採取後長年経過したコアへの コア変形法 (DCDA) の適用について

小野謙弥¹•船戸明雄²

¹応用地質株式会社 ²深田地質研究所

Application of DCDA for the boring core samples recovered many years ago

ONO Kenya¹, FUNATO Akio²

¹OYO Corporation ²Fukada Geological Institute

要旨:コア変形法 (DCDA) は応力解放に伴うボーリングコアの弾性的な変形から原位置の応力 を評価する手法であるが、応力解放後のコアは時間の経過に伴い非弾性的な変形が生じることも 知られている.本稿では、採取後長年経過したコアに対するコア変形法の適用性について検討 した.用いたコアは、2005年に産総研の岡山応力測定孔で採取された花崗岩である.深度445m ~659mの8本のコアを対象に、2009年、2019年及び2021年に直径測定を行った.その結果、約10年間で3回の測定を行っても、コアの直径分布は再現性が良く、それらから求めた最大直 径と最小直径の差⊿d及び最大直径 d_{max}の方位αは、測定者や測定間隔が異なっていてもほぼ 一致していた.一方、軟岩など非弾性的な変形が無視できない場合は、主応力差が過大に評価さ れる可能性があるため、コア回収後は速やかに直径測定を行うことが望まれる. キーワード:DCDA、弾性変形、非弾性変形、主応力、支応力差、応力解放

Abstract: DCDA is a new method for evaluating the in-situ stress of rocks based on the elastic deformation of boring cores with stress relief, but it is assumed that the inelastic deformation also follows with time after stress relief. We evaluated the applicability of DCDA using core samples recovered many years ago. The samples were granite from the Okayama stress measurement borehole of AIST. Eight samples were selected from 445 m to 659 m depth and those diameters were measured in 2009, 2019, and 2021. As a result, those diameter distributions were reproducible, and the differential diameters Δd and the direction of d_{max} were almost corresponding even if the operator and measurement positions were different. On the other hand, the differential stress may be overestimated on some soft rocks that show an inelastic deformation, so it is desirable to measure the diameter promptly after core recovery.

Keywords: DCDA, elastic deformation, inelastic deformation, principal stress, differential stress, stress relief

1. はじめに

1.1 コア変形法の概要

コア変形法とは、応力解放により変形したボー リングコアの断面形状から原位置の応力状態を評 価する方法であり(船戸・伊藤,2013)、ロータ リーコアボーリングによって回収された円柱状コ アの直径を精密に測定することで、コア軸直交断 面内の主応力方向及び主応力差を求めることがで きる.この方法は非破壊の測定が可能であり、ま たコア径のサイズに制約がなく、比較的短いコア でも測定が可能であることから、適応範囲が広く、 様々な岩石に適用した事例が報告されている(例 えば、船戸、2021; Penido et al.,2021).

基本的原理は弾性論に基づいており,理論的 背景も簡潔明瞭である.詳細な理論はFunato and Ito (2017)を参照されたい.ここでは,主応力 差及びコア直径の関係式についてのみ説明する. 図1にボーリング掘削時の応力解放によるコア の変形イメージを示す.等方均質な線形弾性体の 岩盤が鉛直応力Sv,水平面内の最大主応力S_{Hmax} 及び最小主応力S_{hmin}を受けて圧縮されている場 合,コアの直径分布を表す理論式及び主応力差 S_{Hmax} – S_{hmin}とコアの直径の関係式は次式で与え られる.

$$d_{\theta} = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{2} + \frac{d_{\max} - d_{\min}}{2} \cos 2(\theta - \alpha)$$
(1)

$$S_{H\text{max}} - S_{h\text{min}} = \frac{d_{\text{max}} - d_{\text{min}}}{d_{\text{min}}} \cdot \frac{E}{1 + \nu}$$
(2)

ここに、 d_{θ} : θ 方向の直径、 θ : 基準線からの 方位角、 d_{max} : 最大直径、 d_{min} : 最小直径、 α : 最 大直径の方位、E: ヤング率、v: ポアソン比で ある. 回収したコアの方位が既知であれば、 d_{max} と d_{min} の方位から S_{Hmax} と S_{hmin} の方位を決定す ることができ、 d_{max} と d_{min} から(2) 式で主応力 差 $S_{H_{\text{max}}}$ - $S_{h_{\text{min}}}$ を求めることができる.



図1 ボーリング掘削時の応力解放によるコアの変形 (船戸・伊藤, 2013 より).

