

(42) 模型実験によるトンネルライニングの 健全度評価法の検討

北海道電力㈱ 正会員 坂本 容、同正会員 志水 義彦
応用地質㈱ 正会員○横山 幸也、同正会員 村上 弘行

Model Experiment to Evaluate Soundness of Tunnel Lining

Yoh SAKAMOTO, Hokkaido Electric Power Co., Inc.
Yoshihiko SHIMIZU, Hokkaido Electric Power Co., Inc.
Tatsuya YOKOYAMA, OYO Corporation
Hiroyuki MURAKAMI, OYO Corporation

Abstract

In order to evaluate the soundness of a tunnel lining, it is important to classify the patterns of cracks occurring in the lining in relation to the external force loading on the lining in advance. Carrying out loading tests on a tunnel model with a lining, we obtained data on the presence or absence of cavities on the back of the lining and the condition of the external force. As a result, it was confirmed that when a cavity was present lining peak strength fell and a characteristic crack pattern appeared before destruction. Moreover, the phenomenon known as "Nukeagari (in Japanese)" appeared at the time of lining destruction. And the data obtained from this model experiment fit the results of numerical analyses and agree with the results of our investigation conducted in actual tunnels.

1. はじめに

トンネルライニングの健全度を評価するとき、定期的なトンネル点検においてはライニングに発生しているクラックに着目していることから、クラックのパターンをライニングに作用している外力との関係で分類しておくことが重要である。筆者らはこれまでにライニングの応力測定法（壁面ひずみ法）を提案し^{1)、2)}、原位置で測定されたライニングの応力状態とクラックの発生状況やライニング裏側の空洞との関係について検討を行ってきた。今回は、外力とライニングに発生するクラックとの関係を明らかにするため、特にライニングの天端裏側の空洞の有無と外力の作用方向とをパラメータとしたトンネル模型の破壊実験を行った。ここでは単純化した模型実験から得られた知見を整理し、別途実施した数値解析の結果や実際のトンネルでの筆者らの調査結果とも合せて、ライニングの破壊状況と外力や空洞との関係について検討した。

2. 実験方法

2.1 模型材料の物性

模型実験には地盤とライニングを模擬する2種類の材料を用いた。地盤とライニングを模擬する材料の選定にあたっては以下の点を考慮した。①一般にライニングに変状のみられる地点の地盤はライニングコンクリートに比べ剛性が低いことから、作製する地盤材料の弾性係数をライニング材料の半分程度とする。②地盤、ライニング材料とも模型作製ごとの材料の物性値の再現性を高めるため単純な配合とする。③地盤、ライニング材料ともできるだけ均質であり、ひずみゲージが確実に貼り付けられるものとする。使用した材料の配合および室内試験により得られた物性値は表-1のとおりである。

表-1 材料物性一覧

材 料	一軸圧縮強度 kgf/cm ²	弾 性 係 数 kgf/cm ²	ポアソン比	引張強度 kgf/cm ²	密 度 g/cm ³	粘着力 kgf/cm ²	内部摩擦角 degree
地 盤	65	30,000	0.21	9.2	0.98	15	21
ライニング	500	73,000	0.21	38.0	1.76	79	54
配 合 (重量比) 地 盤 / 石膏 : 珪藻土 : 水 = 1.0 : 0.3 : 1.0 ライニング / セメント : デンカ CSA : 水 = 1.8 : 0.2 : 1.0							

2.2 実験装置

模型材料に直接ひずみゲージを接着してひずみ分布の計測が容易に行えることや、実験条件を単純化し別途行う数値解析の条件との整合性などを考慮し、模型は平面応力状態が仮定できる薄肉の形状とした。ひずみゲージは主ひずみ分布を算出するためロゼット型を用い、地盤とライニングの断面およびライニングの内側に貼り付けた(計38枚, 114ch)。変位計はライニングの内側に計6台取り付け付けた。

