

小孔径オーバーコアリングによる初期応力測定理論

安藤ハザマ 正会員 ○川久保 昌平
(国研) 産業技術総合研究所 板場 智史

1. 目的

大深度地下空洞を建設する場合、初期応力を把握することが求められる。我国では初期応力測定法として、応力解放法の一つである埋設ひずみ法が多く用いられてきた。同手法は ϕ 200mm 程度のオーバーコアリングを伴うため、現在はあまり用いられていないのが現状である。また、過去には東濃地震研や産総研で応力解放法による測定がなされてきたが、3次元の初期応力推定は行われなかった。本論文は、小孔径オーバーコアリングを前提として3次元初期応力を解析する理論を示し、その妥当性を検証するものである。

2. 測定理論

測定は埋設ひずみ法 (JGS3741-2012) に準じ、半径 r_3 の測定孔に外半径 r_2 及び内半径 r_1 の中空型ひずみ計を埋設するものとする。 r_3, r_2 間はグラウト充填し、グラウト硬化後に半径 r_4 でオーバーコアリングする。

(1) 基礎式 初期応力を $\sigma_x^\infty, \sigma_y^\infty, \sigma_z^\infty, \tau_{xy}^\infty, \tau_{yz}^\infty, \tau_{zx}^\infty$ とした解析モデルを図1に示す。各領域 ($i=1\sim 4$) における複素応力関数を次式で定義する¹⁾。

$$\left. \begin{aligned} \varphi_i(z) &= a_3^{(i)} z^3 + a_1^{(i)} z + a_{-1}^{(i)} z^{-1} \\ \psi_i(z) &= k^{(i)} \log z + b_2^{(i)} z^2 + b_{-2}^{(i)} z^{-2} \\ \chi_i(z) &= c_1^{(i)} z + c_{-1}^{(i)} z^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 $z = x + iy$ (i :虚数単位) で $a_j^{(i)}, k^{(i)}, b_j^{(i)}, c_j^{(i)}$ は複素係数である。上添字 $^{(i)}$ は領域を示す。合力、変位は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \mp(P_y^{(i)} + iP_x^{(i)}) &= \overline{\varphi_i(z)} + \bar{z}\varphi_i'(z) + \psi_i'(z) \\ P_z^{(i)} &= \pm Im[\chi_i(z)] \\ u_x^{(i)} &= \frac{1}{2G_i} Re[\kappa_i \overline{\varphi_i(z)} - \bar{z}\varphi_i'(z) - \psi_i'(z)] \\ u_y^{(i)} &= -\frac{1}{2G_i} Im[\kappa_i \overline{\varphi_i(z)} - \bar{z}\varphi_i'(z) - \psi_i'(z)] \\ u_z^{(i)} &= \frac{1}{G_i} [\chi_i(z)], \quad \kappa_i = 3 - 4\nu_i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 Re, Im は実部及び虚部、 $\bar{}$ は共役、 $', ''$ は z での1,2階微分を示す。 $\mp$ は外側境界のとき $+$ をとる。 ν_i はポアソン比、 G_i はせん断剛性率である。 $z \rightarrow \infty$ で応力は一定となる条件から、領域(4)での複素係数は式(3)で得られる。

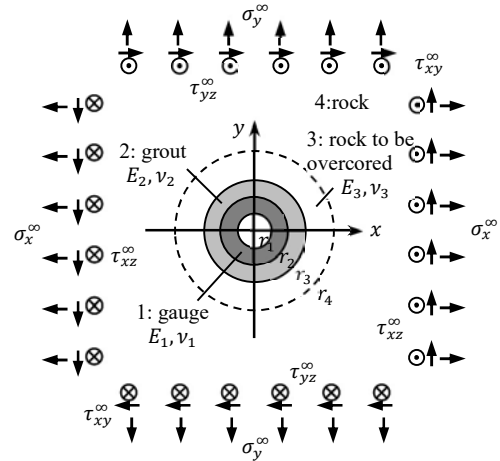


図1 解析モデル

$$\left. \begin{aligned} a_1^{(4)} &= \frac{1}{4}(\sigma_x^\infty + \sigma_y^\infty), \quad a_{-1}^{(4)} = \frac{r_3^2}{2}(\sigma_x^\infty - \sigma_y^\infty) + i r_3^2 \tau_{xy}^\infty \\ k^{(4)} &= -\frac{r_3^2}{2}(\sigma_x^\infty + \sigma_y^\infty), \quad b_2^{(4)} = \frac{1}{4}(\sigma_y^\infty - \sigma_x^\infty) + \frac{i}{2} \tau_{xy}^\infty \\ b_{-2}^{(4)} &= \frac{r_3^4}{4}(\sigma_y^\infty - \sigma_x^\infty) - \frac{i}{2} r_3^4 \tau_{xy}^\infty \\ c_1^{(4)} &= \tau_{xz}^\infty - i \tau_{yz}^\infty, \quad c_{-1}^{(4)} = r_3^2(\tau_{xz}^\infty + i \tau_{yz}^\infty) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

