

# 孔底変形法による 三次元応力測定システムの開発

李 基夏<sup>1</sup>・石島 洋二<sup>2</sup>・菅原 隆之<sup>3</sup>・藤井 義明<sup>4</sup>

<sup>1</sup>非会員 北海道大学大学院 社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: kihalab@rock.eng.hokudai.ac.jp

<sup>2</sup>非会員 幌延地圏研究所 (〒098-3221 天塩郡幌延町栄町5番地3)

<sup>3</sup>非会員 北海道大学大学院 環境循環システム専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>4</sup>正会員 北海道大学大学院 環境循環システム専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

孔底変形法による三次元応力測定システムを開発した。孔底変形法とは応力解放法の一つで、孔底のひずみのみを計測する孔底ひずみ法、孔径の変化のみを測定する孔径変化法、孔壁のひずみのみを測定する孔壁ひずみ法等とは異なり、ボーリング孔孔底からパイロットボアホールを穿孔し、測定器を挿入、ボーリング孔と等しい口径のオーバーコアリング時の7方向の変形を片持ち梁式変位計で計測し三次元応力を求める方法である。変位計を用いるので、接着剤の硬化を待つための時間は不要である。開発した測定器は記録部と一体化しているため、ロッド内にケーブルを通すなどのわずらわしい作業も不要である。原位置での実績はまだないが支笏溶結凝灰岩ブロックについて行った二軸試験の結果、三次元応力をほぼ正確に求めることができた。

**Key Words :** rock stress, stress measurement, stress relief method, 3-dimensional stress, borehole bottom deformation method

## 1. はじめに

岩盤応力を測定するための方法の1つである応力解放法では、応力解放に伴う変位やひずみが計測される。ひずみは多くの場合ひずみゲージで計測されるが、水中で、特に燥粉が存在している状況におけるひずみゲージの貼付には実技的な困難がつきまとう。また、接着剤の硬化を待つ必要もある。

これに対して、変位を計測する方法の場合、方法にもよるが、ひずみに比べて若干感度が劣るものの、変位計を設置すればすぐに応力解放が可能となるという利点を持つ。ただし、一回の応力解放で三軸応力を測定するためには、孔軸に直交する面に対する面外せん断応力による変形成分も測定しなければならない。そのための、例えば、斜距離の変化を計測する、電中研

方式もあるが、この方法では、グラウトが必要である。グラウトは、亀裂質の岩盤の場合に応力解放の成功率を高める上で有効ともいえるが、インクルージョン問題となるために解が複雑になる。また、迅速な測定ができるという、変位を計測する方法の長所が損なわれてしまう。

Ghimire et al.<sup>1)</sup>はグラウト不要で一回の応力解放で三次元応力を測定するためのプローブを開発したが、このプローブにはオーバーコアリング径が大きく、また、変位センサーの取り扱いがデリケートであるという欠点があった。そこで、ボーリング孔底にも測点を設け、オーバーコアリング径、パイロットホール径がともに、よりコンパクトで変位センサーの設置にも無理がない孔底変形法と名付けた方法の開発を試みる。

具体的には、本方法では、直径 86 mm のボーリン

グ孔底に径 30 mm、深さ 150 mm のパイロットホールを穿孔する。パイロットホールに測定器を挿入し、ボーリング孔と等しい口径のオーバーコアリングを行う。オーバーコアリングに伴うパイロットホールの適当な深度における 3 方向の径変化、および、パイロットホール孔壁とボアホール孔底間の 4 方向の伸縮の合計 7 成分を片持ち梁式の変位計により計測し、数値解析に基づいた観測方程式を用いて三次元応力を決定する。

ここでは、孔底変形法の理論と開発した計測器の構造について説明する。原位置での実績はまだないが、岩石ブロックを用いた模擬室内試験を数度行った。一軸試験では岩石の非弾性や異方性に起因すると思われる誤差が大きかったものの、二軸等方圧試験では概ねよい結果が得られたのでこの結果についても紹介する。

## 2. 孔底変形法の理論

### (1) 座標系と測定対象変位

ボアホールの軸を  $z$  軸としてオーバーコアリングが行われる始点の孔底中心に原点を取る (図-1(a))。直交座標系  $(x, y, z)$  及び円柱座標系  $(r, \theta, z)$  は図-1(a), (b) に示すように  $xy$  面を孔底面に一致させ、円柱座標の回転角は  $x$  軸から反時計廻りに計る。

