

ジャッキ試験および水室試験による異方性岩盤物性の決定方法に関する研究

岡 千裕*・平島健一**

本論文では現場における岩盤試験法のうち、主に大規模地下空洞掘削時の岩盤試験等で実施されているジャッキ試験および水室試験に着目して、実測データから岩盤を直交異方性弾性体と仮定した場合の、その地点の主弾性係数やそれらの方向などを求めるための理論的解析法を提示する。さらにその手順について具体的な数値例を示し、幾つかの系統的な数値計算図表を与える。本論文により、岩盤の力学定数をより正確に把握する手法の一つが確立されたものと考えられる。

Key Words : anisotropic rock, jack test, water chamber test, theoretical treatment, determination of the orthotropic elastic properties

1. 緒 言

構造物あるいはその一部としての岩盤の安定性は岩盤を形成している地山に作用する初期地圧およびその地点の地質学的ならびに力学的特性や構造物の大きさ、形状あるいはそれらの配列等により大きな影響を受けるものである。近年にみられるように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られる現今の状況を考えるとき、その地山の力学的諸特性を正確に把握することが基本的な要件である。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、せん断試験等）で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)~4)}。

本論文では、地下発電所等の大規模地下空洞掘削に関する岩盤調査時の試験等で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例示することを目的とする。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。

なお、異方性岩盤の変位問題を取り扱ったものとして川本の研究^{5),6)}および Amadei and Savage の研究⁷⁾が挙げられる。前者では覆工のない円形孔縁の全周に静水圧を作用させた場合について、また後者は覆工のない円形孔縁に直交異方性の主弾性係数方向を経験的に予測し、その方向に部分鉛直荷重を作用された場合についての変

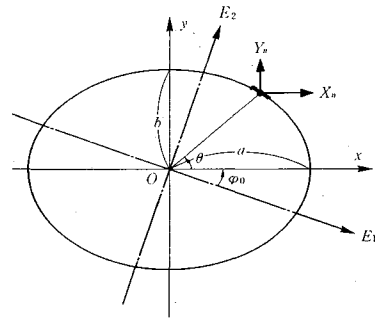


Fig.1 Geometrical configuration and components X_n, Y_n of external force.

形係数を決定する手法の提案がなされている。

また、ここで対象とするジャッキ試験は、孔壁の一部に等分布圧を加える試験であるが、これは一般的に用いられている等変位載荷型の平板載荷試験に対する第1次近似的なものと考えられる。

2. 問題の定式化

(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ポアホールを有する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ポ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。

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

ここに、

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

が成立するから、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のように表される^{9)~11)}。

* 正会員 日本国土開発(株) エンジニアリング本部 (〒243-03 神奈川県愛甲郡愛川町中津 4036-1)

** 正会員 工博 山梨大学教授 工学部土木環境工学科

$$\left. \begin{aligned} 2\text{Re}[\mu_1\Phi_1(z_1)+\mu_2\Phi_2(z_2)] &= -\int_0^S X_n ds \equiv f_x, \\ 2\text{Re}[\Phi_1(z_1)+\Phi_2(z_2)] &= \int_0^S Y_n ds \equiv f_y. \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

なお、応力成分 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ および変位成分 u_x, u_y は次式により表される¹⁰⁾。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= 2\text{Re}[\mu_1^2\Phi_1'(z_1)+\mu_2^2\Phi_2'(z_2)], \\ \sigma_y &= 2\text{Re}[\Phi_1'(z_1)+\Phi_2'(z_2)], \\ \tau_{xy} &= -2\text{Re}[\mu_1\Phi_1'(z_1)+\mu_2\Phi_2'(z_2)]. \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} u_x &= 2\text{Re}[\rho_1\Phi_1(z_1)+\rho_2\Phi_2(z_2)] - \omega_0 y + u_x^0, \\ u_y &= 2\text{Re}[q_1\Phi_1(z_1)+q_2\Phi_2(z_2)] + \omega_0 x + u_y^0. \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 &= a_{11}\mu_1^2 + a_{12}, \quad \rho_2 = a_{11}\mu_2^2 + a_{12}, \\ q_1 &= \frac{a_{12}\mu_1^2 + a_{22}}{\mu_1}, \quad q_2 = \frac{a_{12}\mu_2^2 + a_{22}}{\mu_2}. \end{aligned} \right\} \dots (6)$$

ここに、 Re はカッコ内の複素関数の実部を示し、 u_x^0, u_y^0 および ω_0 は剛体変位ならびに剛体回転を表すもので、本論文の問題においては無視して差し支えない。また、 μ_1, μ_2 は次式の特性根として求められる。

$$a_{11}\mu^4 + (2a_{12} + a_{66})\mu^2 + a_{22} = 0. \dots (7)$$

ここに、 $a_{11}, a_{12}, a_{22}, a_{66}$ 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 $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{31}, \nu_{23}, \nu_{32}$ により、次式により求められる。

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= \frac{1-\nu_{13}\cdot\nu_{31}}{E_1}, \quad a_{12} = -\frac{\nu_{12}+\nu_{23}\cdot\nu_{32}}{E_1}, \\ a_{22} &= \frac{1-\nu_{23}\cdot\nu_{32}}{E_2}, \quad a_{66} = \frac{1}{G}. \end{aligned} \right\} \dots (8)$$

