

### III-A 382 円錐孔底ひずみ法の高精度化

熊本大学工学部 正会員 尾原祐三、菅原勝彦  
西松建設 今井啓太

#### 1. はじめに

応力解放法の1つであり、経済的かつ高精度岩盤応力測定法として知られている円錐孔底ひずみ法<sup>1)</sup>に基づいて、ロゼッタゲージを用いて円錐孔底ひずみ法の高精度化を試みた。得られた結果を以下に報告する。

#### 2. 応力測定理論

岩盤を等方均質弾性体と仮定し、図1に示すように、応力測定のためのパイロット孔（半径 $R=38\text{mm}$ ）の底の先端部分は、半径 $R_1=14\text{mm}$ の球面で頂角 $\omega=60^\circ$ の円錐形としている。

さて、孔底に直角座標系 $(x, y, z)$ 、円柱座標系 $(\rho, \theta, z)$ および球座標系 $(\rho, \theta, \phi)$ を定め、円柱座標系の変位成分を $(u_r, u_\theta, u_z)$ 、球座標系の変位成分を $(u_\rho, u_\theta, u_\phi)$ と表記する。また、球座標系の直ひずみ成分を $(\varepsilon_\rho, \varepsilon_\theta, \varepsilon_\phi)$ 、 $\theta-\rho$ 平面内のせん断ひずみを $\gamma_\theta$ と表記する。また、パイロット孔が作られる以前に岩盤に作用していた初期応力を直角座標系の応力成分によって、 $\{\sigma\}^T = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}$  のように定義する。

孔底ひずみは円錐面上の半径 $r_0=19\text{mm}$ の円周上に軸対称に配置された8つの測点において、周方向のひずみ $\varepsilon_\theta$ 、稜線方向のひずみ $\varepsilon_\rho$ および $\theta$ 軸から反時計回りに角度 $45^\circ$ をなす方向のひずみ $\varepsilon_\phi$ が合計24個測定されるものとする。なお、 $r_0$ を測定半径、 $r_0/R$ を無次元測点半径と呼ぶ。この測定半径は従来の円錐孔底ひずみ法のそれと一致している。

まず、変位・ひずみ関係から式(1)が与えられる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_\theta &= \frac{1}{\rho \sin \phi} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_\rho}{\rho} + \frac{u_\phi}{\rho} \cot \phi, & \varepsilon_\rho &= \frac{\partial u_\rho}{\partial \rho}, \\ \gamma_\theta &= \frac{1}{\rho \sin \phi} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial z} - \frac{u_\phi}{\rho}, & \varepsilon_\phi &= \frac{1}{2} (\varepsilon_\theta + \varepsilon_r + \gamma_\theta) \end{aligned} \quad (1)$$

さて、孔底ひずみと初期応力の関係式は、

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_r \\ \varepsilon_\phi \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & +A_{12} \cos 2\theta & A_{11} & -A_{12} \cos 2\theta & C_1 \\ A_{21} & +A_{22} \cos 2\theta & A_{21} & -A_{22} \cos 2\theta & C_2 \\ A_{31} + A_{33} \sin 2\theta + A_{33} \cos 2\theta & & A_{31} - A_{32} \sin 2\theta - A_{33} \cos 2\theta & & C_3 \end{bmatrix} \cdot \frac{\{\sigma\}}{E}$$

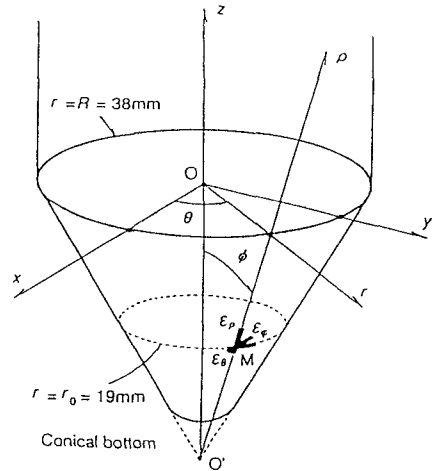


図1 円錐孔底における測定ひずみと座標系

$$\begin{bmatrix} D_{11} \sin \theta & , & D_{11} \cos \theta & 2A_{12} \sin 2\theta \\ D_{21} \sin \theta & , & D_{21} \cos \theta & 2A_{22} \sin 2\theta \\ D_{31} \sin \theta - D_{32} \cos \theta & D_{31} \sin \theta + D_{32} \cos \theta & 2A_{33} \sin 2\theta - 2A_{32} \cos 2\theta \end{bmatrix} \cdot \frac{\{\sigma\}}{E} \quad (2)$$

