

ボーリングコアの変形を利用した地圧評価

Initial Stress Evaluation by Boring Core Deformation Method

船戸 明雄*・陳 渠*

Akio FUNATO, Chen QU

Several methods have been developed and applied for evaluating the in-situ stresses using rock core samples, but they are not yet widely accepted. Core deformation method is a new and simple method. To investigate the applicability of this method, preliminary experiments and logging of core diameters are carried out.

- Core deformation method is non-destructive and easily applicable for various types of rock
- Principal stress directions in the horizontal plane decided as the elliptical axes of core diameters are consistent with the loading direction or the S_{HMAX} orientation by hydraulic fracturing
- Effects of pre-existing microcracks and damages during boring are awaiting solutions for this method

Key Words : rock stress, ellipsoid, microcrack

1. まえがき

初期地圧の測定法は、ボーリング孔内などで実施される原位置法（オーバーコアリング法や水圧破碎法など）と、ボーリングコアを用いて室内で実施されるコア法に大別できる。原位置法に比べてコア法は、測定が比較的容易でコアさえ採取できれば適用深度に制限が少ないことから、様々な方法が提案され多くの適用事例が報告されている。コア法には、DSCA 法、ASR 法、AE 法、DRA 法、超音波法、Core discing 法などがあるが、いずれの方法にも一長一短があり、決定版といえる方法は現状まだ確立されていない¹⁾。近年、コア法の信頼性を高めるために、原位置法や複数のコア法による比較検討例も数多く報告されている²⁾。

今後、大深度における地圧測定の需要が高まるにつれ、水圧破碎法や応力解放法などの比較的高いコストの方法を補間する、或いはそれらに替わる方法としてコア法の需要が高まることは必至と考えられる。そこで筆者らは、新たなコア法としてボーリングコアの変形を利用した地圧測定法³⁾に着目し、その適用性について検討を行った。

2. 基本的な考え方

ボーリングコアは、回転ビットで切削されることによって原位置の地圧から解放される。その際以下のことを仮定する。

仮定 1: ビットは高速回転しているので、切削される瞬間のコアは直径 d_0 の真円である。

仮定 2: 切削されたコアは応力解放に伴って弾性的に変形し、その変形量は解放応力に比例する。

仮定 3: コアは等方均質である。

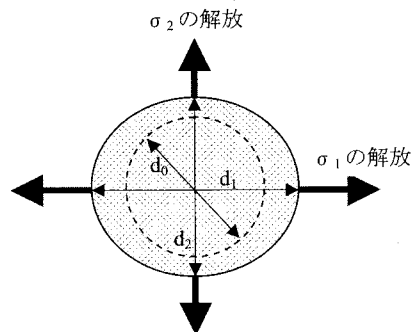


図-1 応力解放に伴うコアの変形

*正会員 応用地質株式会社 コアララボ

これらの仮定のもとに、図-1 のような平面応力条件において応力解放されたときのコアの変形を考える。孔軸に直行する平面内主応力 σ_1 、 σ_2 (圧縮を正、 $\sigma_1 > \sigma_2$) の解放に伴う主ひずみは次式で表される。

$$\varepsilon_1 = (\sigma_1 - \nu \cdot \sigma_2) / E = (d_1 - d_0) / d_0 \quad (1) \text{式}$$

$$\varepsilon_2 = (\sigma_2 - \nu \cdot \sigma_1) / E = (d_2 - d_0) / d_0 \quad (2) \text{式}$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: 主ひずみ (膨張を正)

E, ν : 等方材料の弾性係数, ポアソン比

d_1, d_2 : 主応力方向のコア径

両辺の差をとると、

$$\sigma_1 - \sigma_2 = (d_1 - d_2) / d_0 \cdot E / (1 + \nu) \quad (3) \text{式}$$

ここで初期直径の d_0 は未知数であるが、応力解放に伴うコアの変形量は非常にわずかなので、 $d_0 = d_2$ としても良い。このようにして主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$ を求めることができる。

