画像処理による微細な割れ目の抽出と評価

—— 風化した花崗岩と一軸圧縮試験を行った安山岩における微細な割れ目の解析 ——

楠田 啓*・西山 孝*

Extraction and Evaluation of Microcracks in Rocks by Methods of Image Processing

—— Examination of Microcracks in Weathered Granite
and Andesite Fractured by Uniaxial Compression Test ——

Hiromu KUSUDA* and Takashi NISHIYAMA*

Key words : 画像処理 image processing, 微小割れ目 microcrack, 蛍光法 fluorescent method,
花崗岩 granite, 安山岩 andesite, 一軸圧縮試験 uniaxial compression test

Abstract

Examination of microcracks by image processing, including pattern recognition and image analysis, is becoming popular in applied geology. In the case of image processing, microcracks in rocks are usually recognized by apparent features, such as differences in brightness, color and/or pattern. On microscopic examination, it is usually difficult to distinguish microcracks from the other elements. The fluorescent method was devised recently to visualize microcracks and cavities in rock and concrete specimens. This method is useful for image processing because images recorded by a CCD camera under ultraviolet ray display a great difference of brightness between microcracks and other texture.

We tested five techniques of image processing, linear differential operator (Sobel operator), quadratic differential operator (Laplacian operator; matrix size= 3×3 or 9×9), and template matching operator (Kirsch operator and line detection operator), to extract microcracks in weathered granite and andesite fractured by uniaxial compression test retreated by fluorescent method. Actual microcracks in specimens of weathered granite were represented most realistically by thinned binary image obtained by Laplacian operator (matrix size= 9×9).

Image analysis of microcracks in specimens of andesite fractured by uniaxial compression test was also performed. The results revealed that two types of microcracks, tensile cracks parallel to major principal stress and shear cracks inclined to major principal stress, were extracted. It was also demonstrated that parallel microcracks were formed mainly in groundmass, while inclined microcracks were present mainly in phenocrysts.

* 京都大学工学部 Faculty of Engineering, Kyoto University

1. はじめに

画像処理によって岩石中の微細な割れ目を抽出し、解析するために、種々の方法が試みられている^{1),2)}。しかしながら、画像処理によって微細な割れ目を抽出することは必ずしも容易ではない^{3),4)}。その理由は、割れ目がさまざまな色や形状を有しており、これらを的確に識別できる顕著な特徴が存在しないためである⁵⁾。ところが、近年研究を進めている蛍光法は、岩石やコンクリート中の割れ目や間隙を蛍光剤により可視化する方法で、可視化された割れ目や間隙とそれ以外の部分との輝度差が大きく、画像処理に適している^{6),7)}。これまでに画像処理法と蛍光法を組み合わせることで花崗岩や凝灰岩中の割れ目や間隙の観察と解析を行った。また、画像処理結果により求められた輝度の濃淡が有効間隙率やP波伝播速度などの物理試験結果とも一致していることを報告した^{8),9)}。

本研究では、風化した花崗岩中と、一軸圧縮試験の行われた安山岩試料中に発生している複雑な割れ目を対象として、蛍光法により得られた画像から割れ目を的確に抽出する手法を検討し、さらに、抽出された割れ目の2値画像から、割れ目の特徴の定量的な解析、評価を試みた。

2. 画像処理における割れ目の認識

画像処理装置（コンピュータ）が割れ目の特徴を利用してその存在を認識する手段としては、1)明るさの違いとして認識する方法、2)色の違いとして認識する方法、3)パターンの違いとして認識する方法、の3つがある^{10),11)}。

一般に行われている明るさの違いとして割れ目を認識する方法は、もっとも単純な手法であり、明るさの程度を白～灰～黒の連続した変化（輝度レベル）、すなわち0～255の256レベルに量子化して表現するものである。したがって、割れ目の部分が他の部分よりも著しく明るい、もしくは極端に暗い場合には、この方法は有効な手段である。たとえば、開口している割れ目では光の照射方向により陰の部分が暗くなる。また、充填されている割れ目では母岩と充填物との間の輝度に大きい差があることがある。このような場合には、輝度レベルの違いとして割れ目を認識することは可能である。

次に、色の違いとして割れ目を認識する方法は、画像の色情報をRGB（赤、緑、青）の3要素に分割し、明度、色度の色座標系で色を識別するものである。したがって、特徴的な色をした充填物で割れ目が着色されてい

