

多孔質弾性理論を用いた応力解放法における初期 応力計測理論と岩盤の時間依存性に関する研究

STUDY FOR THEORY OF INITIAL STRESS MEASUREMENT AND TIME DEPENDENCE OF THE ROCK IN STRESS RELEASE METHOD USING POROELASTIC THEORY

市川 晃央*・平島 健一**・木村 清和***

Akio ICHIKAWA, Ken-ichi HIRASHIMA, Kiyokazu KIMURA

This paper presents analytical solutions for theory of initial stress measurement based on stress release method. The rock is assumed to behave as a poroelastic material, while the measuring device (Solid Inclusion Cell) is considered as a classical elastic material. Simultaneously, several steps of stress release method are exactly reproduced by using FEM, and an accuracy of the theoretical solutions that is given under plane strain are mentioned.

Therefore, it is clarified that the time of overcoring and of installation of measuring devices affect a stress (or strain) value of measuring device. Several numerical examples are shown graphically.

Key Words : initial stress , stress release method , poroelasticity , time dependence , solid inclusion cell

1. 緒言

地下空間（地下発電所、石油地下備蓄、放射性廃棄物の地下処分など）の設計や施工にあたっては、岩盤内部に生じている自然の応力状態（初期応力、現有応力もしくは初期地圧）の把握が重要な要素の一つであり、種々の理論や計測手法が提案されてきている。本研究において対象としている応力解放法は比較的古くから採用され、実施例も多く、計測手法の簡便さと実施上の容易さから、現在でも初期応力測定手法の主流を占めており、例えば、日本では電研方式¹⁾や熊大方式²⁾、海外ではCSIRO法³⁾等が有名である。著者らも本手法により樹脂製の円柱状小型埋設型プローブ（Solid Inclusion Cell : SI-セル）を開発すると共に、幾つかの適用理論を確立させてきた^{4)~8)}。

応力解放法による初期応力の測定原理は、埋設された計測装置を含むコアを周辺岩盤からオーバーコアリングにより切離すことで生じる弾性回復量を測定し、岩盤を等方で均質な弾性体と仮定した上で、弾性理論に基づいて初期応力を求める方法である。しかしながら、飽和した多孔質岩盤を対象として初期応力計測を行う場合、パイロット孔掘削やオーバーコアリングの際に、岩盤骨格と間隙流体の挙動の連成効果を考慮する必要があると考えられ、多孔質弾性理論による時間依存性、すなわち応力～ひずみ～間隙水圧関係を加味した評価が必要である。

そこで本研究は、間隙流体の影響を無視できない多孔質弾性岩盤において応力解放法を用いた初期応力計測の理論解を導出し、パイロット孔掘削～オーバーコアリングまでの施工ステージにおける多孔質弾性岩盤と計測装置（SI-セル）との相互作用などについて、時間依存の解析を目的としたものである。本稿で提示する計測理論は、オーバーコアリング径が十分に大きいと仮定することなく、実用性を考慮し、SI-セルの小型化と連動してオーバーコアリング径を有限径とする場合の厳密な理論解である。また、理論解は平面ひずみ状態の仮定の下に得られるため、実際の施工過程に応じた線形弾性 FEM 解析により、有限長さの SI-セルに対して平面ひずみ状態の仮定の適用性を検証した。

* 正会員 修士（工学） ㈱竹中土木 技術本部開発グループ 竹中技術研究所

** 正会員 工学博士 山梨大学大学院医学工学総合研究部自然機能開発専攻 教授

*** 正会員 博士（工学） 群馬工業高等専門学校環境都市工学科 助教授

2. 多孔質弾性理論の基礎方程式

多孔質弾性理論⁹⁾は、Biotの三次元圧密理論(1941)¹⁰⁾を起点として発展してきたものである。線形多孔質弾性体の応力～ひずみ～間隙水圧関係は、多孔質弾性パラメータにより記述することができ、岩盤の固体部分や間隙流体を圧縮性材料として扱うことが可能である。また、本理論は、岩盤の構成粒子、構造骨格および間隙流体の体積弾性率を構成式に取り入れることが可能であり、軟岩から硬岩までの広い範囲にわたって適用可能な基礎理論である⁹⁾。

以下に、多孔質弾性理論の基礎方程式を示す。

(構成方程式)

多孔質弾性媒体に対する構成式は次式で与えられる。

$$\sigma_{ij} = 2Ge_{ij} + \frac{2G\nu}{1-2\nu}\delta_{ij}e - \alpha\delta_{ij}p, \dots\dots\dots (1)$$

$$p = M(\zeta - \alpha e), \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 σ_{ij} は全応力テンソル、 p は間隙圧、 e_{ij} はひずみテンソル、 e は体積ひずみ、 ζ は流体含有率変化、 G はせん断弾性係数、 ν, ν_u は排水、非排水状態でのポアソン比、 B は Skempton の間隙圧係数、 δ_{ij} は Kronecker のデルタである。なお、有効応力係数 α と Biot の弾性係数 M は次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{3(\nu_u - \nu)}{B(1-2\nu)(1+\nu_u)}, \quad M = \frac{2GB^2(1-2\nu)(1+\nu_u)^2}{9(\nu_u - \nu)(1-2\nu_u)} \dots\dots\dots (3)$$

