

(90) 剛性を有する埋設型計測装置の接着層厚、すべり
およびオーバーコアリング径の測定値に及ぼす影響

山梨大学工学部 正会員 平嶋 健一
日本国土開発㈱ 〃 佐久間彰三
 〃 〃 菊地 慎二
山梨大学大学院 学生員 〇 松田 武

Analysis of Effects of Grout Layer, Interface Sliding and Overcoring
Diameter on Measuring Results for Instrumented Inclusion Stressmeter

Ken-ichi HIRASHIMA, Yamanashi University
Shozo SAKUMA, Shinji KIKUCHI, JDC Corporation
Takeshi MATSUDA, Graduate Student, Yamanashi Univ.

Abstract

The theoretical analysis of a triaxial elastic inclusion stressmeter is presented. The effects of grout layer thickness, interface sliding and overcoring diameter on estimation of ground initial stresses are exactly solved and numerical results are shown by several graphical representations.

1. 緒 言

岩質性基盤を対象としたトンネル、地下空洞等の開発や利用の重要性が増大してきているが、それらの空洞の安全性のためには各種の現場計測の一環として初期地山応力を正確に把握する必要がある。

最近の地圧測定、特に初期応力測定は主として、ボーリング孔を利用して行なわれることが多く、大別して次の二通りの方法で実施される。すなわち、その一つは、岩盤中に小孔径のボーリング孔を削孔して測定用の計器を挿入または埋設したり、孔壁や孔底にひずみゲージを貼り付けたりした後、オーバーコアリングによって地山応力を解放する方法である。この方法は応力が解放されることによって生ずる孔の形状変化を、幾つかの標点におけるひずみ、孔径変化、標点間距離の変化などを測定することによって検出し、岩石の弾性定数を介して、地山初期応力を逆算するものである。

もう一つは、孔壁を強制的に破壊させ、破壊条件式から地山応力を決定するものであり、流体圧で孔壁を破壊させる水圧破碎法が広く用いられている。この方法は、オーバーコアリングを必要としないので深い位置での測定が可能であり、また、直接に応力を測定するので地盤の変形特性を必要としないという特徴を有している。著者らの内の佐久間と菊地はこの水圧破碎法の特徴を取り入れた新しい応力測定理論を構成し、測定機器の開発を行なった¹⁾。その方法は、柔軟なウレタンチューブを介して、ボーリング孔壁に流体圧を載荷し孔壁を破壊させるもので、得られた流体圧-孔径変化量曲線から地山応力の算定を行なっている。

本文では前者の応力解放法による初期応力測定理論に焦点を当て、従来までに適用されている解析手法に対して、より精度良い理論を確立するための考察を行なったものである。

すなわち、ここでは円形断面のボアホール内に計測装置を内蔵した計器を接着しないし固定する場合を対象として、次の3つの場合に区分して問題を設定し、理論解析によって各々の場合の影響度について定量的な評価を試みたものである。

- [A] 地山岩盤と計測器間の接着層厚さおよびその弾性特性の影響
- [B] 地山岩盤と計測器間にはく離やすべりが発生する場合の影響
- [C] 応力解放のためのオーバーコアリング径が初期応力値に及ぼす影響

なお、本論文と関係の深い最近の文献としては、Duncan Fama(1979,1980), Pariseau(1987), Worotnicki & Walton(1976), Rocha & Silverio(1969), 石島ら(1970), Spathis & Truong(1987), Gladwin & Hart(1985)などを列挙することができる。

