

応力測定によるトンネルライニングの健全度評価に関する実証的研究

横山幸也¹・志水義彦²・石田毅³・水田義明⁴

¹正会員 応用地質株式会社 エネルギー事業部 (〒336-0015 さいたま市太田窪2-2-19)

²正会員 北海道電力株式会社 土木部 (〒060-8677 札幌市中央区大通東1丁目)

³正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

⁴正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

トンネルライニングの健全度評価を行うとき、特徴的なクラックの発生形態とライニングの応力状態の関係を把握しておくことが重要である。筆者らはまず模型実験により、トンネル周辺から与える外力の方向とライニング裏側の空洞の有無をパラメータとしたとき、空洞を有するモデルではより小さな外力でライニングに破壊が生じること、ライニングの巨視的な破壊形態は与える外力の方向に無関係にほぼ同じであることを明らかにした。この結果を数値解析でも確認した。次に、現場でのライニングの応力測定法として、壁面ひずみ法と孔壁ひずみ法を合わせてライニングの応力状態を実測し、このときの応力状態とライニング壁面で観察されるクラックの関係から、トンネルライニングの健全性の推定が可能なことを明らかにした。

Key Words : tunnel lining, model experiment, numerical analysis, stress, measurement, over-coring,

1. はじめに

最近、供用中の道路トンネルや鉄道トンネルにおいて、ライニングの天端部分の剥落事故がしばしば起こっている。このような事故を引き起こすトンネル変状の原因には、トンネル掘削後に地山に発生する塑性圧や緩みあるいは地形的な偏圧等によるライニングの変形や破壊があり、ライニングコンクリートそのものの材質劣化や設計・施工不良あるいは近接トンネルの施工による地山応力状態の変化等もあげられる。

筆者らは、水路トンネルや道路トンネルの健全度を評価する目的で、種々の調査、研究を実施してきている¹⁾が、これらトンネルの代表的な変状として、ライニングの両肩部に発生するトンネル軸方向のクラックが観測されている。この変状は、ライニング裏側に存在する空洞がこのクラックを発生させる大きな要因であるものと考え、模型実験や数値解析および原位置調査を実施した。

トンネルライニングの模型実験に関する研究事例については、斉藤ら²⁾が約1/4模型で、H型支保工の効果、巻厚の効果、天端背面空洞の影響等について成果を得ている。今田ら³⁾は1/2模型で、ライニングの耐荷力、鉄筋二重巻きライニング、ブロックライニング等の効果について成果を得ている。また、朝

倉ら⁴⁾は三次元実験可能な1/20と1/30模型で、荷重の作用方向による耐力の差、天端背面空洞による耐力の低下、逆巻施工の欠陥による影響等について成果を得ている。さらに、朝倉ら^{4), 5), 6)}はシミュレーションによっても模型実験の検証を行っている。

筆者らは、これらの研究成果を参考にし、特に在来工法のトンネルでしばしば確認されるライニングの天端付近にみられる剥落、あるいは両肩部にみられるトンネル軸方向に連続するクラックの発生原因について、天端背面に存在する空洞の影響の解明を目的として模型実験や数値解析を行った。さらに、得られた知見を確認するため、実際のトンネルにおいて天端背面の空洞の有無とライニング表面の応力状態の関係についても調査・計測を行った。

なお、本論文ではトンネルライニング自体の位置の表示として、以下の用語を用いて説明する。馬蹄形を示すライニングの“天端”とは上半アーチの天頂部を、“肩部”とは上半アーチの斜め上部を、“スプリングライン(SL)”とは上半アーチの始まる線を、“側壁”とは上半アーチの始まる線から下の隅部までを、“インバート”とは力学的に閉じたライニングを形成する下部コンクリートをそれぞれ示すものとする。また、応力とひずみの値については圧縮を正、引張りを負として表現する。

表-1 模型材料の物性値と配合

材料	一軸圧縮強度 MPa	静弾性係数 GPa	ポアソン比	引張強度 MPa	密度 g/cm ³	粘着力 MPa	内部摩擦角 degree
地盤	6.4	2.9	0.21	0.9	0.98	1.5	21
ライニング	49.1	7.3	0.21	3.7	1.76	7.7	54
物性値の比率 (地盤/ライニング)	0.13	0.40	1.0	0.24	0.56	0.19	0.39
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						

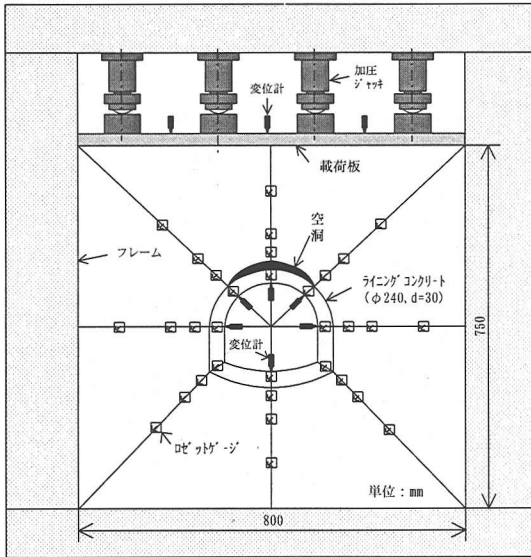


図-1 トンネル模型のセンサー配置図

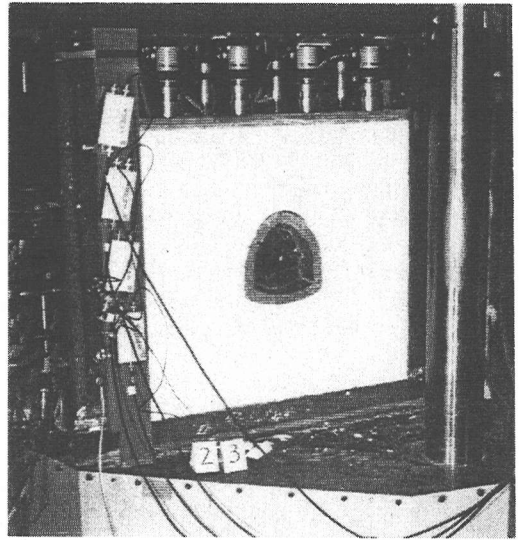


写真-1 実験状況

2. 模型実験

(1) 実験方法

a) 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。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。これら材料の選定にあたっては、以下の点を考慮した。

