

画像処理システムを用いた岩盤割れ目のフラクタル幾何学的 特性評価について

EVALUATION OF FRACTAL GEOMETRY OF ROCK JOINTS IN ROCK MASS BY MEANS OF IMAGE PROCESSING SYSTEM

大西有三*・堀田政國**・大谷司郎***

By Yuzo OHNISHI, Masakuni HORITA and Shiro OHTANI

Discontinuities have been investigated for years to determine actual rock mass behavior. However, data acquisition of discontinuity (joint) network displayed on the rock mass is not easy task. This paper describes an image processing method that will greatly facilitate this kind of job. Instead of land surveying and subsequent drafting of the joint map, this image processing system deals with photographs of a rock surface and produces a joint map easily. Fractal theory was introduced to quantify the complexity of the joint maps and it is extended to measure joint surface roughness.

Keywords: discontinuity, image processing, joint map, fractal, roughness

1. 序 論

コンピュータ技術の進歩は岩盤工学の分野にもさまざまな変化をもたらしている。岩盤構造物の設計においてはすでに数値解析は欠くべからざるものであり、施工においても計測ならびに施工機械にとコンピュータが縦横に利用されている。しかし、こうしたコンピュータの利用はいわゆる数値化されたデータの高速処理に偏っており、人間の五感にかかわるような情報を処理する機能についてはほとんど利用されていない。そこで、本報告では、人間の視覚に対応するコンピュータの画像処理¹⁾が岩盤の割れ目の特性化という問題にどのように応用できるかについて検討する。

「百聞は一見にしかず。」という言葉があるように、人間には、画像に含まれる非常に多くの情報(画像情報)のうち自分に必要なものを一瞬のうちに取り出し、それを認識、解析し、理解する能力をもつ。しかし、人間は映像に対する数量化(たとえば、対象物の面積、長さ、方向などを正確に測定すること)を不得意とし、大量の

画像情報の処理や単調な作業の繰り返しも苦手である。一方、コンピュータによる画像処理は判断の基準さえ決定していれば客観性、再現性の面で優れており、単純作業にも対応できる。また、さまざまな調査法の進歩は、今まで人間には見えなかった画像(たとえばコンピュータトモグラフィー)を作り出すようにもなった。そのうえ従来高価とされていた画像処理用のハードウェアが比較的安価なものとなりつつあることも、利用の速度を速めている。

岩盤工学問題へのアプローチとして、岩盤の不連続性に注目し、割れ目の分布や表面の幾何学的特性を把握して、岩盤の挙動解析に役立てようという考え方が近年注目を浴びている^{2),3)}。不連続性岩盤内の透水問題、キープロックの問題などがその代表的なものである。しかし、数多くの研究は行われているが複雑な割れ目の収集には時間的、費用的な制約が多く、また割れ目の幾何学特性を定量的に評価する方法も確立されてはいない。そこで、本報告ではそうした制約を軽減し、割れ目の不規則性を評価する1つの方法として岩盤面の映像の画像処理とMandelbrotによって開発され、複雑な模様や不規則図形を記述するのに用いられているフラクタル⁴⁾の適用を提案した。そして、例として節理分布図と割れ目の断面の凹凸を取り上げ、それらがフラクタル次元でどのよう

* 正会員 Ph.D. 京都大学助教授 工学部交通土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 Ph.D. 清水建設(株)原子力部

*** 正会員 NTT データ通信(株)

な値になるかを検討した。

2. 岩盤不連続面の画像処理方法

(1) はじめに

岩盤情報を画像処理するにあたっての利点は、

① 迅速性 計測施工を行うにあたって、現場では、迅速な計測（データの収集）、迅速な解析が要求される。その要求を満たすものとして、画像処理の手法が考えられる。

② 内含される豊富な情報量 画像の中には種々の情報が含まれており、それを、写真で撮る、ビデオに映すという非常に簡単な方法で採取でき、その情報をデジタル化して保管、処理できる。また、こうして蓄えられたデジタル情報はさまざまな形にいつでも加工処理が可能である。