2. 理論的取り扱い

一般的な3次元地山初期応力の測定が可能のようにボアホールの孔径 R_0 に比して、充分遠方より面内の一様応力成分 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xz}$ および面外の一様応力成分 τ_{xz}, τ_{yz} がFig.1のように作用する場合を考える。問題は岩盤部分(Matrix)、接着層部分(Grout Layer) および中実の計測器部分(Inclusion) の3つの部分から構成される。それぞれの弾性定数を E_k, G_k, ν_k ($k=1,2,3$)、とし複素変数 $z = x + iy$ の解析関数 $\Phi_k(z), \psi_k(z), \phi_k(z)$ を用いることにより各部分の任意点の応力、変位の計算式が次のように与えられる。(式中の k_k は平面ひずみのとき $k_k = 3-4\nu_k$; 平面応力のとき $k_k = (3-4\nu_k)/(1+\nu_k)$ となる。)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r^{(k)} + \sigma_\theta^{(k)} &= 4\text{Re}[\Phi_k'(z)], \\ \sigma_r^{(k)} - i\tau_{r\theta}^{(k)} &= 2\text{Re}[\Phi_k'(z)] - \{\bar{z}\Phi_k''(z) + \psi_k''(z)\} e^{2i\theta}, \\ \sigma_{rz}^{(k)} - i\tau_{\theta z}^{(k)} &= \phi_k'(z) e^{i\theta}, \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} u_r^{(k)} - iu_\theta^{(k)} &= \frac{1}{2G_k} [\Phi_k(z) - \{\bar{z}\Phi_k(z) + \Phi_k'(z)\} e^{i\theta}], \\ w^{(k)} &= \frac{1}{G_k} \text{Re}[\phi_k(z)], \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \Phi_k(z) &= A_k^{(3)} z^3 + A_k^{(1)} z + A_k^{(1)}/z, \\ \psi_k(z) &= B_k^{(3)} z^2 + k_k^{(1)} \ln z + B_k^{(1)}/z^2, \\ \phi_k(z) &= C_k^{(1)} z + C_k^{(1)}/z. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

まず、第1節で示した問題設定[A] に対しては、Fig.1 の3つの部分の接触境界 L_1, L_2 において応力、変位の連続性が完全に達成されているとすれば、次の境界条件が成立しなければならない。

$$\left. \begin{aligned} u_r^{(n)} - iu_\theta^{(n)} &= u_r^{(n+1)} - iu_\theta^{(n+1)}, \quad w^{(n)} = w^{(n+1)} \\ \sigma_r^{(n)} - i\tau_{r\theta}^{(n)} &= \sigma_r^{(n+1)} - i\tau_{r\theta}^{(n+1)}, \quad \tau_{rz}^{(n)} = \tau_{rz}^{(n+1)}, \end{aligned} \right\} \text{ at } r=R_{n-1}, (n=1,2) \dots\dots (4)$$

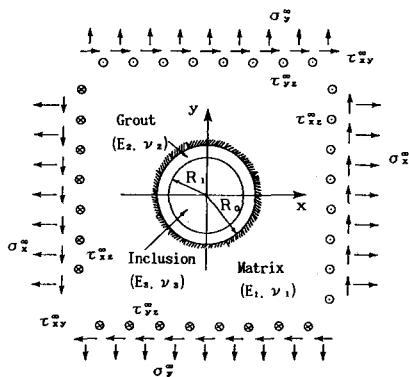


Fig. 1 Geometry and loading conditions.

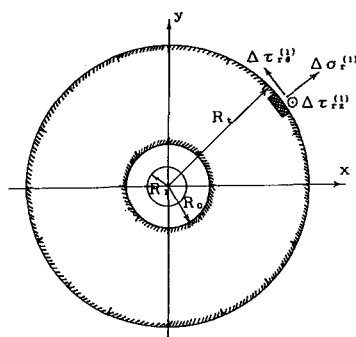


Fig. 2 Overcoring at $r=R_1$ and residual stresses $\Delta \sigma_r^{(1)}, \Delta \tau_{r\theta}^{(1)}$ and $\Delta \tau_{rz}^{(1)}$.

また、これに加えて遠方での作用応力の条件ならびにInclusionの原点0での応力、変位の有限性の条件によって、式(3)の未知の複素定数が全て決定できることになる。

次に、問題設定の[B]の場合に対しては、2次元面内問題に限定するものとし、例えば境界 L_1 ($r=R_0$)において相対的なすべりを許すような次の面内に対する境界条件を設けるものとする。

$$\sigma_r^{(1)} = \sigma_r^{(2)}, \quad u_r^{(1)} = u_r^{(2)}, \quad \tau_{r\theta}^{(1)} = \tau_{r\theta}^{(2)} = C_0(u_r^{(1)} - u_r^{(2)}), \quad \text{at } r=R_0 \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 C_0 は境界での相対すべり量に比例したマサツ係数に相当するパラメータである。 $C_0=0$ のとき完全なすべり条件が、また、 $C_0=\infty$ のとき完全な応力、変位の連続条件が満たされる。なお、式(4)のうちの $n=2$ の場合の境界条件で、面外条件の部分を除いたものがそのまま成立するものとする。この[B]の場合についても[A]の場合と同様に上述の境界条件等から $\Phi_k(z)$ 、 $\psi_k(z)$ の中の複素定数が決定できることになる。

