

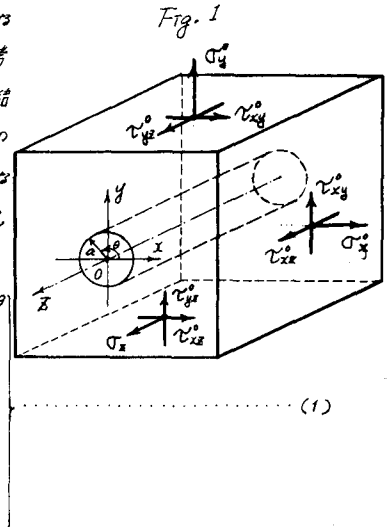
山梨大学・工学部 正員 平島健一  
株式会社・奥村組 正員・古賀 明

### 1. まえがき

地山と形成する岩盤内の初期応力と測定することは、岩盤と対象とする構造物の設計およびその安全性と判定するための基本的な要件である。従来から、岩盤内の三次元的初期応力あるいは変動応力と種々の方法（応力回復法、応力解放法、Hydraulic Jack法、etc.）によって測定することが試みられてきているが、これらの方法では岩盤と等価等方位の線型弾性体とした取り扱いがなされている。著者の一人は先に、実際の岩盤の力学的性質とより正確に導入するためのまず第一歩として、岩盤と等価の三次元異方性弾性体と仮定してボアホール内に埋設持した solid な測定装置 (instrumented inclusion) を用いて初期応力測定のための理論的方法と提案したが、この方法は剛性と有する測定装置によって初期応力の測定と行なうもので、一般には剛性測定器による方法（剛性測定法）と云われる。これに対し、剛性と持たない、あるいは剛性の充分小さい測定器による初期応力の測定法と柔性測定法と呼んでいる。ここでは、同様に岩盤と三次元異方性弾性体と仮定して柔性測定法によるボアホール内での変形（直径変化あるいは軸方向変位）あるいはボアホール周囲のひずみの測定結果から初期応力と測定するための解析方法はらびに具体的手順についての理論的な考察結果と二、三の数値計算例と述べるものである。

### 2. 従来までの研究の概略

Fig. 1 のようにボアホールの孔径に比して充分遠方より、三次元的な地山荷重応力 ( $\sigma_x^0, \sigma_y^0, \sigma_z^0, \tau_{xy}^0, \tau_{yz}^0, \tau_{zx}^0$ ) と受ける等方性弾性体と考え、この媒体内に穿孔された円形のボアホール周囲の応力、変位の解析結果が初期応力と決定するための基本となり、これらの理論結果は幾人かの研究者によって導かれているが、平松<sup>1)</sup>によるものをもっとも一般的に形式で表示されている。ボアホール近傍の応力、変位と円柱座標系 ( $r, \theta, z$ ) を用いて表わせば次のように与えられる。



$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1}{2}(\sigma_x^0 + \sigma_y^0) \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(\sigma_x^0 - \sigma_y^0) \left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta + \tau_{xy}^0 \left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \\ \sigma_\theta &= \frac{1}{2}(\sigma_x^0 + \sigma_y^0) \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(\sigma_x^0 - \sigma_y^0) \left(1 + 3\frac{a^2}{r^2}\right) \cos 2\theta - \tau_{xy}^0 \left(1 + 3\frac{a^2}{r^2}\right) \sin 2\theta \\ \sigma_z &= \sigma_z^0 - 2\nu(\sigma_x^0 - \sigma_y^0) \frac{a^2}{r^2} \cos 2\theta - 4\nu \tau_{xy}^0 \frac{a^2}{r^2} \sin 2\theta \\ \tau_{r\theta} &= \frac{1}{2}(\sigma_x^0 - \sigma_y^0) \left(-1 - 2\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta - \tau_{xy}^0 \left(-1 - 2\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \\ \tau_{\theta z} &= \tau_{yz}^0 \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \cos \theta - \tau_{xz}^0 \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \sin \theta \\ \tau_{rz} &= \tau_{yz}^0 \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \sin \theta + \tau_{xz}^0 \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \cos \theta \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} u_r &= \frac{1+\nu}{E} \left[ \left( \frac{1-\nu}{1+\nu} \cdot \frac{\sigma_x^0 + \sigma_y^0}{2} - \frac{\nu}{1+\nu} \sigma_z^0 \right) r + \frac{\sigma_x^0 + \sigma_y^0}{2} \frac{a^2}{r} + \left\{ r - \frac{a^4}{r^3} + 4(1-\nu) \frac{a^2}{r} \right\} \left\{ \frac{\sigma_x^0 - \sigma_y^0}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy}^0 \sin 2\theta \right\} \right] \\ u_\theta &= \frac{1+\nu}{E} \left\{ -r - \frac{a^2}{r^3} - 2(1-2\nu) \frac{a^2}{r} \right\} \left\{ \frac{\sigma_x^0 - \sigma_y^0}{2} \sin 2\theta - \tau_{xy}^0 \cos 2\theta \right\} \\ w_z &= \frac{1+\nu}{E} \left\{ 2 \left( r + \frac{a^2}{r} \right) (\tau_{yz}^0 \sin \theta + \tau_{xz}^0 \cos \theta) + \frac{z}{1+\nu} \sigma_z^0 - \frac{\nu z}{1+\nu} (\sigma_x^0 + \sigma_y^0) \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