直交座標における変位成分を  $(u_x, u_y, u_z)$ 、円柱座標における変位成分を  $(u_r, u_\theta, u_z)$ 、岩盤に作用する初期応力は

$$\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}^T \quad (1)$$

とする。

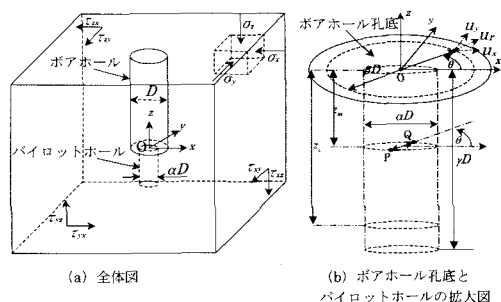


図-1 ボアホールと座標系

岩盤中のボアホール(直径:  $D$ )の底面とその中心から穿孔したパイロットホール(直径:  $\alpha D$  長さ:  $\gamma D$ )に

複数の測点を設ける。パイロットホールの  $z = z_m$  における径変化、および、 $z = z_c$  における断面と孔底の円上(直径:  $\beta D$ )の測点との間の軸方向の相対変位を計測の対象とする。

### (2) 数値解析

$z = z_m$  における径変化のみであれば弾性理論解が求められている。しかしながら、本方法ではボアホール孔底の変形も利用するので、岩盤をヤング率  $E$ 、ポアソン比  $\nu$  の均質な等方弾性体と仮定して初期応力が作用するときの孔底周辺の変形と初期応力との関係式を三次元有限要素法により求めた。解析領域の対称性を考慮し、座標変換公式を用いれば次の 3 つの境界条件に対する三次元有限要素法による解を求めることで孔底周辺の変形と応力との間に成り立つ観測方程式が得られる。

$$\text{i) } \sigma_x \neq 0, \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$$

$$\text{ii) } \sigma_z \neq 0, \sigma_x = \sigma_y = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$$

$$\text{iii) } \tau_{zx} \neq 0, \sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{yz} = 0$$

各境界条件に対して実施した数値解析結果の例を図-2に示す。座標変換や重ね合わせに便利のように、これらの解を以下のように三角関数を用いて近似する。

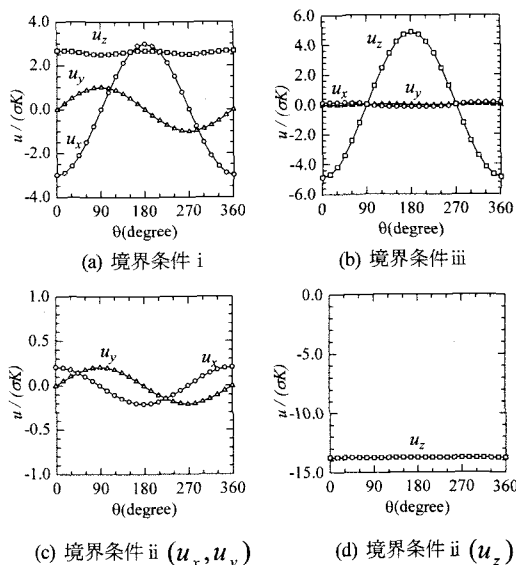


図-2  $z_m = -40$  (mm) における変位成分 ( $K = \alpha D / (2E)$ )

境界条件 i)

$$u_x = m_x \sigma_x K \cos \theta \quad (2(a))$$

$$u_y = n_x \sigma_x K \sin \theta \quad (2(b))$$

$$u_z = \sigma_x K (s_x + t_x \cos 2\theta) \quad (2(c))$$

境界条件 ii)

$$u_x = m_z \sigma_z K \cos \theta \quad (3(a))$$

$$u_y = m_z \sigma_z K \sin \theta \quad (3(b))$$

$$u_z = s_z \sigma_z K \quad (3(c))$$

境界条件 iii)

$$u_x = m_{zx} \tau_{zx} K \cos \theta \quad (4(a))$$

$$u_y = n_{zx} \tau_{zx} K \sin 2\theta \quad (4(b))$$

$$u_z = t_{zx} \tau_{zx} K \cos \theta \quad (4(c))$$

$$\text{ここで, } K = \frac{\alpha D}{2E}$$

$m$ ,  $n$ ,  $s$ ,  $t$  は  $\alpha$  (図-1参照),  $\beta$  (図-1参照),  $\gamma$  (図-1参照),  $z$  (図-1参照),  $v$  に依存した定数である.  $\sigma_y, \tau_{xy}, \tau_{yz}$  による変位成分は座標変換と重ね合わせにより求めることができ, まとめると測点 P (図-1(b)) で生じる面内と軸方向の変位成分は式のように表すことができる.

