

(22) 現位置における異方性岩盤物性の 決定方法に関する研究

日本国土開発(株) ○正会員 岡 千裕
大成建設(株) 正会員 川上 哲太郎
山梨大学 正会員 平島 健一

A study on determination of elastic properties of anisotropic rock masses by in-situ tests

Kazuhiro Oka, JDC Corporation
Tetsutaro Kawakami, Taisei Corporation
Kenichi Hirashima, Yamanashi University

ABSTRACT

This paper presents a study on determination of elastic properties of anisotropic rock masses by jack test and water chamber test that are conducted commonly because of its easiness. The theoretical analysis methods to determine the principal elastic moduli from the in-situ measurement data are proposed on the assumption that the rock masses are anisotropic body. Furthermore, numerical examples and numerical calculation diagrams are presented.

1. はじめに

近年、岩盤を対象とする構造物の大型化、多様化に伴って各種の岩質状態での構造物の設置を強いられる現今の状況を考えると、その地山の力学的諸特性を正確に把握することが重要であると考えられる。現在、現場において実施されている、いわゆる”岩盤試験法”(ジャッキ試験、水室試験、せん断試験)は地山の構成材料を均質な等方性体と考えた試験法ならびに実験データの整理法がなされ、それによって現地岩盤の力学特性を数量化して設計のための基礎資料とする場合が多い¹⁾。

ここでは、比較的よく実施されているジャッキ試験、および水室試験の直交異方性岩盤への適用のための解析方法を提示し、数値例をもとにして異方性岩盤の主弾性係数を決定するための具体的手順と計算図表を提示する。なお、ここでの解析において、岩盤試験のために設ける孔の形状は閉じた型の解析解が得られる円あるいは楕円の場合に限定する。

2. 問題の定式化

2.1 ジャッキ試験

Fig. 1に示すような円ないし楕円形状のトンネルないしボアホールを有する2次元の直交異方性弾性体を対象とし、そのトンネルないしボアホール周縁におけるx、y座標方向の外荷重応力成分 X_n 、 Y_n は応力成分 σ_x 、 σ_y および τ_{xy} と次式の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} X_n &= \sigma_x \cos(n, x) + \tau_{xy} \cos(n, y) \\ Y_n &= \tau_{xy} \cos(n, x) + \sigma_y \cos(n, y) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

$$\cos(n, x) = -\frac{dy}{ds}, \quad \cos(n, y) = \frac{dx}{ds} \dots \dots \dots (2)$$

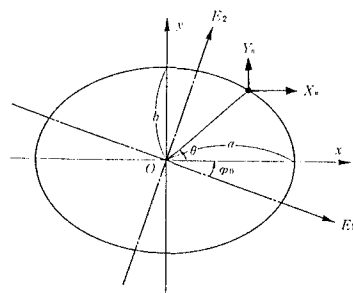


Fig. 1 Geometrical configuration and components X_n, Y_n of external force.

また、応力、変位を求めるための複素関数 $\Phi_k(Z_k)$ の満足すべき境界条件は次式のように表せる²⁾。

$$2\operatorname{Re}[\mu_1\Phi_1(z_1) + \mu_2\Phi_2(z_2)] = -\int_0^S X_n ds \equiv f_x, \quad 2\operatorname{Re}[\Phi_1(z_1) + \Phi_2(z_2)] = \int_0^S Y_n ds \equiv f_y \dots \dots \dots (3)$$

なお、応力成分 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} および変位成分 u_x 、 u_y は式(4)~(6)により表される。ここに、 Re はカッポ内の複素関数の実部を示し、 u_{x0} 、 u_{y0} および ω_0 は剛体変位ならびに剛体回転を表すもので、ここでは無視してよい。

$$\sigma_x = 2\operatorname{Re}[\mu_1^2\Phi_1'(z_1) + \mu_2^2\Phi_2'(z_2)], \quad \sigma_y = 2\operatorname{Re}[\Phi_1'(z_1) + \Phi_2'(z_2)], \quad \tau_{xy} = -2\operatorname{Re}[\mu_1\Phi_1'(z_1) + \mu_2\Phi_2'(z_2)] \dots (4)$$