なお、ここでは対象とする問題の性格上、平面ひずみ状態を採用する。上式の応力、変位成分を極座標系 (r, θ) の応力、変位成分に変換する公式は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r + \sigma_\theta &= \sigma_x + \sigma_y, \\ \sigma_\theta - \sigma_r + 2i\tau_{r\theta} &= e^{2i\theta}(\sigma_y - \sigma_x + 2i\tau_{xy}), \\ u_r + iu_\theta &= e^{i\theta}(u_x + iu_y). \end{aligned} \right\} \dots (9)$$

ここに、

$$e^{i\theta} = \frac{\zeta}{|\zeta|} \cdot \frac{\omega'(\zeta)}{|\omega'(\zeta)|}, \quad e^{2i\theta} = \frac{\zeta}{\bar{\zeta}} \cdot \frac{\omega'(\zeta)}{\overline{\omega'(\zeta)}}. \dots (10)$$

$$\left. \begin{aligned} z = x + iy = \omega(\zeta) &= R_0(\zeta + m/\zeta), \\ R_0 &= (a+b)/2, \quad m = (a-b)/(a+b). \end{aligned} \right\} \dots (11)$$

上式中の a, b は楕円孔の半軸長さを表す。したがって、円孔の場合には $a=b$ (i.e. $m=0$) と置けばよい。

さらに、複素変数 $z_k (=x+\mu_k y)$ に対し、 ζ_k を用いて次式のように変換することを考える。

$$z_k = \omega_k(\zeta_k) = \frac{1}{2} \{ (a - i\mu_k b)\zeta_k + (a + i\mu_k b)\zeta_k^{-1} \}. \dots (12)$$

このようにすると、 z_k -平面上の境界ならびにその外

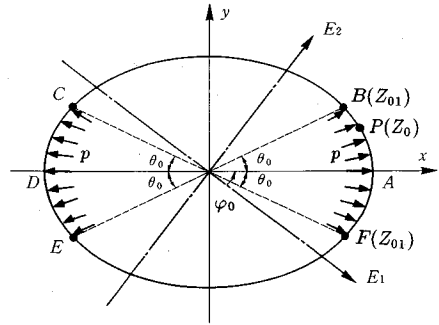


Fig.2 Partially distributed normal stress p applied at elliptic hole.

部は ζ_k -平面上の単位円ならびにその外部に 1 対 1 に写像される。

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になる。

$$\left. \begin{aligned} 2\text{Re}[\mu_1\Phi_1(\sigma)+\mu_2\Phi_2(\sigma)] &= f_x(\theta), \\ 2\text{Re}[\Phi_1(\sigma)+\Phi_2(\sigma)] &= f_y(\theta). \end{aligned} \right\} \dots (13)$$

ここに、 σ は ζ_k -平面上の単位円を表し、 $\sigma = e^{i\theta}$ であり、 θ は x 軸より反時計回りに測った角である。

上記の境界条件を満足する複素応力関数 $\Phi_k(\zeta_k)$ は、両辺に $1/(\sigma - \zeta_k)$ を掛け、単位円周上 γ で一周積分すると Cauchy の積分定理より、次式のように求められる。

$$\Phi_k(\zeta_k) = \frac{(-1)^k}{\mu_1 - \mu_2} \cdot \frac{1}{2\pi i} \int \frac{f_x - \mu_j f_y}{\sigma - \zeta_k} d\sigma + C. \dots (14)$$

ここに、添字 j は $k=2$ のとき 1 を、 $k=1$ のとき 2 をとるものとする。さらに、 C は積分定数である。

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 $\sigma_r, \tau_{r\theta}$ (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。

a) 部分鉛直荷重の場合

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。

$$-f_x + if_y = \left. \begin{aligned} ip(z_0 - a) & \quad \text{区間 FAB,} \\ ip(z_{01} - a) & \quad \text{区間 BC,} \\ ip(z_{01} - a + z_0 + \bar{z}_{01}) & \quad \text{区間 CDE,} \\ ip(\bar{z}_{01} - a) & \quad \text{区間 EF.} \end{aligned} \right\} \dots (15)$$

この値を式 (14) に代入し、 ζ_k -平面上の単位円上の対応する各区間について複素積分を実行すれば、求める関数 $\Phi_k(z_k)$ は以下のようになる。

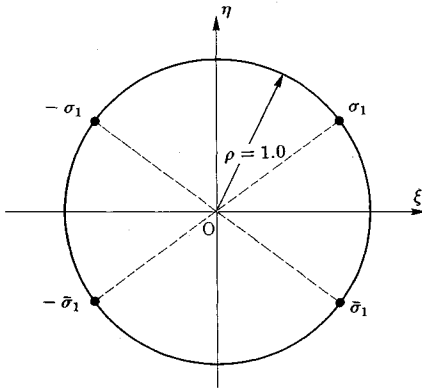


Fig. 3 ζ_k -plane.

