

# 原位置の岩盤応力を評価するための コア変形法 (DCDA)

船戸明雄

深田地質研究所

## Diametrical Core Deformation Analysis (DCDA) Developed for In-situ Rock Stress Measurements

FUNATO Akio  
Fukada Geological Institute

要旨：コア変形法 (DCDA) は、応力解放に伴うコアの弾性的な変形から原位置の応力を評価する方法である。原位置岩盤においてボーリングによりコアが切り出される時、コアは原位置の圧縮応力から解放されて弾性的に膨張する。ボーリングが鉛直で圧縮応力場が異方的な場合、解放されたコアは水平最大主応力  $S_{Hmax}$  の方向により大きく、水平最小主応力  $S_{Hmin}$  の方向により小さく膨張してわずかに扁平になることが予想される。コア変形法は、このようなコアのわずかな変形量を精密に計測することにより差応力  $S_{Hmax} - S_{Hmin}$  と主応力の方向を評価する方法である。この方法の適用性を検証するため、300mm 角のブロック試料にフラットジャッキで一軸圧縮応力を加えた状態でくり抜いたコアの直径分布を測定し、载荷応力と载荷方向を評価した。その結果、コアは弾性変形理論で予測されるように変形しており、DCDA による応力評価は十分実用的であることを確認した。

キーワード：応力解放、扁平、岩石コア、弾性変形、最大主応力

Abstract: DCDA is a new method for evaluating the in-situ stress of rocks based on the elliptical deformation of boring cores with stress relief. When a rock core sample is carved out by drilling, it becomes free from in-situ stress, and the expansion should occur elastically. If the condition of in-situ stress is anisotropic, the core must expand elastically in an asymmetric shape. In order to confirm the applicability of DCDA, laboratory verifications were conducted using 300 mm cube samples. The sample was set into a steel frame where it was subject to an uniaxial compressive stress using a pair of flat jacks. While holding the applied stress, a core sample was drilled out and the cross sectional shape of the core was measured precisely. Then the differential stress  $S_{Hmax} - S_{Hmin}$  and azimuths of  $S_{Hmax}$  and  $S_{Hmin}$  can be determined from the measured shape data. From these results, the effectiveness of DCDA was confirmed.

Keywords: stress relief, elliptical, rock core, elastic deformation,  $S_{Hmax}$

1. はじめに

コア変形法は、ボーリングコアの断面形状のわずかな扁平性から原位置応力を評価する方法である (船戸・伊藤, 2013). 鉛直応力  $S_v$ , 水平面内の最大主応力  $S_{Hmax}$  及び最小応力  $S_{hmin}$  を受けて岩盤が圧縮されている状態を考える. この岩盤に生じている  $S_{Hmax}$  及び  $S_{hmin}$  方向の圧縮ひずみ  $\epsilon_{max}$  及び  $\epsilon_{min}$  は, 等方均質な線形弾性体を仮定すると以下のように表わされる.

$$\begin{aligned} \epsilon_{max} &= \frac{1}{E} \{S_{Hmax} - \nu(S_{hmin} + S_v)\} \\ \epsilon_{min} &= \frac{1}{E} \{S_{hmin} - \nu(S_{Hmax} + S_v)\} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで  $E$  及び  $\nu$  はそれぞれ岩盤のヤング率とポアソン比である. この圧縮状態において, 図 1a の上図のように岩盤の水平面に仮想的な円を描いた後, 同下図のように全ての応力を解放したとする. このとき, 元の圧縮ひずみの分だけ, それぞれの方向に岩盤が膨張する.  $S_{Hmax}$  は  $S_{hmin}$  よりも大きいので,  $\epsilon_{max}$  は  $\epsilon_{min}$  よりも大きい. したがって, 圧縮状態で描いた円は応力解放によって扁平な形状となり,  $S_{Hmax}$  の方向で最大直径  $d_{max}$ ,  $S_{hmin}$  の方向で最小直径  $d_{min}$  となる. ここで, 圧縮状態で描いた円の直径を  $d_0$  とすると,  $d_{max}$  及び  $d_{min}$  はそれぞれ次式で与えられる.

$$\begin{aligned} d_{max} &= d_0 \cdot (1 + \epsilon_{max}) \\ d_{min} &= d_0 \cdot (1 + \epsilon_{min}) \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 式の両辺の差をとると,

$$\begin{aligned} d_{max} - d_{min} &= d_0 (\epsilon_{max} - \epsilon_{min}) \\ &= d_0 \cdot \frac{1 + \nu}{E} \cdot (S_{Hmax} - S_{hmin}) \end{aligned} \quad (3)$$

となる.

一方, ボーリングコアはビットによって原位置の岩体から切り離される. その際, ビットは回転しているので, ビット先端に位置するコアの断面は真円のはずである. その後, 掘削が進むとコアは周囲の岩体から完全に切り離され, 図 1a に示した仮想円の変形と正に同じようにコアは膨張変形することになる (図 1b). すなわち, ビット先端に位置するコアの断面が直径  $d_0$  の真円とすれば, 完全に切り離された段階のコア断面は, 最大および最小直径がそれぞれ (2) 式で与えられる  $d_{max}$  及び  $d_{min}$  に等しい扁平な形状になるはずである. これがコア変形法の基本原理である.