$$u_x = 2\operatorname{Re}[p_1\Phi_1(z_1) + p_2\Phi_2(z_2)] - \omega_0 y + u_x^0, \quad u_y = 2\operatorname{Re}[q_1\Phi_1(z_1) + q_2\Phi_2(z_2)] + \omega_0 x + u_y^0 \dots \dots \dots (5)$$

$$p_1 = a_{11}\mu_1^2 + a_{12}, \quad p_2 = a_{11}\mu_2^2 + a_{12}, \quad q_1 = \frac{a_{12}\mu_1^2 + a_{22}}{\mu_1}, \quad q_2 = \frac{a_{12}\mu_2^2 + a_{22}}{\mu_2} \dots \dots \dots (6)$$

また、 μ_1 、 μ_2 は式(7)の特性根として求められる。ここに、 a_{11} 、 a_{12} 、 a_{22} 、 a_{00} は岩盤の弾性定数であり、主弾性係数 E_1 、 E_2 、せん断弾性係数 G 、ポアソン比 ν_{12} 、 ν_{13} 、 ν_{31} 、 ν_{23} 、 ν_{32} により、式(8)から求まる。

$$a_{11}\mu^4 + (2a_{12} + a_{00})\mu^2 + a_{22} = 0 \dots (7)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= \frac{1 - \nu_{13} \cdot \nu_{31}}{E_1}, \quad a_{12} = -\frac{\nu_{12} + \nu_{23} \cdot \nu_{32}}{E_1}, \\ a_{22} &= \frac{1 - \nu_{23} \cdot \nu_{32}}{E_2}, \quad a_{00} = \frac{1}{G} \end{aligned} \right\} \dots (8)$$

次に、いま $\Phi_k(Z_k) = \Phi_k[\omega_k(\zeta_k)] = \Phi_k(\zeta_k)$ と表すものとすれば、式(3)で与えられる境界条件は次式のようになる。

$$2\operatorname{Re}[\mu_1\Phi_1(\sigma) + \mu_2\Phi_2(\sigma)] = f_x(\theta), \quad 2\operatorname{Re}[\Phi_1(\sigma) + \Phi_2(\sigma)] = f_y(\theta) \dots \dots \dots (9)$$

したがって、上式の複素応力関数を孔縁で与えられた外荷重応力 σ_r 、 $\tau_{r\theta}$ (したがって X_n および Y_n) により決定すれば、孔周辺における応力ならびに変位の成分が式(4)、(5)により求められることになる。

ここで、楕円形状の孔周縁の x 軸に対称で部分的な等分布鉛直荷重 p が Fig. 2 のように作用する場合を考える。この場合、物理平面上での不釣合力の座標方向成分 f_x 、 f_y は孔縁上の移動点 P の座標を $Z_0 (=x+iy)$ とすると次式のようになる。

$$-f_x + if_y = \left\{ \begin{aligned} ip(z_0 - a) & \quad \text{区間 F A B,} \\ ip(z_{01} - a) & \quad \text{区間 B C,} \\ ip(z_{01} - a + z_0 + \bar{z}_{01}) & \quad \text{区間 C D E,} \\ ip(\bar{z}_{01} - a) & \quad \text{区間 E F.} \end{aligned} \right\} \dots (10)$$

いま一般性を失わないように、Fig. 3 のように x 軸より ϕ の角度の位置を対称軸とし、孔縁境界上の σ_{r0} 、 $\tau_{r\theta_0}$ を求め、 $\Phi_k(Z_k)$ 、($k=1, 2$) に関する連立一次方程式を解けば式(11)が得られる。

$$\Phi_k(z_k) = \frac{(-1)^k}{\mu_1 - \mu_2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (\mu_j \bar{\alpha}_n + \beta_n) \cdot \zeta_k^{-n} \dots \dots \dots (11)$$

