(97) 岩盤割れ目トレースマップのフラクタル次元について

京都大学工学部　正会員　大西　有三
清水建設　正会員　○堀田　政國
三井建設　戸村　豪治

Fractal Dimension of Rock Joint Trace Map

Yuzo OHNISHI, Kyoto University
Masakuni HORITA, Shimizu Co.
Gouji TOMURA, Mitsui Construction Co.

ABSTRACT

When one looks at the distribution of rock joints in nature, it very often appears that several classes of objects are imbedded (self-similar) in the same system. Mandelbrot has created the term "Fractal Geometry" to quantitatively describe such self-similar complex structures. Fractal analyses for a joint map (joint network) have been tried. For a two dimensional case, grids of various sized square elements were placed over the map, and the number of grid elements by joint traces was counted. This process was automatically done by computer image processing techniques. The log of the relative size of the grid elements is plotted versus the log of the number of grid elements intersected by rock joint for each element size. The fractal dimension D is the absolute value of the slope of a straight line fitted to the points. The fractal dimension D for the joint trace map has been determined and examined.

1. はじめに

節理性岩盤を対象とする土木工事においては、節理の分布特性を把握することが、その岩盤の力学特性、透水特性を解明する上で重要となる。採石場、切取り斜面、ダムのアバット、トンネルおよび地下空洞等の岩盤構造物の対象となる岩盤には潜在的に不連続面が存在している。これらの不連続面はあらゆる長さと間隔で走り、岩盤全体の性質に様々な影響を与えている。

特に、近年においては、地下空間の利用や地下発電所、トンネル建設が盛んになり、岩盤中に原油の地下備蓄を行なったり、さらには、原子力発電所等から出される放射性廃棄物の処理問題が深刻化し、その処理方法として岩盤内処理が検討され、実施されようとしている。また、原子力発電所の基礎、道路建設等に関係して、大規模斜面の切取りがしばしば行われている。このような状況において、不連続性岩盤の節理の幾何学的性状を調べそれを定量的に表わすことは非常に重要なことと思われる。

しかし、岩盤不連続面においては土質層状地盤の規則正しさと比較して、その不規則性が特徴的である。我々はこのようなランダム形状に関する現象を合理的に取り扱う手段をつい最近まで知らなかったわけであるが、自然界に存在する不規則性になんらかの意味を与えることのできるフラクタル幾何学を複雑な節理系に導入することによってある程度節理の規則性を見いだす可能性が出てきた。

本報告では、初めに人為的に発生させたさまざまな節理ネットワークのフラクタル次元をパソコンによって求め、節理密度（単位面積あたりの節理本数）、卓越群の数、および、平均節理長とフラクタル次元の間の関係について調べた。そして、実際の現場から得た節理データと比較し、フラクタルの概念が実際の自然

節理に適用できるかどうかを検討したものである。

2．フラクタルの概念および岩盤節理評価への適用

フラクタル[1]という言葉はマンデルブロの造語であり、概念的には、ある集合の小さい部分を見ても、より大きな部分を見ても、同じように見える図形や構造、現象をいう。 このように、見る尺度を変えることを粗視化の度合を変えると言う。また、フラクタルとは、なんらかの自己相似性を持つ形や集合とも解釈される。しかし、自然界においては全体と部分がぴったり重なるような集合は少ないために統計的な自己相似、つまり、ある有限でランダムな集合（図形）において、小さなスケールの集合の成分の分布が大きなスケールの集合の成分と一致するような集合について考える。

岩盤力学の分野におけるフラクタルに関する従来の研究としては、節理ネットワークの評価の手段としての可能性を考えたもの（Marsily, 1985）[2]や、実際に露頭にあらわれた節理の交跡線ネットワークのフラクタル次元を測定したもの（Barton, 1985）[3]、また岩盤節理の長さや幅にフラクタルを適用したもの[4]がある。今回の報告では、大西ら[5]の定義にしたがって、次式を用いた。

$$D = -\frac{d\log N(r)}{d\log r}$$

3．フラクタル次元を用いた岩盤節理ネットワークの評価手法

２次元節理ネットワークに関する評価方法は従来節理本数のみに着目した節理密度が主に用いられてきたが、この評価方法は節理の本数という断片的な情報でしかないため、大小さまざまな大きさを持ち、不規則に存在している節理の指標としては、それのみでは不十分であると思われる。そこで、節理系をどのように定量化するかが大きな問題となってくるわけであるが、ここで、自然界に存在する不規則性の指標となるフラクタルを適用することを考える。