1.2 コア変形法における非弾性変形の影響

コア変形法では、原位置の岩盤が地殻応力か ら解放された瞬間の弾性的な変形を前提としてい るが, 岩石によっては時間経過に伴って, 非弾性 的な変形も生じることが知られている. 船戸・伊 藤(2013)は、コア変形法の開発に当たり、時 間経過に伴う非弾性的挙動に関する室内実験を 行っている.実験には硬さが異なる稲田花崗岩, 来待砂岩、モルタルの3材料を用いており、フラッ トジャッキで載荷した一辺が 300mm のブロック からくり抜いたコアの直径分布の経時変化を測定 している.これによれば、直径は経過日数ととも にすべての方向で小さくなっているものの, 直径 分布のピークの方向と振幅はいずれの試料におい ても一致しており、時間経過した試料でも、コア 変形法により応力評価が可能であることを示唆し ている.なお,経過日数とともに直径が小さくなっ ているのは乾燥収縮による影響とされている.

田中(2014)が取りまとめた室内三軸クリー プ試験結果によれば、軟岩のクリープ係数は0.1 ~0.4程度となっている.一方で、硬岩のクリー プ係数はより小さいと考えられているが、明確に 示されているデータは少ない.

本稿では、採取後長年経過した硬岩コアに対

するコア変形法の適用性を評価することを目的と して,2005年に採取された岡山応力測定孔の花 崗岩コアを用い,2009年,2019年及び2021年 に同一のコアについて直径分布を測定し,それら の比較検討を行った.

2. 採取後長年経過したコアの測定

2.1 測定試料

長(2007)は岡山市内の花崗岩の岩盤露頭で 深さ750mの応力測定孔を掘削し、水圧破砕法 による応力測定を行っている.そこで採取された コアのうち、深度445m~659mの8個のコア 試料を用いた.代表的なコアを図2に示す.測定 対象のコアは、直径が約58mm、長さは0.3m~ 1.0mである.岩級区分はB~A級相当と評価さ れており、節理や潜在亀裂が極めて少ないもので あった.原位置の密度検層による密度は24.8~ 25.2kN/m³、速度検層で得られたP波速度は5.2 ~5.5km/sである(長,2007).



図2 代表的なコア.

この地域に分布する花崗岩は、中生代の万成 花崗岩で、比較的粗粒なものと細粒なものに大別 される. 鈴木・能美(2008)によれば、粗粒花 崗岩は粒径3~10mmの半自形淡紅色カリ長石 を含むことで特徴づけられ、石英の粒径は3~ 7mm、斜長石の粒径は1~6mmで、いずれも 粒度が粗い. 細粒花崗岩は、いずれも粒径2mm 以下の鉱物から構成され、稀に粒径3~5mmの 石英、カリ長石、黒雲母などを含む場合もあるが、 粒径 5mm を超える鉱物はほとんど含まれていない. 測定に用いたコア試料も概ね同じ特徴を有していた.

2.2 測定装置·方法

測定装置は図3に示すように、寸法測定器(㈱ 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 からなる.適用可能なコア の直径は30~200 mm、長さは100~1000 mm である.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 で 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.直径の測定精度は± 2μ m、くり返し精度は±0.15 μ m、最小表示単位 は 0.01 μ m である(船戸・伊藤, 2013).



図3 測定装置の概略図(船戸・伊藤, 2013より).

コアの直径測定は1 試料あたり5~9 断面で, 2019年のNo.445を除き,深度方向に5 cm 間隔 で行った.コアを90秒で360°回転するように モーターの速度を調整し,0.5秒間隔で寸法測定 器のコントローラーからの出力をPC に取り込ん だ.方位の基準は,コア側面に引かれた基準線と し,上から見て時計回りに測定を行った.複数断 面で得られたコアの直径分布を方位毎に平均し, 方位 θ と直径 d の関係を (2) 式に最小二乗法で 回帰して, Δd (= $d_{max} - d_{min}$) 及び d_{max} の方位 α の最適解を求めた. 2009 年と 2019 年では測定者 が異なっているが,測定深度は No.445m を除き, 同一深度の断面で実施した. No.445m の試料に ついては,元々は 1m のコアであったが, 2009 年の測定後に中心部を他の岩石試験に利用したた め, 2019 年の測定では,残されていた上端部の コアで測定間隔を 1 cm 間隔として実施した.