式(11)、(5)と極座標 (r, θ) への変換公式から $r=a$ の円孔縁における垂直方向変位 u_r は次式のようになる。

$$u_r = -\frac{a}{4} \{ \rho_1 a_0 + \rho_0 (a_2 - d_2) \} - \frac{a}{4} \cdot \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^2 - 1} \cdot \{ \rho_0 (n-1) (a_{n+2} - d_{n+2}) + (P_n a_n - Q_n d_n) + \rho_0 (n+1) (a_{n-2} + d_{n-2}) \} \cos n\theta - \frac{a}{4} \cdot \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^2 - 1} \cdot \{ \rho_0 (n-1) (c_{n+2} - b_{n+2}) + (Q_n c_n - P_n b_n) - \rho_0 (n+1) (c_{n-2} + b_{n-2}) \} \sin n\theta \dots \dots (12)$$

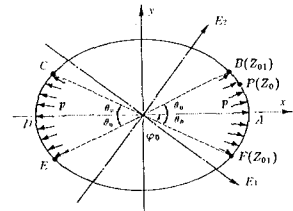


Fig. 2 Partially distributed normal stress p applied at elliptic hole.

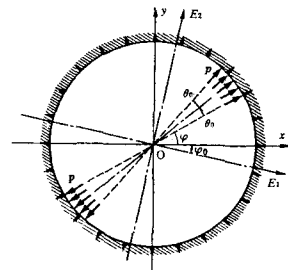


Fig. 3 Partially distributed normal stress p applied at circular hole.

2.2 水室試験

ここで対象とする水室試験は異方性岩盤中に円形孔を掘削した後、コンクリート覆工を施した水室を製作し、その内壁面に等分布内圧を加えるものである。この場合の平面ひずみ状態での一般的境界条件をFig. 4(a)に示す。この問題は、コンクリート覆工を岩盤から分離し、Fig. 4(b), (c)の条件のもとでそれぞれについて解き、境界での応力および変位が等しいという拘束条件のもとに、2つの解を合成する。

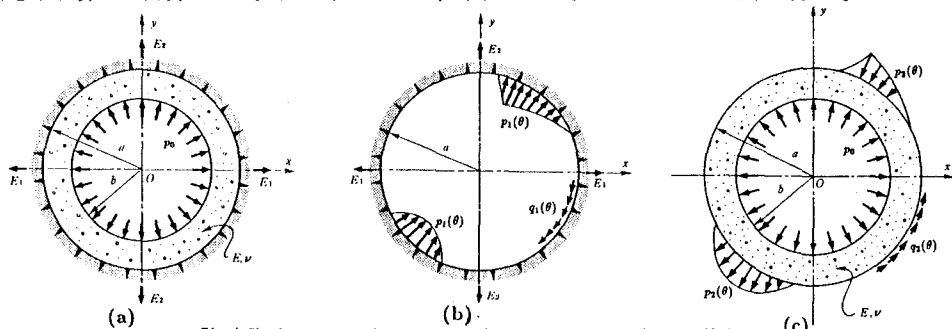


Fig. 4 Chamber test with concrete lining and general boundary conditions.

等方等質の厚さ $(a - b)$ のコンクリート覆工を考えた場合、応力と変位はAiryの応力関数 $F(r, \theta)$ と変位の補助関数 $\phi(r, \theta)$ を用いて次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial F}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2}, \quad \sigma_\theta = \frac{\partial^2 F}{\partial r^2}, \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial F}{\partial \theta} \right). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} u_r &= \frac{1}{2G} \left\{ -\frac{\partial F}{\partial r} + \frac{1}{1+\nu} \cdot r \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right\}, \\ u_\theta &= \frac{1}{2G} \left\{ -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial F}{\partial \theta} + \frac{1}{1+\nu} \cdot r^2 \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r} \right\}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

覆工の外側境界面 $(r=a)$ における垂直方向および接線方向の作用応力を $p_1(\theta) = p_2(\theta)$ 、 $q_1(\theta) = q_2(\theta)$ とし、内側境界面 $(r=b)$ においては内圧のみが作用するとして、 $\sigma_r = -p_0$ 、 $\tau_{r\theta} = 0$ と置くと、外側境界面に沿う変位は最終的に次式で与えられる。

$$u_r^2 = \frac{1+\nu}{E} \cdot a \left[(V_0 p_0 + V_1 a_0) - \sum_{n=2}^{\infty} K_n \{ (V_2 a_n - V_3 d_n) \cos n\theta + (V_3 c_n - V_2 b_n) \sin n\theta \} \right] \quad \dots \quad (15)$$

