

(111) 部分応力解放法による等方性および 異方性岩盤の初期応力測定理論

大林組技術研究所 正会員 ○山下 幸夫
日本国土開発 正会員 菊地 慎二
山梨大学工学部 正会員 平島 健一
愛知工業大学工学部 正会員 川本 脩万

Measuring Theory of Initial stresses in Isotropic or Anisotropic Rock Masses
by Partial Stress Relief Techniques

Yukio YAMASHITA, Obayashi Corporation
Shinji KIKUCHI, J.D.C Corporation
Ken-ichi HIRASHIMA, Yamanashi University
Toshikazu KAWAMOTO, Aichi Inst.of Tech.

Abstract

The techniques including in this paper were formerly proposed by Kawamoto[2], one of authors. In usual stress relief methods, ground stresses have been released by making slit or over-coring of concentric boreholes. On the other hand, we can release the ground stresses partially, using established borehole for measuring hole and by opening newly the second borehole in the neighborhood of it. This method is utilizing the stress concentration that is arisen by reciprocal interference of neighboring two circular holes, and is considered to a kind of stress re-distribution method or partial stress relief techniques.

In the above mentioned paper[2], the effects of reciprocal interference were determined from photo-elastic tests. We describe an analysis method that is raised the accuracy of analysis and is extended to the problems in anisotropic elastic rock under 3-dimensional initial stress conditions; and show some concrete numerical results, in this paper.

1. 緒言

岩盤内の初期応力（初期地圧）は地下構造物の安定に重大な影響を及ぼす要因であり、その値および作用方向を正確に推定することは、地下構造物の経済的および安全な設計・施工のためにも極めて重要である。そのため、初期応力を測定する方法は現在までも多く提案されており、応力解放法を初めとして、応力再現（補償）法、水圧破碎法、A E 法および変形率変化法などが実際の建設プロジェクトに適用されている。¹⁾

上記の測定法のうち応力解放法は、単一のボアホールの追いきりまたはオーバーコアリングにより作用応力を解放し、孔壁や孔底のひずみ（または変位）の変化量から初期応力を算定するものである。これに対して著者らの一人（川本）は、以前に、既設のボアホールを測定側にして、これに隣接する第二のボアホールを開削することにより部分的に応力解放を行う方法を提案した。²⁾ この方法は近接した2円孔の相互干渉による応力集中を利用するもので、一種の応力再分布（部分応力解放）法と呼べるものである。

前述の論文²⁾は、2円孔の相互干渉効果を光弾性実験法により定めていたが、ここでは、解析精度を高め、かつ一般的な3次元初期応力ならびに等方性、異方性岩盤への拡張を計った解析手法およびその具体的数値結果の例を提示する。

2. 異方性弾性体内の双設ボアホール問題に対する解

異方性弾性体内に平行する2個のボアホールが存在する問題の解として、選点法を用いて1個のボアホールが存在する場合の厳密解より誘導する。³⁾ いま図-1に示すように、解析対象モデルとして無限遠方より一様な面内応力 $\sigma_x^\infty, \sigma_y^\infty, \tau_{xy}^\infty$ (または2次主応力 $\sigma_1^\infty, \sigma_2^\infty$) が作用する、2個の円孔 Σ_1, Σ_2 を有する2次元異方性弾性体を考える。円孔が Σ_1 だけの場合、すなわち1個の円孔しか存在しない場合には、物理平面内の任意位置における応力および変位は二つの複素応力関数 $\phi_k(z_k)$, ($k=1,2$)を用いて次式のように与えられる。⁴⁾

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_x^\infty + 2Re[\mu_1^2 \phi_1'(z_1) + \mu_2^2 \phi_2'(z_2)], \\ \sigma_y &= \sigma_y^\infty + 2Re[\phi_1'(z_1) + \phi_2'(z_2)], \\ \tau_{xy} &= \tau_{xy}^\infty - 2Re[\mu_1 \phi_1'(z_1) + \mu_2 \phi_2'(z_2)], \\ u &= u_x^0 + 2Re[p_1 \phi_1(z_1) + p_2 \phi_2(z_2)], \\ v &= u_y^0 + 2Re[q_1 \phi_1(z_1) + q_2 \phi_2(z_2)]. \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

