

浅部応力方位測定のためのレーザー式孔径変化測定装置の開発

木口 努^{1,*}・桑原保人¹・佐藤凡子²・横山幸也³

Tsutomu Kiguchi, Yasuto Kuwahara, Namiko Sato and Tatsuya Yokoyama (2010) Development of a new tool of laser scanner for borehole deformation to estimate stress orientation at shallow depth. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 61 (9/10), p. 337-350, 10 figs, 2 tables.

Abstract: A new sensor tool for borehole deformation measurement using a laser displacement sensor has been developed for an estimation of crustal stress orientation at shallow depths. The new method for estimation using this tool is based on following principles: 1) A borehole drilled in an anisotropic stress field is elliptically deformed by creep due to viscous property of rock around a borehole. 2) The orientation of maximum horizontal compressive stress is determined from a minor axis of an ellipse fitted to a deformed shape of borehole cross section. One of the advantages of this method to estimate stress orientation is a remarkably lower cost than existing methods, such as stress release and/or hydraulic fracturing methods. Radial displacements of the borehole wall during creep deformation are measured with the laser displacement sensor rotating continuously around the borehole axis. A total resolution of $0.7\mu\text{m}$ is achieved by stacking of several thousands raw data from the laser sensor. A field performance test confirms that the new tool can detect the creep deformation, about $10\mu\text{m}$ increasing of the borehole radius in a measurement of half a day just after drilling.

Keywords: stress orientation, laser displacement sensor, creep deformation, borehole deformation

要 旨

深度 20m 程度までの地殻応力方位を測定するために、レーザー変位計を用いて掘削直後のボーリング孔の孔径変化を連続測定する装置を開発した。本装置を用いた新たな応力場評価法は以下の原理・手法に基づいている。1) 異方的な応力がかかった岩盤に孔井を掘削した場合、岩石の持つ粘性の効果によって、掘削直後から孔井は異方的にクリープ変形をする。2) 孔井断面の異方的な変形に楕円を近似することにより、楕円の短軸方向から最大水平圧縮応力の方位を決定する。本手法によって応力方位を求める利点の一つは、応力解放法や水圧破砕法などの既存の手法に比べて非常に簡便で安価に測定できることである。クリープ変形中の孔井壁面の半径方向の変位は、孔軸を中心として連続的に回転するレーザー変位計により非接触で測定される。変位の分解能としては、レーザー変位計からの原データを 7500 回のスタッキングすることによって、約 $0.7\mu\text{m}$ を実現した。実際の掘削直後の孔井で本測定装置の野外作動試験を行った結果、約半日間の測定で

$10\mu\text{m}$ 程度孔径が大きくなるというクリープ変形を捉えることができ、孔井断面の相対変化量に楕円を近似することから最大水平圧縮応力方位が決定できることを示した。

1. はじめに

地殻にかかる応力の測定は、地球表層部の地殻や岩盤に関わる多くの分野で必要とされている。例えば、地震発生の予測を研究する分野では、地震発生域の断層に加わる応力を明らかにすることが重要な課題の一つである。また、地下空間を利用した土木建造物の設計においては、構造物近傍の初期地圧を把握することが必須である。

地殻応力を原位置測定する既存の手法として、応力解放法、水圧破砕法、ブレイクアウトを利用した方法などがある。応力解放法は、従来、孔口から 50m 程度の深さで適用されている。この手法は、所定の深度まで掘削した孔井の底に小口径の掘削を行いそこに計器を設置する。その後、大口径の掘削によるオーバー

¹活断層・地震研究センター (AIST, Geological Survey of Japan, Active Fault and Earthquake Research Center)

²地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute of Geology and Geoinformation)

³応用地質株式会社 (OYO corporation, 2-2-19 Daitakubo, Minami, Saitama, Saitama, 336-0015, Japan)

* Corresponding author: T. KIGUCHI, Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan. E-mail: kiguchi.t@aist.go.jp

コアリングを行い、周囲の岩盤から切り離されたときに解放されて生じる歪や変位を測定する。この測定値とコアの岩石試験より得られる弾性定数から成る観測方程式を解くことにより三次元の応力値が求められる。横山(2004)は、孔井内の歪計測法の違いにより、孔底ひずみ法(例えば、坂口ほか, 1992; Sugawara and Obara, 1999)、孔径変化法(例えば、Ghimire *et al.*, 2004)、孔壁ひずみ法(例えば、Leeman, 1968; Pine *et al.*, 1983)、埋設法(例えば、Kanagawa *et al.*, 1986; 山内ほか, 2005; 佐藤ほか, 2005)に分類している。最近では、山内ほか(2005)が開発した埋設型の歪計により深さ1000mまで測定した例が報告されている。水圧破碎法は、通常孔口から数km程度までの深さで適用される。この手法は、孔井内の測定深度区間を膨張パッカーで密閉し、水圧をかけることによって孔壁にメートルサイズの亀裂を作成する。亀裂は最大水平圧縮応力の方向に孔軸と平行に形成されるので、その方位を型どりパッカーやボアホールテレビュアーなどの孔壁イメージング検層で検出する。水圧をある基準に従い人為的に変化させることによって得られる亀裂閉口圧と亀裂再開口圧を用いて最大及び最小水平圧縮応力値を求めることができる(例えば、Bredehoeft *et al.*, 1976; Haimson, 1978; 塚原ほか, 1978)。ブレイクアウトを利用した方法は、水圧破碎法よりも深い深度で適用可能である。この手法は、掘削した孔井の近傍に周囲の岩盤からの圧縮応力が集中することにより孔壁が崩壊する現象であるブレイクアウトを利用する。ブレイクアウトは最小水平圧縮応力の方向に生じる。また、ブレイクアウトの形状から水平応力の比を推定する方法や、岩石強度が既知の場合にはブレイクアウトの発生の有無から水平応力の値の存在する範囲を推定する方法などが提案されている(Zoback *et al.*, 1985; Moos and Zoback, 1990)。ブレイクアウトの有無や方位、形状などの情報は孔壁イメージング検層により得ることができる。

しかし、これら既存の応力測定法はいずれも、原理的・技術的ないくつかの問題を抱えており、課題を解決すべく様々な提案がなされているのが現状である。例えば、応力解放法の各手法それぞれに、歪ゲージを孔壁に正しく固着する技術的課題や測定歪の独立性の評価などの課題がある。水圧破碎法に関しては、最大水平圧縮応力の値を求めるときに亀裂再開口圧を用いるが、亀裂再開口圧の測定や解釈に疑問があることが指摘されている(例えば、Lee and Haimson, 1989; Ito *et al.*, 1999; 水田, 2002)。これに対しては、現在、測定装置の加圧系の改良や水を使わない乾式破碎法の開発などが提案されている(例えば、Serata *et al.*, 1992; Ito *et al.*, 2001; 石田ほか, 2002)。ブレイクアウトを利用した方法により応力値を推定することは、原位置での

測定が困難な岩盤強度などの情報が必要であり、まだ信頼性が低い。また、ブレイクアウトが発生するか否かは、主応力値や地層強度、孔内水圧などの要因の兼ね合いにより決まり、すべての孔井でブレイクアウトが生じるわけではない。

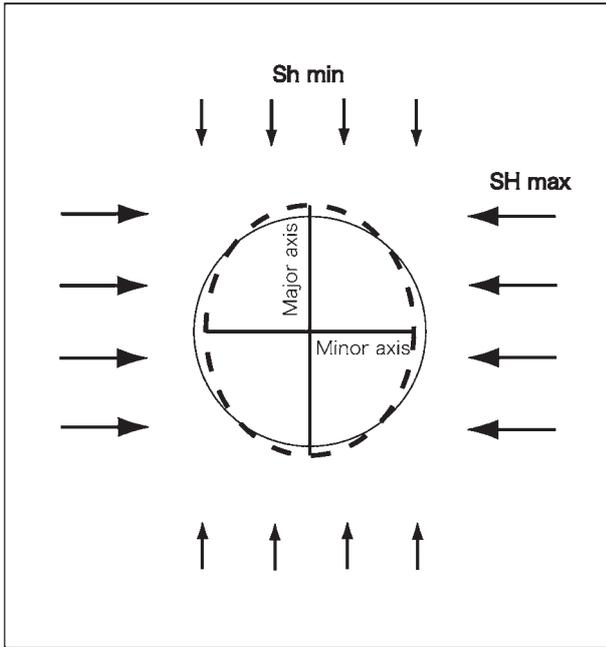
更に、既存の手法を適用する際に共通する課題は、孔井を掘削する費用以外にも非常に高額な測定費用が必要となることである。一般に、地殻には様々なスケールの亀裂や岩質の不均質が存在し地殻中の応力も不均一な状態になっていると推定できる。そのため、岩盤中の代表的な応力状態を推定するためには、出来るだけ多くの場所で測定する必要がある。しかし、高額な測定費用のために測定点数が限定されているのが現状である。