③ 視覚に訴える 目で見るということは、人が物事を理解するうえで、非常に有効な行為である。単に数字に現わされたこと以外の情報も補完できる。

④ 省力化 節理のスケッチのような単純な作業あるいは危険な場所での作業から人間を解放する。と同時に作業の効率化が図れる。

画像処理に必要な機材は、ホスト・プロセッサ（パーソナルコンピュータ）、画像入力用カメラまたはビデオデッキ、画像解析装置、モニターなどである。現在多様な装置が市販されているが、本研究ではできるだけ安価で可搬性のものを揃えた。また、画像解析装置に代わって、その機能をすべてコンピュータのソフトウェアに代行させる方法も可能となっている。

(2) 節理分布図（マップ）の作成

基本的な画像処理方法の説明として、岩盤節理を写真やビデオに撮り、その映像から節理以外の雑音を消去して節理のみの映像を作り、それを画像計測（画面上の対象物の大きさ、長さ等を計測するプログラムを実行）し、各節理の位置、長さ、走行を知る方法について述べる。

第1段階はデータの収集である。これには前に述べたように写真かビデオ映像が適している。CCDカメラのように撮影の段階で情報がデジタル化されていれば、その信号を利用できるので後の処理にさらに都合がよい。

第2段階は通常の写真やビデオのアナログ情報のデジタル化である。作業自体はD/A変換を行うだけなので簡単である。

第3段階が画像データの数値処理である。手法にはいくつもあるが、今回採用した方法のフローチャートを図-1に示すとともに、その基本的な考えを以下に示す。

検討対象である節理をカメラから入力し、デジタル化したものをコンピュータ画面に出した画像を写真-1に示す（ただし、今回は、現場であらかじめマーキングさ

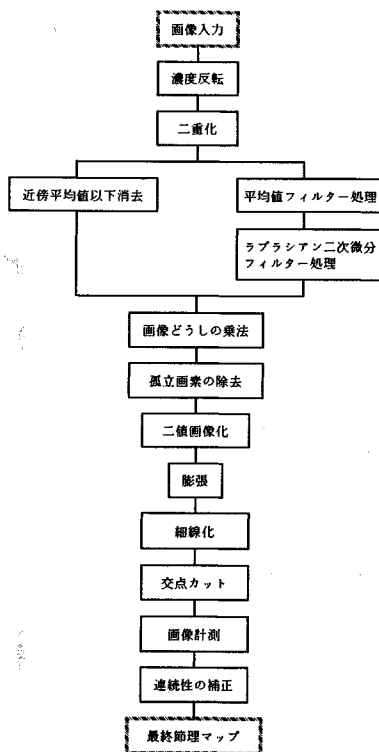


図-1 節理マップ作成手順

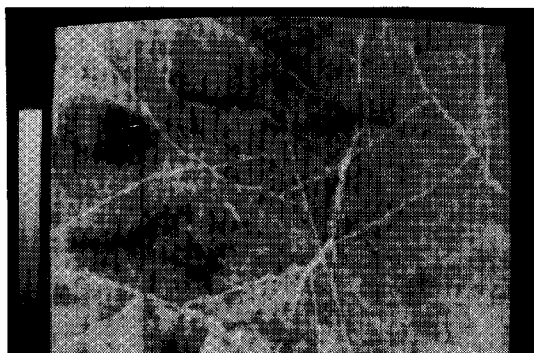
れている節理の写真を用いている）。この時点で、画面を構成する480×512の画素にはそれぞれ濃淡の諧調である0(BLACK)から255(WHITE)の値が対応しており、これを以後、画素の濃度とよぶことにする。

次に以下の処理を容易にするためにこの画像の濃度を反転させる（写真-2）と、節理の部分が白く目立っていることがわかる。このあと2つの考え方に基づいて節理以外の映像（ここではノイズとよぶことにする。）を消去する。そのためあらかじめ、同じ映像を記憶装置にコピーしておく。

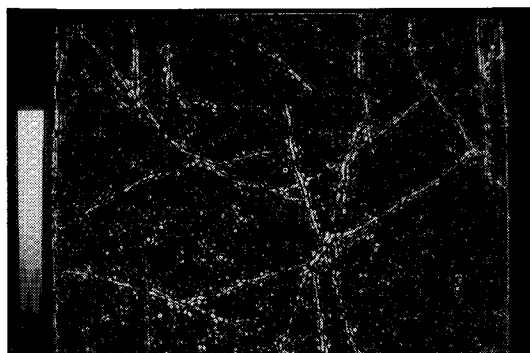
ノイズ消去に際しては、以下のような特徴に注目して処理を行う。

- ① 節理の部分では、岩肌から割れ目へと映像が（それに対して与えられている濃度が）、急激に変化する。
- ② 節理の部分は、濃度が反転させられたことによって、少なくともまわりの部分よりは高い濃度が与えられている。
- ③ 節理は連続している。