この方法は、応力解放に伴うコアの変形から地圧を求めるという原理においては、コア自体をセンサとした応力解放法の一つといえる。また、後述するように、コアの変形はマイクロラックと密接な関係にあることから、DSCA 法と共通のメカニズムに基づいているとも考えられる。いずれにしてもこの方法は、コアを整形する必要もなく非破壊の測定ができること、コア径に制約はなく比較的短いコアでも測定できることなどから適用範囲は広く、他のコア法との併用も容易である。

さらに、ボーリング孔において回転式のセンサを用いて精密に孔径を測定することによっても同じように地圧を求めることが可能である⁴⁾。コアの変形よりも孔径の変形の方が大きいこと、繰り返し測定することで原位置の応力変化をモニターできることなど、より大きなメリットが期待できる。

3. 実験方法と結果

1) コアリング方法

初めに、予備実験として岩石ブロックに一軸荷重を加えながらコアリングを行い、得られたコアの直径を計測して応力解放に伴うコアの変形を確認することとした。コアリングの概要を図-2 に示す。用いた試料は表-1 に示す 4 種類のものとし、一辺約 10cm の矩形ブロックに切出した。それぞれのブロックの一面に油圧ジャッキで 50kN の一軸荷重を加え、载荷軸と直交方向にコアドリルで中央部を繰り抜いた。繰り抜き方向は、白浜砂岩と多胡砂岩については層理直交方向、コンクリートとセメントミルクについては鉛直方向とした。コアリングに用いたダイヤモンドビットの外径は 60mm、内径は 50mm である。

2) 直径の測定方法

コアの直径測定にはレーザー寸法測定器 (株式会社エンス LS-3060) を用いた。この装置は図-3 のように投光部から平行なレーザー光線が照射され、

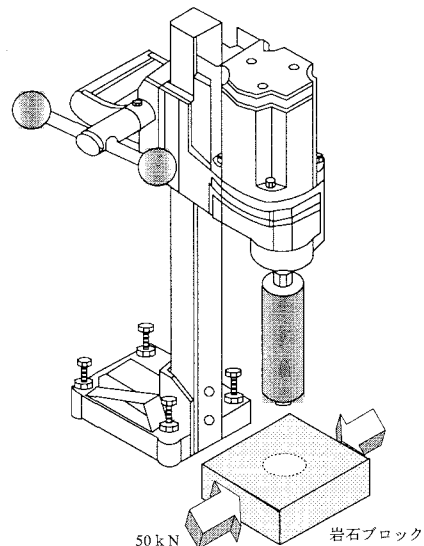


図-2 コアリングの概要図

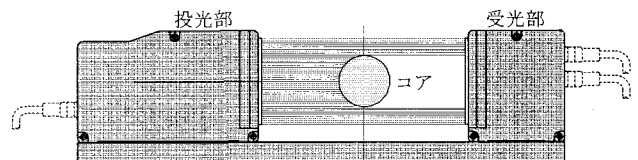


図-3 直径の測定方法

受光部では測定対象物で遮断されたエッジの位置を検出することで外径を求めるものである。カタログ上の測定精度は $\pm 3\mu\text{m}$ 以下、繰返し精度は $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以下、最小表示単位は $0.1\mu\text{m}$ である。図-4にはこの測定器の適用性を確認するため、 $\phi 30\text{mm}$ のステンレス棒（三軸セルのピストン）について8断面、 45° 間隔で直径を測定した結果を示す。寸法表示は $0.1\mu\text{m}$ の桁まで安定して表示されるが、レーザー光線面とコア軸の角度が直角からわずかにずれるだけで表示値が大きく変化するため、支持台を操作して表示値の最小値を記録した。その結果、平均直径は 29.9794mm 、標準偏差は 0.0007mm で極めて真円に近いことを確認するとともに、少なくとも $1\mu\text{m}$ のオーダーまで有意な測定ができることを確認した。

3) 測定結果

回収したコアの直径を、コア軸方向には 2cm ごとに4断面、円周方向には載荷方向を角度の基点として 15° 間隔で 180° の範囲まで測定した。図-5には各試料の4断面ごとに得られた角度と直径の関係を破線で、4断面の平均値を○印で、この平均値を最小二乗法で楕円に近似した曲線を実線で示す。この近似曲線から最大直径 d_1 、最小直径 d_2 および最大直径の角度を求め表-1に示す。これらの結果をもとに(3)式で主応力差を算定し、載荷荷重を載荷面の面積で除した載荷応力と比較して同表に示した。なお、同表の弾性係数とポアソン比は、ブロックから繰り抜いた風乾状態の供試体で一軸圧縮試験を行い、載荷応力レベルの割線係数として求めた。