模型の形状を図-1に示す。トンネルの影響範囲を考慮すると地盤の外側の境界とトンネルとの幅はトンネル直径の2倍程度が望ましいが、実験装置の規模の制約のためトンネル直径の1倍程度とした。事前に実施した数値計算の結果では、上記の2種の地盤の領域の差異がライニングに生ずる応力状態にほとんど影響を与えないことを確認している。地盤の大きさは80cm×75cm×厚さ10cm、ライニングはインポート付きの馬蹄形で外径23cm、厚さ3cmとし、トンネルの中心と地盤の中心を一致させた。模型は、あらかじめライニングを作製し、H型钢で組んだフレームを型枠としてライニングを型枠の中心に固定した後、地盤材料を流し込んで作製した。載荷用ジャッキは10ton ジャッキを4連並列で用いた。載荷能力は50kgf/cm²である。

2.3 実験ケース

これまでに実際のトンネルで行われた調査によると、ライニングの天端裏側に空洞が存在する場合、ライニングに変状の生じている例がしばしば経験されている。今回の実験では外力の作用方向と空洞の有無とをパラメータとし、以下の4ケースの実験を行った。また載荷速度は0.5kgf/cm²/30secとした。

- CASE-1 : 縦方向載荷 (トンネル上下方向)、空洞なし
- CASE-2 : " (")、空洞あり
- CASE-3 : 横方向載荷 (トンネル水平方向)、空洞なし
- CASE-4 : " (")、空洞あり

3. 実験結果

3.1 主ひずみ分布

地盤内およびライニング断面の主ひずみ分布の例を図-2に示す。同図は空洞のあるときの破壊直前でのひずみ分布である。空洞のない場合のひずみ分布もほぼ同様の傾向を示しているが、空洞のある場合と以下の点で相

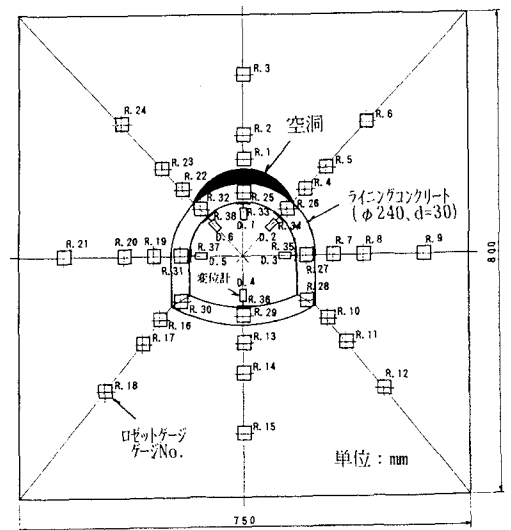
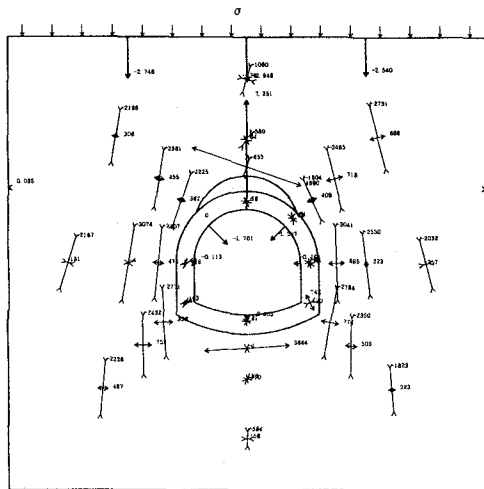
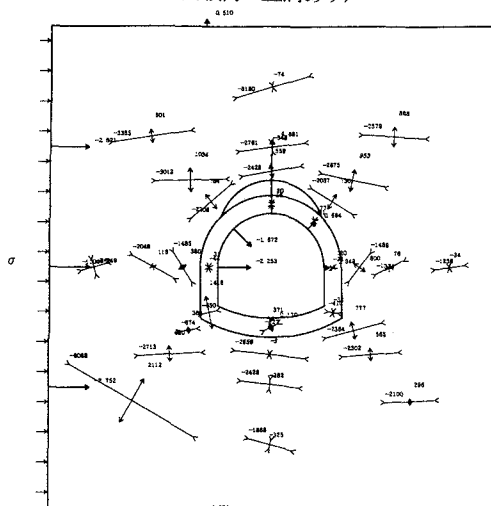