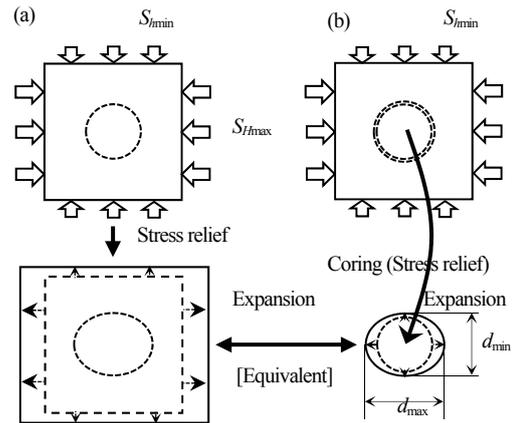


図1 (a) 異方的な応力が解放された場合の円形領域の変形;  
(b) 異方的な応力場から抜き取られたコアの変形

なお, 基準方位から  $d_{max}$  の方向までの角度を  $\alpha$  とすると, 任意の角度  $\theta$  方向のひずみ  $\epsilon_\theta$  は次式で与えられる.

$$\begin{aligned} \epsilon_\theta &= \frac{d_\theta - d_0}{d_0} \\ &= \epsilon_{max} \cos^2(\theta - \alpha) + \epsilon_{min} \sin^2(\theta - \alpha) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで  $d_\theta$  は  $\theta$  方向の直径である. 上式に (2) 式を変形して代入すると次式を得る.

$$d_{\theta} = d_{\max} \cos^2(\theta - \alpha) + d_{\min} \sin^2(\theta - \alpha) \\ = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{2} + \frac{d_{\max} - d_{\min}}{2} \cos 2(\theta - \alpha) \quad (5)$$

これがコアの直径分布を表す理論式となる。上式にも表されているとおり、当然ながらコアの直径分布は周期  $\pi$  の周期関数となる。

## 2. 開発の経緯

著者は大学卒業後 1977 年に応用地質株式会社に入社し、最初の 5 年間は関西地方で土質地盤を対象とする調査業務に携わってきた。当時は高度経済成長時代で会社の業績は指数関数的に上昇していた。調査担当者は、いくつもの業務を同時に担当し、工期に追われて報告書を仕上げるのが日常となっていた。当時（現在でもあまり変わっていないと思われるが）、土質地盤の設計は N 値万能主義であり、N 値を求めるための標準貫入試験だけのボーリング調査が多くなされていた。重要構造物を対象とする調査では、孔内載荷試験や透水試験、粘性土層の室内試験などが実施されたが、担当者は自らそれらの試験を行うことはなく、上がってきたデータを整理し報告書にまとめる単調な日々を送っていた。

転機は 5 年目にやってきた。2 月のある日、担当していた海上ボーリングの檣が転倒しその処理に憔悴して会社に戻った夜、転勤を言い渡された。4 月、浦和にあった研究所の岩盤物性部へ配属になった。そこでは地圧が重要なテーマとなっており、電中研と共同で AE 試験と OC 測定を開発したばかりであった。文献レビューも行われ、パイロット孔に充填したエポキシをオーバーコアリングして光弾性装置でひずみを検出するアイデアの実現性を検討したこ

ともあった。10 名ほどの部員の中で 30 歳前の著者が上から 2, 3 番目の若い組織であった。何かの折、ボーリングコアの直径を精度よく測定できれば応力に関する情報を得ることができるのではないかというアイデアが出されたが、夢物語として流されていった。

その後のバブル時代から兵庫県南部地震後の復興期に至るまで、会社の業績アップとともに業務に忙殺されていたが、1997 年をピークに業績が下降線をたどり始めた頃から新たな開発課題を模索し始めた。その頃、たまたま手にした

「Rock Stress and Its Measurements」がきっかけで ASR 法や超音波法などコア法による応力評価に取り組み始めた。しかし、経費削減が叫ばれる中、新たな設備を導入することは困難であり、手持ちの設備で後追いの実験を行っても得られる成果は多くはなかった。

そんな折、2003 年に東大地震研で開催された「地殻絶対応力測定法に関する研究集会」に参加した。応力測定に関して理学屋と工学屋が一堂に会した初めての集会で、測定対象深度が一桁異なるため議論がかみ合わないこともあったが終日にわたって熱っぽい議論が交わされた。その熱に浮かされて自分もこの中に加わっていきたいという思いを強く持った。その頃関係していた業務でポアホールテレビュアー (BHTV) のデータを見る機会があり、超音波の往復走時から孔径変化を求めることができることを知った。精密な測定を行えば孔径変化によって原位置応力の情報を得ることができると考えたが、BHTV にはそこまでの精度がないことがわかって落胆した。その議論の中で、それなら芯のコアを使えばどうかと思い至り、手元にあった一軸圧縮試験用の供試体の直径をノギスで測ってみた。45° 毎に測定した図 2 の直径分布には有意な傾向があるようにも見える

が、この程度の差は測定誤差かコアのわずかな凹凸によって生じるレベルであり、原位置応に結び付けるには無理があるようにも思われた。

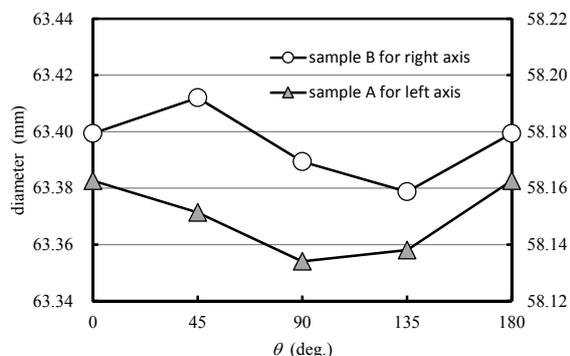


図2 ノギスによる直径分布

翌年の「地殻応力研究集会」は2日間にわたって開催され、多くの研究発表が行われた。その中で、レーザーによるコアの非弾性変形を測定する方法が紹介された(川方, 2004)。この方法は、鉛直に立てたコアを回転させながらレーザーを照射してコアの半径の経時変化を計測することを目的としていたが、回転軸のブレなどの問題があり装置は未完成であった。この発表に刺激を受けて、コア変形法の開発に本格的に取り組むことになった。

