

## 堆積軟岩体の水没鉛直井における高精度地圧計測法の開発

岩山 晃大, 坂口 清敏 (東北大学)

小川 浩司, 檀上 堯, 丹野 剛男 (応用地質 (株))

横山 幸也 (深田地質研究所)

広中 良和 (公財 原子力環境整備促進・資金管理センター)

石橋 勝彦 (東電設計(株))

## 1. 緒言

堆積軟岩体を対象とした地下構造物の設計・施工に関する課題の一つに、堆積軟岩体に適用可能な高精度地圧測定法が確立されていないことが挙げられる。本研究では、堆積軟岩体に対して、地表から削孔された水没鉛直井で地圧測定が可能な高精度地圧測定法の開発を行った。

## 2. 測定方法・手順の概要

本研究では、測定実績が多く信頼性の高い測定法とされる応力解放法の中から、国際岩の力学会(ISRM)の標準試験法<sup>1)</sup>であり、かつ、地盤工学会の基準<sup>2)</sup>でもある円錐孔底ひずみ法<sup>3)</sup>を応用した円錐孔壁ひずみ法を提案する。提案する測定方法・手順の概要を図1に示す。まず、①パイロット孔の孔底から円錐状の孔壁部を加工し、その底部に小口径のカッティングス溜り孔を加工する。次に、②カッティングス溜り孔の上部付近から円錐孔壁部にかけて接着剤を充填する。③ストレインセルを押し付け円錐孔壁部に接着する(以降、どぶづけ接着法と呼ぶ)。④大口径のオーバーコアリングを行い解放ひずみ測定する。

提案する円錐孔壁ひずみ法の主な特徴は、カッティングス孔、どぶづけ接着法および大口径オーバーコアリングの採用の3つである。これら特徴の誘因は、堆積軟岩を対象としていること、鉛直井での適用を目指していること、および測定歩留まりの高さの確保に起因する。すなわち、カッティングス孔によって円錐孔壁部にボーリングに伴うカッティングスの付着を防ぐことができ、どぶづけ接着法で簡便かつ確実に水没したボアホール内にストレインセルを接着でき、大口径のオーバーコアリングで測点近傍の岩盤の破壊を防ぐことができると考えた。円錐孔壁ひずみ法で使用するストレインセルは、ロゼットゲージ8枚が等間隔に配置される24素子のものを採用することにした(図2)。

## 3. 円錐孔壁ひずみ法の理論的検討

### 3.1 測定理論と理論測定精度

測定理論は円錐孔底ひずみ法<sup>1)</sup>と同じであるが、以下に概要を説明する。図2に示す口径 $2R$ のパイロット孔の孔底に加工された円錐孔壁面の測定円半径 $r_0$ 上のひずみ $(\varepsilon_\rho, \varepsilon_\theta, \varepsilon_\varphi)$ と、初期応力 $\{\sigma\}^T = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}\}$ の関係は式(1)に示す観測方程式で表される。式中の $A_{11}, A_{12}, \dots, D_{32}$ はひずみ感度係数と呼ばれ、ポアソン比 $\nu$ および無次元測点円半径 $r_0/R$ の関数である。 $E$ はヤング率である。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_\rho \\ \varepsilon_\varphi \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}+A_{12}\cos 2\theta & A_{11}-A_{12}\cos 2\theta & C_{11} \\ A_{21}+A_{22}\cos 2\theta & A_{21}-A_{22}\cos 2\theta & C_{22} \\ A_{31}+A_{32}\sin 2\theta+A_{33}\cos 2\theta & A_{31}-A_{32}\sin 2\theta-A_{33}\cos 2\theta & C_{33} \end{bmatrix} \cdot \frac{\{\sigma\}}{E} \quad (1)$$

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

式(1)をマトリックス表示すると式(2)となる。

$$[A]\{\sigma\}=E\cdot\{\beta\} \quad (2)$$

ここに、 $[A]$ は $24 \times 6$ の係数マトリックスで、ひずみ感度係数を含む行列であり、 $\{\beta\}$ が測定ひずみである。初期応力の最確値 $\{\bar{\sigma}\}$ は最小二乗法によって求められ、 $[C]$ を $[A]^T \cdot [A]$ の逆マトリックスとすれば式(3)となる。