図-1 トンネル模型のセンサー配置図

CASE-2 (縦方向載荷・空洞あり)



CASE-4 (横方向載荷・空洞あり)



載荷応力 $\sigma = 35.0 \text{ kgf/cm}^2$

引張量
圧縮量

主ひずみのスケール 変位量のスケール

0 2 4 6 8 10 cm

模型のスケール

図-2 模型実験による主ひずみ分布図

違っている。①縦方向載荷の場合、CASE-1では天端直上およびインパート直下での地盤のひずみは、CASE-2と異なり水平方向の大きな引張りひずみが生じていない。②横方向載荷の場合、CASE-3では天端直上での地盤のひずみは、CASE-4と異なり鉛直方向の圧縮ひずみとなっている。

ライニング内側の主ひずみ分布の例を図-3に示す。同図はいつでもライニングに顕著なクラックが生じる前（載荷応力 15 kgf/cm^2 ）のひずみ分布である。これらのひずみ分布のうち、円周方向のひずみに着目すると各ケースでの特徴は以下のである。縦方向載荷で空洞のないとき（CASE-1）は、天端とインパートで引張り、その他は圧縮ひずみとなっている。横方向載荷で空洞のないとき（CASE-3）は、逆に両側のスプリングラインで引張り、その他は圧縮ひずみとなっている。

一方、縦方向載荷で空洞のあるとき（CASE-2）は、天端と両肩部のひずみの正負がCASE-1と逆転しており、インパートでは殆どひずみが生じていない。横方向載荷で空洞のあるとき（CASE-4）は、両肩部でのひずみの正負

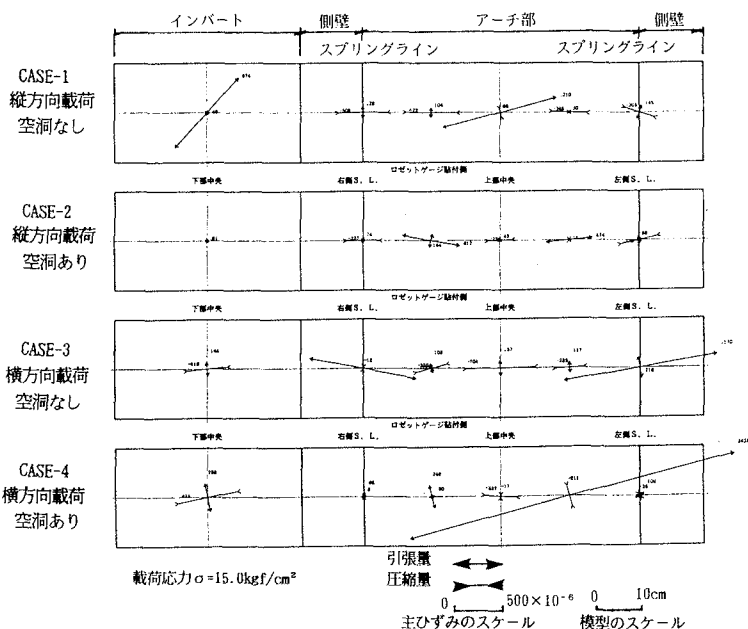


図-3 ライニング内側の主ひずみ分布図（展開図）

がCASE-2と逆転しており、両スプリングラインでは殆どひずみが生じていない。以上のように、空洞のあるときには、荷重方向にかかわらず天端で圧縮、両肩部で引張りという特徴的なひずみ分布となっている。

