

三次元多段式応力測定システムの実用化への検討

板本 昌治^{1*}・桑原 和道²・丹野 剛男²・中山 芳樹³・水田 義明⁴・新 孝一⁵

¹正会員 株式会社 3D地科学研究所 東京事業所 技術部 (〒107-0052 東京都港区赤坂九丁目6-41)

²株式会社 3D地科学研究所 東京事業所 技術部

³正会員 工博 株式会社 3D地科学研究所 東京事業所 技術部

⁴正会員 崇城大学 工学部エコデザイン科 教授 (〒860-0082 熊本県熊本市池田四丁目22-1)

⁵正会員 財団法人 電力中央研究所 バックインド・研究センター (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

*E-mail: itamoto@3d-geosci.jp

従来より使用されている応力測定法は、一回の測定について1測点の応力状態を得る。筆者らは応力解放法の一手法である孔壁ひずみ法を利用した「三次元多段式応力測定システム」を考案し、一回のオーバーコアリング計測で複数点の三次元応力状態を把握できるものとした。また、オーバーコアリングにより回収したコアについて周圧載荷試験による感度補正を行うことで、更に高い測定精度を得ることができた。今後、このシステムの原位置への適用を目指し、この論文では実用化への更なる検討を行った。

Key Words : rock stress, three dimensional stress state, multiple stress measurement, over-coring, biaxial loading test, examining sensitivity

1. はじめに

我が国では地下発電所、放射性廃棄物の地層処分施設および天然ガスや石油の地下備蓄基地など地下空洞を積極的に利用する機会が近年増加している。このような地下空洞を安全かつ経済的に設計・施工するうえで計画地点の初期地圧を把握することは重要である。また、最近ではより経済的で効率的な支保工や覆工の新たな工法技術を開発するため、あるいは保守管理といった目的で施工後の空洞周辺の二次地圧や覆工自体に作用する応力を測定するなど、測定目的も多岐におよんできた。このような背景から、より安価・簡便・高精度な地圧の測定方法の開発が望まれている。初期・二次地圧を計測する方法としては多くの研究者により様々な方法が提案されているが、原位置試験に着目すると現在我が国で主に使用されている方法として電中研式埋設ひずみ法および円錐孔底ひずみ法などの応力解放法や水圧破碎法が挙げられる。また、構造物に作用する応力の測定法としては比較的安価で簡便な平面孔底法や円錐孔底法が良く利用されている。これらの手法は一回の測定で1点における二次元あるいは三次元応力状態が結果として得られることは周知のことである。筆者らは応力解放法の一手法である孔壁ひずみ法¹⁾を利用した「三次元多段式応力測定システム」

を考案した。この測定システムの大きな特徴として、一回のオーバーコアリング計測で複数点の三次元応力状態を孔軸方向に連続的に把握できることが挙げられる。また、オーバーコアリング終了後、回収したコアで周圧載荷試験を行うことにより感度補正がなされ、更に精度の高い測定結果が得られることも特徴のひとつと言える。以上の特徴について室内実験による検証を行った結果、測定システムの実用化に対する目処がたった²⁾。この論文ではさらに実用化に向けて同システムに検討を加えた。

2. 孔壁ひずみ法の原理

孔壁ひずみ法は1960年代から用いられている応力測定法で応力解放法の一つである。この方法はパイロットボーリングの孔壁面における解放ひずみをオーバーコアリングにより測定し、弾性論によって応力値を計算するものである。しかしながら、孔壁面にひずみゲージを貼付けること自体が比較的困難で、様々な貼付け手法が考案されている³⁾が現在国内ではあまり用いられていない方法である。

図-1は孔壁ひずみ法における座標と孔壁面に貼付けるゲージ配置を示したものである。用いるゲージはロゼッ

トゲージで、この時測定されるひずみは孔軸方向のひずみ ε_z 、これに直交する孔周方向のひずみ ε_θ およびこれらの方向と45度をなす方向のひずみ ε_t である。図に示すようにロゼットゲージを孔壁の同一円周上に3個配置し解放ひずみを測定することによって、原位置の三次元応力状態を計算することができる。ロゼットゲージは120°間隔で配置するものとした。

