

(75) 円錐孔底ひずみゲージによる初期応力測定法の改良

京都大学工学部 正会員 ○小林昭一
京都大学大学院 学生会員 細田直文

An Improvement of In-Situ Stress Measurement by Use of a Conical Shaped Strain-Gage Cell

Shoichi Kobayashi, Kyoto University

Naofumi Hosoda, Graduate Student, Kyoto University

ABSTRACT

In this paper, we proposed an improvement of in-situ stress measuring technique in a rock using the stress-relief method together with a conical-shaped strain-gage cell, which is specially designed for applying to a conical-ended borehole. The improvement is simply to bore a small sized hole with or without a core ahead of the conical-shaped end. Applying this technique, we can easily judge the rock state around the bore hole observing the core or the wall of the hole using a borehole viewer and efficiently determine the point at which in-situ stresses can be measured. Moreover, by use of this technique, we can effectively determine initial stresses using only one borehole. In order to estimate in-situ stresses from the measured relieved-strains, we must use a conversion matrix for it. With an assumption of linear elasticity the conversion matrix is easily reduced from the strain sensitivity matrix, which is a matrix of strains produced by unit stress components and can be accurately obtained by the aid of the Boundary Element Method. The strain sensitivity matrices for three Poisson's ratios $1/3$, $1/4$ and $1/5$ are given in case of applying the technique for various rocks.

1. はじめに

地下空間の開発に伴って、岩盤の初期応力状態をより正確に把握することが益々重要となっており、現在いろいろな地圧測定法が提案され、試みられている。なかでも、応力解放法は信頼性の高い方法の一つである¹⁻⁴⁾。

本報文は、すでに提案し、実施してきた円錐孔底ひずみゲージ法（円錐形状に仕上げた孔底にひずみゲージセルを接着した後、応力解放によって生じた解放ひずみから、一孔のみを用いて初期応力状態を推定する方法）¹⁻⁴⁾を、より有効に適用するために、実施面を考慮した一つの改良方法を提案したものである。一般に円錐孔底ひずみゲージ法などの応力解放法を適用する際には、ゲージセル前後の岩盤が十分堅硬であることが必須条件となる。しかし、従来の方法では計測点周辺の岩の状態を前もって知ることは困難であった。ここでは、その難点を円錐孔底の前方に小口径の先行ボーアホールを削孔し、岩の状態をそのボーリングコアあるいはボーアホールビューアーを用いて観察することによって解決することとした。この方法を導入すれば、先行ボーリングのために若干の付加施工が必要ではあるが、初期応力測定位置の選定が容易となり、測定の確実性は飛躍的に高くなるであろう。にも拘らず、初期応力の測定過程および応力の推定方法は、従来のものとなんら異なるところはない。この方法を、"先行ボーアホール付き円錐孔底ひずみゲージ法"と呼ぶことにする。ただし、この方法を適用する際には、孔底の形状が従来のものとは若干異なるので、解放ひず

みから初期応力へ変換する係数行列を改めて求めておくことが必要である。ここでは、施工の問題には立ち入らずに、解放ひずみから初期応力へ変換する方法と、そのために必要となる単位応力に対するひずみ係数行列（ひずみ感度行列）を求めた結果を示すにとどめる。なお、円錐孔底ひずみゲージ法の有用性は既に発表しているので¹⁻⁴⁾、ここで改めて述べる必要は無いであろう。

2. 円錐孔底ひずみゲージを用いた応力測定法の原理

ここで提案した”先行ボアホール付き円錐孔底ひずみゲージ法”は、既に有効性が示されている”円錐孔底ひずみゲージ法”を少し改良したものである。その方法は、地山に穿孔したボーリング孔底を円錐形状に仕上げ、更にその頂点から小口径の先行ボーリングを穿孔した後、円錐孔底周辺にひずみゲージセルを接着した後、オーバーコアリングに伴って生じる解放ひずみを計測して、それを応力に変換することによって、逆に地山初期応力を推定しようという方法である。

地山初期応力を推定するためには、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。その係数（行列）はひずみ感度（行列）から求められる。一方、ひずみ感度行列は境界要素法を用いて精度よく求められる。それに関しては適当な文献³⁻⁵⁾を参照されたい。以下では、それらの係数（行列）が求められているものとして、初期応力を求める方法について述べる¹⁻⁴⁾。

いま、地山の初期応力（初期地圧）状態が行列表現を用いて、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、 $\{\sigma\}^T$ は $\{\sigma\}$ の転置である。