著者らは、既存の応力測定法のこれらの問題点を克服するため、浅部20m程度までの深度における測定を対象とする、新しい原理に基づく簡便で比較的安価な応力測定法とそのために必要な装置の開発を行っている。本論文では、測定法の原理、測定装置の特徴と設計・製作、野外の孔井で実施した作動試験の良好な結果などについて述べる。

2. 測定法の原理

今回開発した応力測定法の原理は、掘削直後の孔井断面の異方的なクリープ変形を直接測定することにより水平主応力の方位を決定することである。何らかの応力がかかった地殻に孔井を掘削した場合、岩石の持つ粘性の効果によって、掘削直後から孔井はクリープ変形をする。かかっている応力が異方的であれば、クリープ変形も異方的である。孔井断面で見ると、第1図に示すように、楕円状にクリープ変形する。この変形を直接測定することが出来れば、楕円形状の短軸方向を求めることによって、最大水平圧縮応力の方位を決定できる。

本手法は、孔井内埋設型三成分歪計の長期観測結果(桑原・伊藤, 1999)をもとに考案した。孔井内に設置された歪計は歪計が接する孔壁の変形を連続測定しており、3方向の歪成分の変化量を用いて水平主応力の方位が得られる。例えば、1995年兵庫県南部地震後に近畿地方に埋設した歪計の長期変化は、時定数数年程度の異方的クリープ変形と考えられる変形を示す(木口ほか, 2004)。測定されたクリープ変形から岩石の粘性係数や遠方の応力値・方位を評価するには、岩盤内のトンネル掘削の安定性の問題の解(例えば、Cristescu, 1989)を用いることが出来る。既存の応力測定法は孔井掘削後に、孔内に水圧を負荷したり、再度掘削(オーバーコアリング)したりする必要がある。今回提案する異方的変形の直接測定による応力方位決



第1図 異方的な応力場における掘削孔井のクリープ変形概念図。初期の孔井断面（実線円）は孔井周辺の岩石の粘性特性により楕円状（点線楕円）に変形する。楕円の短軸方向は最大水平圧縮応力（SHmax）の方位となる。

Fig. 1 Schematic diagram of creep deformation of a borehole in an anisotropic stress field. Initial cross section (solid circle) is deformed elliptically (dashed ellipse) due to a viscous property of rock around the borehole. A direction of a minor axis of the ellipse coincides with the maximum horizontal compressive stress (SHmax) orientation.

定法は、掘削後に直接孔井の変形を測定するものであり、既存の手法に比べてはるかに簡便であるといえる。上記の原理による応力測定法を実現するための測定装置の特徴は、第3章で説明するように、レーザー変位計を孔軸を中心に回転させ孔径を非接触で連続測定することである。Obara *et al.* (2004) と川辺ほか (2005) も同様な仕組みで孔径を高精度に測定する装置の開発を行っている。ただし、応力場評価の原理は次の点で本手法と異なっている。Obara *et al.* (2004) は、弾性変形から初期応力を求めるとしており、真円で掘削された初期断面と弾性変形後の断面との差を用いる。野外孔井では、弾性変形による真円からのずれを測定することは測定装置が傾斜して設置される可能性などの問題により難しい点があると考えられる。一方、我々のクリープ変形を用いる方法では掘削終了後に孔径の相対変化を測定するものとする。川辺ほか(2005)では、地圧の変化や岩盤の変形などのモニタリングを行うことを目的としているのに対して、我々の手法では初期応力の測定を目指している。孔径変化をとらえるという点で、測定の原理はObara *et al.* (2004) と川辺ほか(2005)の方法と同様であるが、本手法を実孔井に適用

するためには測定装置に次のような性能が要求される。
 1) 変位計は次章に説明するクリープ変形量の見積りから分解能 $0.1\mu\text{m}$ 程度を有する。2) 野外孔井では真円で掘削されない可能性や測定装置が傾斜して設置される可能性を考慮し、変位計には設計上の測定基準位置から数 mm 以上のずれでも測定できるような測定可能範囲を有する。3) 孔内水のある環境で1日以上安定した測定が出来る。Obara *et al.* (2004) と川辺ほか (2005) の装置はこれらの条件を満たすものではないため、新たに測定装置を開発する必要がある。

応力場を評価するためには、応力の絶対値と方位が得られれば完全であるが、測定対象によっては応力方位の情報だけでも十分な場合がある。例えば、桑原(2004)は、活断層周辺で応力方位を面的に測定することにより、断層面上の応力降下の割合を推定し、活断層の現在置かれている状態を指標として示すことを提案している。したがって、今回開発した応力測定法は、当面、応力の方位測定のみを対象としており、応力の絶対値測定は対象としない。

3. レーザー式孔径変化測定装置の設計と製作

孔井のクリープ変形を測定するために、ある深度において孔径を時間的に連続的高精度に測定する孔井内装置を作成することとした。今回の測定装置の開発により、既存の手法に比べて簡便な測定法を実現し、1測定点当りの測定費用を少なくすることを目指す。したがって測定装置を設計するにあたり、可能な限り浅部において短期間で測定する仕様とした。以下に本測定装置の各種仕様のうちの主なものとして、測定対象深度、センサ分解能、対象孔井の孔径、主たるハードウェア、ソフトウェアの設計、製作後の室内試験について述べる。

3.1 測定深度

孔井内で測定する場合、浅部で測定するほど孔井掘削費用を含めた測定費用は安価となる。しかし、地表に近い深度で応力方位を測定すると、浅部で測定することによるノイズの影響が大きくなり、応力方位の評価が困難となる。ノイズの要因の一つとして、年間の地表温度変化による熱応力がある。Sbar *et al.* (1984) はサンアドレアス断層の近くの深度 30m 孔井で、応力解放法により密な深度間隔で応力方位を測定した。その結果、深度 6m 以浅で測定した応力方位は熱応力による異方性を示したが、6m 以深の測定結果は近くの孔井で水圧破碎法により求められた深度 80~787m の応力方位と整合した。また、地表付近の高い水平応力値が深度 6m までに指数関数的に減衰する測定結果は、平面歪を仮定し側方膨張を制限した半無限等方弾性体

中を半無限等方向に熱が伝わる場合の下記の熱応力式を用いて、年間の地表温度変化の影響として説明できることを示した。

$$\sigma_T(z,t) = \frac{-\alpha EA e^{-Kz} \cos(\omega t - Kz)}{2(1-\nu)}$$

ここで、 $\sigma_T(z,t)$ ：深度と時間を関数とする水平方向の熱応力、 $K = (\omega/2k)^{1/2}$ 、 k ：熱拡散係数、 ω ：1年周期に対する角周波数 (2×10^{-7})、 A ：地表温度の年間変化量、 α ：熱膨張係数、 E ：ヤング率、 ν ：ポアソン比、 t ：年間地表最高温度を示す時からの経過時間である。

我々は、Sbar *et al.* (1984) による上式を用い、第1表に示す浅部花崗岩の物性と東京の気温に相当するパラメータを入力して、熱応力が及ぼす影響を計算した。その結果、深度3m以下では年間の地表温度変化による応力変化が $\pm 0.5\text{MPa}$ 以上となり熱応力の及ぼす影響は比較的大きいが、深度10mでその絶対値が静水圧に相当する $\pm 0.1\text{MPa}$ 以下の応力変化であり、深度15mでほぼ0となることがわかった。Sbar *et al.* (1984)の結果及び著者らのモデル計算から、深度10m程度以下で測定する場合には、熱応力による擾乱は小さいと見なすことが出来る。したがって、熱応力の影響が及ばないと考えられる深度10~20m程度で測定する仕様とした。

測定時間については、孔井掘削直後から12~24時間程度測定することを想定した。掘削直後から測定をする理由は、孔井のクリープ変形は掘削直後が最も大きく、時間が経過するに従い指数関数的に小さくなるからである。また、通常、夜間は掘削作業を行わないため、掘削作業が終了してから翌日の掘削作業を開始するまでの夜間を利用し約12~24時間の間に測定が行えれば、掘削作業を含めた現地での測定作業の効率は著しく向上する。

次に、深度10~20mにおいて掘削直後から12~24

第1表 年間の地表温度変化による熱応力計算に用いたパラメータ。

Table 1 Parameters for the calculation of induced thermal stress due to seasonal temperature variations at the earth surface.