これらの位置でのひずみと応力はボーリング孔半径を a 、ゲージ長を ℓ とし $\omega = \ell/a$ とおきマトリックス表示すると式(1)で表される。

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_t \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 - \frac{2\sin\omega}{\omega} \cos 2\theta & -\frac{2\nu \sin\omega}{\omega} \cos 2\theta & (1-\nu)\left(\frac{\sin(\omega/\sqrt{2})}{\omega/\sqrt{2}} - \frac{\sin\omega}{\omega}\right) \cos 2\theta \\ 1 + \frac{2\sin\omega}{\omega} \cos 2\theta & \frac{2\nu \sin\omega}{\omega} \cos 2\theta & (1-\nu)\left(\frac{\sin(\omega/\sqrt{2})}{\omega/\sqrt{2}} - \frac{\sin\omega}{\omega}\right) \cos 2\theta \\ -\frac{4\sin\omega}{\omega} \sin 2\theta & -\frac{4\nu \sin\omega}{\omega} \sin 2\theta & 2(1-\nu)\left(\frac{\sin(\omega/\sqrt{2})}{\omega/\sqrt{2}} - \frac{\sin\omega}{\omega}\right) \sin 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)の3×6行列を単純に $[A]$ とおき簡略化すると

$$\{\varepsilon\} = 1/E [A] \cdot \{\sigma\} \quad (2)$$

と表される。式(2)を正規化するためには行列 $[A]$ の転置

行列 $[A]^T$ を左側から乗じ

$$E[A]^T \{\varepsilon\} = [A]^T [A] \{\sigma\} \quad (3)$$

とすればよい。従って、求める応力について整理すると

$$\{\sigma\} = E([A]^T [A])^{-1} \cdot [A]^T \{\varepsilon\} \quad (4)$$

となる。

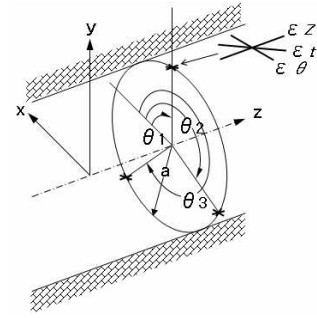


図-1 孔壁ひずみ法における座標とゲージ配置

3. システムの開発経緯

三次元多段式応力測定システムはボーリング孔軸方向について連続的に三次元応力状態を把握する目的で開発された。最初のステップとしてひずみゲージを孔壁面に簡便で着実に貼付ける方法を検討し、パッカー方式を採用した”多段式ひずみゲージ貼付け装置”(写真-1参照、以下単に貼付け装置という)を開発した。同貼付け装置の作動状況・実用性を確認するため、二軸载荷試験装置を用いた確認試験を行った。確認試験はモルタルブロック供試体に穿った径45mmの試験孔内に貼付け装置を用いてゲージを貼り付け、二軸载荷試験装置に設置し等圧で载荷し、このときの载荷圧とひずみとの関係を測定した。貼付け剤にはシアノアクリレート系の接着剤を使用



写真-1 多段式ひずみゲージ貼付け装置

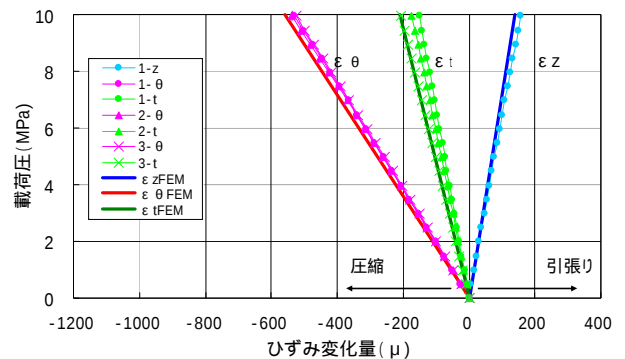


図-2 二軸载荷試験結果の一例

した。また、载荷圧とひずみとの関係が妥当かどうかを確かめるためFEMによる弾性解析を行い試験結果と比較した。その結果、測定結果と解析結果は整合的であった。一方、試験孔壁面の仕上がり精度の向上が課題として残