フローチャート（図-1）の中で、左のブランチに沿うものが上記②に対応したものである。1つの画素についてそのまわりにある16×16個の画素の間の平均値を求め、その平均値と注目している画素の濃度とを比べ、画素の濃度の方が小さいなら、②の特徴に反するものと



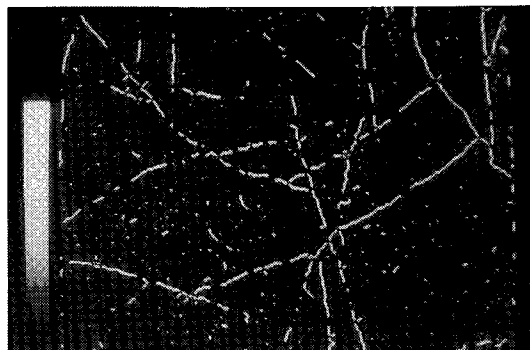
写真一 入力画像



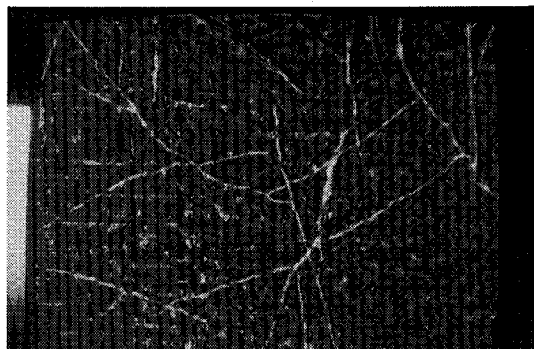
写真一五 ラプラシアン 2次微分実行後の画像



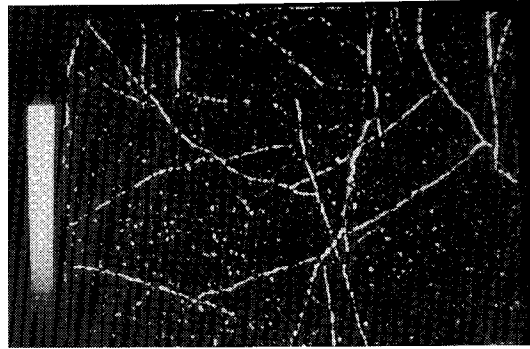
写真二 反転画像



写真一六 画像間乗法後の画像



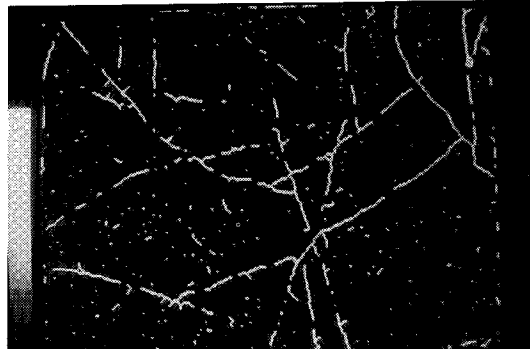
写真一三 近傍の平均値以下を消去した画像



写真一七 細線化処理後の画像



写真一四 平均値フィルター処理後の画像



写真一八 連結箇所消去後の画像

して、消去する。これを対象領域内のすべての画素について行う。こうして得られたのが写真—3である。

上記①の考え方に基づくものが、図—1中の右のプランチである。ここで有効なプログラムに、ラプラシアン2次微分フィルターとよばれるものがある¹⁾。それを実行した結果が、写真—5である。まわりに比べて、急激な濃度の変化を示す部分（色が急に変わっているエッジ部分）を指摘しているのがわかる。このプログラムの実行効果を高めるため実行前に、平滑化処理のための平均値フィルター²⁾とよばれるプログラムを実行した（写真—4）。

こうして違う考え方によって得られた2枚の映像（写真—3, 5）の濃度（度数）を掛け合わせることで濃度差を強調し、一層のノイズ消去を試みた（写真—6）。次に、③の考え方に基づいて孤立粒子を除去する。ここまでの処理は濃淡画像（諧調は0（BLACK）から255（WHITE）の値）に対する処理である。

