

軟岩地盤における円錐孔底ひずみ法の 現場適用性に関する一考察

A STUDY OF FIELD APPLICABILITY OF ROCK STRESS DETERMINATION IN SOFT ROCKS USING THE CONICAL-ENDED BOREHOLE OVERCORING TECHNIQUE

富田敦紀*・高橋一憲*・小川浩司**・横山幸也**

Atsunori TOMITA, Kazunori TAKAHASHI, Koji OGAWA, Tatsuya YOKOYAMA

Conical-ended borehole overcoring technique, which is one of stress relief methods, has been hardly applied to soft rocks, since it is difficult to glue the strain cell to the borehole socket with water. In order to conduct for soft rocks with water, we selected epoxy resin adhesives. However, as a result of the laboratory test, it became clear that the measured strain might become small as compared with the actual strain of rock surface, in case of gluing with epoxy resin adhesives. Therefore, we carried out the sensitivity test of the overcore with the cell by hydrostatic loading in the site and determined stress tensor. Consequently, the estimated result was almost the same as the CRIEPI overcoring method.

Key Words: rock stress, conical-ended borehole overcoring technique, soft rock, sensitivity testing

1. はじめに

岩盤を対象とした地下空洞の設計に際しては岩盤物性等を的確に調査・設定する必要がある。特に地圧は空洞安定性検討・支保設計・掘削影響領域検討に対して重要な条件であり、原位置での正確な 3 次元応力の絶対値測定が必要である。

地圧の測定法は種々あるが、その中で応力解放法は原理が明快で信頼性が高く実績も豊富である。応力解放法の原理は、地圧から解放された岩石のひずみまたは変形を測定して地圧を算出するものである。その応力解放法のうち特に実績が豊富なのが埋設ひずみ法と円錐孔底ひずみ法の 2 つである。円錐孔底ひずみ法は埋設ひずみ法と比較してひずみ計が安価であり測定に要する期間も短縮できるが、軟岩地盤での計測実績は埋設ひずみ法と比較して乏しい。また、間隙が水で飽和した軟岩を対象にする場合、孔底表面から水が浸出する孔底面に孔底ひずみ計を設置することとなり、一般に使用されているシアノアクリレート系接着剤では接着不良となり測定できないことがある。

そこで、今回は孔底表面から浸出水がある岩盤でも適用可能な接着剤としてエポキシ系接着剤を選定し¹⁾、事前実験により適用性を検証した。その結果、エポキシ系接着剤によりひずみ計を接着すると、測定されるひずみが、被着部岩盤表面の実際のひずみに比べて小さくなる場合があることが判明した。

このため、現場での適用にあたっては、ひずみ計が接着されたコアを用いて三軸感度試験を行い、ひずみの測定感度を求めて感度補正して岩盤内応力を算定した。この円錐孔底ひずみ法により求めた応力と埋設ひずみ法による測定結果を比較し、円錐孔底ひずみ法の軟岩地盤での適用性を検討した。

* 正会員 日本原燃 (株) 開発設計部

**正会員 応用地質 (株) エネルギー事業部

2. 測定・解析の方法

(1) 円錐孔底ひずみ法に関する事前実験

円錐孔底ひずみ法は、中硬岩から硬岩までの岩盤を対象に多く実施されてきた方法であり、軟岩での実績は少ない。通常は浸出水の少ない孔底にひずみ計を接着する場合がほとんどであり、使用する接着剤はシアノアクリレート系のものが一般的である。

しかし、間隙が水で飽和した軟岩を対象とする場合、浸出面にひずみ計を接着する必要があるが、シアノアクリレート系の接着剤では、その特性から孔底に水がある場合には接着が困難である。このため、適切な接着剤を選定するために実際の測定地点の近傍で採取した岩石試料を用いて事前室内実験を行うことにした。

実験の第一段階として、測定地点で採取した岩石試料を成形し、ひずみゲージを各種の接着剤で貼り付け、二軸載荷試験時の挙動を比較した。その結果、シアノアクリレート系接着剤ではひずみゲージの一部が剥離し、接着が不良になる場合があることが判明した。シアノアクリレート系接着剤が水分と反応して硬化するためと考えられる。比較した接着剤の中では、エポキシ系接着剤の場合のみシアノアクリレート系接着剤により接着できたひずみゲージとほぼ同じ挙動を示した。