った．載荷圧とひずみの相関の一例を図-2に示した．この図にはFEMによる数値解析結果も併記した⁴⁾．

第2ステップとして実際に原位置で行うオーバーコアリングを室内試験として実施した．第1ステップで課題として残った試験孔壁面の仕上がり精度を改善するために、径46mmのダイヤモンドリーマーを用い孔壁面の研磨を行った．同様にモルタルブロック供試体を二軸載荷試験装置に設置し、試験孔内に貼付け装置を用いて接着剤で貼り付け、その後オーバーコアリングを行い応力を算出した．なお、モルタルブロック供試体の作成時に径50mmのテストピースを作製し一軸繰返載荷試験を行い、ヤング率とポアソン比を求め応力の算出に用いた．また、FEM解析によるオーバーコアリング時のひずみ挙動と比較し整合性を得た⁵⁾．しかしながら、応力の算出結果は実際の載荷圧に比較し大き目の値となった．室内オーバーコアリング試験結果の一例を図-3に示す．この図はオーバーコアリング時における供試体試験孔壁面のひずみ挙動を掘進深度でまとめたものである．

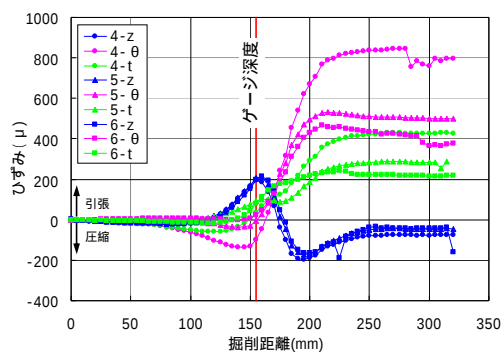


図-3 オーバーコアリングによるひずみ挙動一例

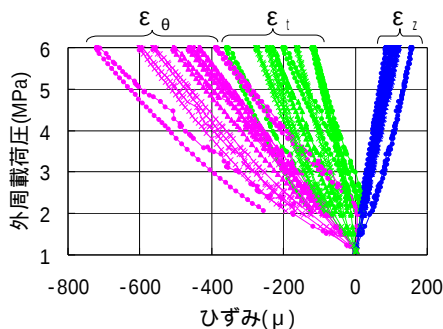


図-4 周圧載荷試験結果例

第3ステップとして、オーバーコアリングで回収したコアを周圧載荷試験装置により載荷し、その時の載荷圧とひずみとの相関関係から感度補正を行い、応力の再計算を行った．その結果、供試体中心部における応力状態は二軸載荷試験装置による載荷圧とほぼ一致した．ただし、孔軸方向での相対的な感度低下が課題として残った．周圧載荷試験結果の例を図-4に示す．この図はオーバーコアリング後回収したコアを用い周圧載荷試験を行った

時の孔壁面のひずみ挙動を示したものである．

この論文では以下に述べる2つの事項について検討する．まずひとつは、これまで行った試験で、孔壁面にゲージを貼り付けた後、ゲージが接着剤の接着力のみで壁面に付着した状態を保つことが非常に難しいことが分かった．このため、ゲージを貼り付けた後もパッカー圧を掛けた状態を保ち試験を行った．試験孔に内圧を加えると弾性変形が起きひずみは変化する．その状態を基準点として計測を行えば内圧の影響をキャンセルすることができると考える．ただし、この内圧は極力小さい方が計測に与える影響も少ないと考えられる．そこで今回、貼付け装置の適正圧力を明確にするための試験を行った．2つ目として、これまでの試験ではゲージの貼付けにはシアノアクリレート系の接着剤を用いていたが、パッカー圧がなくなるとゲージ接着状態が悪くなるゲージが多く観られることから、ある程度パッカー圧を作用させていた．このことから、接着剤を用いずパッカー圧のみでゲージを孔壁面に密着させた場合に壁面のひずみ変化を測定することが可能か否かを実験した．また、測定結果を評価するためにFEMを用いた数値解析結果との比較を行った．