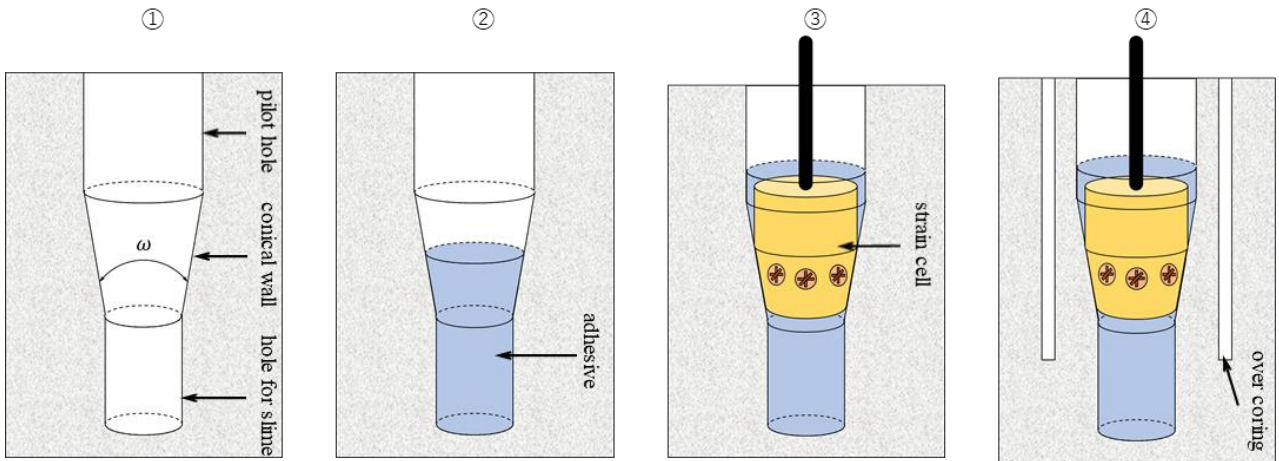
$$\{\bar{\sigma}\}=E\cdot[C]\{\bar{\beta}\} \quad (3)$$

ここに、 $\{\bar{\beta}\}=[A]^T \cdot \{\beta\}$ である。また、6つの応力成分の分散 $\{\xi_\sigma^2\}$ は、測定ひずみ $\beta_i$ の分散を $\xi_m^2$ とすると、最小二乗法の性質により式(4)となる。

$$\xi_i^2=c_{ii}\cdot E^2\cdot\xi_m^2 \quad (4)$$

ここに、 $c_{ii}$ はマトリックス $[C]$ の対角成分である。式(4)は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。測定値の分散 $\xi_m^2$ を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<sup>4)</sup>。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くなる。



- ①パイロット孔の孔底から円錐状の孔壁部を加工し、その底部に小口径のカッティングス溜り孔を加工
- ②カッティングス溜り孔の上部付近から円錐孔壁部にかけて接着剤を充填
- ③ストレインセルを押し付け円錐孔壁部に接着（どぶづけ接着法）
- ④大口径のオーバーコアリングを行い解放ひずみ測定

