円錐孔底ひずみ法の直交異方性岩盤への適用*

坂口 清敏¹ 宇佐美 順也² 木崎 彰久³

Application of the Compact Conical-ended Borehole Overcoring Technique to Orthotropic Rock

by Kiyotoshi SAKAGUCHI^{a*}, Junya USAMI^b and Akihisa KIZAKI^c

a. Associate Professor, Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, 6-6-20, Aramaki-Aza-Aoba, Aobaku, Sendai, 980-8579, Japan (*Corresponding author, E-mail: saka@mail.kankyo.tohoku.ac.jp)

b. JFE Steel Corporation

c. Research Associate, Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

Stress-measurement methods based on the overcoring method assume that the rock mass is linearly elastic, isotropic, continuous, and homogeneous. However, a rock mass is actually anisotropic to some degree.

In this study, we carried out theoretical, numerical and experimental studies to apply the Downward Compact Conical-ended Borehole Overcoring technique to an orthotropic rock. Numerical experiments with the use of a 3D-FEM analysis were conducted to confirm the applicability and efficiency of the proposed measurement theory. The results showed that the measurement includes a non-negligible error if we do not consider the anisotropy of rock when such anisotropy is strong. For example, the isotropic assumption method gives an error of more than 20 % in the estimation of stress when the degree of anisotropy in the direction of the maximum applied stress exceeds 20 %. On the other hand, the error is less than 5 % in the orthotropic assumption method. Finally, laboratory experiments for four kinds of orthotropic rocks using a true-triaxial compressive apparatus were carried out to verify the efficiency of the proposed measurement theory. These experiments also verified that the proposed method is suitable for use in orthotropic rock.

KEY WORDS: Orthotropic Rock, Compact Conical-ended Borehole Overcoring Technique, In-situ Rock Stress Measurement, Overcoring Method

1. 緒 言

円錐孔底ひずみ法^{1,2)}をはじめとする応力解放法に基づく地圧測定法のほとんどは、岩盤を均質等方な線形弾性であると仮定している。しかしながら、岩盤は程度の差こそあれ異方性を持つことが知られている。異方性の程度によっては、従来の等方性を仮定した測定理論に基づいて地圧測定を行った場合、重大な過ちを冒すことが指摘されている³⁾。

応力解放法の異方性岩盤への適用に関しては、Boresstto et al.⁴⁾が Doorstopper 法に対して、尾原ら⁵⁾が円錐孔底ひずみ法に対して適用を検討している。Boresstto et al. は直交異方性岩盤に対する理論を構築し、異方性岩盤に対してそれを均質等方と仮定して応力を評価した場合と大きな差が出る事を証明した。尾原らは層異方性岩盤の層に対して直交する方向にボアホール軸を一致させた場合の横等方性岩盤への適用について検討を行っている。横等方性岩盤の平均ヤング率を用いることによって平均的には数%以

内の誤差内で初期応力の評価が可能という結果を得ている。しかし、層に対して直交する方向にボアホール軸を一致させた場合のみにしか検討しておらず、一般的とはいえない。

そこで本研究では、円錐孔底ひずみ法を直交異方性岩盤へ適用するための理論的・実験的検討を行った。具体的には、円錐孔底ひずみ法を鉛直下向きボアホールに適用できるようにした下向き円錐孔底ひずみ法^{6,7)}を対象に、直交異方性岩盤に適用するための測定理論を構築し、その適用性について数値実験によって検討した。さらに、直交異方性を考慮した地圧測定法の有用性、必要性を検証するために、真三軸圧縮試験装置を用いて実験的検討を行った。なお、本研究では、下向き円錐孔底ひずみ法を対象にした記述となっているが、本論で記載の内容はそのまま、円錐孔底ひずみ法に適用できるので、表題ではより一般的な方法である「円錐孔底ひずみ法の適用」としている。また、本研究では、岩盤は異方性を持つ均質弾性体であると仮定する。

2. 測 定 理 論

異方性の主軸の方向と弾性係数が既知の直交異方性岩盤に対する孔底ひずみと岩盤応力の関係を Amadei (1983)⁸⁾ に倣い誘導する。

Fig. 1 に示すようにグローバル座標系 (X, Y, Z)、ボアホール座標系 (x, y, z)、直交異方性の主軸を定義する座標系 (x', y', z')、

*2012 年 12 月 11 日受付 2013 年 3 月 8 日受理

1. 正会員 博士 (工学) 東北大学大学院 環境科学研究科 准教授

2. 修士 (環境科学) JFE スチール (株)

3. 正会員 博士 (環境科学) 東北大学大学院 環境科学研究科 助教

[著者連絡先] FAX: 022-795-7381 (東北大学・坂口)

E-mail: saka@mail.kankyo.tohoku.ac.jp

キーワード: 直交異方性, 円錐孔底ひずみ法, 原位置応力測定, 応力解放法

Fig.1 Definition of coordinate system and strain measurement.