表-1 用いた試料とコア直径の測定結果

試料名	白浜砂岩	多胡砂岩	コンクリート	セメントミルク
産 地	和歌山県	群馬県	既製品	1週養生
密 度 g/cm^3	2.43	2.24	2.19	1.87
一軸圧縮強度 MPa	39	29	—	56
弾性係数 E MPa	4400	7100	18000	7200
ポアソン比 ν	0.07	0.10	0.29	0.26
最大直径 d_1 mm	50.027	49.919	49.916	49.888
最小直径 d_2 mm	49.979	49.858	49.868	49.854
d_1 の方位 $^\circ$	5	12	-7	4
主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$ MPa	3.9	7.9	13.4	3.9
載荷応力 MPa	4.9	4.7	3.3	5.6

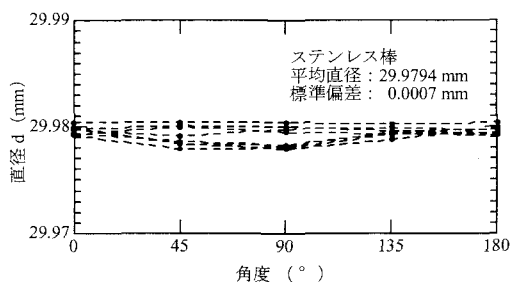


図-4 ステンレス棒の直径測定結果

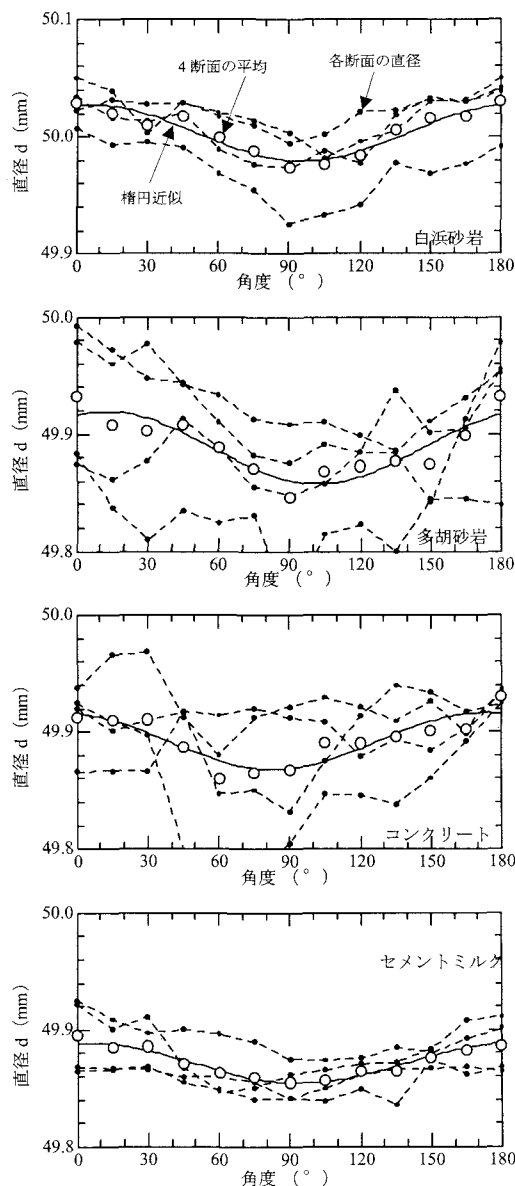


図-5 コア直径の測定結果

これらの結果から以下のことがうかがえる。

- いずれの試料についても最大直径の方向は載荷方向とはほぼ一致している
- 細粒の白浜砂岩や骨材を含まないセメントミルクでは各断面の直径のばらつきは小さいが、粗粒の多胡砂岩や粗骨材を含むコンクリートは直径のばらつきが大きい
- ばらつきの小さい白浜砂岩とセメントミルクについて(3)式で求めた主応力差は載荷応力の 70～80%とやや小さ目であった