### 3. 測定装置

差応力 ( $S_{Hmax} - S_{Hmin}$ ) が 10MPa, ヤング率  $E$  が 30GPa, ポアソン比  $\nu$  が 0.2 の岩盤から、直径  $d$  が 50mm のコアを回収した場合を想定すると、そのコアに生じる直径の差 ( $d_{max} - d_{min}$ ) は式 (3) 式から 0.02mm となる。このわずかな差をノギスで検出するのはほとんど不可能であるが、精密な測定器を用いれば検出できる可能性がある。そこで、(株)キーエンスのレーザー寸法測定器 LS-3060 を借用して深部から採取したボ

ーリングコアの直径分布を測定してみた(図3, 船戸・陳, 2004)。それぞれのコアについて、円周方向には 10° 間隔でコア軸方向には 5cm 間隔で 5 断面の測定を行った。各断面の直径分布にはばらつきがあるが 5 断面の平均直径は 180° 周期のサイン曲線によくフィットしている(当時は図中に示すように楕円曲線に近似していたが(5)式のように直径分布はサイン曲線となる)。しかも、定方位コアであった万成花崗岩の最大直径  $d_{max}$  の方向は同一深度で実施された水圧破砕法による水平面内最大主応力  $S_{Hmax}$  の方向に一致していた。

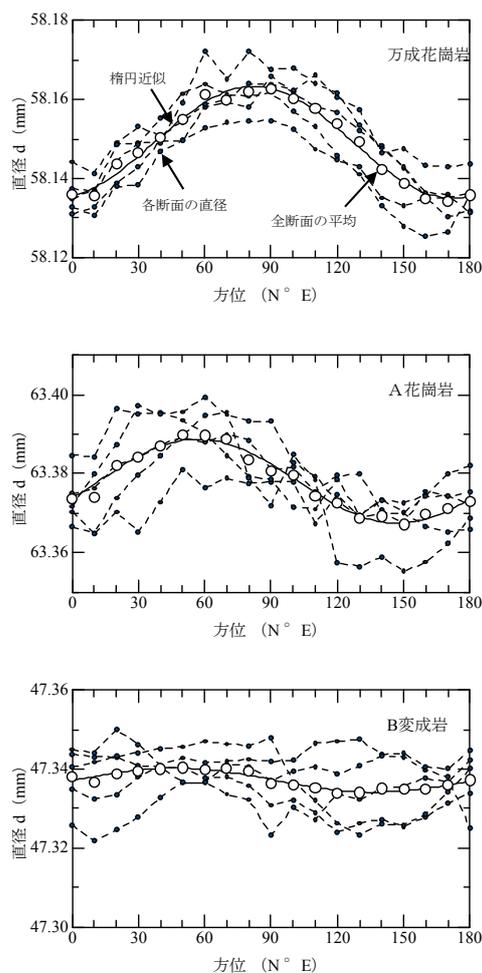


図3 レーザー寸法測定器による直径分布 (船戸・陳, 2004 より)

この結果に意を強くし、より詳細な数多くのデータを得るため、専用のコア直径測定装置を製作した(図4)。この装置は、光学式の寸法測定器(楢キーエンス LS-7030)、コア回転台、回転制御装置、データ収録用PCからなっている。コアを2本のローラーの上に置いて一定速度で回転させながら寸法測定器の出力をPCに収録することで、直径の周方向分布を非接触で計測することができる。コアの回転は、DCモーターによりローラーの1本を回転することで行っており、回転速度は可変である。

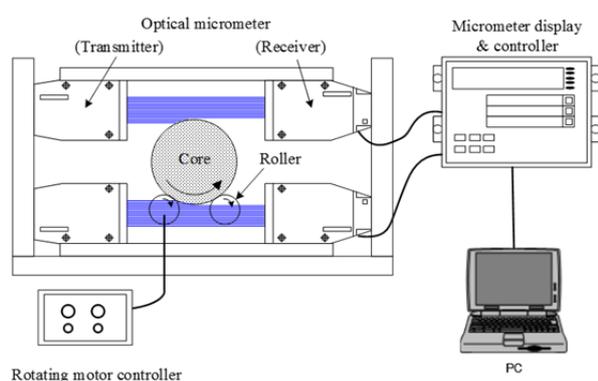


図4 コア直径測定装置

寸法測定器では、図4に示すように投光部から照射された光線の帯がコアで遮断されるエッジを受光部で検出している。この寸法測定器を2台組み合わせてコアの径に応じた位置にセットし、コアの上下のエッジをそれぞれの測定器で別々に検出することにより、最大直径が200mmのコアでも測定できるように工夫している。LS-7030のカタログによれば、測定精度は $\pm 2\text{mm}$ 、くり返し精度は $\pm 0.15\text{mm}$ 、最小表示単位は $0.01\text{mm}$ である。