図1 円錐孔壁ひずみ法の測定概念

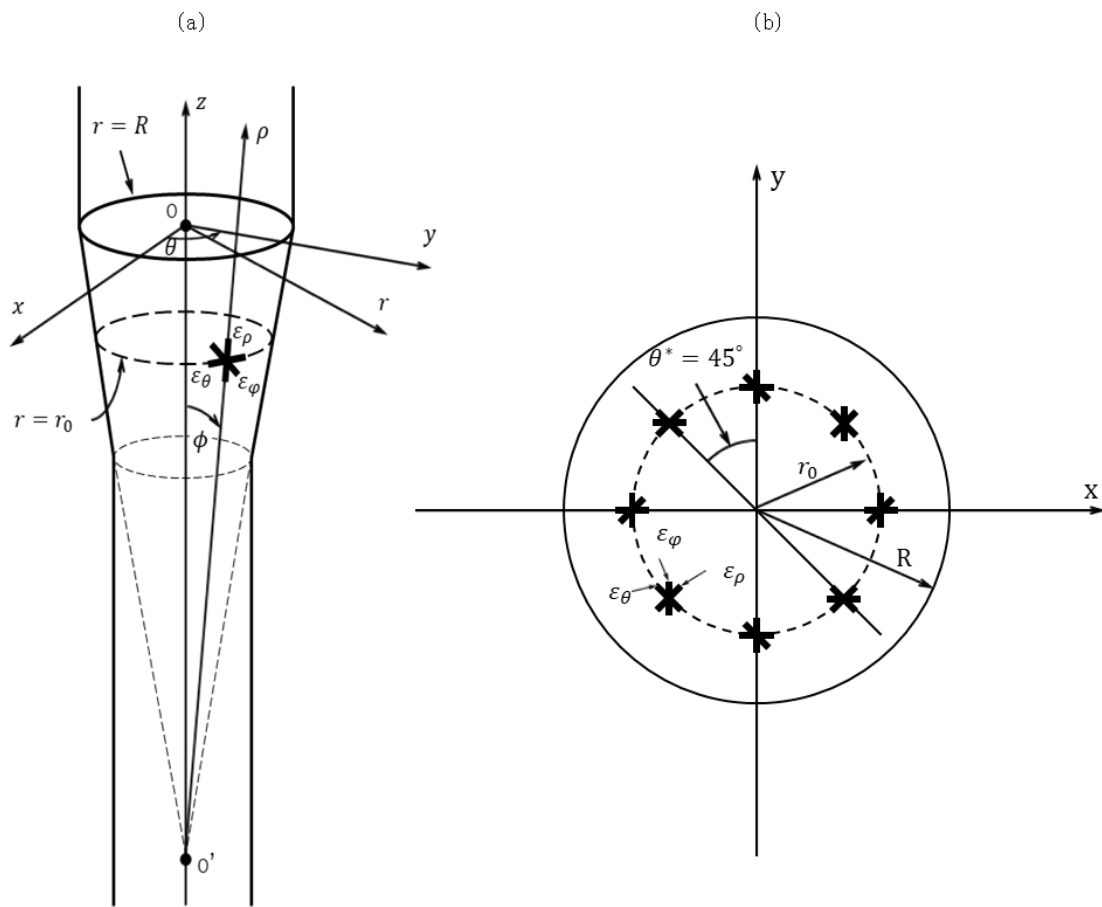


図2 円錐孔壁で測定されるひずみの配置と座標系

(a)座標系の定義, (b)測点円上のひずみゲージの配置（孔底から孔口を見て）

### 3.2 幾何学条件

前節で述べた理論測定精度の検討結果と、原位置での実用性を考慮して、円錐孔壁ひずみ法の幾何的な条件を図3のように決定した。すなわち、円錐孔壁部の頂角 $\omega = 20$ 度、パイロット孔の孔径 $\phi 56$  mm( $R = 28$  mm)、カッティングス溜まり孔の孔径 $\phi 36$  mm( $R_0 = 18$  mm)、孔長 540 mm、オーバーコアリング孔径 $\phi 116$  mm、測点円半径 $r_0 = 21$  mmとした。また、パイロット孔の長さ $h$ は、原位置の状況で長さが増える(せざるを得ない)ことが想定される。そこで、パイロット孔の長さ $h$ がひずみ感度係数に及ぼす影響について、 $h = 100$  mm, 200 mm, 300 mm, 400 mm として、 $h = \infty$ の場合との変動を数値計算した結果、 $h$ を300 mm以上にするとその変動は3%以下となることが分かった。言い換えると、測定現場の状況に応じてパイロット孔の長さを変えざるを得ない場合、 $h$ を300 mm以上にすれば $h = \infty$ の場合のひずみ感度係数が適用可能となる。また、提案する幾何学条件で円錐孔底ひずみ法との測定精度<sup>4)</sup>を $c_{ii}$ で比較したところ、応力の理論測定精度は円錐孔底ひずみ法に比べて36%高いことが明らかとなった。さらに、円錐孔壁面に貼付された長さ $l$ のひずみゲージの曲率が、ひずみ感度係数に与える影響についても検証した。その結果、ひずみ感度係数に与える影響は、円錐孔底ひずみ法において無視できるとされている範囲<sup>3)</sup>に収まったため、円錐孔壁ひずみ法においてひずみゲージ曲率の影響は無視できると結論付けた。