2.3 測定結果

2009年と2019年の測定に用いたコアの直径測 定深度と測定結果を表1に示す.また2009年と 2019年の測定で得られた △ d と d_{max}の方位 αの 比較を図4に、コアの直径分布の比較を図5に 示す.図5の記号でプロットした点は複数断面で 測定した直径の方位毎の平均値を、横軸は基準線 からの時計回りの方位を示し、実線と点線は方位 とコア直径の関係を最小二乗法で(2)式に回帰 した近似曲線である.

図 5 によれば、2019 年のコアの直径の測定値 は 2009 年の測定値よりも、0.02 mm 程度小さく なっているが、これは寸法測定器のオフセット値 の違いによるものである.オフセット値は測定試 料の直径をノギスで複数回測定し、その平均値を 用いてその都度設定している.このため 2009 年 と 2019 年ではノギスによる直径の測定箇所の違 いにより、この差が生じたものである.しかし 全試料でコアの直径分布のピークの方向や振幅 は極めて再現性が良く、表1及び図4に示した ⊿d及び d_{max}の方位 α も良く一致している.な お No.560 の ∠dは、2009 年より 2019 年の方が わずかに大きい.これは測定した粗粒花崗岩の中 でも、比較的粒径の異なる鉱物が不規則に分布し

2009年 2019年 測定 測定深度 77 断面 地質 Δd α Δd α No. (数) (m) (m) mm $(^{\circ})$ (mm) (°) 445.09 445.22 8 0.0186 117 445m 445.30 445.65 0.0183 123 8 485.60 485.95 0.0095 16 0.0096 16 485m 8 粗粒 486m 486.25 486.50 6 0.0117 17 0.0120 18 花崗岩 560m 560.45 560.85 8 0.0075 75 0.0101 71 569m 569.75 9 0.0129 5 0.0139 7 569.35 573m 573.20 573.50 7 0.0075 106 0.0080 105 0.0213 658m 658.20 658.45 6 98 0.0207 98

細粒

花崗岩

658.75

658.95

5

0.0168

96

0.0177

94

659m



表1 コアの直径測定深度と測定結果.





図 5 2009 年と 2019 年に測定したコアの直径分布の比較.

ており,この粒径の違いを反映している可能性が 考えられる.

3. 考察

3.1 2009 年と 2019 年の測定値のばらつき

測定したコアの直径分布と(2)式による理論 曲線の残差の標準偏差を表2に示す.2009年と 2019年の標準偏差は1~3µm程度であり、これ は寸法測定器の測定精度と同程度である.した がって採取後長年経過しても、測定値のばらつき に明瞭な変化はないことがうかがえる.

3.2 コア直径の測定間隔の違いの影響

No.485m の粗粒花崗岩と No.658m の細粒花崗 岩コアについて, 2021 年に 1 cm 間隔で直径測定 を実施し, それぞれの測定断面毎に最小二乗法で (2) 式に回帰して *d*_{max}, *d*_{min} 及び α の最適解を求 めた. 図 6 に示す *d*_{max}, *d*_{min} 及び α の深度分布に よれば、粗粒花崗岩と細粒花崗岩ともに、測定深 度にかかわらず、*d*_{max}、*d*_{min}及びαはほぼ一定で ある.このことはコアがほぼ一様に変形している ことを示している.

次に1cm間隔毎の⊿d及びαの平均値と標準 偏差を求め、2章に示した複数断面の平均から求 めた値と比較した結果を表3に示す.粗粒花崗岩、 細粒花崗岩の両者ともに⊿d及びαは良く一致し ている.したがって、同一のコア試料であれば測 定者や測定間隔が異なっていても、測定結果に大 差はないと考えられる.

これまでのコア変形法によるコアの直径測定 では、コア試料1本について数断面の直径を測定 し、その平均の直径分布から⊿dとαを求めてい たが、測定断面を多くすれば、それぞれの断面で 求めた⊿dとαからそのばらつきを評価すること ができる.ただし、この場合、測定に要する時間 がかかるので、必要に応じて両者の測定パターン を使いわければ良いと考える.

		理論曲線との残差の標準偏差(μm)									
地質		粗粒花崗岩							細粒花崗岩		
コアNo.		445m	485m	486m	560m	569m	573m	658m	659m		
測定時期 (年)	2009	1.2	1.3	1.6	1.2	1.5	1.5	2.5	3.2		
	2019	1.8	1.3	1.5	1.5	1.5	1.6	1.7	1.8		

表3 2009年、2019年及び2021年の測定結果の比較.

表 2 2009 年と 2019 年の理論曲線との残差の標準偏差.