対象とする上記の多孔質弾性媒体に対する基礎方程式は以下のように与えられる。

(釣合方程式)

$$\sigma_{ij,j} = 0, \dots\dots\dots (4)$$

(幾何学関係式)

$$e_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 u_i は変位ベクトルである。

(Darcy の法則)

$$q_i = -\kappa p_{,i} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 q_i は流束ベクトル、 κ は透水係数である。

(連続の方程式)

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + q_{i,i} = 0, \dots\dots\dots (7)$$

(Navier の方程式)

$$G\nabla^2 u_i + \frac{G}{1-2\nu_u}e_{,i} - \alpha M\zeta_{,i} = 0, \dots\dots\dots (8)$$

(拡散方程式)

$$\frac{\partial p}{\partial t} - \kappa M \nabla^2 p = -\frac{2GB(1+\nu_u)}{3(1-2\nu_u)} \frac{\partial e}{\partial t}, \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} - c \nabla^2 \zeta = 0, \dots\dots\dots (10)$$

ここに、

$$c = \frac{\kappa}{S} = \frac{2\kappa B^2 G(1-\nu)(1+\nu_u)^2}{9(1-\nu_u)(\nu_u - \nu)} \dots\dots\dots (11)$$

3. 有限位置でのオーバーコアリングによる平面ひずみ状態下での理論解の適用性に関する検討

本研究において対象とする計測装置 (SI-セル) のサイズは図-1 に示すような、長さ 200mm、直径 18mm であり、オーバーコアのビット外径は 72mm、内径 68mm である。図-1 のような施工過程において、ボーリング孔を掘削し、その後のパイロット孔を掘削し、SI-セルを埋設するが、SI-セルが有限の長さであり、岩盤を小口径で掘削することによる応力の攪乱やパイロット孔先端およびボーリング孔とパイロット孔の接合部における隅角部の応力集中などの影響により、SI-セルのひずみゲージ設置位置において平面ひずみ状態の応力状態を呈する前提が満たされなけれ

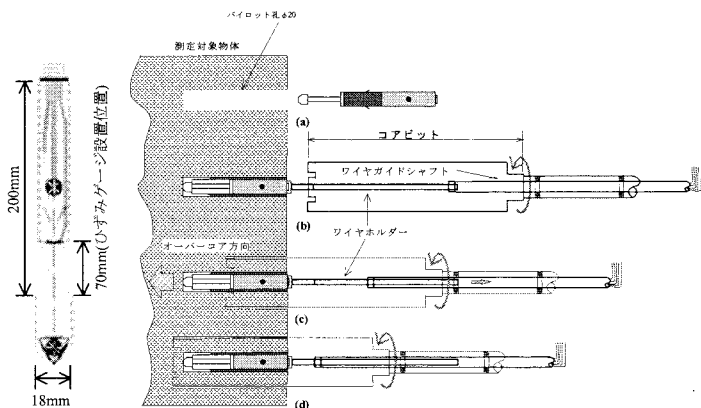


図-1 SIセル模式図および応力解放法の施工過程

表-1 FEMによるオーバーコアリング法のステージ解析

FEMによるステージ解析	STAGE
初期応力解析	1
ボーリング孔掘削	2
パイロットホール掘削 (200mm)	3
ゲージ施工(埋設)	4
12mm毎に掘削(オーバーコア)	5～29

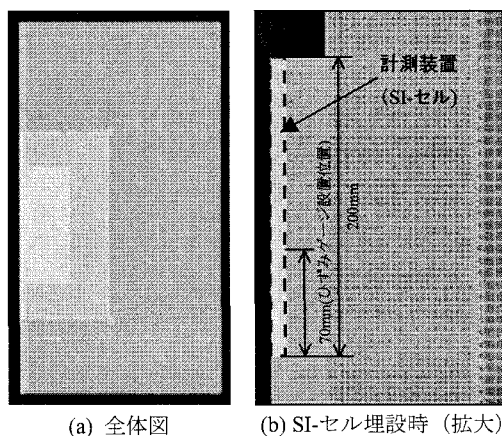


図-2 FEM 解析メッシュ図

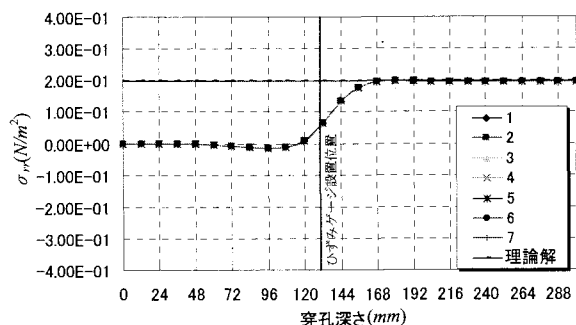


図-3 SIセル内の σ_r の解析結果

ば、次章で示す理論解の適用が不可能となる。そこで、本章においては最もシンプルな仮定として、岩盤と SI-セルを線形弾性体と仮定し、FEM 解析を表-1 のような実際の施工過程を考慮したステージ解析を実施することにより、平面ひずみ状態で導かれる理論解の適用性の検討を行った。