ボアホール孔底の球座標系 (ρ, θ, ϕ) を定義する。また, Fig. 1 (b) に示すように, グローバル座標系に対する異方性の面の傾斜角を ψ (図中 $\delta = \pi/2 - \psi$), 傾斜方位角を β とし, Fig. 1 (c) に示すように, グローバル座標系に対するボアホールの上げ角を δ_n , 回転角を β_n とする。また, 応力テンソル σ_{ij} とひずみテンソル ε_{ij} は対称性を考慮し, 各座標系における応力ベクトルとひずみベクトルを以下のように定義する。

$$\begin{aligned} \{\varepsilon\}_{XYZ}^T &= \{\varepsilon_X \quad \varepsilon_Y \quad \varepsilon_Z \quad \gamma_{YZ} \quad \gamma_{ZX} \quad \gamma_{XY}\} \\ \{\varepsilon\}_{xyz}^T &= \{\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx} \quad \gamma_{xy}\} \\ \{\varepsilon'\}_{x'y'z'}^T &= \{\varepsilon_{x'} \quad \varepsilon_{y'} \quad \varepsilon_{z'} \quad \gamma_{y'z'} \quad \gamma_{z'x'} \quad \gamma_{x'y'}\} \quad \dots\dots\dots (1) \\ \{\varepsilon\}_{\rho\theta\phi}^T &= \{\varepsilon_\rho \quad \varepsilon_\theta \quad \varepsilon_\phi \quad \gamma_{\theta\phi} \quad \gamma_{\phi\rho} \quad \gamma_{\rho\theta}\} \\ \{\sigma\}_{XYZ}^T &= \{\sigma_X \quad \sigma_Y \quad \sigma_Z \quad \tau_{YZ} \quad \tau_{ZX} \quad \tau_{XY}\} \\ \{\sigma\}_{xyz}^T &= \{\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx} \quad \tau_{xy}\} \\ \{\sigma'\}_{x'y'z'}^T &= \{\sigma_{x'} \quad \sigma_{y'} \quad \sigma_{z'} \quad \tau_{y'z'} \quad \tau_{z'x'} \quad \tau_{x'y'}\} \end{aligned}$$

異方性の主軸座標系 (x', y', z') における構成式は次式で与えられる。

$$\{\varepsilon'\}_{x'y'z'} = [H'] \{\sigma'\}_{x'y'z'} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで, $[H']$ は 9 個の弾性係数 (E : ヤング率, G : 剛性係数, ν : ポアソン比) によって次式で与えられる。

$$[H'] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{x'}} & -\frac{\nu_{x'y'}}{E_{y'}} & -\frac{\nu_{x'z'}}{E_{z'}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{x'y'}}{E_{y'}} & \frac{1}{E_{y'}} & -\frac{\nu_{y'z'}}{E_{z'}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{x'z'}}{E_{z'}} & -\frac{\nu_{y'z'}}{E_{z'}} & \frac{1}{E_{z'}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{y'z'}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{z'x'}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{x'y'}} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$\{\sigma'\}_{x'y'z'}$ と $\{\sigma\}_{XYZ}$ には次の関係式がある。

$$\{\sigma'\}_{x'y'z'} = [T_\sigma'] \{\sigma\}_{XYZ} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに, $[T_\sigma']$ は座標変換マトリクスであり, x', y', z' 方向の

単位ベクトルの方向余弦を式 (5) とし, 式 (6) で与えられる。

$$\begin{aligned} l_{x'} &= \cos\delta \cos\beta, & l_{y'} &= -\sin\delta \cos\beta, & l_{z'} &= -\sin\beta, \\ m_{x'} &= \sin\delta, & m_{y'} &= \cos\delta, & m_{z'} &= 0, \quad \dots (5) \\ n_{x'} &= \cos\delta \sin\beta, & n_{y'} &= -\sin\delta \sin\beta, & n_{z'} &= \cos\beta. \end{aligned}$$

$$[T_\sigma'] = \begin{bmatrix} l_{x'}^2 & m_{x'}^2 & n_{x'}^2 & 2m_{x'}n_{x'} & 2n_{x'}l_{x'} & 2l_{x'}m_{x'} \\ l_{y'}^2 & m_{y'}^2 & n_{y'}^2 & 2m_{y'}n_{y'} & 2n_{y'}l_{y'} & 2l_{y'}m_{y'} \\ l_{z'}^2 & m_{z'}^2 & n_{z'}^2 & 2m_{z'}n_{z'} & 2n_{z'}l_{z'} & 2l_{z'}m_{z'} \\ l_{y'}l_{z'} & m_{y'}m_{z'} & n_{y'}n_{z'} & m_{y'}n_{z'} + m_{z'}n_{y'} & n_{y'}l_{z'} + n_{z'}l_{y'} & l_{y'}m_{z'} + l_{z'}m_{y'} \\ l_{z'}l_{x'} & m_{z'}m_{x'} & n_{z'}n_{x'} & m_{z'}n_{x'} + m_{x'}n_{z'} & n_{z'}l_{x'} + n_{x'}l_{z'} & l_{z'}m_{x'} + l_{x'}m_{z'} \\ l_{x'}l_{y'} & m_{x'}m_{y'} & n_{x'}n_{y'} & m_{x'}n_{y'} + m_{y'}n_{x'} & n_{x'}l_{y'} + n_{y'}l_{x'} & l_{x'}m_{y'} + l_{y'}m_{x'} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (6)$$