また応力とひずみの関係は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{16}\tau_{xy}, \\ \epsilon_y &= a_{12}\sigma_x + a_{22}\sigma_y + a_{26}\tau_{xy}, \\ \gamma_{xy} &= a_{16}\sigma_x + a_{26}\sigma_y + a_{66}\tau_{xy}, \\ \epsilon_r &= \epsilon_x \cos^2 \theta + \epsilon_y \sin^2 \theta + \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta, \\ \epsilon_\theta &= \epsilon_x \sin^2 \theta + \epsilon_y \cos^2 \theta - \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta. \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

式(1)に含まれる複素係数 μ_k , ($k=1,2$)は、異方性弾性体に対する特性方程式の複素根として次式(3)により、また係数 p_k, q_k , ($k=1,2$)は式(4)により、それぞれ求められる。

$$\begin{aligned} a_{11}\mu^4 + 2a_{16}\mu^3 + (2a_{12} + a_{66})\mu^2 \\ - 2a_{26}\mu + a_{22} = 0. \end{aligned} \dots\dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} p_k &= a_{11}\mu_k^2 + a_{12} - a_{16}\mu_k, \\ q_k &= a_{12}\mu_k + a_{22}/\mu_k - a_{26}. \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

ここに、 $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{66}$ は弾性コンプライアンスであり、問題を平面ひずみ問題として取り扱う場合には、上記の a_{ij} に代えて、 $\beta_{ij} [= a_{ij} - (a_{i3}a_{j3}/a_{33})]$, ($i, j=1,2,\dots,6$)を用いればよい。

式(1)の複素応力関数 $\phi_k(z_k)$ は、具体的に次式のようになる。

$$\phi_1(z_1) = \frac{\bar{\beta}_1 - \mu_2 \bar{\alpha}_1}{\mu_1 - \mu_2} \cdot \frac{1}{\zeta_1}, \quad \phi_2(z_2) = -\frac{\bar{\beta}_1 - \mu_1 \bar{\alpha}_1}{\mu_1 - \mu_2} \cdot \frac{1}{\zeta_2}. \dots\dots (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= (a/2)(-\sigma_y^\infty + i\tau_{xy}^\infty), \quad \beta_1 = (a/2)(\tau_{xy}^\infty - i\sigma_x^\infty), \\ z_k &= x + \mu_k y = (a/2)\{(1 - i\mu_k)\zeta_k + (1 + i\mu_k)\zeta_k^{-1}\}, \\ \zeta_k &= [z_k^2 \pm \{z_k - a^2(1 + \mu_k^2)\}^{1/2}]/a(1 - i\mu_k). \end{aligned} \right\} \dots\dots (6)$$

上記のような状態で、これに隣接して第2の平行するボアホール Σ_2 が開削される場合は、次のような演算を行えばよい。すなわち、[I] 図-2(a)の座標系に対して、選点法を用いて破線で示す Σ_2 の仮想境界上での応力値を求める。[II] Σ_2 に対しても同様の座標系を設定し、上記[I]で求めた応力成分に、 Σ_2 の孔の境界での半径方向直応力 $\sigma_\alpha = 0$ 、せん断応力 $\tau_{\alpha\theta} = 0$ を満たすように重ね合わせを行って新たに複素