解析モデルは図-2 に示すように、左側境界を中心とする軸対象モデルであり、節点および要素数は、24642 節点、25310 要素である。本解析において、上下および右外側境界までの距離を十分にとることで遠方場応力を一様に作用させ、SI-セル内および SI-セル周辺の岩盤のメッシュを細かくすることで SI-セル内の挙動をより精密に把握し、理論解との比較検討を行った。

解析において、右側境界より 1.0Pa の単位圧縮荷重を载荷させた。その結果を図-3 および図-4 に示す。図-3 は、SI-セル内のひずみゲージ設置位置 (SI-セル底部より 70mm の位置) の半径方向応力 σ_r の分布である。図中の凡例 1 は SI-セルの中心であり、7 は SI-セルと岩盤の接合部である。本図より、穿孔がゲージ位置 (穿孔深さ 130mm) に近づくとき応力が減少し、ゲージ位置の近傍まで穿孔すると大きく増加し、その後若干減少して SI-セルの長さ分の穿孔深さで、ゲージ位置の応力は穿孔によるビット先端の切欠き部の応力集中による乱れの影響を受けることなく、一定値に収束することが分かる。このことは SI-セル内に生じるひずみにも同じことが言え、参考文献 11) の原位置試験の結果と概ね整合する結果となった。また、線形弾性理論による解と一定値に収束した FEM の解は一致していることが分かる。図-4 は σ_r の等高線図であり、パイロット孔先端およびボーリング孔とパイロット孔の接合部における隅角部の応力集中は生じているものの、その影響範囲は SI-セルの上下一部分に過ぎず、また、穿孔によるビット先端の応力集中はおおむね 10D 以上 (D:SI-セル径) の穿孔深さを設定することで影響範囲外となることがわかる。

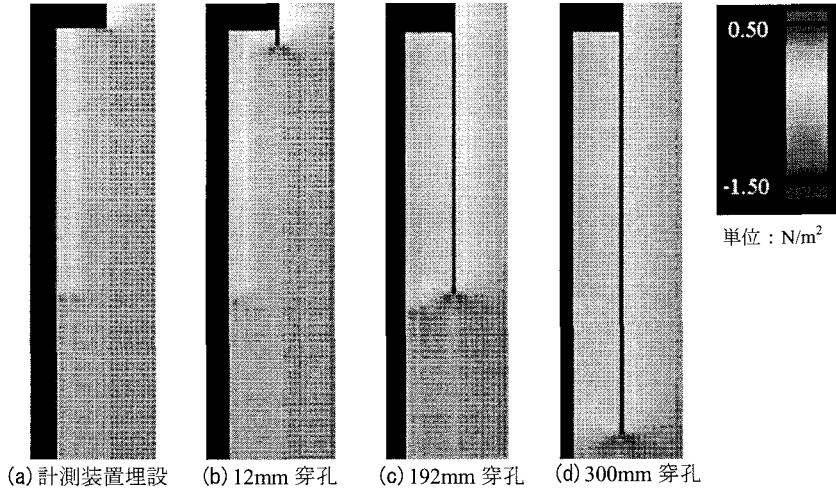


図-4 FEM 解析による σ_{rr} の等高線図

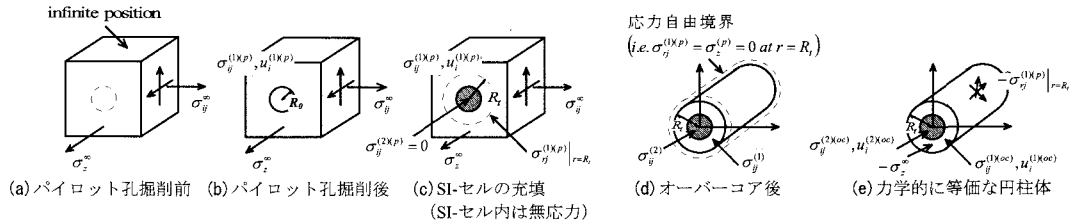


図-5 応力解放法の過程における概念図

以上より、SI-セルのひずみゲージ位置（SI-セル底部より 70mm の位置）において、おおむね 10D 以上の深さの穿孔を行うことで、ボーリング孔やパイロット孔の掘削の影響を受けることなく、平面ひずみ状態の下で導かれた理論解と FEM 解析により得られた解は一致し、理論解の適用性が確認された。したがって、次章で述べる平面ひずみ状態下での多孔質弾性理論を用いた理論解の適用も可能であると言える。

