

## (14) 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

応用地質(株) 正会員 ○ 横山 幸也

” 村上 弘行

” 勝山 明雄

### Evaluation of the Soundness of Concrete Lining by Stress Measurement

Tatsuya, YOKOYAMA, OYO Corporation

Hiroyuki, MURAKAMI, ”

Akio, KATSUYAMA, ”

#### Abstract

A previous report has covered a relatively simple stress measuring method for evaluation of the soundness of tunnel concrete lining. This report concerns the "Wall Surface Strain Method" that has been improved recently. We have developed the technique of measuring sensitivities of each gauge on a core sample using a biaxial stress chamber. Examples of results obtained by this method and their effectiveness are given. The fact that the results from this measuring method are reasonable indicates that the simplified stress relief technique makes it possible to evaluate the soundness of concrete linings.

In addition, the result of estimates of in-situ stress around concrete linings, based on the measured states of stress on the lining are given.

#### 1. はじめに

既設トンネルの健全度評価の一手法として、比較的簡便に行うことのできるライニングコンクリートの応力測定法およびその測定結果について、前回報告した<sup>1)</sup>。そこでは、ライニングの表面で応力を解放したときのひずみを測定する方法（以下『壁面ひずみ法』と称す）と、ライニングにボアホールを削孔した後、このボアホール全体にわたり孔壁の応力を解放したときのひずみを測定する方法（以下『孔壁ひずみ法』と称す）により、ライニングの応力状態を算定する手法について報告した。

今回は、上記二つの手法のうち、測定作業のより簡便な壁面ひずみ法に改良を加え、改めて原位置での計測に適用することによりこの測定法の精度および有効性について確認したので、その結果について報告する。また、トンネルの力学的安定性を検討するうえで重要なライニング周辺の地山応力を数値解析により算定した結果について報告する。

#### 2. 測定位置

評価対象は、総延長が約 1.5km 最大土被りが約 300m の前回と同じ水路トンネルである。周辺地山の地質は新第三紀の安山岩を主体とする。トンネル形状は、在来工法による直径 2m の馬蹄形断面である。覆工厚は 40cm であり、インバートを有している。トンネルの縦断面と測定位置を図-1 に示す。今回、壁面ひずみ法は No. 1、No. 2 の 2 断面で実施した。No. 3、No. 4 は前回の測定位置である。測定断面付近での顕著なコンクリートの変状はなく、閉じたクラックが所々に認められる程度である。応力解析に使用する基準座標系は図-2 に示すように、トンネル軸を X 軸（坑口側を正）、トンネル横断方向を Y 軸（坑奥に向かって右側を正）、鉛直方向を Z 軸（上向きを正）とした。

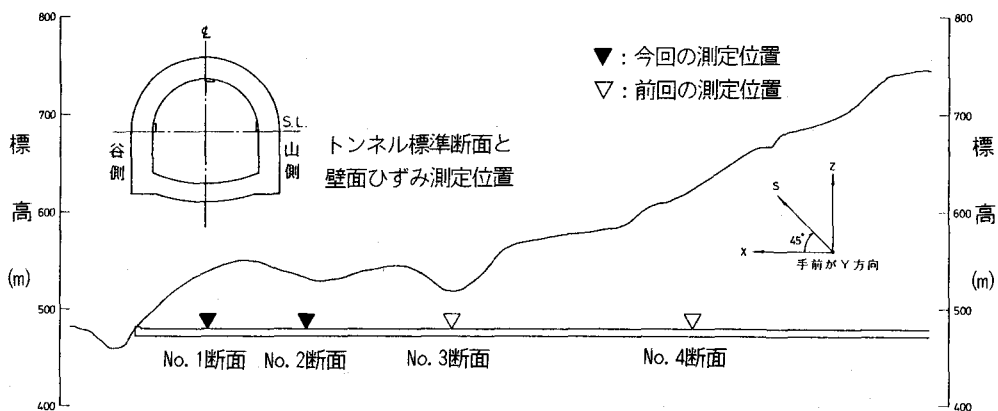


図-1 トンネル縦断面と測定位置

### 3. 測定方法および結果

#### 3. 1 応力解放試験

ひずみゲージの貼り付け位置を図-2に示す。ゲージの貼り付け方法は前回と同じ<sup>1)</sup>であるが、今回はひずみの測定精度を上げるため、一か所に4組のロゼットゲージを貼り付けた。壁面応力を解放させる方法は、前回と同様に内径100mmのコアドリルを用いて壁面から約20cm削孔することとし、この時の初期値からのひずみ変化量を解放ひずみとした。ひずみの測定後、さらに約20cm削孔し約40cmのコアを回収した後、再度ひずみを測定し解放ひずみの安定していることを確認した。