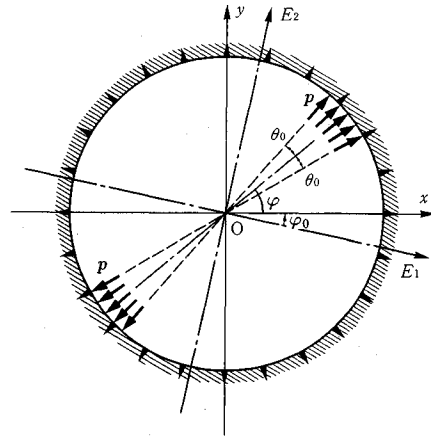


Fig. 4 Partially distributed normal stress p applied at circular hole.

$$\begin{aligned} \Phi_k(\zeta_k) = & \frac{(-1)^{k+1}}{\mu_1 - \mu_2} \cdot \frac{p}{4\pi i} \left[\zeta_k \ln \frac{\zeta_k^2 - \sigma_1^2}{\zeta_k^2 - \bar{\sigma}_1^2} \cdot (ib + \mu_j a) \right. \\ & + \zeta_k^{-1} \left(\ln \frac{\zeta_k^2 - \sigma_1^2}{\zeta_k^2 - \bar{\sigma}_1^2} - 2 \ln \sigma_1 + 2 \ln \bar{\sigma}_1 \right) (\mu_j a - ib) \\ & + \mu_j a \left(\sigma_1 + \frac{1}{\sigma_1} \right) \left(\ln \frac{\zeta_k - \bar{\sigma}_1}{\zeta_k - \sigma_1} + \ln \frac{\zeta_k + \sigma_1}{\zeta_k + \bar{\sigma}_1} \right) \\ & \left. - ib \left(\sigma_1 - \frac{1}{\sigma_1} \right) \left(\ln \frac{\zeta_k - \bar{\sigma}_1}{\zeta_k + \sigma_1} - \ln \frac{\zeta_k + \bar{\sigma}_1}{\zeta_k - \sigma_1} \right) \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

なお、孔縁においては $\zeta_k = \sigma = e^{i\theta}$ が成立する。また $\sigma_1, \bar{\sigma}_1$ は Fig. 3 の ζ_k -平面上の特定点 (Fig. 2 の点 z_{01}, \bar{z}_{01} に対応する) の複素座標である。

ところで、上述の部分載荷の場合の特別なものとして、孔周縁上のすべての点に等分布鉛直載荷 (静水圧 p_0) が作用した場合の結果が求められる。これは上式において $\sigma_1 = -\bar{\sigma}_1 = i, \theta_0 = \pi/2$ とおけばよく、関数 $\Phi_k(z_k)$ は

$$\Phi_k(\zeta_k) = \frac{(-1)^k}{\mu_1 - \mu_2} \cdot \frac{p_0}{2} (\mu_j a - ib) \zeta_k^{-1}. \quad (17)$$

となって、従来より求められている結果に一致する¹⁰⁾。

以上の方法に対して、対象とする孔形状が円形の場合には、孔縁に作用する外荷重 p および q を直接、Fourier 級数に展開して、複素関数 $\Phi_k(z_k)$ を無限級数で求めることも可能である。

いま一般性を失わないように、Fig. 4 のように x 軸より φ の角度の位置を対称軸として、孔縁境界上の半径方向応力 σ_r^0 および接線方向せん断応力 $\tau_{r\theta}^0$ は次式で表示される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r^0 &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=2,4,\dots} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta), \\ \tau_{r\theta}^0 &= \frac{c_0}{2} + \sum_{n=2,4,\dots} (c_n \cos n\theta + d_n \sin n\theta). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$a_0 = \frac{4}{\pi} \theta_0 p.$$

$$a_n = \frac{4}{\pi} p \cdot \frac{1}{n} \sin n\theta_0 \cdot \cos \frac{n\pi}{2} \cdot \cos n\varphi,$$

$$\left. \begin{aligned} b_n &= \frac{4}{\pi} p \cdot \frac{1}{n} \sin n\theta_0 \cdot \cos \frac{n\pi}{2} \cdot \sin n\varphi, \\ c_0 &= \frac{4}{\pi} \theta_0 q, \\ c_n &= \frac{4}{\pi} q \cdot \frac{1}{n} \sin n\theta_0 \cdot \cos \frac{n\pi}{2} \cdot \cos n\varphi, \\ d_n &= \frac{4}{\pi} q \cdot \frac{1}{n} \sin n\theta_0 \cdot \cos \frac{n\pi}{2} \cdot \sin n\varphi. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

したがって、この場合の $f_x(\theta), f_y(\theta)$ を式 (3) の右辺の関係式および式 (18) によって決定し、続いて式 (3) の左辺の関係式である $\Phi_k(z_k)$ ($k=1, 2$) に関する連立一次方程式を解けば、最終的に次式が得られる。

$$\Phi_k(z_k) = \frac{(-1)^k}{\mu_1 - \mu_2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (\mu_j \bar{\alpha}_n + \bar{\beta}_n) \cdot \zeta_k^{-n}. \quad (20)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \bar{\alpha}_n &= \frac{a}{4n} \cdot [\{ (a_{n+1} - a_{n-1}) - (d_{n+1} + d_{n-1}) \} \\ & \quad + i \{ (b_{n+1} - b_{n-1}) + (c_{n+1} + c_{n-1}) \}], \\ \bar{\beta}_n &= \frac{a}{4n} \cdot [\{ (b_{n+1} + b_{n-1}) + (c_{n+1} - c_{n-1}) \} \\ & \quad - i \{ (a_{n+1} + a_{n-1}) - (d_{n+1} - d_{n-1}) \}]. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