4. 有限位置でのオーバーコアリングによる初期応力計測理論

有限位置におけるオーバーコアリングによる初期応力計測理論は以下のような過程により導く。図-5(a)に示すような無限遠から三次元の応力(σ_{ij}^{∞})が作用している岩盤（媒体）に対して、SI-セルを埋設設置するために図-5(b)に示すような半径 R_0 のパイロット孔を掘削するが、これは一般的な円孔を有する媒体問題に帰着する。なお、この時の媒体内に生じる応力などに対する記号として上添字^(p)を用いた。次にパイロット孔を掘削した後に、図-5(c)に示すように SI-セルを埋設設置し、接着剤などによりパイロット孔壁と一体化させる。この段階では SI-セル内部は無応力状態である。さらに、図-5(d)は、半径 R_i のオーバーコアリングにより切離された SI-セルを含む円柱体であるが、この外周面では、オーバーコアリング前の応力場($\sigma_{ij}^{(1)(p)}$)に相当する表面応力が解放されている（上添字⁽¹⁾は岩盤（媒体）を示す）。一方、図-5(e)に示すように、この表面応力と逆符号の応力 ($-\sigma_{ij}^{(1)(p)}$: 指標 i が r の時の応力、すなわち $-\sigma_{rr}^{(1)(p)}$ 、 $-\sigma_{\theta\theta}^{(1)(p)}$ 、 $-\sigma_{zz}^{(1)(p)}$ を意味する) を円柱体の境界条件として与えることによって、オーバーコアリング後に生じる SI-セル内部の応力を決定することができる。なお、この時に円柱体に生じる応力および変位を $\sigma_{ij}^{(1)(oc)}$ 、 $\sigma_{ij}^{(2)(oc)}$ および $u_i^{(1)(oc)}$ 、 $u_i^{(2)(oc)}$ とする（上添字⁽²⁾は SI-セル（円柱形介在物）を示す）。ここで、円柱体表面で設定する境界条件にはパイロット孔を掘削していることによる撓乱を厳密に考慮していることから、有限位置におけるオーバーコアリングによる計測理論の構築が可能となる。

4. 1 問題の設定

本稿では、図-6 のような平面ひずみ状態における荷重条件を設定し、次節において下述のような平均圧縮応力成分すなわち静水圧的荷重条件の場合について一般解の導出を行い、多孔質弾性岩盤の時間依存性について検討する。

x' 軸が最小水平主応力方向に、 y' 軸が最大水平主応力方向に一致するように z 軸に関する座標の回転を行う。 x 軸と x' 軸のなす回転角 θ_r は次式で表される。

$$\theta_r = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2S_{xy}}{S_x - S_y} \quad (12)$$

この変換後の座標系での角度は次式となる。

$$\theta' = \theta - \theta_r \quad (13)$$

この軸の変換により遠方場 ($r \rightarrow \infty$) での応力は次式で与えられる。

$$\sigma_{x'x'} = -(P_0 - S_0), \quad \sigma_{y'y'} = -(P_0 + S_0), \quad \sigma_{x'y'} = 0, \quad p = p_0 \quad (14)$$

ここに、 P_0 は平均圧縮応力、 S_0 は偏差応力でありそれぞれ次式で与えられる。

$$P_0 = \frac{S_x + S_y}{2}, \quad S_0 = \sqrt{\left(\frac{S_x - S_y}{2}\right)^2 + S_{xy}^2} \quad (15)$$

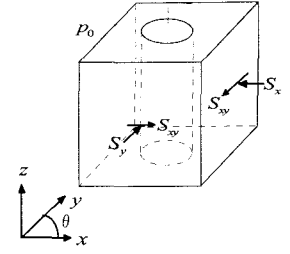


図-6 遠方場応力条件

4. 2 理論解の導出

(1) パイロット孔掘削

本問題は、前述したとおり、円孔を有する媒体問題に帰着する。したがって、Detournay & Cheng(1988)¹²⁾による解を援用することができ、境界条件は以下のように与えられる。

Model

$$\sigma_{rr}^{I(1)(p)} = P_0, \quad \sigma_{r\theta}^{I(1)(p)} = p^{I(1)(p)} = 0, \quad \text{at } r = R_0 \quad (16)$$

Mode2

$$\sigma_{rr}^{II(1)(p)} = \sigma_{r\theta}^{II(1)(p)} = 0, \quad p^{II(1)(p)} = -p_0, \quad \text{at } r = R_0 \quad (17)$$