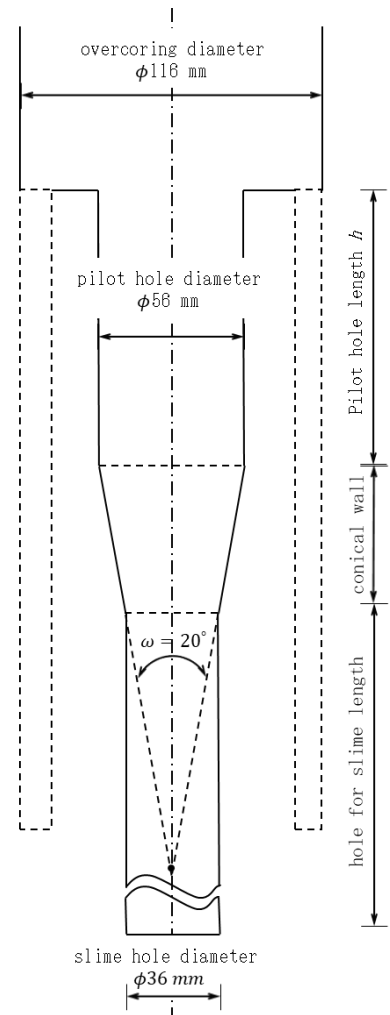


図3 幾何学条件

## 4. 室内検証実験

### 4.1 測定装置等

円錐孔壁ひずみ法の実用性の検証のために室内実験(一辺300 mmの立方体岩石供試体を使用)を行った。まず、実験に必要な測定機材等を開発・準備した。図4は、所定の円錐孔壁とカッティングス孔を一度に加工できるビットである。

なお、円錐孔壁部の加工用ビットには粗削り用と仕上げ用の2種類がある。図5はエポキシ樹脂製24素子ストレインセルであり、ゲージ長5 mmのロゼットゲージ8枚が等間隔にセル表面にモールドされている。

測定概念で述べたどぶづけ接着法のための接着剤の選定を行った。使用する接着剤に必要とされる主な条件は、水中に流し込んで所定の位置に堆積すること、可使時間が30分以上であること、水中での硬化時間が1日以内であること、およびひずみの測定感度に影響を与えないことである。そこで、入手した7種類の接着剤に対して、どぶづけ接着法を想定した接着性能評価実験を行い、CSIRO-HIC用接着剤(HIC接着剤)を採用することとした。図6は、接着後の断面の様子である。接着層は薄く均等に分布している。



図4 円錐孔壁(仕上げ用をセット)とカッティングス孔を加工するビット(青色部)