これより、式 (20), (5), (9) から $r=a$ の円孔縁における垂直方向および接線方向の変位 u_r, u_θ は次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} u_r &= -\frac{a}{4} (\rho_1 a_0 + \rho_0 (a_2 - d_2)) \\ & \quad - \frac{a}{4} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^2 - 1} \cdot \{ \rho_0 (n-1) (a_{n+2} - d_{n+2}) \\ & \quad + (P_n a_n - Q_n d_n) + \rho_0 (n+1) (a_{n-2} + d_{n-2}) \} \cos n\theta \\ & \quad - \frac{a}{4} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^2 - 1} \cdot \{ \rho_0 (n-1) (c_{n+2} - b_{n+2}) \\ & \quad + (Q_n c_n - P_n b_n) - \rho_0 (n+1) (c_{n-2} + b_{n-2}) \} \sin n\theta, \end{aligned} \right\}$$

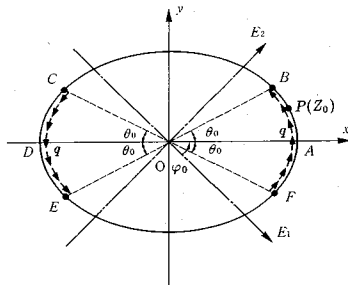


Fig. 5 Partially distributed shear stress q applied at elliptic hole.

$$\begin{aligned}
 u_\theta = & \frac{a}{4} \{ \rho_1 c_0 - \rho_0 (c_2 - b_2) \} \\
 & + \frac{a}{4} \cdot \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^2 - 1} \cdot \{ \rho_0 (n-1) (c_{n+2} - b_{n+2}) \\
 & - (P_n c_n - Q_n b_n) + \rho_0 (n+1) (c_{n-2} + b_{n-2}) \} \cos n\theta \\
 & + \frac{a}{4} \cdot \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n^2 - 1} \cdot \{ p_0 (n-1) (d_{n+2} - a_{n+2}) \\
 & - (P_n d_n - Q_n a_n) + \rho_0 (n+1) (d_{n-2} + a_{n-2}) \} \sin n\theta. \quad \dots\dots\dots (22)
 \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned}
 \xi = & -i(\mu_1 + \mu_2) = \sqrt{\frac{2a_{12} + a_{06}}{a_{11}}} + 2\sqrt{\frac{a_{22}}{a_{11}}}, \\
 \eta = & -\mu_1 \mu_2 = \sqrt{\frac{a_{22}}{a_{11}}}, \\
 \rho_0 = & \xi \left(a_{11} - \frac{a_{22}}{\eta} \right), \\
 \rho_1 = & a_{11} (\xi + \eta) + 2a_{12} + \frac{a_{22}}{\eta} (\xi - 1), \\
 P_n = & 2 \left\{ n \xi \left(a_{11} + \frac{a_{22}}{\eta} \right) + \left(2a_{12} + a_{11} \eta + \frac{a_{22}}{\eta} \right) \right\}, \\
 Q_n = & 2 \left\{ n \left(2a_{12} + a_{11} \eta + \frac{a_{22}}{\eta} \right) + \xi \left(a_{11} + \frac{a_{22}}{\eta} \right) \right\}. \quad \dots\dots (23)
 \end{aligned}$$

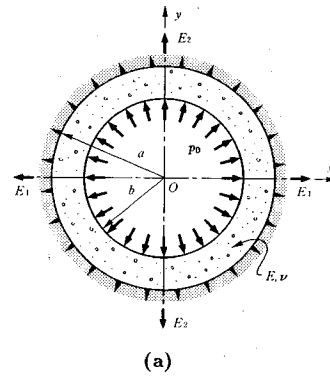
なお、円孔内の全周に静水圧 p_0 が作用する場合には、式 (18) において $a_0 = 2p_0$, $a_n = b_n = 0$ とおけばよく、式 (22) から求められる関数 $\Phi_k(z_k)$ は式 (17) に $a=b$ を代入した結果と一致する。

b) 部分せん断荷重の場合

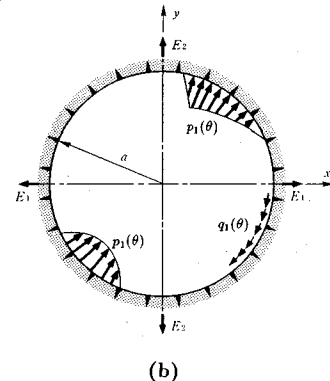
これは岩盤試験法のうちせん断試験の実測値を解析するために、前節の結果と組み合わせれば、その基礎理論の一部となるものであるが、Fig.5のように部分的なせん断荷重 q が反時計廻りに作用する場合の理論は、前節において求めた応力関数 $\Phi_k(z_k)$ の式における p あるいは p_0 の代わりに $-iq$ あるいは $-iq_0$ と置きかえてやればよい。したがって、ここではその理論式は省略する。

(2) 水室試験⁸⁾

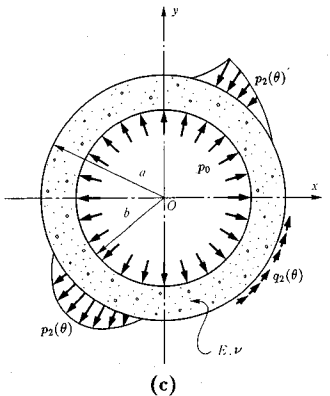
ここで対象とする水室試験は異方性岩盤中に円形孔を掘削した後、コンクリート覆工を施した水室を製作し、



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Chamber test with concrete lining and general boundary conditions.