コンクリート覆工が岩盤との境界面で十分堅固に密着し、 $p_1(\theta) = p_2(\theta)$ 、 $q_1(\theta) = q_2(\theta)$ および $u_r^{(1)} = u_r^{(2)}$ 、 $u_\theta^{(1)} = u_\theta^{(2)}$ として、 a_n 、 b_n 、 c_n 、 d_n を求める。これらの係数を用いてAiryの応力関数 $F(r, \theta)$ 、および式(13)、(14)からコンクリート覆工の内壁面 $(r=b)$ における応力と変位を求めればよい。

3. 数値計算例

3.1 ジャッキ試験

Fig. 5(a)は半径方向の部分荷重 p が作用する場合の円孔縁に生じる半径方向変位 u_r の分布を直交異方性体の傾斜角 ϕ_0 をパラメータにプロットしたものである。Fig. 5(b)は $\phi_0 = 0^\circ$ の場合で円孔の内部領域における半径方向応力 σ_r の分布の変化を異方性弾性係数比 $e (= E_1/E_2)$ をパラメータに図示したものである。

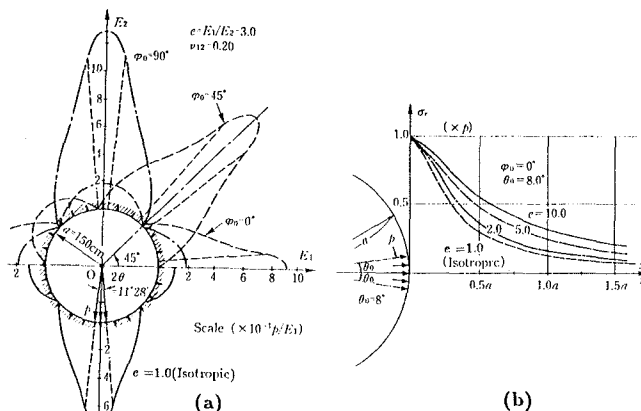


Fig. 5 Distributions of radial displacement u_r , (a) around circular hole and (b) along x-axis in orthotropic medium ($\phi_0 = 0^\circ$, $e = 3.0$) under partially distributed normal stress p at the hole.

次に、実際に異方性岩盤の弾性係数を求める手順を示す。以下の計算図面は内径 $2a=200\text{cm}$ 、ジャッキ試験の載荷円直径 $2a'=30\text{cm}$ ($\theta_0=8^\circ 36'$) の場合の計算例である。Fig. 6(a)はFig. 5(a)のように求められた変位分布のうち、ジャッキ荷重載荷点の全変位の半分すなわち $\delta_r=(u_r)_{\max}$ を系統的に計算し、 e 、 ϕ_0 をパラメータとして図示したものであり、Fig. 6(b)はFig. 6(a)において $\delta_0=(\delta_r)_{\phi=0}$ 、 $\delta_{45}=(\delta_r)_{\phi=45}$ 、 $\delta_{90}=(\delta_r)_{\phi=90}$ と書き表し、それらの比率 δ_{90}/δ_0 、 δ_{45}/δ_0 および δ_{90}/δ_{45} を主弾性係数比 e との関係で示したものである。さらにFig. 7は種々の最大主弾性係数 E_1 を具体的に与えて、半径方向変位 δ_r を、 e をパラメータとして示した図である。

これらの図面が完成した後、同一断面において 45° 間隔に測定したジャッキ試験の実測値がFig. 8の・印のようであったとすれば、これらの点を通る滑らかな楕円に近い閉曲線を描き、最短半軸の長さを δ_0 、最長半軸のそれを δ_{90} として、その比 $k=\delta_{90}/\delta_0$ を求める。この図の場合 $k=\delta_{90}/\delta_0=1.70$ となる。この数値をもとにしてFig. 6(b)より、縦軸 $k=1.70$ から水平線を引き、パラメータ δ_{90}/δ_0 の曲線を媒介として主弾性係数比 e ($=E_1/E_2$) $=2.85$ を求める。