これらの応力、変位の式と利用してボアホールの壁面での変位、ひずみの測定量から初期応力と決定するための方法のうち代表的なものと列挙すれば、(1)複数のボアホールの孔径変化量と測定する方法、(2)単一のボアホールの孔壁面ひずみと測定する方法、(3)単一のボアホール<sup>1)</sup>の孔径変化量および軸方向 (z 方向) 変位と測定する方法、等が考えられる。

### 3. 三次元異方性岩盤への拡張

前節に略述した方法と等質の三次元異方性弾性岩盤に適用するためには、異方性体とした場合の式(1),(2)に対応する応力、変位の式と求めなければならぬが、これらの式はすでに著者の一人が、平松周らと同一の仮定と設けて理論的に求めた<sup>2)</sup>ので、それを利用することにより、初期地山応力の算定を行なうことが可能である。これらの具体的な式は非常に複雑であるのでここでは省略するが、等方性体の式(1),(2)に示すように三次元的な地山荷重応力( $\sigma_x^0, \sigma_y^0, \sigma_z^0, \tau_{xy}^0, \tau_{yz}^0, \tau_{zx}^0$ )、角度 $\theta$ 、距離 $r, a, B$ の他に、考慮している異方性体の弾性定数( $Q_{11}, Q_{12}, \dots, Q_{66}$ )および特性方程式の複素根 $\mu_k (k=1, 2, 3)$ に関係した形で表示されるものである。これらの式はポアソン定数の応力、変位が、当然のことながら地山荷重応力( $\sigma_x^0, \sigma_y^0, \sigma_z^0, \tau_{xy}^0, \tau_{yz}^0, \tau_{zx}^0$ )の各々の値と線型結合になっており、したがって前節の最後に列挙した初期地山応力の測定法がすべて適用できることになる。

### 4. 数値計算例

ここでは(1)複数のポアソンの孔径変化量と測定することによって初期地山応力と決定する方法のみを例示する。この方法ではFig.2に示すように最低三本のポアホールが必要であり、また各々のポアホールの孔径変化は三方向上の角度位置で測定したデータによって、地山応力( $\sigma_x^0, \sigma_y^0, \sigma_z^0, \tau_{xy}^0, \tau_{yz}^0, \tau_{zx}^0$ )と完全に決定することができものである。ただし、地山応力としての未知量は6個であるのに対して、測定量(したがって方程式の数)は9個となるため、最小二乗法を用いて未知量の決定を行なうことになる。

さて、数値計算を行なうにあたって、便宜的に次のような条件を設けた。

- (a) 岩盤は横等方性の異方性体( $E_1=E_2, \nu_{12}=\nu_{21}$ )と仮定する。
- (b) 弾性主軸の方向はZ軸に対して水平、垂直の方向と仮定する。
- (c) 測定点およびその孔径変化量はTable 1の値と仮定する。