これ以降の処理は映像を2値化した後に行う。2値化とは、計測に先立って行われる操作であり、計測対象である画像を白（諧調は255）、その他の不必要な領域に対しては黒（諧調は0）、つまり、必要、不必要に応じて両極端の諧調に分化させる作業のことである。

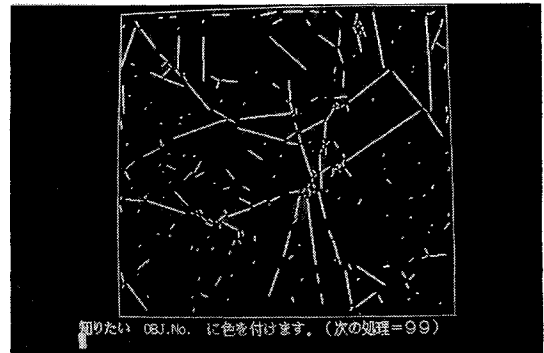
さらに、2値化された画像に対する処理として膨張、細線化のプログラムを実行して、ここまでの操作中で、必然的に生じてしまう“ヒゲ”（節理の映像につく短い枝別れの映像）を取り去り、連結性に関しては、交差部分にのみ、3以上のものが残るが、他は2（端点は1）となるようにする（写真—7）。連結性とは、ある1つの画素がまわり上下、左右、斜めの8個の画素の中で何個の画素と連結しているかを示すものである（図—2）。

ここで、画像計測を施して、各節理の方向、長さを求めたいわけであるが、通常、画像処理では、交わる線分を別々の物体とみなさないため、ここで、多少のテクニッ

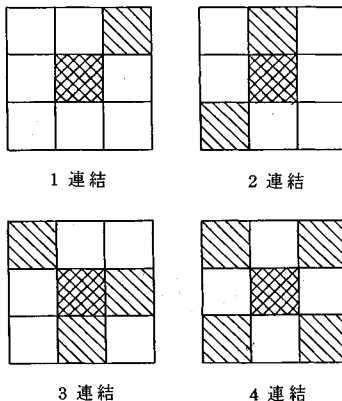
クを必要とする。そこでまず、いったん、交わる部分をすべてカットする。交差部分発見の方法としては、先に述べたおのおの画素の連結性を調べてみるとよく、連結性が3以上のものを捜し出し、そこをカットする。こうして得られたのが、写真—8であり、このすべてのばらばらにされた映像の方向、長さを計測し、同じ方向、長さをもつ直線で近似する（写真—9）。

ここまでの過程で、節理の全映像が完全に抽出されたわけではなく、一部再現しきれなかったものが残っているため、節理の映像は、飛び飛びになっていたり、また、先ほどの交点カットの処理のため、細切れになっている。ここで、多少の「ふくみ」（許容範囲）をもたせながら、線分をつなぐ処理を施す必要がある。そこで、すべての隣合う線分に対して端点間距離、交差角（図—3）のチェックを行い、あらかじめ定めておく許容値以下である線分に関しては、元はつながっていたとみなして、1本の直線で近似する。近似された直線の方向、長さをもって、節理の方向、長さとする。節理が屈曲している場合にも、部分直線に置き換えることで同様の取扱いが可能である。

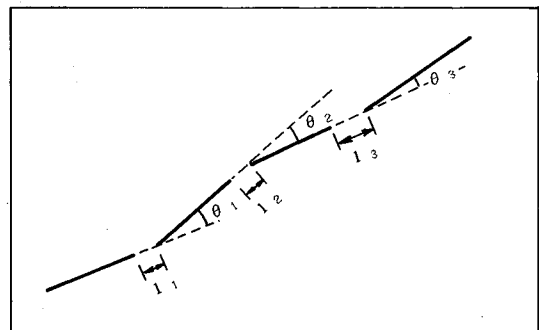
こうして得られた最終的な節理マップが写真—10であり、各節理の長さ、方向は、データファイルとして記録される。