るような場合には効果的である。しかし、通常、自然界の岩石や鉱物では種々の色が存在しており、色情報だけで割れ目を分離できることは稀である。

第3番目の、パターンの違いとして割れ目を認識する方法は、あらかじめ特定のパターンのモデルを設定し、そのモデルともっとも良く似た形状のものを割れ目だと判断する方法である。この手法は、はっきりとした線状を示す新鮮な割れ目や、劈開のように特徴的な方向を持つ割れ目に対しては有効と考えられる。しかしながら、この方法は計算量が多いため、あまり複雑なモデルを設定しておくで処理時間が長くなり、迅速な解析ができない。したがって、モデルの初期設定が重要である。

3. 前処理と画像の入力

すでに述べたように、輝度レベルの差の大きい画像を得るためには蛍光法は極めて有効な手段である。蛍光法とは、蛍光染料を添加した浸透性の良い樹脂を岩石中の微細な割れ目や間隙に浸透させ、紫外線を照射することによりこれらを発光させて微細な割れ目や間隙を可視化するもので、樹脂の充填方法や顕微鏡観察結果についてはすでに報告した^{6),7)}。本研究では、蛍光法で得られる画像の解析に限って論じる。

画像の入力方法としては、テレビカメラで入力する方法と、スキャナで入力する方法の2つがある^{9),10)}。テレビカメラを用いる方法は、単純で操作性も良く、大きさや形状の異なる試料に対して適用範囲は広い。また、最近では極めて高感度のCCDカメラも廉価で発売され、微妙な輝度レベルの違いも認識できるようになってきた。しかし、レンズの影響で画像周辺部に歪みが生じるので、この点には注意が必要である。

一方、スキャナを利用する方法は、一般にテレビカメラに比べて分解能が良く、周辺部の歪みも少ない。しかしながら、読み込む物体は平面であることが必要で、かつ対象物の大きさにも制限がある。さらに、スキャナで使われている光源は一般に可視光であるため、蛍光法のように紫外線を照射して割れ目や間隙を可視化するには特別な装置の開発が必要である。

このようなことから、以下の研究では、画像入力装置として高感度モノクロCCDカメラを使用し、画像周辺部の歪みをできるだけ除去するために、ウインドウ設定により入力画像の周辺領域を除外した。

4. 割れ目の抽出

4.1 割れ目の抽出に用いられる画像処理の手法

入力された画像から割れ目のみを抽出し、割れ目の特

図-1 画像処理による割れ目の抽出結果の比較

(a) 原画像, (b) Sobel オペレータによる抽出結果, (c) Laplacian オペレータ (3×3) による抽出結果, (d) Laplacian オペレータ (9×9) による抽出結果, (e) Kirsch オペレータによる抽出結果, (f) 線検出オペレータによる抽出結果

(↓: 強く発光している連続性のよい割れ目, ↓↓: 明るい粒子内部に存在する連続性の悪い割れ目, ↓↓↓: 画像処理の結果発生した細かい枝)

性を解析, 評価するために画像処理が行われている。その手法としては, さまざまなものが提案されているが, 確立された操作手順があるわけではなく, 試行錯誤により適切な方法を選択しているのが現状である。また, 画

像処理では, 操作が複雑になればなるほど情報は加工され, 本来の情報からかけ離れてゆく傾向がある。できるだけ単純な操作で処理するのが望ましい。

割れ目のような線状の物体の抽出には, しきい値処理

がもっとも頻繁に使われ、その他によく用いられるものとして微分処理と最適あてはめ法の2つがある^{1),2),11)}。

1) しきい値処理

これはしきい値処理だけで割れ目を抽出する方法で、コンクリート中の気泡や割れ目の解析に成功している^{7),12),13)}。しかし、岩石の場合には、狭い範囲の中でも鉱物粒子の色調や透明度などが不均一になっていることが多く、微小部分で微妙な違いを生じているのが一般的である。そのため、岩石、とくに風化した岩石中の割れ目をしきい値処理だけで抽出することは困難である。

2) 微分処理

微分オペレータは、画像のエッジ強調、割れ目の鮮鋭化に用いる手法である。微分オペレータには、1次微分オペレータ (Sobel オペレータなど) と、2次微分オペレータ (Laplacian オペレータ) がある。

1次微分オペレータは、上下あるいは対角方向の1次偏微分から勾配ベクトルを求め、画像のエッジを検出するものである。この処理は、画像中の雑音の影響を受けにくいという長所があるが、1次微分の演算は方向依存性があるために複数の方向から微分処理をする必要がある。2次微分オペレータは2次の偏微分を計算することによりエッジを検出するものである。これは等方的な微分演算であるためエッジの方向に依存性はなく、処理時間は短い。しかしながら、このオペレータでは加重マトリックスのサイズが小さいと、エッジだけでなく雑音成分をも強調するという欠点があり、雑音を少なくするためには加重マトリックスのサイズを大きくするか、平滑化などの手法と組み合わせる必要がある。