#### 4. ボーリングコアへの適用

長(2007)は岡山県内で深度750mの応力測定孔を掘削し、水圧破碎法による応力測定を行っている。そのうちの深度455m~727mで水圧破碎法を実施した箇所18本のコアを借用してコア直径の測定を行った。コア径は約58mm、長さは0.3m~1.0mであった。図4のコア直径測定装置を用い、1本あたり7、8断面の直径分布を測定した。コアの方位は、超音波テレビュアー(BHTV)の画像データと照らし合わせて可能な範囲で決定した。なお、すべてのコアは風乾状態であり、現地でボーリングによって回収後約7年経過していた。

コア直径の測定結果の例を図5に示す。それぞれの図の薄い折れ線は各断面の直径分布で、横軸は基準線からの東回りの角度である。所々スパイク状に直径が変化しているのはコア表面のちりや傷によるものと思われる。丸印は同一方向の直径の平均値である。485m、486m、560及び658mの測定結果では、いずれのコアにおいても各断面の直径分布は再現性があり最大直径の方位は一定で、平均値は周期が $180^\circ$ の明瞭なサイン曲線を描いている。このことは、コア直径の最大値と最小値の方向が直交していることを示している。689mのコアでは、各測定断面ごとに最大直径の方向がずれているため直径分布曲線が一致していない。しかし、平均値で見れば全体の傾向を反映しているようにも見える。695mのコアでは各測定断面の直径分布がまったくばらばらで再現性がない。このコアは、図6に示すようにコアの側面に直定規を当てると最大1mm程度の隙間があり、コアがスパイラル状にうねっていた。

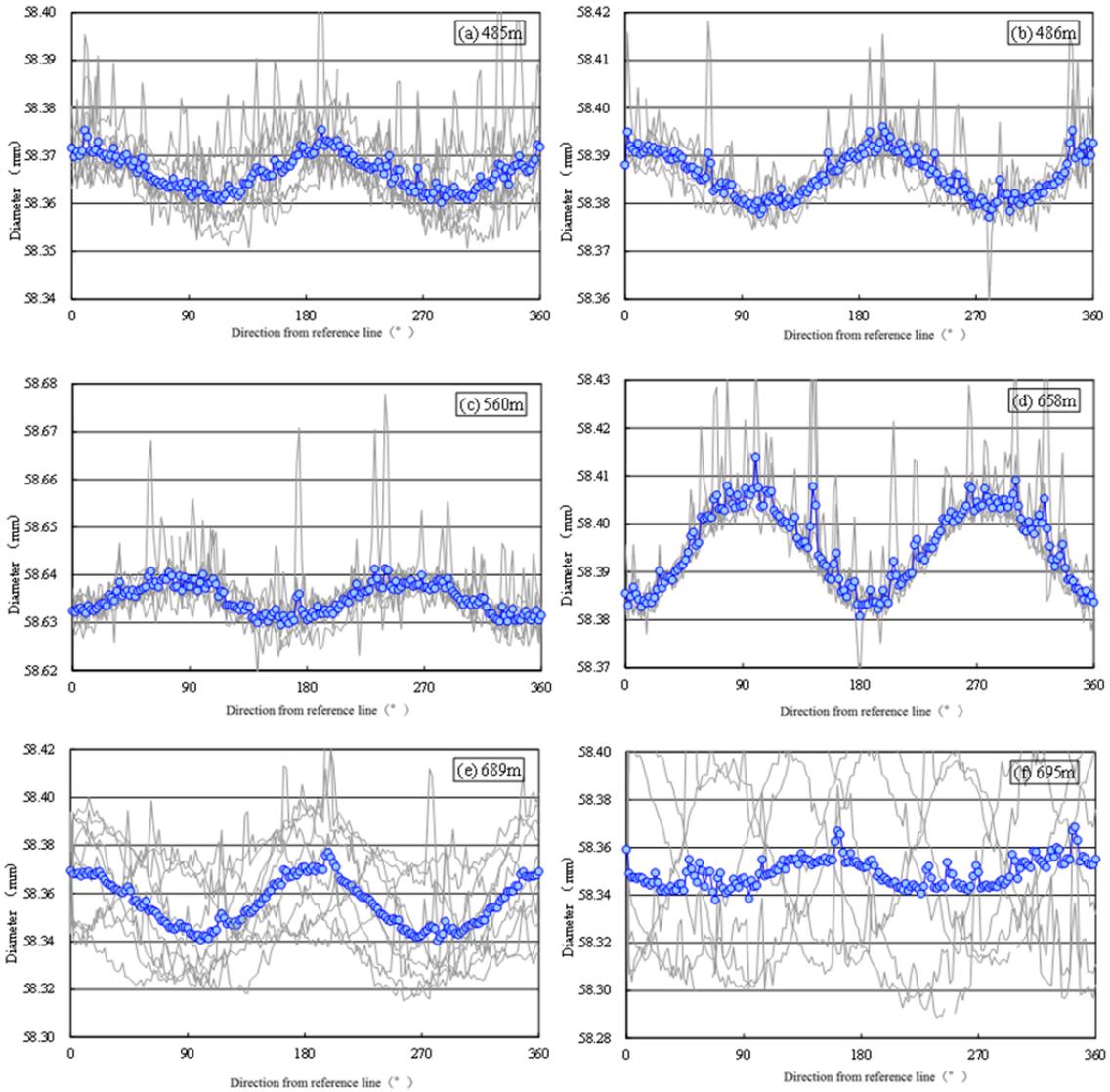


図5 岡山応力測定孔の各深度から採取されたコアの直径分布  
 (a) 485m, (b) 486m, (c) 560m, (d) 658m, (e) 689m, (f) 695m