- 一般に、ライニングに変状のみられるトンネル周辺の地盤は、ライニングコンクリートに比べ剛性が低いことから、作製する地盤材料は多少硬めではあるが表-1のような配合とした。材料試験の結果では、地盤材料とライニング材料の強度および弾性係数の比率はそれぞれ0.13、0.40となった。
- 地盤、ライニングの材料ともに、模型製作ごとの

材料物性の再現性を高めるため、単純な配合とした。

- 地盤、ライニングの材料ともに、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した。

b) 実験装置

模型材料に直接ひずみゲージを接着して主ひずみ分布の計測が容易に行えることや、別途行う数値解析の条件との整合性をはかるためには実験条件を単純化するのが望ましいことなどを考慮し、模型は平面応力状態が仮定できる薄肉の形状とした。載荷方法は両側面を拘束した一軸載荷試験とした。ひずみゲージは主ひずみ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内側の壁面に貼り付けた(計38枚、114ch)。変位計はライニングの内側に6台、載荷板上面に3台、計9台設置した。

模型の形状を図-1、写真-1に示す。トンネルの影

表-2 模型実験ケース

ケース名	荷重方向	空洞の有無	最大荷重応力 (破壊状況)
CASE-1 (縦荷重健全モデル)	縦 (トンネル鉛直方向)	無し	3.9MPa (地盤がせん断破壊)
CASE-2 (縦荷重空洞モデル)	"	有り	3.7MPa (地盤がせん断破壊) (2.6MPaでライニングが曲げ破壊)
CASE-3 (横荷重健全モデル)	横 (トンネル水平方向)	無し	3.9MPa (地盤がせん断破壊)
CASE-4 (横荷重空洞モデル)	"	有り	3.5MPa (地盤がせん断破壊) (1.5MPaでライニングが曲げ破壊)

響範囲を考慮すると、トンネルの壁面から模型の外側までの地盤の幅は、弾性論によるとトンネル直径の2倍以上が望ましいが、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。模型の大きさは横800mm×縦750mm×厚さ100mm、ライニングはインバート付きの馬蹄形で外径230mm、厚さ30mmとし、トンネルの中心と模型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型鋼で組んだ反力枠（ローディングフレーム）を型枠（モールド）としてライニングを型枠の中心に固定した後、模型を立てた状態で地盤材料を流し込んで作製した。荷重には容量100kNの油圧ジャッキを4連並列で用いた。荷重能力は模型地盤に発生する応力に換算して5MPaである。

荷重用ジャッキは、H型鋼のフレーム上部の内側に均等に配置し、図-1の地盤材料の上部に厚さ10mmの鋼製荷重板を介して固定した。このように4連のジャッキを上部に固定した構造としたため、荷重方向を鉛直方向と水平方向で別々のケースとして実験ができるよう、ライニングの上下方向をそれぞれ90°回転した模型を作製した。

c) 実験ケース

実験ケースは、表-2に示す4ケースとした。これまでに実際のトンネルで行われた調査によると、ライニングの天端背面に空洞が存在する多くの場合、ライニングに変状の生じている例がしばしば報告されている。このため、今回の実験では空洞の有無を1つのパラメータとした。空洞の範囲については、これまでに実際のトンネルで行ったレーダー探査やコア抜きによる調査結果を基に、ライニングの天端背面に上半アーチの90°の範囲で設定した。また、トンネルに作用する荷重の方向についても、上下方向と水平方向での破壊の状況の差異を確認するため、荷重方向をもう一つのパラメータとした。従って今回の実験では、2種類の荷重方向と空洞の有無による4種類の組み合わせを設定した。いずれのケース

も荷重速度は0.05MPa/30sとし、荷重はライニングが曲げ破壊あるいは地盤がせん断破壊するまで増大させた。各ケースで荷重した最大応力および破壊状況を表-2に示した。

(2) 実験結果

a) 模型断面の主ひずみ分布と変位

地盤内およびライニング断面の主ひずみ分布と、ライニング内側壁面の変位の測定結果例を図-2に示す。同図はCASE-2、CASE-4の実験で得られた主ひずみ分布である。

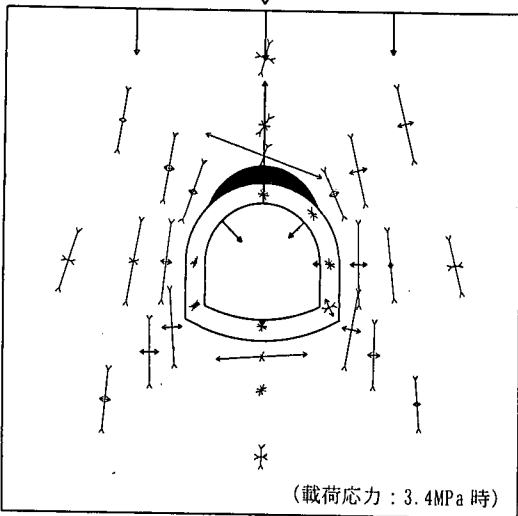
CASE-2 (縦荷重空洞モデル) での地盤内の主ひずみ分布は、ライニングの周辺を上下に流れるような主ひずみ分布となっており、ライニングの直上および直下では横方向に大きな引張ひずみの発生している点特徴的である。ライニング断面の主ひずみ分布は、右側下部でみられる引張ひずみ以外は全て圧縮ひずみが発生しているが、これらの値は地盤内のひずみに比較すると非常に小さい値となっている。また、ライニング内側壁面の変位は、両肩部がライニング内側に、天端が上方に変位していることが特徴としてあげられる。

CASE-4 (横荷重空洞モデル) での地盤内の主ひずみ分布は、ライニングの周辺を左右に流れるような主ひずみ分布となっており、ライニング両側壁の近傍では圧縮主ひずみが傾斜している点特徴的である。ライニング断面の主ひずみ分布は、左側下部およびインバートでみられる上下方向の引張ひずみ以外は全て圧縮ひずみが発生しているが、これらの値はCASE-2と同様に地盤内のひずみに比較すると非常に小さい値となっている。また、ライニング内側壁面の変位は、左肩部と左側壁が内側に、天端が上方に変位していることが特徴としてあげられる。

ライニング内側の変位について、CASE-2 およびCASE-4ともに荷重の作用している側のみ顕著にあらわれている理由は、変位測定の不動点を模型と独立

CASE-2 (縦荷重空洞モデル)

載荷方向



CASE-4 (横荷重空洞モデル)

