マイクロフォーカスX線CTを用いた拘束圧および 間隙水圧変化による岩石の変形挙動観察について

高橋 学*・藤野 翔**・竹村 貴人***・道口 陽子****

要 旨

5ミクロンの解像度で3次元画像を取得できるマイクロフォーカスX線CTを用いて, 種々の拘束圧・間隙水圧条件下での岩石の変形様式を可視化した。岩石供試体に拘束圧と間隙水圧を同時に負荷できる新しい圧力容器を開発した。直径10mm, 高さ20mmのベレア砂岩と能登珪藻泥岩の円柱状供試体を用い, 各供試体の15度おきの直径を各拘束圧・間隙水圧条件下で測定した。各岩石の直径は有効拘束圧の原理に従いながら有効拘束圧の増加とともに単調に減少した。载荷中, 特定の方向の直径変化が著しいことが確認され, その直径変化は最大8%に達し, 結果として载荷中における変形の異方性が生じた。本文で示したようなマイクロフォーカスX線CTによる変形測定手法は, 種々の拘束圧・間隙水圧条件下における小さなそして不規則な形状をした岩石の変形計測に適していると言える。

Key words: マイクロフォーカスX線CT micro focus X-ray CT, 間隙水圧効果 pore pressure, CT用圧力容器 pressure vessel for X-Ray CT, 変形の異方性 deformation anisotropy

1. は じ め に

静水圧のみの負荷を目的としたマイクロフォーカスX線CT用圧力容器が開発され(高橋ほか(2004)¹⁾, TAKAHASHI *et al.* (2006)²⁾), ベレア砂岩の静水圧増加に伴う空隙率の変化が観察され, あるいは稚内層硬質頁岩の亀裂閉鎖が確認された。これらの研究では, 空隙率の比較的大きな砂岩の静水圧の増加に伴う空隙率の減少が確認されると同時に, 局所的には砂岩中の石英粒子の回転・移動によると思われる空隙の増加という全体的な傾向とは反対の現象も確認された。また, 頁岩の事例では, 比較的低圧の静水圧でも既存亀裂幅が著しく減少することが確認されている。このような現象は载荷の初期における透水性の著しい低下

現象を説明することができる(高橋ほか(2004)¹⁾)。

地盤材料へのX線CTやマイクロフォーカスX線CTの利用に関しては, 近年多くの適用が試みられており, 非接触・非破壊の特徴を活かした多くの事例が報告されている(例えば, MEES *et al.* (2003)³⁾, OTANI and OBARA (2003)⁴⁾, DESRUES *et al.* (2006)⁵⁾など)。これらのほとんどは大気圧下での観察事例であり, わずかに砂や粘土を対象とした1 MPa以下の拘束圧条件下における変形・歪の局所化などの観察事例が報告されている。岩石を対象とした拘束圧実験の事例はごく低圧に限られている。

そこで, 高い拘束圧条件下で, さらに間隙水圧の作用した応力条件下における岩石を対象とした内部構造観察を主目的に新たなマイクロフォーカスX線CT用圧力容器を開発し, 2種類の堆積岩に対して適用し変形の異方性を確認することができたので, その事例を紹介する。

2. マイクロフォーカスX線CTの概要

マイクロフォーカスX線CTでは, 固定されたX線源とデータ取得する検出器(通常はイメージインテンシファイヤーと呼ばれる蛍光体が表面に塗られた撮像管と12ビット以上のA/D変換を行うCCDカメラから構成されている)が用いられている。X線は線源から扇状に進むので, 被写体を線源に近づけることによって検出器で得られるX線透過

* (独)産業技術総合研究所深部地質環境研究センター
 Research Center for Deep Geological Environments,
 AIST. (会員)

