

山梨大学・工学部 正員。平島健一
 松江工専・土木工学科 兵野浩幹

1. まえがき.

地下発電所、長大トンネル、燃料(石油)地下貯蓄のための岩盤内の大型掘削機に対する設計基本資料と入手するためには、掘削前の岩盤内の応力状態を何らかの計測法により求めなければならぬ。そのため、従来から岩盤内の3次元の初期(変動)応力と種々の方法(応力回復法、応力解放法、Hydraulic Jack法等)によって測定することが試みられていたが、このデータから、設計構造物の施工位置での応力・変形状態を求めるための、いわゆる逆問題と解析しなければならぬ。このための基本項目は対象とする地山の力学定数(弾性係数、Poisson比等)と予備的な手段で計測しておき、それと基として初期(変動)応力の測定用のために設けたボアホールや試験トンネルでの計測器による測定データと収集し、岩盤の物性(構成式)、測定孔の幾何形状、地山表面の影響の有無等と仮定をいし考慮して上述の逆問題と解析することである。その場合、岩盤の物性としては一般に等質・等方弾性体とした仮定と採用するのが普通である。これに対し、著者の一人は先に、実際の岩盤の力学性質と正確に導入するための第一歩として、また顕著な岩盤性状と考慮できるように岩盤と等質ではあるが、一般的に3次元異方性弾性体と仮定して初期(変動)応力の決定のための理論的方法と提案すること共に、具体的な数値例と挙げてその処理方法と例示した¹⁾。

上述した結果と踏まえて最近、Amadeiは同様の解析過程により系統的に整理した結果を取りまとめて公開した²⁾。この両者の取扱いには一応たけ明確な差異が認められるが、それは次第以降に述べよう。現場計測の過程での応力解放に際して実施されるオーバーコアリング操作に際し、ボアホール軸方向に対するひずみ拘束の有無にある。すなわち、著者の一人(平島)は平面ひずみ拘束と仮定したのに対し、Amadeiは平面応力的拘束と設けたことから生じたものである。これらの取り扱いの差異から生じる数値結果への影響と、どちらの方がより妥当か等について検討したものが本文の内容である。

2. 解析過程の概要

まず図1のようにボアホールの孔径に比較して十分大なり3次元の地山初期(変動)荷重応力 $\sigma_x, \sigma_y, \dots, \tau_{yz}$ と受ける3次元的に均質な異方性弾性体と考える。異方性弾性体の構成式は一般に次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{13}\sigma_z + a_{14}\tau_{yz} + a_{15}\tau_{zx} + a_{16}\tau_{xy}, \\ \epsilon_y &= a_{21}\sigma_x + a_{22}\sigma_y + a_{23}\sigma_z + a_{24}\tau_{yz} + a_{25}\tau_{zx} + a_{26}\tau_{xy}, \\ \epsilon_z &= a_{31}\sigma_x + a_{32}\sigma_y + a_{33}\sigma_z + a_{34}\tau_{yz} + a_{35}\tau_{zx} + a_{36}\tau_{xy}, \\ \gamma_{yz} &= a_{41}\sigma_x + a_{42}\sigma_y + a_{43}\sigma_z + a_{44}\tau_{yz} + a_{45}\tau_{zx} + a_{46}\tau_{xy}, \\ \gamma_{zx} &= a_{51}\sigma_x + a_{52}\sigma_y + a_{53}\sigma_z + a_{54}\tau_{yz} + a_{55}\tau_{zx} + a_{56}\tau_{xy}, \\ \gamma_{xy} &= a_{61}\sigma_x + a_{62}\sigma_y + a_{63}\sigma_z + a_{64}\tau_{yz} + a_{65}\tau_{zx} + a_{66}\tau_{xy}. \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &(\text{直交異方性弾性体の場合の } a_{ij}): \\ &a_{11} = \frac{1}{E_1}, \quad a_{22} = \frac{1}{E_2}, \quad a_{33} = \frac{1}{E_3}, \quad a_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2}, \\ &a_{13} = -\frac{\nu_{13}}{E_1} = -\frac{\nu_{31}}{E_3}, \quad a_{23} = -\frac{\nu_{23}}{E_2} = -\frac{\nu_{32}}{E_3}, \quad a_{44} = \frac{1}{G_{12}}, \\ &a_{55} = \frac{1}{G_{13}}, \quad a_{66} = \frac{1}{G_{23}}, \quad \text{その他の } a_{ij} = 0. \end{aligned} \quad (1), (2)$$