4. 室内試験方法

試験は300mm四方で高さ320mmのモルタルブロックを作成しブロックの中心を通る長手方向に径46mmの試験孔を穿ち供試体とし、二軸載荷試験装置に設置した．

試験はまず、貼付け装置の適正貼付け圧を検討する目的で行った．貼付け装置にひずみゲージを設置し接着剤は塗布せずに、供試体試験孔内に挿入しパッカーを膨張させた．この時の貼付け装置のパッカー圧と貼り付けるひずみゲージのひずみ挙動を計測した．なお、ひずみゲージの貼付け位置は試験孔壁面の深度60mm、155mmおよび250mmとした．また、ひずみゲージの貼付けに際しては孔壁面が乾燥した状態と供試体孔内を水で満たし、孔壁面が湿潤した状態の2通りで行った．パッカー圧とひずみ挙動より適正貼付け圧を検討した．

次に、接着剤を用いず孔壁面のひずみが測定可能か否かを調べる試験を行った．前述試験同様に貼付け装置にひずみゲージを設置し供試体の試験孔内に挿入しパッカーを膨張させ適正貼付け圧に保った．ひずみゲージの貼付け位置は前試験と同様深度とした．供試体を二軸載荷試験装置で載荷しこの時の載荷圧と各ゲージのひずみ挙動を測定した．なお、ひずみゲージ貼付けに際しては、前試験と同様に孔壁面が乾燥した状態と湿潤した状態の2通りで行った．二軸載荷試験装置に設置したモルタル供試体は、300mm正方のフラットジャッキにより載荷し

た．フラットジャッキによる荷重範囲は供試体上面から300mmとし供試体の下側20mm幅は無荷重とした．荷重条件は等圧状態とし，荷重速度は1MPa/minで荷重圧は最大10MPaとした．図-5に二軸荷重試験における測定システムを図-6に貼付け装置の概要とゲージ貼付け模式図を示した．写真-2は二軸荷重試験装置にセットされたモルタル供試体の孔内に貼付け装置を挿入しひずみゲージを貼付けている状況を示したものである．