同様に, $\{\varepsilon'\}_{x'y'z'}$ と $\{\varepsilon\}_{XYZ}$ には次式が成り立つ。

$$\{\varepsilon'\}_{x'y'z'} = [T_\varepsilon'] \{\varepsilon\}_{XYZ} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$[T_\varepsilon']$ はひずみに関する座標変換マトリクスであり,

$$[T_\varepsilon']^{-1} = [T_\sigma']^T, \quad [T_\varepsilon']^T = [T_\sigma']^{-1} \quad \dots\dots\dots (8)$$

である。

式 (4) と式 (7) を式 (2) に代入し, 式 (8) を用いると, グローバル座標系 (X, Y, Z) に置ける構成式が得られる。

$$\{\varepsilon\}_{XYZ} = [T_\sigma']^T [H'] [T_\sigma'] \{\sigma\}_{XYZ} \quad \dots\dots\dots (9)$$

次にボアホール座標系 (x, y, z) について考える。 $\{\sigma\}_{xyz}$ と $\{\sigma\}_{XYZ}$ は次の関係式がある。

$$\{\sigma\}_{xyz} = [T_\sigma] \{\sigma\}_{XYZ} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで $[T_\sigma]$ は

$$[T_\sigma] = \begin{bmatrix} l_x^2 & m_x^2 & n_x^2 & 2m_xn_x & 2n_xl_x & 2l_xm_x \\ l_y^2 & m_y^2 & n_y^2 & 2m_yn_y & 2n_yl_y & 2l_ym_y \\ l_z^2 & m_z^2 & n_z^2 & 2m_zn_z & 2n_zl_z & 2l_zm_z \\ l_yl_z & m_y m_z & n_y n_z & m_y n_z + m_z n_y & n_y l_z + n_z l_y & l_y m_z + l_z m_y \\ l_z l_x & m_z m_x & n_z n_x & m_z n_x + m_x n_z & n_z l_x + n_x l_z & l_z m_x + l_x m_z \\ l_x l_y & m_x m_y & n_x n_y & m_x n_y + m_y n_x & n_x l_y + n_y l_x & l_x m_y + l_y m_x \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (11)$$

x, y, z 方向の単位ベクトルの方向余弦は式 (12) で与えられる。

$$\begin{aligned} l_x &= \sin \beta n, & l_y &= -\sin \delta n \cos \beta n, & l_z &= \cos \delta n \cos \beta n, \\ m_x &= 0, & m_y &= \cos \delta n, & m_z &= \sin \delta n, & \cdots (12) \\ n_x &= -\cos \beta n, & n_y &= -\sin \delta n \sin \beta n, & n_z &= \cos \delta n \sin \beta n. \end{aligned}$$

同様に、 $\{\varepsilon\}_{xyz}$ と $\{\varepsilon\}_{XYZ}$ は次の関係式がある。

$$\{\varepsilon\}_{xyz} = [T_\varepsilon] \{\varepsilon\}_{XYZ} \cdots \cdots \cdots (13)$$

$[T_\varepsilon]$ はひずみに関する座標変換マトリクスであり、

$$[T_\varepsilon]^{-1} = [T_\sigma]^T, \quad [T_\varepsilon]^T = [T_\sigma]^{-1} \cdots \cdots \cdots (14)$$

が成り立つ。

式 (10) と式 (13) を式 (9) に代入し、式 (14) を用いると、ボアホール座標系 (x, y, z) に置ける構成式が得られる。

$$\{\varepsilon\}_{xyz} = [T_\varepsilon][T_\sigma]^{-1}[H']^{-1}[T_\sigma][T_\varepsilon]^T \{\sigma\}_{xyz} \cdots \cdots \cdots (15)$$

ここで、

$$[A] = [T_\varepsilon][T_\sigma]^{-1}[H']^{-1}[T_\sigma][T_\varepsilon]^T \cdots \cdots \cdots (16)$$

とおけば、

$$\{\varepsilon\}_{xyz} = [A] \{\sigma\}_{xyz} \cdots \cdots \cdots (17)$$

式 (17) に式 (10) を代入すると、無限遠方から作用する応力 $\{\sigma\}_{XYZ}$ によってボアホール周りに生ずるひずみの関係式が得られる。

$$\{\varepsilon\}_{xyz} = [A][T_\sigma] \{\sigma\}_{XYZ} \cdots \cdots \cdots (18)$$