$$\begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix} = K \begin{bmatrix} m_x \cos \theta & n_x \cos \theta & m_z \cos \theta \\ n_x \sin \theta & m_x \sin \theta & m_z \sin \theta \\ s_x + t_x \cos 2\theta & s_x - t_x \cos 2\theta & s_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} \quad (5)$$

### (3) 観測方程式

孔底変形法で計測するオーバーコアリングに伴う7つの測線に沿った伸縮に関する観測方程式は以下のようである.

a) パイロットホール の  $z = z_m$  断面における3方向の径

変化  $U(\theta)$

$z = z_m$  断面上で  $\theta$  の方向を有する直径の両端を測点 P, Q とする. 測点 P, Q の直径方向の伸縮による径変化  $U(\theta)$  は, 測点 P, Q の半径方向変位成分  $u_r(\theta)$ ,  $u_r(\theta + \pi)$  を用いて次のような式で表わされる.

$$\begin{aligned} U(\theta) &= u_r(\theta) + u_r(\theta + \pi) \\ &= 2K[(m_x \cos^2 \theta + n_x \sin^2 \theta) \sigma_x \\ &\quad + (m_x - n_x) \tau_{xy} \sin 2\theta + m_{zx} \tau_{yz} \sin^2 \theta \\ &\quad + m_z \tau_{zx} \cos^2 \theta] \end{aligned} \quad (6)$$

b) パイロットホール の断面  $z = z_c$  と孔底 ( $z = 0$ ) における円(直径:  $\beta D$ ) 上の互いに  $90^\circ$  離れた点との4つの軸方向相対変位  $\Delta u_z$

$$\Delta u_z(\theta) = u_z(\theta) - u_z^{**} \quad (7)$$

である. ここで,  $u_z(\theta)$  は孔底における円上の点の変位,  $u_z^{**}$  はパイロットホール の断面  $z = z_c$  の孔壁の4方向 ( $\theta = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ ) の孔壁に設けた測点の軸方向変位  $u_z$  の平均値であり,

$$\begin{aligned} u_z^{**} &= \{u_z(r_m, 0, z_c) + u_z(r_m, \pi/2, z_c) \\ &\quad + u_z(r_m, \pi, z_c) + u_z(r_m, 3\pi/2, z_c)\} / 4 \\ &= K \{s_x(r_m, z_c)(\sigma_x + \sigma_y) \\ &\quad + s_z(r_m, z_c) \sigma_z\} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{ここで, } r_m = \frac{\alpha D}{2} \text{ である.}$$

$\Delta u_z(\theta)$  と遠方の応力  $\{\sigma\}$  との関係は次のようである.

$$\begin{aligned} \Delta u_z(\theta) &= A[\{s_x + t_x \cos 2\theta\} \sigma_x \\ &\quad + \{s_x - t_x \cos 2\theta\} \sigma_y + s_z \sigma_z] \end{aligned}$$

$$+ 2t_x \sin 2\theta_{xy} + t_{zx} \sin \theta_{yz} \\ + t_3 \cos \theta_{zx} ] - u_z^{**} \quad (9)$$