ここに、 p は間隙水圧であり、上付添字^Iおよび^{II}はそれぞれ Model および Mode2 の荷重モードに対する解を示す。

最終的な解は次式により荷重モード Model、Mode2 の重ね合わせにより得られる。

$$\sigma_{rr}^{(1)(p)} = -P_0 + \sigma_{rr}^{I(1)(p)} + \sigma_{rr}^{II(1)(p)}, \quad (18)$$

$$\sigma_{\theta\theta}^{(1)(p)} = -P_0 + \sigma_{\theta\theta}^{I(1)(p)} + \sigma_{\theta\theta}^{II(1)(p)}, \quad (19)$$

$$\sigma_{zz}^{(1)(p)} = \nu [\sigma_{rr}^{(1)(p)} + \sigma_{\theta\theta}^{(1)(p)}] - \alpha(1-2\nu)p^{(1)(p)}, \quad (20)$$

$$\sigma_{r\theta}^{(1)(p)} = 0, \quad (21)$$

$$p^{(1)(p)} = p_0 + p^{II(1)(p)}, \quad (22)$$

ここに、

$$\sigma_{rr}^{I(1)(p)} = P_0 \frac{R_0^2}{r^2}, \quad \sigma_{\theta\theta}^{I(1)(p)} = -P_0 \frac{R_0^2}{r^2}, \quad (23)$$

$$\tilde{\sigma}_{rr}^{II(1)(p)} = -\frac{2\eta p_0}{s} \left[\frac{R_0}{r} \frac{K_1(\xi)}{\beta K_0(\beta)} - \frac{R_0^2}{r^2} \frac{K_1(\beta)}{\beta K_0(\beta)} \right], \quad (24)$$

$$\tilde{\sigma}_{\theta\theta}^{II(1)(p)} = \frac{2\eta p_0}{s} \left[\frac{R_0}{r} \frac{K_1(\xi)}{\beta K_0(\beta)} - \frac{R_0^2}{r^2} \frac{K_1(\beta)}{\beta K_0(\beta)} + \frac{K_0(\xi)}{K_0(\beta)} \right], \quad (25)$$

$$\tilde{p}^{II(1)(p)} = -\frac{p_0}{s} \frac{K_0(\xi)}{K_0(\beta)}, \quad (26)$$

であり、 $\sim$ は Laplace 変換を意味し、 s は時間 t に関する変換パラメータである。また、 ξ 、 β および η は次式で表される。

$$\xi = r\sqrt{\frac{s}{c}}, \quad \beta = R_0\sqrt{\frac{s}{c}} \dots\dots\dots (27)$$

$$\eta = \frac{\alpha(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \dots\dots\dots (28)$$

(2) 有限径のオーバーコアリング

オーバーコアリング後の岩盤（媒体）の円柱体（図-5(e)）の外周面（ $r=R_1$ ）には、パイロット孔掘削時にその仮定の円周に作用していた表面応力（ $\sigma_{rr}^{(1)(p)}$ at $r=R_1$ ）とは逆向きのものを作用させればオーバーコアによって応力解放が実施されたことを再現させることができる。したがって、以下のように境界条件を設定する。

$$\sigma_{rr}^{(1)(oc)} = -\sigma_{rr}^{(1)(p)} \Big|_{r=R_1}, \quad \sigma_{r\theta}^{(1)(oc)} = -\sigma_{r\theta}^{(1)(p)} \Big|_{r=R_1}, \quad p^{(1)(oc)} = -p^{(1)(p)} \Big|_{r=R_1}, \quad \text{at } r=R_1 \dots\dots\dots (29)$$

また、多孔質弾性岩盤と SI-セル（円柱形介在物）との接合境界は完全結合条件および岩盤は非排水条件を仮定し、次式が成立する。

$$u_r^{(1)(oc)} = u_r^{(2)(oc)}, \quad \sigma_{rr}^{(1)(oc)} = \sigma_{rr}^{(2)(oc)}, \quad \sigma_{r\theta}^{(1)(oc)} = \sigma_{r\theta}^{(2)(oc)}, \quad \frac{dp^{(1)(oc)}}{dr} = 0, \quad \text{at } r=R_0 \dots\dots\dots (30)$$

a) 多孔質弾性岩盤

式(10)の拡散方程式を時間 t について Laplace 変換を行うと次式となり、その一般解は式(32)で与えられる。

$$\frac{d^2 \tilde{\zeta}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\tilde{\zeta}}{dr} - \frac{s}{c} \tilde{\zeta} = 0. \dots\dots\dots (31)$$

$$\tilde{\zeta} = A^{(M)} I_0(\xi) + B^{(M)} K_0(\xi). \dots\dots\dots (32)$$

式(1)、(2)および(4)より、次式が得られ、次式と式(32)より体積ひずみ $\tilde{e}$ が式(34)のように求まる。

$$\frac{\partial e}{\partial r} = \frac{\alpha M(1-2\nu_u)}{2G(1-\nu_u)} \frac{\partial \tilde{\zeta}}{\partial r} \dots\dots\dots (33)$$

$$\tilde{e} = \frac{\alpha M(1-2\nu_u)}{2G(1-\nu_u)} \left[A^{(M)} I_0(\xi) + B^{(M)} K_0(\xi) \right] + C^{(M)}. \dots\dots\dots (34)$$

