岩石内部亀裂系のフルカラー可視化法

清水 均^{*1}・高橋 学^{*2}・浜島良吉^{*3}

A Fullcolored Visualization Method of Stress Induced Microcracks in a Rock

Hitoshi SHIMIZU^{*1}, Manabu TAKAHASHI^{*2} and Ryoukichi HAMAJIMA^{*3}

Key words : 三軸圧縮試験 conventional triaxial compression test, 亀裂系の分布 distribution of stress induced microcracks, 可視化法 visualization method, 画像表示 image displaying

1. はじめに

「百聞は一見にしかず」という諺があるように、どんなに言葉を尽くしても説明できないことが、1枚の絵を見せるだけで簡単にわかることがある。これは、人間が画像の中の情報を一瞬のうちにに取り込み、解析して理解する能力を備えているためであると考えられる。また、画像の中の情報の1つである「その対象物が何であるか」を判断する基準には、「形」と「色」という2つの手がかりが考えられる。特に、他の感覚を表す言葉に比べると、色の感覚を表す言葉には誰にでも通用する共通語が最も豊富に存在し、その分類基準が明確である。

このような人間の視覚的判断基準に訴えるべく、地盤や岩石の亀裂群の観察および解析において、コンピュータを用いた画像処理や画像表示などの手法が盛んに用いられている。岩盤の地下流体挙動や力学的挙動を解明するためには、亀裂系の分布や形状の把握は非常に重要である。

しかし今までの手法による亀裂やポアの観察¹⁾は、そのほとんどが1枚の断面画像、あるいは1枚の薄片か

ら得られる2次元的な情報の把握でしかない。一方、すでに医療の分野においては実際の脳や心臓のデータに基づいて、それらの精密な3次元グラフィックス表示に成功し、任意断面の切り出し等によって腫瘍や血流の状態の把握に貢献している²⁾。

そこで本文では、三軸試験を行った稲田花崗岩の供試体の断面を、一定のピッチで連続的にCCDカメラを用いて画像入力し、その断面画像をコンピュータ内部で積

図-1 CLASS II 型の変形様式

^{*1} 埼玉大学大学院理工学研究科 Graduate Student, Faculty of Engineering, Saitama University

^{*2} 地質調査所 Environmental Geology Department, Geological Survey of Japan

^{*3} 埼玉大学工学部建設工学科 Faculty of Engineering, Saitama University

図 - 2 座標軸の設定と断面画像取り込み模式図

図 - 3 縦方向に拡大した断面図
(Y 軸に垂直 , 供試体中央部 134 番目の断面)

図 - 4 表示可能な断面の方向と位置関係

図 - 5 Y軸に垂直な断面を端部から順に表示した様子

み重ねることによって亀裂系の画像データを3次元構築し、フルカラーで内部断面を画像表示する手法が可能になったので紹介する。

2. 画像表示方法について

画像表示方法として AVS (Application Visualization System) を用いた。AVS は X ウィンドウシステムをベースとしたビジュアルイゼーションツールであり、ワークステーションからスーパーコンピュータまであらゆる環境での稼働が可能なため、現在コンピュータによる可視画像化の分野では、標準的なソフトウェアになりつつある。主要な機能としては、2次元のイメージデータに対して処理を施すイメージビューワ、3次元幾何座標データの表示を行うジオメトリビューワ、グラフを作成するグラフビューワ等がある。今回は取り込んだイメージデータを3次元的に積み重ねて、そこから2次元の断面データをイメージビューワを用いて画像表示するために AVS を利用した。

3. CCD カメラによる断面画像の取り込み

三軸圧縮応力下におかれた稲田花崗岩の供試体 (直径 30 mm, 高さ 60 mm) の割れ目系に、赤色顔料で着色された樹脂 (シアノアクリレート) を注入する。この際、供試体は最大強度点を過ぎて変形が応力の減少とともに減少する、いわゆる CLASS II 型の変形様式 (図-1) を示している。樹脂固化後、回転型断面研磨機を用いて供試体断面を研磨していき、ある規定の高さになったら断面画像を CCD カメラによって、フルカラーでワークステーションに取り込む (図-2)。そしてこの後は断面を 0.5 mm のピッチで研磨し、上記の作業を繰り返した。今回は、稲田花崗岩の 0.5 mm ピッチの離散的な断面画像を 98 枚得ることができた。すなわち、供試体高さ 60 mm のうちの 49 mm 分についての断面画像が得られたことになる。

4. AVS を用いた画像データの3次元構築

断面画像は取り込んだ順に AVS を用いて積み重ねられ、フルカラーの画像データとして3次元構築される。その画像データを縦方向 (重ねた断面を貫く方向) にスライスして画像表示すると、取り込んだ断面画像とは違う角度から岩石の内部の状況を確認できる。ただし、取り込んだ1枚の画像データの厚さは、研磨のピッチにかかわらず再構成して積み重ねた画面上ではすべて1ピクセルで表現されてしまうため、このままだと縦横のバランスが悪く、見づらいものとなる。そこで、高さ方

向に関して適当な倍率に拡大して表示すると、かなり荒っぽい印象の画像になってしまうが、視覚的に見やすい画像となり、供試体内部の亀裂系全体の把握を行うのに都合が良い (図-3)。