このようなデータは除外し、BHTV から方位を決定することができたものについて最大直径の方位と水圧破碎法による  $S_{Hmax}$  の方位を比較して図 7a に示す。両者の方位はほぼ一致している。図 7b には直径の差  $\Delta d$  の深度分布を示す。等方均質な岩盤であれば  $\Delta d$  は主応力差 ( $S_{Hmax} - S_{Hmin}$ ) に比例するので深度とともに大きくなっていくことが期待されるが、必ずしもそのような明瞭な傾向とはなっていない。しかし、コア

観察と各種検層結果による不均一な岩盤状況（長，2007）を考慮すれば、 $\Delta d$  の深度分布は応力に関する情報を反映している可能性は十分にあるものと考えた。

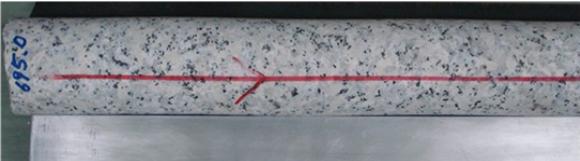


図6 深度 695m のコア

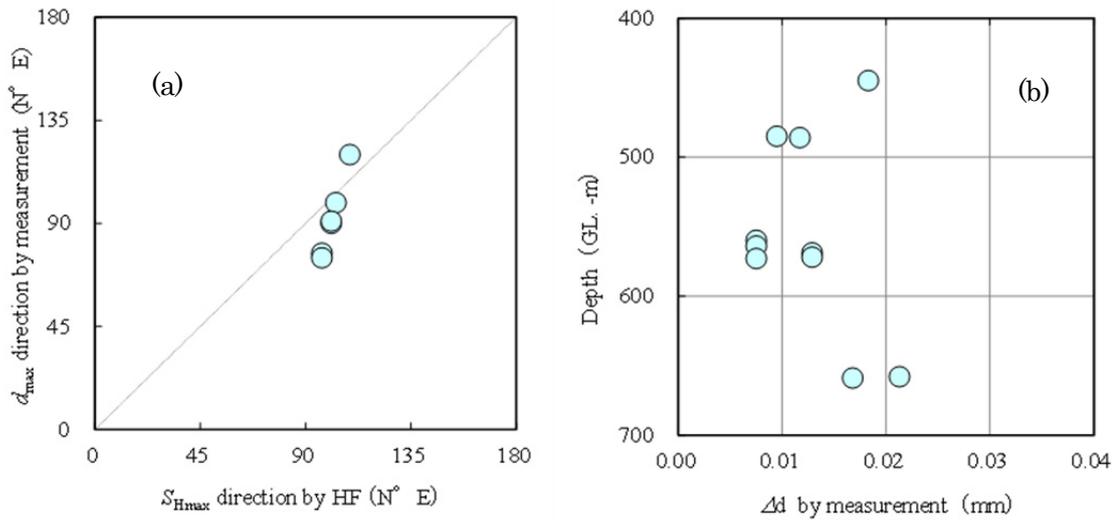


図7 (a) 直径測定による  $d_{\max}$  の方向と水圧破碎による  $S_{H\max}$  の方向の比較  
 (b) 直径測定による  $\Delta d$  の深度分布

## 5. 検証実験

### 5.1 コアリング時のひずみ挙動

ボーリングコアが回転するビットによって岩盤から切り離される際のコアの変形過程を解明するため、ひずみゲージを埋設したモルタルブロックに一軸圧縮応力を加えた状態でコアをくり抜いてコアビットが通過する際の応力解放に伴うひずみの挙動を計測した。埋設したひずみゲージはモルタルやコンクリートの内部応力測定用の埋込型（共和電業 KM-30）で、これを所定の位置、所定の方向に設置してモルタルを流し込んで 300mm 角のブロックを作成した。1 か月以上養生後、図 8 のようにフラットジャッキにより一定の一軸圧縮応力を負荷しながらひずみゲージの位置をくり抜いた。得られた長さ 300mm のコアの中央部 100mm~200mm の区間において、20mm 間隔で 6 断面の直径を測定した。

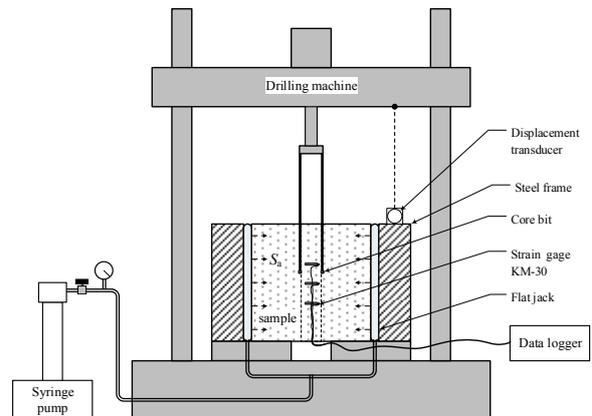


図8 くり抜き実験の概要図

くり抜き時の応力解放に伴うひずみ変化の例を図 9 に示す。同図には埋設ひずみゲージの位置と方向を確認するために撮影したコアの X 線写真を合わせて示している。図 9a では、深度 100, 150, 200 mm の x 方向（載荷方向）にひずみゲージを設置しているが、7.5MPa の載荷に伴って生じた約  $400 \times 10^{-6}$  の圧縮ひずみが、ビットの通過とともに順次解放されてほぼゼロに戻