上記の結果から、第二段階として、シアノアクリレート系に代わる接着剤としてエポキシ系を選定し、円錐ゲージを用いた比較試験を行った。実験は以下のように実施した(写真1)。

- ①立方体に成形した試料の相対する両面に円錐孔を削孔して二軸載荷装置にセットし、初期荷重を載荷した。
- ②両側の円錐孔底にそれぞれシアノアクリレート系とエポキシ系の接着剤で円錐ゲージを接着した。
- ③一晩経過後、除荷試験を行い、ひずみ変化を計測した。

測定された円錐ゲージのひずみは、図1に示すように、エポキシ系接着剤の場合はシアノアクリレート系と比較して 1/5 以下と小さかった。すなわち、エポキシ系接着剤では被着部岩盤表面の実際のひずみに比べて測定されるひずみが小さくなる可能性があることが判明した。

したがって、エポキシ系接着剤を用いて円錐孔底ひずみ法を適用する場合、ひずみの測定感度が十分であるか否かを確認し、不十分な場合はその感度を求めて感度低下の影響を補正することが必要となると考えられた。

このため、実際の測定においては、埋設ひずみ法と同様に、ひずみ計が接着された状態でオーバーコアを回収し、回収コアを用いた三軸感度試験を行い、ひずみの測定感度を求めることとした。

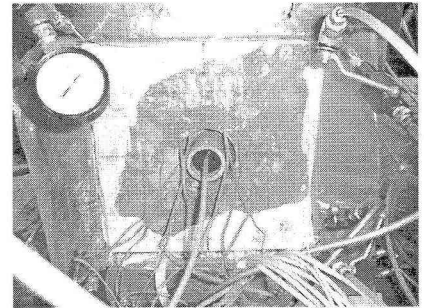


写真1 事前実験状況

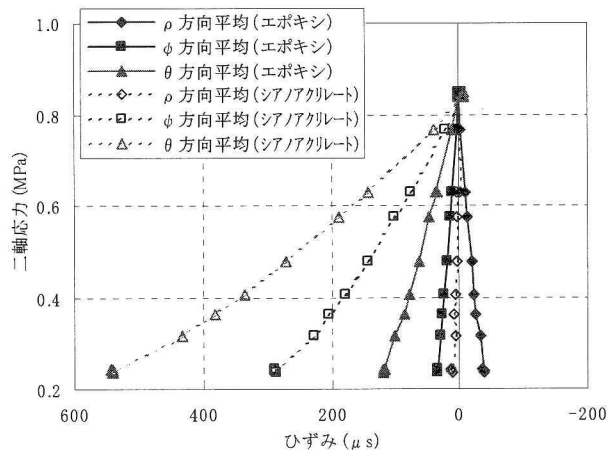


図1 事前実験における円錐ゲージの測定結果

(2) 円錐孔底ひずみ法の測定方法

円錐孔底ひずみ法²⁾の概要は以下のとおりである。まず、調査坑壁面から所定の深度までカットボーリングを行う。続いてその奥に円錐孔を削孔し、孔底観察用のボアホールカメラを用いて孔底の状況を確認する。

測定可能と判断できた場合は円錐孔底ひずみ計(写真2)を孔底に接着し、接着剤の硬化後にオーバーコアリングを行い、ひずみ計周囲の岩石が地圧から解放される時の変形をひずみ計によって測定する。得られた解放ひずみと室内一軸圧縮試験により求めたヤング率・ポアソン比から弾性論にもとづき地圧を算出する。

今回はひずみの測定感度を求めるため、図2、図3に示すように測定方法に改良を加えた。主な変更点は、下記のとおりである。

- ① 水のしみ出る孔底に確実にひずみ計を接着するために接着剤をエポキシ系のものに変更した。
- ② ひずみの測定感度が低下する可能性があるため、感度を求めるための現地三軸感度試験を実施した。
- ③ 三軸試験を実施するため、通常