### 3. 測定器の構造と測定の手順

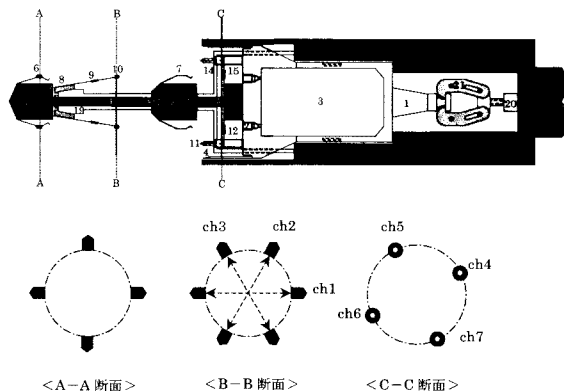


図-3 測定器の構造。1:測定器(収納部), 2:リード線取入孔, 3:データロガー, バッテリー, 4:保護円筒, 5:測定器(計測部), 6:固定用板バネ1, 7:固定用板バネ2, 8:台座1(孔径変化センサー用), 9:片持ち梁(孔径変化センサー), 10:測定ピン(孔径変化ピン), 11:測定ピン(軸変化センサー), 12:片持ち梁(軸変位センサー), 13:台座4(軸変化センサー), 14:コイルスプリング, 15:測定ピンガイド, 16:台座2(固定用板バネ2用), 17:台座3(固定用板バネ1用), 18:コイルスプリング, 19:固定用楔(孔径変化台座固定用), 20:エアピストン, 21:フック, 22:挿入部, 23:ロッド

測定器の構造を図-3に示す。3方向の径変位は、台座に等間隔60°で固定されている6個の片持ち梁センサーによって計測する。各片持ち梁センサーには二枚のひずみゲージが表裏に貼付されている。一つの径方向成分は二つの片持ち梁センサーが直径の両端になって径方向のみに動き測定される。

4方向の軸変位は台座に90°等間隔で固定されている4個の片持ち梁センサーによって計測する。各片持ち梁センサーは台座に固定されており軸方向のみに変位する。

7成分の変位の内、径方向の3成分をch1, ch2, ch3, 軸方向の4成分をch4, ch5, ch6, ch7とする。マイクロメーターを用いて評価した感度係数を表-1に示す。

孔底変形法に基づく岩盤応力測定作業の1サイクルは次のようである(図-4)。

表-1 片持ち梁式変位計の感度係数 (μ strain/mm)

|     | 一回目   | 二回目   | 三回目   | 四回目   | 平均    |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| ch1 | -2482 | -2511 | -2525 | -2525 | -2511 |
| ch2 | -2578 | -2609 | -2617 | -2619 | -2606 |
| ch3 | -2564 | -2600 | -2603 | -2601 | -2592 |
| ch4 | -4734 | -4721 | -4744 | -4741 | -4735 |
| ch5 | -4638 | -4642 | -4643 | -4663 | -4646 |
| ch6 | -4773 | -4792 | -4801 | -4785 | -4788 |
| ch7 | -4812 | -4829 | -4836 | -4823 | -4825 |

- 1) データロガーの電源を入れ、測定器を挿入部(22)に組み込む。挿入部の後部にロッド(23)を取り付け、挿入部ごと測定器を観測孔内に送り込む。必要に応じてロッドを継ぎ足す。
- 2) 測定器の先端がパイロットホールに入り、挿入部の先端が孔底に当たった(図-4(a))ことを確認した後、圧縮空気を送り込むと、エアピストン(20)の作用でフック(21)が開く(図-4(b))ので、ロッド(23)を挿入部とともに引き出す。
- 3) ビットを孔底に挿入し(図-4(c))、オーバーコアリング穿孔作業をする。
- 4) コアチューブを回収する。測定器はコアチューブの中に収納された状態になっている。
- 5) データロガーをパソコンに接続し、測定結果を取り込む。

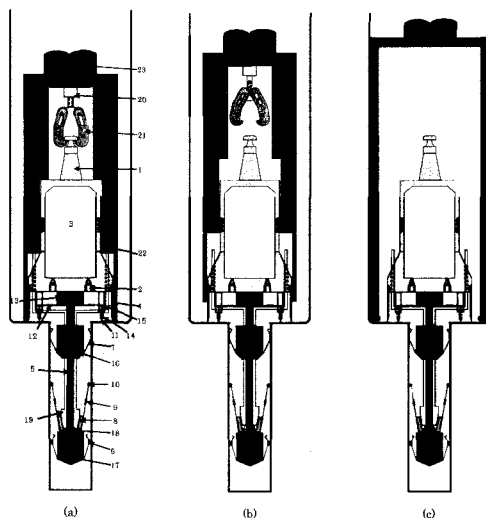


図-4 測定の様式図

### 4. 模型実験

測定器の信頼性を確認するために岩石ブロックの二軸圧縮試験を行った。試験には円形の反力棒・250 mm

×250 mmのフラットジャッキ・油圧ポンプなどを用い、応力解放を模擬した。

### (1) 岩石試料

250 mm×250 mm×250 mmの支笏溶結凝灰岩の立方体ブロックを用意し、1つの面の中央に直径30 mm、深さ120 mmのパイロットホールを穿孔する。試料表面を孔底面とみなし、中心点を原点Oとする。試料表面にはN, E, W, Sの方向表示を書き込み、パイロットホールの軸方向を直交座標系の $z$ 軸とする。E, N方向をそれぞれ $x$ ,  $y$ 軸とする。