っている。一方、深度 150mm の x, y 方向にひずみゲージを設置している図 9b では、x 方向のひずみの挙動は図 9a と全く同じであり、再現性のある結果となっている。また、y 方向（荷重直交方向）のひずみの挙動は x 方向とは圧縮／伸張のセンスが逆でひずみの変化量が約 1/4 となっている。

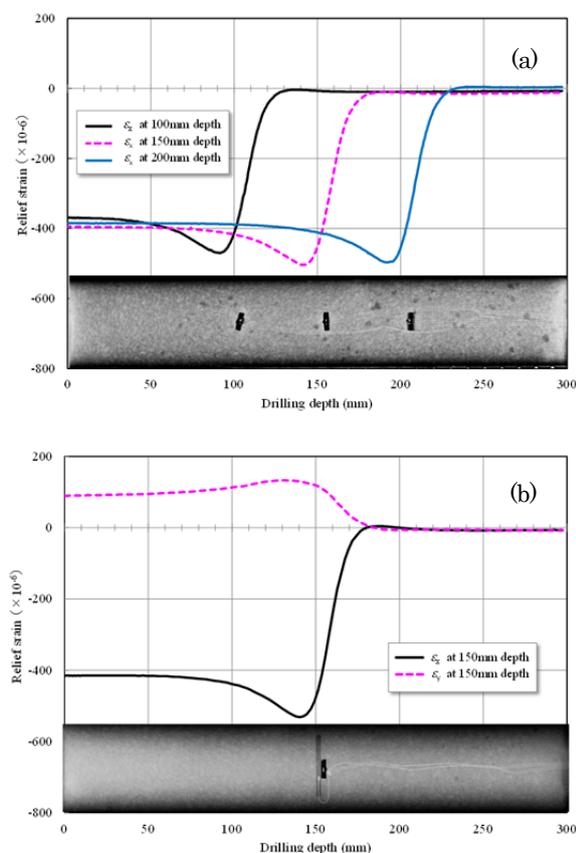


図 9 くり抜き時のひずみ変化

図 10 には荷重時の弾性的なひずみ変化とくり抜き時の解放ひずみの関係を示す。いずれのケースにおいても両者は符号が逆で大きさはほぼ一致しており、弾性的な挙動を示していることがうかがえる。

図 11 には軸対称 FEM 弾性変形解析によるひずみ変化を図 9a の実測データと比較して示す。

ただし、軸対称応力と一軸応力の違いを考慮し、FEM によるひずみの右縦軸は実測値の左縦軸の  $0.75 (=1-\nu)$  倍としている。この図から実測と FEM によるひずみの挙動はよく一致しており、実験に用いたモルタルはくり抜き時に弾性体として挙動していることがうかがえる。

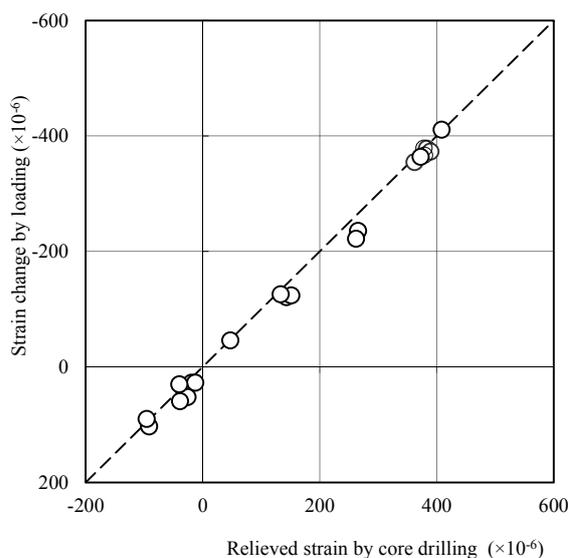


図 10 荷重時の弾性的なひずみ変化とくり抜き時の解放ひずみの比較

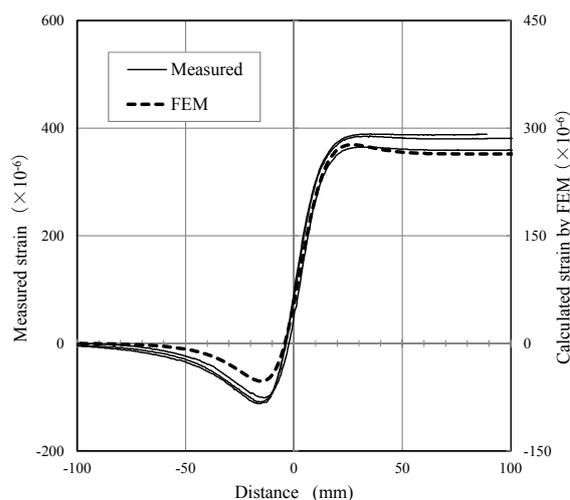


図 11 実測と FEM によるくり抜き時のひずみ変化

## 5.2 コアの変形と載荷応力の関係

コア変形法の適用性を検討するために、既知の一軸圧縮応力を加えたブロック試料からコアをくり抜き、得られたコアの直径を測定して載荷応力を評価する検証実験を行った。実験装置、測定手順は前節と同様である。実験に用いた試料は、稲田花崗岩、来待砂岩、モルタルの3種類で、ブロックの形状はいずれも一辺 300mm の立方体とした。それらの物性を表 1 に示す。