次に、Fig. 7を用いて、 δ_0 あるいは δ_{90} の具体的な数値 (この例では $\delta_{90}=10.9 \times 10^{-6}\text{Pa}$) より水平線を引き、 $\phi_0=0$ あるいは $\phi_0=90^\circ$ であつ、先ほど求め

られた $e=2.85$ の曲線 (内挿曲線) との交点より鉛直下方に垂線をおろし、横軸 E_1 との交点を読みとれば、最大主弾性係数が求められる。もう一方の主弾性係数 E_2 は主弾性係数比 e と E_1 から容易に決定される。本例の場合、 $E_1=1.41 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ 、 $E_2=E_1/e=4.95 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ として求められる。

なお、これらの弾性係数の主方向はFig. 8の測定値から容易に決定できる。

3.2 水室試験³⁾

コンクリート覆工内面に等分布圧力を加えた場合の半径方向変位を、コンクリートと岩盤の弾性係数比 ($j=E/E_1$)、岩盤の主弾性係数比 ($e=E_1/E_2$) を変化させて計算した。計算は、 $a=1.20\text{m}$ 、 $b=1.00\text{m}$ で、ポアソン比として $\nu=0.2$ 、 $\nu_{12}=0.2$ 、 $\nu_{31}=\nu_{32}=0$ 、($i=X, Y$) ならびに、せん断弾性係数は次式の仮定のもとに実施した。

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} \quad \dots \dots \dots (16)$$

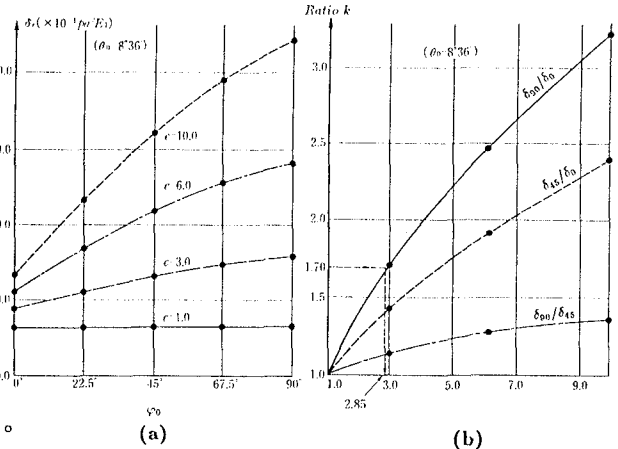


Fig. 6 (a) Relation between inclination angle ϕ_0 and radial displacement $\delta_r=(u_r)_{\max}$ with parameter $e=E_1/E_2$.
(b) Relation between parameter e and ratio $k=\delta_{90}/\delta_0$.

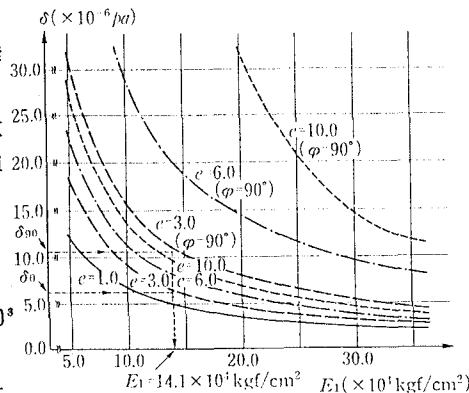


Fig. 7 Relation between radial displacement δ and maximum principal elastic modulus E_1 with parameter $e=E_1/E_2$.

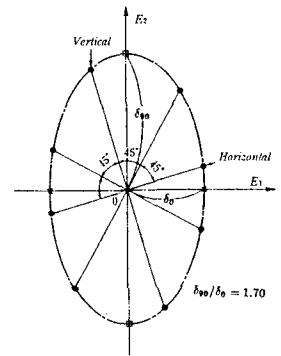


Fig. 8 Numerical example of Jack test as a case study.