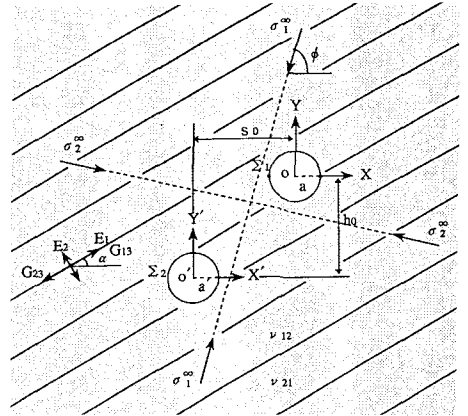


図-1 2円孔を有する異方性弾性体モデル

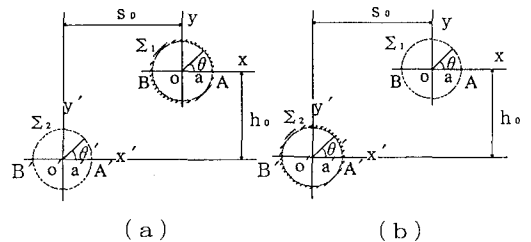


図-2 任意の大きさの2円孔の位置と座標系

応力関数 $\phi_k(z_k)$ を求めれば、図-2(b)の状態の任意点での応力、変位およびひずみが決定できる。

ただし、上述の〔I〕および〔II〕の結果を重ね合わせれば、円孔 Σ_2 の境界上での境界条件は満足されるが Σ_1 の境界における境界条件は損なわれる。そこで再び Σ_1 の境界における境界条件を満足するように、上述〔II〕の操作を図-2(a)の状態のものに適用する。以下、同様の操作を順次おのおのの円孔周縁での応力値 $\sigma_\alpha, \tau_{\alpha\theta}$ が作用荷重に対して十分に小さくなるまで繰り返して計算し、それぞれの段階で得られた値を重ね合わせれば、求めるべき双設ボアホールの面内応力、変位およびひずみ分布が得られる。

一方、ボアホールの軸方向(z方向)からの荷重、すなわち面外せん断応力 τ_{xz}^∞ および τ_{yz}^∞ が作用する場合は、異方性弾性体内の応力および変位成分、ならびに応力-ひずみ関係式は次のようになる。⁵⁾

$$\tau_{yz} = -2R_e[\phi_1'(z_1)], \quad \tau_{xz} = 2R_e[\mu_1\phi_1'(z_1)], \quad w = 2R_e[(a_{45}-a_{44}/\mu_1)\phi_1(z_1)]. \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\gamma_{yz} = \partial w / \partial y = a_{44}\tau_{yz} + a_{45}\tau_{xz}, \quad \gamma_{xz} = \partial w / \partial x = a_{45}\tau_{yz} + a_{55}\tau_{xz}. \quad \dots\dots\dots (8)$$

いま、異方性体内の応力、変位を決定する複素応力関数 $\phi_1(z_1)$ を、次式(9)に示す形式で求めるものとすれば、複素係数 $\bar{C}_m$ は式(10)で与えられる。

$$\phi_1(z_1) = \sum_{m=1}^{\infty} \bar{C}_m \zeta_1^{-m} \quad \dots\dots\dots (9), \quad \bar{C}_1 = (a/2)(\tau_{yz}^\infty - i\tau_{xz}^\infty), \quad \bar{C}_m = 0. (m \geq 2) \quad \dots\dots\dots (10)$$

3. 双設ボアホール問題の解析と2次主応力の計算

前章で述べた解析理論を双設ボアホール問題に適用して具体的な数値解析例を示す。解析モデルは、図-3に示すように円孔 Σ_1 を測定側にして、これに隣接して孔壁間の純離隔距離 S' を保って円孔 Σ_2 が開削される場合を考える。岩盤は等方性とし、ポアソン比は $\mu = 0.25$ を仮定した。