3.2 破壊状況

(1) 空洞のない場合

荷重方向にかかわらず荷重応力40 kgf/cm² 程度のとき地盤材料が圧縮破壊を生じ、ライニングには大きな破壊がみられなかった。CASE-1では天端とインバートにトンネル軸方向のクラックが生じ、CASE-3では両スプリングラインにトンネル軸方向のクラックが発生している。これらの結果はひずみ分布と調和的である。

(2) 空洞のある場合

CASE-2では27kgf/cm²、CASE-4では15kgf/cm²の荷重応力で、俗にいうライニングの“抜け上がり”現象が発生し、ライニングそのものが大きく破壊された(図-4)。これらの現象も空洞のないときと同様にライニング内側でのひずみ分布と調和的である。

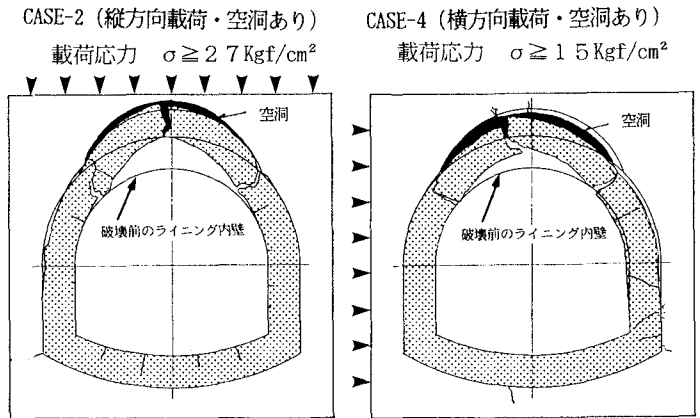


図-4 ラインニングの破壊状況

4. 考 察

4.1 数値解析結果との比較

模型実験と同様の条件でFEM弾塑性計算を行った。材料の強度定数は材料試験で得られた値(表-1)を用いた。その結果、特に空洞のあるとき(CASE-2, CASE-4)は図-5に示すように、荷重方向にかかわらずライニングの天端外側と両肩内側に引張り応力の集中域がみられる。CASE-2では荷重応力37kgf/cm²で、CASE-4では荷重応力10kgf/cm²とともに上記の応力集中域では20kgf/cm²程度の値となった。実験結果と解析結果では定量的な一致はみられないが、実験で得られた破壊現象を裏づける結果が得られたものと考えられる。