本報告では、まず、人為的に発生させた二次元平面上の節理ネットワークのフラクタル次元をパーソナルコンピュータ上で計測し、節理本数、総トレース長、卓越群数、および、平均節理長によって、フラクタル次元がどのように変化するかを調べた。

今回用いた節理データは１０ｍ×１０ｍの正方形領域内にランダムに発生させた節理の端点座標である。作成手順は以下のようである。

１）まず１０ｍ×１０ｍ内のｘ－ｙ座標にランダムに点をプロットしそこを中点とする。

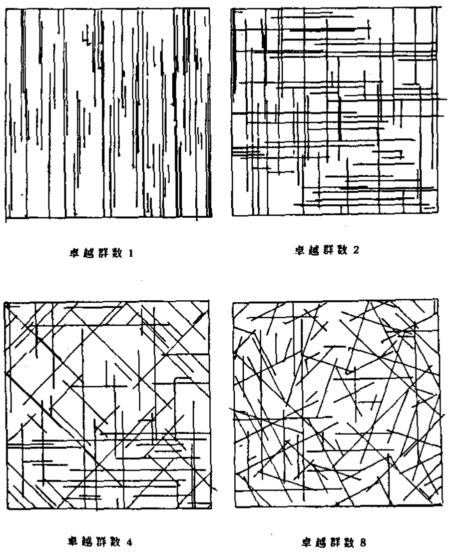
２）その中点から、卓越群の方向の両側に節理長の半分の距離をおいた点を端点座標とした。この場合卓越群の方向は１，２，４，８の４種類とした。卓越群とは節理の走る方向のことである。（図－１）

３）上記の端点座標ファイルは全ての端点が１０ｍ×１０ｍの正方形内にあるわけではないが、後で述べるフラクタルを求めるプログラムの関係上これは都合が悪いので１０ｍｘ１０ｍの正方形をはみでる部分に関してはこれを切る処理を行い、これを節理データとした。

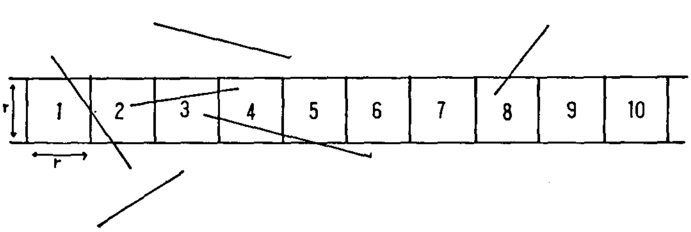
変化させるパラメータは、卓越群数、節理本数、平均節理長である。平均節理長を３ｍとしたものを卓越群１、２、４、８の４種類に関して節理本数24, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 550, 700, 1400のもの計５２個とその他に平均節理長の変化によるフラクタル次元の変化を調べるために総トレース長を約１３０ｍ，２５０ｍ，４７０ｍに固定させて平均節理長を０．５ｍ，１ｍ，３ｍ，６ｍと変化させたものを１２個、合わせて６４種類の節理データファイルを作成した。

フラクタル次元を求める手順としては、先に述べた方法を用いた。つまり、対象とする範囲を正方形で区切り、節理を含む格子の数を数えるという方法である。

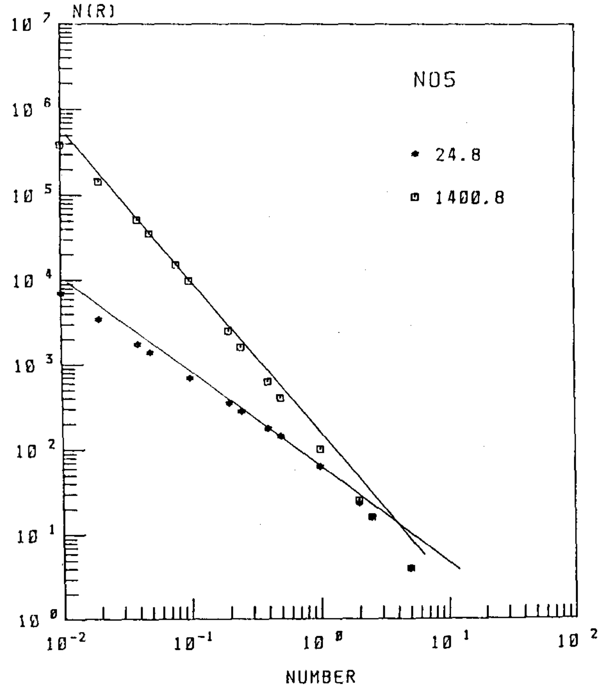
これは人間の手で行えば直感的にできる作業である。しかし、今回はフラクタルの性質をより正確に知る