#### 3. 2 二軸等圧感度試験

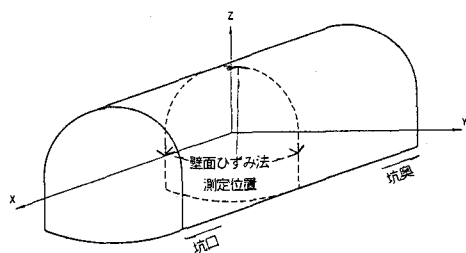
岩石やコンクリートのような材料は一般に不均質性を有するため、同一のコアサンプルであってもひずみを計測する方向や位置によって、その変形特性は一樣ではない。このような不均質性は、応力解放により得られる解放ひずみをもとに弾性論に従って初期の応力状態を算定するとき、最も大きな誤差の要因となる。

今回は、この誤差をできるだけ少なくするため、ひずみゲージの貼られたコアサンプルに周圧を作用させ、そのときの応力～ひずみ関係から各ひずみゲージのひずみ感度係数を算出し応力解析を行った。この試験の概要を図-3に示す。また、試験結果の一例を図-4に示す。

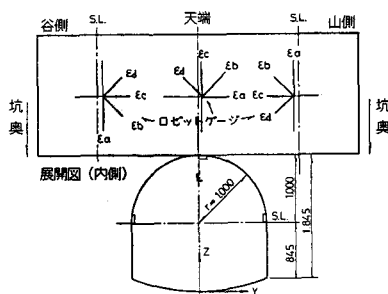
応力解析の概要は以下のとおりである。応力解放によって得られる各解放ひずみ $\varepsilon_i$ と、二軸等圧感度試験によって得られる $\varepsilon_i$ に対応した応力 $\sigma_i$ から、(1)式によりひずみ感度係数 $E_i$ を算出した。

$$E_i = (1 - \nu) \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \dots \dots (1)$$

(a) 水路トンネルと基準座標系



(b) 壁面ひずみ法におけるゲージの貼り付け位置



(c) ロゼットゲージの貼り付けパターン

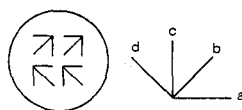


図-2 壁面ひずみ法における基準座標系とひずみゲージの貼り付け位置

但し、ポアソン比 $\nu$ は0.25とした。

次に、コアサンプルが等方均質体で様な弾性係数 $E$ を有すると仮定したとき、各解放ひずみ $\varepsilon_i$ に対応するみかけのひずみ $\varepsilon_{ai}$ を(2)式により算出した。

$$\varepsilon_{ai} = \frac{E_i}{E_0} \varepsilon_i \quad \dots \dots \dots (2)$$

次いで、 $\varepsilon_{ai}$ と $E_0$ の関係から弾性論にもとずいてロゼット解析を行うが、今回は一か所につき4組のロゼットゲージを貼り付け、計12個の $\varepsilon_i$ が得られているため、最小二乗法により3応力成分を求めた。

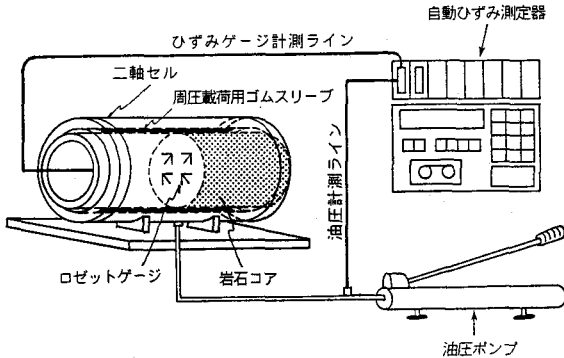


図-3 二軸等圧感度試験の概要

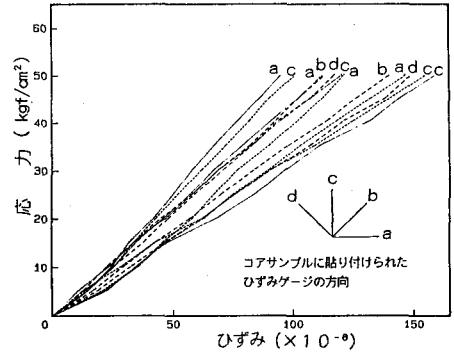


図-4 二軸等圧感度試験結果の例

### 3. 3 解析結果

No.1、No.2 断面での解析結果を図-5に示す。同図では、ライニングを展開して内側からみたときの壁面での二次元主応力（圧縮を正とする）の大きさと方向を示した。No.1断面では、最大主応力は坑軸方向（X方向）で45～52kgf/cm<sup>2</sup>、最小主応力はライニングの接線方向で22～32kgf/cm<sup>2</sup>である。No.2断面では、最大主応力は天端の坑軸方向で56kgf/cm<sup>2</sup>、天端の接線方向の応力も48kgf/cm<sup>2</sup>と比較的大きい。両側壁においても、最大主応力は坑軸方向で35kgf/cm<sup>2</sup>、最小主応力は接線方向で23、24kgf/cm<sup>2</sup>である。以上のように、No.1、No.2 断面ともライニングコンクリートはすべて圧縮応力下であり、最大主応力の方向はほぼ坑軸方向で、その大きさは60kgf/cm<sup>2</sup>以下であることがわかった。解析結果の精度については、いずれの測定箇所においても、算出された主応力の変動係数は2～9%であり、実用的には十分な精度が確保できているものと考えている。