E-mail: takahashi-gonsuke@aist.go.jp

** 筑波大学大学院教育研究科 Master's Program in Education, University of Tsukuba.

*** (独)産業技術総合研究所地質情報研究部門 Institute of Geology and Geoinformation, AIST. (会員)

**** 筑波大学大学院生命環境科学研究科 Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba.

図-1 マイクロフォーカスX線CT装置の概要

像を拡大することができる。被写体は線源と検出器の間に位置する3次元ステージ上に置かれ、今回採用した装置では360度回転しながらX線透過像を取得する方式を採用している。X線CTの構造上の分類からすると、これを第3世代のCTと呼んでいる。マイクロフォーカスX線CT装置の簡単な構造上のレイアウトを図-1に示す。この装置はX線源、CT撮影部、CT検出部の三つに大きく分けられる。マイクロフォーカスX線CTは被写体を回転させながらX線を多くの方向から照射し、内部構造をX線の吸収率に基づいて決定する装置であり、さらに透視画像のように投影の情報を示すのではなく、ある任意の断面の2次元情報を再構成することができる装置である。マイクロフォーカスX線CTが通常のX線CTと異なるのは、X線源に到達する前の電子ビームを細く絞ることができる機能が付加されていることである。この機能によって5ミクロンの空間分解能が達成されている。検出器には通常、イメージインテンシファイアが用いられ、デジタルカメラを介してデータ取得を行っている。X線はイメージインテンシファイアによって光電子、可視光へと変換され、デジタルカメラはこの信号の高さ情報をA/D変換することによりイメージインテンシファイアに入射した透過X線の強度として捉えることになる。

3. 間隙水圧に対応した圧力容器の概念設計

圧力容器内にて拘束圧と間隙水圧を同時に岩石供試体に負荷するためには、拘束圧のみが作用する圧力容器に間隙水圧ラインを2系統(上流と下流)組み込む必要がある。通常の力学試験で使用する三軸試験装置の圧力容器では、供試体の上下端のエンドピース内に間隙水圧ラインを確保し、軸圧載荷用ピストンとは独立に配管し、圧力容器の上下の蓋部分から取り出す方法、あるいは軸圧載荷用ピストン内を加工した状態で圧力容器の外側から間隙水圧を供給する

番号	名称	材質
①	上蓋	SUS304
②	圧力容器本体	Engineering Plastic
③	エンドプラグ	SUS304
④	供試体	Rock
⑤	六角穴付ボルト	SUS304
⑥	ニードルバルブ	SUS304 他

図-2 新たに開発された間隙水圧負荷用圧力容器

方法を採用している。マイクロフォーカスX線CTは固定された線源と移動できる検出器の間の被写体を回転させながらデータ取得する方法を用いている。撮影被写体をX線源に可能な限り近づけ、より拡大した状態でCT画像を得るため、今回開発する圧力容器は極力小さな構造とする必

要があり、最終的には压力容器内径を20mm、外径を30mmと設計し、数十MPaの耐压構造とした。また、撮影中は被写体がステージ上に載り回転するため回転中心からできるだけ近くにバルブ類を配置する必要がある。さらに、回転ステージには重量の制限があることなどから压力容器はできるだけ軽く、しかも引張強度に十分耐えられる材質でなければならない。同時にバルブ類も小型軽量化されたものなどを採用する必要がある。

以上のような間隙水圧を新たに付加するための条件を満たすよう、図-2に示す拘束圧および間隙水圧同時付加压力容器を設計した。以下、簡単に各部を説明する。①は圧力フランジであり、基本的には静水圧用压力容器と同一である。②は压力容器本体であり、今回は材質として加工が容易で引張強度に優れているピーク材を用いた。これは圧力シール部のガスケット材として一般的に用いられている材質である。ここでは、CT測定 of 幾何学的な拡大率を大きくすることを優先的に考え、外径を30mmとして設計した。③はエンドプラグであり、直径10mm、高さ20mmの供試体に適合するよう設計した。間隙水圧ラインはこのエンドプラグに直結するものであり、16分の1インチ高压ステンレスチューブとOリングによって静水圧との隔離がなされている。⑥は拘束圧および間隙水圧上流・下流のための高压ニードルバルブであり、耐压は15,000psi(約100MPa)である。ポータブル水圧ポンプの最大負荷能力は42MPaである。

