

(9) 円錐孔底ひずみゲージを用いた初期応力測定

京都大学工学部 正会員 ○小林昭一
正会員 西村直志
関西電力総合研究所 正会員 吉川 太
正会員 打田靖夫

Measurement of Initial Stresses by Use of a Conical-Ended Borehole Strain-Gage

Shoichi Kobayashi and Naoshi Nishimura, Kyoto University

Tohru Yoshikawa and Yasuo Uchida, Kansai Electric Power Co.

Abstract

In this paper, we developed a new measuring technique for initial stresses in a rock using the stress-relief method together with a conical-ended borehole strain-gage, which is specially designed for applying to a conical-ended borehole. By use of this technique, we can efficiently determine initial stresses using only one borehole. The conversion matrix from the relieved strains to initial stresses was accurately determined by the Boundary Element Methods.

We carried out an in-situ test at the site of an underground power house as well as laboratory test. The test proved the efficiency and the accuracy of the proposed technique.

The initial stresses at the site of the power house are $\sigma_1:\sigma_2:\sigma_3=172:91:39$ (kgf/cm²) in compression, and the maximum stress is perpendicular to the axis of the power house and the minimum stress lies in the direction of the minimum distance to the free-surface (hill-side).

1. はじめに

岩盤の初期応力状態を調べるために種々の測定法が提案されてきた。なかでも、応力解放法は信頼できる方法としてしばしば用いられてきた。しかし、いわゆるドアストッパー型の孔底ひずみゲージ法では、孔軸方向のひずみ感度が悪い上に、少なくとも3方向の孔を必要とする欠点がある。

本報文は、ドアストッパー型を改良し、円錐形状の孔底にひずみゲージを接着し、オーバーコアすることによって解放されたひずみ（解放ひずみ）から、一孔のみを用いて初期応力状態を高精度で推定する方法を提案するとともに、室内試験及び原位置試験によってその有効性を確認した結果を述べたものである。

2. 円錐孔底ひずみゲージを用いた応力測定法の原理

円錐孔底ひずみゲージを用いた初期応力測定法は、初期応力の存在する地山に穿孔し、その孔底を円錐形状に仕上げ、その周辺にひずみゲージを接着した後、オーバーコアリングを行って地山初期応力を解放する際に生じる解放ひずみを計測することにより、逆に地山初期応力を推定しようという方法である。

初期応力を求めるためには、オーバーコアリングによる解放ひずみを測定し、それを応力に変換することが必要である。地山を等方線形弾性体と仮定すれば、応力は測定した解放ひずみの線形結合で表されることになる。その係数は境界要素法を用いて精度よく求められる。以下では、その係数が得られたものとして、初期応力を求める方法について述べる。

いま、地山の初期応力（初期地圧）状態がマトリックスで、次のように与えられているとする。

$$\{\sigma\}^T = \{\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31}\} = \{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6\} \quad (1)$$

ここに、応力 σ_{ik} ($i, k=1, 2, 3$) は、直交直線座標系 ($0; x_1, x_2, x_3$) を x_1 軸方向が孔軸 (奥向き) と一致するように選んだ場合の応力成分であり、また $\{\sigma\}^T$ は $\{\sigma\}$ の転置である (図-1 参照)。一方、オーバーコアリングによって解放されたボアホール孔の壁面上のひずみ $\{\varepsilon\}$ は、次のように与えられる。

$$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \dots, \varepsilon_{N1}, \varepsilon_{N2}\} \quad (2)$$

ここに、第1添字 N は計測点 (位置) を表し、第2添字 1, 2 は、それぞれ母線方向の成分及びそれに直交する方向 (周方向) の成分を表している (具体的な位置表示は、図-1 参照)。