さて、孔底に定義する球座標系におけるひずみ $\{\varepsilon\}_{\rho\theta\phi}$ とボアホールに定義する直交座標系におけるひずみ $\{\varepsilon\}_{xyz}$ には次の関係がある。

$$\{\varepsilon\}_{\rho\theta\phi} = [T_{\rho\theta\phi}] \{\varepsilon\}_{xyz} \cdots \cdots \cdots (19)$$

ここで $[T_{\rho\theta\phi}]$ は ρ, θ, ϕ 方向の単位ベクトルの方向余弦を用いて、

$$\begin{aligned} [T_{\rho\theta\phi}] = & \begin{bmatrix} l_\rho^2 & m_\rho^2 & n_\rho^2 & m_\rho n_\rho & n_\rho l_\rho & l_\rho m_\rho \\ l_\theta^2 & m_\theta^2 & n_\theta^2 & m_\theta n_\theta & n_\theta l_\theta & l_\theta m_\theta \\ l_\phi^2 & m_\phi^2 & n_\phi^2 & m_\phi n_\phi & n_\phi l_\phi & l_\phi m_\phi \\ 2l_\theta l_\phi & 2m_\theta m_\phi & 2n_\theta n_\phi & m_\theta n_\phi + m_\phi n_\theta & n_\theta l_\phi + n_\phi l_\theta & l_\theta m_\phi + l_\phi m_\theta \\ 2l_\phi l_\rho & 2m_\phi m_\rho & 2n_\phi n_\rho & m_\phi n_\rho + m_\rho n_\phi & n_\phi l_\rho + n_\rho l_\phi & l_\phi m_\rho + l_\rho m_\phi \\ 2l_\rho l_\theta & 2m_\rho m_\theta & 2n_\rho n_\theta & m_\rho n_\theta + m_\theta n_\rho & n_\rho l_\theta + n_\theta l_\rho & l_\rho m_\theta + l_\theta m_\rho \end{bmatrix} \\ & \cdots \cdots \cdots (20) \end{aligned}$$

で与えられる。なお、式 (20) 中の方向余弦は式 (21) で与えられる。

$$\begin{aligned} l_\rho &= \cos \theta \sin \phi, & l_\theta &= -\sin \theta, & l_\phi &= \cos \theta \cos \phi, \\ m_\rho &= \sin \theta \sin \phi, & m_\theta &= \cos \theta, & m_\phi &= \sin \theta \cos \phi, \cdots \cdots (21) \\ n_\rho &= \cos \phi, & n_\theta &= 0, & n_\phi &= -\sin \phi. \end{aligned}$$

ここで、16 素子下向き円錐孔底ひずみ法では $\phi=30^\circ$ であり、測定されるひずみ成分は Fig. 1 (d) に示す $\varepsilon_\rho, \varepsilon_\theta$ だけなので、式 (20) は、

$$[T_{\rho\theta\phi}] = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} \cos^2 \theta & \frac{1}{4} \sin^2 \theta & \frac{3}{4} & \frac{\sqrt{3}}{4} \sin \theta & \frac{\sqrt{3}}{4} \cos \theta & \frac{1}{8} \sin 2\theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2} \sin 2\theta \end{bmatrix} \cdots \cdots \cdots (22)$$

となる。

式 (18) を式 (19) に代入して孔底形状による応力集中も考慮に入れると、次の観測方程式が得られる。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_\rho \\ \varepsilon_\theta \end{Bmatrix} = [T_{\rho\theta\phi}][A][C][T_\sigma] \{\sigma\}_{XYZ} \cdots \cdots \cdots (23)$$

ここで $[C]$ は応力集中係数マトリクスであり、測定位置によって異なり、16 素子の場合、 $[C]_{\theta=0^\circ}$, $[C]_{\theta=45^\circ}$, $[C]_{\theta=90^\circ}$, $[C]_{\theta=135^\circ}$, $[C]_{\theta=180^\circ}$, $[C]_{\theta=225^\circ}$, $[C]_{\theta=270^\circ}$, $[C]_{\theta=315^\circ}$ の 8 パターンが存在し、16 個の観測方程式が得られる。

$$[C] = \begin{bmatrix} c_{x-x} & c_{x-y} & c_{x-z} & c_{x-yz} & c_{x-zx} & c_{x-xy} \\ c_{y-x} & c_{y-y} & c_{y-z} & c_{y-yz} & c_{y-zx} & c_{y-xy} \\ c_{z-x} & c_{z-y} & c_{z-z} & c_{z-yz} & c_{z-zx} & c_{z-xy} \\ c_{yz-x} & c_{yz-y} & c_{yz-z} & c_{yz-yz} & c_{yz-zx} & c_{yz-xy} \\ c_{zx-x} & c_{zx-y} & c_{zx-z} & c_{zx-yz} & c_{zx-zx} & c_{zx-xy} \\ c_{xy-x} & c_{xy-y} & c_{xy-z} & c_{xy-yz} & c_{xy-zx} & c_{xy-xy} \end{bmatrix} \cdots \cdots \cdots (24)$$