上式と式(5)を用いることで、式(35)のように変位 $\tilde{u}_r^{(1)(oc)}$ が得られる。

$$\tilde{u}_r^{(1)(oc)} = \frac{1}{s} \left[\frac{\alpha M(1-2\nu_u)}{2G(1-\nu_u)} \sqrt{\frac{c}{s}} \left(A^{(M)} I_1(\xi) - B^{(M)} K_1(\xi) \right) + \frac{C^{(M)}}{2} r + \frac{D^{(M)}}{r} \right]. \dots\dots\dots (35)$$

また、式(2)と式(34)、(35)を用いて間隙圧 $\tilde{p}^{(1)(oc)}$ は次式のように求まる。

$$\tilde{p}^{(1)(oc)} = \frac{1}{s} \left[M \left\{ \frac{(1-2\nu_u)(1-\nu)}{(1-2\nu)(1-\nu_u)} \left(A^{(M)} I_0(\xi) + B^{(M)} K_0(\xi) \right) \right\} - \alpha C^{(M)} \right]. \dots\dots\dots (36)$$

最後に式(1)、(5)および式(34)、(36)より $\tilde{\sigma}_{rr}^{(1)(oc)}$ 、 $\tilde{\sigma}_{\theta\theta}^{(1)(oc)}$ は次のように得られる。

$$\tilde{\sigma}_{rr}^{(1)(oc)} = \frac{1}{s} \left[\frac{\alpha M(1-2\nu_u)}{1-\nu_u} \left(-\frac{A^{(M)}}{\xi} I_1(\xi) + \frac{B^{(M)}}{\xi} K_1(\xi) \right) + \frac{G}{1-2\nu_u} C^{(M)} - \frac{2G}{r^2} D^{(M)} \right]. \dots\dots\dots (37)$$

$$\tilde{\sigma}_{\theta\theta}^{(1)(oc)} = \frac{1}{s} \left[\frac{\alpha M(1-2\nu_u)}{1-\nu_u} \left\{ A^{(M)} \left(\frac{1}{\xi} I_1(\xi) - I_0(\xi) \right) + B^{(M)} \left(-\frac{1}{\xi} K_1(\xi) - K_0(\xi) \right) \right\} + \frac{G}{1-2\nu_u} C^{(M)} + \frac{2G}{r^2} D^{(M)} \right]. \dots\dots (38)$$

ここに、 $A^{(M)}$ 、 $B^{(M)}$ 、 $C^{(M)}$ 、 $D^{(M)}$ は積分定数である。

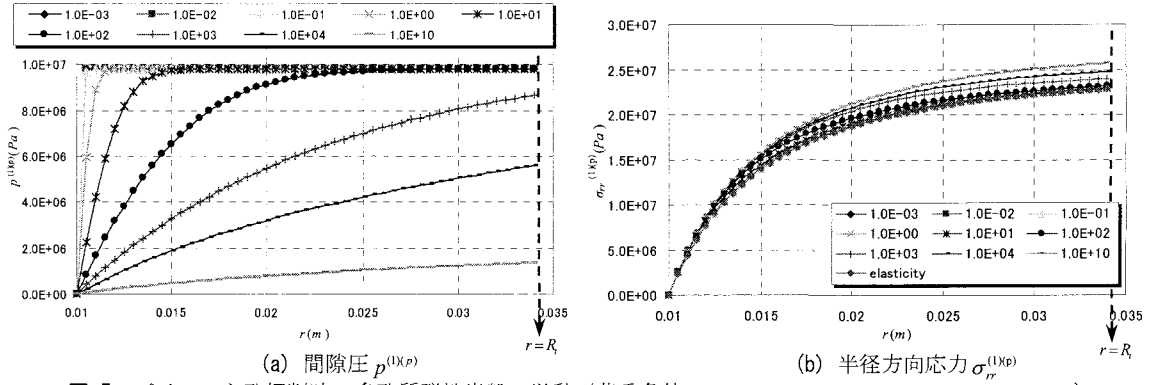


図-7 パイロット孔掘削時の多孔質弾性岩盤の挙動（荷重条件： $\sigma_r^\infty = P_0 = -25 \times 10^6 \text{ Pa}$, $p_0 = 9.8 \times 10^6 \text{ Pa}$ ）

b) SI-セル

SI-セルは弾性体と仮定すると、下式のように与えられる。

$$\tilde{u}_i^{(2)(oc)} = \frac{2}{sE^{(I)}}(1+\nu^{(I)})(1-2\nu^{(I)})A^{(I)}r, \quad (39)$$

$$\tilde{\sigma}_{rr}^{(2)(oc)} = \tilde{\sigma}_{\theta\theta}^{(2)(oc)} = \frac{2A^{(I)}}{s}. \quad (40)$$