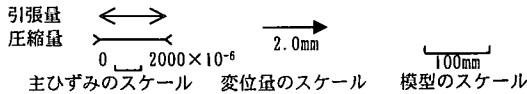
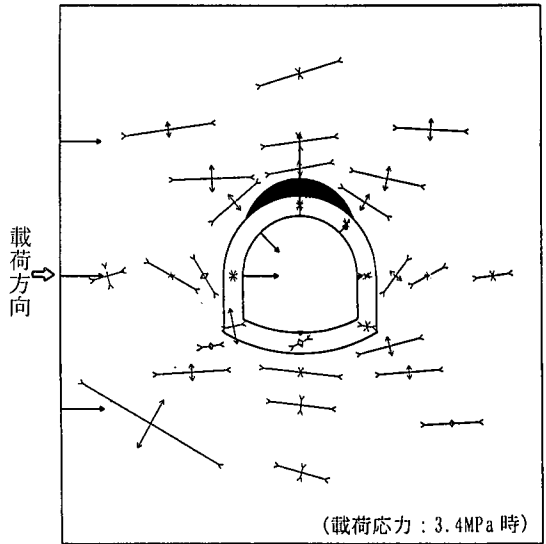
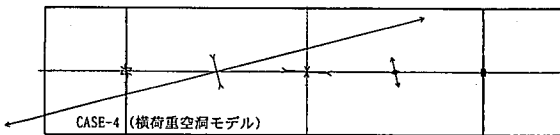
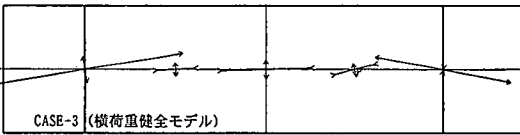
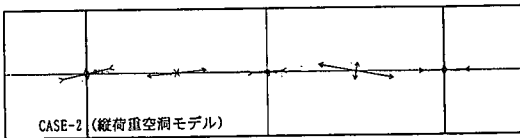
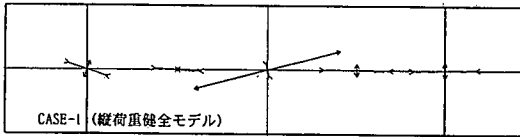


図-2 模型実験による主ひずみ分布図

(左ブリガライ) (左肩) (天端) (右肩) (右ブリガライ)



載荷応力 $\sigma = 1.4 \text{ MPa}$

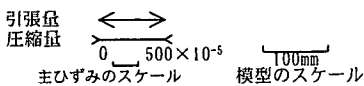


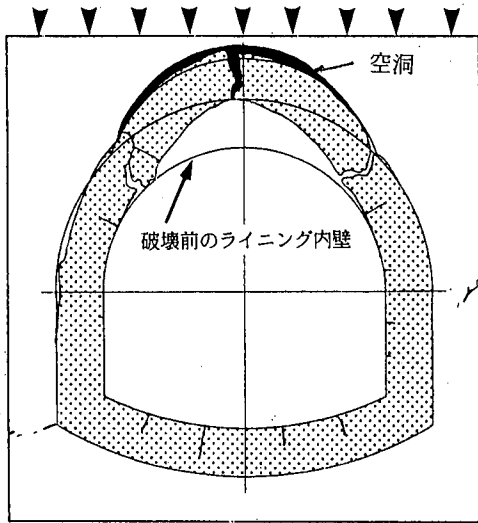
図-3 ライニング表面の主ひずみ分布図 (展開図)

した位置に設けているため、縦方向載荷では底面を固定したモデル地盤が下向きに、横方向載荷では右側の面を固定したモデル地盤が右方向に圧縮されていることによる。ここでは、CASE-1 (縦荷重健全モデル) およびCASE-3 (横荷重健全モデル) での測定結果例は割愛するが、地盤とライニング断面の主ひずみ分布およびライニング内側壁面の変位の状況は、それぞれCASE-2 およびCASE-4 と概ね同様の結果が得られている。ただし、CASE-1 およびCASE-3では空洞がないため、CASE-2でみられたライニング上部での横方向の大きな引張ひずみは発生せず、またライニング天端の上方向の大きな変位も現れていない。以上のように、地盤やライニングにみられるひずみや変位の測定結果から、今回行った模型実験はほぼ弾性論で予想される挙動と矛盾しない良好な結果が得られたものと判断される。

b) ライニング内側の主ひずみ分布

ライニング内側の主ひずみ分布の例を図-3に示す。同図はいづれもライニングに顕著なクラックが生じる前 (載荷応力1.4MPa) の主ひずみ分布である。これらの主ひずみ分布のうち、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とおりである。CASE-1 (縦荷重健全モデル) では、天端で引張り、その他は圧縮ひずみとなっている。CASE-2 (縦荷重

CASE-2 (縦荷重空洞モデル)
 載荷応力 $\sigma = 2.6 \text{ MPa}$



CASE-4 (横荷重空洞モデル)
 載荷応力 $\sigma = 1.5 \text{ MPa}$

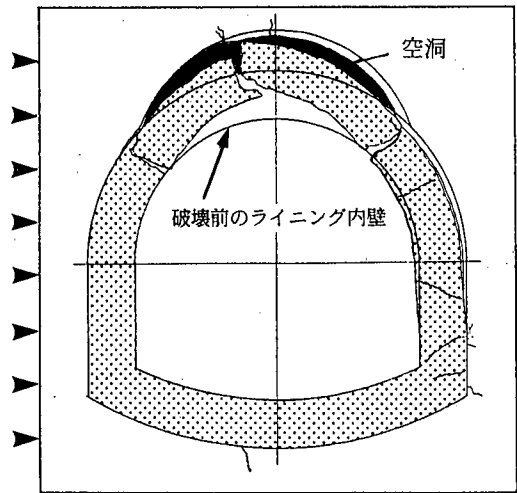


図-4 ライニングの破壊状況

空洞モデル) では、天端で圧縮、両肩部で引張りひずみとなっており、ひずみの正負がCASE-1と逆転している。

一方、CASE-3 (横荷重健全モデル) では、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。CASE-4 (横荷重空洞モデル) では、CASE-2と同様に天端で圧縮、両肩部で引張りひずみとなっている。両スプリングラインではほとんどひずみが生じていない。