図5 円錐孔壁ひずみ法用の24素子ストレインセル

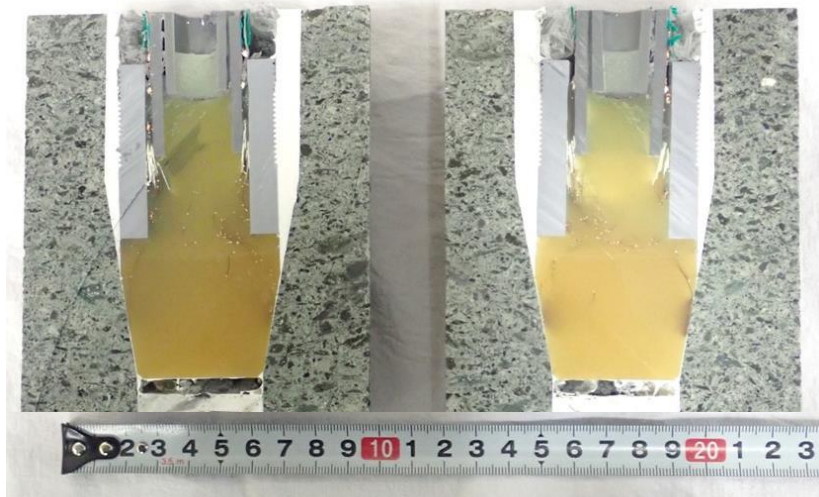


図6 ストレインセル接着後の様子（岩石は大谷石）

#### 4.2 どぶづけ接着法の実用性検証実験

どぶづけ接着法の実用性と選定した接着剤がひずみ測定感度に与える影響を確かめるために2軸荷重実験を行った（図7）。本試験においては、接着剤の影響のみを検討できるように、測定方法を実績のある円錐孔底ひずみ法とし、使用する岩石は、確実に測定できる硬岩（本小松安山岩，ヤング率  $E = 30 \text{ GPa}$ ，ポアソン比  $\nu = 0.25$ ）を用いた。実験は、図のように加工した本小松安山岩に対して、HIC接着剤を用いてどぶづけ接着法で円錐孔底ひずみ法の24素子ストレインセルを孔底に接着し、2軸応力を載荷して孔底ひずみを測定した。測定ひずみから応力を評価し、載荷応力と測定応力を比較した。実験の結果、載荷応力が  $\sigma_x = 5.12 \text{ MPa}$ ， $\sigma_y = 9.86 \text{ MPa}$  に対し、測定応力は  $\sigma_x = 5.30 \text{ MPa}$ ， $\sigma_y = 9.72 \text{ MPa}$  となり、その誤差は  $\sigma_x$  が 3.5%， $\sigma_y$  が 1.4% であった。この結果、HIC接着剤を用いたどぶづけ接着法の実用性が確認できた。

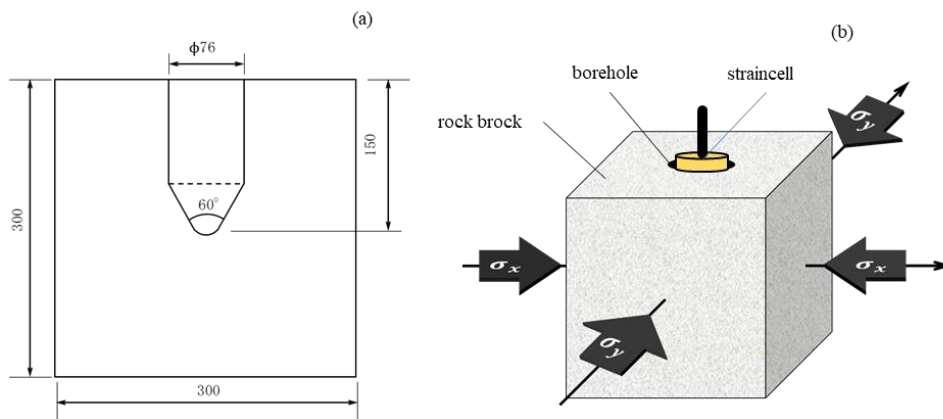


図7 2軸荷重実験 (a)供試体の寸法と断面図，(b)供試体と載荷応力の関係

### 4.3 軟岩を用いた2軸載荷試験

軟岩への適用性を検証するために、軟岩（青森県六ヶ所村産軽石凝灰岩，ヤング率  $E = 1.0 \text{ GPa}$ ，ポアソン比  $\nu = 0.25$ ）を対象に円錐孔壁ひずみ法を用いた2軸載荷実験を行った。供試体の寸法、断面は図8のようである。載荷応力は  $\sigma_x = 3.0 \text{ MPa}$ ，  $\sigma_y = 2.0 \text{ MPa}$  とした。図5のストレインセルをどぶ

