れモデルは要素内にひび割れが多数一様に分布した状態を想定した分布ひび割れモデルであり、そのファイバーを含む要素の全長で剛性の低下が発生すると考える。

本プログラムでは、ひび割れ発生と判断されたファイバーについて、

- ①ファイバーの剛性を低下させ、応力を0にする
- ②解放応力を軸力及びモーメントとして両端の節点に載荷する
- ③新たに定まったファイバーの剛性から中立軸を移動させる
- ④中立軸の不連続を表すため要素を両端に剛域を持ったコの字型の要素に変形させる(図-5)といった処理を実施して、ひび割れ進展をシミュレーションする。

今回の解析においては、覆工模型の断面をはりでモデル化し、覆工の肉厚方向をファイバーで分割して表現した。

3.2 解析モデル

2章で述べた覆工模型を数値モデルに置き換えて、実験結果を再現することを試みる。

本論文では、複線トンネル覆工模型と単線トンネル覆工模型のそれぞれについて、1点載荷のケースを載荷点を変えて3ケースづつ実施した。両モデルとも周方向を46分割し、肉厚方向は物性値一様として20のファイバーに分割した。

全ケースとも引っ張り方向に剛性を持たない非線形ばねを地盤ばねとして付加して背面空洞無しの状態を作った。脚部の境界条件としては脚部ストッパーに対応するばねを付加した。荷重載荷方法は、実験とは異なり、荷重制御で1ステップあたり10kgfづつ段階的に載荷した。

3.3 解析結果

解析結果を図-6及び図-7に示す。図-6は各ケースのひび割れ進展状況及び、荷重が100kgfの時点での変形状況、図-7は各ケースの載荷重Pとuの関係を示したものである。模型実験の結果(図-2及び図-3)と比較すると、ひび割れ発生状況がよく再現されていることがわかる。変形状況も実験と良く似た形状を示し、ことに載荷点が側方にある例(S03)では、解放応力と地盤ばねの効果によって生じると見られる複雑な変形状況が再現されていることがわかる。

載荷重Pと変位uの関係をみると、ひび割れの開始荷重は実験よりもやや小さく、以降の変位及びひび割れ進展はやや早めである。これはこの解析モデルが自重による初期応力を考慮していないことと、ひび割れモデルが面としてのひび割れではなく要素全体の剛性を低下させていることなどによって生じると考えられ、これにより解析結果は安全側の評価を行なっていると言える。複線トンネルと単線トンネルの、または載荷の方向による差異は良く再現されており、単線トンネルでは鉛直の荷重に対する耐力が大きい、側方からの載荷に弱い傾向などが分かる。

3.4 解析結果のまとめ

以上述べてきたように、本手法を用いた解析で曲げひび割れが卓越する荷重については覆工コンクリートのひび割れ発生、進展、およびそれに伴う変形状況がある程度定量的に予測できることが確かめられた。ことに、ひび割れ発生個所の予測がかなり正確に実施できることから、危険個所の予測やき裂の原因となる荷重の推定にも利用できる。今後は、境界条件や材質の非線形性の評価の精密化、計算パラメータの最適化、せん断破壊が卓越する破壊様式への適合性等の検討を進め、本手法の実問題への適用をめざして行く。

また、本手法は元来複合材料の評価のために考案されており、鉄筋や補修工がある場合の解析が可能であると考えられる。したがって、これらについても実験との比較を通じて確認して行く必要がある。