以上のように、空洞モデルで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主ひずみ分布となっている。この現象は、CASE-2、CASE-4ともに天端背面に存在する空洞の影響により、荷重の作用する方向にかかわらず、上部のライニングが空洞のある方向にせり上がるような変形モードを示しているものと思われる。この点は、次に述べるライニングの破壊状況とよく整合する。

c) ライニングの破壊状況

CASE-1 (縦荷重健全モデル) とCASE-3 (横荷重健全モデル) では、ともに載荷応力が 3.9 MPa のとき模型の地盤にせん断破壊が生じ、ライニングには軽微なクラックが見られるものの顕著な破壊は生じなかった。CASE-1ではライニングの天端とインバートにトンネル軸方向の軽微なクラックが生じ、CASE-3ではライニングの両スプリングラインにトンネル軸方向にやはり軽微なクラックが発生しており、これらの現象は前述したライニング内側の主ひずみ分布と調和的である。この結果から、これらのモデルにお

けるライニングは十分その機能を果たしているものと判断される。

一方、CASE-2 (縦荷重空洞モデル) とCASE-4 (横荷重空洞モデル) では、載荷応力がそれぞれ 2.6 MPa と 1.5 MPa を超えたとき図-4に示すような破壊が生じた。CASE-2、CASE-4ではともに天端の空洞の端部に対応する両肩部でライニングの引張破壊が生じ完全に開口している。また、破壊したライニングはトンネルの天端付近で左右二つに分離し、ライニング内側では圧縮によりライニングコンクリートの一部が肌落ちするいわゆる“圧ざ”が発生し、ライニング外側(背面)では引張破壊が生じている。この破壊モードは、荷重の作用する方向にかかわらずともいわれる“抜け上がり”現象を示している。ライニングの側壁やインバートについては、ライニングの周囲が地盤材料で拘束されているため、数条のクラックがみられるものの座屈するほどの破壊は生じていない。

以上の実験結果から、ライニング裏側の空洞の有無がトンネル健全性に大きく影響することが明らかとなった。また、破壊時の載荷応力の大きさの違いからみると、今回作製したライニングの形状では表-2に示したように、横方向から荷重を受けた場合は 1.5 MPa でライニングが破壊しており、 2.6 MPa で破壊した縦方向から荷重を受ける場合に比べて、ライニングの耐荷力が小さいものと判断される。

CASE-2 (縦荷重空洞モデル)

載荷応力 $\sigma = 3.6 \text{ MPa}$

CASE-4 (横荷重空洞モデル)

載荷応力 $\sigma = 1.0 \text{ MPa}$

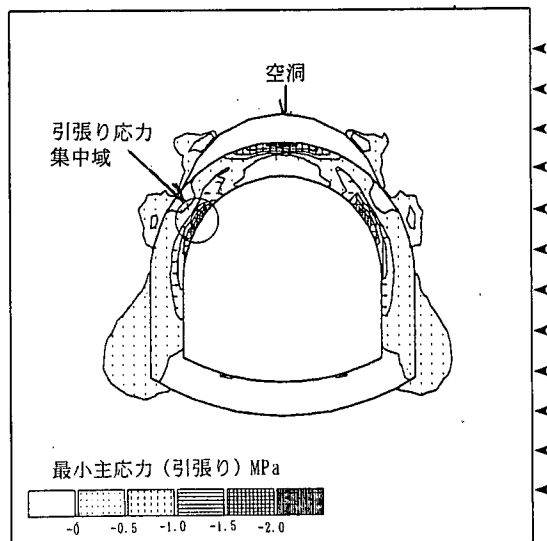
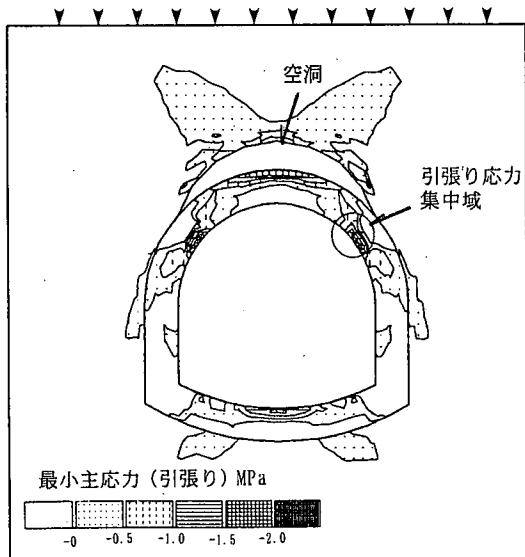


図-5 FEMにより得られた引張り応力集中域

(3) 数値解析

今回行った模型実験の結果を追証するため、CASE-2 (縦荷重空洞モデル) とCASE-4 (横荷重空洞モデル) について模型実験と同様の条件でFEMによる弾塑性計算を行った。材料の弾性定数および強度定数は材料試験で得られた値 (表-1) を用いた。また、モデルの境界条件は、荷重を作用させる自由面に等分布荷重を作用させ、他の3つの面は全てローラーとし、ライニングと地盤は連続体とした。また、塑性化の条件はモール・クローンの破壊基準を用いた。

解析結果を図-5に示す。解析結果ではCASE-2、CASE-4ともに載荷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では載荷応力3.6MPaで、CASE-4では載荷応力1.0MPaで、ともに上記の箇所での引張り応力は2MPa以上の値となり、応力集中の生じていることがわかる。また、CASE-2でのライニングのインバートの内側でみられる引張り応力は、図-4で示したCASE-2におけるライニングの破壊状況にみられるクラックの状況と調和的である。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。

ンネルの健全度に大きな影響を及ぼすという従来の研究結果を具体的な現象として確認することができた。また、ライニングの天端背面に空洞が存在するときには、ライニング内側 (壁面) に特徴的な応力状態が発生することもわかった。すなわち、今回の実験条件においてはライニングの天端背面に空洞が存在する状態に外力が作用したときには、トンネル壁面の円周方向の直応力が天端では圧縮、肩部では引張りとなる。このことから、原位置で直接ライニング表面の二次元応力を計測すれば、今回のモデルに設定した条件に近いトンネルの健全度を評価するための1つの指標を得ることができると思われる。

筆者らは、先に述べた模型実験や数値解析を進めるとともに、実際のトンネルにおいて、図-6に示した“壁面ひずみ法”および“孔壁ひずみ法”を用いて、ライニングの応力状態の測定を行ってきた。ここでは、まずこの応力測定の方法について述べる。次に、これまでに実施したトンネルライニングの応力測定の内、特にライニングの天端背面に存在する空洞とライニングの応力状態の関係について検証するため、空洞の無い場合と空洞の有る場合それぞれ1例について報告する。