(2) 境界条件 $r = r_4$ で応力解放された供試体は、オーバーコア前と反対方向の合力が作用する。すなわち、 $P_y^{(4)} + iP_x^{(4)} - (P_y^{(3)} + iP_x^{(3)}) = 0, P_z^{(4)} - P_z^{(3)} = 0$ (4)
 $r = r_3, r_2$ では、次式の合力の作用・反作用及び変位の連続条件が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} P_y^{(3)} + iP_x^{(3)} + P_y^{(2)} + iP_x^{(2)} &= 0, \quad P_z^{(3)} + P_z^{(2)} = 0 \\ u_x^{(3)} - i u_y^{(3)} - (u_x^{(2)} - i u_y^{(2)}) &= 0, \quad u_z^{(3)} - u_z^{(2)} = 0 \\ P_y^{(2)} + iP_x^{(2)} + P_y^{(1)} + iP_x^{(1)} &= 0, \quad P_z^{(2)} + P_z^{(1)} = 0 \\ u_x^{(2)} - i u_y^{(2)} - (u_x^{(1)} - i u_y^{(1)}) &= 0, \quad u_z^{(2)} - u_z^{(1)} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$r = r_1$ では次の合力自由条件が成り立つ。

$$P_y^{(1)} + iP_x^{(1)} = 0, \quad P_z^{(1)} = 0 \quad (6)$$

式(4),(5)より xy 面内では23元、面外では8元の連立一次方程式が導かれ、これを解いて全ての複素係数が得られることにより z 方向の直応力 $\sigma_z^{(i)}$ 以外の応力成分が全て決定される。

(3) ポアソン効果による連成問題 オーバーコアリング後は孔軸方向に $-\sigma_z^\infty$ が作用(図2(a))するとともに、ポアソン効果による応力が作用する(図2(b))。これらを重ね合わせたものを面積比に応じて各領域に配分す

キーワード 初期応力測定, 埋設ひずみ法, 小孔径オーバーコアリング, 3次元理論, 3層モデル

連絡先 〒305-0822 茨城県つくば市荻間 515-1 安藤ハザマ 技術研究所 原子力部 TEL029-858-8810

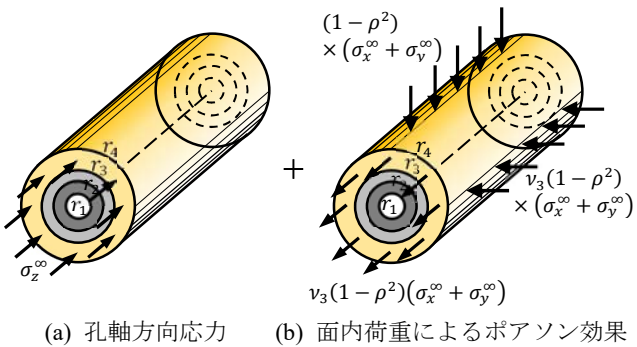


図 2 連成問題

る. このとき, $r = r_3, r_2$ では次の変位の連続条件を満たす必要がある.

$$\left. \begin{aligned} u_r^{(3)} - u_r^{(2)} &= 0, & u_z^{(3)} - u_z^{(2)} &= 0 & (r = r_3) \\ u_r^{(2)} - u_r^{(1)} &= 0, & u_z^{(2)} - u_z^{(1)} &= 0 & (r = r_2) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

上式より導かれる連立方程式を解くことで, 連成による孔軸方向直応力 $\bar{\sigma}_z^{(i)}$ が求められる. これと 2. (2) における x, y 方向直応力 $\bar{\sigma}_x^{(i)}, \bar{\sigma}_y^{(i)}$ を次式により重ね合わせれば, 最終的な孔軸方向応力 $\sigma_z^{(i)}$ が決定される.

$$\sigma_z^{(i)} = \bar{\sigma}_z^{(i)} + \nu_i(\bar{\sigma}_x^{(i)} + \bar{\sigma}_y^{(i)}) \quad (8)$$

3. ひずみ感度係数

以上より初期応力とひずみの関係は次式で得られる.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_i \\ \vdots \\ \varepsilon_N \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} & a_{i4} & a_{i5} & a_{i6} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & a_{N3} & a_{N4} & a_{N5} & a_{N6} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x^\infty \\ \sigma_y^\infty \\ \sigma_z^\infty \\ \tau_{yz}^\infty \\ \tau_{xz}^\infty \\ \tau_{xy}^\infty \end{Bmatrix} \quad (9)$$

ここに, ε_i は i 番目のひずみゲージの値である. a_{ij} はひずみ感度係数で, 単位の初期応力が作用したときのひずみを示す (例えば a_{12} は $\sigma_y^\infty = 1$ のみが作用したときの ε_1). 一般にひずみ成分数 N は初期応力成分数 6 よりも多く, 最小二乗法により式(9) を解く.