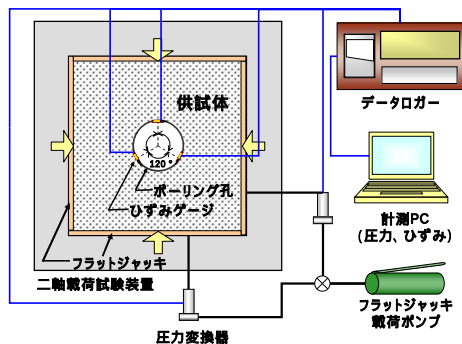


図-5 二軸荷重試験測定システム

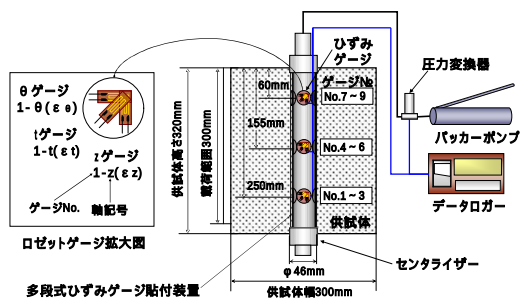


図-6 貼付け装置の概要とゲージ貼付け模式図

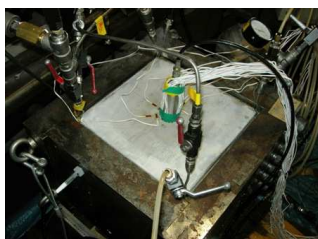
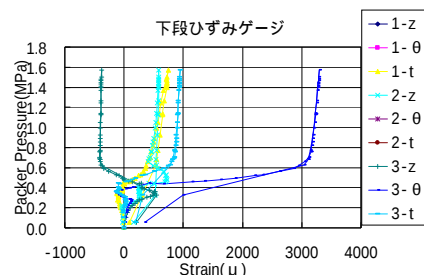
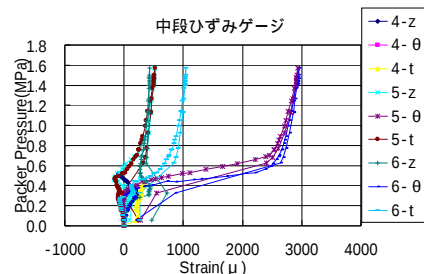
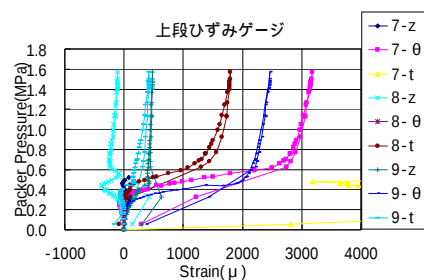


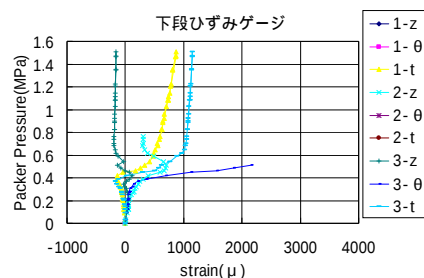
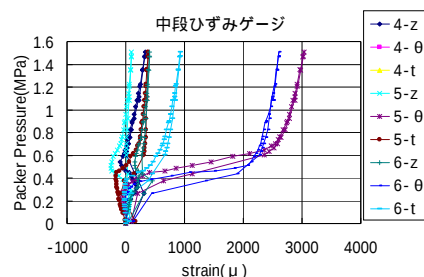
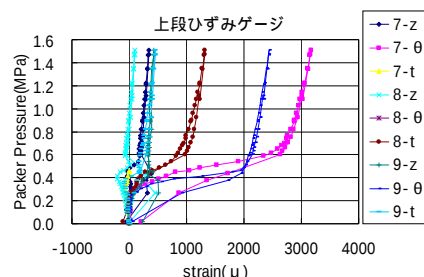
写真-2 二軸荷重試験装置と供試体

5. 適正貼付け圧の検討

適正貼付け圧の検討を行なうための試験結果を図-7に示す．このグラフは貼付け装置のパッカー圧と孔壁に貼り付けたゲージのひずみ挙動との相関を示したものである．上段が孔壁が乾燥した状態，下段が湿潤状態で貼り付けたものであり，それぞれ上段より貼付け深度60mm，155mmおよび250mmでのひずみ挙動を示している．いくつかのゲージで断線により計測不能となったが，それ以外ではひずみ挙動の形状は水の有無に関わらず大きな差異は認められない．また，ひずみ挙動はパッカー圧が