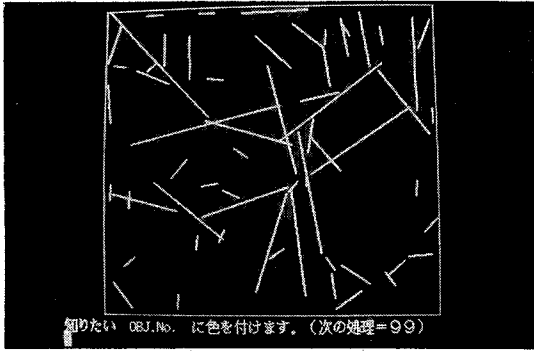
写真—9 写真—8の直線近似



図—2 連結の種類



図—3 端点間距離 (l) と交差角 (θ)



写真—10 最終節理マップ

(3) 検討事項

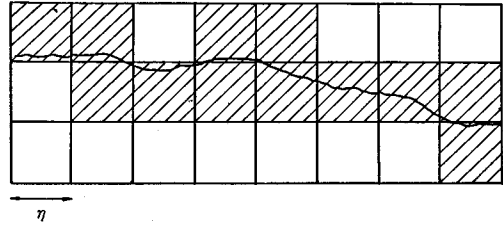
画像処理を利用する場合、最も重要なのは写真でもビデオでも映像の質が解析の精度を左右するという点である。したがって、撮影にあたっては影の影響を極力少なくすること、節理をくっきり際立たせるような光源を利用すること、赤外線撮影のような特殊効果を重ね合わせてノイズを軽減することなどの工夫が必要である。単一波長の光源であるレーザーを帯にしてスキャンする方法は測定精度を上げるうえで有望である。

また、全自動でなくても、今回採用したような現場の節理にマーキングを施して撮影をする方法、撮影後の映像の処理に際して微妙な節理の判別を地質専門家の助力と併用するなどの方法が考えられる。これらの方法は人間による作業が必要であるが、従来のような節理情報収集法に比較すると、節理端点の座標、長さ、方向などが自動的に数値化できる点で格段に有利である。いずれにしても、本研究の主眼は画像処理の岩盤への応用の可能性を検討することであり、今回のような手軽な装置でその可能性が開けた点に意義を見出したい。もちろん、人工衛星画像の処理に用いられているような装置類を利用すれば、同じ考え方で格段に精度のよい解析ができることは論を待たない。

3. 岩盤不連続面のフラクタル次元

(1) はじめに

自然界におけるさまざまな不規則な形（たとえば海岸線や雲の形状）はフラクタルであるとされている。フラクタルに関する Mandelbrot の著書⁴⁾が出版されて以来、あらゆる分野でフラクタルの研究が行われるようになった。わが国でもいろいろな応用分野が高安ら^{5)~7)}によって紹介されている。フラクタル次元の定義を解釈するとその次元はトポロジー次元とユークリッド次元の中間にあり、図形の複雑さを表す。フラクタル図形は“自己相似性”すなわち、あらゆるスケールにおいて幾何学特



図—4 節理を含むメッシュの数 $N(\eta)$ の数え方

性が不変であるという重要な性質を有している。この意味を岩盤の分野で考えると、岩盤のなんらかの幾何学形状がフラクタルであるとすれば、その特性は岩盤の大きさに依存しない、言い換えれば小さい試料あるいは小領域で計測した幾何学特性は大きいサイズの岩盤にそのまま適用できることになる。

岩盤に関連した分野では地震の構造について、地震の空間分布、時間分布、大きさ分布などがいずれもフラクタルであることが報告されており⁸⁾、最近では地震を起こす断層面の形がフラクタルであるかどうかについて活発な議論が行われている⁹⁾。また、大きな領域で破碎帯や断層の平面形の分布を求めてそのフラクタル次元を計算している例もある¹⁰⁾。

フラクタル次元を求める方法にはいくつかあるが、最も一般的なのは物差し法である¹¹⁾。これは線分や平面部分を一辺の長さが η の“多面体”（または球、円など）からなる細胞でおおった場合の個数 $N(\eta)$ が次の式