76mmであるオーバーコアリング孔径を222mmに変更した。円錐孔底(φ76mm)はカットボーリング(φ222mm)孔底の応力の乱れた領域から離すため、孔底中央から約50cm奥に整形した。また、オーバーコアリング掘進長を大きくした。

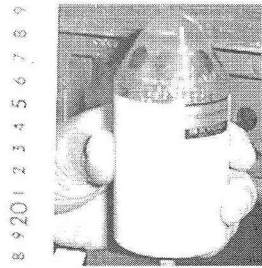


写真2 円錐孔底ひずみ計
(円錐ゲージ)

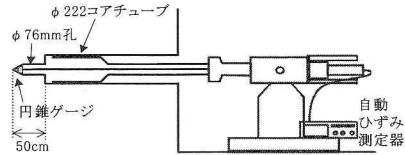


図3 オーバーコアリング概念図



図2 円錐孔底ひずみ法の測定の流れ

(3) 円錐孔底ひずみ法の解析方法

円錐孔底ひずみ法では、図4に示すように円錐孔底面の半径 r の同一円上に45°間隔で8つの測点を配し、各点でひずみを測定する。直交座標 (x, y, z) において応力テンソル $\{\sigma\}$ は以下のように表される。

$$\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{xy}\} \cdots (1)$$

円周方向の回転角 θ_j ($j=1, \cdots, 8$)における測点のひずみ $\{\epsilon_{Rj}\} = \{\epsilon_{R\rho j}, \epsilon_{R\phi j}, \epsilon_{R\theta j}\}^T$ は等方性岩盤(ヤング率 E)の場合、次式で与えられる。

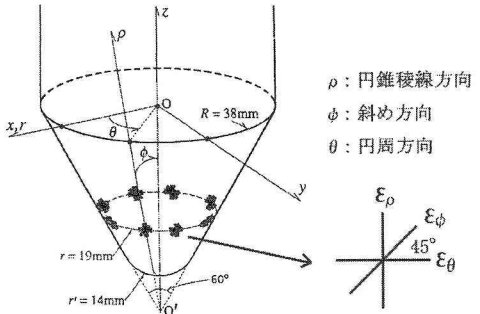


図4 円錐孔底面のひずみゲージ配置

$$\{\varepsilon_{Rj}\} = [A_j] \{\sigma\} / E \quad \cdots (2)$$

ここで、 $[A_j]$ は3×6成分のひずみ感度係数のマトリクスでポアソン比 ν と測点位置の関数である。

測定されるひずみ $\{\varepsilon_{Mj}\} = \{\varepsilon_{M\rho j}, \varepsilon_{M\phi j}, \varepsilon_{M\theta j}\}^T$ が感度低下の影響を受け、真のひずみ $\{\varepsilon_{Rj}\}$ に対して以下のように表すことができると考える。

$$\{\varepsilon_{Mj}\} = k_j \{\varepsilon_{Rj}\} \quad \cdots (3)$$

ここで、 k_j が感度低下の影響を表す係数であり、円周方向の回転角 θ_j ($j=1, \cdots, 8$)における測点ごとに感度の変化が異なると考える。一般に $0 < k_j \leq 1$ になると考えられる。式(2)および式(3)より、

$$[A_j] \{\sigma\} = E/k_j \cdot \{\varepsilon_{Mj}\} \quad \cdots (4)$$

三軸感度試験結果を用いて E/k_j を以下のように求める。

$$\frac{E}{k_j} = \frac{1}{3} \left(\frac{E_{T\rho j}}{E'_{c\rho}} + \frac{E_{T\psi j}}{E'_{c\psi}} + \frac{E_{T\theta j}}{E'_{c\theta}} \right) \quad \cdots (5)$$

ここで、 E_T (MPa)は三軸感度試験の応力-ひずみ曲線の傾きであり、 E'_c は ρ 、 ϕ 、 θ 各方向での三軸感度試験時の形状の影響を示す無次元係数でポアソン比により値が異なる。これを「封圧に対する感度係数」と呼ぶことにする。 E'_c を求めるため、回収したコアの三軸感度試験時の挙動を等方弾性条件の数値解析で計算した。各ポアソン比に対し、封圧と測点におけるひずみ(ε_{ρ} 、 ε_{ϕ} 、 ε_{θ})の関係を求め、単位ヤング率において単位ひずみを発生させるために必要な封圧を $E'_{c\rho}$ 、 $E'_{c\phi}$ 、 $E'_{c\theta}$ として求めた。ポアソン比は0.10、0.20、0.25、0.30、0.40の5通りについて数値解析を行い、表1に示す値となった。