表 1 実験に用いた試料の物性

Sample	Inada Gr.	Kimachi Ss.	Mortar
Density $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.65	2.07	2.10
P-wave velocity $V_p$ (km/s)	Max. 5.03 Mid. 4.93 Min. 4.90	Normal 2.82 Parallel 2.70 Oblique 2.73	3.66
Young's modulus $E$ (GPa)	38	11	22
Poisson's ratio $\nu$	0.15	0.19	0.27
UCS $\sigma_c$ (MPa)	165	36	65
Tensile strength $\sigma_t$ (MPa)	8.4	3.2	3.1

UCS : Uniaxial compressive strength

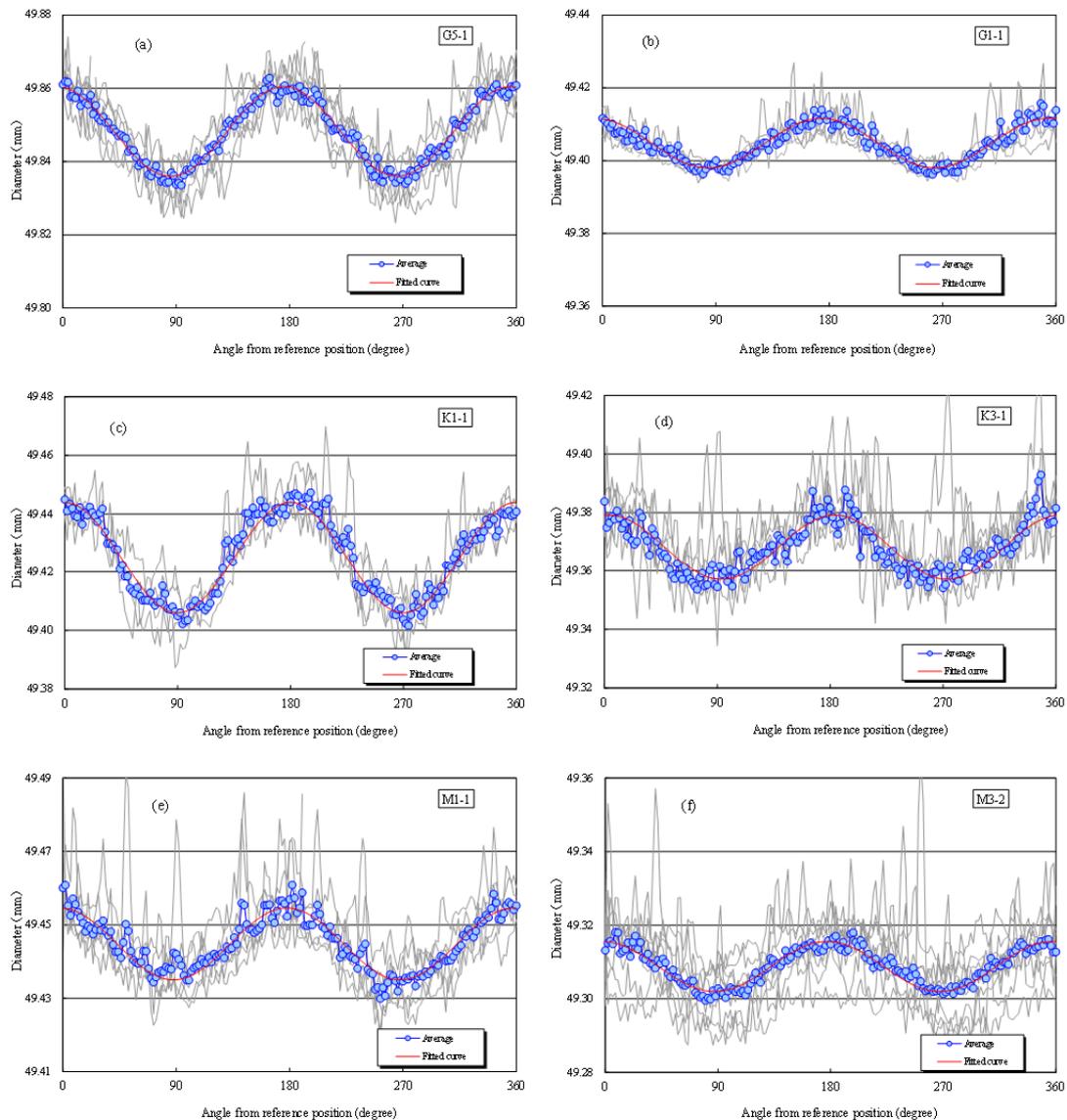


図 12 くり抜いたコアの直径分布：載荷応力 (a) 15 MPa, (b) 10 MPa (稲田花崗岩), (c) 7.5 MPa, (d) 5.0 MPa (来待砂岩), (e) 7.5 MPa, (f) 5.0 MPa (モルタル)

直径測定によって得られた  $360^\circ$  の直径分布の代表例を図 12 に示す。いずれの試料においても各断面の直径分布の振幅や山谷の現れる角度はほぼ一致しておりコアが一様に変形していること、最大直径の方向は載荷方向 ( $0-180^\circ$ ) にほぼ一致していることがうかがえる。また、平均データは (5) 式に良くフィットしており、コアの変形 ( $d_{\max} - d_{\min}$ ) は載荷応力の大きさに依存し、同じ載荷応力でも試料ごとに  $E$  に応じて異なっている。