Thermal diffusivity	1.0E-6 m ² /s
Seasonal temperature variation at earth surface	21.9 °C
Coefficient of thermal expansion	1.0E-5 K ⁻¹
Young's modulus	10 GPa
Poisson's ratio	0.3

時間で生じるクリープ変形を測定できるセンサの仕様を決定するために、孔径変化量を見積もった。木口ほか(2004)は、1995年兵庫県南部地震以降に産業技術総合研究所が近畿地方に埋設した孔井内三成分歪計の長期変化を異方的クリープ変形として標準線形モデルを適用した解析を行い、岩石の粘性係数や遠方応力などを推定した。ここで推定した粘性係数や弾性定数などの岩盤の定数を用い、最大水平圧縮応力と最小水平圧縮応力をそれぞれ0.47MPa、0.32MPa、すなわち深度300mにおいて推定された最大・最小水平圧縮応力の30分の1に相当する値として与えることにより、深度10mにおいて掘削直後24時間でおよそ 10^{-6} のクリープ歪が生じると推定した。このクリープ歪は直径10cmの孔井の場合0.1 μm の変化が生じることを意味する。

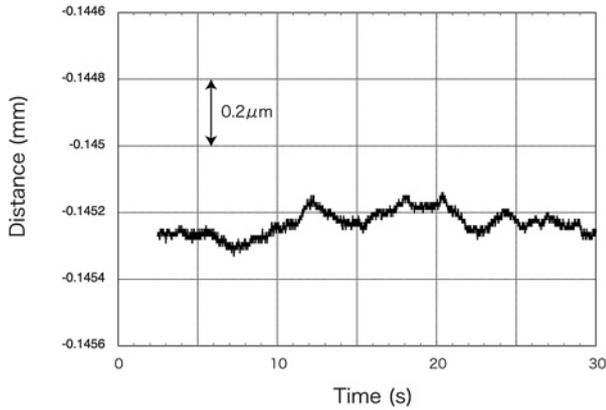
3.2 センサ分解能

0.1 μm 以下の分解能を有するセンサを選定するために、センサ単体の試験を実施した。用いたセンサは、非接触で距離を計測するセンサとして近年発展の著しいレーザー変位計((株)キーエンス社製、LK-030)である。レーザー変位計で一般に広く使われている距離を計測する原理は、半導体レーザーから投光されたレーザー光が測定対象物で反射し、反射光の一部をCCDで受光し、受光角度の変化から距離を測定するという三角測量を利用したものである。このLK-030を選んだ理由は、測定基準距離(空气中)が30mm、測定可能範囲が $\pm 5\text{mm}$ であることから、センサを組み込んだ装置と孔壁との距離を現実的な値に設計できるためである。

試験はすべて恒温室内で実施し、測定対象は花崗岩試料の掘削した内壁面(掘削径76mm)とした。また、水がある孔井内での測定を想定し、岩石試料とセンサ間に厚さ3mmの亚克力板や水(清水または懸濁水)がある場合、岩石試料を固定または連続微小変位させた場合や温度変化を与えた場合などの各種の条件で試験した。なお、センサから岩石試料までの距離は約30mmであり、清水の層は約8mmである。第2図に、岩石試料とセンサ間に亚克力板と清水があり、岩石試料とセンサを固定し、温度15°Cの条件で測定した結果を示す。これはサンプリング間隔1msで連続測定し、それを5000回スタック(移動平均)した結果である。30秒間測定でのゆらぎは0.1 μm 以内であり、このことから、このレーザー変位計で5000回以上のスタックを行うことにより、0.1 μm 以下の分解能が可能であることを確認した。

3.3 測定可能な孔径

測定用の孔井の掘削費用を安価とするためには、掘削孔井は可能な限り小口径であることが望ましい。レー



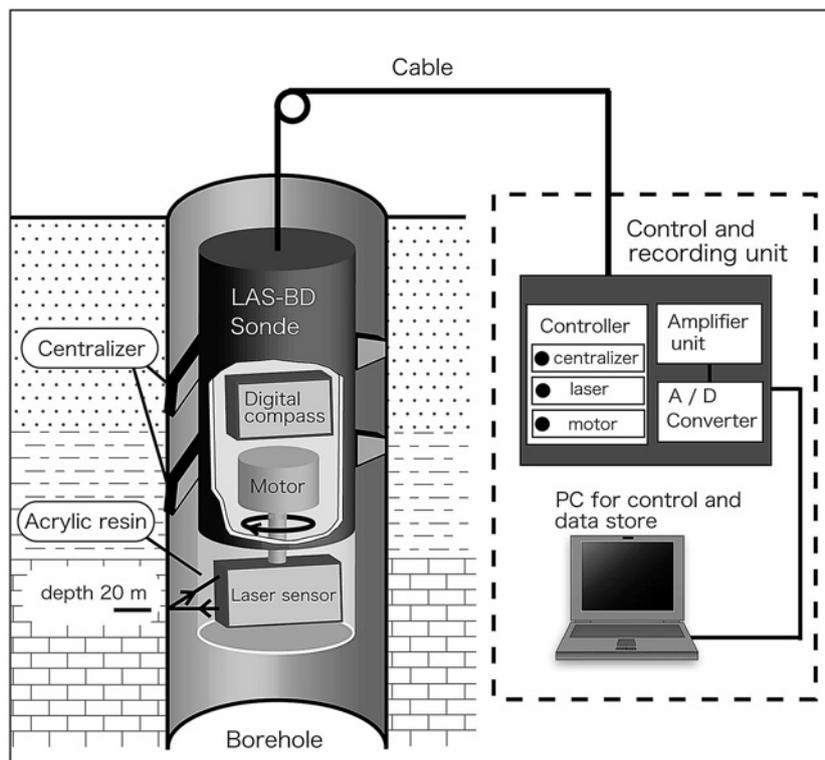
第2図 花崗岩を対象としたレーザー変位計の距離測定の結果。岩石とセンサー間に水と厚さ3mmの亚克力がある。サンプリング間隔1msで測定し、5000回スタック（移動平均）した。

Fig. 2 Result of distance measurement of laser displacement sensor for the granite. Water and an acrylic plate of a thickness of 3 mm were set between the rock and the sensor. The distances were measured at a sampling rate of 1 ms. The data shown here were 5000 times stacked ones.

レーザー変位計の大きさや測定可能な焦点距離，国内の標準的な掘削ビット径等の要因を考慮し，本測定装置を適用する孔井の掘削径を116mmまたは123mmとした。測定装置に組み込むレーザー変位計から掘削井孔壁までの距離がレーザー変位計の測定可能な範囲に入るように，レーザー光の焦点距離を調整するためのプリズムをレーザー発光部に取付けた。このプリズムを設計するには，センサを保護する亚克力や孔内水でレーザー光が屈折することにより焦点距離が長くなる影響も考慮した。また，孔内水がある場合と無い場合ではレーザー光の焦点距離が異なるため，レーザー変位計の位置を簡便に切り替えることにより，両方の場合において測定可能とした。

3.4 主なハードウェア仕様

測定装置の概念図を第3図に示す。孔井内に挿入する地中装置は，レーザー変位計とその回転機構，装置の固定機構，方位測定機構からなる。レーザー変位計を測定装置に組み込み，モータで連続回転させることにより，円周上360°にわたる孔径を連続的に測定しクリブ変形を計測する。レーザー光は装置外側の亚克力と孔内水（孔内水が無い場合は空気）を経て孔壁



第3図 レーザー式孔径変化測定装置の概念図。地中装置はレーザー変位計とその回転機構，方位測定機構，装置の固定機構からなる。測定データは地上装置とパソコンに転送される。

Fig. 3 System diagram of the new tool of the laser scanner for borehole deformation (LAS-BD). The downhole tool is composed of a laser sensor with rotary mechanism, a digital compass for a tool direction measurement and centralizers. The data is transferred to the control and recording unit and the PC for data store and tool control.