で表わされる。ここに、 $A_1, A_2, \dots, D_2$ はひずみ感度係数と呼ばれ、ポアソン比 $\nu$ および無次元測点半径 $r_0/R$ の関数である。ひずみ感度係数を示すと表1のようである。これらは回転体非軸対称荷重問題として境界要素法で求めたものである。

さて、8つの測定点において $\varepsilon_\theta$ 、 $\varepsilon_\rho$ および $\varepsilon_\phi$ がそれぞれ同時に測定され、合計24個の孔底ひずみが得られたとすると、これらの孔底ひずみと初期応力の関係式は式(2)に従って求められる。したがって、孔底ひずみの測定値を、 $\{\beta\}^T = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{24}\}$  とすると、初期応力 $\{\sigma\}$ の観測方程式はつぎのようにマトリックス表示できる。

$$[A]^T \cdot \{\sigma\} = E \cdot \{\beta\} \quad (3)$$

表1 24素子円錐孔底ひずみ法のひずみ感度係数

Poisson's ratio : $\nu$	A11	A12	A21	A22	A31	A32	A33	C1	C2	C3	D11	D21	D31	D32
0.10	1.015	-1.794	0.110	0.345	0.562	-0.802	-0.724	-0.159	0.652	0.246	0.082	1.523	0.802	-1.725
0.20	1.015	-1.782	0.023	0.367	0.519	-0.818	-0.707	-0.269	0.639	0.185	0.096	1.626	0.860	-1.860
0.25	1.014	-1.762	-0.021	0.377	0.496	-0.821	-0.693	-0.323	0.634	0.155	0.100	1.672	0.886	-1.923
0.30	1.013	-1.733	-0.066	0.384	0.474	-0.820	-0.674	-0.378	0.631	0.126	0.107	1.715	0.911	-1.983
0.40	1.008	-1.643	-0.155	0.393	0.426	-0.803	-0.625	-0.488	0.630	0.071	0.120	1.785	0.953	-2.091

ここに、 $[A]$ は $24 \times 6$ の係数マトリックスであり、上式を正規化すると、つぎのような観測方程式が得られる。

$$[B] \cdot \{\sigma\} = E \cdot \{\bar{\beta}\} \quad (4)$$

ここに、 $[B] = [A]^T \cdot [A]$ 、 $\{\bar{\beta}\} = [A]^T \cdot \{\beta\}$ である。 $[B]$ の逆マトリックスを $[C]$ とすると、

$$\{\bar{\sigma}\} = E \cdot [C] \cdot \{\bar{\beta}\} \quad (5)$$

となり、初期応力 $\{\sigma\}$ の最確値 $\{\bar{\sigma}\}$ が求まる。

### 3. 測定精度の検討

6つの応力成分の分散 $\{\xi_m^2\}$ は、測定値 $\beta_i$ の分散を $\xi_m^2$ とすると、最小二乗法の性質により、

$$\xi_i^2 = c_{ii} \cdot E^2 \cdot \xi_m^2 \quad (6)$$

で与えられる。ここに、 $c_{ii}$ はマトリックス $[C]$ の対角成分である。上式は各応力成分の分散がマトリックス $[C]$ の対応する対角成分に比例することを示している。したがって、孔底ひずみの測定において、測定値の分散 $\xi_m^2$ が一定であると仮定すると、応力測定精度は $c_{ii}$ の最大値 $c_{max}$ の大きさから分析できると考えられる。すなわち、 $c_{max}$ の値が小さいほど初期応力の測定精度は高いと考えられる。

さて、小林らが提案している12素子円錐孔底ひずみ法<sup>2)</sup>および坂口ら<sup>1,3)</sup>が提案している16素子円錐孔底ひずみ法と本報告で提案している24素子円錐孔底ひずみ法の3つの方法における $c_{max}$ の比較を行うと表2のようである。 $c_{max}$ の値はポアソン比によって異なるが、それぞれのポアソン比における $c_{max}$ の値は本方法が最も小さく、応力測定精度は本方法が最も高いと結論できる。

### 参考文献

- 1) 坂口ら，資源と素材，108，6，pp.455-460（1992）． 2) 小林ら，第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.279-284（1990）． 3) 坂口ら，資源と素材，110，4，pp.331-336（1994）．

表2  $c_{max}$ による応力測定精度の比較

Method	Normalized radius of measuring circle : $r/R$	Number of strains to be measured : $n$	Poisson's ratio : $\nu$	Maximum value of $c_{ii}$ : $c_{max}$
Strain measurements on the conical bottom surface of a single borehole	0.589	12	1/6	0.378
			1/3	0.467
	0.5	16	1/6	0.293
			1/3	0.361
0.5	24	1/6	0.166	
		1/3	0.193	