

II—22

亀裂性岩盤内における分散特性について

髙土木技術コンサルタント 正員 谷口 直弘
室蘭工業大学 正員 藤間 聡

1. はじめに

岩盤内の分散性に関する研究は、近年の放射性廃棄物の地中処分問題に伴い盛んに行われるようになってきている。岩盤内の浸透流解析に用いられるモデルの大部分は、節理の密度が十分であれば、岩盤を等価な多孔媒体に置換できるという考えに基づき極めて理想化されたものが多く^{1,2)}、亀裂性岩盤内の浸透流を的確に解析する方法が確立されているとは言い難い実状にある。岩盤の節理分布は、一般に規則性を有するとされており^{3,4)}、岩盤の分散性の検討に用いる節理モデルは、節理の分布特性を規定する要素を定量的に評価したうえで、作成しなければならない。

本解析は、節理の分布性状を支配する要素として、節理長、節理間隔、節理開口幅および節理の連続性について検討を加え、Priestらの提示した統計的手法⁵⁾に準拠して節理系を二次元節理群としてモデル化し、それに基づく岩盤内の分散機構の特性を検討したものである。

2. 岩盤節理の評価法

実際の岩盤には、断層のような長大な割れ目から微細な割れ目までスケールの異なる節理が多数存在するが、ここでは、長大な割れ目を除外して細かな節理のみを解析対象とする。

2.1 節理長の評価⁶⁾

節理長に関しては、長い節理は個数が少なく短い節理は多く存在するという概念を適用して節理長が従う分布形は指数分布と仮定すると、節理長の確率密度関数は次式で与えられる。

$$f(l) = \lambda \exp(-\lambda l) \quad (1)$$

ここに、 l は節理長、 λ は平均節理長の逆数。上式において、平均節理長が既知であると節理長の密度関数が決定できることになる。

実際の岩盤露頭面で節理調査を行う場合、岩盤の一部のみが露出していて節理全体を測定で

きない状況が多い。本研究では測定範囲が限定される場合においても実際の節理分布性状を推定できる方法を考え、分散解析に用いるものである。

ここで、解析上の簡単化のため節理群はすべて平行なものとして取り扱う。これは、節理調査から卓越方向解析を行い、属群に分類された節理毎に解析することを意味する。

Fig. 1は岩盤露頭面が土壤、地被植物等で被覆されており、調査範囲が制限される状況を示し、線分 AB は節理測定の基線となるスキャンラインを表す。

スキャンラインを露頭面の任意の位置に設置した場合、節理がスキャンラインと交差する確率は節理長に比例すると考えると、節理長 l_0 がスキャンラインと交わる確率 $p(l_0)$ は次式で表される。

$$p(l_0) = k l_0 f(l_0) d l_0 \quad (2)$$

ここに、 k は比例定数を示す。

スキャンラインと交差する節理の密度関数 $g(l_0)$ は次式で与えられる。

$$g(l_0) = k l_0 f(l_0) \quad (3)$$

ここで、密度関数 $g(l_0)$ の一、二次の積率に関しては次式が成立する。

$$\int_0^\infty g(l_0) d l_0 = k \int_0^\infty l_0 f(l_0) d l_0 = 1 \quad (4)$$

$$\int_0^\infty l_0 f(l_0) d l_0 = 1/\lambda \quad (5)$$

(4)、(5)式から比例定数 k は $k=\lambda$ となり、密度関数 $g(l_0)$ が決定される。

スキャンラインから露頭端までの距離は位置により変化するため最小距離 C を基準値とし、この長さ以下の半節理長 $i b$ を測定して節理全体の平均長を評価する。

スキャンラインで捕捉される半節理長 l の密度関数 $h(l)$ は、全長 l_0 に関する密度関数の定式化と同様の理論展開を行うと次式を得る。

$$h(l) = \int_0^\infty 1/l_0 g(l_0) d l_0 \quad (6)$$

以上の展開において、スキャンラインで捕捉される節理長の密度関数 $g(l_0)$ は露頭面の節理長の

A Stochastic Analysis of Macroscopic Dispersion in Fractured Rock

by Naohiro TANIGUCHI and Satoshi TOHMA

密度関数 $f(l_0)$ に l_0 を乗じた(3)式で表現できるとした。このことは節理長が長いほど高い頻度を与え、平均は $2/\lambda$ となり偏差を有することになる。一方、スキャンラインで捕捉される半節理長の平均 $1/\lambda_h$ は、真値の $1/\lambda$ に正しく一致し、節理調査データから次式によって求められる。

$$1/\lambda_h = -C/\log[(n-r)/n] \quad (7)$$

ここに、 n はスキャンラインと交差する節理数、 r は基準長 C 以下の長さの半節理数を示す。

また、スキャンラインを露頭底部の位置に設定し、基準長を一定距離 ($C=1\text{m}, 2\text{m}, \dots$) 毎に半節理長測定する場合には、平均長は次式で与えられる。

$$\frac{1}{\lambda_h} = \frac{1}{\lambda} - \frac{C \exp(-\lambda C)}{1 - \exp(-\lambda C)} \quad (8)$$