代表的な計算例をFig. 9に示す。 E_1 、 E_2 の比が増加すると、y方向の変位が増加し、逆にx方向の変位は若干減少する。また、コンクリート覆工とx方向弾性係数の比、および主弾性係数の比をパラメータにして、x軸方向、y軸方向、x軸から45°方向の半径方向変位(δ_x 、 δ_y および δ_{45})を求めたのが、Fig. 10(a)、(b)、(c)である。

コンクリート覆工の弾性係数がわかっている場合、異方性岩盤の主弾性係数は以下に示す水室試験の方法によって、容易に求めることができる。まず、半径方向変位の変位量から主弾性係数の方向が決定される。次に、既に作成されている図表を使って異方性の主弾性係数を求める。例えば $E=3.0 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\delta_x=0.8 \times 10^{-3} \text{ Po cm/kgf/cm}^2$ 、 $\delta_y=1.6 \times 10^{-3} \text{ Po cm/kgf/cm}^2$ とするとFig. 10(b)から $j=3.3$ 、 $e=4.1$ が読み取れる。したがって、 $E_1=9.1 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $E_2=2.2 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ が求められる。

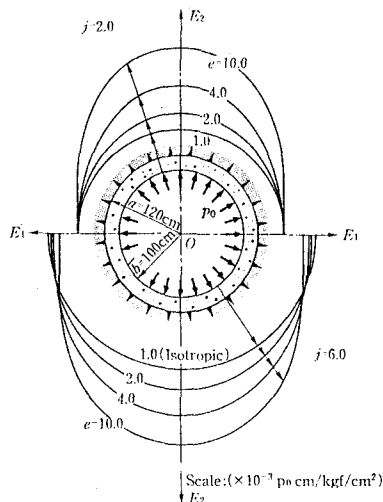


Fig. 9 Calculated radial displacement u , around the inner surface of lining ($E=3.0 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$) for water chamber test.

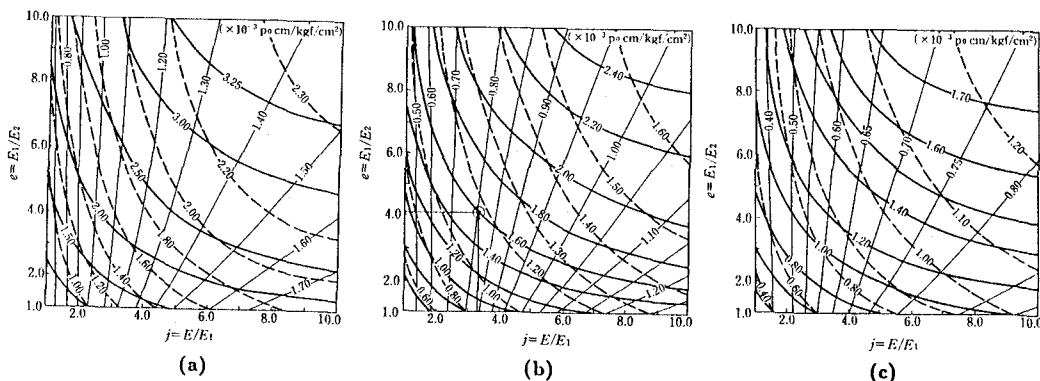


Fig. 10 Calculated radial displacement u , in the case of (a) $E=2.1 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$, (b) $E=3.0 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ and (c) $E=4.0 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ for water chamber test.

4. おわりに

本研究では、現場における岩盤試験のうち、代表的でかつ簡単に実施されている水室試験とジャッキ試験に着目して、実測データより、その地点の直交異方性の主弾性係数ならびにその方向を求めるための理論的解析法ならびにその手順について具体例を挙げて提示を行った。ここでは便宜上、二次元的荷重状態でかつ異方性も二次元的な直交異方性の完全弾性体と考えたこと、孔形状は円ないし楕円であると考えたこと等に関する補正については、今後に残された研究課題であり、現在検討中である。

参考文献

- 1) Jager, J. C. and Cook, N. G. W.: Theory of applications of curved jacks for measurements of stresses, State of Stress in the Earth's Crust, (Ed. by W. R. Judd), Elsevier, pp. 381-395, 1964.
- 2) Lekhnitskii, S. G.: Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body, (Eng. Trans.), Holden Day, 1963.
- 3) Niwa, Y., Kobayashi, S. and Hirashima, K.: Determination of rock orthotropy by water chamber test, Int-Symp. Rock Mech., Madrid, pp. 59-63, 1968.