3) 最適あてはめ法

最適あてはめ法は、検出したい理想的なエッジや線のモデルを想定し、このモデルともっとも良く合致するものを抽出する手法である。この手法は、2値画像のように対象物とそれ以外の部分との間に顕著な輝度レベルの差がある場合には有効な方法であるが、割れ目の境界が漸移しているような場合には確かな抽出ができない。また、先に述べたように、対象物が複雑な形状や方向を持つ場合には、いくつものモデルを設定しておかねばならない。

4.2 割れ目の抽出結果の比較

次に、これまで述べてきた画像処理の手法を風化花崗岩試料に適用した例を示す。図-1aは原画像で、割れ目の抽出画像 (図-1b~f) は種々の処理をした場合の2値画像をHilditchの方法により細線化したものである。

1) 1次微分オペレータ (Sobel オペレータ)

図-2 割れ目の抽出に用いた5種類のオペレータ

- (a) Sobel オペレータ, (b) Laplacian オペレータ (3×3), (c) Laplacian オペレータ (9×9), (d) Kirsch オペレータ, (e) 線検出オペレータ

図-3 画像処理における画素の連結性
(a) 4近傍連結, (b) 8近傍連結

図-4 岩石中の割れ目を抽出、解析する画像処理フロー

このオペレータは、3×3の加重マトリックスを用いて、注目する画素の近傍領域内の濃度重みを計算するものである (図-2a)。図-1bはこのオペレータを用いて割れ目を抽出したもので、強く発光している割れ目 (↓)

図-5 一軸圧縮試験を行った安山岩試料中の割れ目の画像処理

(a) 原画像 (→←: 載荷方向), (b) ダイナミックレンジの拡大処理によりコントラストを強調した画像, (c) Laplacian オペレータ (9×9) により割れ目を強調した画像, (d) 割れ目を抽出した 2 値画像, (e) 割れ目の細線化 2 値画像, (f) 最大主応力方向に平行な割れ目を分離したもの, (g) 最大主応力方向に垂直な割れ目を分離したもの, (h) 最大主応力方向に斜交する (右上) 割れ目を分離したもの, (i) 最大主応力方向に斜交する (左上) の割れ目を分離したもの, (j) 石基部分 (黒色) と斑晶部分 (灰色) における最大主応力方向に平行な割れ目の分布, (k) 石基部分 (黒色) と斑晶部分 (灰色) における最大主応力方向に斜交する割れ目の分布

については良く抽出されている。しかしながら、粒子全体が明るく発光している中に存在している割れ目(↓↓)については、形状が正しく抽出されているとは言えな

い。

- 2) 2 次微分オペレータ (3×3 の加重マトリックス)
3×3 の加重マトリックス (図-2b) により 2 次微分

の計算をする方法で、もっとも単純な Laplacian オペレータである。割れ目の抽出結果は図-1cのように全般的に悪く、明るい粒子内部に存在する割れ目(↓↓)は実際とは異なった割れ目として抽出されている。

3) 2次微分オペレータ(9×9の加重マトリックス)

2次微分オペレータの持つ雑音成分に反応しやすい欠点を改善するために、局所領域の濃度和の差分を求める9×9の加重マトリックス(図-2c)を用いて線状の物

体を強調したものである。図-1dに示すように、ほとんどの割れ目に対して良好な抽出結果が得られている。

4) 最適あてはめ法(Kirschオペレータ)

8つのエッジのモデル(図-2d)を画像中の3×3の領域にそれぞれ掛け合わせ、もっとも高い値を出力するモデルを選ぶ手法である。このオペレータにより割れ目を抽出した結果は図-1eのとおりで、全般的に良好な結果を示しているが、連続性の悪い短い割れ目について

は十分な抽出ができていない部分も存在する。

5) 最適あてはめ法 (線検出オペレータ)

4つの加重マトリックスにより水平、垂直、右上、左上の4方向の線のモデルを設定し、画像をフィルタリングすることで、線状の物体を検出するオペレータである (図-2e)。抽出画像を見ると、連続性の良い割れ目については良く抽出されているが、抽出した割れ目の線から細かい枝が発生している部分も多く見られ(↓↓↓)、現実の割れ目の状況をうまく反映しているとは言えない (図-1f)。

目的に応じて異なるが、以上の結果から判断すると、これらの中で2次微分オペレータ (9×9の加重マトリックスサイズ) が割れ目の抽出にはもっとも有効であることがわかる。