ここで、オーバーコアリングによって解放された円錐形状の孔壁面上のひずみ $\{\varepsilon\}$ を

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

と表そう。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およびそれに直交する方向（周方向）の成分を意味している（図-1参照）。

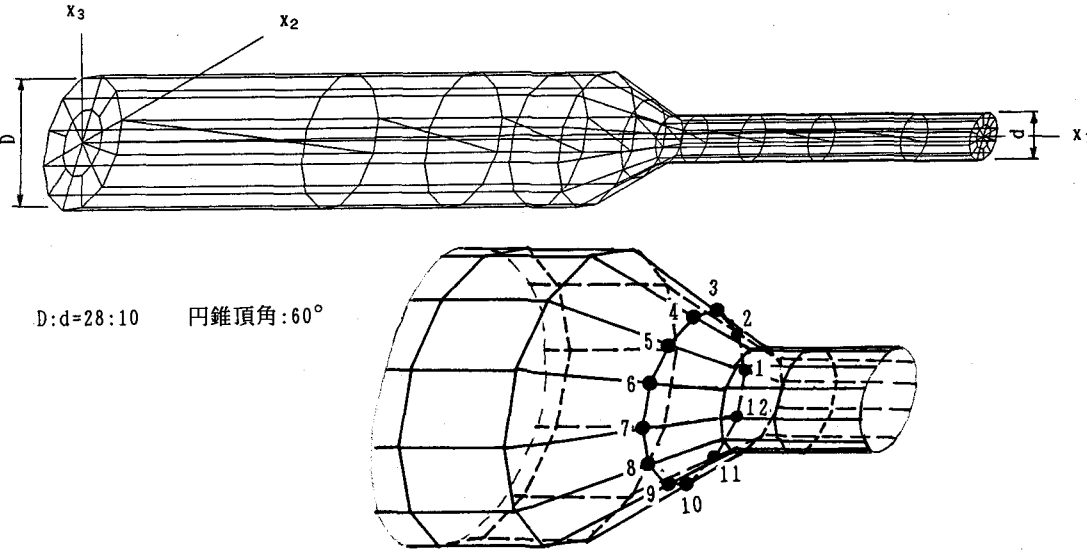


図-1 先行ボアホールのある円錐状孔底と要素モデル

さて、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）を表し、係数行列 $[A]$ は弾性係数を単位とした場合に単位応力によって生じるひずみを意味している。ここでは後者をひずみ感度行列と呼ぶことにした。このひずみ感度行列 $[A]$ は、すでに述べたように境界要素法を用いて精度良く求めることができる^{1), 3-5)}。表-1に、ポアソン比 $\nu=1/3, 1/4, 1/5$ に対するひずみ感度行列 $[A]$ を示した。表中の数値は、弾性係数を単位とした場合に、単位応力 $\sigma_{ik}=1 (i, k=1, 2, 3)$ によって、円錐形状壁面に生じる計測点 N での母線方向のひずみ成分 $N, 1$ および周方向のひずみ成分 $N, 2$ を表している。なお、これらの間のポアソン比に対するひずみ感度係数は、この表から補間によって推定することができる。

上式のひずみ感度行列 $[A]$ 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、

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

である。ここに、 $[D]$ をひずみ-応力変換行列と呼ぶことにする。

3. 初期応力の推定¹⁻⁴⁾

地山の弾性係数 E およびポアソン比 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)および(6)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

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

を用いることにすると、これに対応したひずみ感度行列 $[A]$ は、表-1に与えたもののうちから該当するものを選べばよいので、初期応力はそのひずみ感度行列を用いて式(5)および(6)によって求めればよい。各成分に対応するひずみの測定点および方向は図-1を参照されたい。

なお、式(5)のひずみ-応力変換行列 $[D]$ は、利用する測定ひずみの個数（6個以上任意の数でよい）を決めれば、式(6)によってひずみ感度行列 $[A]$ から容易に求められる。一般に、初期応力推定に利用する測定ひずみ（の数）は測定結果から判断して決めるのが普通であるので、ここでは行列 $[D]$ の数値は示さなかった。

4. 試験方法

4.1 原位置測定と計測機器

原位置に於て、先行ボーリング付き円錐孔底ひずみゲージ法を適用する際の条件、過程、使用機器類および測定方法は、従来の円錐孔底ひずみ法に準じればよい¹⁻⁴⁾。また、実施に関してもほぼ同様の事項に留意すればよい。なお、小口径の先行ボーリングは、円錐孔底の頂点から元のボーリング孔に同心円となるように削孔することが必要である。また、円錐孔底の前方の岩の状態を把握するためには、できればコアを得ることが望ましい。コアを得ることが困難であれば、ボアホールビューアーなどで壁面の観察をしてもよい。それによって、測定位置の決定ははるかに容易になるであろう。