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.6 (a) に示す。ここで、簡単のため座標軸が異方性の主弾性軸と一致しているものとする。この問題を解くためには、次のように2段階に分割して考える。すなわち、(第1段階)：コンクリート覆工を岩盤から分離し、Fig.6 (b), (c) の条件のもとでそれぞれについて解く。(第2段階)：第1段階で求めた解に対し、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。

a) コンクリート覆工の外面上における応力および変位

等方等質の厚さ $(a-b)$ のコンクリート覆工を考える。この場合の一般的な Airy の応力関数 $F(r, \theta)$ は次式のように与えられる¹⁾。

$$F(r, \theta) = A_0 r^2 + B_0 \ln r + C_0 \theta + \left. \begin{aligned} &+ \{ (A_1 r^3 - B_1 r^{-1}) \cos \theta + (A_1' r^3 - B_1' r^{-1}) \sin \theta \} \\ &+ \sum_{n=2}^{\infty} (A_n r^{n+2} + B_n r^{-n} + C_n r^n + D_n r^{-n+2}) \cos n\theta \\ &+ \sum_{n=2}^{\infty} (A_n' r^{n+2} + B_n' r^{-n} + C_n' r^n + D_n' r^{-n+2}) \sin n\theta. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

応力と変位は上式の $F(r, \theta)$ および変位の補助関数 $\varphi(r, \theta)$ を用いて次式で与えられる²⁾。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} \\ \sigma_\theta &= \frac{\partial^2 F}{\partial r^2} \\ \tau_{r\theta} &= -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial \theta} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (25)$$

$$\left. \begin{aligned} u_r &= \frac{1}{2G} \left(-\frac{\partial F}{\partial r} + \frac{1}{1+\nu} r \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right) \\ u_\theta &= \frac{1}{2G} \left(-\frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial \theta} + \frac{1}{1+\nu} r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (26)$$

ここに、 $\varphi(r, \theta)$ は

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right) &= \frac{\partial^2 F}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 F}{\partial \theta^2} \\ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \theta^2} &= 0. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (27)$$

の微分方程式を満足しなければならない。

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³⁾。

$$\left. \begin{aligned} u_r^2 &= \frac{1+\nu}{E} \cdot a \left[(V_0 p_0 + V_1 a_0) - \sum_{n=2}^{\infty} K_n \{ (V_2 a_n - V_3 d_n) \cos n\theta + (V_3 c_n - V_2 b_n) \sin n\theta \} \right], \\ u_\theta^2 &= \frac{1+\nu}{E} \cdot a \left[H_0 + \sum_{n=2}^{\infty} K_n \{ (V_4 a_n - V_5 d_n) \sin n\theta - (V_5 c_n - V_4 b_n) \cos n\theta \} \right]. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (28)$$

ここに、

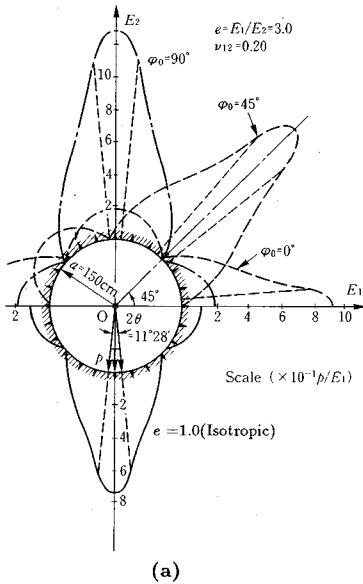
$$\left. \begin{aligned} k &= \frac{b}{a}, \\ \omega_1 &= -n + 2 - 4\nu, \\ \omega_2 &= n + 2 - 4\nu, \\ \omega_3 &= n + 4 - 4\nu, \\ \omega_4 &= n - 4 + 4\nu, \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \tau_1 &= (n+1)(1-k^2) - (1-k^{-2(n-1)}), \\ \tau_2 &= (n+1)(1-k^2) + (1-k^{-2(n-1)}), \\ \tau_3 &= (n-1)(1-k^2) + (1-k^{-2(n+1)}), \\ \tau_4 &= (n-1)(1-k^2) - (1-k^{-2(n+1)}), \\ T_1 &= (n-1)\tau_1 + k^{-2n}\tau_3, \\ T_2 &= (n-1)\tau_2 - k^{-2n}\tau_4, \\ T_3 &= k^{2n}\tau_1 - (n+1)\tau_3, \\ T_4 &= k^{2n}\tau_2 + (n+1)\tau_4, \\ K_n &= 1/[2\{(n^2-1)(1-k^2)^2 \\ &\quad + (1-k^{2(n+1)})(1-k^{-2(n-1)})\}], \\ V_0 &= \frac{2k^2(1-\nu)}{1-k^2}, \\ V_1 &= \frac{1+k^2-2\nu}{2(1-k^2)}, \\ V_2 &= \frac{k^2 T_1 + \omega_2 \tau_3}{n-1} + \frac{k^2 T_3 + \omega_1 \tau_1}{n+1}, \\ V_3 &= \frac{k^2 T_2 - \omega_2 \tau_4}{n-1} + \frac{k^2 T_4 - \omega_1 \tau_2}{n+1}, \\ V_4 &= \frac{k^2 T_1 - \omega_4 \tau_3}{n-1} - \frac{k^2 T_3 + \omega_3 \tau_1}{n+1}, \\ V_5 &= \frac{k^2 T_2 + \omega_4 \tau_4}{n-1} - \frac{k^2 T_4 + \omega_3 \tau_2}{n+1}. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (29)$$