4. 撮影事例

供試体としてベレア砂岩、能登珪藻泥岩の2岩種を用い

図-3 Berea砂岩(a)および能登珪藻泥岩(b)のCT画像

た。図-3はベレア砂岩、能登珪藻泥岩のCT画像をそれぞれ示す。直径10mmの各サンプルがシリコンゴムによって被覆されている様子がわかる。ベレア砂岩は図-4(a)の水銀圧入式ポロシメータで得られた空隙率と空隙サイズ分布で示されるように、空隙率約18%の均質な砂岩であり、空隙サイズも比較的大きなものが卓越している。一方、能登珪藻泥岩は約35%もの大きな空隙率とベレア砂岩に比べかなり小さな空隙が卓越することで特徴付けられる。

このような岩石を用いて以下のような方法で各応力条件下における直径変化率を計測した。

- 1)各応力条件下における画像を選び、基準画像(1)として選択する。
- 2)直径変化計測のための目盛りを作る画像(2)を作成し、直線ツールで縦軸をひく(図-5A参照)。
- 3)前項でひいた直線を複製し、変形・回転機能を用いて15度おきに直線を配置する。各直線を整列ツールで水平方向、鉛直方向に配列し中心を揃える(図-5B参照)。
- 4)直線がすべて選択された状態でグループ化し、基準画像(1)の画像上の中心に合わせてグループを解除し、サンプル端と思われる位置まで各直線を修正し、その距離を計測する(図-5C参照)。こうして得られた直径変化の計測精度は10mmの実寸法に対し、200mm近い拡大画面上で±1mm以内であった。

こうして得られたベレア砂岩の拘束圧(P_c)と間隙水圧(P_p)の変化に対応する画像上における直径変化のローズダイアグラムを図-6(a)に、そして有効拘束圧の変化に対する平均直径の変化を図-7(a)に示す。ローズダイアグラム

(a) Berea砂岩

(b) 能登珪藻泥岩

図-4 ポアサイズ分布

図-5 各応力条件下における直径変化の計測方法

図-6 各種応力条件下の変形

図-7 有効拘束圧による平均直径の変化

は、各応力状態における平均直径からの差を歪に変換して15度ごとに計測した結果を示している。なお、各応力状態における歪の計測精度は、画像上1ピクセルオーダーであり約0.02%相当となる。拘束圧5MPaの载荷で45・225度方向が著しく収縮している。この状態から間隙水圧が1MPa負荷されると、15・195度方向が顕著に膨張している。45・225度方向の収縮傾向は変化していない。さらに間隙水圧が3MPaに増加されるとやはり15・195度方向の膨張が卓越した状態が続いている。拘束圧が10MPa、間隙水圧が3MPaと有効拘束圧が増加してもこの傾向は変わらない。有効拘束圧の観点から整理すると図-7(a)のようになり、基本的には有効拘束圧の増加に伴い平均直径は減少、すなわち収縮していることが認められる。ただし、ベレア砂岩の(b)から(c)へ、(c)から(d)への間隙水圧の増加過程では必ずしもこの関係を維持しているとは言えず、間隙水圧の増加に対し平均直径が減少する結果となった。これはベレア砂岩では平均粒径が大きく、直径の計測位置が粒子のどこを通るかによって、あるいは図-6(a)の応力負荷前の(a)状態でも確認できるように±0.5%程度の整形時における直径のばらつきがあること、などから考えるとベレア砂岩では1～2MPaの応力変化では、直径変化率は計

測精度の範囲内ということが言える。しかしながら、より大きな応力値に対する全体的な傾向は有効拘束圧依存性を明瞭に示している。平均粒径が大きく、直径の小さな供試体を計測対象としているので、このような計測上の誤差は避けられないと思われる。