今回の測定断面近傍のコンクリートの一軸圧縮強度は200～300 kgf/cm<sup>2</sup>であり、壁面ひずみ法で得られた応力と一軸圧縮強度との比較において、ライニングコンクリートは応力的には十分安全であることが確認できた。

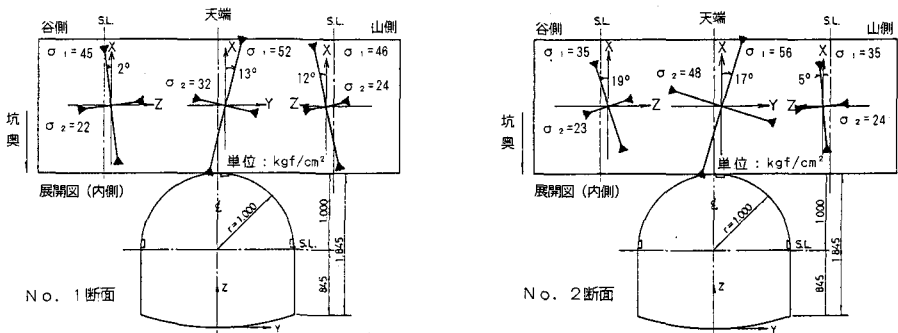


図-5 壁面ひずみ法によるライニングコンクリートの応力測定結果

4. ライニング周辺の地山応力の推定

壁面ひずみ法で得られた解放ひずみを用いて、ライニング周辺の三次元的な地山応力の推定を試みた。この種の推定方法としては、壁面ひずみ法あるいは孔壁ひずみ法で得られる解放ひずみの値を用いた断面二次元での数値解析による手法が石島ら<sup>2)</sup>により提案されている。今回は、前記の壁面ひずみ法の結果から坑軸方向の応力の大きいことが推察されたため、荻野ら<sup>3)</sup>により開発された、坑道（無支保）周辺の三次元岩盤応力を数値解析により算定する手法を用いた。

ここでは、ライニングと周辺岩盤が一体化しており応力が連続的であること、ライニングと周辺岩盤の物性が同一であることを解析の前提条件とする。別途行われたボーリング調査、岩石試験などの結果から、測定地点周辺では上記の条件をおおむね満たしているものと判断した。

解析手順の概要は以下のとおりである。境界要素法により各測定における応力係数（8個）を求め、前記の壁面ひずみ法で得られた解放ひずみから(3)式の観測方程式を導く。

$$\{\varepsilon_{ai}\} = [B] \{\sigma\} \dots\dots (3)$$

但し、 $\{\varepsilon_{ai}\}$ は前記の二軸等圧試験から求めたみかけのひずみで、 $[B]$ は応力係数、弾性係数、ポアソン比を含む係数マトリックス、 $\{\sigma\}$ は $[\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}]^T$ で未知数の6応力成分を表す。測定箇所は1断面につき3箇所、一箇所につき3成分のロゼットゲージが4組貼られているので、36個の連立方程式を最小二乗法で解くことになる。

解析結果を図-6に示す。同図で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）での二次元応力分布図も示した。最大主応力の方向はNo.1、No.2断面ともにほぼ坑軸方向で、最大主応力の大きさはそれぞれ47、42kgf/cm<sup>2</sup>となっている。また、鉛直方向の応力は、No.1、No.2それぞれ