ブロックの寸法に対してコアリングの孔径が大きいため、コアリングに伴って残った部分に応力が集中して一定応力状態に保たれていないこと、得られたコアの表面がさほど滑らかでなく切削の凹凸があったこと、さらに多胡砂岩やコンクリートは表面がザラザラで目に見える空隙があったことなどにもかかわらず前記の結果が得られたことは、この方法の有効性を示すものと考ええる。

4) 既存コアの測定結果

次いで、地下深部から定方位で採取した 3 種類の既存コアについて同様の方法で直径を測定した。ただし、測定間隔はコア軸方向は 5cm、円周方向は 10° 間隔で 180° の範囲とした。これら 3 種類のコアは試験室に搬入後 2～数年程度経過しており、いずれも風乾状態であった。岩質は非常に硬質で、コアの表面はビットの切削跡も見られず非常に滑らかであった。測定結果を表-2、図-6 に示す。なお、主応力差は $E=50\text{GPa}$ 、 $\nu=0.2$ と推定して概算値を求めた。

表-2 既存コアの直径測定結果

		万成花崗岩	A 花崗岩	B 変成岩
採取深度 GL-m		234	675	323
コア 変形法	最大直径 d_1 mm	58.1633	63.3888	47.3403
	最小直径 d_2 mm	58.1350	63.3678	47.3342
	最大直径の方位	N82W	N57W	N47W
	主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$ MPa	20	14	5
水圧	σ_H 方位	N72～86W ⁵⁾	—	—
破碎法	主応力差 MPa	3.2 ⁵⁾	—	—

これらの結果から以下のことがうかがえる。

- 前述の実験に比べると直径の変化はごくわずかであるがばらつきも小さく有意な傾向がうかがえる
- 万成花崗岩では、コアの最大直径の方位は水圧破碎による σ_H の方向とはほぼ一致しているが、コア変形法による主応力差は水圧破碎法に比べてかなり大きい
- A 花崗岩では、コア変形法による最大直径の方位は N57W、主応力差は 14MPa であった
- B 変成岩はコア軸に対して約 45° 傾斜した片状構造を有しており、珪質部と泥質部が互層状を呈していることから他の 2 試料に比べてばらつきがやや大きかったものと考えられる

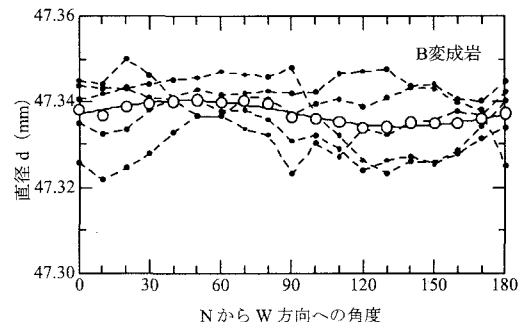
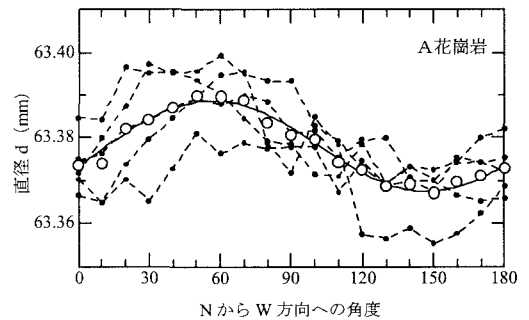
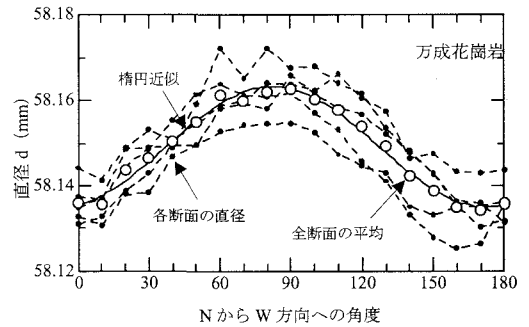