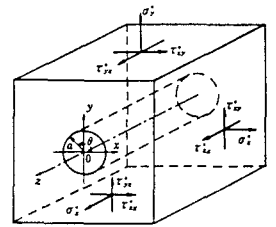


図1. 三次元応力状態のもとでの円形ボアホールを有する弾性体

すなわち、 E_1, E_2, E_3 は主弾性係数、 G_{12}, G_{13}, G_{23} はせん断弾性係数であり、 ν_{ij} はPoisson比である。このような地山内の初期(変動)応力測定用の円形ボアホール(半径 a)と掘削した場合、この孔近傍の応力および変位は図1に示した直交座標系 (x, y, z) を用いて表示される次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_x^0 + 2\text{Re} \{ \mu_1 \Phi_1'(z_1) + \mu_2 \Phi_2'(z_2) + \mu_3 \Phi_3'(z_3) \}, \\ \sigma_y &= \sigma_y^0 + 2\text{Re} \{ \Phi_1'(z_1) + \Phi_2'(z_2) + \lambda_3 \Phi_3'(z_3) \}, \\ \sigma_z &= \sigma_z^0 - \frac{1}{a_{33}} (a_{13}\sigma_x^0 + a_{23}\sigma_y^0 + a_{34}\tau_{yz}^0 + a_{35}\tau_{zx}^0 + a_{36}\tau_{xy}^0), \\ \tau_{yz} &= \tau_{yz}^0 - 2\text{Re} \{ \mu_1 \Phi_1'(z_1) + \mu_2 \Phi_2'(z_2) + \mu_3 \lambda_3 \Phi_3'(z_3) \}, \\ \tau_{zx} &= \tau_{zx}^0 + 2\text{Re} \{ \mu_1 \lambda_1 \Phi_1'(z_1) + \mu_2 \lambda_2 \Phi_2'(z_2) + \mu_3 \Phi_3'(z_3) \}, \\ \tau_{xy} &= \tau_{xy}^0 - 2\text{Re} \{ \lambda_1 \Phi_1'(z_1) + \lambda_2 \Phi_2'(z_2) + \Phi_3'(z_3) \}, \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} u &= u^0 + 2\text{Re} \left[\sum_{i=1}^3 p_i \Phi_i(z_i) \right], \\ v &= v^0 + 2\text{Re} \left[\sum_{i=1}^3 q_i \Phi_i(z_i) \right], \\ w &= w^0 + 2\text{Re} \left[\sum_{i=1}^3 r_i \Phi_i(z_i) \right], \end{aligned} \right\} \dots (3), (4).$$

$$z_k = x + \mu_k y, \quad (k=1, 2, 3)$$

上式中の係数 μ_k は式(5)の6次代数方程式の根として求められ、複素数値である。また λ_k, p_k, q_k, r_k 等も μ_k によって計算できるものである。また式(3), (4)の複素応力関数 $\bar{z}_k$ は μ_k, λ_k および地山の初期応力 $\sigma_x^0, \sigma_y^0, \tau_{xy}^0$ を用いて式(7)~(9)で求められる。なお、式(4)の u^0, v^0 および w^0 はポアソール比 ν とした場合のみ、および z 方向変位で終極に求められ、 z 方向変位である。

3. 地山応力の決定手法¹⁾

このための手法として、著者の一人(平島)は、

(A) ポアソールの孔徑変化量と測定する場合、(B) 孔壁面のずみと測定する場合、(C) ポアソール軸方向の変位と測定する場合、についてこの解析式と前項の基礎式を再構成して提示したが、ここではその詳細については省略する。

4. 数値計算例

ここでは Amadei の理論²⁾との比較とその目的とするところから $\sigma_x^0, \sigma_y^0, \tau_{xy}^0$ が与えられた場合のポアソール孔周縁に生じる応力、変位を計算し、それらの差異を見ていくことにする。

右表のように $\sigma_x^0, \sigma_y^0, \tau_{xy}^0$ および弾性定数 E, ν を与え、走行角 $\beta=40^\circ$ 、傾斜角 $\psi=30^\circ$ 、図3の角 $\beta_R=90^\circ, \delta_R=0^\circ$ の場合について、ポアソール軸を基準とした円柱座標 (r, θ, z) での孔縁応力 $\sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{\theta z}$ および変位 u_r, u_θ, w の計算結果をまとめたものが表1(a)および(b)である。(上段に平島理論、下段に Amadei 理論による結果を示した。)この表とみるに応力については完全に一致して、変位に差異がある。 $u_r=U_r+u_r', u_\theta=U_\theta+u_\theta', w=W+w'$ と設定して計算して、(表1(b))。添字0の量は地山応力下のポアソールが存在しない状態での変位、添字1の量は残りの部分である。この変位のうち添字0の部分に差異があるのは、平島は平面ひずみ状態と、Amadei は平面応力状態と“0の条”に対して想定していることに起因するものである。

(地山の初期応力成分):

$$\begin{aligned} \sigma_x^0 &= 7.0, & \sigma_y^0 &= 2.5, & \tau_{xy}^0 &= 5.8 \\ r_{xx}^0 &= -1.8, & r_{yy}^0 &= 1.0, & r_{xy}^0 &= 2.6 \quad (\times \text{MPa}) \end{aligned}$$