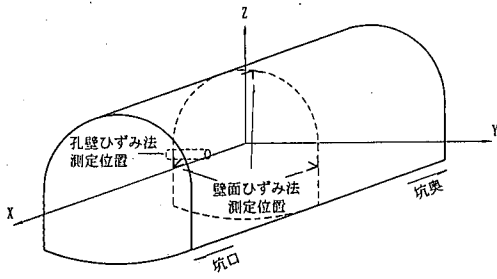
3. 原位置でのライニング応力の測定

今回実施した模型実験および数値解析の結果により、トンネルライニング天端背面の空洞の有無がト

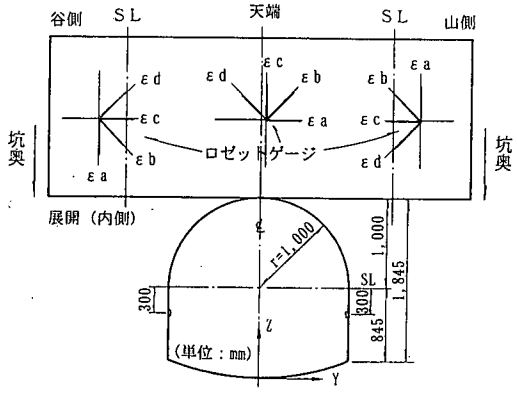
(1) 測定方法

a) 壁面ひずみ法 (二次元応力の原位置測定法)

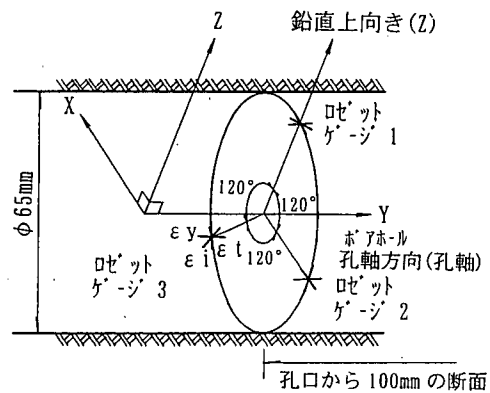
壁面ひずみ法は、平松・岡¹⁾により提案された岩盤表面の2次元の応力測定法で原理的には応力解放法に属する測定法である。この方法は、図-6(a), (b)



(a) 水路トンネルと基準座標系の関係図



(b) 壁面ひずみ法における基準座標系と各ロゼットゲージの貼付け位置の関係図



(c) 孔壁ひずみ法における基準座標系と各ロゼットゲージの貼付け位置の関係図

図-6 壁面ひずみ法及び孔壁ひずみ法における基準座標系と各ロゼットゲージの貼付け位置

に示すようにコンクリートの表面に直接ひずみゲージ（電気抵抗線型箔ゲージ）を3方向以上に接着し、ひずみゲージの周囲にコアリング等によるスリットを形成（この作業を“オーバーコアリング”と称す）し、その前後に測定されたひずみの変化（“解

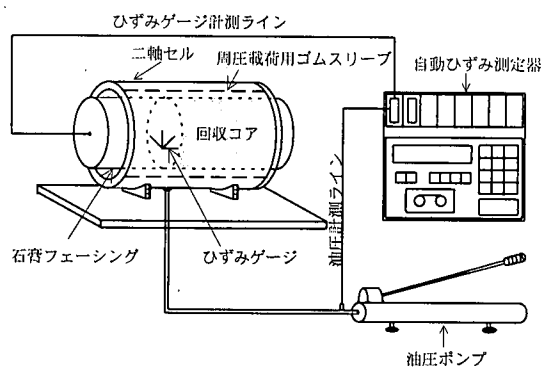


図-7 二軸等圧感度試験の概要

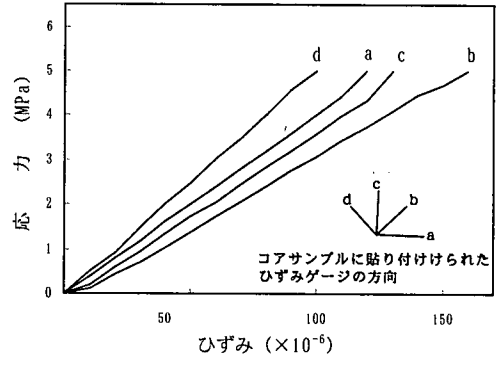


図-8 二軸等圧感度試験で得られる各ひずみゲージの応力-ひずみ関係

放ひずみ”と称す) から応力状態を算定する方法である。この方法では、解放ひずみの値に測定対象である材料の様な弾性係数を仮定して二次元的な応力状態を求めるため、仮定した弾性係数が実際の値と異なっているときには、得られる主応力の値や方向に誤差を含むことになる。

コンクリートの弾性係数は、ひずみゲージの接着された局所的な領域においては、骨材とマトリックスの混合度合いにより不均質な材料であることが一般的である。そこで筆者らは、解放ひずみから応力を求めるとき、様な弾性係数を仮定することなく、各ひずみゲージの接着された位置における“ひずみ感度係数”を直接計測する二軸等圧感度試験機を開発し、精度よく二次元的な応力状態を算定する方法を導入した。但し、ここで用いた二軸等圧感度試験機の二軸等圧とは、静水圧を三軸等圧と表現するように、円筒形の供試体の側面に均一に作用する応力状態を表現している。この測定は、不均質な材料に貼付けたひずみゲージの感度をキャリブレーション

することを目的としている。

図-7に、オーバーコアリングで回収されたコアを用いて行う二軸等圧感度試験の概要を、図-8に二軸等圧感度試験結果の例を示す。二軸感度試験では、回収されたコアのひずみゲージを貼り付けた側はシリコンゴムで覆い、このコアの端部にコンクリートに近い剛性を有す石膏フェーシングを取り付け、これを供試体として周圧が加えられるよう工夫している。