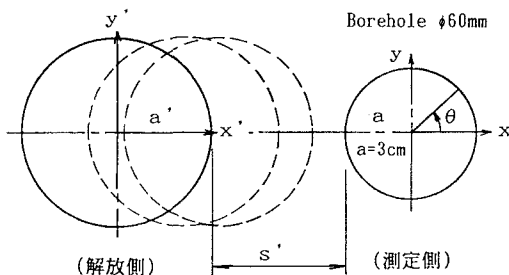


図-3 双設ボアホールの解析モデル

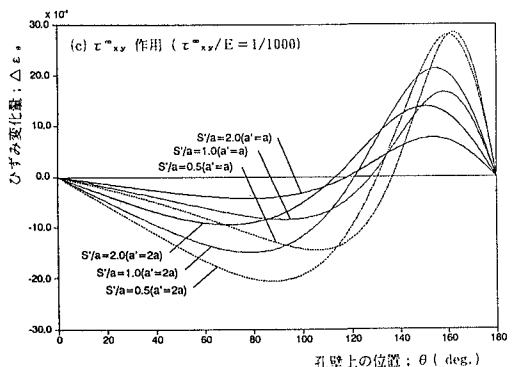
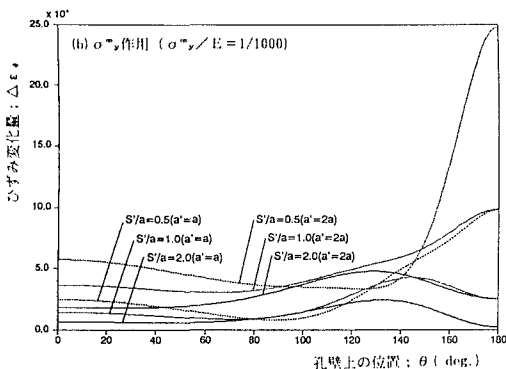
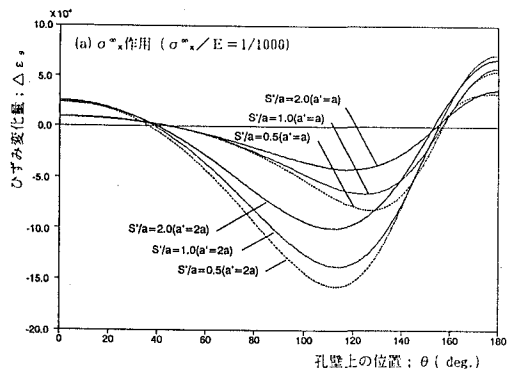


図-4 面内荷重による円孔 Σ_1 の孔壁周方向のひずみ変化量 ($\Delta \epsilon_\theta$)

双設ボアホールを利用した初期応力の算定では、測定孔 Σ_1 を開削したのち孔壁表面にひずみゲージを貼り付けるか、またはその内部に変位計が設置され、その後の Σ_2 の開削に伴う変化量が測定される。そのため壁面位置でのこれらの変化量の解析が特に重要となる。

図-4は解析結果の一例として、面内荷重 σ_{ij}^{∞} がそれぞれ単独に作用した場合の、測定孔 Σ_1 における孔壁周方向のひずみの変化量($\Delta \epsilon_{\theta}$)を示したものである。離隔距離 s'/a (a は測定孔の半径)をパラメータにして、解放孔 Σ_2 の大きさがそれぞれ等円の場合($a'=a$)および2倍円の場合($a'=2a$)のケースについて表示した。図からも明らかなように、解放孔が測定孔に近づくほど、またその直径が大きくなるほど、ひずみの変化量が大きな応答を示していることが分かる。精度の高い測定のためにも、変化量は大きいことが望ましい。

なお上記の結果は、岩盤の弾性係数を $E = 1000 * \sigma_{ij}^{\infty}$ として解析しているため、作用外力が $\sigma_{ij}^{\infty}/E = 1/1000$ の応力状態での、あらゆる場合にこの図が適用できる。

一方、図-5は前記と同じ解析条件で、面外せん断荷重 τ_{ij}^{∞} が作用した場合の孔軸方向のひずみの変化量($\Delta \epsilon_{\theta z}$)を求めたものである。図-4の結果と同様であるが、孔壁上の位置の違いによって、発生するひずみに大きな差が生じていることが分かる。したがって、初期応力の作用方向とその大きさおよびボアホールの方向との相対的な関係によっては、ひずみゲージの貼り付け位置で小さなひずみしか測定できないこともあるため注意が必要である。