これらは三次元有限要素法などの数値解析で求めることになる。すなわち、 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}$ の単位の応力成分が独立に作用する場合について、各位置における $[C]$ を求める必要がある。

16 個の観測方程式は最小二乗法で解き、応力の最確値 $\{\sigma\}_{XYZ}$ を求める。すなわち、式 (23) を

$$[\varepsilon_{\rho\theta}] = [B] \{\sigma\}_{XYZ} \cdots \cdots \cdots (25)$$

とすると、応力の最確値は最小二乗法の原理により

$$\{\sigma\}_{XYZ} = [B]^T \cdot [B]^{-1} \cdot [B]^T [\varepsilon_{\rho\theta}] \cdots \cdots \cdots (26)$$

となる。ここに、

$$[B] = [T_{\rho\theta\phi}][A][C][T_\sigma] \cdots \cdots \cdots (27)$$

である。応力の最確値を決定するにあたり異方性の影響を含むのは $[A]$ および $[C]$ であり、式 (26) からわかるように、これらの行列が複数回乗じられることから、これを考慮しない場合、異方性の程度によっては応力の計算結果に無視できない誤差が含まれる可能性が出てくる。特に $[C]$ は、応力の大きさに直接影響する係数である。

3. 数値実験による適用性の検討

構築した測定理論の検証と異方性を考慮した測定方法の有用性を検証するために数値実験を行った。16 素子下向き円錐孔底ひずみ法 (HQ サイズのボアホール) を対象として、まず、各ひずみ測点における応力集中係数 $[C]$ を三次元有限要素法を用いて求めた。ここでは簡単のために、異方性の主軸の一つがボーリング軸に一致し、ボアホール座標系がグローバル座標系と一致する場合を対象とした。また、各方向のヤング率は $E_x = 1$ GPa, $E_y = 2$ GPa, $E_z = 1.5$ GPa, ポアソン比は $\nu_{y'z'} = \nu_{z'x'} = \nu_{x'y'} = 0.20$ とした。

本例は、ヤング率の異方性が最大 2 倍であり、かなり大きな異方性を有する場合であるが、コア試験においても、弾性波速度試験や載荷試験により、方向によって 2 倍程度以上の弾性係数の異方性が見られる例が多数報告されており⁹⁾、現実とかけ離れた条件ではないと考える。

Fig. 2 に解析モデルを示す。(a) は陰面処理したもの、(b) は陰面処理をしていないもの、(c) は内部形状を示す。ボアホール孔底がモデルの中心点となる。要素数は 11,152、節点数は 47,601 で

Fig.2 3D-FEM model for numerical experiment.

Table 1 Results of stress estimations.

Applied stress		Isotropic assumption		Orthotropic assumption	
		Estimated stress	error (%)	Estimated stress	error (%)
σ_X	2.000	2.483	24.2	1.996	0.2
σ_Y	5.000	4.173	16.5	4.998	0.0
σ_Z	1.000	0.915	8.5	1.008	0.8
τ_{YZ}	0.000	0.000	0.0	0.000	0.0
τ_{ZX}	0.000	0.000	0.0	0.000	0.0
τ_{XY}	-1.000	-1.109	10.9	-1.000	0.0

ある。要素は六面体 20 節点のアイソパラメトリック要素である。

本研究では、対象モデルに対して、三次元応力を作用させ（以下、载荷応力とする）、その時に生ずる測定位置における孔底ひずみを求め、その孔底ひずみを測定ひずみとして、1) 等方性を仮定して応力を計算した場合（異方性モデルの平均ヤング率 1.5 GPa を用い、従来の測定理論に基づき応力を計算）と 2) 直交異方性を考慮し 2. に基づいて計算した場合（各方向のヤング率を用いる）の結果について、誤差を比較することにより適用性を検討した。ここでは結果の 1 例を示す。なお、誤差は次式で評価した。

$$\text{error} = \frac{|\sigma^{\text{cal}} - \sigma^{\text{th}}|}{\sigma^{\text{th}}} \times 100 \quad (\%) \quad \dots\dots\dots (28)$$

ここに、 σ^{cal} は評価応力、 σ^{th} は载荷応力である。

モデルに与えた応力条件は、 $\sigma_X = 2 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_Y = 5 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_Z = 1 \text{ MPa}$ 、 $\tau_{YZ} = \tau_{ZX} = 0 \text{ MPa}$ 、 $\tau_{XY} = -1 \text{ MPa}$ である。結果を Table 1 にまとめ、主応力の方向を Fig. 3 に示す。なお、式 (28) で $\sigma^{\text{th}} = 0$ の場合は、式 (28) に依らず、評価応力値から $\text{error} = 0.0$ と判断した。

等方性を仮定した場合、誤差がもっとも大きい応力成分は σ_X で、24.2% である。一方、直交異方性として計算した場合は载荷応力と各評価応力の誤差は 0.8% 以下である。異方性を考慮した

Fig.3 Comparison of the directions of the principal stresses (lower hemisphere).