応力解析の方法を以下に示す。応力解放によって得られる各解放ひずみ ε_{pi} と二軸等圧感度試験によって得られる ε_i に対応する応力 σ_i を用いて、式(1)によりひずみ感度係数 E_i を求める。

$$E_i = (1 - \nu) \sigma_i / \varepsilon_{pi} \quad (1)$$

ただし、 ν はコンクリートのポアソン比で、別途測定された値を用いる。次に、供試体としてのコンクリートコアが等方均質体で様な弾性係数 E_0 を有するものと仮定したとき、各解放ひずみ ε_{pi} に対応するみかけひずみ ε_i を式(2)により求める。

$$\varepsilon_i = (E_i / E_0) \varepsilon_{pi} \quad (2)$$

ここで得られるみかけひずみ ε_i は、コンクリートの不均質性が解放ひずみに与える影響をキャンセルするもので、等方均質な弾性体でのひずみ値として評価できるものである。このときの観測方程式は、4枚のひずみゲージを用いたときには、3元4連の連立方程式で表現され、これを行列で表現すれば式(3)のようになる。

$$\{\varepsilon\} = [B] \{\sigma^*\} \quad (3)$$

ここに $\{\varepsilon\}$ はみかけひずみ、 $\{\sigma^*\}$ は求めるべき二次元応力の3応力成分 $\{\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}\}^T$ (Tは転置行列) を表す。また、 $[B]$ は各ひずみゲージのひずみと応力の関係を表す係数行列である。求めたい3応力成分は式(4)のように最小自乗法を用いた後、逆マトリックスを両辺に乗じて式(5)を得る。ここに、 $^{-1}$ は逆行列を示す。

$$[B]^{-1} \{\varepsilon\} = [B]^{-1} [B] \{\sigma^*\} \quad (4)$$

$$\{\sigma^*\} = ([B]^{-1} [B])^{-1} [B]^{-1} \{\varepsilon\} \quad (5)$$

b) 孔壁ひずみ法 (三次元応力の原位置測定法)

孔壁ひずみ法は、Leeman⁸⁾ が提案し、岡・平松⁹⁾ が孔壁のひずみと6個の独立な応力成分との関係を完

全な解析解として明らかにした方法である。この方法は、小口径ポアホール孔の孔壁の一断面内3箇所(ロゼットゲージ(3方向独立のひずみ成分を測定するひずみゲージ)を貼付け、小口径ポアホールと同心円の大口径ボーリングにより小口径ポアホール周辺を応力解放し(オーバーコアリング)、測定された解放ひずみから、弾性論にもとづいて6個の独立な応力成分を決定するものである。ひずみゲージの貼付け位置はすでに示した図-6(c)を参照されたい。孔壁ひずみ法は、測定対象となる材料の三次元的な応力状態を求めることができるため、ライニングコンクリート内部の応力状態を把握することができる。この方法においても、壁面ひずみ法と同様に二軸等圧感度試験を適用した。

応力解析の方法を以下に示す。基本的な解析方法は上記の壁面ひずみ法と同様であるが、孔壁ひずみ法によって得られる各解放ひずみ ε_{pi} は3軸のロゼットゲージを3組用いるため、合計9つの解放ひずみが得られることになる。これら9つのひずみゲージは、測定位置毎にポアホール孔の孔軸方向、円周方向、斜め45°方向の3つの方向成分に分けられる。孔壁ひずみ法では、円孔の壁面に直角型ロゼットゲージを貼付しているため、式(1)に対応する式としては、この円孔の存在を考慮する必要があり、次式のようなになる。ここに、各式の記号の意味は式(1)と同様である。

$$\text{孔軸方向: } E_i = -2\nu \sigma_i / \varepsilon_{pi} \quad (6a)$$

$$\text{円周方向: } E_i = 2\sigma_i / \varepsilon_{pi} \quad (6b)$$

$$\text{斜め方向: } E_i = (1 - \nu) \cdot \sigma_i / \varepsilon_{pi} \quad (6c)$$

感度試験の載荷は円孔を含むコアの外周に対する静水圧載荷だけで、孔軸方向への載荷はない。孔軸方向については、円孔の応力集中を考慮する必要がなく、式(6a)のようになる。円周方向については、無限遠方に静水圧 p が作用すると考えると円孔壁面の円周方向には $2p$ の直応力が作用するため、式(6b)のようになる。斜め方向については、式(6a)と式(6b)を平均したものである。これ以外の解析手順は、壁面ひずみ法と同様であるが、孔壁ひずみ法では6元9連の連立方程式を最小自乗法で解くこととなる。

(2) 測定結果

a) 空洞の無い例

空洞の無い例として測定を行ったトンネルは、上半アーチ半径1.0mの馬蹄形断面、インバート付き水路トンネルでライニングの厚さは20~30cm、土被り

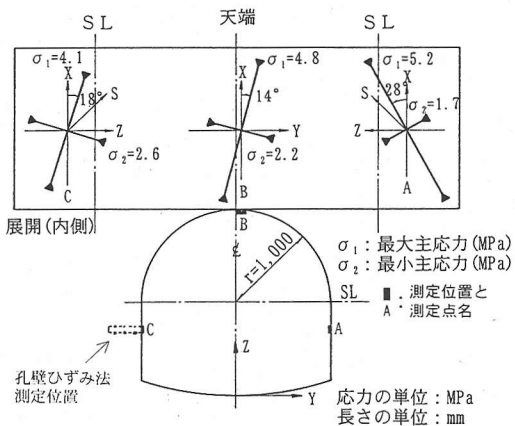


図-9 壁面ひずみ法測定結果
(空洞の無い例)

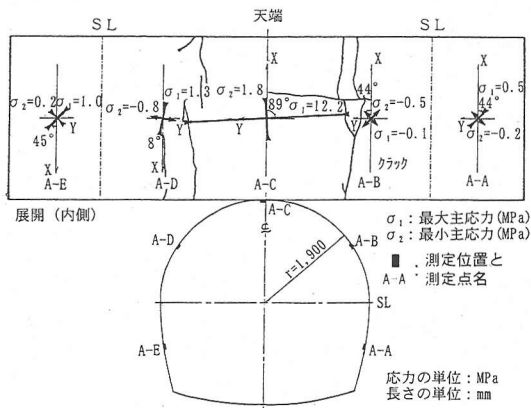


図-11 壁面ひずみ法測定結果
(空洞の有る例)

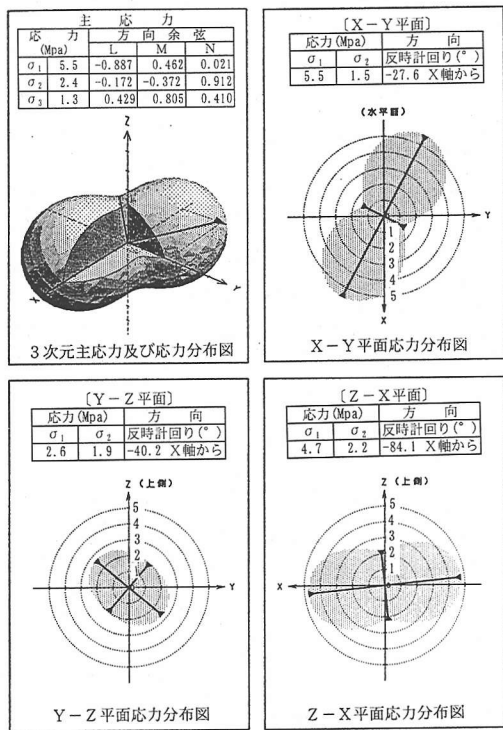


図-10 孔壁ひずみ法解析結果
(空洞の無い例)