図－1　節理ネットワーク図



図－2　コーディングの考え方



図－3　フラクタル次元の測定

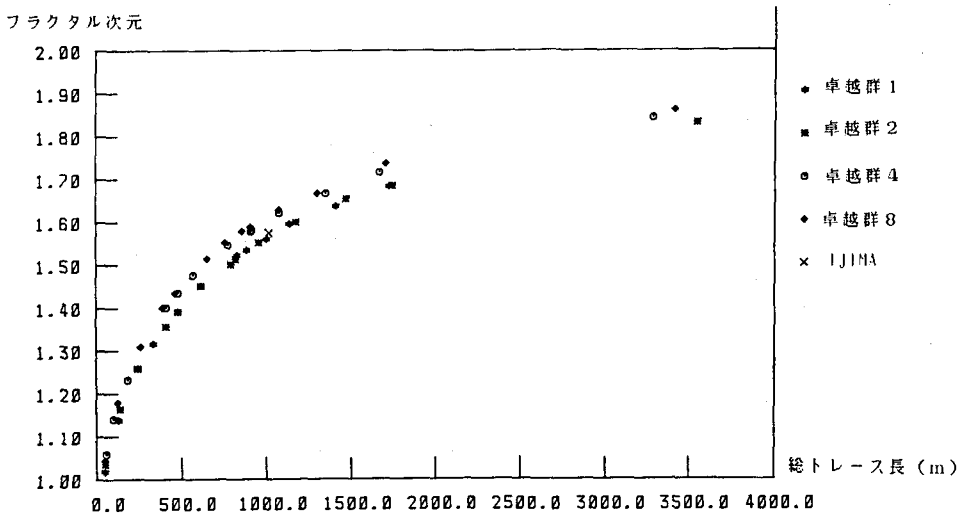
ために１０００×１０００程度の格子まで区切ることを試みたため、これは個数１０^{6}個を数えることになり不可能である。そこで、パーソナルコンピュータで計算することを考えたが、それでも単純に数えると１０００×１０００（１０^{6}個）を記憶させることはメモリー容量上できない。また、格子を一個づつ処理すると非常に長時間の計算時間を要する。そこで、次のような方法を考案した。

まず、図－２のように横一列の正方格子に番号をつけて、少なくとも一本の節理を含む格子の数を数え、これを縦に繰り返して節理と交わる、もしくは節理を含む格子の総数を求めるという方法である。つまり、上記の二つの方法の中間をとるという考え方である。

この方法だと、１０００本の節理を１０００×１０００の正方格子で区切った場合約１０分程度の計算で結果を得られた。これは、一つづつ計算を行った場合の約五百分の一である。このようにｒを変化させてＮ（ｒ）を求め、最小自乗法を用いてフラクタル次元をＤを求めた。

４．解析結果および考察

フラクタル次元を求めるために両対数紙を使って、横軸ｒ，縦軸Ｎ(ｒ)で点をプロットし、その負の傾きすなわちフラクタル次元Ｄを求めたのが図－３である。これを見ると、ｒの値をどこからどこまで設定するかによってグラフの傾き、すなわちフラクタル次元が違っていることがわかる。プロットした点を結ぶと直



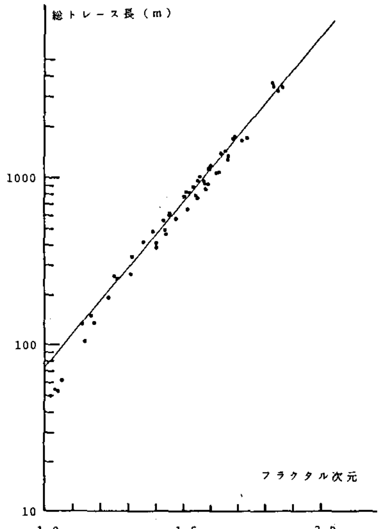
図－4　フラクタル次元と総トレース長の関係

線ではなく上に凸の曲線となっている。このようなことが起こる理由は、この節理ネットワークが完全なフラクタル図形ではないからである。つまり、節理長が負の指数分布に従っているとはいえ、スケールを変えれば複雑さの度合も変わってしまうのである。