図 13 に実際の載荷応力  $\sigma_a$  と DCDA による評価応力の比較を示す。わずかの例外を除いてほとんどのデータが  $\pm 15\%$  の範囲に入っている。図 14 には  $d_{\max}$  の方向  $\alpha$  のヒストグラムを示す。 $\alpha$  は大部分  $\pm 5^\circ$  以内に納まっている。コアによる  $E$  のばらつき (変動係数が 7~12%) を考慮すれば、応力の大きさと方向の推定精度は十分実用的であると考えられる。

## 6. その他の課題

本稿で紹介した原位置応力を評価するためのコア変形法 (DCDA) は、理論的背景が簡潔明瞭であること、解析において何らかの仮定を置く必要がないこと、コアを整形する必要もなく非破壊で迅速に測定できること、4 章で述べたように採取後数年経過し乾燥したコアにも適用できる可能性があることなど従来のコア法にない多くの利点を有している。

しかし、その一方で、どのようなコアにも適用できるわけではなく、図 9 のような曲がったコアやビットの切削痕が残るコアへの適用は困難であり、応力解放に伴って膨張したコアの側面がビットの内刃によって切削されないようにコアを採取する配慮も必要である (船戸ら、

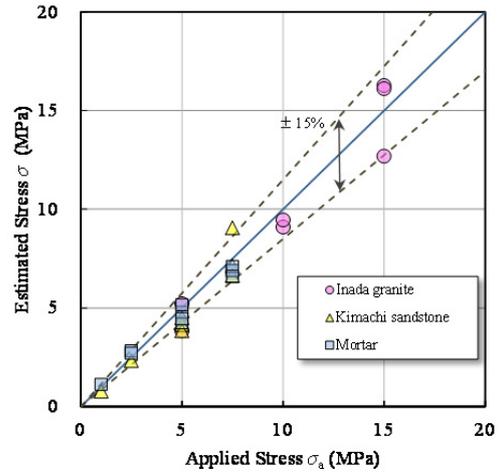


図 13 DCDA による評価応力と載荷応力の比較

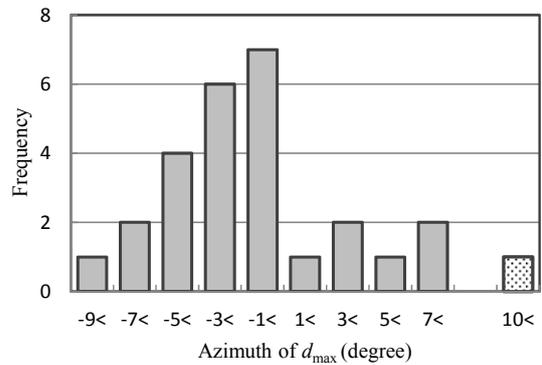


図 14 評価された  $d_{\max}$  の方向  $\alpha$  のヒストグラム

2014)。また、岩石の非弾性的な挙動は、弾性変形に基づく (3) 式による応力評価値に誤差をもたらすことになる。さらに、岩石に弾性異方性がある場合には、その影響を無視することはできない。これらの課題については次の機会に述べることにしたい。

## 7. おわりに

本稿の第 3 章及び第 4 章は、筆者が応用地質株式会社コアラボに在籍していた 2006 年までに技術課題として個人的に検討した結果に基づいている。当時の関係諸氏、とりわけ協力者と

して手作業による面倒な直径測定などを地道に行ってくれた陳 渠氏 (現 3D 地科学研究所) に感謝する。また、長 秋雄氏 (産業技術総合研究所) には、貴重な深部ボーリングコアと関連データをご提供頂いたことを深く感謝する。

その後、エネルギー事業部に所属が変わり受注業務の中でコア変形法の適用拡大を図ったが、深部ボーリングコアを手にする機会も少なく行き詰まっていた。そんな折、深田地質研究所の「岩盤応力に関する研究委員会」で一緒することになった伊藤高敏教授 (東北大学) から、深海掘削船「ちきゅう」号で採取されたコアの直径測定を依頼された。これが契機となり、コア変形法を研究テーマとして東北大学の社会人ドクターコースに入学し伊藤教授の指導を仰ぐことになった。

後半の第 5 章は東北大学の実験室で行った実験の一部を要約したものである。研究計画立案から博士論文執筆に至るまでご指導いただいた伊藤教授には感謝の言葉もない。また、一連の実験に協力していただいた折田隆三氏 (KAS 計測) をはじめとして関係諸氏にも深く謝意を表する次第である。

## 参考文献

- 船戸明雄・陳 渠 (2005) : ボーリングコアの変形を利用した地圧評価, 第 34 回岩盤力学に関するシンポジウム, 261-266.
- 船戸明雄・伊藤高敏 (2013) : 岩盤応力評価のためのコア変形法 (DCDA), *Journal of MMIJ*, 129, 577-584.
- 船戸明雄・伊藤高敏, 三上 央 (2014) : コア変形法 (DCDA) の室内検証実験, *Journal of MMIJ*, 130, 515-526.
- 川方裕則・三浦 勉・松尾成光・渡邊雅之 (2004) :

岩石コアを用いたレーザー干渉型地殻応力測定装置の開発 (その 2), 日本地震学会講演予稿集 2004 年度秋季大会, C054.

長 秋雄 (2007) : 産総研岡山応力測定孔での水圧破碎法による応力測定と広域応力場の評価, 第 42 回地盤工学研究発表会, G-05.