最後に、[C]の場合として、Fig.2に示したように、有限位置の $r=R_t$ でのオーバーコアリングにより、応力解放操作を実施するものとするれば、もともとの十分大きい半径の位置で応力解放したものと間に差異が生じる。この差異を理論式のレベルで解消するためには $r=R_t$ の位置に、次式：

$$\Delta \sigma_r^{(1)} = \sigma_r^{(1)} - \overline{\sigma_r^{(1)}}, \Delta \tau_{r\theta}^{(1)} = \tau_{r\theta}^{(1)} - \overline{\tau_{r\theta}^{(1)}}, \Delta \tau_{r\phi}^{(1)} = \tau_{r\phi}^{(1)} - \overline{\tau_{r\phi}^{(1)}}, \text{ at } r=R_t \dots \dots \dots (6)$$

の残差応力をInclusionと接着層を有するFig.2の $r=R_t$ に作用させ、その状態で応力解析を実行して、先に得られた応力、変位の値に重ね合わせてやればよい。ここに、 $\sigma_r^{(1)}$ 、 $\tau_{r\theta}^{(1)}$ 、 $\tau_{r\phi}^{(1)}$ はFig.1の状態での $r=R_t$ の位置におけるMatrix部分の半径方向の応力成分であり、 $\overline{\sigma_r^{(1)}}$ 、 $\overline{\tau_{r\theta}^{(1)}}$ 、 $\overline{\tau_{r\phi}^{(1)}}$ はFig.1のInclusionと接着層の部分が空洞(i.e. $E_2=E_3=0$)としたときの、同じく $r=R_t$ でのMatrix部分の半径方向成分である。この場合も、式(3)の関数仮定と同じものを採用してやればよく、式(4)および式(6)の境界条件のもとで解析をすればよいので、方法論的には先の[A]の場合と類似である。

以上の理論式をもとにInclusion内に生じた応力 $\sigma_r^{(2)}$ (またはひずみ)の値から岩盤に作用する初期応力は最終的に次式によって求めることができることになる。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{\theta}^{(1)} \\ \sigma_{\phi}^{(1)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I_A & I_B \\ I_B & I_A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_r^{(2)} \\ \sigma_{\phi}^{(2)} \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} \tau_{x\phi}^{(2)} \\ \tau_{y\phi}^{(2)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} I_C & 0 \\ 0 & I_C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tau_{x\phi}^{(2)} \\ \tau_{y\phi}^{(2)} \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (7)$$

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) \pm \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\beta \pm \tau_{xy} \sin 2\beta, \quad \tan 2\beta = 2\tau_{xy} / (\sigma_x - \sigma_y) \dots \dots \dots (8)$$

なお、計測器内のひずみが測定される場合にはそれらのひずみ成分から構成式を介して応力成分を求め、式(8)によってその主応力 $\sigma_1^{(1)}$ 、 $\sigma_2^{(1)}$ を、続いて式(7)により岩盤初期主応力 $\sigma_{\theta}^{(1)}$ 、 $\sigma_{\phi}^{(1)}$ を計算してやればよい。面外成分についても同様である。したがって、ここで必要とされるものは問題設定の[A],[B],[C]の各場合に対応した応力影響係数に相当するパラメータ I_A 、 I_B 、 I_C を求めることである。これらの係数は先に示した理論式を具体的に整理してやることによって厳密値として決定することが可能である。

3. 数値計算例

計算例としてInclusionの弾性定数を次の2種類のもの、すなわち ① $E_i=200.0$ GPa, $\nu_i=0.28$ (i.e. 鋼製のInclusion) および ② $E_i=3.0$ GPa, $\nu_i=0.40$ (i.e. エポキシ樹脂系のInclusion)を採用した。

まず、[A]の影響を検討するために、接着層の材料としてCopper($E_2=110.0$ GPa, $\nu_2=0.35$)を用いて影響係数 I_A 、 I_B を計算した一例をFig.3(a),(b)に示した。図は接着層の厚さ $t(=R_0-R_1)$ として、 $t/R_0=0.05$ 、 0.50 の場合のものである。岩盤の弾性定数としては $E_1=10, 50, 100$ GPa、ポアソン比 $\nu_1=0.0 \sim 0.5$ の各値についての I_A 、 I_B が平面応力、平面ひずみの各場合について示されている。