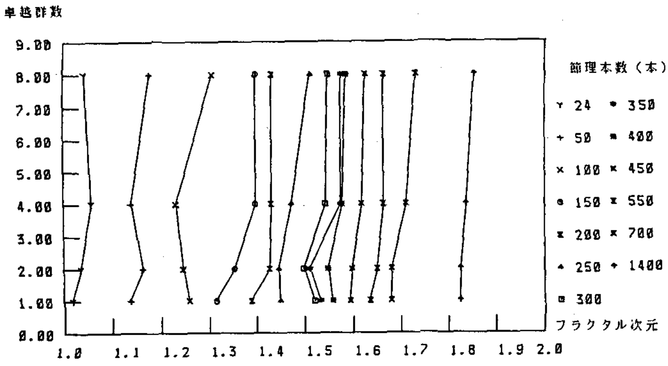
自然界に存在する物体および事象には、それがフラクタルであったとしても、多かれ少なかれ必ず上限－下限を持っている。つまり、節理ネットワークがフラクタル性を持つ範囲も限られているのである。そして格子を小さくすればするほど対象としている節理ネットワークはより1次元的であると見なされているのがわかる。

本来ならば、フラクタル的な現象を示す直線部分を見つけ、その傾きをもってフラクタル次元Dとするべきであるが、今回扱っているような節理ネットワークの場合、対象によってスケールを変えて評価すると、どれも同じ様な次元になってしまうと考え、そのスケールをすべて統一した。今回のデータはすべての節理ネットワークのフラクタル次元を、rの値が0．01mから2mまでのN（r）すべてを用いて、最小自乗法によって求めた。

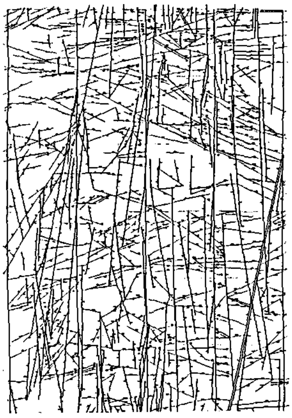
このようにして、全ての節理データのフラクタル次元を求めた後に横軸に総トレース長、縦軸にフラクタル次元をとり、それらの関係を調べたのが図－4である。これを見るとフラクタル次元と総トレース長は平均節理長一定の時一対一で対応することがわかる。しかしここで、卓越群数とフラクタルの関係がよくわからないので、横軸にフラクタル次元、縦軸に卓越群数をとり節理本数ごとに調べたものが、図－5である。この図をみた限りではフラクタルと卓越群数との関係はないか、あるいはあったとしてもわずかであり、総トレース長ほど影響を与えないように思われる。また、フラクタル次元と総トレース長の関係を片対数紙上にプロットすると図－6のようになった。これはほぼ一直線上にあるとみてよいだろう。図中の直線は、$y=10^{ax}$で表せる直線である。つまり、総トレース長が0の時、フラクタル次元も0になるならばこの直線上に乗ると考え、引いたものである。ここで注意してほしいのは、格子の一辺r



図－6　図－4の片対数表示



図－５　卓越群数とフラクタル次元の関係



図－７　現場トレースマップ

を有限の範囲に設定しているので、節理ネットワークの次元が２になることもあるということである。また総トレース長が極端に短いとき、１以下の次元を考えることも問題ないだろう。総トレース長が小さいほどこの直線からずれているのは、よりフラクタル的でない図形だからだと思われる。ａの値は、ｒを設定する範囲によって変わるが、総トレース長とフラクタル次元の関係を定式化できると言えるのではないだろうか。

ここで一つの自然節理のデータを用意し、総トレース長とフラクタル次元の関係をプロットしてみた。このデータは瀬戸内海の小島”井島”でサンプリングされたものであり（図－７）、人為的に作成された節理データと同じように端点座標として６ｍ＊１８ｍの節理面に与えられている。また、トレース長は$100m^2$当りに換算した。その結果は図－４に示すように、人為的に発生させた節理と同じラインにのっている。これは、今回の解析が有効であったこと、また今後同じように人為的節理を使って解析を行うことが有効であることを意味している。

参考文献

1)B.B.Mandelbrot:Fractals,Form,Chance,and Dimension :(W.H.Freeman and Co.,San Francisco,1977), 広中平祐　監訳:「フラクタル幾何学」, 日経サイエンス社,1985

2)de Marsily,G: Flow and Transport in Fractured Rocks, Int'l symp. on hydrogeology of Rocks of Low Permeability,Tucson,Arizona, 1985

3)Barton,C.C.and Larsen,E.(1985):Fractal geometry of two-dimensional fracture networks at Yucca montain southwestern Nevada, Int.Sym.Fundamentals of Rock Joints, Bjorklinde n,pp.77-84.

4)大野博之,小島圭二(1988): 岩盤の割れ目系に見られるフラクタル, 応用地質２９巻４号pp.11-18.

5)大西有三,鍵本広之(1986): フラクタル幾何学の岩盤工学への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講演論文集,pp.186-190.