ここに、 $E^{(I)}$ および $\nu^{(I)}$ はそれぞれSI-セルのヤング係数およびポアソン比である。また、 $A^{(I)}$ は積分定数である。

上記a)およびb)より、境界条件式(29)および(30)を満足するように定数 $A^{(M)}$ 、 $B^{(M)}$ 、 $C^{(M)}$ 、 $D^{(M)}$ 、 $A^{(I)}$ を定めることで所期の条件を満たした解が得られる。

以上によって、パイロット孔掘削時の応力 $\sigma_{ij}^{(1)(p)}$ 、変位 $u_i^{(1)(p)}$ および間隙水圧 $p^{(1)(p)}$ とパイロット孔掘削時に $r=R_i$ の位置で生じる応力 $\sigma_{ij}^{(1)(p)}|_{r=R_i}$ および間隙水圧 $p^{(1)(p)}|_{r=R_i}$ と逆向きものを作用させた場合の円柱体の応力 $\sigma_{ij}^{(1)(oc)}$ 、変位 $u_i^{(1)(oc)}$ および間隙水圧 $p^{(1)(oc)}$ を重ね合わせることでオーバーコア後の最終的な結果が次式のように得られる。

$$\sigma_{ij}^{(1)} = \sigma_{ij}^{(1)(p)} + \sigma_{ij}^{(1)(oc)}, \quad u_i^{(1)} = u_i^{(1)(p)} + u_i^{(1)(oc)}, \quad p^{(1)} = p^{(1)(p)} + p^{(1)(oc)}. \quad (\text{岩盤}) \quad (40)$$

$$\sigma_{ij}^{(2)} = \sigma_{ij}^{(2)(oc)}, \quad u_i^{(2)} = u_i^{(2)(oc)}. \quad (\text{SI-セル}) \quad (41)$$

5. 数値計算例

前章の結果を基に数値計算例を示す。時間領域における数値解は前章において得られたLaplace変換領域の理論解を近似逆Laplace変換（Stehfestの方法¹³⁾）を適用することによって得ることができる。

数値計算を行うに当たり物質係数は以下のように設定した。

多孔質弾性岩盤：頁岩（参考文献14）より）

$$\left. \begin{aligned} G &= 7.600 \times 10^8 \text{ Pa}, \quad B = 0.915, \quad \alpha = 0.968, \\ \nu &= 0.219, \quad \nu_u = 0.461, \quad c = 1.782 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}. \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

SI-セル：エポキシ樹脂

$$G^{(I)} = 1.194 \times 10^9 \text{ Pa}, \quad \nu^{(I)} = 0.340. \quad (43)$$

また、SI-セルとオーバーコアビットのサイズは以下のように設定した。

$$R_0 = 0.010 \text{ m}, \quad R_i = 0.034 \text{ m}. \quad (44)$$

図-7 はパイロット孔掘削時の間隙水圧 $p^{(1)(p)}$ および応力 $\sigma_{rr}^{(1)(p)}$ の挙動を示したものである。オーバーコア位置の $p^{(1)(p)}|_{r=R_i}$ および $\sigma_{rr}^{(1)(p)}|_{r=R_i}$ がオーバーコア後の解放力となり（図-5(e)参照）、SI-セル内部の応力が求まるのであるが、多孔質岩盤においては時間に依存しているため、パイロット孔を掘削してSI-セルを埋設設置してからオーバー

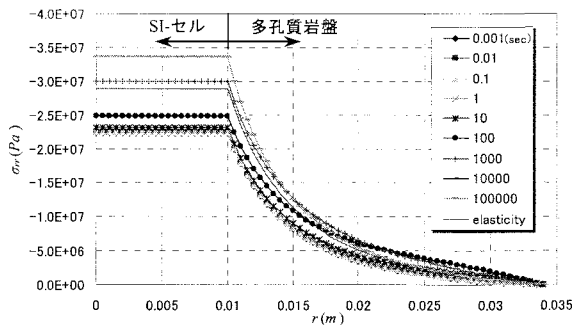


図-8 σ_r の時間依存分布

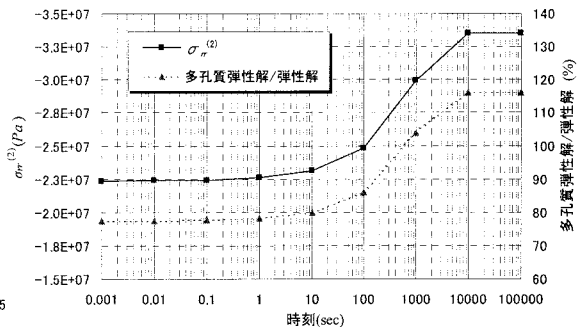


図-9 SI-セル内の $\sigma_r^{(2)}$ の時間依存分布

コアを行う時間までに解放力の値が変化することが分かる。したがって、オーバーコアを行うタイミングにより求まる SI-セル内部の応力値が変化するということが解釈できる。