次に、オーバーコアリング径 R_t の影響を見るために、 R_t を幾つかの値に変えた場合のInclusion内の

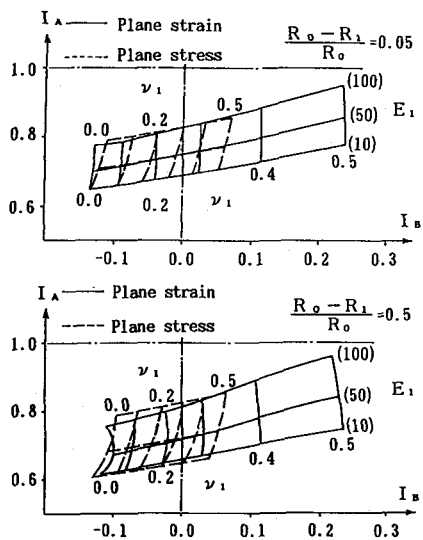


Fig. 3 Effects of grout layer thickness t on stress influence factors I_A and I_B .

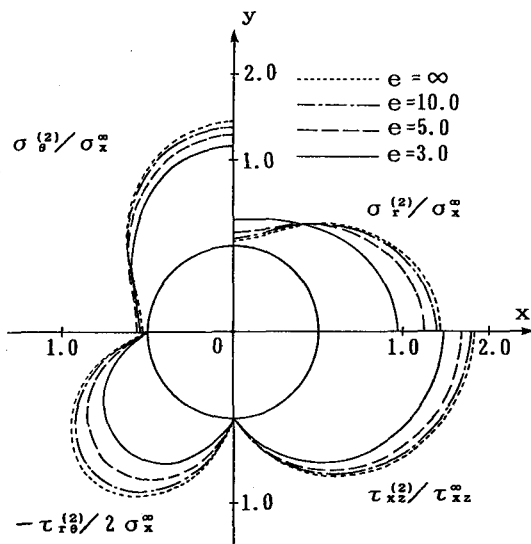


Fig. 4 Variations of inclusion stresses due to size effect $e = R_1 / R_0$ of overcoring diameter.

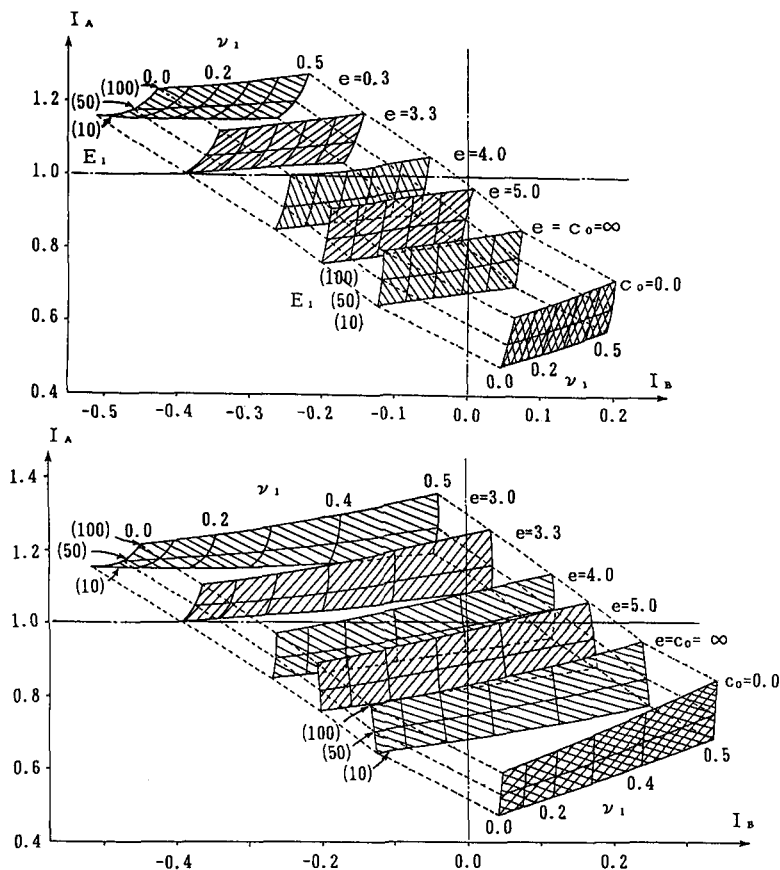


Fig. 5 Effects of friction parameter C_0 and overcoring parameter e on I_A and I_B .