5. 割れ目の特徴解析

次に、割れ目の持つ特徴を定量的に解析する方法を検討する。解析には、上記のもっとも良く割れ目を抽出してきた図-1dを用いた。この画像は、9×9のマトリックスサイズのLaplacianオペレータで、割れ目のような幅の狭い物体を選択的に強調して割れ目を抽出した細線化2値画像である。そのため、幅の情報は失われているが、割れ目の存在位置に関しては正しく表現されている。そこで、割れ目の特徴の中で長さや方向性の2つのパラメータを解析した。

まず、割れ目の長さの解析方法について検討する。割れ目は細線化画像においては、個々の画素の連続体となっている。画素の連結のタイプとしては、上下に画素が連続している場合 (4近傍連結: 長さ2) と斜めに画素が連続している場合 (8近傍連結: 長さ $2\sqrt{2}$) の2種類がある (図-3)。したがって、長さを正しく計測するためには、単純に割れ目部分の画素数 (すなわち面積) では長さを正しく表現することができない。このことを考慮して、割れ目の長さを計測する2つの手法を検討した。その1つは、割れ目と判断される物体の周囲長を計測し、その1/2を割れ目の長さとして近似する方法である¹⁰⁾。この方法ではどのような形状の割れ目でも測定可能であるが、割れ目の両端の1画素分の誤差が生じるため、短い割れ目ほど誤差が大きくなる (図-3)。

2つめの手法は割れ目を枝毎に分割した後に、分割された物体の最大径を求め、これを割れ目の長さとして近似する方法である。この方法では割れ目の両端の相対的な座標が決まるので、相対座標系から長さを求めることができる。また、両端の座標が決まるために、長さだけでなく方向も同時に計測できるという利点を有する。その反

表-1 一軸圧縮試験の実施された安山岩試料中に発生している割れ目の特徴解析結果

割れ目の方向	最大主応力方向とのなす角 (°)	度数 (本)	頻度 (%)	累積長さ (mm)	頻度 (%)	平均長さ (mm)
最大主応力方向に平行	-22.5 ~ 22.5	280	58.0	116.1	63.9	0.45
最大主応力方向に斜交	22.5 ~ 67.5	61	13.6	21.2	11.7	0.35
最大主応力方向に垂直	67.5 ~ 112.5	23	5.1	5.9	3.2	0.25
最大主応力方向に斜交	112.5 ~ 157.5	104	23.2	38.5	21.2	0.37

面、枝での割れ目の分割が不完全な場合には、最大径と長さとは全く対応しないことになる。したがって、いかに割れ目を正しく枝で分割できるかがこの手法における重要なポイントである。

6. 一軸圧縮試験が行われた安山岩中の割れ目の解析

6.1 割れ目の長さ、方向の分布状況

一軸圧縮試験が実施された安山岩試料中に発生している割れ目を画像処理により特徴解析した。解析領域は10 mm×15 mmの範囲である。画像処理のフローは図-4のとおりで、まず、入力した画像 (図-5a) のコントラストを強調するために、輝度レベルのダイナミックレンジを線形に拡大した (図-5b)。次に、9×9のLaplacianオペレータにより割れ目の部分を選択的に強調した (図-5c)。さらに、しきい値処理により割れ目を抽出し (図-5d)、細線化処理、ノイズ除去処理を行って得られた細線化2値画像を、割れ目の特徴解析のための基本画像とした (図-5e)。

次に、すでに述べた線検出オペレータにより割れ目を4方向の成分に分割した (図-5f~i)。それぞれの方向の成分について解析した割れ目の本数、累積長さ、平均長さは表-1のとおりである。試料中の割れ目は最大主応力方向と平行な成分がもっとも卓越し、全割れ目の64%を占めている。最大主応力方向に垂直なものはもっとも少なく、1.3%である。また、各方向成分毎にそれぞれの割れ目の長さを検討してみると、最大主応力方向の割れ目が全般的に長く平均値は0.45 mmで、さらに、最大主応力方向に斜交するもので、右上方向、左上方向の平均値はそれぞれ0.37 mm および0.35 mmである。最大主応力方向に垂直な割れ目はもっとも短く、平均値は0.25 mmとなっている。

6.2 割れ目の存在状況と岩石の組織との関係

解析の対象とした安山岩試料は堅硬な岩石で、岩石の一般的な破壊形式から判断して、最大主応力方向と平行な割れ目は引張り破壊により形成された割れ目と推測される¹⁴⁾。また、この方向の割れ目は石基の部分に多く存在し、斜長石を主体とする斑晶部分では少ない傾向が