図-6 既存コアの直径測定結果

4. 考察

この方法はボーリング時の応力解放によって真円のコアが弾性変形し、その変形量が解放応力に比例することを前提としている。しかし、ボーリングコアは原位置の地圧状態から瞬時に解放される訳ではなく、ビット先端が通過する際に一旦大きな応力集中を受け、その後に応力解放される。一般的な圧縮応力場で考えれば、図-7のaの位置付近に最も大きな応力が集中し、b, c, dと進むにつれてそれが解放される。そのとき応力解放にともなって膨張したコアはダイヤモンドチップによって切削されるので、結局最上段dの位置のダイヤモンドチップにより真円に仕上げられる。従って、回収されたコアの変形量には、d断面に作用している応力の解放分に相当する弾性変形量とASR法で考えられているような非弾性変形量が含まれているものと考えられる。仮にコアの変形量が前者の弾性変形量だけだとしても、d断面内の応力は原位置の初期地圧とは異なっており、またコアの断面内の応力分布も均一ではないので、(3)式によって求めた主応力差は初期地圧とは一致しなくなる。

次にマイクロクラックの影響について考える。実際の岩石はマイクロクラックを内在しており、岩石の異方性はマイクロクラックの配向性やクラック密度によるものと考えられている。マイクロクラックの配向性と超音波速度の異方性の関係については多くの研究があり、超音波速度の最小方向に直交するマイクロクラックが多いことが明らかになっている⁶⁾。そこで図-6に示した万成花崗岩とA花崗岩について、P波速度の異方性を測定した。測定方法は図-8に示すようにコアの側面に共振周波数100kHzのAEセンサを貼り付けてパルス透過法により行った。図-9に示す測定結果によれば、両試料とも明瞭な速度異方性が認められ、速度の最小方向と直径の最大方向はほぼ一致している。このことは、図-10に示すようにマイクロクラックの長軸が速度最大方向に並んで配列していると解釈するのが妥当である。すなわち、

- マイクロクラックの長軸の配列方向
- = 速度の最大方向
- = コア直径の最小方向
- = 最小主応力方向

ということになる。DSCA法はこのような概念をもとに応力解放に伴って主応力と垂直なマイクロクラックが主応力の大きさに比例して発生することを仮定している。したがって、コア変形法とDSCA法は同じ原理に基づいていると