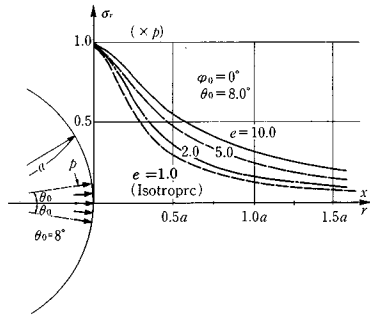
b) コンクリート覆工の内面における応力および変位
コンクリート覆工が岩盤との境界面で十分堅固に密着していると仮定し、 $p_1(\theta) = p_2(\theta)$, $q_1(\theta) = q_2(\theta)$ および $u_r^{(1)} = u_r^{(2)}$, $u_\theta^{(1)} = u_\theta^{(2)}$ とすると、 a_n , b_n , c_n , d_n は最終的に次式のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} \left(\rho_1 + \frac{2}{G} V_1 \right) a_0 + \rho_0 (a_2 - d_2) &= -\frac{1}{2G} V_0 p_0, \\ \rho_0 (n+1) (a_{n-2} + d_{n-2}) + R_n a_n - S_n d_n \\ &\quad + \rho_0 (n-1) (a_{n+2} - d_{n+2}) = 0, \\ \rho_0 (n+1) (a_{n-2} + d_{n-2}) + U_n a_n - W_n d_n \\ &\quad - \rho_0 (n-1) (a_{n+2} - d_{n+2}) = 0, \\ \rho_1 c_0 + \rho_0 (c_2 - b_2) &= \frac{2}{G} H_0, \\ -\rho_0 (n+1) (c_{n-2} + b_{n-2}) + S_n c_n - R_n b_n \\ &\quad + \rho_0 (n-1) (c_{n+2} - b_{n+2}) = 0, \\ -\rho_0 (n+1) (c_{n-2} + b_{n-2}) + W_n c_n - U_n b_n \\ &\quad - \rho_0 (n-1) (c_{n+2} - b_{n+2}) = 0. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (30)$$

$$\left. \begin{aligned} G &= \frac{E}{2(1+\nu)}, \\ R_n &= P_n - \frac{2(n^2-1)}{G} K_n V_2, \\ S_n &= Q_n - \frac{2(n^2-1)}{G} K_n V_3, \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (31)$$



(a)



(b)

Fig. 7 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.

$$\left. \begin{aligned} U_n &= Q_n - \frac{2(n^2-1)}{G} K_n V_4, \\ W_n &= P_n - \frac{2(n^2-1)}{G} K_n V_5. \end{aligned} \right\}$$

コンクリート覆工の内壁面 ($r=b$) における応力と変位は、式 (30), (31) から求められる係数を用いて、式 (24), (25), (26) から計算される。係数の値は n の増加に伴って急激に減少していく。したがって、通常の数値計算では $n=20$ 程度で十分である。

3. 数値計算例

(1) ジャッキ試験

Fig. 7 (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 をパラメータとしてプロットしたものである。 $\phi_0=45^\circ$ の場合の変位分布はやはり反時計方向に

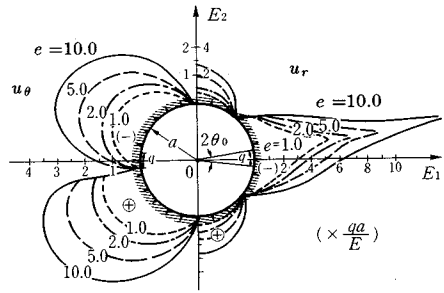


Fig. 8 Distributions of radial and tangential displacements u_r , u_θ around circular hole in orthotropic medium ($\phi_0=0^\circ$, $e=3.0$) under partially distributed shear stress q at the hole.

傾斜した非対称の分布となることがわかる。Fig. 7 (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 $e (=E_1/E_2)$ をパラメータとして図示したものである。図中の $e=1.0$ の場合は等方性弾性体に対するものである。

次に、円孔の接線方向の部分荷重 q が作用する場合の孔周縁における u_r , u_θ の分布を $\phi_0=0^\circ$ の場合で、主弾性係数比 e をパラメータとして図示したものの一例が Fig. 8 である。

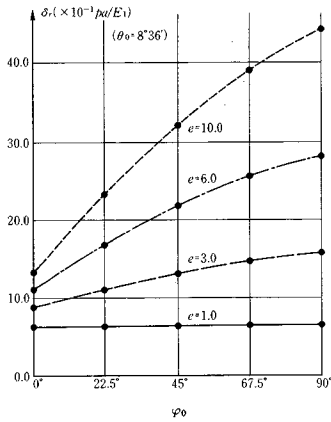
なお、半径方向ならびに接線方向の変位 u_r , u_θ は円孔の場合、式 (5) の変位 u_x , u_y から次式を用いて計算することができる。

$$\left. \begin{aligned} u_r &= u_x \cos \theta + u_y \sin \theta, \\ u_\theta &= -u_x \sin \theta + u_y \cos \theta. \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (32)$$