Fig.4 Sampling direction of rock specimens for uniaxial compressive test.

場合の評価応力の主方向は、载荷応力のそれと一致しており。主応力の大きさもほぼ等しいという結果が得られた。一方、等方性と仮定した場合は、傾斜に相違は殆どないが、傾斜方位については、反時計回りに約 13 度回転している。

以上より、異方性の強い岩盤を対象として地圧測定を行う場合、その異方性を考慮しなければ、誤った評価をすることが分かる。逆に、ここに示した理論に従い異方性を考慮した評価をすることで、信頼性の高い地圧計測が可能となる。

4. 実験的検討

4・1 供試体

本研究で用いた岩石は、稲田花崗岩（茨城県笠間市）、庵治花崗岩（香川県高松市）および大島花崗岩（愛媛県今治市）の粗目と細目の 4 種類である。

上記岩石の弾性定数を決定するために、Fig. 4 に示すように、異方性の主軸方向から、円柱供試体（直径 34.4mm、高さ 87 ~ 91mm）と角柱供試体（30mm×30mm×70mm）を作成した。ここで、異方性の主軸は (h, g, r) と表記する。それぞれ、 h : Hardway 面に直交する方向、 g : Grain 面に直交する方向、 r : Rift 面に直交する方向を意味する。

各供試体に対して一軸圧縮試験を行って弾性定数を決定した。一軸圧縮試験では、後述する真三軸圧縮試験における最大载荷応力 20MPa を目安に、5MPa ~ 25MPa まで 5MPa おきに载荷除荷を繰返し、それぞれの応力レベルにおける弾性回復ひずみを測定した。ひずみの測定は、円柱供試体についてはクロスゲージを 2 枚貼付し、角柱供試体については、载荷面以外の 4 面に 1 枚ずつ合計 4 枚貼付して行った。

Table 2 に角柱供試体から評価されたヤング率の測定結果をまとめる。ここで、ヤング率に関して E_h の表記は、Hardway 面に直交する方向のヤング率であることを意味する。 E_m は平均のヤング率である。ポアソン比については表への記載は省略するが、

Table 2 Young's moduli for each type of granite. (GPa)

	E_h	E_g	E_r	E_m
Inada	46.6	42.1	37.8	42.1
Aji	64.0	58.9	53.3	58.7
Oshima (coarse)	43.6	38.6	33.7	38.6
Oshima (fine)	48.8	40.1	29.8	39.6

Fig.5 A cubic specimen for the true-triaxial compressive test.
 *)DCCBO: Downward Compact Conical-ended Borehole Overcoring⁶⁾

稲田花崗岩で 0.14 ~ 0.21 (平均 0.17), 庵治花崗岩で 0.20 ~ 0.28 (平均 0.24), 大島花崗岩 (粗目) で 0.06 ~ 0.15 (平均 0.12), 大島花崗岩 (細目) で 0.09 ~ 0.19 (平均 0.14) であった。また, 円柱供試体の結果については省略するが, ヤング率については, 円柱供試体と角柱供試体の結果はほぼ等しく, ポアソン比は, 角柱供試体の結果が大きな値になる傾向があった。

さて, 異方性の程度の影響について検討するために, 異方性主軸方向のヤング率を E_i ($i = h, g, r$) とし, 以下の式によって, 異方性の主軸方向についての異方性の程度 (DoA) をそれぞれ定義することにする。

$$DoA = \frac{|E_i - E_m|}{E_m} \times 100 \quad (\%) \quad (29)$$

上式で求めた各岩石の異方性の程度 DoA を Table 3 にまとめる。異方性の程度の最大値は, 稲田花崗岩: 10.5%, 庵治花崗岩: 9.2%, 大島花崗岩 (粗目): 12.9%, 大島花崗岩 (細目): 24.7% である。

4・2 実験方法

一辺が 300mm の立方体形状の各岩石試験片に対し, Fig. 5 に示すように, 中央に HQ サイズの円錐孔底⁷⁾を加工して 16 素子のストレインセルを貼付し, フラットジャッキ式真三軸圧縮試験機を用いて, 独立三方向に載荷除荷試験を行い, 除荷時の弾性回復ひずみから載荷応力を求める。

測定された弾性回復ひずみから応力を計算する際, 等方性を仮定した場合と異方性を考慮した場合の比較を行うために 2 通りの計算を行った。すなわち, Table 2 の平均ヤング率 E_m , および平均ポアソン比を用いて計算した場合 (等方性仮定) と, それぞれの方向のヤング率, およびポアソン比を用いて, 2. の測定理論に基づいて計算した場合 (異方性考慮) の 2 通りである。なお, 式 (24) 中の応力集中係数については Fig. 6 に示すように, 立方体供試体の形状をモデル化して, 3. と同様の方法で求めた。

なお, 稲田花崗岩については, Hardway 面に円錐加工したもの, 庵治花崗岩, 大島花崗岩 (粗目) および大島花崗岩 (細目) につ

Table 3 Degree of anisotropy DoA for each granite (%). The h-axis is perpendicular to the Hardway plane, the g-axis is perpendicular to the Grain plane, and the r-axis is perpendicular to the Rift plane.