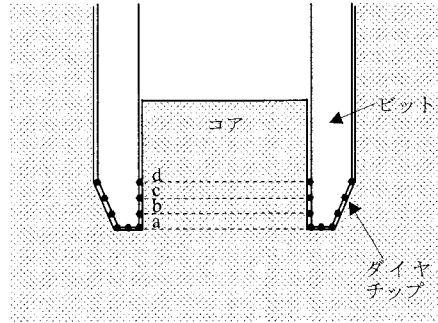


図-7 ビット先端の概略図

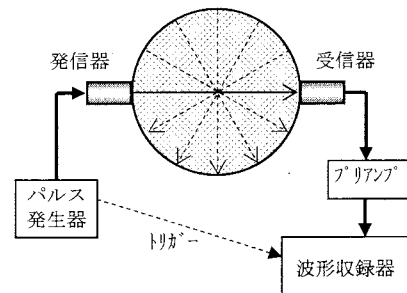


図-8 P波速度測定概念図

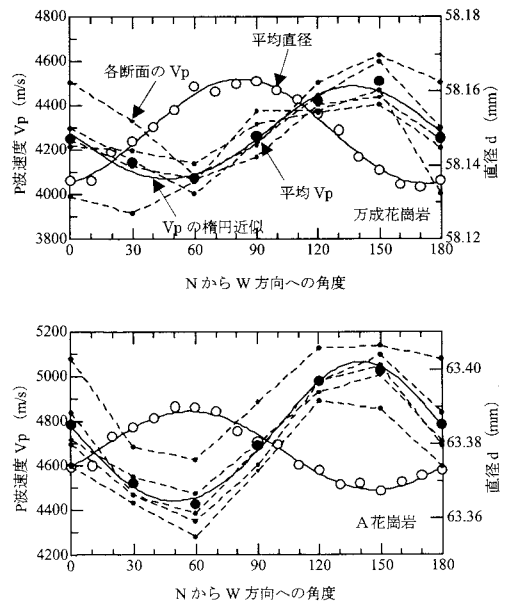


図-9 既存コアのVp測定結果

いうことができる。

図-9 の万成花崗岩について詳細に見ると、平均速度の最大方向とコア直径の最小方向が 35° ずれている。速度が他とはやや異なる断面のデータを除いても約 30° ずれており、この不一致が測定上の誤差やコア性状のばらつきによるものかそれともその他の原因によるものかは判断できない。いずれにしても、速度異方性の主軸と現在の主応力方向が常に一致するとは限らない⁷⁾ので、さらなるデータの蓄積が必要である。

また、松木ら⁸⁾はコアディスキングに関してビット先端部の応力解析を行い、コアの根元中心部には σ_3 方向の引張応力が発生することを示している。この引張応力が岩石の引張強度を越えたときにコアディスキングが生ずるが、それ以下の場合でも岩石コアは損傷を被り、DSCA 法の結果に影響を与えることを指摘している⁸⁾。この指摘は、コアを用いた地圧測定法すべてに共通する課題であるとともに、コアを利用した物性試験やマイクロクラックの観察においても留意すべき重要な指摘である。

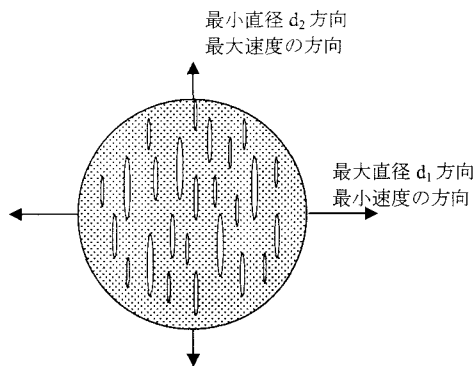


図-10 マイクロクラックと直径、速度の関係

5. あとがき

ボーリングによって採取したコアの扁平度から主応力を求めるコア変形法の適用性について検討した結果、主応力差の評価については課題が残るものの、主応力方向の評価については有効であるとの結論を得た。また、初生的に内在しているマイクロクラックの影響や、ボーリング時の応力集中によるコアの損傷など今後の課題が明らかになった。

本実験に用いた万成花崗岩のコアは、(独)産業技術総合研究所の長 秋雄氏から提供していただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 菅原 勝彦：岩盤応力測定に関する研究の動向，資源と素材，Vol.114，pp.834-844，1998.
- 2) 例えば，新 孝一，及川 寧己，伊藤 久敏：コアディスキングなどとの比較による DSCA 法および AE 法の検討，資源と素材，Vol.116，pp.965-971，2000.
- 3) Enever J.R., Yassir N., Addis M.A., Willoughby D.R., Tan C.P. and Schmidt P.: A note on the status of deep hole stress measurement/estimation research in CSIRO, Proceeding of International Workshops on Rock Stress Measurement at Great Depth, pp.40-45, 1995.
- 4) 桑原 保人，木口 努，佐藤 凡子：活断層応力場評価のための浅部応力方位測定法の開発，日本地震学会講演予稿集 2004 年度秋季大会，C053，2004.
- 5) 長 秋雄，佐々木 勝司，堀川 滋雄，萩原 育夫：花崗岩体での深度 1000m 岩盤調査（その 1，～320m），日本応用地質学会平成 14 年度研究発表会講演論文集，pp.291-294，2002.
- 6) 林 為人，中村 敏明，高橋 学：稲田花崗岩の熱特性，超音波速度，強度および変形特性の異方性，応用地質，第 44 巻，第 3 号，pp.175-187，2003.
- 7) 工藤 洋三，橋本 堅一，佐野 修，中川 浩二：瀬戸内地方の採石場における花崗岩質岩石の異方性，土木学会論文集，第 382 号/III-7，pp.45-53，1987.
- 8) 松木 浩二，飯野 亘，坂口 清敏：地圧下のボーリングに伴う岩石コアの引張損傷と DSCA，資源と素材，Vol.116，pp.972-978，2000.