ブロックのヤング率は、円柱形供試体に関する一軸圧縮試験により評価した。直径30 mm、長さ60 mmの円柱形の供試体を4本作製し、80℃の恒温槽で1日間乾燥させ、2日間常温大気中に静置した後試験に供した。ひずみは供試体中央部に貼付した有効長5 mmのひずみゲージにより計測した。

Instron 社製 5586 型材料試験機(300 kN, 機械式)を用いて、供試体に0.520 MPa/minの载荷速度で負荷し、応力が1.040 MPaに達したときに、その値を1分間保ち、その後、除荷する過程を2回繰返して得られたヤング率を表-2に示す。

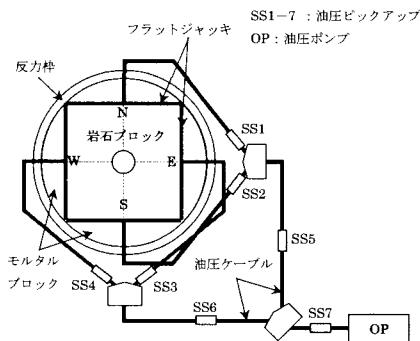


図-5 二軸試験の模式図

表-2 支笏溶結凝灰岩のヤング率

| 供試体   | 支笏溶結凝灰岩   |
|-------|-----------|
| 供試体 1 | 4.666 GPa |
| 供試体 2 | 7.723 GPa |
| 供試体 3 | 4.417 GPa |
| 供試体 4 | 3.823 GPa |
| 平均値   | 4.302 GPa |

### (2) 二軸圧縮試験方法

岩石ブロックとフラットジャッキを反力枠にセットする(図-5)。本試験では1個の油圧ポンプを加圧することにより全てのフラットジャッキに等しい油圧が作用するようにしてある。各油圧ケーブルには応力セン

サーを接続して油圧を確認する。

測定器は図-6に示すように径方向のch1成分をブロックの方向表示EW向きに一致させてパイロットホールの中にセットした。2.030 MPaの応力を作用させ1分間保ち、その後、除荷するときの変形を計測する。

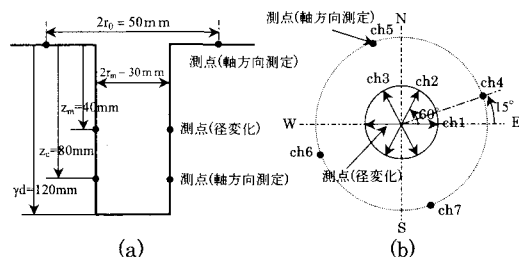


図-6 試験における計測断面

### (3) 測定内容及び観測方程式

本試験では $z_m = -40$  (mm),  $z_c = -80$  (mm),  $r_0 = 25$  (mm)である。

上記の条件で、実験に用いたブロックに対して三次元有限要素法による数値解析を行い、観測方程式を求めた。なお、計算はフラットジャッキの断面積220 mm×220 mmに作用する荷重が、ブロックの断面積250 mm×250 mmに平均的に作用していると仮定して実施した(図-7)。

求めた観測方程式は以下のようである。

$$\{U\} = K[A]\{\sigma\} \quad (10)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 4.647 & -1.567 & -0.320 & 0.000 & 0.000 & -0.254 \\ -0.014 & 3.094 & -0.320 & 5.382 & -0.191 & -0.064 \\ -0.014 & 3.094 & -0.320 & -5.382 & -0.191 & -0.064 \\ -0.604 & -0.949 & 4.111 & 0.199 & 1.136 & 4.235 \\ -0.949 & -0.604 & 4.111 & -0.199 & 4.235 & -1.136 \\ -0.604 & -0.949 & 4.111 & 0.199 & -1.136 & -4.235 \\ -0.949 & -0.604 & 4.111 & -0.199 & 4.235 & 1.136 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\{U\} = \left\{ U(0), U\left(\frac{\pi}{3}\right), U\left(\frac{2\pi}{3}\right), \Delta u_z\left(\frac{\pi}{12}\right), \Delta u_z\left(\frac{7\pi}{12}\right), \Delta u_z\left(\frac{13\pi}{12}\right), \Delta u_z\left(\frac{19\pi}{12}\right) \right\}^T$$