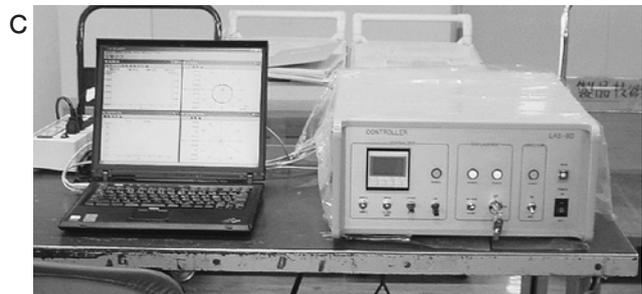
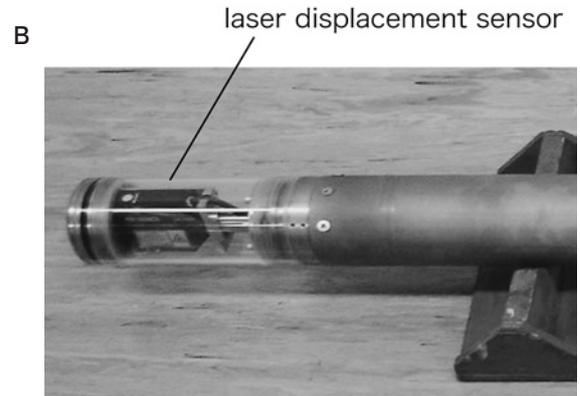
に照射される。レーザー変位計は1秒で1°連続的に回転し、1周するのに6分かかる。測定中は、装置の2ヶ所にあるモータ駆動アーム式のセントライザで孔壁に圧着し固定する。固着する荷重は1600Nで、測定装置の重量の約6倍に相当する。この値は、孔井内地震計が高品質データ取得のために必要とされる装置重量の2~3倍の固着力 (Hardage, 1983) よりも十分大きく、本セントライザの安定した固着により高精度な測定が実現できると考える。装置には小型軽量の方位計 (ハネウェル社製, HMR3300) を内蔵し、固着した測定装置の方位を精度1° (水平時) で計測する。この方位計には傾斜計が組み込まれており、測定装置が傾斜した場合には補正を行い、30°以内の傾斜であれば精度3°で方位を決定できる。地中装置はケーブルにより地上装置と接続している。地上装置は、レーザー変位計やセントライザなどを制御し測定データの増幅・A/D変換などを行う地中装置制御部と、測定データの保存などを行うパソコンから成る。地中装置の仕様を第2表にまとめる。レーザー変位計単体での分解能は約0.1μmであるが、後述する製作後の室内試験の結果から、センサ回転などの影響によりセンサを組み込んだ装置全体としての分解能は0.7μm程度である。テストデータ取得中の地中装置、地中装置下部のレーザー変位計、地上装置の各写真を第4図に示す。レーザー変位計の外側はアクリルで保護されている。

なお、測定中に温度変化があれば、岩石熱膨張特性と測定装置の温度特性により、孔径の測定値に影響があると予想される。しかし、温度による測定値の変化は孔軸に対して等方的であると近似できると考えられ、異方的なクリープ変形から求められる応力方位への影響は無視できると考えた。したがって、今回製作した測定装置は必要不可欠な機能だけを有した方が良く考え、装置には温度計を取付けていない。

第2表 地中装置の仕様.

Table 2 Specification of the downhole tool.

Tool length	1500 mm
Tool diameter	100 mm
Tool weight	25 kg
Applicable hole diameter	116 or 123 mm
Maximum depth	20 m
Rotation speed of sensor	1 degree / s
Total resolution	0.7 μm



第4図 測定装置の写真。A：三又で懸垂した地中装置。較正管に挿入しキャリブレーションを行なっている。B：地中装置下部のレーザー変位計。アクリルカバーで保護されている。C：地上装置とパソコン。

Fig. 4 Photographs of the developed tool. A: Downhole tool hung from a tripod. The bottom of the tool is inserted into a stainless steel pipe to calibrate the sensor. B: Laser displacement sensor in the bottom of the tool. The sensor is protected with the acrylic resin. C: A personal computer, a controller and a recording unit.

3.5 ソフトウェア仕様

測定データは円周上の2°間隔で取得され、サンプリング間隔200 μ sで最大7500回スタックする。パソコンに取り込まれたデータは、画面上にリアルタイムで孔井断面図や解析結果などを示す。孔井断面図は微小なクリープ変化を表示できるように真円からのずれを拡大して表示できる。また、異方的応力場により楕円状にクリープ変形した孔井断面図に楕円を近似することにより、断面図の長軸と短軸の長さや方位を求めることができる。短軸の方位が最大水平圧縮応力の方位である。楕円を近似する方法は、まず孔井断面楕円の重心を決定し、長軸と短軸の長さ及び長軸の方位を未知数とする最小二乗法を解くこととした。

楕円の近似計算は、基本的に測定値の絶対値を用いるのではなく、初期測定値からの相対的な変化量を用いた計算とする。これは、掘削の過程で掘削直後の孔井そのものが楕円になる可能性があることや、あるいは装置が孔井に対して傾斜設置される可能性がありその場合の初期測定による孔井断面は楕円となることを考慮したためである。例えば装置が5°傾斜した場合、測定される孔井断面は長軸が約0.4%短軸より長い楕円となる。この場合、クリープ変形の大きさがこの誤差以上とならない限り絶対値を用いた近似では変形を正しく評価できない。一方、相対変化量を用いれば、これらの誤差は無視できることになる。

3.6 室内試験

測定装置の製作後に、総合分解能及び感度検定、孔井変形の測定、耐圧試験の3種類の室内作動試験を実施し、設計上の性能を有することを確認した。以下に

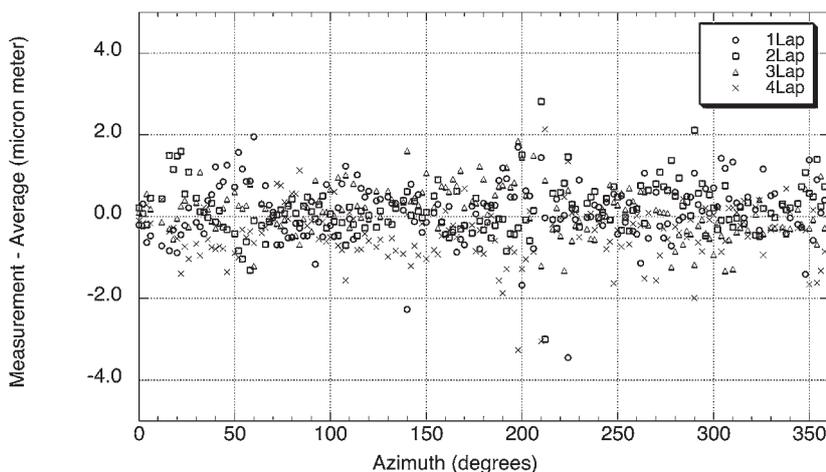
その概要を記す。

3.6.1 総合分解能及び感度検定試験

内径116mmの校正管を用意し、これを水中に設置してデータを取得した。この試験の4周分の孔径データを第5図に示す。これは2°ごとの測定箇所における4周分の平均値と各周の測定データとの差の分布である。4周分のデータ全体の標準偏差は0.7 μ mである。この測定データがセンサ単体の試験で得られた分解能の約0.1 μ mよりもばらつきが大きい原因として、センサを回転させることによるノイズや試験室内での防振対策が不十分なことによる振動ノイズが考えられる。また、各測定点で7500個のデータを自動的にスタックしているため、水中浮遊物などの影響による異常データを取り除いてからスタックすることにより精度の向上は見込める。次章で説明する野外実験においては、7500個のデータを細かく分割して異常データを取り除いてからスタックしている。また、感度検定としては内径115mm、116mm、117mmの3種類の校正管に測定装置を挿入し連続データを測定した。ステンレス製の校正管の内径の寸法誤差は5 μ m以内である。3種類の孔径の校正管におけるセンサ出力値の平均値と校正管の内径の関係から、測定値の校正式を求めた。なお、センサ等のドリフトの影響を除去するために、測定の前1時間前に電源を投入した。後述する野外作動試験においても、同様に1時間前の電源投入を行なった。

3.6.2 孔径変化の測定

孔井の変形に対応した孔径変化を測定し孔井にかかる圧力方位を求められることを確認するために、内径



第5図 内径116mmの校正管を用いた水中におけるレーザー変位計の4周分の測定結果。2°間隔で4周分の平均値と各周の測定値との差を示す。横軸はレーザー変位計の回転角度。

Fig. 5 The measured radius versus sensor rotation angles for 4 lap measurements of a stainless steel pipe with a diameter of 116 mm for a sensor calibration in a water environment. The vertical axis is a difference between the data at each lap and the average of four lap data. Data was obtained at two degrees interval.

約115mmの鋼管に測定装置を挿入し連続データを取得中に鋼管に荷重をかける変形試験を行った。鋼管の外周の1方向に万力により荷重をかけ、鋼管を1mm程度変形させた。測定した孔径データから得られる孔井断面図に楕円を近似して短軸方向を求めた結果は、鋼管に荷重をかけた方向に一致した。鋼管の変形量としてノギス（最小読み取り値0.01mm）で外径を測定した結果とセンサにより内径を測定した結果は、それぞれ1.30mmと1.255mmである。ノギスによる測定位置の誤差を考慮すると両者の結果はほぼ整合していると言え、鋼管の変形に対応した孔径変化を測定できたと判断した。