約50m, 周辺地山の地質は新第三紀の砂質凝灰岩からなる。測定断面周辺でのレーダ探査を行い、かつライニングを直接コア抜きした結果、ライニング背面に空洞の存在しないことを確認した。測定断面周辺のライニングには開口幅の小さいクラックが数条認められるが、測定断面近傍には顕著なクラックはみられない。ここでの測定は、壁面ひずみ法3点(天

端1点, 両側壁各1点)と孔壁ひずみ法1点(左側壁)を併用した。先に示した図-6は、このときの測定位置を表したものである。

壁面ひずみ法の測定結果を図-9に、孔壁ひずみ法の測定結果を図-10に示す。壁面ひずみ法による測定結果では、3点とも全て圧縮応力状態であることが特徴的である。最大主応力の方向は概ねトンネル軸方向でその大きさは3点とも4.1MPa~5.2MPaとほぼ一致している。最小主応力は円周方向に近く、1.7MPa~2.6MPaの値が得られた。また、トンネル軸方向の応力がほぼ一致していることは、計測したトンネル断面ではトンネル軸方向に様な安定した状態となっているものと判断される。但し、軸方向の応力が円周方向の応力より大きい理由は、年間の温度差による温度応力やこの地域の地殻応力の影響等が考えられるが、今回はこの点に関する計測を行っていないため明確ではない。

このように、ライニング表面の応力状態とライニング背面に空洞が確認されなかったことおよびライニング表面にクラックが存在しないことから判断すると、ライニングには地山からほぼ均等な外力が作用しているものと推測される。すなわち、地山からライニングに外力が作用しているものの、力学的にはライニングコンクリートの健全性は確保されているものと思われる。

孔壁ひずみ法による測定結果は、応力状態を三次元的に表現し、さらに3つの平面(X-Y平面, Y-Z平面, Z-X平面)での二次元応力状態も併記した。この測定結果は、最大主応力は壁面ひずみ法での結果と同様にほぼトンネル軸方向に約5.5MPaの圧縮応力であることを示している。孔壁ひずみ法の測定位置に近い谷側側壁での壁面ひずみ法の測定結

表-3 壁面ひずみ法とA E法による測定値の比較

位置*/方法	壁面ひずみ法 (MPa)		A E法 (MPa)	
	σ_x	σ_z	σ_x	σ_z
A	4.4	2.5	5.6	2.7
C	3.9	2.6	3.4	2.6

※位置は図-9に示す測定位置と同様

果を孔壁ひずみ法の二次元断面（Z-X平面）での応力状態と比較すると両者は近似している。すなわち、壁面ひずみ法では最大主応力はほぼトンネル軸方向に4.1MPa、最小主応力はほぼトンネル円周方向に2.6MPaの値が得られ、孔壁ひずみ法でも最大主応力はほぼトンネル軸方向に4.7MPa、最小主応力はほぼトンネル円周方向に2.2MPaの値が得られている。

これら2種類の応力解放法で得られた測定値の信頼性をチェックするため、カイザー効果を利用したA E法¹⁰⁾による応力測定を実施した。A E法に使用した供試体は、壁面ひずみ法で得られたコンクリートのコアから採取した。切り出した供試体の軸方向は、壁面ひずみ法で測定した各成分と一致させた。また、各コアからの切り出し位置については、A E法による応力測定位置が出来るだけライニング表面に近くなるように、コンクリートコアの壁面近傍から供試体を採取した。

A E法による応力測定結果を表-3に示す。A E法で得られた値は、壁面ひずみ法で得られた各測定成分での値と近似しているものと思われる。

これら異なる3つの測定結果の類似性から、ここでの測定結果の信頼性は確保されているものと判断される。

今回の測定は、天端と両側壁の3点のみで実施しており、両肩部での応力状態が不明であり、先に示した模型実験での主ひずみ分布の測定結果と直接比較することはできないが、ライニング背面に空洞が存在しないことや顕著なクラックが認められないことから、ライニング表面が一様な圧縮応力状態にあり十分健全性が保たれていると判断される。

b) 空洞の有る例

空洞の有る例として測定を行ったトンネルは、上半アーチ半径1.9mの馬蹄形断面、インバート付き水路トンネルでライニングの厚さは約30cm、土被り約100m、周辺地山の地質は中生代の輝緑凝灰岩からなる。測定断面周辺でのレーダ探査とライニングのコア抜きから、ライニングの天端背面にトンネル円周方向に幅約1.5mの空洞が存在していることが確認された。測定断面周辺のライニングの両肩部には開口したクラックがトンネル軸方向に数条認められる

(図-11)。ここでの測定は、壁面ひずみ法を1つの断面で5点（天端1点、両肩部各1点、両側壁各1点）実施した。

測定結果を図-11に示す。ライニング表面での円周方向の応力状態は、天端に大きな圧縮応力（12.2MPa）が発生し、クラックより下側の両肩部には小さな引張り応力（-0.8MPa以下）が、スプリングラインより下の両側壁では小さな圧縮応力（1.0MPa以下）が認められることが特徴として挙げられる。

このようなライニング表面の応力状態のうち天端と両肩部に着目すると、先に示したライニングの天端背面に空洞が存在するときの模型実験での結果（図-3のCASE-2）と応力状態の傾向は類似している。すなわち、図-11に示した原位置でのライニング表面の円周方向の応力状態は天端に12.2MPaの圧縮応力、両肩部に-0.8MPa~-0.5MPaの引張応力がみられ、応力状態から推定されるライニング上部の曲げのモードは模型実験と同様の傾向を示している。ただし、模型実験の例ではライニングにクラックが生じる前で、原位置では既に両肩部に引張りクラックが発生した後での応力状態であることから、特に原位置でのライニングの応力状態はクラックの発生により両肩部の引張り応力が低減し、逆に天端での圧縮応力が増加したものと推定される。従って、この原位置で得られたようなクラックの発生状況と応力状態にあるライニングは、かなり健全度が低下しているものと判断される。

4. まとめ

トンネルライニングの健全度評価を行うとき、筆者らはこれまでの経験からライニングの応力状態とライニングに生じるクラックのパターンやライニング背面の空洞有無の関係を明らかにしておくことが重要と考え、トンネルの模型実験と数値解析を行い、実際のトンネルにおいても原位置でライニングの応力測定を行ってきた。