円錐孔底の解放ひずみを測定するためには、すでに円錐孔底ひずみゲージ法で用いているモールドタイプの円錐孔底用ひずみゲージセル¹⁻⁴⁾を利用すればよい。それは、可塑性材を加えて軟らかくしたエポキシ樹脂

表-1 ひずみ感度行列 [A]

(a) ポアソン比 $\nu=1/3$

応力 ひずみ	σ_{11}	σ_{22}	σ_{33}	σ_{12}	σ_{23}	σ_{31}
1.1	0.573	0.165	-0.383	-1.351	0.000	0.000
1.2	-0.437	-0.640	2.717	-0.310	0.000	0.000
2.1	0.573	0.028	-0.246	-1.170	0.474	-0.676
2.2	-0.437	0.200	1.878	-0.269	-2.907	-0.155
3.1	0.573	-0.246	0.028	-0.675	0.474	-1.170
3.2	-0.437	1.878	0.200	-0.155	-2.907	-0.269
4.1	0.573	-0.383	0.165	0.000	0.000	-1.351
4.2	-0.437	2.717	-0.640	0.000	0.000	-0.310
5.1	0.573	-0.246	0.028	0.675	-0.474	-1.170
5.2	-0.437	1.878	0.200	0.155	2.907	-0.269
6.1	0.573	0.028	-0.246	1.170	-0.474	-0.676
6.2	-0.437	0.200	1.878	0.269	2.907	-0.155
7.1	0.573	0.165	-0.383	1.351	0.000	0.000
7.2	-0.437	-0.640	2.717	0.310	0.000	0.000
8.1	0.573	0.028	-0.246	1.170	0.474	0.676
8.2	-0.437	0.200	1.878	0.269	-2.907	0.155
9.1	0.573	-0.246	0.028	0.675	0.474	1.170
9.2	-0.437	1.878	0.200	0.155	-2.907	0.269
10.1	0.573	-0.383	0.165	0.000	0.000	1.351
10.2	-0.437	2.717	-0.640	0.000	0.000	0.310
11.1	0.573	-0.246	0.028	-0.675	-0.474	1.170
11.2	-0.437	1.878	0.200	-0.155	2.907	0.269
12.1	0.573	0.028	-0.246	-1.170	-0.474	0.676
12.2	-0.437	0.200	1.878	-0.269	2.907	0.155

(b) ポアソン比 $\nu=1/4$

応力 ひずみ	σ_{11}	σ_{22}	σ_{33}	σ_{12}	σ_{23}	σ_{31}
1.1	0.571	0.232	-0.232	-1.337	0.000	0.000
1.2	-0.331	-0.734	2.793	-0.271	0.000	0.000
2.1	0.571	0.101	-0.161	-1.158	0.454	-0.668
2.2	-0.331	0.147	1.911	-0.235	-3.055	-0.136
3.1	0.571	-0.161	0.101	-0.668	0.454	-1.158
3.2	-0.331	1.911	0.147	-0.136	-3.055	-0.235
4.1	0.571	-0.292	0.232	0.000	0.000	-1.337
4.2	-0.331	2.793	-0.734	0.000	0.000	-0.271
5.1	0.571	-0.161	0.101	0.668	-0.454	-1.158
5.2	-0.331	1.911	0.147	0.136	3.055	-0.235
6.1	0.571	0.101	-0.161	1.158	-0.454	-0.668
6.2	-0.331	0.147	1.911	0.235	-3.055	-0.136
7.1	0.571	0.232	-0.292	1.337	0.000	0.000
7.2	-0.331	-0.734	2.793	0.271	0.000	0.000
8.1	0.571	0.101	-0.161	1.158	0.454	0.668
8.2	-0.331	0.147	1.911	0.235	-3.055	0.136
9.1	0.571	-0.161	0.101	0.668	-0.454	1.158
9.2	-0.331	1.911	0.147	0.136	-3.055	0.235
10.1	0.571	-0.292	0.232	0.000	0.000	1.337
10.2	-0.331	2.793	-0.734	0.000	0.000	0.271
11.1	0.571	-0.161	0.101	-0.668	-0.454	1.158
11.2	-0.331	1.911	0.147	-0.136	3.055	0.235
12.1	0.571	0.101	-0.161	1.158	-0.454	0.668
12.2	-0.331	0.147	1.911	-0.235	-3.055	0.136