3.6.3 耐圧試験

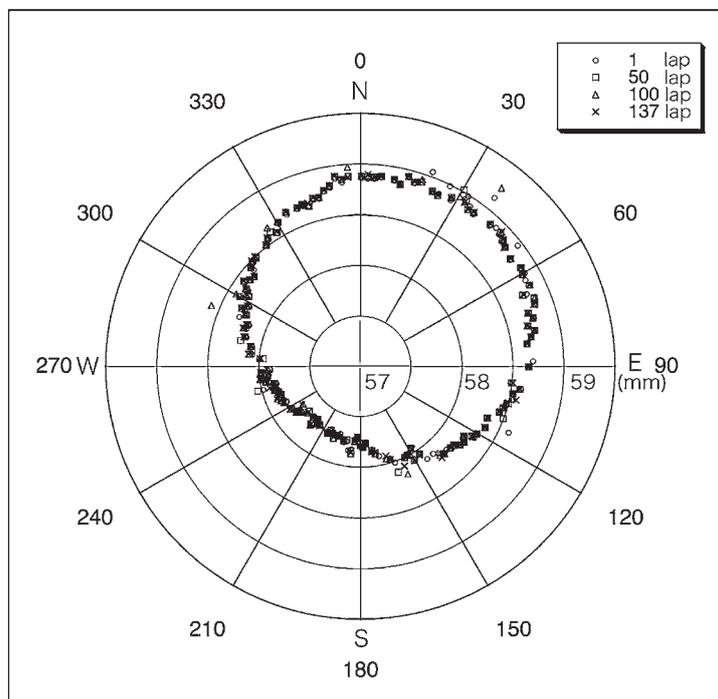
深度20mの孔井に適用できることを確認するために耐圧試験を行った。内径約116mmの鋼管に挿入した測定装置を実験孔井の水深20mに設置し、24時間連続の孔径データの測定を実施した。水圧下でのセントライザの開閉、方位計の測定などは正常であり、孔井からの引上後に破損や漏水は認められなかった。

4. 野外作動試験

本手法の原理で予測されるようなボーリング孔掘削

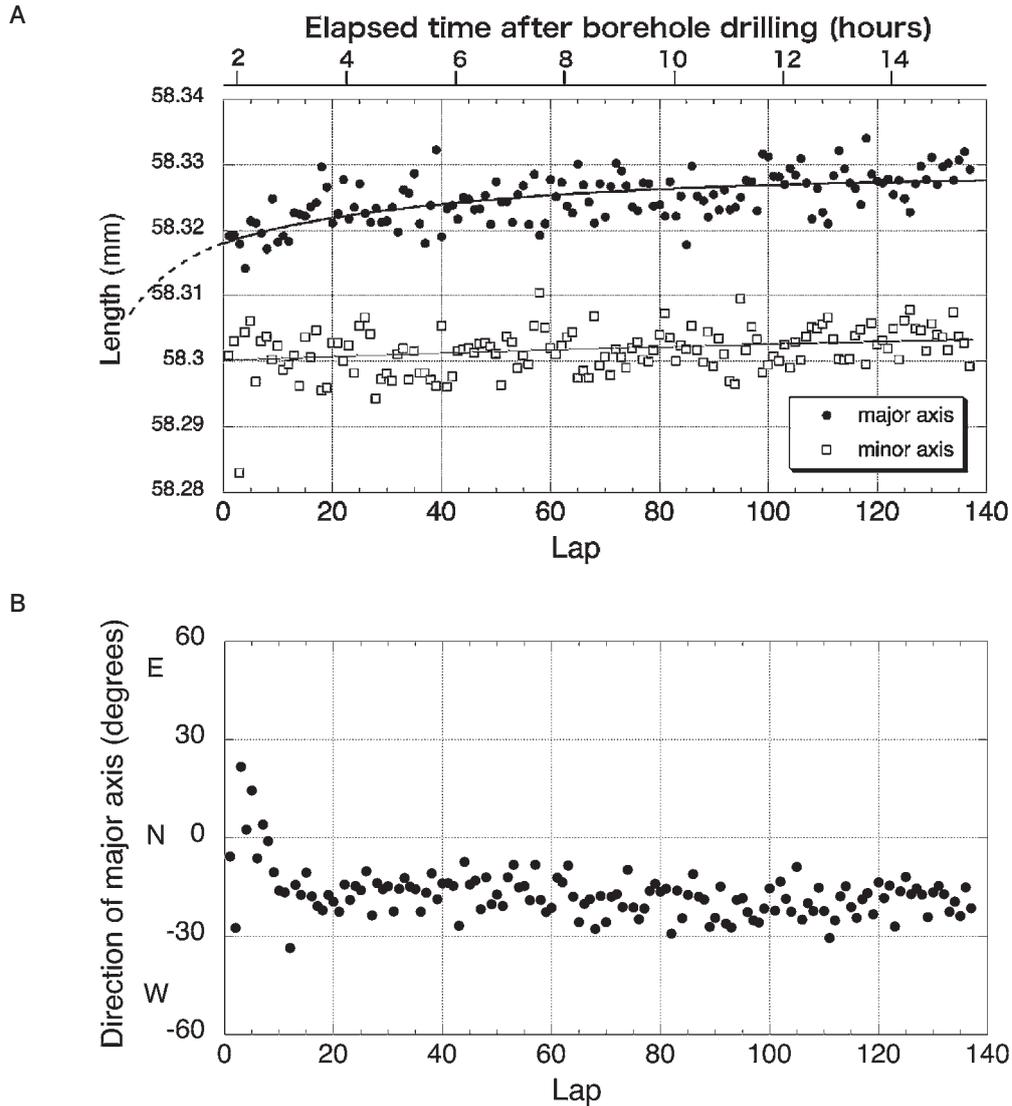
直後のクリープ変形が実際に起きるか、また開発した測定装置が野外の孔井で十分な精度で作動するかなどを確認することを目的として野外での作動試験を行った。試験はつくば市内の碎石場跡地において行い、実際に深度10m程度の孔井を掘削しその直後の孔径変化の連続測定を実施した。掘削径116mmで掘削した孔井から連続採取したコアの観察により、測定する孔井の深度3.3m以深は新鮮で硬質な花崗岩である。一部亀裂の多い深度を除き、明瞭な亀裂は1mあたり1~2個程度存在する。測定深度は、長さ50cm以上の棒状のコアが取れることを条件として深度8.1mと11.4mの2深度とした、これらの深度の前後数十cmの範囲にコア観察による亀裂は認められない。掘削と測定の作業手順は次の通りである。深度8.4mまで掘削した後、夕方から翌日の朝まで深度8.1mで孔径を測定した。その後更に深度11.8mまで掘進し、同じく夕方から翌朝まで深度11.4mで測定した。つまり、一つの孔井で二日間で二回測定を行った。実際の測定に際しては、当初期待した通りの連続的なデータ収録ができない問題があったが、解析に最低限必要なデータは取得できた。以下に、深度11.4mの測定と解析の結果を示す。

深度11.4mで夜間の約14時間で137周分の孔径データを取得した。測定データは円周上の2°間隔でそれぞれ7500個取得しスタックする予定であったが、実際に



第6図 深度11.4mで孔径を連続測定した野外作動試験の原記録の例。孔井は碎石場跡地で掘削した。1周、50周、100周、137周で測定した値を重ねて表示している。半径方向の目盛は0.5mm。測定装置は孔軸から約0.5mm偏心している。

Fig. 6 Original result of a field performance test for borehole shape measurement at a depth of 11.4 m. The borehole was drilled in a former stone quarry. The data of the first, the 50th, the 100th and the 137th lap are shown. Radial axis tick is a 0.5 mm interval. It is noted that the tool was decentered at about 0.5 mm.



第7図 A: 各週の孔井断面形状に近似した楕円の長軸と短軸の長さの時間変化。図中の黒丸と白四角は、それぞれ、長軸と短軸の長さを示す。長軸の長さが半日で約 $10\mu\text{m}$ 伸びる変化をとらえている。長軸及び短軸の長さ変化に近似した指数関数の曲線を示す。近似曲線の点線は、掘削直後に測定を開始した場合を想定した時の長軸の推定変化を示す。B: 長軸の方位の時間変化。方位は最初の20周までに急激に変化している。

Fig. 7 A: Time variations of the lengths of major and minor axes of an ellipse fitted to the borehole cross section at each lap. Closed circles and open squares denote lengths of major axis and of minor axis, respectively. It is confirmed that length of a major axis increased about ten μm in half a day. Two solid curves are the exponential functions fitted to the data of a major axis length and a minor one, respectively. The dashed curve is an extrapolation of the fitted curve for the major axis data, provided that the measurement were started just after borehole drilling. B: Time variation of the direction of the major axis in the figure A. The direction varies rapidly for the early 20 laps.