4. 初期応力の逆解析例

(1) 妥当性確認 図 3 に示すひずみ計配置 (3 箇所 7 成分) で, 図右下の①~⑦で示したひずみが測定されたものとし, 初期応力を逆解析した. ここでは Pender ら²⁾との比較のため $r_4 = \infty$ とし, グラウト層は無視した. 表 1 にその結果を示すが, 両者は良く一致している.

表 1 逆解析結果 (圧縮を正)

Initial Stresses	$E_1/E_3=0.05, r_4/r_3=\infty$	
	Pender	Author
σ_x^∞	7.0	7.10
σ_y^∞	2.5	2.47
σ_z^∞	5.8	5.81
τ_{yz}^∞	-1.8	-1.76
τ_{xz}^∞	1.0	0.97
τ_{xy}^∞	2.6	2.65

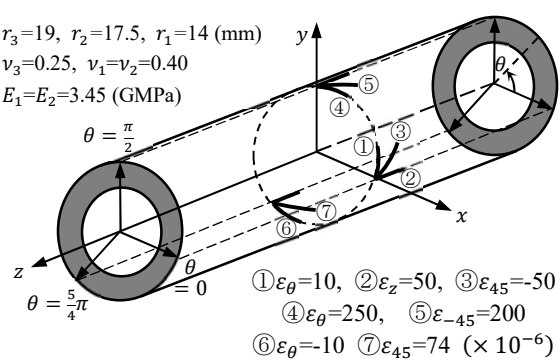


図 3 ひずみ計配置

(2) オーバーコアリング径の影響 図 4 に r_4 を有限にした場合の測定ひずみの変化を示した. 図より, オーバーコアリング径比 r_4/r_3 が 10 倍程度以下では ②⑤⑦の変化が大きい, 通常, 通常の測定では r_4/r_3 の影響を十分に考慮して解析しなければならないといえる.

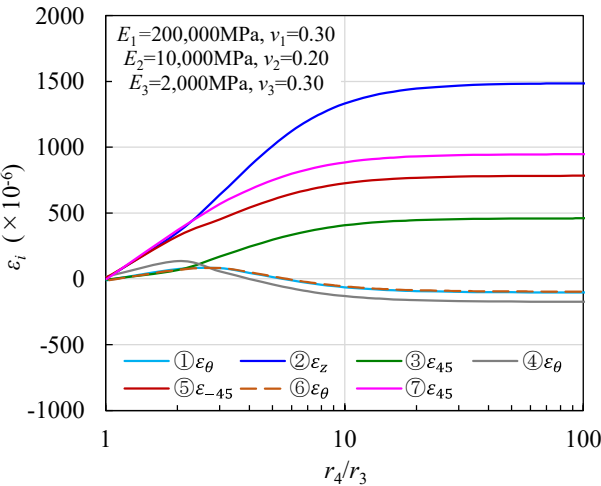


図 4 オーバーコア径に伴うひずみの変化

5. 総括

(1) 成果 本研究では岩盤, グラウト層及びひずみ計による 3 層モデルを想定し, 有限位置からのオーバーコアリングを行った場合の 3 次元初期応力を解析する理論を示した. 逆解析例では既往研究による値との比較から, 解析理論が妥当であることを確認した.

(2) 課題 現在, 著者らは地上からのボーリングにより埋設ひずみ法の適用可能な小孔径中空型ひずみ計を整備中である. 今後, 本測定器を用いてひずみ感度試験及び現地測定を実施していく予定であるが, 感度係数においては理論値と試験値を比較し, 最適な係数値を見出していきたい.

参考文献

1) 菊池慎二, 佐久間彰三, 平島健一, 松田武: 三次元地山応力測定のための中空埋設型計測装置の理論解析, 土木学会論文集, 第 430 号/III-15, pp.143-152, 1991.
2) Duncan Fama, M.E. and Pender, M.J.: Analysis of the hollow inclusion technique for measuring in situ rock stress, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geotech. Abstr., Vol.17, pp.137-146, 1980.