ここで、地山を等方な線形弾性体と仮定すると、初期応力と解放ひずみの間には、次の関係が成り立つ。

$$\{\varepsilon\} = \frac{1}{E} [A] \{\sigma\} \quad (3)$$

ここに、 E は弾性係数 (ヤング率) を表す。なお、係数マトリックス $[A]$ は、境界要素法を用いて精度良く求めることが出来る¹⁾。

さて、上式の係数マトリックス $[A]$ が与えられると、そのうちの幾つかの計測点に関する係数を選んで、初期応力を決定するための観測方程式を立てることは容易である。例えば、3 測点 (6 成分) 以上の解放ひずみ $\{\varepsilon\}$ を選んで、最小2乗法を用いると、

$$[A]^T [A] \{\sigma\} = E [A]^T \{\varepsilon\} \quad (4)$$

と表されるので、それを生じるために必要な応力 (初期応力) $\{\sigma\}$ は、次のように求められる。

$$\{\sigma\} = E [D] \{\varepsilon\} \quad (5)$$

ここに、

$$[D] = [C] [A]^T, \quad [C] = \{[A]^T [A]\}^{-1} \quad (6)$$

である。

3. 初期応力の推定

地山の弾性係数 E 及びボアソン比 ν が予め求められていると、解放ひずみを計測すれば、初期応力は式 (5) によって容易に算定することができる。

例えば、測定した解放ひずみの成分として、6 計測点 12 成分 (後述する原位置の計測ひずみに対応)

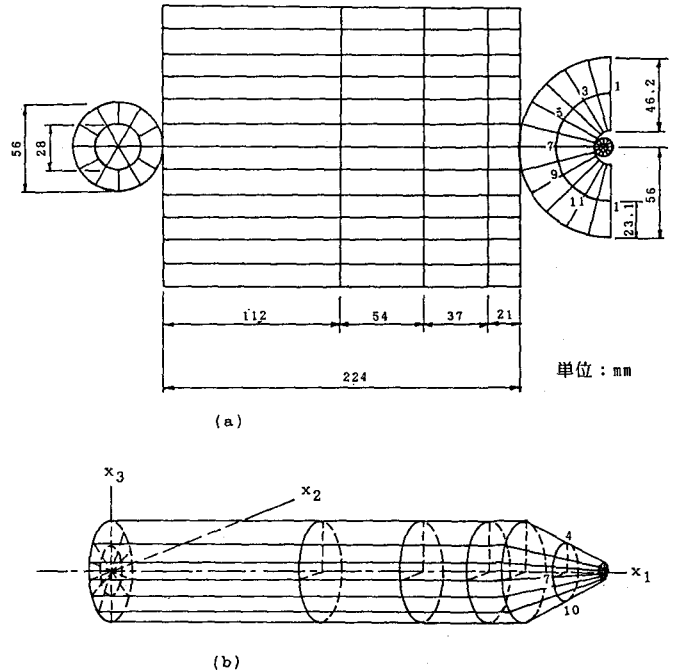


図-1 円錐孔底モデルとひずみ計測点

$$\{\varepsilon\}^T = \{\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{31}, \varepsilon_{32}, \varepsilon_{51}, \varepsilon_{52}, \varepsilon_{71}, \varepsilon_{72}, \varepsilon_{91}, \varepsilon_{92}, \varepsilon_{11,1}, \varepsilon_{11,2}\} \quad (7)$$

を用いることにすると、これに対応する

表-1 応力マトリックス [D] (ポアッソン比 $\nu=1/4$)

応力マトリックス

[D] は、表-1 に

与えたようになる。

(表-1には、紙数の関係で、ポアッソン比 $\nu=1/4$ に対応する係数マトリックス

位置	1		3		5		7		9		11	
呼び名	1,1	1,2	3,1	3,2	5,1	5,2	7,1	7,2	9,1	9,2	11,1	11,2
応力												
σ_{11}	0.282	0.025	0.282	0.025	0.282	0.025	0.282	0.025	0.282	0.025	0.282	0.025
σ_{22}	0.063	-0.007	0.040	0.136	0.040	0.136	0.063	-0.007	0.040	0.136	0.040	0.136
σ_{33}	0.033	0.184	0.055	0.040	0.055	0.040	0.033	0.184	0.055	0.040	0.055	0.040
σ_{12}	-0.223	-0.020	-0.112	-0.010	0.112	0.010	0.223	0.020	0.112	0.010	-0.112	-0.010
σ_{23}	0.000	0.000	0.013	-0.083	-0.013	0.083	0.000	0.000	0.013	-0.083	-0.013	0.083
σ_{31}	0.000	0.000	-0.193	-0.017	-0.193	-0.017	0.000	0.000	0.193	0.017	0.193	0.017