は7500個のうち20%程度のデータしか取得できなかった。ある周回のある測定方位では全くデータが取れずに欠測した場合もあった。このデータ取得の問題については第5章で検討する。孔径測定の前記録の一部を第6図に示す。ここでは1周、50周、100周、137周で測定したデータをそれぞれ重ねて表示している。各周回における 2° 間隔の測定データは、スタック後の値である。測定した孔径の範囲を拡大して表示するため、

半径方向の座標軸の値を57~59.5mmとしており、孔井断面図を直接示しているのではないことに注意されたい。また、孔井と測定装置の中心が一致していないので偏心した図となっている。4つの周回分のデータはこのスケールだとほぼ重なっていることがわかる。

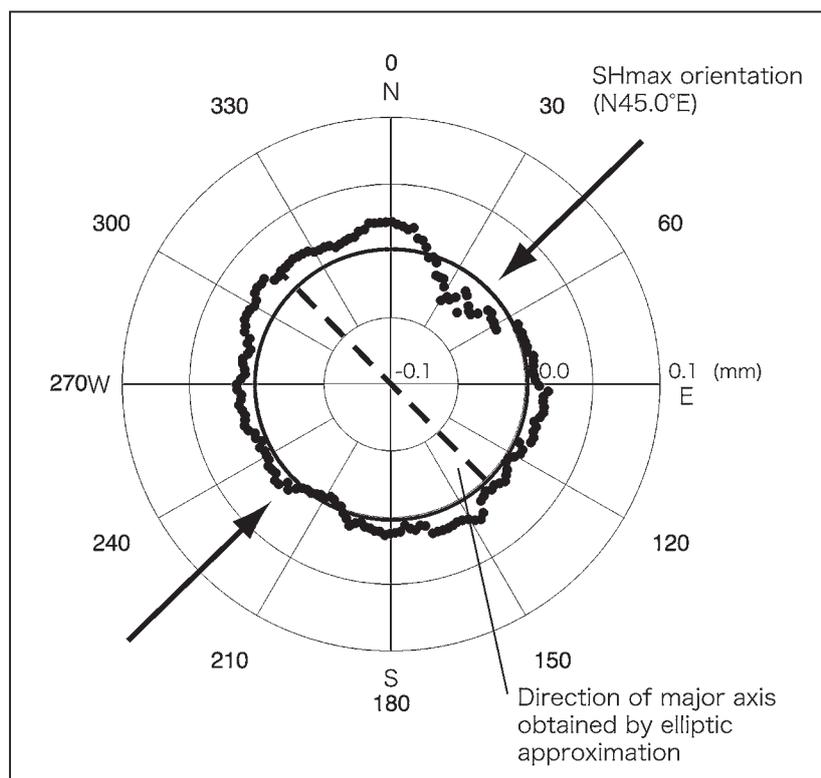
各週の孔径データから得られる孔井断面形状に楕円を近似することにより、断面図の長軸と短軸の長さ及び方位を求める。1周から137周までの各周で求めた

長軸と短軸の長さ、及び長軸の方位の時間変化をそれぞれ第7図A, Bに示す。第7図Aでは、長軸と短軸の長さはともに各周で大きさ $10\mu\text{m}$ 程度のばらつきはあるが、黒丸で示す長軸が長くなっていく時間変化を確かにとらえたと言える。長軸と短軸の長さにはばらつきがある原因の一つとして、データが安定して取得できず、スタックするデータ数が少ないことや欠測があることから楕円近似が安定して得られなかったことが考えられる。長軸の長さは1周から約20周目までに $5\mu\text{m}$ 程度大きくなり、それ以降137周までゆるやかに約 $5\mu\text{m}$ 増加していることがわかる。第7図Aに、長軸の変化に対応する指数関数の近似曲線を記入した。近似曲線の点線は、掘削後すぐに測定していた場合を想定したときの長軸の変化を推定したものである。短軸の長さについては、指数関数で近似すると、約14時間で約 $3\mu\text{m}$ の伸びを示す結果となるが、近似の誤差は $\pm 2\mu\text{m}$ と大きく、長軸に比べて短軸の伸張は明瞭でない。以上のように今回製作した測定装置を用いて高分解能で孔径を連続測定することによって初めて、本測定法の原理で予測した掘削直後の孔井の変形をとらえるこ

とができたと考える。

孔井断面の長軸の方位は第7図Bに示すように、約20周目までにおよそ $\text{N}30^\circ\text{E}$ から $\text{N}20^\circ\text{W}$ に回転し、それ以降は大きな変化を示していない。これは、第3章で説明したように装置の設置や孔井掘削の状態などによって、外部応力によるクリープ変形とは異なる要因で初期の孔井断面が楕円となることを示唆する。したがって、第7図Bで得られた長軸方位から直接応力方位を推定することはできない。応力方位を求めるためには次に示す相対変化を用いた解析が必要である。

測定位置における最大水平圧縮応力の方位を推定するために、掘削直後の孔径と、クリープ変形がある程度生じたと考えられる約14時間経過した後の孔径との相対変化量を用いて楕円の近似をする解析を行った。掘削直後の孔径データとして、最初の1から5周までの5周分の各平均値を用い、半日経過後のデータとして、最後の128から137周までの10周分の各平均値を用いた。平均値を求める際には、各周において、楕円近似を行って求めた孔井断面の重心を測定の原点に移動する補正を実施している。第8図に1~5周の各方

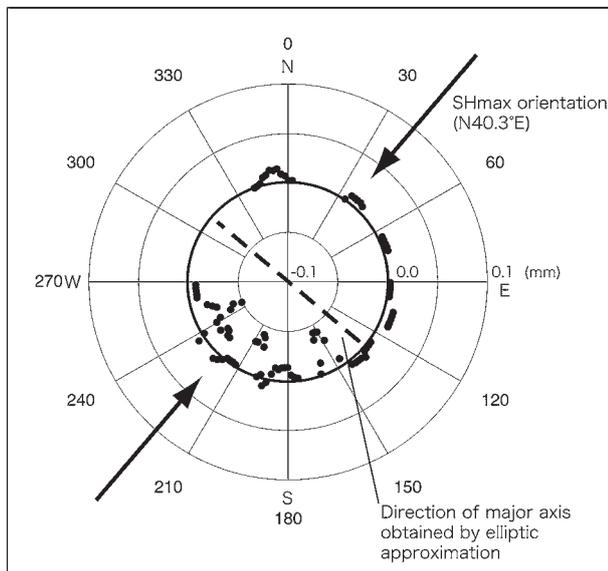


第8図 深度11.4mにおける孔径の相対変化。測定開始直後の1~5周の各方位毎の平均値と測定最後の128~137周の平均値との差から求めた。方位 20° 毎に移動平均をとっている。太線円周は孔径変化がゼロであることを意味する。相対変化量に楕円を近似して求めた長軸方向と直交する方向が最大水平圧縮応力(SHmax)の方位 $\text{N}45.0^\circ\text{E}$ である。

Fig. 8 The relative change of the borehole shape at 11.4 m in depth estimated from the difference between the averaged radius for the data from the first to the fifth lap and that from the 128th to the 137th lap. Moving average for 20° is applied to this data. The thick circle indicates the radius change of zero. The orientation of major axis is obtained by the elliptic approximation. The maximum horizontal compressive stress (SHmax) orientation can be determined as $\text{N}45.0^\circ\text{E}$.

位毎の平均値と128~137周の平均値との差による孔径の相対変化を示す。太線で示す円周は相対変化量がゼロであることを意味する。相対変化量に楕円を近似して求めた長軸方向とそれに直交する最大水平圧縮応力の方位を合わせて表示している。本解析によるこの場所の最大水平圧縮応力の方位はN45.0°Eである。第7図Bに示す約14時間経過後の孔井断面の長軸方位データから直接求められる短軸の方位は約N70°Eであり、相対変化量を用いて得られた水平圧縮応力の方位と有意に異なる。また、第7図Bに見られるように、1周及び2周目の長軸方位は、3周目以降の長軸方位がNEからNWへ徐々に変化する傾向と異なることがわかる。このため、孔径の相対変化量を求めるときに、1~5周の平均値の代わりに3~5周の平均値を掘削直後のデータとする解析も行った。この場合の最大水平圧縮応力の方位はN42.5°Eである。したがって、今回の応力方位の結果には3°程度の誤差を含むと考える。

深度8.1mで測定した結果は、深度11.4mの測定に比べて、取得できた孔径データ数が少なく、データが欠損となる場合が多いという問題があった。この原因は、7500個のスタック後のデータのみを保存するという測定パラメータの設定が不適切であったため、深度11.4mのデータ解析のように、スタック前のデータを吟味して解析を行うことが不可能となったからであ



第9図 深度8.1mにおける孔径の相対変化。測定パラメータの設定の問題のため、多くの孔径値が欠損している。方位10°毎に移動平均をとっている。楕円近似から求めたSHmaxの方位はN40.6°Eである。

Fig. 9 The same as Fig.8 for a depth of 8.1 m. Because of the problem of parameter setting in the measurement, borehole radius were not estimated at a large number of the azimuth points. Moving average for 10 degrees is applied to this data. SHmax orientation can be determined as N40.6°E by the elliptic approximation.