$j=1, \cdots, 8$ に対する式(4)から、最小二乗法により正規化し応力の最確値を求める。なお、式(5)の E_T にはヤング率の影響も含まれているため、室内一軸圧縮試験で E を求める必要がない。

3. 測定結果

測定は、軽石質の凝灰岩が分布する土被り100m程度のトンネル内で図5に示す配置で実施した。円錐孔底ひずみ法での解放ひずみの測定結果の一例を図6に示す。また、三軸感度試験結果の一例を図7に示す。

解放ひずみの測定結果は応力解放時の典型的なひずみ挙動を示しており、問題となる動きは特に認められない。三軸感度試験でも概ね挙動は安定しているが、 ρ 方向の一部で引張となっている。 ρ 方向のひずみは数値解析ではわずかに圧縮となる。測定値での ρ 方向の平均的なひずみは圧縮を示しているため、引張ひずみが生じた原因は岩石の不均一性やゲージの接着状況のばらつきに起因しているものと考えられる。

ρ 、 ϕ 、 θ の3方向のひずみ値を比較すると、 θ 方向のひずみが最も大きく、 ϕ 方向、 ρ 方向の順となっている。これは数値解析で計算される傾向と一致しており、全般には良好なデータと判断できる。

なお、オーバーコアリングの掘進速度は、試験中の間隙水圧の変化を抑えるため、約1cm/minとした。

また、三軸感度試験では排水経路を確保するとともに、載荷速度は約0.03MPa/minとした。

これらの測定結果から感度を求め、応力解析を実施した。この時、式(8)における E として別途実施した一軸圧縮試験結果から求め