上記の測定値は平松周らが導いた基本式に

次のような等方性の弾性定数とDataとして計算に用いたものである。

$$E = 3.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2, \nu = 0.250 \dots (3)$$

Table 2 は上述の条件(a)~(c)を用いて初期地山応力と

計算した結果を表示したものである。なお、同表中には式(3)のような等方性体の場合に対する平松周らの計算結果ならびに著者の導いた計算式に同一の弾性定数(式(3))を代入して計算した結果も併記されているが、両者の結果ほとんど完全に一致していることがわかる。

### 5. おわりに

その他の方法を用いた場合の例および計算結果に対する考察は紙面の都合上、講演会当日に譲る。

### 参考文献:

- 1) Hiramatsu, Y. and Y. Oka: Mem. Fac. Eng., Kyoto Univ., Vol. 30 (1968) pp. 480~499.
- 2) 丹羽義次・小林昭一・平島健一: 土木学会論文報告集, 第173号 (1970), pp. 7~17.
- 3) Niwa, Y. and K. Hirashima: Mem. Fac. Eng., Kyoto Univ. Vol. 33 (1971), pp. 101~117

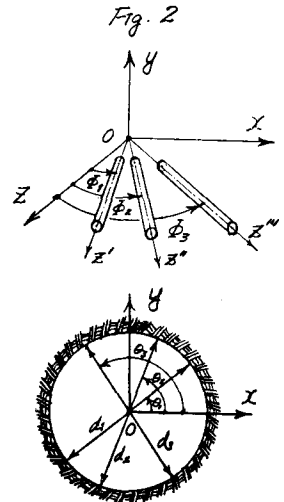


Table 1

| $\theta_k$        | $\theta_1 = 45^\circ$ |            |            | $\theta_2 = 90^\circ$ |            |            | $\theta_3 = 135^\circ$ |            |            |
|-------------------|-----------------------|------------|------------|-----------------------|------------|------------|------------------------|------------|------------|
| $\theta_k$        | $\theta_1$            | $\theta_2$ | $\theta_3$ | $\theta_1$            | $\theta_2$ | $\theta_3$ | $\theta_1$             | $\theta_2$ | $\theta_3$ |
| "                 | 30°                   | 90°        | 150°       | 30°                   | 90°        | 150°       | 30°                    | 90°        | 150°       |
| $\Delta V_k (\%)$ | -64                   | -832       | -265       | -52                   | -826       | -320       | -128                   | -816       | -308       |

Table 2.

| $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ | 平松 周<br>の結果 <sup>1)</sup> | 著者との計算結果               |         |         |         |          |
|---------------------------------|---------------------------|------------------------|---------|---------|---------|----------|
|                                 |                           | $e=1/5$<br>(Isotropic) | $e=5/6$ | $e=1/2$ | $e=1/5$ | $e=1/10$ |
| $\sigma_x^0$                    | -31.0                     | -31.3                  | -28.4   | -17.7   | -6.6    | -1.3     |
| $\sigma_y^0$                    | -97.9                     | -98.0                  | -81.2   | -48.7   | -19.9   | -9.9     |
| $\sigma_z^0$                    | -29.6                     | -29.8                  | -24.2   | -14.9   | -6.2    | -3.1     |
| $\tau_{xy}^0$                   | -12.4                     | -12.4                  | -10.3   | -6.0    | -2.5    | -1.3     |
| $\tau_{yz}^0$                   | -3.6                      | -3.7                   | -3.3    | -2.6    | -1.2    | -0.7     |
| $\tau_{zx}^0$                   | +0.7                      | +0.7                   | +0.6    | +0.6    | +0.2    | +0.2     |

$$E_{11} = E = 3.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2, \quad e = E_{33}/E_{11} = E_{22}/E_{11}$$

$$\nu_{12} = \nu = 0.250, \quad \nu_{13} = \nu_{23} = 0.150$$

$$\frac{1}{G_{23}} = \frac{1}{E_{22}} + \frac{1}{E_{33}} + \frac{2\nu_{23}}{E_{22}}, \quad \frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} + \frac{2\nu_{12}}{E_{11}}$$