(地山の弾性定数):

$$\begin{aligned} E_1 &= 2.0 \times 10^4, & E_2 &= E_3 = 4.0 \times 10^4, & (\times \text{MPa}) \\ G_{12} &= G_{13} = 4.0 \times 10^3, & G_{23} &= 1.6 \times 10^4, & (\times \text{MPa}) \\ \nu_{12} &= \nu_{13} = 0.2, & \nu_{23} &= 0.25 \end{aligned}$$

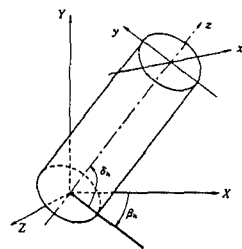


図3 基本座標系 (X, Y, Z) に関する座標系 (x, y, z) の関係

表1(a). 平島理論と Amadei 理論によるポアソール孔縁での応力と変位

θ	σ_θ ($\times \text{MPa}$)	σ_z ($\times \text{MPa}$)	$\tau_{\theta z}$ ($\times 10^{-4}$)	$\frac{u_r}{a}$ ($\times 10^{-4}$)	$\frac{u_\theta}{a}$ ($\times 10^{-4}$)	$\frac{w}{a}$ ($\times 10^{-4}$)
0°	0.3273	4.763	-3.222	9.750	8.639	3.706
				9.635	8.567	3.968
10°	-2.457	3.848	-3.691	12.11	6.529	2.938
				11.97	6.439	3.299
20°	-4.047	3.251	-3.958	13.61	3.738	2.081
				13.44	3.641	2.530
30°	-4.892	2.878	-4.250	14.07	0.6027	1.161
				13.86	0.5106	1.683
40°	-4.794	2.726	-4.827	13.42	-2.499	0.2049
				13.18	-2.576	0.7660
50°	-2.467	2.761	-5.889	11.76	-5.193	-0.7570
				11.49	-5.245	-0.1352
60°	4.193	2.775	-6.721	8.267	-7.154	-1.696
				8.993	-7.175	-1.052
70°	13.73	2.956	-5.225	6.259	-8.146	-2.583
				5.963	-8.134	-1.937
80°	19.72	4.083	-1.778	3.092	-8.050	-3.392
				2.826	-8.005	-2.764
90°	20.80	5.807	0.7773	0.1497	-6.876	-4.096
				-0.95939	-6.504	-3.506

表1(b). 平島理論と Amadei 理論によるポアソール孔縁での変位成分
(上段: 平島理論, 下段: Amadei 理論) ($\times 10^{-4}$)

θ	$\frac{u_r}{a}$	$\frac{u_\theta}{a}$	$\frac{w}{a}$	$\frac{u_r}{a}$	$\frac{u_\theta}{a}$	$\frac{w}{a}$
0°	4.122	3.694	2.255	5.629	4.944	1.451
	4.007	3.623	2.517			
10°	5.229	2.584	1.692	6.885	3.945	1.246
	5.085	2.429	2.053			
20°	5.889	1.162	1.078	7.725	2.576	1.003
	5.713	1.065	1.527			
30°	6.023	-0.4006	0.4315	8.045	1.003	0.7291
	5.814	-0.4926	0.9543			
40°	5.615	-1.1919	-0.2284	7.808	-0.5846	0.4333
	5.376	-1.991	0.3527			
50°	4.714	-3.197	-0.8813	7.042	-1.996	0.1243
	4.452	-3.249	-0.2595			
60°	3.428	-4.095	-1.508	5.840	-3.060	-0.1884
	3.153	-4.115	-0.8639			
70°	1.913	-4.498	-2.088	4.346	-3.648	-0.4954
	1.637	-4.485	-1.442			
80°	0.3059	-4.359	-2.605	2.741	-3.691	-0.7874
	0.08528	-4.314	-1.376			
90°	-1.069	-3.694	-3.043	1.219	-3.182	-1.055
	-1.314	-3.623	-2.451			

5. おわりに

詳しくは当日発表するが、本文により両理論の差異の原因は、 ν の数量的誤差の大きさと異次元性によって示すことが出来た。なお、平松・岡の等方性体に対するものは平島理論と同じ取扱としていた。

参考文献:

- 1) 平島健一, 古賀明: 異方性岩盤内の応力測定法に関する研究, 山梨大学工学部研究報告, 24, 140-147, (1973).
- HIRASHIMA, K. & KOGA, A.: Determination of Stresses in anisotropic elastic medium unaffected by boreholes from measured strains or deformations, Proc. Symp. Field Measurements in Rock Mechanics, Zürich, 173-182, (1977).
- 2) AMADEI, B.: Rock Anisotropy and the Theory of Stress Measurements, Springer-Verlag, 478pp., (1983).
- 3) LEKHNITSUKII, S. G.: Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body, (English Translation), Holden-Day, (1963).
- 4) HIRAMATSU, Y. & OKA, Y.: Determination of the stress in rock unaffected by boreholes or drifts from measured strains or deformations, Mem. Fac. Eng., Kyoto Univ., 30, 480-499, (1968).