のみを示した)。各成分に対応するひずみの測定点及び方向は図-1を参照されたい。

4. 原位置試験

4.1 測定地点と計測機器

地山の初期応力を推定する目的で、地下式水力発電所の試掘横坑内で原位置試験を実施した。測定には、2つのボアホールを用いた。No.1孔は横坑に垂直に、またNo.2孔は垂直から30°の角度で、それぞれ水平から上向きに3°の角度で穿孔した。なお、測定地点の鉛直被り厚は260mであった。

1) 試錘機：ボーリングロッドの中にひずみゲージのリード線保護管を挿入できるように試錘機のウォータースイーベルを改造し、オーバーコアリング中のひずみが測定出来るようにした。

2) 円錐孔底モールドひずみゲージ：解放ひずみを測定するために用いた円錐孔底ひずみゲージは、可塑性を加えて軟らかくしたエポキシ樹脂製の薄肉の円錐台形状のシェルの外側表面に、中央高さに円周方向に等間隔の6位置に、母線方向及び周方向の2成分を持つクロスゲージがモールドされたものである。従って、合計で12成分のひずみが計測できるようになっている。なお、ここで用いたモールドゲージの寸法は、外径(底部の直径)が54mm、高さが約36.4mmで頂角は60°である。

3) 測定方法：①所定の位置と方向にφ56mmのコアボーリングを行い、テーパービットにより孔底面を円錐形状に仕上げ、円錐形状モールドゲージを孔底に接着設置する。②接着剤の硬化後(12時間以上を必要とする)保護管(φ55mm)を入れ、ウォータースイーベルを通してリード線を外に出し、静ひずみ計に接続した後φ116mmでオーバーコアリングを行う。ひずみゲージの位置の約50cm手前から解放ひずみの測定を開始し、ボーリングが10cm進行する毎にボーリングを止め、送水を止めて計測した。なお、ゲージの位置の前後20cmでは、進行5cm毎に計測した。③オーバーコアリング完了後、円錐モールドゲージを内蔵したコアを取り出す。④その後、上述の作業を繰り返して、計4ヶ所で解放ひずみの計測を行った。

4.2 試験結果

1) ボーリングコアの性状と計測位置周辺の岩の性状：コアはすべて斑状のひん岩であり、岩質は堅硬であった。不連続面は、節理と熱水性細脈が見られたが、殆どすべての節理が方解石と沸石とからなる熱水性細脈によって充填されていた。

2) オーバーコアリングの精度：オーバーコアリングは、φ56mmの先行ボーリング孔に同心的に行われ、得られた円筒状のコアの肉厚を測定した結果は21±1.5mm以内であった。