	Direction of h-axis	Direction of g-axis	Direction of r-axis
Inada	10.5	0.2	10.3
Aji	8.9	0.3	9.2
Oshima (coarse)	12.9	0.1	12.8
Oshima (fine)	17.7	1.3	24.7

Fig.6 3D-FEM model for the true-triaxial compressive test.

いては, 2 個の供試体について, Rift 面と Grain 面に円錐加工したものを用いた。いずれの場合もポアホール軸は z 軸に一致させている。

4・3 結果と考察

各岩石に対する結果の一例を Table 4 ~ Table 7 にまとめる。これらの結果は, 最大載荷応力の方向を, Rift 面に直交する方向とした場合である。表中の誤差は,

$$error = \frac{|\sigma_{meas} - \sigma_{app}|}{\sigma_{app-max}} \times 100 \quad (\%) \quad (30)$$

で求めた。ここに, σ_{meas} は測定応力, σ_{app} は載荷応力, $\sigma_{app-max}$ はそのケースにおける最大載荷応力である。式 (30) は最大載荷応力で正規化しているが, これは, 等方性仮定で応力を求めた場合, 異方性の影響が “最も明” に出るのが最大載荷応力の計算結果と考えたからである。ここでは, 等方性仮定の最大誤差をより厳しく評価したいと考えたので, 本誤差評価手法を用いた。なお, その他の応力については, 誤差を過小評価することにもなるので注意されたい。

稲田花崗岩の場合, 最大載荷応力方向の異方性の程度は 10.3% であり, 応力の測定誤差は, 等方性仮定の場合, 最大載荷応力に対して 14.2% の誤差が生じる。一方, 異方性を考慮すると 5% 未満となる。

庵治花崗岩の場合, 最大載荷応力方向の異方性の程度は 9.2% であり, 応力の測定誤差は, 等方性仮定の場合, 最大載荷応力に対して 4.9% の誤差が生じる。一方, 異方性を考慮すると 2% 以下となる。

大島花崗岩 (粗) の場合, 最大載荷応力方向の異方性の程度は 12.8% で, 応力の測定誤差は, 等方性仮定の場合, 最大載荷応力に対して 11.9% の誤差が生じる。一方, 異方性を考慮すると 3% 以下となる。

大島花崗岩 (細) の場合, 最大載荷応力方向の異方性の程度は 24.7% で, 応力の測定誤差は, 等方性仮定の場合, 最大載荷応力

Table 4 Results for Inada granite. ($x = r$ -axis, $y = g$ -axis, $z = h$ -axis)

	σ_{app}	Isotropic assumption		Orthotropic assumption	
		σ_{meas}	error (%)	σ_{meas}	error (%)
σ_x	10.6	12.1	14.2	11.1	4.7
σ_y	4.9	5.0	0.9	4.7	1.9
σ_z	2.6	2.5	0.9	2.4	1.9
τ_{yz}	0.0	-0.4	3.8	-0.4	3.8
τ_{zx}	0.0	-0.3	2.8	-0.3	2.8
τ_{xy}	0.0	-0.1	0.9	-0.1	0.9

Table 5 Results for Aji granite. ($x = r$ -axis, $y = h$ -axis, $z = g$ -axis)

	σ_{app}	Isotropic assumption		Orthotropic assumption	
		σ_{meas}	error (%)	σ_{meas}	error (%)
σ_x	10.2	10.7	4.9	10.0	2.0
σ_y	5.6	5.4	2.0	5.3	2.9
σ_z	2.9	3.1	2.0	2.7	2.0
τ_{yz}	0.0	-0.3	2.9	-0.3	2.9
τ_{zx}	0.0	-0.4	3.9	-0.4	3.9
τ_{xy}	0.0	0.2	2.0	0.2	2.0

Table 6 Results for Oshima granite (coarse). ($x = r$ -axis, $y = h$ -axis, $z = g$ -axis)

	σ_{app}	Isotropic assumption		Orthotropic assumption	
		σ_{meas}	error (%)	σ_{meas}	error (%)
σ_x	10.1	11.3	11.9	10.4	3.0
σ_y	5.2	5.1	1.0	5.2	0.0
σ_z	2.0	2.4	4.0	2.6	5.9
τ_{yz}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
τ_{zx}	0.0	0.3	3.0	0.3	3.0
τ_{xy}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Table 7 Results for Oshima granite (fine). ($x = r$ -axis, $y = h$ -axis, $z = g$ -axis)