以上は孔壁のひずみ変化量についての表示であるが、現位置計測では、ひずみに替えて孔壁の直径変化量を直接測定する方が便利な場合もある。計器の設置が容易であり、転用による経済的な計測作業が可能

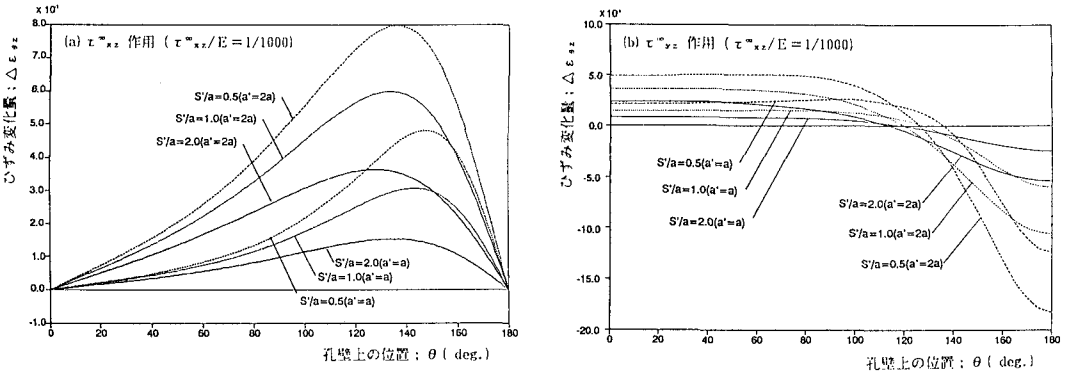


図-5 面外せん断荷重による円孔 Σ_1 の軸方向ひずみの変化量($\Delta \epsilon_{\theta z}$)

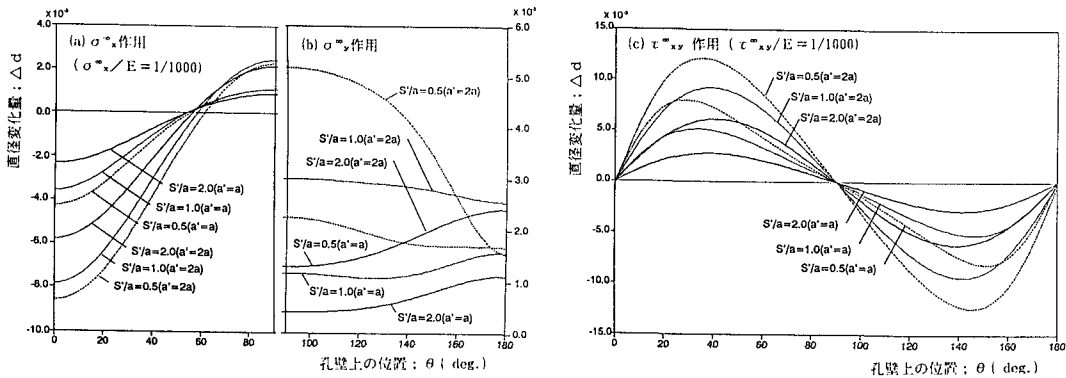


図-6 面内荷重による円孔 Σ_1 の直径変化量(Δd)