(1)孔壁面乾燥状態



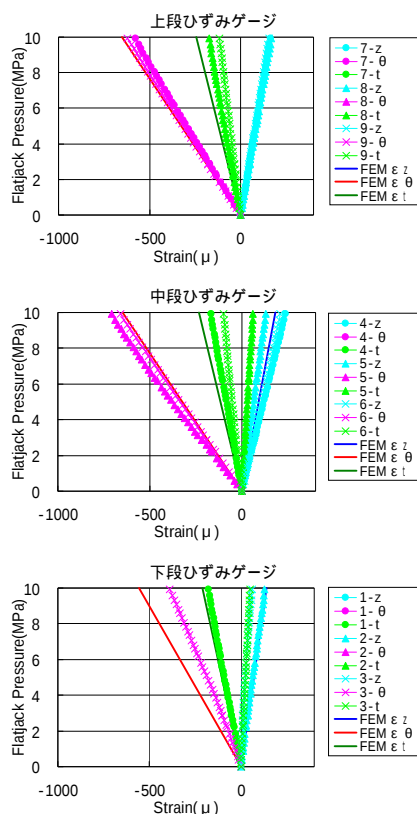
(2)孔壁面湿潤状態

図-7 貼付け装置パッカー圧と貼付けひずみゲージのひずみ挙動

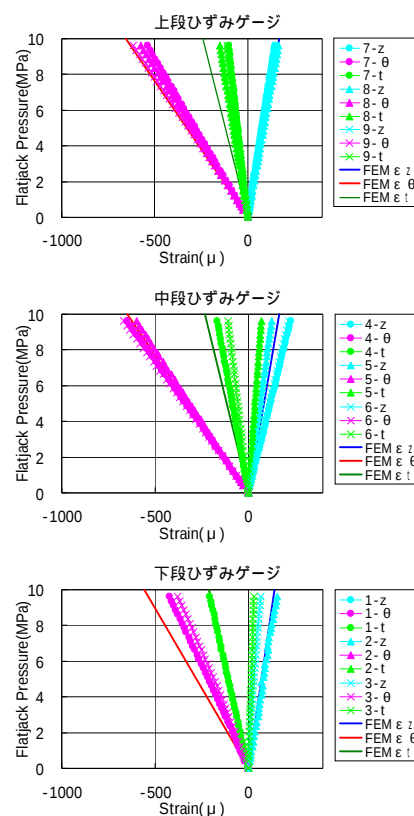
0.7MPaに至るまで大きな変化を示すが、0.7MPa以上では変化量が急激に小さくなり、0.8MPa以上では概ね線形的な挙動を示す。このことは、現在用いている貼付け装置のパッカーゴム反力が0.7MPa程度であり、0.8MPa程度で殆どのひずみゲージが孔壁にほぼ密着した状態となり、1.0MPa以上で全てのゲージが確実に孔壁面に密着し安定した状態になるものとする。従って、貼付け装置の適正貼付け圧としては1.0MPaと判断した。また、ゴム反力を0.7MPaとするとゲージの押付け圧は0.3MPaとなる。

6. 二軸载荷試験結果

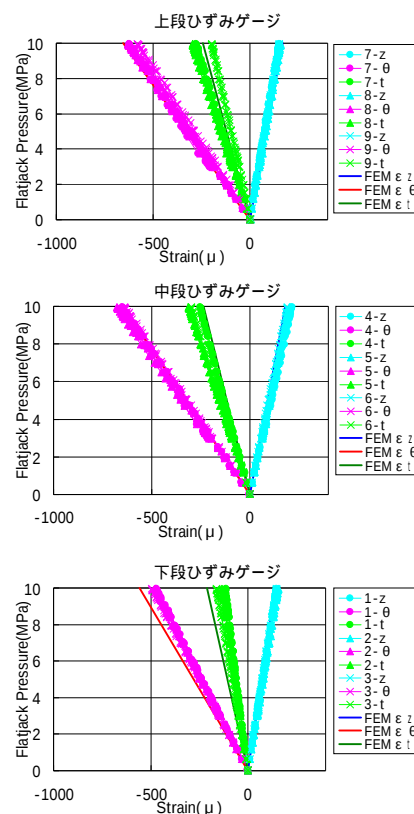
二軸载荷試験の結果を図-8に示した。図はフラットジャッキによる载荷圧と孔壁に貼付け装置で押し付けたゲージのひずみ変化量を図化したものである。(1)は孔壁面が乾燥した状態で接着剤未使用、(2)は湿潤状態で接着剤未使用、(3)は乾燥状態で接着剤を使用したもので、いずれもゲージの押付け圧は1MPaである。各図は上段からゲージの設置深度が60mm、155mmおよび250mmの結果である。これらの図にはFEMによる数値解析結果を直線で併記し比較した。FEMによる数値解析はモデルを簡略化し検討を行った。解析モデルは内径45mm、外径300mm、長さ320mmの弾性円筒回転体とした。物性値はモルタルブロック作成時に径50mm、長さ100mmのテストピースを作製し、室内において一軸繰返载荷試験を行