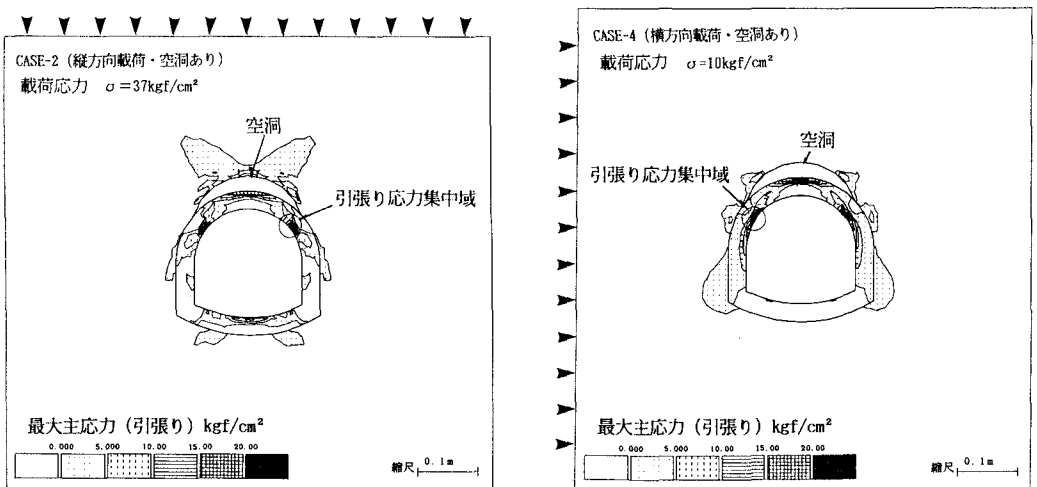


図-5 FEMにより得られた引張り応力集中域

4.2 原位置での調査結果との比較

実際のトンネルにおいて、ライニングの両肩部にトンネル軸方向に連続する2条のクラックが発生している場合には、そのクラックに囲まれた天端のライニングコンクリートにはトンネル円周方向に大きな圧縮応力が作用しており（図-6）、そのライニングの裏面には空洞の存在する例が確認された。この事例は、模型実験で得られた知見とおおむね一致しておりライニングの破壊のメカニズムを検討するうえで有用と思われる。

4.3 クラックのパターン分類

今回の模型実験や数値解析および既往の調査結果から、実際のライニングにみられるクラックの発生パターンのうち、以下に示すような特徴を有するクラックパターンから外力の条件や空洞の存在の有無を推定することが可能であろうと考えた。この関係についての試案を表-2に示した。

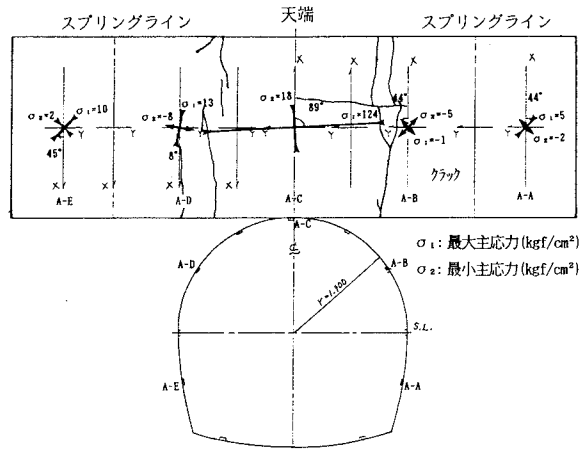


図-6 原位置における壁面の主応力とクラックの調査例

表-2 クラックパターンと発生条件との関係

クラックの発生パターン	外力の方向	空洞の有無
天端とインバートにトンネル軸方向のクラックが発生	鉛 直	無 し
両肩部とインバートにトンネル軸方向のクラックが発生	鉛 直	有 り
スプリングラインにトンネル軸方向のクラックが発生	水 平	無 し
両肩部とスプリングラインにトンネル軸方向のクラックが発生	水 平	有 り

5. あとがき

筆者らはこれまでにトンネルの健全度の評価手法を確立する目的で、ライニングの応力状態に着目し、実際のトンネルライニングにおける応力測定を実施してきた。今回はこれまでに得られた知見を実験的に裏付けることを目的として、トンネルライニングを単純化した模型を用いて室内実験を行い、さらに数値解析による検討を行った。

これら一連の調査、実験、解析の結果、ライニングに生じるクラック発生のパターンは、ライニングの応力状態とライニングの天端裏側に存在する空洞とに大きく関係していることが明らかになった。特にライニングの両肩部にトンネル軸方向に連続する2条のクラックがみられる場合は、その区間のライニングの天端裏側には空洞の存在する可能性が高く、かつそのクラックはライニングの破壊の前兆現象とみることができる。これらの知見は実際のトンネル点検を行う際に大いに参考となるものと思われる。

〔参考文献〕

- 1) 横山幸也、荘司泰敬、田中達吉「簡易な応力解放法によるライニングコンクリートの応力測定結果について」第21回岩盤力学に関するシンポジウム、講演論文集、1989年2月
- 2) 横山幸也、村上弘行、勝山明雄「応力測定によるライニングコンクリートの健全度評価について」第22回岩盤力学に関するシンポジウム、講演論文集、1990年2月