3) 岩石の物性試験：ボーリングコアを用いて物性試験を行った。

4) 解放ひずみ測定データ：解放ひずみの計測結果の例を図-2に示す。

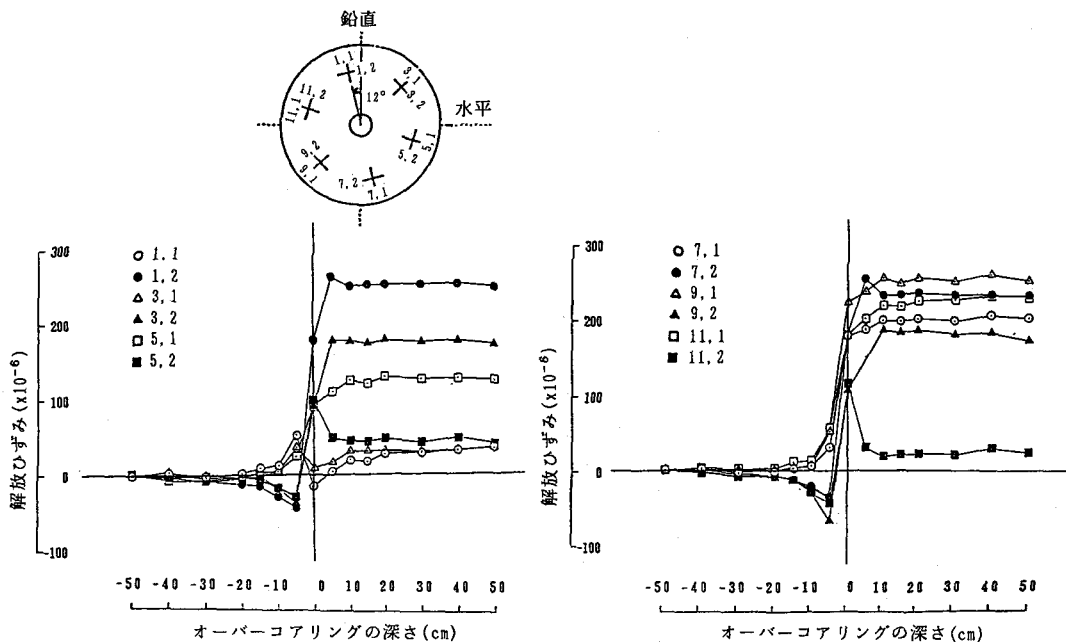


図-2 オーバーコアリングの進行と解放ひずみ (円錐孔底の深度: 11.00mの場合)

4.3 初期応力の推定法

1) 無次元応力: 解放ひずみの測定結果から無次元応力 $\{\sigma/E\}$ を求めておく。その手順を以下に示す。

①式(5)を用いて、12個の解放ひずみから最小2乗法によりひずみ計測位置での局所座標系に対する無次元応力の最確値を算出する。②上で求めた無次元応力から、無次元主応力及びその方向を計算する。

③全体座標系(地下発電所の軸方向をX軸、谷向きをY軸、鉛直上向きをZ軸とした右手座標系(o; X, Y, Z))で表した無次元主応力とその方向を求める。なお、発電所軸は真北から北西へ $28^{\circ} 54' 49''$ である。

2) 初期応力状態: 最後に、弾性係数を用いて初期応力状態を求める。

5. 室内試験結果

モールドゲージの接着性、接着厚さ、及び剛性などの影響を含んだ形での見かけの弾性係数を求めるために、円錐孔底ひずみゲージをほぼ中心に含んだ一軸圧縮供試体(高さ 200mm, $\phi 97$ mm)を、原位置試験でオーバーコアしたものから作成した。試験に際しては、モールドゲージのひずみの他に、供試体の側面で、両端から 50mm 間隔の 3 段、周方向に対称に 4 ヶ所で軸及び周方向のひずみを計測した。

この試験により、コアは等方均質な線形弾性体であることが分かり、側面のひずみ計測から、弾性係数 $E=72.6 \times 10^4$ (kgf/cm²)、ポアソン比 $\nu=0.26$ を得た。これらの値は、コアの一軸試験から求めたもの、 $E=71.7 \times 10^4$ (kgf/cm²)、 $\nu=0.254$ にほぼ一致している。

一方、境界要素法を用いて、上述の試験に対応した数値シミュレーション解析を行った。まず、実験と同じ応力に対する供試体側面の測定ひずみを比較したところ、弾性係数 $E=72.6 \times 10^4$ (kgf/cm²)、ポアソン比 $\nu=0.25$ とすると、数値解析値は実測値とよく一致した。次いで、円錐孔底の測定ひずみと比較したところ、数値解析値は測定値の 0.97 倍であった。従って、円錐孔底ひずみの追従能力が 100 パーセントとして、弾