		測定	測定深度		測定		A .J	
コアNo.	地質	時期	上限	下限	断面		Δa	α
		(年)	(m)	(m)	(数)		(mm)	(°)
485m	粗粒	2009	485.60	485.95	8	平均	0.0095	16
	花崗岩	2019	485.60	485.95	8	平均	0.0096	16
		2021	485.60	485.95	36	平均	0.0100	17
						標準偏差	0.0026	7
658m	細粒	2009	658.20	658.45	6	平均	0.0213	98
	花崗岩	2019	658.20	658.45	6	平均	0.0207	98
		2021	658.20	658.45	26	平均	0.0196	97
						標準偏差	0.0022	4



図6 d_{max}, d_{min} 及び d_{max} の方向 α の深度分布.

3.3 粘性変形の影響

コア変形法では弾性変形を前提としているが、 粘性変形が生じる場合のコアの変形に及ぼす影響 について考察する.

田中(2014)にしたがって岩石のクリープ挙動を粘弾性三要素モデルで表すと、応力解放後の時間 t の経過とともにコア直径 d'は次式で表わされる.

$$d' = d_0 \left\{ 1 + \varepsilon + a\varepsilon \ (1 - e^{-bt}) \right\}$$
(3)

ここに、 ε :応力解放による弾性ひずみ、a: クリープ係数、b:遅延関数、 d_0 :原位置の岩盤 から切り離される瞬間のコア直径である.次に時 間経過に伴う最大直径 d'_{max} 及び最小直径 d'_{min} は 次式で表される.

$$d'_{\max} = d_0 \left\{ 1 + \varepsilon_{\max} + a\varepsilon_{\max} \left(1 - e^{-bt} \right) \right\}$$

$$d'_{\min} = d_0 \left\{ 1 + \varepsilon_{\min} + a\varepsilon_{\min} \left(1 - e^{-bt} \right) \right\}$$
(4)

ここに、 ε_{max} 、 ε_{min} はそれぞれ最大直径、最小 直径方向の弾性ひずみである.以上より時間 t経 過後の直径差 $\Delta d'$ は次のように表される.

したがって(5)式より,十分な時間が経過し て粘性変形が完了後の⊿d'は弾性変形のみの⊿d より(1+a)倍大きくなり,(2)式で表される主 応力差 S_{Hmax}-S_{hmin}も(1+a)倍となる.一般に 硬岩のクリープ係数 a は軟岩よりも小さく,粘性 変形の影響はほとんど受けないと考えられるが, 軟岩などの粘性変形の影響が無視できない場合 は,(2)式による主応力差が過大に評価される可 能性があるため,コア回収直後に直径測定を速や かに実施することが望ましい.

4. まとめ

コア変形法は応力解放に伴うボーリングコア の弾性変形から原位置の応力を評価する手法であ るが、応力解放後の非弾性変形の影響に関する検 討の一環として採取後長年経過した硬岩コアへの 適用性について検討した.用いたコアは2005年 に採取された花崗岩コアであり、2009年、2019 年及び2021年に同一コアの直径測定を行った. その結果、コアの直径分布は再現性が良く、それ から求めたコアの直径差⊿dとdmaxの方位αは 測定者や測定間隔が異なっていても、ほぼ一致し ていた.一方、軟岩など粘性変形が無視できない 場合には、(2)式による主応力差が過大に評価さ れる可能性があるため、コア回収後時間をおかず 速やかにコア直径の測定を行うことが望まれる.

文献

- 長秋雄(2007): 産総研岡山応力測定孔での水 圧破砕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発表講演集, 153-154.
- 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.
- Funato, A. and Ito, T. (2017): A New Method of Diametrical Core Deformation Analysis for In-Situ Stress Measurements. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 91, 112–118.
- 船戸明雄(2021):コア変形法(DCDA)の適用 拡大と高度化の現状.深田地質研究所年報, 22, 21-32.

鈴木寿志・能美洋介(2008):岡山市の花崗岩

の岩相と丘陵地形の関係. Naturalistae, 12, 1-8.

- Penido, H. A., Funato, A., Metsugi, H., Navarro Torres, V. F., Sotomayor, J. M. G., Dight, P., Figueiredo, R. P., Assis, A. P. and Guimaraes, A. (2021): Application of the HF, DRA and DCDA technologies for in situ stress determination in Iron Quadrangle rock masses. *Geomechanics* and Geoengineering, 17(5), 1670–1694.
- 田中莊一(2014): 堆積性泥質軟岩の物理・力学 的特性評価手法に係る若干の考察. 深田地質 研究所年報, 15, 117-129.