る。不完全ではあるが、深度8.1mで測定した限られた孔径データを用いて上記と同様に、孔径の相対変化量を用いた楕円の近似を行った。その結果を第9図に示す。ここで用いた孔径データは、最初の1から5周までの平均値と最後の95から104周までの平均値である。全周180点の測定方位のうち、50点について相対変化量を求めることができた。この相対変化量に楕円を近似することから求めた最大水平圧縮応力の方位はN40.3°Eである。約3m離れた2つの深度で、それぞれ応力方位を求めた結果はほぼ整合する。しかし、深度8.1mの結果については測定データ数が少なく、第9図に示す方位210°や240°付近の局所的な変化が楕円近似に与えた影響が大きいと推定できるので、深度8.1mの結果を深度11.4mの結果と直接比較できないと考えられる。

5. 議論

ここでは、これまでの開発で問題となった事項のうち、1) 孔内水のある野外孔井の測定におけるデータ取得の不安定さの原因と対策についてと、2) 野外作動試験で得られた孔井断面の変形の解釈について議論する。

まず、1) の原因については、次のように考えている。本孔井の孔口から3.4mまでは表土層の崩落を防ぐために鋼製ケーシングが設置してあり、ケーシングのある深度では安定してデータ取得が出来た。したがって、データ取得が不安定であったことの原因は測定対象物が岩石であることによると考えられる、つまり、水中の岩石の孔壁面におけるレーザー光の反射強度が弱くレーザー変位計が受光できなかったことだと考えられる。

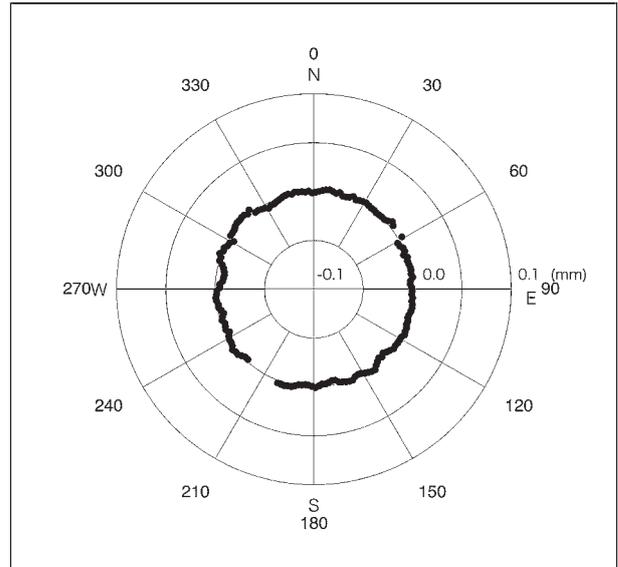
野外作動試験後、水中岩石を対象としたレーザー変位計の基本性能を評価するための室内試験を実施した(木口ほか, 2005a)。この性能試験から、a) レーザー変位計を岩石面に対して傾斜させることによりレーザー光が乱反射ではなく正反射となるような配置にすれば安定して測定できること、b) レーザーの発光エネルギーを大きくすれば安定して測定できること、c) レーザー光が水中を通過する距離を短くすると安定的なデータ取得に効果があること、d) 濁度計を用いてどの程度の懸濁水で測定が可能かなどを定量的に確認することが出来た。また、岩石の種類によってもデータ取得状況は変わることがわかった。安山岩や大理石に比べて花崗岩を対象とすると測定は不安定になる傾向がある。これは、花崗岩に含まれる各種鉱物によって反射したレーザー光の受光波形が変化するためだと思われる。今回の試験では、黒雲母の測定が最も不安定であり、石英でやや不安定、長石が安定して測定できた。この性能試験の結果を用いて、野外孔井内でより安定

して孔径の測定できるようにレーザー光の強度を上げたレーザー変位計（(株)キーエンス社製、LK-G30）を用いる等の測定装置の改良を行なった。

次に、2) については以下のように考える。孔井掘削後の約半日間で孔径を連続測定した野外作動試験の結果、孔井断面に近似した楕円の長軸は長くなり、短軸も長軸に比べると不明瞭であるがやや伸張となる傾向を示した。この変形の原因が応力だけとするならば、この場所の応力は引張り場となる。今回測定した場所は碎石場跡地であるから、碎石による荷重の除去によって岩盤の上昇や側方への膨張などが進行している可能性があり、これが引張り応力場につながるかもしれない。荷重除去による応力変化の定量的見積りも含めて、今回得られた断面形状変化の原因の考察を進める必要がある。

また、約半日の孔径の変化量が長軸方向で $10\mu\text{m}$ 程度であり、測定装置を設計する前に見積もった歪量よりもはるかに大きく変化した。岩石が変形する一因として温度変化があるが、線膨張係数 $5\sim 10\times 10^{-6}/\text{K}$ の花崗岩が $10\mu\text{m}$ 変形するためには 10°C 以上の温度変化が必要であり、今回の場合ありえないと考える。一方、歪量を見積もるときに使用した岩石の粘性係数や弾性定数は、深度 300m の歪計データをモデル計算して得た値である。今回の測定は 300m よりも浅い深度なので、その深度の岩石がよりクリープ変形しやすい物性を持つのであれば、当初の見積りよりも大きく変形する可能性はある。また、今回求めた最大水平圧縮応力の方位は $\text{N}45^\circ\text{E}$ であるが、測定場所が碎石場跡地であることによる上述したアイソスタシーの効果や孔井近傍に急峻な崖地形があり応力場に地形効果が及ぼす影響などを考慮すると、この方位は広域的な応力場を反映していない可能性がある。

前段落では第7図Aに示す長軸方向の半径が約 $10\mu\text{m}$ 変化する原因を応力として解釈したが、測定中に装置が孔井内で徐々に傾斜することにより、測定した孔径が見掛け上変化し孔井断面が楕円となることも考えられる。今回の測定では装置の傾斜に関する情報を直接取得していないため、装置に接する孔壁の変形などにより装置の傾斜が生じた可能性はある。直径 116mm の孔井で、装置の傾斜により測定される直径が見掛け上 $20\mu\text{m}$ （半径では $10\mu\text{m}$ ）長くなるためには、 1.1° 傾斜することが必要である。一方、直径 100mm 、長さ 150cm の測定装置が直径 116mm の孔井内で最大に傾斜する場合として、装置上端が孔壁に接しその反対側の装置下端が孔壁に接する状態を考える。このときの傾斜は 0.6° である。実際の測定時には、セントラライザの2つのアームと4つの背当（高さ 8mm ）の合計6点が装置を孔壁で支持しているため、孔壁に著しい不均質がない限り、上記のような装置の上端・下端



第10図 孔井掘削から1年後に深度 4.5m で測定した孔径の相対変化。1周目と10周目の差から求めた。方位 10° 毎に移動平均をとっている。方位 $53\sim 57^\circ$ 及び $203\sim 219^\circ$ に開口性の亀裂が存在する。掘削から1年が経過しているため測定中のクリープ変形は無視できると考えられる。

Fig. 10 The same as Fig.8 for the measurement one year after the drilling at 4.5m in depth. The relative change is estimated from the difference between the first and 10th lap. Moving average for 10 degrees is applied to this data. Borehole radius of the azimuth $53\sim 57$ and $203\sim 219$ degrees were not obtained because of the existence of an open fracture. The creep deformation of the borehole after one year the drilling is considered to be small enough to be neglected.

と孔壁の接触は生じ難い。よって、装置が傾斜できる範囲は 0.6° 以下と考えられる。装置が最大 0.6° 傾斜した場合でも、測定される孔井半径は見掛け上約 $3\mu\text{m}$ 伸張するだけである。したがって、今回測定された、半径が約 $10\mu\text{m}$ 伸張する変化は装置の傾斜では説明できないと言える。

更に、今回使用した孔井で野外試験から約1年後に本測定装置で10周分の連続測定を実施し、連続測定中の孔径データの総合的な安定性を確認した。この1周目と10周目で得られた孔径の相対変化量を第10図に示す。このデータは野外試験とは異なる深度 (4.5m) で測定しており、方位 $53^\circ\sim 57^\circ$ 及び $203^\circ\sim 219^\circ$ は開口性亀裂の存在により孔径値は得られていない。掘削から1年経過しているため測定中のクリープ変形は無視できると考えられる。測定された相対変化量から計算した孔径の変化は、長軸方向に $+0.5\mu\text{m}$ 、短軸方向に $-0.3\mu\text{m}$ である。この値は亀裂の存在からデータが不十分な中で得られたものあり、本測定装置によるこの孔井での装置の傾斜も含めた連続測定の安定性は悪くてもこの程度であると考えられる。一方、掘削直後の測

定による長軸の変化は20周目までに約 $5\mu\text{m}$ 変化しており、測定の安定性を考えても有意に大きな変化といえる。

このように今回の孔井での測定では、応力方位の測定に傾斜の影響はほとんどないと言えるが、このことは測定場所の地質などの条件によって変化することが考えられる。また、岩盤の粘性特性や地殻応力条件により、孔径変化量が今回の野外作動試験の測定結果よりも小さくなることもありうる。今後、様々な地質・応力の条件下での本測定装置の適用を想定すると、装置の傾斜変化の把握が必要となる。そのため、今回の測定後に測定装置の改良を行ない、孔径と同時に装置の傾斜変化を連続測定できるようにした。