$$\eta^D N(\eta) = \text{一定値} \dots\dots\dots (1)$$

を満足するならば、 $\log \eta - \log N$ プロットが直線になり、その勾配がフラクタル次元になる性質を利用したものである。

$$D = -d \log N / d \log \eta \dots\dots\dots (2)$$

この物差し法を画像処理方法に組み込んで、簡単に迅速にフラクタル次元を決定する方法を節理マップと割れ目表面を例にとって説明する。

(2) 節理分布図のフラクタル次元

二次元平面の場合の具体的なフラクタル次元の測定法は図—4に示すように、対象となる図形に一辺 η の正方形格子をかぶせ、図形と交わる格子の数を数え、 η の大きさをいくつか変えることによって式 (1)、(2) の関係から求める次元を得ることである。画像処理の場合、まず対象図形を入力し、2値画像化する。コンピュータ画面は画素で分割（たとえば 480×512 個）表示されているので、この画素をもとに一辺 η の正方形細胞をつくり、いくつかの $(\eta, N(\eta))$ の組合せを計算することによって、最小二乗法からフラクタル次元 D を求めることができる。ここで、従来のように人力で採取した実岩盤の節理マップを画像処理した図—5を例として取り上



図-5 フラクタル次元の計算に使用した節理マップ

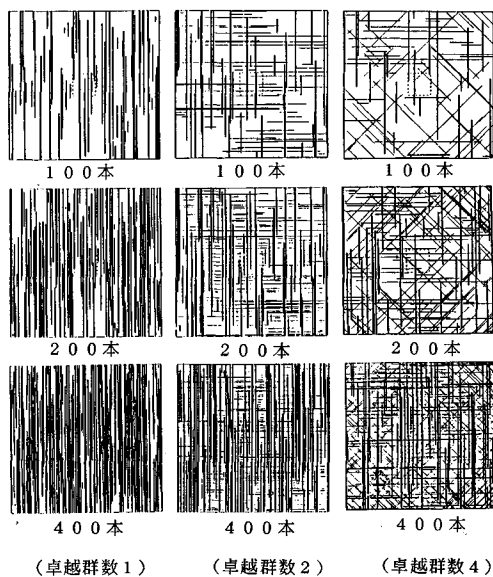


図-6 人為的に発生させた節理マップ

げ計算したところ、フラクタル次元は1.625で、佐藤ら¹²⁾の1.05, Barton¹⁰⁾の1.14とかなり異なった。そこで、節理密度とフラクタル次元の関係をみるために次のような検討を行った¹³⁾。

図-6は人為的に作成した節理ネットワークであり、それぞれ卓越群が1つ、2つ、4つであって、節理密度は100 m²当たり100, 200, 400本のもを示している。節理トレース長には負の指数分布を適用し¹⁴⁾、その平均値は3 mとして、フラクタル次元を計算した。その結果をみると、一般的傾向として節理密度の上昇に比例して次元は増加しているが、卓越群の数には依存していない。節理ネットワークの作成では各群ごとに本数を均等に分配しているため、密度が等しければ単位領域内に発生させる節理トレース長の総和はほぼ等しくなっている。そこで、領域内の総トレース長とフラクタル次元の関係をプロットすると図-7が得られ、両者が密接な関

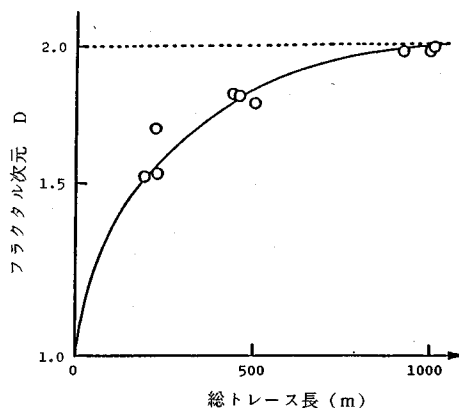


図-7 総トレース長とフラクタル次元の関係

粗さ	JRC値に対応する粗さ形状	JRC値
1		0-2
2		3-4
3		4-6
4		6-8
5		8-10
6		10-13
7		12-14
8		14-16
9		16-18
10		18-20
		∞

図-8 粗さ形状とそれに対応するJRC値の範囲

係にあることがわかる。

(3) 岩盤表面のフラクタル次元

不連続面の表面(壁面)粗さは、そのせん断強度を支配する重要な要素であることは周知のことである。この表面粗さを定量的に評価するものとして、国際岩の力学会(ISRM)は、Bartonらの提案^{15),16)}に基づき、JRC値をISRM指針として示している¹⁷⁾。JRC値は図-8のように表面粗さの程度により10段階に分けられ、0から20の値が割り振られている。しかし、図-8をもとにこのJRC値を通常の岩盤表面から客観的に求めることは困難であり、クリノメーターによる方法、写真測量法や古くは平均面からのずれの平均値などが提案されてきた¹⁸⁾⁻²⁰⁾。ところが、これらの値はスケール依存性(寸法効果)を示すため、別の普遍的な指標が求められていた。