また、図-2の模式図に表したように、3次元直交座標系の座標軸を X, Y, Z 軸とすると、それぞれの軸に垂直な断面をスライスして表示することが可能である。すなわち、1つの方向から取り込んだ連続的な画像から、実際には観察が不可能な他の2つの方向からの画像を得ることができる (図-4)。今回使用した画像データは、Z 軸方向に垂直な断面が 98 断面、そして、それらの画像から作成される X および Y 軸方向に垂直な断面は、それぞれ 268 断面が表示可能である。

図-5 は Y 軸方向に垂直な断面を、供試体端部より 5, 30, 60, 90, 134 (中央部), 178, 208, 238, 263 番目の順に切り出し、表示した様子を示している。AVS を用いることによって、このようにナイフで切り出すような感覚で供試体の断面画像を簡単に得ることができ、しかも別の角度、任意の切り出し位置のフルカラー画像を表示することが可能となった。また、図-6 に一連の処理をフローチャートにして示した。

5. 赤色で表示される領域の持つ意味

図-5 の断面画像において、5, 30, 238 および 263 番目等の断面外郭部に見える黄色の部分は実験時に塗布したシリコン樹脂である。内部に存在する赤系統の色で表示されている部分が、亀裂系に浸透した赤色の樹脂である。特に中央部の 134 番目の断面 (図-3 右側と同一断面) を見ると、右側上部と左右下方両外郭部は広い範囲で面的に赤色樹脂が浸透しているのがわかる。また、断面を斜めに横断している線形の赤色樹脂も数本確認できる。

これは、今回の画像取り込みピッチが 0.5 mm と荒くなっているために、供試体外側に存在する幅の小さい微小亀裂やいわゆる破碎帯となっている部分は、それらが面的に表示され、そして亀裂幅が小さいものは線形のつながりとして表示されているものと考えられる。

既述したように、本供試体は図-1 のような CLASS II 型の挙動を示し、実験は応力帰還法によって破壊後領域まで制御されたものである。樹脂注入は破壊後領域で载荷を一時中断して行われ、その後 5~6 時間、応力を制御した状態で保持しているため、赤く着色されている部分は破壊後領域において樹脂が通った道筋であると同時に、周辺に拡散、湿潤した範囲をも示していることになる。したがって、赤く着色表示される部分は、流体の

図-6 岩石の内部の亀裂構造の可視化のフローチャート

通過経路そのものの幅を示しているものではないことに注意しておかなければならない。シアノアクリレートのような一般の樹脂では鉱物粒子を潤れさせてしまうので、亀裂の幅そのものの把握という意味では、本手法は限界があるものと思われる。

フルカラー表示された図(図-5, 134th)中央部付近は、左右の赤く着色された領域に比べて線の幅が狭いことに気付く。これは透水係数等の固有な値を決定しているのは、より着色領域の広い左右の部分であるが、それらを連結しているような形で存在する中央部の狭い亀裂は、応力の変化等による透水性の変化に対し支配的な存在となりうることを示している。すなわち、応力(外力)の増加はより狭い亀裂から閉鎖させてしまうので、わずかな応力の増加により、狭い領域が閉じてしまえば、系全体の透水係数は大きく変化する。したがって、岩石中

の流体移動を考える場合、大きな亀裂(というよりは孔隙等)よりもむしろそれらを連結している亀裂を考慮の対象としておかなければならないと思われる。

6. ま と め

従来、応力を負荷した状態での亀裂の可視化はその技術的な困難さから、ほとんど手を付けられてこなかった。今回は三軸応力下に置かれた稲田花崗岩の供試体を、最大強度点を過ぎ、荷重が変位とともに減少する変形領域で応力制御を行いながら樹脂を注入し、樹脂の固化後取り出して既述のような画像を得ている。応力によって生じる亀裂のうち、地下水等の流体の移動、湿潤に支配的な亀裂系の実態というのは従来未解明であり、本手法による可視化技術により亀裂系を直接見ることは有意義なことと思われる。

しかしながら、解明しなければならないのは、「流体は、亀裂系の中をどのようなアルゴリズムで移動、湿潤していくのか」という問題であり、この意味では今後解明しなければならない問題が数多く存在することも事実である。

著者らは現在、亀裂をより鮮明に抽出できるレプリカフィルム³⁾を用いて、同じく3次元的に亀裂系を把握する試みを行っている。この手法により、亀裂系の抽出はより精度の高い段階に入るものと思われる。種々の物性と亀裂との関連が明らかにされる日を待ち望んでいる。

参 考 文 献

- 1) 高橋 学, 薛 自求, 大和田朗, 石島洋二(1992): 青色顔料を混合した樹脂によるポア観察について, 応用地質, Vol. 33, No. 5, pp. 294-306.
- 2) 高野政明, 三浦慶和, 小堺加智夫, 木暮 喬ほか(1994): Application Visualization System(AVS)における脳, 心臓の三次元表示, THE 5TH JAPAN AVS CONFERENCE 講演予稿集, pp. 197-205.
- 3) 鈴木清史, 高橋 学(1994): レプリカフィルムを用いた空隙, 亀裂の可視化法, 応用地質, Vol. 35, No. 2, pp. 77-78.

(1995年4月26日受付, 1995年5月24日受理)