表-2 石基と斑晶における割れ目の存在状況

割れ目の方向	石基 (%)	斑晶 (%)
最大主応力方向に平行	58.7	41.3
最大主応力方向に斜交	39.5	60.5

認められる。割れ目の抽出画像と斑晶を重ねて表したのが図-5j, kである。画像解析により、その比を求めると、石基中のものが58.7%、斑晶中のものが41.3%ということになる(表-2)。

逆に、剪断破壊によるものと推測される最大主応力方向に斜交する割れ目は、斑晶中に集中しているのがわかる。画素数の比で表現すると、斑晶中のものが60.5%、石基中のものは39.5%である(図-5k)。

7. おわりに

繰り返し述べたように、画像処理による割れ目の抽出、解析は試行錯誤、経験の積み重ねによって研究が進められているが、本研究では風化した花崗岩および一軸圧縮試験の行われた安山岩試料について、蛍光法により得られた画像をもとに割れ目の解析を行った。

その結果、9×9マトリックスサイズのLaplacianオペレータがもっとも現実に近い形で割れ目を抽出できることがわかった。また、割れ目の特徴を定量的に解析する方法としては、線検出オペレータを用いて割れ目を4方向の成分に分離した後に、長さと方向性を同時に計測する方法が簡便かつ有効であった。さらに、一軸圧縮試験の行われた安山岩試料においては、最大主応力方向に平行な引張り割れ目と、最大主応力方向に斜交する剪断割れ目の2種類の割れ目が個々に抽出され、引張り割れ目は石基の部分に、剪断割れ目は斑晶の部分に多く発生している状況が定量的に求められた。

〔謝辞〕 本研究に当って、関西大学工学部の西田一彦教授および山口大学工学部の水田義明教授には試料を提供していただいた。また、蛍光剤を添加した樹脂の開発に当っては東亜合成化学株式会社に、画像処理に関しては株式会社ピアスにお世話になった。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- ANDREA G. F. (1984): Image Processing of Geological Data, Computer Methods in Geosciences, Von Nostrand Reinhold Inc., pp. 29 - 190.
- Ulf BAYER (1985): Pattern Recognition Problems in Geology and Paleontology, Lecture Notes in Geosciences, Springer-Verlag, pp. 144 - 216.
- 小池克明, 伊藤博之, 大見美智人(1989): リニアメント解析のためのランドサット TM データの画像処理法に関する基礎的検討, 情報地質, 14B, pp. 25 - 39.
- 橋本文作, 佐藤高史, 本多 真(1990): 画像処理技術を用いた岩盤割れ目の調査システム, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 73 - 77.
- 高橋 学, 薛 自求, 大和田 朗, 石島洋二, (1992): 青色顔料を添加した樹脂によるボア観察について, 応用地質, Vol. 33, No. 5, pp. 294 - 306.
- 西山 孝, 楠田 啓, 北川元紀(1990): 蛍光剤を添加した樹脂による微小割れ目の視覚化と自動抽出, 資源と素材, Vol. 106, No. 10, pp. 573 - 579.
- 楠田 啓, 西山 孝, 西田一彦(1992): 花崗岩の風化に伴う微小割れ目の形成と間隙の発達について, 土質工学会論文報告集, Vol. 32, No. 2, pp. 169 - 175.
- 西山 孝, 楠田 啓, 斎藤敏明: 蛍光法による岩石中の間隙の観察と評価に関する二, 三の考察, 応用地質, Vol. 33, No. 1, pp. 17 - 22.
- 長尾 真(1992): 人工知能と人間, 岩波新書, pp. 43 - 100.
- 日本工業技術センター編(1985): コンピュータ画像処理入門, 総研出版, pp. 65 - 164.
- 西山 孝, 前川慎喜, 楠田 啓, 北川元紀, 中野欽一(1989): 染色したコンクリートの画像処理による観察, セメント・コンクリート論文集, No. 43, pp. 590 - 593.
- 西山 孝, 楠田 啓, 石田淳志, 金山清一(1992): 蛍光法によるコンクリートの経年変化の観察と評価について, 資源と素材, Vol. 108, No. 7, pp. 521 - 524.
- 楠田 啓, 西山 孝, 本居孝治(1992): 蛍光法による間隙および気泡の可視化と軽量コンクリート評価への応用, 建設用原材料, Vol. 1, No. 2, pp. 36 - 39.
- M. S. パターソン(1986): 実験岩石力学 - 脆性領域の岩石の変形および破壊 -, 荻野正二, 水田義明, 佐野 修共訳, 古今書院, pp. 15 - 45.

(1993年8月27日受付, 1993年9月22日受理)