本研究では、まず地山とコンクリートライニングを模擬した模型を用いて一軸載荷試験を行った。実験は載荷方向と空洞の有無をパラメータとし、ライニング内側表面と地山断面のひずみ測定、ライニング表面の内空変位測定を行った。この結果、天端付近のライニング裏側に存在する空洞がライニング両肩部にみられるトンネル軸方向のクラックを発生させる大きな要因となることを確認した。またそれぞれのケースでのライニング表面の応力状態も測定することができた。さらに、数値計算によってもこの

ような現象と調和的な結果が得られた。この結果に基づいて、ライニング表面の両肩部にクラックのない区間とクラックの発生している区間での応力測定を実施し、空洞の有無も同時に調査することにより、ライニング表面の応力状態と両肩部にみられるトンネル軸方向のクラックやライニング裏側に存在する空洞の関係について明らかにすることができた。

今回の模型実験で得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- 1) 模型実験によると、ライニングの天端背面に空洞を有する場合には、空洞の無い場合に比べ小さな外力でライニングが破壊する。
- 2) 空洞を有する場合のライニングの破壊状況は、今回用いた模型の物性や形状に限定すると、外力の作用方向が縦（鉛直）方向、横（水平）方向にかかわらず、天端付近のライニングが空洞に向けて抜け上がる状態となる。
- 3) 空洞を有する場合のライニング表面のトンネル周方向での応力状態は、今回用いた模型の物性や形状に限定すると、外力の作用方向が縦（鉛直）方向、横（水平）方向にかかわらず、天端で圧縮応力、両肩部で引張り応力が発生する。
- 4) 模型実験をモデル化した数値解析においても、上記3)で得られたライニングの応力状態と同様の結果を得た。

次に、模型実験の結果を実際のトンネルで検証するため、既存の地圧測定法を利用するもののひずみ感度係数の設定に新たな工夫を加え、トンネルライニングの原位置応力測定を行い、以下の結果を得た。

- 5) 原位置でのライニングの応力測定によると、ライニングの背面に空洞がなく壁面にクラックが認められない場合には、ライニング表面がほぼ一様な圧縮状態であった。このことはA E法による応力測定でも確かめることができた。
- 6) 一方、ライニングの背面に空洞を有し、両肩部のトンネル軸方向に2条のクラックが発生している場合には、天端で大きな圧縮応力、両肩部で小さな引張り応力が測定された。

以上のとおり、今回の模型実験と数値解析で得られた知見は、これまでの同種の研究^{2), 3), 4), 5), 6)}においても指摘されている事項であるが、ライニングの天端背面の空洞の有無に限定したモデルとライニング表面の応力状態に着目した計測を行うことにより、トンネルライニングの天端部分の剥落あるいは両肩部にみられるトンネル軸方向に連続するクラックの発生原因についてより明確に示すことができたものと思われる。

すなわち、トンネルライニングの天端背面に空洞が存在することにより、トンネルに圧縮側の外力が作用したとき、空洞部分のライニングに空洞側にせり出すような曲げが発生し、ライニング表面の両肩部に引張応力が集中し、ライニング表面の天端付近には圧縮応力が集中する。このような条件下においてさらに外力が大きくなると、両肩部のトンネル軸方向に連続するクラックが発生し、あるいは天端部にあつぎのような剥落が生じることになるものと推定される。

このような空洞の存在するトンネルライニングの特徴的な現象を理解し、ライニング表面に着目した原位置でのクラックの特徴と壁面の応力を把握することにより、力学的な側面からのトンネルの健全性を評価することが可能になるものと思われる。

今後は、今回の限られた条件のうち、空洞の形状や地山の地質・地盤状況についてもモデルの条件を広げることにより、より一般的なトンネルの健全性が評価できるよう、実際のトンネルでの調査事例も増やしながらか研究を進めていきたい。

参考文献

- 1) 志水義彦, 坂本容, 能登谷勇人: 導水路トンネル設備診断技術の高度化, 電力土木, 第245号, pp.10-19, 1993.
- 2) 斉藤徹, 白井慶治, 飯塚全, 高木盛男, 土屋敬, 岩井徳雄: 模型実験によるトンネル覆工の耐力に関する研究, 鉄道技術研究報告, No. 779, 1971.
- 3) 今田徹, 石橋正徳, 平江哲: トンネルコンクリート覆工の強度に関する実験報告(1), 建設省土木研究所資料, No921, 1974.
- 4) 朝倉俊弘, 小島芳之, 安東豊弘: 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, pp.183-188, 1991.
- 5) 朝倉俊弘, 安東豊弘, 小島芳之, 川上義輝: トンネル覆工の力学挙動解析(2)-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, pp.51~58, 1992.
- 6) 朝倉俊弘, 小島芳之, 安東豊弘, 佐藤豊, 松浦章夫: トンネル覆工の力学挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 493/III-27, pp.79-88, 1994.
- 7) 平松良雄, 岡行俊: 応力解放法による岩盤内の応力測定に関する研究, 日本鉱業会誌, 79巻, 906号, pp.1016-1022, 1963.

- 8) Leeman, E. R. : The determination of the complete state of stress in rock in a single borehole laboratory and underground measurements, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.5, pp.337-353, 1968.
- 9) 岡行俊, 平松良雄 : ひずみまたは変形測定値からの岩盤内応力の決定, 日本鉱業会誌, 84巻, 957号, pp. 7-14, 1968.
- 10) 金川忠, 林正夫, 仲佐博祐 : 岩石における地圧成分の Acoustic Emissionによる推定の試み, 土木学会論文報告集, 258号, pp. 63-75, 1977.

(2000. 7. 7受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON SOUNDNESS EVALUATION OF TUNNEL LINING BY STRESS MEASUREMENT

Tatsuya YOKOYAMA, Yoshihiko SHIMIZU, Tsuyoshi ISHIDA
and Yoshiaki MIZUTA

Knowledge on a relation between a crack pattern and stress state in a tunnel lining should help to evaluate soundness of tunnel linings by route surveying along a tunnel. Thus, the authors clarified in laboratory experiments that a tunnel lining having a cavity above the ceiling generates the same crack pattern of a shear crack along the ceiling and tensile cracks along the shoulders, even if a loading condition is different. The fact was confirmed by comparing stress conditions measured in real tunnel linings using two over-coring methods to the strain distribution in the laboratory experiments.