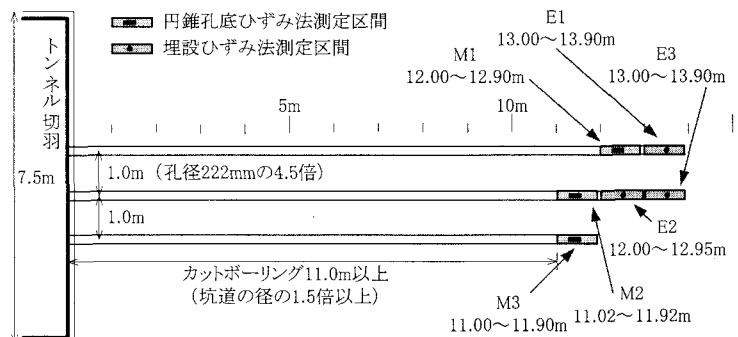


図5 測定配置図

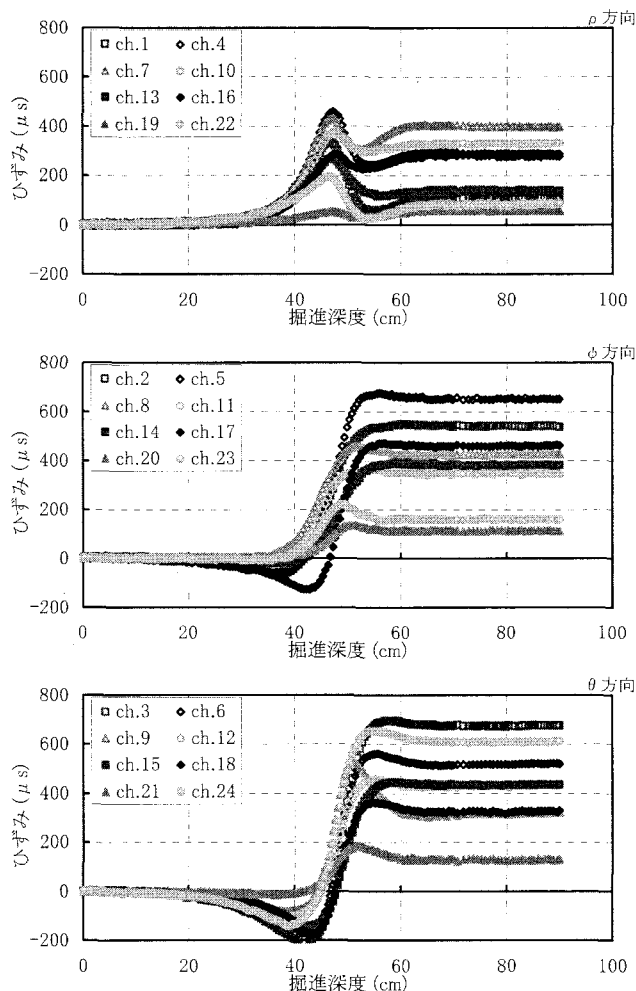


図6 解放ひずみ測定結果の一例

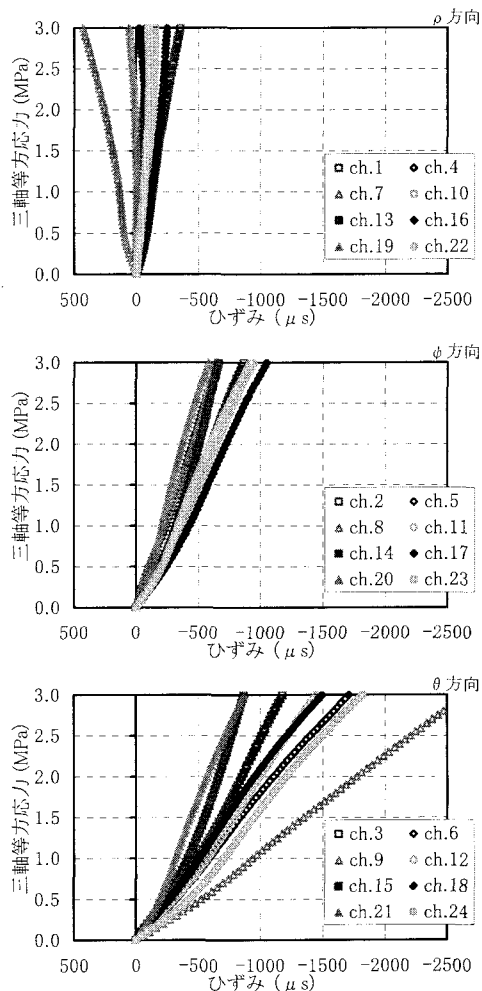


図7 三軸感度試験結果の一例

たヤング率を代入すると、感度低下の影響を表す k_f は $1/8 \sim 1/10$ 程度であった。

埋設ひずみ法と円錐孔底ひずみ法の応力解析結果をもとに整理した主応力方向のシュミットネット下半球投影図を図8に示す。また、図9には坑道に直角・平行な3断面内の主応力図を示す。なお、封圧に対する感度係数およびひずみ感度係数の決定に必要なポアソン比は、封圧に対する感度係数における ρ 、 ϕ 、 θ の3方向の比率が実際の三軸感度試験結果における ρ 、 ϕ 、 θ 3方向のひずみの比率の平均値に近かった $\nu = 0.40$ を採用した。

以上の方法で得られた円錐孔底ひずみ法の解析結果は、応力の大きさ、方向とも埋設ひずみ法の結果と良く一致した。

最大主応力と中間主応力の差は小さく $2.4 \sim 2.1 \text{ MPa}$ 程度

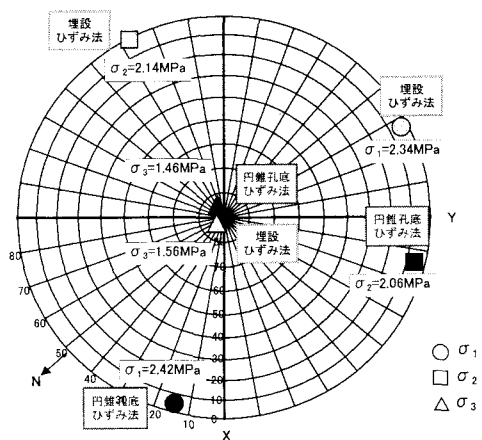


図8 主応力方向(シュミット下半球)