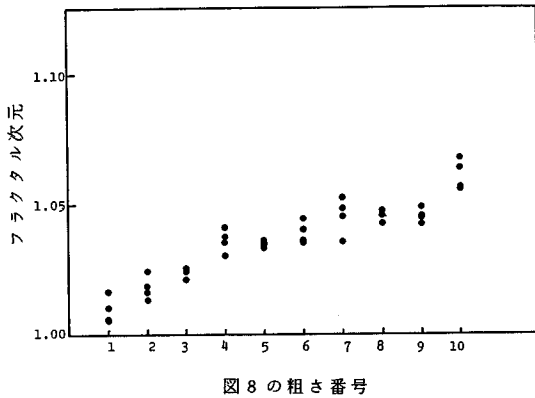


図-9 フラクタル次元と JRC 値の関係



図-10 自然岩盤表面の亀裂形状

直感的に考えて、岩盤表面の断面は地図でみる海岸線のように自己相似性をもつフラクタルのようにみえる。大西ら¹³⁾や Carr ら²¹⁾は (1) に説明したコンパス法によりフラクタル次元と思われる値を計算した。また、大規模な断層の凹凸がフラクタルであると Avils ら⁸⁾や Okubo ら⁹⁾も報告している。しかし、Mandelbrot はフラクタルな性質には自己相似性と自己アフィン性があり、両者は区別して用いられるべきであり、特に自然物の垂直断面は自己相似性を示さない可能性があることに注意している²²⁾。Brown はスペクトル解析を利用して、岩盤表面に自己アフィン性のあることを示した²³⁾が、すべての岩盤がそうであるか、部分的な特性かなどについて議論があり結論は出ておらず、今後検討すべき課題として残されている。

岩盤表面が近似的に自己相似性を示すものとして計算したフラクタル次元を図-8の表面について求めた。実岩盤の表面を記録する方法にはいくつかあり、最も簡単なのは型取り器である。表面の形が図形としてとらえられると画像として入力でき、画像メッシュを前述の節理ネットワーク解析のときと同じように利用してフラクタル次元が求められる。得られたフラクタルの値と JRC 値との関係を示すと図-9のように相関があり、これがラフネスの工学的指標として利用できることを示唆している。ちなみに、自然岩盤表面のある断面をかたどったものを4例、図-10に示し、それらのフラクタル次元

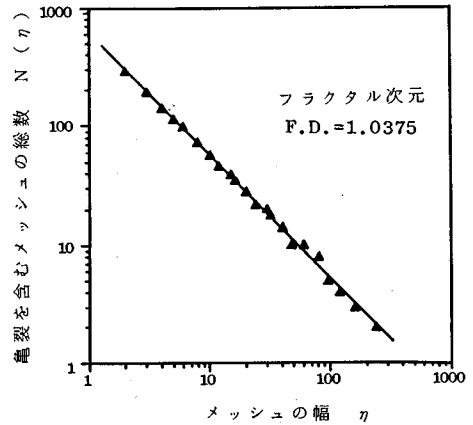


図-11 フラクタル次元の算出

を図-11の例のように計算した。結果はK1:1.0375, F1:1.052, F2:1.030, F3:1.045となり、これらから JRC 値が確定できる。

4. 結 論

コンピュータの1つの応用分野として画像処理が注目され、各方面で利用されているが、本報告においてその岩盤工学への適用の可能性、特に岩盤不連続面の評価への利用について検討した。画像処理の利点は迅速性と省力化であるが、従来人間の目や勘によって採取されてきた割れ目データの再現がどの程度可能かについては、機材の高性能化、高感度化、画像の三次元立体視化と絡んでまだ多くの課題が残されている。

岩盤の不連続性は複雑なもので、不規則なものの代表といった感があるが、その指標として幾何学的に定義が可能となったフラクタル次元を岩盤節理に対して求めた。節理の密度分布のフラクタル次元は等方的性質をもつが、密度分布だけでなく節理の分布そのものがフラクタルである可能性もあり、この場合は異方性を加味することもできる。したがって、いくつかの節理特性を組み合わせれば、複雑な岩盤の総合的な評価を行うことが可能となってくる。また、フラクタルの性質から断面が D 次元であれば三次元表面は $(D+1)$ 次元を示すといわれており、これも工学指標として役立てられる。