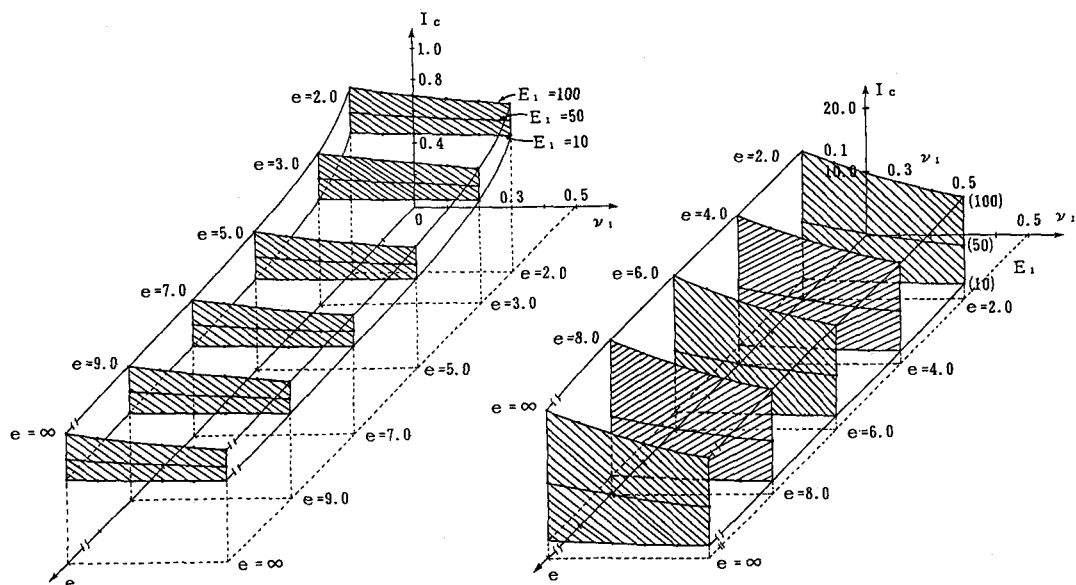


Fig. 6 Effects of overcoring parameter e on stress influence factor I_c .

応力がどのように変化するかを示したものがFig.4 である(ただし、この例および以下の例では簡単のため接着層厚を零、すなわち無視したものを示した)。図の点線(i.e. $e = R_c/R_o = \infty$)のものから残差分に相当するものを補正してやる必要があることを示している。その補正操作を理論的に実行したのち、オーバーコアリング径比 $e = R_c/R_o$ を変化させた場合の影響係数 I_A , I_B および I_c の値を求めてFig.5(a), (b)およびFig.6(a), (b)に示した。Fig.5 には問題設定[B]の影響を検討した結果(i.e. $C_o = 0.0 \sim \infty$)も図中に示されている。この図の $C_o = \infty$ のものは $e = \infty$ としたものに相当する。これらの図から、 e の変化によって応力影響係数が大きく変化する様子が観察される。

4. むすび

ここで提案した理論的手法を用いることにより、従来不明確なまま取り扱われていた問題点を定量的に解決することができるようになった。特に、従来までは測定誤差に繋がるとして敬遠されていたオーバーコアリング径を小さくすることについても、初期応力の推定には何らの誤差も含まない形の理論解析が可能であることを示唆した。

参考文献

- 1) 佐久間, 菊地, 水田, 世良田: 土木学会論文集, 第406号/Ⅲ-11, pp.87-96, 1989.
- 2) Duncan Fama, ME.: Proc. 4th Congr. ISRM, Montreux, pp.113-120, 1979.
- 3) Duncan Fama & Pender: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst. Vol.17, pp.137-146, 1980.
- 4) Pariseau, WG.: Proc. Int. Congr. Rock Mech., pp.1201-1205, 1987.
- 5) Worotnicki, G. & Walton, R.J.: Proc. ISRM, Sydney, pp.1-8, 1976.
- 6) Rocha, M. & Silverio, A.: Geotechnique, Vol.19, pp.116-132, 1969.
- 7) 石島, 小出, 鈴木: 日本鉱業会誌, No.993, pp.901-906, 1970.
- 8) Spathis & Truong: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst., Vol.24, pp.31-39, 1987.
- 9) Gladwin, MT. & Hart, R.: Pure Appl. Geophys., Vol.123, pp.59-80, 1985.