づけ接着法で接着した。ひずみは問題なく測定できたものの、 $z$ 軸方向に近い  $\varepsilon_\rho$  の値が  $2500 \times 10^{-6}$  程度の大きな引張ひずみであったことから、実験中の岩石ブロック内に  $z$ 軸方向に引張応力が発生し、円錐孔壁近傍に引張り裂が発生している可能性が考えられた。そこで、実験中の岩石ブロックの状況を模擬した3D-FEM解析を行い、岩石ブロック内の  $z$ 軸方向の応力状態を確かめた。計算条件は実験条件に則して、 $\sigma_x = 3.0 \text{ MPa}$ ，  $\sigma_y = 2.0 \text{ MPa}$ ， ヤング率  $E = 1.0 \text{ GPa}$ ， ポアソン比  $\nu = 0.25$  とした。結果を図9(a)に示す。図は、解析モデルを  $x$ 軸に対して垂直に切断した断面であり、 $z$ 軸方向応力の  $\sigma_z$  の分布を示している。カラーバーに併記の数字が正の場合が引張応力、負の場合が圧縮応力となる。シミュレーションの結果、岩石ブロック内に  $z$ 軸方向の引張応力が発生していることが確認できる。円錐孔壁部周辺には最大の引張応力  $0.94 \text{ MPa}$  が発生していた。この値は、実験に使用した軽

石凝灰岩の引張強度  $0.57 \text{ MPa}$  を超えていることから、実験時に円錐孔壁近傍で引張り裂が発生し、載荷応力に対応したひずみが測定できていないと判断した。 $z$ 軸方向への引張応力の発生は、 $\sigma_z$  を載荷しない2軸載荷試験が原因していると考えられた。そこで、 $\sigma_z$  を載荷した場合についてのシミュレーションを行った。載荷条件は、 $\sigma_x = 3.0 \text{ MPa}$ ，  $\sigma_y = 2.0 \text{ MPa}$ ，  $\sigma_z = 2.0 \text{ MPa}$  とし、他の条件は同じである。結果を図9(b)に示す。 $\sigma_z$  が加わると岩石ブロック内に  $z$ 軸方向の引張応力は発生しないことが分かる。今回の室内検証実験を  $\sigma_z$  を載荷した条件で実施していれば避けられたことではあったが、使用した実験システムの関係上、今回の実験では  $z$ 軸載荷ができなかった。しかしながら、相応のひずみ測定はできているので、提案する円錐孔壁ひずみ法による原位置応力の測定は可能であると判断している。なお、実際の測定現場においては  $\sigma_z$  が存在する。応力の状態にもよるが、原位置測定においては室内実験のような現象は起こりにくいと考える。いずれにしても、軟岩を使用した室内検証実験は必要であり、今後の課題としたい。

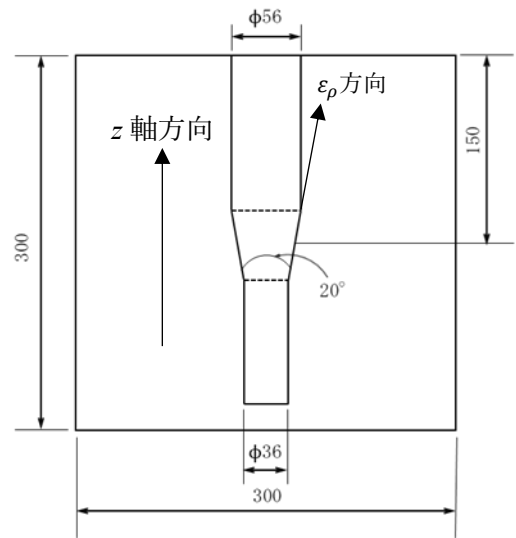


図8 供試体の断面と寸法

## 5. 結言

堆積軟岩体の水没鉛直井に適用可能な高精度地圧測定法として円錐孔壁ひずみ法を提案した。提案する方法に対して測定精度に及ぼす幾何学条件について検討を行い幾何学条件を決定した。応力の理論測定精度は円錐孔底ひずみ法に比べて高いことを確認した。硬岩を対象とした2軸載荷実験から、開発した測定装置とどぶづけ接着法の実用性を確認した。軟岩に対して円錐孔壁ひずみ法を適用し2軸試験を行った結果、ひずみの測定は可能であったが、大きな引張ひずみが測定された。これは、載荷条件の影響でひずみ測定点近傍に引張り裂が発生していたためであることを数値シミュレーションで確認した。しかしながら、相応のひずみ測定はできており、提案した円錐孔壁ひずみ法は実用可能であると判断した。