同様に能登珪藻泥岩の事例を図-6(b)に示す。応力開始前の完全飽和状態で±2%程度の直径変化が示されている。拘束圧3MPaで60・240度方向が著しく収縮している。この傾向は拘束圧が増加しても変わらず、間隙水圧が変化してもその影響をほとんど受けないことがわかる。図-7(b)には有効拘束圧の変化に対する平均直径の変化を示しているが、ベレア砂岩と同様に明瞭な負の相関を示している。平均直径の変化率は最大で8%近くに達している。能登珪藻泥岩はベレア砂岩に比較してヤング率が小さく、平均粒径も著しく小さいので、各応力条件下における平均直径の変化はすべて有効拘束圧の変化に従っていることがわかる。

5. お わ り に

拘束圧や間隙水圧の変化に対応する岩石の変形を詳細に計測するため、マイクロフォーカスX線CT用の圧力容器を新たに開発した。直径10mmのベレア砂岩と能登珪藻泥岩の円柱状供試体を用いて拘束圧と間隙水圧を連続的に変化させながら、CT画像を用いて直径の変化を計測した。計測は15度おきに行い、各応力状態における平均値からの歪として評価した。その結果、両岩種とも拘束圧と間隙水圧の変化に伴う明瞭な異方性を示すことが確認できた。ただし、これらの岩種の初期状態(大気圧下)では弾性波速度などの物性値で評価できる異方性は確認されていない。今回の実験で確認されたのはあくまでも拘束圧と間隙水圧が作用する応力条件下での異方性である。地盤材料の変形特性を種々の応力条件下で評価することは歪ゲージや変位計な

どで計測可能であるが、小さな供試体や不規則な形状をした供試体の変形評価に、今回提案したX線CTを利用した新たな評価手法の有効性が示されたものと思われる。

引用文献

- 1) 高橋学・竹村貴人・加藤昌治(2004)：マイクロフォーカスX線CTを用いた拘束圧下における岩石の構造観察について，応用地質，Vol.45，No. 4，pp.192-196.
- 2) TAKAHASHI, M., TAKEMURA, T., HIRAI, H., MURAKOSHI, A. and KATO, M.(2006)：Spatial and density resolution in microfocus X-ray CT, applied to studies of microstructural changes in rocks with increasing hydrostatic pressure, *Advances in X-ray Tomography for Geomaterials*(Jacques Desrues *et al.* ed), pp.421-427.
- 3) MEES, F., SWENNEN, R., VAN, G. M. and JACOBS, P. (2003)：Application of X-ray Computed Tomography in the Geosciences, The Geological Society, 243p.
- 4) OTANI, J. and OBARA, Y.(2003)：X-ray CT for Geomaterials Soil, Concrete, Rocks, Balkema Publishers, 343p.
- 5) DESRUES, J., VIGGIANI, G. and BESUELLE, P.(2006)：Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, ISTE Ltd. 452p.

(2006年11月27日受付, 2007年8月10日受理)

Jour. Japan Soc. Eng. Geol., Vol.48, No.5, pp.253-257, 2007

Deformation Behavior of Rocks by Micro Focus X-Ray CT under Various Confining and Pore Pressures

Manabu TAKAHASHI, Syou FUJINO, Takato TAKEMURA and Yoko MICHIGUCHI

Abstract

To visualize in detail the manner of deformation in rocks under various confining and pore pressures, we used a micro focus X-ray CT system to obtain three dimensional image with high resolution of 5 micron. A new pressure vessel was developed to simultaneously supply both confining pressure and pore pressure to rock specimen. Berea sandstone and Noto diatomaceous mudstone specimen of 10 mm diameter and 20 mm length were deformed hydrostatically. The diameters at every 15 degree angle were measured under the various conditions of confining and pore pressures. The average diameter decreased monotonically with increasing effective confining pressure, following the law of effective confining pressure. Sensitive orientation around the specimen diameter during pressurization was recognized, deformation anisotropy under pressurization then emerged and the fluctuation of diameter reached a maximum value of 8 % in the case of Noto diatomaceous mudstone. In this paper, we demonstrated deformation measurements by means of micro focus X-ray CT. This measurement method is applicable for deformation measurements of small and irregular rock specimen under various confining and pore pressures.

Key words : micro focus X-ray CT, pore pressure, pressure vessel for X-Ray CT, deformation anisotropy