	σ_{app}	Isotropic assumption		Orthotropic assumption	
		σ_{meas}	error (%)	σ_{meas}	error (%)
σ_x	10.3	13.1	27.2	10.2	1.0
σ_y	5.8	6.5	6.8	6.3	4.9
σ_z	2.6	2.6	0.0	2.4	1.9
τ_{yz}	0.0	-0.3	2.9	-0.3	2.9
τ_{zx}	0.0	-0.1	1.0	0.1	1.0
τ_{xy}	0.0	0.1	1.0	0.1	1.0

に対して 27.2% の誤差が生じる。一方、異方性を考慮すると 1% 以下となる。

等方性を仮定して評価した場合と比較して、異方性を考慮した方が明らかに測定誤差は減少する。また、その測定誤差は、載荷応力方向の異方性の程度、特に、最大載荷応力方向の異方性の程度に依存する傾向がある。具体的には、最大載荷方向の異方性の程度が 10% を超える場合に等方性を仮定して応力を評価した場合、10% 以上の誤差が生じてしまう可能性があり、異方性の程度が 20% を超える場合は 20% 以上の誤差が生じる可能性がある。一方、異方性を考慮すれば、その誤差は 5% 未満に低減できる。しかし、異方性の程度が 10% 未満の場合は、等方性を仮定した場合でも、その誤差は数 % 程度なので、このような場合には、現状の応力測定精度からすると今は無視できる大きさであると考ええる。

応力の方向については、等方性仮定とした場合と異方性を考慮した場合で明瞭な違いは見られず、いずれも正しい結果を示した。これは、室内実験では、載荷方向を異方性軸に一致させて行ったことが大きな原因であると考えられる。2. でも述べたように、異方性を考慮した場合、計算上はマトリックス [A] と [C] が関係してくる。[A] は主に方向に影響を与える係数であり、[C] は主に大きさに影響を与える係数である。室内実験では、異方性軸と主軸（載荷軸）を一致させているために、そもそも方向については、誤差が最小となるような設定であったことが要因と考えられる。一方、数値実験においては、異方性を考慮しないと主応力の方向の結果に無視できない誤差が生じると指摘したが、これは、数値実験のモデルの異方性の程度が最大で 33% と今回用いた岩石より大きかったこと要因の一つと考えられる。

本研究で行った数値実験および室内実験は、ともに異方性軸と主軸が一致する場合であり、今回定量化された誤差の値は、一般的な状況に適用するには難があることを理解されたい。今後、より一般的な条件下においても検証をする必要がある。

5. 結 言

下向き円錐孔底ひずみ法を異方性岩盤に適用するための測定理論を構築し、その適用性について数値実験と供試体実験に基づいて検討した。結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 異方性がある場合、等方性を仮定して応力を評価した場合と比較して、異方性を考慮すると測定誤差が小さくなる。
- 2) 等方性仮定により生じる応力値の測定誤差は、載荷応力方向の異方性の程度、特に最大載荷応力方向の異方性の程度に依存している。
- 3) 最大載荷方向の異方性の程度が 10% を超える場合に等方性を仮定して応力を評価した場合、10% 以上の誤差が生じてしまう可能性があり、異方性の程度が 20% を超える場合に 20% 以上の誤差が生じる可能性がある。一方、異方性を考慮した場合、その誤差は 5% 未満になる。
- 4) 応力の方向については、等方性仮定とした場合と異方性を考慮した場合で明瞭な違いは見られず、いずれも正しい結果を示した。これは、室内実験では、載荷方向を異方性軸に一致させて行ったことが大きな原因であると考えられる。今後、より一般的な条件下においても検証をする必要がある。

References

- 1) K. Sakaguchi, T. Takehara, Y. Obara, T. Nakayama, K. Sugawara: Journal of MMIJ, **110** (1994), 331-336.
- 2) K. Sugawara, Y. Obara: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., **36** (1999), 307-322.
- 3) B. Amadei: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., **33** (1996), 293-325.
- 4) M. Borsetto, S. Martinetti, R. Ribacchi: Rock Mechanics and Rock Engineering, **17** (1984), 167-182.
- 5) Y. Obara, H.-K. Jang, K. Murakami, K. Sugawara: Journal of MMIJ, **111** (1995), 919-924.
- 6) K. Sakaguchi, H. Yoshida, M. Minami, M. Hara, Y. Suzuki, K. Matsuki: Journal of MMIJ, **122** (2006), 338-344.
- 7) K. Sakaguchi, H. Takeda, K. Matsuki: Journal of MMIJ, **126** (2010), 418-424.
- 8) B. Amadei: Rock Anisotropy and the Theory of Stress Measurements, 1983.
- 9) K. Shin: Journal of MMIJ, **120** (2004), 79-84.