本測定装置は、測定費用を軽減する目的から孔口から最大20m程度の深度で測定することを想定している。浅部で応力方位を測定するときに考慮すべきことは、浅部であることを原因とする様々なノイズ要因である。ノイズ要因の一つに熱応力があるが、この影響は既に第2章で検討しており深度10~20m程度で測定することにより取り除くことが出来る。その他の要因には、地表付近の風化作用による応力緩和、応力に対する地形効果、亀裂等による応力不均一などがあり、これらの影響をあらかじめ見積もって除くか、それらの影響の小さい場所で測定を行う必要がある。このノイズの検討は測定装置の開発と平行して進めており、例えば、木口ほか（2005b）は地形効果が応力方位測定に与える影響の一般的な指標を得るために、有限要素法を用いて単純な地形モデルとその重ね合わせから地形効果を定量的に評価し応力方位測定が可能な場所を示すことを試みている。

6. まとめ

新しい原理に基づく簡便な応力方位測定法を実用化するために、レーザー変位計を用いた孔径変化測定装置を開発した。本測定法の原理は、異方的な応力場に掘削した孔井が岩石の粘性効果により楕円状にクリープ変形する現象を直接測定し、最大水平圧縮応力方位を求めることである。従来の地殻応力測定法は、主に高額な測定費用の点から測定点数が限られる問題点があったが、本測定装置は深度10~20mの浅い孔井に適用し、孔井掘削作業を行わない夜間の半日間程度で測定することにより、従来に比べ格段に安価に測定できる利点がある。本手法を適用することにより、より多くの場所で測定することから不均一な岩盤の代表的な応力状態を精度よく把握することや、活断層周辺で面的に応力方位を測定し活断層の状態の指標を推定することなどが可能となると考える。本測定装置はレーザー変位計を回転することにより、円周上の 2° 間隔で

孔径を連続測定し、孔井断面の異方的変形を測定する。1測定点当り最大7500回のスタックを行うことにより $0.7\mu\text{m}$ 程度の分解能を有する。今回開発した装置が適用できるのは、掘削径116mmまたは123mmのおよそ20m以浅の孔井である。

掘削直後の孔井に本測定装置を適用する野外作動試験を行い、測定法の原理で予測した掘削直後の孔井の変形を約半日間の測定で確かにとらえることが出来たと考える。この孔井断面の約半日間の相対変化量に対し楕円を近似する解析を行うことから、最大水平圧縮応力の方位を決定した。

野外作動試験では、当初予定していた1測定点当りのデータ数のうち一部しか取得できない問題があった。このため、水中の岩石を対象としたレーザー変位計の測定性能を評価する試験を行い、その結果を基に、野外の孔井でより安定して測定できるように測定装置の改良を行なった。また、本測定法を応力方位が正確に測定された場所を実施し、測定法の検証を行う予定である。

謝辞：査読を通じて、活断層・地震研究センターの佐藤隆司博士には、大変貴重で有益な助言を頂き、本稿を改善することができました。ここに記して深く感謝致します。

文 献

- Brederhoeft, J. D., Wolff, R. G., Keys, W. S. and Shuter, E. (1976) Hydraulic fracturing to determine the regional in situ stress field, Piceance Basin, Colorado. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **87**, 250-258.
- Cristescu, N. (1989) *Rock Rheology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 336p.
- Ghimire, H. N., Ishijima, Y., Sugawara, T. and Nakama, S. (2004) Development of stress measuring system by overcoring method suitable for soft rocks. *資源と素材*, **121**, 32-38.
- Haimson, B. C. (1978) The hydrofracturing stress measuring method and recent field results. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, **15**, 167-178.
- Hardage, B. A. (1983) *Vertical Seismic Profiling: Principles*. Geophysical Press, London, 509p.
- 石田 毅・水田義明・中山芳樹・山下 貢・新宮和喜 (2002) 乾式一面破碎地圧測定法の理論的・実験的検討. *土木学会論文集*, **708**, 145-159.
- Ito, T., Evans, K., Kawai, K. and Hayashi, K. (1999) Hydraulic fracture reopening pressure and the estimation of maximum horizontal stress. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **36**, 811-826.

- Ito, T., Sato, A. and Hayashi, K. (2001) Laboratory and field verification of a new approach to stress measurements using a dilatometer tool. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **38**, 1173-1184.
- Kanagawa, T., Hibino, S., Ishida, T., Hayashi, M. and Kitahara, Y. (1986) In situ stress measurements in the Japanese island: Overcoring results from a multi-element gauge used at 23 sites. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, **23**, 29-39.
- 川辺金光・杉本文男・今井忠男 (2005) レーザ変位計を用いたボアホールメータの開発と適用性に関する室内検証試験. 資源と素材, **121**, 378-386.
- 木口 努・桑原保人・佐藤凡子 (2004) 掘削後の孔径変化を用いた応力場の推定. 物理探査学会第111回学術講演会講演論文集, 153-156.
- 木口 努・桑原保人・横山幸也・小川浩司・松田慎思・小澤健志 (2005a) 岩盤の掘削孔径直接測定のためのレーザ変位計性能試験. 地質調査総合センター研究資料集, **426**.
- 木口 努・佐藤凡子・桑原保人 (2005b) 浅部応力場評価のための問題点と解決 - 地形効果の定量化 -. 地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会予稿集, S044-P012.
- 桑原保人 (2004) 内陸活断層応力場の新しい評価手法の確立に向けて. 地質ニュース, **597**, 10-16.
- 桑原保人・伊藤久男 (1999) : 有馬-高槻-六甲断層帯近傍における 1995 年兵庫県南部地震以降の主歪変化. 地震予知連絡会会報, **62**, 432-433.
- Lee, M. Y. and Haimson, B. C. (1989) Statistical evaluation of hydraulic fracturing stress measurement parameters. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, **26**, 447-456.
- Leeman, E. R. (1968) The determination of the complete state of stress in rock in a single borehole-Laboratory and underground measurements. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **5**, 31-38.
- 水田義明 (2002) 孔内载荷による大深度岩盤応力測定の実状と問題点. 資源と素材, **118**, 361-368.
- Moos, D. and Zoback, M. D. (1990) Utilization of observations of well bore failure to constrain the orientation and magnitude of crustal stresses: Application to continental, Deep Sea Drilling Project, and Ocean Drilling Program boreholes. *J. Geophys. Res.*, **95**, 9305-9325.
- Obara, Y., Matsuyama, T., Taniguchi, D., and Kang, S. S. (2004) Cross-sectional Borehole Deformation Method (CBDM) for rock stress measurement. *Proceedings of the ISRM International Symposium 3rd ARMS*, 1141-1146.
- Pine, R. J., Tunbridge, L. W. and Kwakwa, K. (1983) In-situ stress measurement in the Carnmenellis granite. I. Overcoring tests at South Crofty mine at a depth of 790 m. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, **20**, 51-62.
- 坂口清敏・尾原祐三・中山智晴・菅原勝彦 (1992) 円錐孔底ひずみ法の応力測定精度. 資源と素材, **108**, 455-460.
- 佐藤稔紀・中間茂雄・加藤春實 (2005) 大深度ボーリング孔における応力解放法による初期応力測定. 第40回地盤工学研究発表会講演集, 973-974.
- Sbar, M. L., Richardson, R. M., Flaccus, C. and Engelder, T. (1984) Near-surface in situ stress, 1. Strain relaxation measurements along the San Andreas fault in southern California. *J. Geophys. Res.*, **89**, 9323-9332.
- Serata, S., Sakuma, S., Kikuchi, S. and Mizuta, Y. (1992) Double fracture method of in situ stress measurement in brittle rock. *Rock Mech. and Rock Eng.*, **25**, 89-108.
- Sugawara, K. and Obara, Y. (1999) 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**, 307-322.
- 塚原弘昭・池田隆司・佐竹 洋・大竹政和・高橋 博 (1978) 静岡県岡部町における水圧破壊法による地殻応力の測定. 地震, **31**, 415-433.
- 山内常生・石井 紘・浅井康広・大久保慎人・松本滋夫・吾妻瞬一 (2005) 深部ボアホール観測のための地殻活動総合観測装置および地殻応力測定装置の開発と興味ある成果例. 地震, **58**, 1-14.
- 横山幸也 (2004) 応力解放法の実状と課題. 月刊地球, **295**, 13-19.
- Zoback, M. D., Moos, D., Mastin, L. and Anderson, R. N. (1985) Well bore breakouts and in situ stress. *J. Geophys. Res.*, **90**, 5523-5530.

(受付: 2010年1月13日; 受理: 2010年3月26日)