$\{\sigma\}$ はブロックに载荷された応力である。 $\{\sigma\}$ は以下のよう計算することができる。

$$\{\sigma\} = \frac{1}{K} \left\{ [A]^T [A] \right\}^{-1} [A]^T \{U\} \quad (12)$$

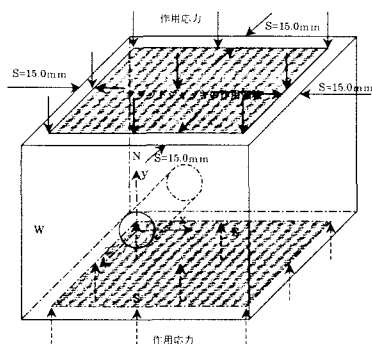


図-7 ブロックとフラットジャッキ圧の作用領域

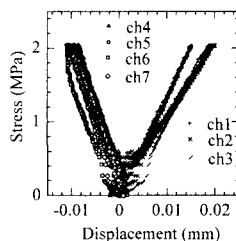


図-8 応力 - 変位線図

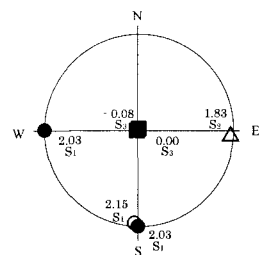


図-9 測定された最大( $S_1$ ), 中間( $S_2$ ), 最小( $S_3$ )主応力 (白塗り)と作用させた応力(黒塗り) (下半球ステレオ投影)

## 5. 試験結果

応力と変位は略線形な関係を示した(図-8)。除荷に伴う変位量の計測結果を表-3に示す。これらの変形量を、供試体を用いた一軸圧縮試験で得たヤング率 $E$ や仮定したポアソン比 $\nu$  0.25とともに(12)に代入し、求めた応力を作用させた応力と比較して表-4、図-9に示す。主応力値に関する最大の誤差は9.8%であった。

表-3 測定器で計測された変位( $\mu$ m)

| センサー | ch1 | ch2 | ch3 | ch4 | ch5 | ch6 | ch7 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 計測変位 | 38  | 51  | 49  | -51 | -40 | -51 | -47 |

表-4 観測方程式を用いた評価応力(MPa)

|        | $\sigma_x$ | $\sigma_y$ | $\sigma_z$ | $\tau_{xy}$ | $\tau_{yz}$ | $\tau_{zx}$ |
|--------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 作用応力   | 2.030      | 2.030      | 0          | 0           | 0           | 0           |
| 計算評価応力 | 1.830      | 2.145      | -0.081     | 0.018       | 0.042       | -0.016      |

## 6. 結言

孔底変形法による三次元応力測定方法の理論を示し、開発した測定器の構造について説明した。また、支笏溶結凝灰岩ブロックを用いた二軸試験による測定精度のチェック結果も示した。

本方法は、変位計を用いているため、応力解放時の変形が比較的大きい岩盤における岩盤応力の迅速な測定に有用と考えられるが、今後、二軸等方圧以外での測定精度や原位置への応用等について検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) H. N. Ghimire, 石島 洋二, 菅原 隆之, 中間 茂雄: 資源と素材, Vol. 120, No. 1, pp.32-38, 2004.

## DEVELOPMENT OF 3-DIMENSIONAL STRESS MEASUREMENT SYSTEM BY BOREHOLE BOTTOM DEFORMATION METHOD

Kiha LEE, Yoji ISHIJIMA, Takayuki SUGAWARA and Yoshiaki FUJII

A 3-dimensional stress measurement system based on the borehole bottom deformation method, which is one of the stress relief methods, was developed. A pilot borehole is drilled from the bottom of a borehole and the stress meter is inserted into the pilot borehole in the method. The borehole is advanced as an overcoring and the deformations in seven directions are measured by cantilever type-sensors. Using the cantilever type-sensors saves time for hardening of glue. No cable connection between the stress meter and a data logger is necessary since a compact data logger is installed in the stress meter. The accuracy of the stress meter was confirmed by a biaxial test for a Shikotsu welded tuff block although in-situ tests have not been carried out yet.