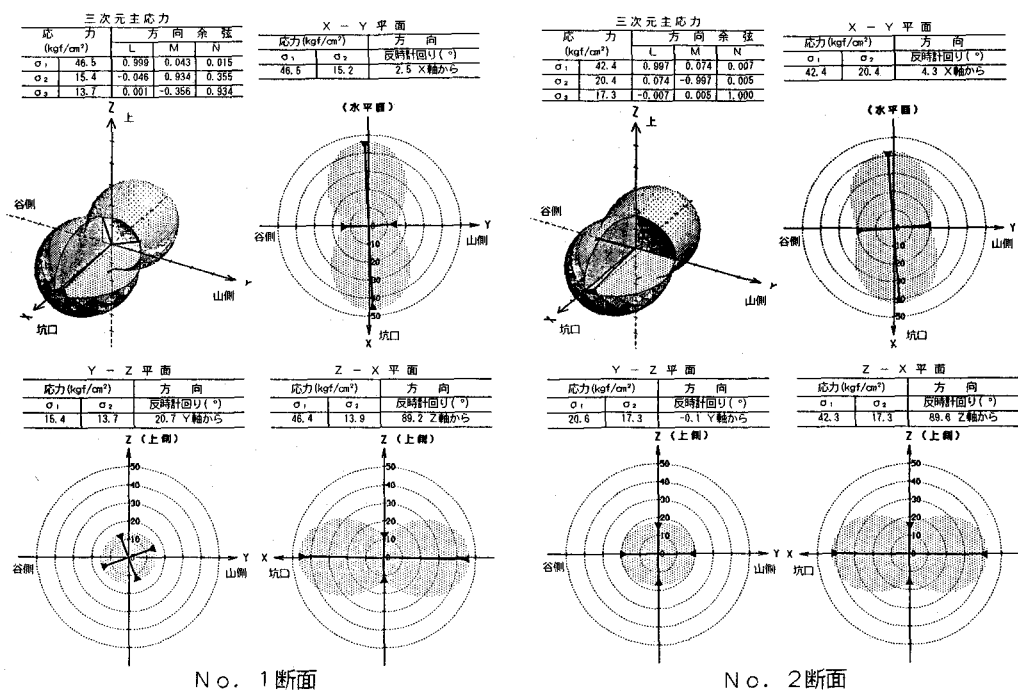


図-6 ライニング周辺の地山応力の解析結果

の断面で土被り圧と比較すると以下のようなものである。

- ・No.1断面：鉛直応力／土被り圧＝ $14(\text{kgf}/\text{cm}^2) / 19(\text{kgf}/\text{cm}^2) = 74\%$
- ・No.2断面：鉛直応力／土被り圧＝ $17(\text{kgf}/\text{cm}^2) / 21(\text{kgf}/\text{cm}^2) = 81\%$

但し、土被り圧は地山の単位体積重量を $2.5\text{gf}/\text{cm}^3$ として算定した。

以上の結果を整理すると、以下のようなことが推察される。No.1、No.2 断面ともに坑軸方向に比較的大きな力が働いており、このような力は現在の地山の応力状態を反映しているものと考えられる。一方、坑軸に直交する断面では、No.1、No.2 断面ともに土被り圧よりやや小さい応力状態である。これは、ライニングの施工後ライニングと周辺岩盤が一体化し、長期的な岩盤内での緩みや応力の再配分により土被り圧に近い荷重がライニングに作用しているためと思われる。

この解析手法はもともと素掘りの岩盤坑道での地山の三次元初期応力の測定方法として開発された手法であるため、今回のようなライニングを有するトンネル周辺の地山応力の推定に利用するときには、前述したような仮定が必要となる。したがって、この手法の適用については、ライニングや周辺岩盤の状況を十分把握しておくことが肝要である。今回測定を行った、ライニングと周辺岩盤が比較的良好に一体化している条件のトンネルであれば、ライニング周辺の地山応力の第一近似的な解としてこの解析結果を位置付けることができるとと思われる。

## 5. おわりに

壁面ひずみ法によるライニングコンクリートの応力測定を行うことにより、ライニングコンクリートの応力と強度との比較において、トンネルの健全度を評価することができる。今回紹介した壁面ひずみ法は、貼り付けるひずみゲージの数を増やし、それぞれのゲージの感度係数を求めてそれを解析に反映させることで、解析誤差を極力小さく出来るように改良されたものである。この方法は、原位置での作業工程あるいは測定に要する費用の面で有利な方法であり、今後も他のトンネルに適用できると考えられる。

また、ライニング周辺の地山応力を把握することは、トンネルの力学的安定性を検討するうえで重要な要素となる。今回紹介した方法は、適用条件にやや一般性を欠いていることもあり、今後は、適用範囲の広い方法を開発したいと考えている。

なお、ライニング周辺の地山応力の推定方法として使用した一連の数値解析プログラムは、山口大学工学部資源工学科の水田義明教授らにより開発されたものである。

## 〔参考文献〕

- 1) 横山幸也、莊司泰敬、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) 石島洋二、宋 文洲「トンネルライニングに作用する背面圧の測定」平成元年度資源・素材関係学会合同秋季大会、分科研究会資料、〔地圧計測の現状と動向〕、1989年10月
- 3) 荻野正二、水田義明、佐野 修、松崎茂則「坑道壁面の応力の解放による3次元岩盤応力測定結果について」日本鉱業会、研究業績発表講演要旨集、昭和59年度春季大会、1984年4月