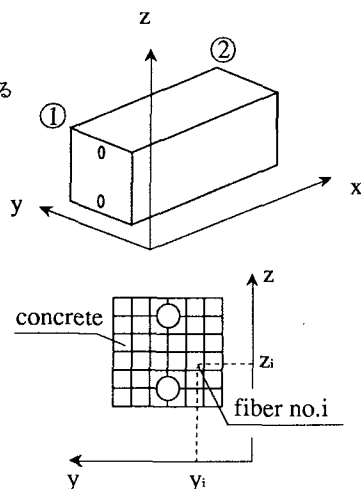


図4 ファイバーモデル

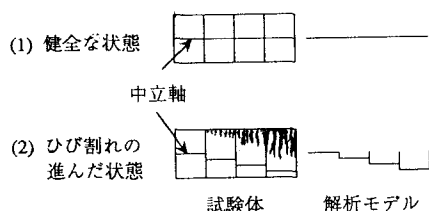


図5 ひび割れ進展に伴うモデルの変化

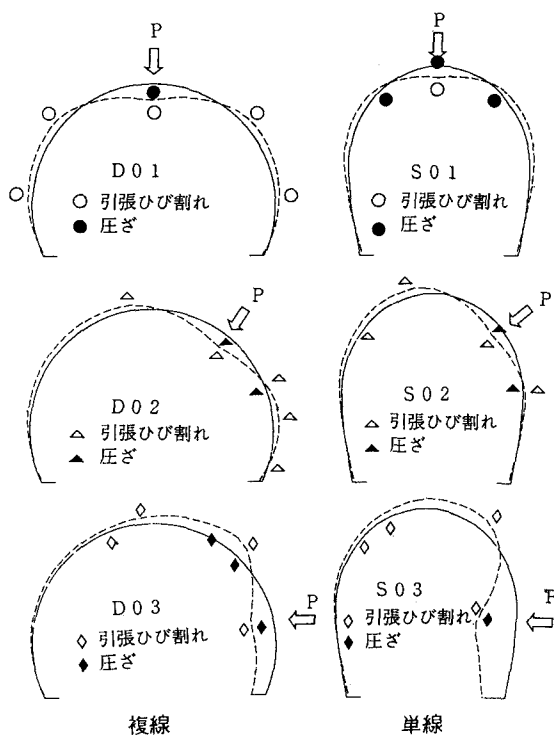


図6 ひび割れ進展および変形状況
 ---: 載荷重が100kgf 時の変形状況

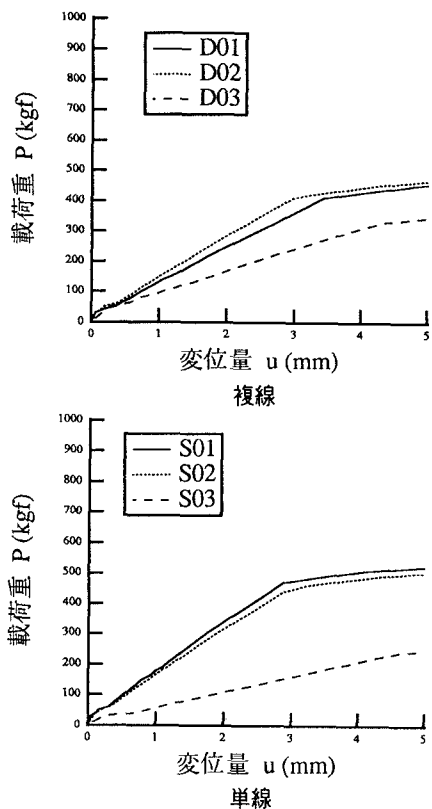


図7 載荷位置の覆工変位量と載荷重の関係 (計算)

4. おわりに

複線トンネル・単線トンネルを対象として、載荷位置の違いによる覆工挙動の差異を実験によって明らかにし、さらにファイバーモデルにより精度良くシミュレーション解析を行なった。ただし、今回取り扱った覆工挙動は曲げが卓越したモードであったため、今後軸力が卓越したせん断モードについても評価が可能なように検討を行ないたい。

トンネル覆工の挙動は、時として3次元問題として取り扱わざるを得ない場合もあり、また2次元骨組み解析により簡便に検討することが可能な場合もある。今回検討したファイバーモデルを含め、各種解析条件に対する個々の解析手法の適用性について今後明らかにしていく必要がある。

最後に、実験・解析にご協力いただいた関係各位に深甚なる謝意を表しむすびとする。

[参考文献]

- 1) 朝倉、松本、小島、川上：トンネル覆工の力学的挙動解析、第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、1990
- 2) 朝倉、小島、安東：トンネル覆工の力学挙動解析-複線トンネル覆工模型実験のシミュレーション-、トンネル工学研究発表会論文・報告集、第1巻、1991
- 3) 朝倉、小島、安東：トンネル覆工の力学挙動解析-単線トンネル覆工模型実験のシミュレーション-、トンネル工学研究発表会論文・報告集、第2巻、1992
- 4) 高木、山本、安岡、仙波：角型魚礁の応力解析 (その1 解析手法の開発)、平成4年度日本水産工学会学術講演会論文集、1992