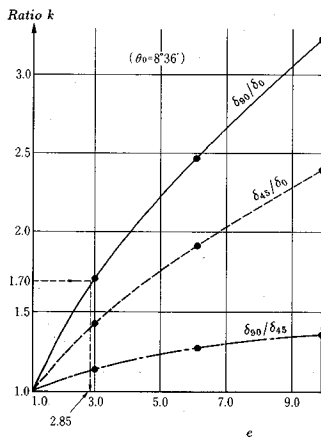
次に、以下に示す計算図面は内径 $2a=200$ cm, ジャッキ試験の載荷円直径 $2a'=30$ cm の場合、したがって $\theta_0=8^\circ 36'$ を例にとって計算したものである。

Fig. 9 (a) は Fig. 7 (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 $\delta_r = (u_r)_{\max}$ を系統的に計算して、 e , ϕ_0 をパラメータとして図示したものであり、Fig. 9 (b) は Fig. 9 (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. 10 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のち、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. 11 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、この閉曲線のうちの最短半軸の長さを 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. 9 (b) より、縦軸 $k=1.70$



(a)



(b)

Fig.9 (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 $k = \delta_{90}/\delta_0$.

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.10** 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、 $\varphi_0 = 0$ あるいは $\varphi_0 = 90^\circ$ でかつ、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下ろし、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 と上記で求めた E_1 から容易に決定される。本例のような場合、 $E_1 = 1.41 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $E_2 = E_1/e = 4.95 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$ として求められる。

なお、これらの弾性係数の主方向は **Fig.11** の測定値から、水平、鉛直の各方向に対して、何度傾斜しているかを決定することは簡単である。

(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 ($j =$

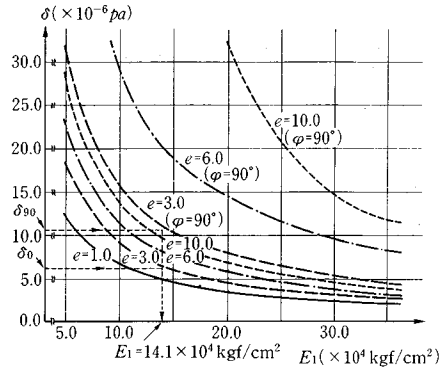


Fig.10 Relation between radial displacement δ and maximum principal elastic modulus E_1 with parameter $e = E_1/E_2$.

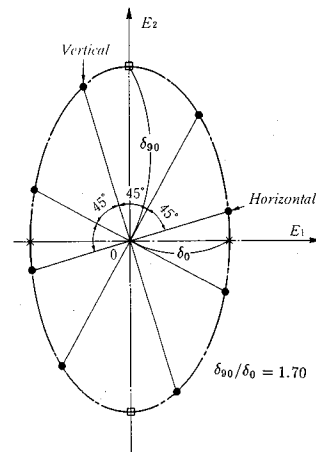


Fig.11 Numerical example of jack test as a case study.

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 $\nu = 0.2$ 、 $\nu_{12} = 0.2$ 、 $\nu_{3i} = \nu_{i3} = 0$ 、($i = x, y$) 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。

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} \dots \dots \dots (33)$$

代表的な計算例を **Fig.12** に示す。等方性の場合 ($e = 1.0$) の変位は円孔に沿って一様である。 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_0 、 δ_{90} および δ_{45}) を求めたのが、**Fig.13** (a)、(b)、(c) である。

半径方向変位に対する岩盤のポアソン比の影響は、別途実施した計算結果から、ポアソン比の 0.2 から 0.5 への増加に対して線形的に変化し、 x 軸方向で 10%、 y 軸方向で 7% の増加を示す。

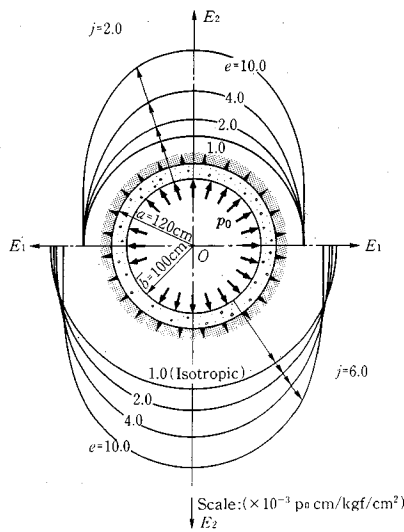


Fig. 12 Calculated radial displacement u_r around the inner surface of lining ($E=3.0 \times 10^5$ kgf/cm²) for water chamber test.

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 $E=3.0 \times 10^5$ kgf/cm², $\delta_0=0.8 \times 10^{-3} p_0$ cm/kgf/cm², $\delta_{90}=1.6 \times 10^{-3} p_0$ cm/kgf/cm² とする。Fig. 13 (b) から $j=3.3$, $e=4.1$ が読み取れる。したがって、 $E_1=9.1 \times 10^4$ kgf/cm², $E_2=2.2 \times 10^4$ kgf/cm² が求められる。

なお、ポアソン比が Fig. 13 に示される値と異なっても補正によって弾性係数が求められる。仮に、 $\nu=0.5$ の場合でも、測定される x 軸方向、 y 軸方向変位は、別途実施した計算結果からそれぞれ 9%、6% 程度減少することになる。コンクリート覆工の弾性係数が未知の場合は、Fig. 13 に示される値を補間して求めてやればよい。