図-8 はパイロット孔掘削から時刻を $t=10^3$ sec 経過したときのオーバーコア後の応力 $\sigma_r^{(1)}$ と $\sigma_r^{(2)}$ を示したものであり、図-9 は SI-セル内の $\sigma_r^{(2)}$ の時間依存分布を示したものである。応力解放後においても多孔質弾性岩盤の時間依存挙動により、SI-セル内の応力は変化し、時間が経過するに従い応力は増加し、一定値に収束することが分かる。また、弾性解を基準とした時の多孔質弾性解の応力比の時間変化は、 $t=10^3$ sec になると弾性解よりも多孔質弾性解の応力が大きくなり、多孔質弾性解の応力が一定値に収束した時の応力比は 116% となり、多孔質弾性解の応力が大きくなることが分かる。

上述の結果より、多孔質弾性岩盤において初期応力計測を行う場合、各施工ステージに要した時間に SI-セルの挙動は依存することが分かる。また、原位置初期応力の真値を得ることは、オーバーコア後の SI-セルの時刻歴挙動変化を捉え、本研究において提示した理論をフィッティングさせることで、可能となると考える。

6. 結言

本論文では、多孔質弾性岩盤において埋設型計測装置 (SI-セル) を用いた応力解放法による初期応力計測の理論解を提示し、パイロット孔掘削～オーバーコアリングまでの施工ステージにおける多孔質弾性岩盤と計測装置 (SI-セル) との相互作用などについて時間に依存した解析を実施した。その結果、オーバーコアを行うタイミングや応力解放後の SI-セルの挙動は時間に依存し、得られる SI-セル内の応力は時刻の経過に伴い値が変化することが分かった。また、本論文で提示した多孔質弾性岩盤の初期応力計測理論は平面ひずみ状態の仮定により導かれているが、SI-セルは長さが 200mm と有限長さの円柱体であるため、応力解放法の施工仮定を考慮した FEM 解析を実施することで理論解の適用性の検討を行った。その結果、ボーリング孔とパイロット孔の隅角部の応力集中やオーバーコアによるビット先端の応力集中の影響を受けることなく、FEM 解析結果と理論解は一致し、平面ひずみ状態で得られる理論解の適用が可能であることを確認した。

参考文献

- 1) 土木学会編: 初期地圧測定法の現状と課題, 土木学会, pp.3-45, 1992.
- 2) Sugawara, K., and Obara, Y.: Measuring rock stress, Case examples of rock engineering in Japan, Comprehensive Rock Engineering, Pergamon Press, Vol.3, pp.533-552, 1993.
- 3) Worotnicki, G.: CSIRO Triaxial stress measurement cell, Comprehensive Rock Engineering, Pergamon Press, Vol.3, pp.329-394, 1993.
- 4) 平島健一, 浜野浩幹: 異方性弾性地山内の応力測定理論に関する二, 三の再考察, 土木学会論文集, No.382/III-7, pp.141-147, 1987.
- 5) 平島健一, 浜野浩幹: 測定用の円柱状埋設物による異方性弾性地山の初期(変動)応力の解析理論, 土木学会論文集, No.406/III-11, pp.175-184, 1989.
- 6) 平島健一, 佐久間彰三, 菊地慎二, 松田武: 円形状埋設型計測装置を用いた地山応力測定結果に及ぼす接着層, すべりおよびオーバーコアリング径の影響の理論解析, 土木学会論文集, No.424/III-14, pp.207-216, 1990.
- 7) 菊地慎二, 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, No.430/III-15, pp.143-152, 1991.
- 8) 平島健一, 桂千代, 鈴木拓雄: 応力解放法による粘弾性岩盤の円形介在物を用いた初期応力計測理論, 土木学会論文集, No.743/III-64, pp.147-154, 2003.
- 9) たとえば, Detournay, E. and Cheng, A.H.-D.: Chapter5 Fundamentals of Poroelasticity, Comprehensive Rock Engineering, Pergamon Press, Vol.2, 1994.
- 10) Biot, M.A.: General Theory of Three-dimensional Consolidation, Journal of Applied Physics, Vol.12, 155-164, 1941.
- 11) 金川忠, 日比野敏, 石田毅: オーバーコアリング法による3次元地圧測定法, 電力中央研究所報告, 研究報告: 385033, 1986.
- 12) Detournay, E. and Cheng, A.H.-D.: Poroelastic Response of a Borehole in a Non-hydrostatic Stress Field, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.25, No.3, pp. 171-182, 1988.
- 13) H.Stehfest: Numerical inversion of the Laplace transform and applications, J. Comp. Mach. Vol.13, pp. 47-49, 1970.
- 14) Cheng, A.H.-D and Abousleiman, Y.: Poroelastic Solution for an Inclined Borehole, J.Appl. Mech, Vol.64, pp. 32-38, 1997.