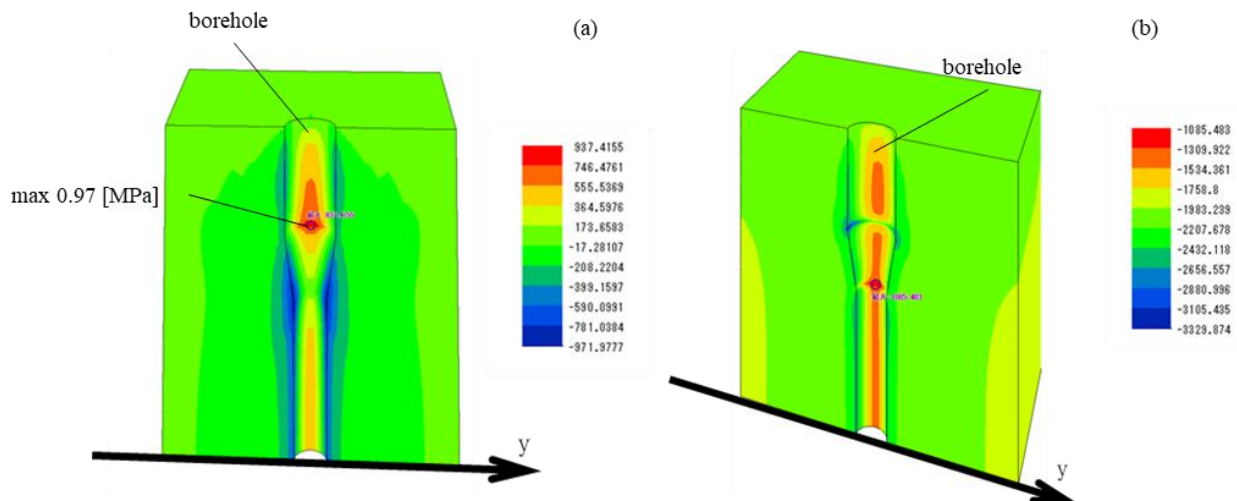


図9 3F-FEMで計算した応力 $\sigma_z$ の分布（引張が正）（ $E = 1.0$  GPa,  $\nu = 0.2$ ）

(a)  $\sigma_x = 3.0$  MPa,  $\sigma_y = 2.0$  MPa の場合 (b)  $\sigma_x = 3.0$  MPa,  $\sigma_y = 2.0$  MPa,  $\sigma_z = 2.0$  MPa の場合

注) カラーバーの色では比較できない

## 謝 辞

本研究には、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「令和3年度低レベル放射性廃棄物の処分に関する技術開発事業（地下空洞型処分調査技術高度化開発）（JPJ010897）」の成果の一部を利用した。

## 参考文献

- 1) K. Sugawara and Y. Obara: Draft ISRM Suggested Method for In Situ Stress Measurement using the Compact Conical-ended Borehole Overcoring (CCBO), Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 36, 307-322, 1999.
- 2) Japanese Geotechnical Society: Method for initial stress measurement by compact conical-ended borehole overcoring technique, JGS3551-1009, 2009.
- 3) 坂口清敏, 竹原孝, 尾原祐三, 中山智晴, 菅原勝彦: コンパクトオーバーコアリング法による岩盤応力の測定, 資源と素材, 110, 331-336, 1994.
- 4) 坂口清敏, 尾原祐三, 中山智晴, 菅原勝彦: 円錐孔底ひずみ法の応力測定精度, 資源と素材, 108, 455-460, 1992.