性係数を求めると、 $E=70.5 \times 10^4 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ となる。この結果から、円錐孔底に接着したモールドゲージのひずみ値は十分信頼できると言える。

6. 試験結果とその考察

推定した無次元初期応力を図-3に示す。なお、ここでは圧縮応力を正とした。最大初期応力方向は、ほぼ地下発電所空洞の長軸方向に垂直であり（約 8° S方向へずれている）、谷側へ約 25° （山の傾斜よりより少しゆるやかに）傾斜している。また最小主応力方向はほぼ最小土被り方向（水平から 54° の方向）にあることが分かる。

絶対応力を求めるためには、弾性係数とポアソン比を正確に求めることが必要である。それには、例えば、既に5で述べたような室内試験を行って、円錐孔底ひずみゲージに適用する見かけの弾性係数を推定するのがよい。（なお、鉛直応力成分 σ_{33} がいわゆる土被り地圧（平均密度 x 土被り厚 $= 2.6 \text{ (gf/cm}^3\text{)} \times 260 \text{ (m)} = 67.6 \text{ kgf/cm}^2$ ）に等しいとして静弾性係数を求めてみると、弾性係数は $59.2 \times 10^4 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ となる）。

ここで前述の見かけの弾性係数 $70.5 \times 10^4 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ 、及びポアソン比 0.25 を用いて初期応力を求めると、 $\sigma_1:\sigma_2:\sigma_3=172:91:39 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$ となる。その比は、 $\sigma_1:\sigma_2:\sigma_3=1:0.53:0.23$ である。

なお、このようにして求めた初期応力は、測定位置周辺の応力状態を表しているけれども、応力測定をする位置は一般には岩塊の或る部分であるので、測定した初期応力がいわゆる地山の応力状態を正確に表しているかどうかについては少し疑問が残る。それを解決するためには、非均質な岩盤構造に関する詳細な情報が必要である。しかし、それを得ることは容易ではないので、現実問題としては上の疑問を解決することは困難であろう。

7. おわりに

この報文では、円錐孔底ひずみゲージ法を用いた初期応力推定法を述べ、それを原位置計測に適用した結果を考察した。ここに提案した円錐孔底ひずみゲージ法は、十分有用な方法であることが示された。更に多くの実施例が望まれる。

参考文献

1) S. Kobayashi, N. Nishimura and K. Matsumoto: Displacements and strains around a non-flat-end borehole, Field Measurements in Geomechanics (ed. S. Sakurai), pp.1079-1084, Balkema, 1987.

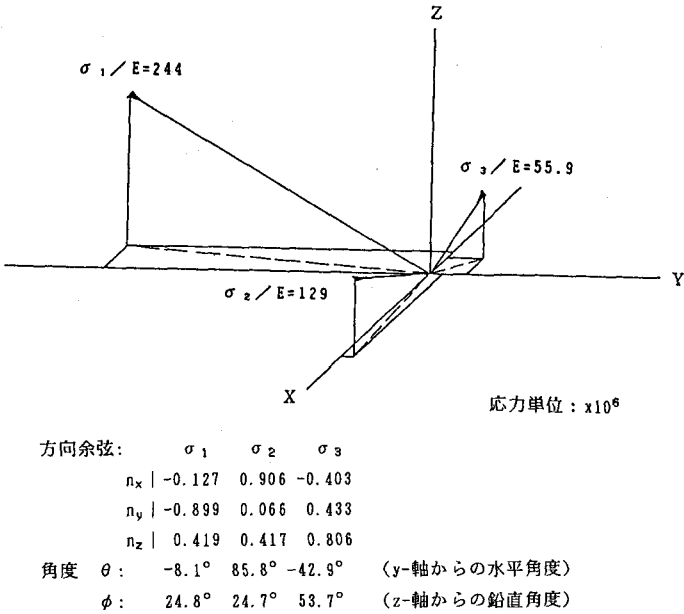


図-3 初期応力状態（無次元表示）