(c) ポアソン比 $\nu=1/5$

応力 ひずみ	σ_{11}	σ_{22}	σ_{33}	σ_{12}	σ_{23}	σ_{31}
1.1	0.570	0.270	-0.237	-1.320	0.000	0.000
1.2	-0.272	-0.778	2.829	-0.250	0.000	0.000
2.1	0.570	0.143	-0.111	-1.143	0.440	-0.660
2.2	-0.272	0.124	1.927	-0.217	-3.123	-0.125
3.1	0.570	-0.111	0.143	-0.660	0.440	-1.143
3.2	-0.272	1.927	0.124	-0.125	-3.123	-0.217
4.1	0.570	-0.237	0.270	0.000	0.000	-1.320
4.2	-0.272	2.829	-0.778	0.000	0.000	-0.250
5.1	0.570	-0.111	0.143	0.660	-0.440	-1.143
5.2	-0.272	1.927	0.124	0.125	3.123	-0.217
6.1	0.570	0.143	-0.111	1.143	-0.440	-0.660
6.2	-0.272	0.124	1.927	0.217	3.123	-0.125
7.1	0.570	0.270	-0.237	1.320	0.000	0.000
7.2	-0.272	-0.778	2.829	0.250	0.000	0.000
8.1	0.570	0.143	-0.111	1.143	0.440	0.660
8.2	-0.272	0.124	1.927	0.217	-3.123	0.125
9.1	0.570	-0.111	0.143	0.660	0.440	1.143
9.2	-0.272	1.927	0.124	0.125	-3.123	0.217
10.1	0.570	-0.237	0.270	0.000	0.000	1.320
10.2	-0.272	2.829	-0.778	0.000	0.000	0.250
11.1	0.570	-0.111	0.143	-0.660	-0.440	1.143
11.2	-0.272	1.927	0.124	-0.125	3.123	0.217
12.1	0.570	0.143	-0.111	1.143	-0.440	0.660
12.2	-0.272	0.124	1.927	0.217	3.123	0.125

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、母線方向および周方向の2成分を持つクロスゲージがモールドされたものであり、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、応力解放のためのオーバーコアリングには、ボアホールと同径ならびにそれより口径の大きいものが用いられる。

5. 試験結果と初期応力の推定

原位置試験による解放ひずみの計測法は、従来の方法に準じればよい¹⁻⁴⁾。なお、初期応力を推定するためには、弾性係数とポアソン比が必要であるが、それにはボーリングコアを用いた室内試験を行えばよいであろう。

解放ひずみの測定結果から初期応力を推定法するには、次の手順によればよい。

1) 無次元応力

以下により先ず無次元応力 $\{\sigma/E\}$ を求めておく。

①式(5)により、12個（あるいはそれ以下で6個以上）の解放ひずみから最小2乗法によってひずみ計測位置での局所座標系に対する無次元応力を算出する。

②無次元主応力およびその方向を計算する。

③全体座標系での無次元主応力とその方向を求める。

2) 初期応力状態

最後に、測定した弾性係数を用いて初期応力状態を推定する。

6. おわりに

この報文では、円錐孔底ひずみゲージ法を改良した“先行ボアホール付き円錐孔底ひずみゲージ法”を用いた初期応力推定法を提案した。この方法は、従来その有効性が認められている円錐孔底ひずみゲージ法をわずかに修正するだけであるが、実用的な見地からは十分検討に値するものであろう。この改良型の円錐孔底ひずみゲージ法が原位置で多く適用されることを望みたい。

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.
- 2) 小林昭一他：円錐孔底ひずみゲージを用いた初期応力測定，土木学会第22回岩盤力学シンポジウム，pp. 426-430，1990.
- 3) 小林昭一，吉川太，打田靖夫：円錐形状孔底ひずみゲージによる原位置応力測定，第8回岩の力学シンポジウム講演論文集，pp.279-284，1990.
- 4) S. Kobayashi et al.: In-Situ Stress Measurement Using a Conical-Shaped Borehole Strain-Gage Plug, Proc. 7th Congr. ISRM (ed. W. Wittke), pp.545-548, 1991.
- 5) 神谷泰範，西村直志，小林昭一：ベクトル化計算によるBEMの高効率化とその弾性問題への適用，境界要素法論文集，第5巻，pp.81-84，境界要素法研究会，1988.