フラクタルの岩盤への適用はまだ始まったばかりでデータも少ないが、今後の適用の可能性は大きく開けているものと思われる。その場合、画像処理という手段は迅速な情報の収集法としてますます重要性が増すものと思われる。

最後に本研究を進めるにあたって、日頃からご指導いただいた京都大学 足立紀尚教授、またフラクタルについて数学的な助言をしていただいたマサチューセッツ大学

Herda 教授に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 長谷川純一・奥水大和・中山 晶・横井茂樹：画像処理の基本技法<技術入門編>，技術評論社，昭和 61 年 8 月。
- 2) Priest, S. D. and Hudson, J. A. : Discontinuity Spacing in Rock, Int'l J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.13, 1976.
- 3) 大西有三・鍵本広之・菊地宏吉：不連続性岩盤の節理分布性状の幾何学モデル作成に関する研究，第 20 回土質工学研究発表会論文集，1985。
- 4) Mandelbrot, B.B. : The Fractal Geometry of Nature, Freeman and Co., New York, 1977. (フラクタル幾何学，広中平祐監訳，日経サイエンス，1985)。
- 5) 高安秀樹：フラクタル，朝倉書店，1986。
- 6) 高安秀樹 編著：フラクタル科学，朝倉書店，1987。
- 7) 高安秀樹・高安美佐子：フラクタルって何だろう，ダイヤモンド社，1988。
- 8) Avils, C.A., Scholz, C.H. and Boatwright, J. : Fractal Analysis Applied to Characteristic Segments of the San Andreas Fault, J. Geophys. Res., 92, 1987.
- 9) Okubo, P. G. and Aki, K. : Fractal Geometry in the San Andreas Fault System, J. Geophys. Res., 92, 1987.
- 10) Barton, C.C. and Larson, E. : Fractal Geometry of Two-dimensional Fracture Networks at Yucca Mountain, Southwestern Nevada, Int'l Symp. on Fundamentals of Rock Joints, Bjorkliden, 1985.
- 11) 沢田康次：フラクタルの数理と 2 次元パターン，数理科学，Vol.19, No.11, 1981.
- 12) 佐藤・大橋・青野・増田：岩盤浸透流におけるキレツ系のフラクタル構造に関する基礎研究，第 30 回水理講演会論文集，1986。
- 13) 大西有三・鍵本広之：フラクタル幾何学の岩盤工学に関する適用についての基礎的検討，第 18 回岩盤力学に関するシンポジウム，1986。
- 14) 大西有三・鍵本広之：岩盤割れ目性状の評価方法に関する一考察，土木学会論文集，第 400 号/Ⅲ-1, 1988.
- 15) Barton, N. : Relationship between Joint Roughness and Joint Shear Strength, Int'l Symp. on Rock Fracture, Nancy, 1971.
- 16) Barton, N. and Choubey, V. : The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice, Rock Mechanics, 10-1, 54, 1977.
- 17) 岩の力学連合会訳：ISRM 指針，Vol.3，岩盤不連続面の定量的記載法，岩の力学連合会，1986。
- 18) Fecker, E. and Renger, N. : Measurement of Large Scale Roughness of Rock Planes by means of Profilograph and Geological Compass, Int'l Symp. on Rock Fracture, Nancy, 1971.
- 19) Lam, S. K. and Johnston, I. W. : A Scanning Device to Quantify Joint Surface Roughness, Geotechnical Testing Journal, Vol.8, No.3, 1985.
- 20) Reeves, M. J. : Rock Surface Roughness and Frictional Strength, Int'l J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.22, No.6, 1985.
- 21) Carr, J. R. and Warriner, J. B. : Rock Mass Classification Using Fractal Dimension, 28 th U. S. Rock Mech. Symp., Tuscon, 1987.
- 22) Mandelbrot, B.B. : Self-Affine Fractals and Fractal Dimension, Physica Scripta, 32, 1985.
- 23) Brown, S.R. : A Note on the Description of Surface Roughness Using Fractal Dimension, Geophys. Res. Let., Vol.14, No.11, 1987.

(1989.2.9・受付)