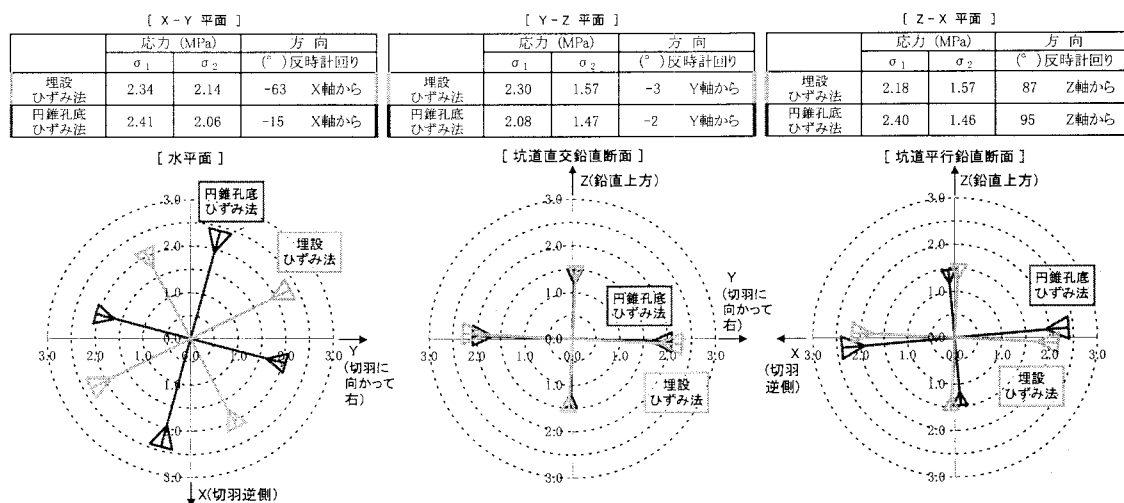


図9 面内主応力図

で、ともにほぼ水平面内である。なお、水平面内の応力値は等方的であり、若干の絶対値の違いにより方向が合わないものと考えられる。最小主応力はいずれも鉛直方向に近く 1.5MPa 程度である。

これらの結果から、間隙が水で飽和され孔底表面から浸出水がある軟岩地盤において、本手法を採用した円錐孔底ひずみ法による応力測定は適用可能であると考えられる。

4. まとめ

本実験では、間隙が水で飽和され孔底表面から浸出水がある軟岩地盤において、円錐孔底ひずみ法を適用するために、以下のように測定方法を変更した。

- ① ひずみ計接着に使用する接着剤をエポキシ系のものに変更した。
- ② ①の変更によりひずみの測定感度が低下したが、三軸感度試験を行って感度補正を含めた応力解析を実施した。

その結果、得られた応力解析結果は同時に実施した埋設ひずみ法とほぼ同等の結果となり、本手法は有効な方法であるとする。

ただし、感度低下が 1/8～1/10 と低くなっていることから、今後は感度を向上させることが可能な接着剤の選定や接着方法の改良、ひずみ計モールド材料の改善などの更なる検討が望まれる。

本手法では感度試験のために孔径を大きくしており、本来の円錐孔底ひずみ法における孔径が小さく作業性が良いという利点は発揮されない。しかし、軟岩を対象に実施する場合は大口径でも比較的掘進は容易であり、原位置での3次元応力測定法として本手法を用いることは有効な手段であると考えられる。

参考文献

- 1) Sakaguchi, K., Yoshida, H., Minami, M., Suzuki, Y., Hara, M. & Matsuki, K.: Development of downward compact conical-ended borehole overcoring technique for rock stress measurement, Proc. of the 3rd. Int. Symp. on Rock Stress, pp.211-216, 2003.
- 2) Sugawara, K. & Obara, Y.: Draft ISRM suggested method for in situ stress measurement using the compact conical-ended borehole overcoring (CCBO) technique, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 36(3), pp.307-322, 1999.