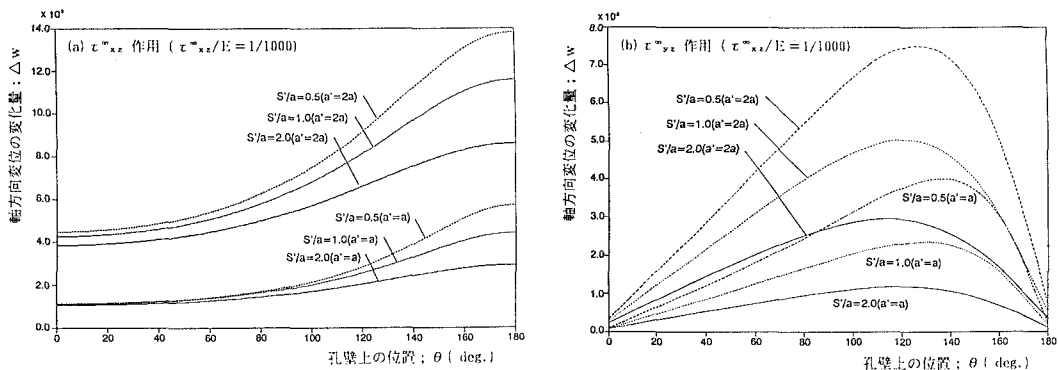


図-7 面外せん断荷重による円孔 Σ_1 の軸方向変位の変化量(Δw)

になることも考えられるためである。そこで図-6に面内荷重が作用する場合の測定孔 Σ_1 の直径変化量を示した。また図-7は面外せん断荷重が作用する場合の軸方向変位の変化量である。ここではボアホールの直径が60mm($a=3\text{cm}$)のケースについて表示しているが、直径がこれと異なるボアホールに対しても、比例関係を利用してこれらの図から容易に変化量を求めることができる。また、面外荷重の場合には、孔壁上の 90° の位置(y 軸面)で対象条件を満たすことは明らかである。

図-4～図-7に示した結果は、応力係数に相当するものを孔壁ひずみまたは変位の変化量で表したものである。そのためボアホール内でこれらの値が測定されれば、上記の図を使って2次主応力の各応力成分が決定され、さらに座標関係から岩盤内の初期応力を算定することができる。なお、著者らがすでに発表している逆解析法⁴⁾⁶⁾を用いれば、さらに容易に初期応力を求めることが可能である。

4. 結言

ここでは、近接して開削される双設ボアホールの相互干渉を利用した初期応力の測定理論について、複素関数論を用いた高精度の解析手法を提示した。ここに述べた手法によると、1地点の測定によって、ボアホール軸に直交する x, y 平面内での3個の面内応力 $\sigma_x^\infty, \sigma_y^\infty, \tau_{xy}^\infty$ および2個の面外応力 $\tau_{xz}^\infty, \tau_{yz}^\infty$ を決定することができる。岩盤内の3次元的な初期応力を求めるためには、ボアホールの軸方向(z 方向)に作用する直応力 σ_z^∞ を決定する必要があるが、例えばFlat Jack法を併用して直接 σ_z^∞ を測定するか、またはトンネル壁面上の直交する2地点に本手法を適用すれば容易に求めることができる。

既設孔に平行して第2のボアホールを精度よく開削するためには高度のボーリング技術を要するが、ガイド機構の改善等で対応可能と思われる。また本手法は、著者らの一人²⁾が現場測定で示したように、試験坑道表面においても、岩盤内部の深い位置においても適用できるものである。

参考文献

- 1) 土木学会編; 初期地圧測定法の現状と課題, 1992.6
- 2) 川本, 高橋; 岩盤の初期応力の一測定法について、土木学会論文集, 第146号, pp.22-27, 1967.10
- 3) 山下, 川上, 平島; 双設トンネル掘削問題に関する順解析および逆解析, 第24回岩力シンポ, 1991.2
- 4) 平島, 川上, 藤原, 山下; 弾性厳密解に基づく円形・楕円形トンネルを有する等方性および異方性岩盤の逆解析, 土木学会論文集 No.439/III-17, pp.1-8, 1992.12
- 5) 平島, 川上, 藤原, 山下; 面外せん断荷重下の等方性・異方性弾性岩盤内の素掘りトンネル掘削問題に関する順解析および逆解析, 土木学会論文集 No.436/III-16, pp.37-45, 1991.9
- 6) Hirashima K., Kawakami T., Fujiwara T. and Yamashita Y.; Quasi 3-D Back-Analysis of Tunnel in Anisotropic Rock. ISRM the 7th Int. Congress, AACHEN, pp.733-736, 1991.9