(1)孔壁面乾燥状態接着剤なし



(2)孔壁面湿潤状態接着剤なし



(3)孔壁面乾燥状態接着剤使用

図-8 二軸载荷時のひずみ挙動とFEM解析によるひずみ挙動との比較

いヤング率とポアソン比を求め用いた．求めた物性値を以下に示す．

ヤング率 $E=28\text{GPa}$

ポアソン比 $\nu=0.225$

接着剤を用いない場合，孔壁面が乾燥状態と湿潤状態とでの差異は殆どみられない．ただし，測定結果による圧力 - ひずみ曲線の傾きは解析結果による傾きに比べ若干勾配が急であったり，一部のゲージであまり変化しないものが認められる．これは壁面との接触が一樣でない部分が発生し応力に対するひずみの感度がやや低くなる傾向を示しているものと考えられる．しかしながら，接着剤を用いた場合と使用しなかった場合とでの決定的な相違は見出せない．

以上の結果から接着剤を用いずに，パッカー圧のみでひずみゲージを孔壁面に押し付けた場合でも，孔壁面のひずみ変化を捉えることは十分可能であり，それは孔内水位の有無に関わらないことが判明した．

7. まとめ

「三次元多段式応力測定システム」の実用化に向けて，貼付け装置の適正貼付け圧を検討するため，パッカー圧と貼付けゲージのひずみ挙動の関係を室内試験により調べた．試験の結果，適正パッカー圧は1MPaと判断した．さらに接着剤を塗らずに貼付け装置の押付け圧でひずみゲージを孔壁に固定し，二軸載荷試験を行った．その結果，孔内水位の有無に関わらず孔壁面のひずみ変化を十分捉えることが可能であることが明らかとなった．また，実験の過程で認められた貼付け装置と壁面との接触の不均一性やゲージの感度低下については，貼付け装置およびひずみゲージの改良やオーバーコアリング後回収したコアを用いた周圧載荷試験による感度補正で対応できると考えられることから，当該システムは十分に実用可能

であると言える．

8. 今後の課題

当該システムでは接着剤を用いることなく孔内水位下での測定が可能であることから，今後，例えば軟岩などの接着剤では接着しづらい岩石や地下水位下の深い深度での適用についての検討が必要であると考ええる．また，現在のところ市販の防水型ゲージを用いているが，今後の実用化に向けて耐久性が高くかつ低コストの専用ゲージの開発や貼付け装置の改良が必要であると考ええる．さらに国際基準の中での実用についても今後検討を進めてゆきたい．

参考文献

- 1) Y. Hiramatsu and Y. Oka: Determination of the stress in rock unaffected by boreholes or drifts, from measured strains or deformations *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 5, pp. 337-353, 1968 .
- 2) 板本昌治, 桑原和道, 丹野剛男, 中山芳樹, 水田義明, 新孝一: 三次元多段式応力測定システムの測定精度に関する検討, 資源素材学会秋季大会講演集()資源編, pp.81-82, 2007
- 3) E. R. Leeman: The determination of the complete state of stress in rock in a single borehole - Laboratory and underground measurements *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 5, pp. 31-56, 1968.
- 4) 板本昌治, 桑原和道, 丹野剛男, 中山芳樹, 水田義明: 孔壁ひずみ法を利用した連続三次元応力測定システムの開発, 第36回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp.425-430, 2006
- 5) 新孝一, 板本昌治, 桑原和道, 丹野剛男, 中山芳樹, 水田義明: 三次元連続応力測定システムによる室内オーバーコアリング試験, 第42回地盤工学会研究発表会平成19年度発表講演集 CD-ROM, 2007

A STUDY ON PRACTICAL USE OF MULTIPLE TREE DIMENSIONAL STRESS MEASUREMENT SYSTEM

Masaharu ITAMOTO, Kazumichi KUWABARA, Takeo TANNO,
Yoshiki NAKAYAMA, Yoshiaki MIZUTA and Kouichi SHIN

In order to determine the three-dimensional stress state in serial order, the authors developed the multiple measurement system for three-dimensional stress determination by over-coring the strains on the borehole wall. The serial stress measurements give the value of the stresses with high accuracy and bring the regional stress variations. Also, improving the precision of measurement is gotten if examining sensitivity with the core by over-coring. In this paper, we did further examination for the coming to practical use and we aim to apply this system to the field in future.