4. 結 言

本論文では、現場における岩盤試験のうち、主に大規模地下空洞掘削時の岩盤試験等で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および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。本論文により、異方性を考慮した岩盤の力学的定数をより正確に把握する手法の一つが確立されたものと考えられる。

なお、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、

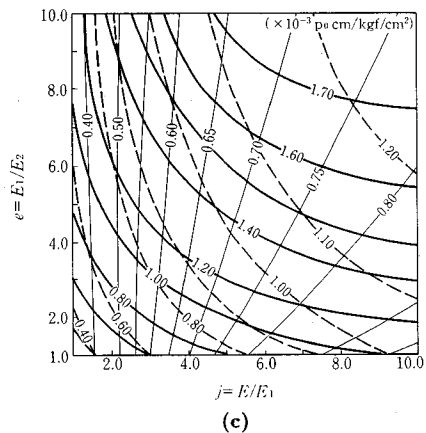
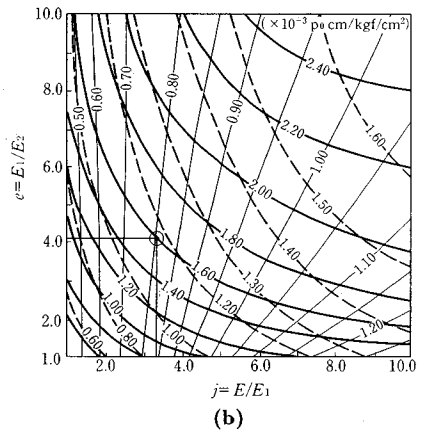
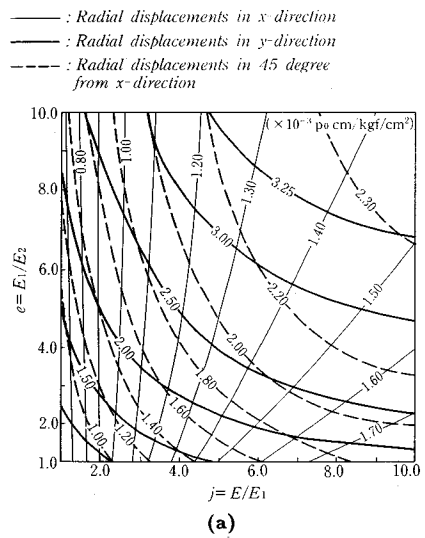


Fig. 13 Calculated radial displacement u_r in the cases of (a) $E=2.1 \times 10^5$ kgf/cm², (b) $E=3.0 \times 10^5$ kgf/cm² and (c) $E=4.0 \times 10^5$ kgf/cm² for water chamber test.

り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るが、これら補正についての理論的扱いは現在研究を行っている。

参考文献

- 1) Lauffer, H. and Seeker, G. : Design and control of linings of pressure tunnels and shafts, based on measurements of the deformability of the rock, 7th Congr. on Large Dam, Q. No.25, pp.678~705, 1961.
- 2) Jaeger, 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.
- 3) Goodman, R.G., et al : Measurement of rock deformability in boreholes, Basic and Applied Rock. Mech. (Ed. by R.E. Gray), AIME, pp.523~555, 1972.
- 4) 「孔内載荷試験法の現状と課題—指針化の試み—」, 土木学会編, 186 p, 1988.
- 5) 川本眺万 : 直交異方性弾性体内の一定内圧をうける円孔の変形状態について, 土木学会論文集, No. 118, pp. 1~7, 1965.
- 6) Kawamoto, T. : On the calculation of the orthotropic elastic properties from the states of deformation around a circular hole subjected to internal pressure in orthotropic elastic medium, Proc. 1st Congr. Int Soc. Rock Mech, Lisbon, pp.269~274, 1966.
- 7) Amadei, B. and Savage, W.Z. : Analysis of borehole expansion and galley tests in anisotropic rock masses, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol.28, pp.383~396, 1991.
- 8) Niwa, Y., Kobayashi, S. and Hirashima, K. : Determination of rock orthotropy by water chamber test, Int-Symp. Rock Mech., Madrid, pp.59~63, 1968.
- 9) Lekhnitskii, S.G. : Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body, (Eng. Trans.), Holden Day, 1963.
- 10) Lekhnitskii, S.G. : Anisotropic Plates, (Eng. Trans.), Golden and Breach Science, 1968.
- 11) Savin, G.N. : Stress Concentration Around Holes, (Eng. Trans.), Pergamon, 1961.
- 12) Timoshenko, S.P. and J.N. Goodier : Theory of Elasticity, (3rd. Ed.), McGraw-Hill, 1970.

(1992.7.23 受付)

SOME APPROACHES ON DETERMINATION OF ELASTIC PROPERTIES OF ANISOTROPIC ROCK MASSES BY JACK TEST AND WATER CHAMBER TEST

Kazuhiro OKA and Ken-ichi HIRASHIMA

This paper presents some methods which determine the elastic properties of anisotropic rock masses by interpreting the results of borehole jack test and water chamber test on the basis of two-dimensional anisotropic elastic theory. In the first part, mathematical formulations of two approaches for borehole jack and water chamber (with circular lining) tests in the medium having circular or elliptic hole are given, then the charts for determination of orthotropic elastic properties of rock masses are prepared by several graphical representations.