上式から節理全体が測定不可能な場合の平均節理長が推定され、この値を(6)式に代入すると密度関数 $h(l)$ が決定される。

2.2 節理間隔の評価

節理間隔に関して Wallis ら⁷⁾ はボーリングコアを用いた調査から節理間隔の分布性状が節理長と同様に指数分布で表現されることを提示した。ここでは、節理間隔を節理長の評価法に準拠して一定の分布型をもつ確率変数として取り扱う。

2.3 節理開口幅の評価

節理の開口幅に関しては、節理が長いほど開口幅が大きく、また応力解放の影響を受けて地表に近いほど開口幅は大きい傾向があるとの報告⁸⁾があるが、客観的な評価を行うことが困難なため、ここでは開口幅の分布性状が正規分布に従うと仮定し、平均と標準偏差を与えて決定する。

3. 岩盤モデルにおける分散シミュレーション

3.1 節理モデルの作成

節理モデルは実際の節理の分布性状の特性を備えたものを作成しなければならないが、ここでは以下に述べる手法によって節理データを計算機によって発生させて解析に供した。

①解析領域を $20 \times 20\text{m}$ の正方領域と想定する。

②節理の卓越方向 θ と属群の数を決定する。

③各節理の中点をランダムに配置し、各節理長 l を指数分布で与える。

Fig. 2 は卓越方向 $\theta=60^\circ$ 、節理数 $N=300$ 本の条件で発生させた節理群を示し、平均、最大および最小長はそれぞれ 2.0m 、 13.8m 、 0.08m である。

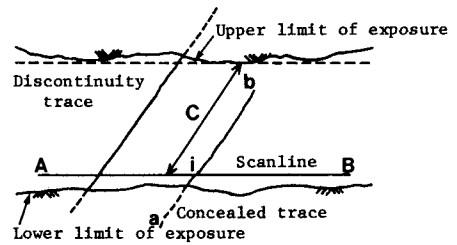


Fig.1 Discontinuity traces intersecting a scanline set up on a rock face.

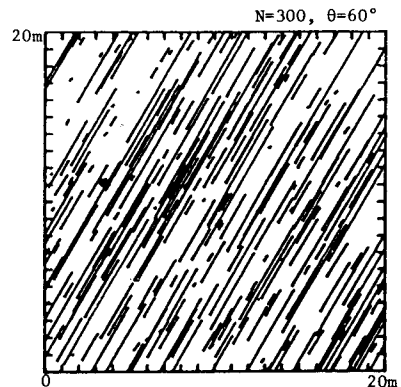


Fig.2 Discontinuity trace model

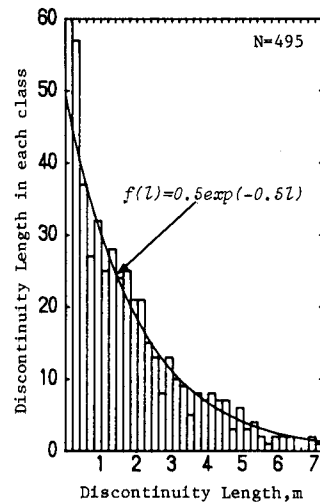


Fig.3 Histogram of sampled semi-trace length.

ここで、卓越方向を 90° 反時計方向に回転させた節理群を再び発生させて重ね合わせ、露頭面の節理とした。

この露頭面に任意の位置にスキャンラインを設定して半節理長と節理間隔の分布性状を調べた。Fig. 3はFig. 1に示す最小距離Cを1~7mの範囲で1m刻みで捕捉した495本の半節理長を0.2m刻みの階級毎に整理した柱状分布を示す。半節理長の平均は(8)式から $l=2.0\text{m}$ が得られる。

図中の理論曲線は捕捉された半節理長の平均を用いて全節理長の分布型を(1)式から推定したもので次式で与えられる。

$$f(l) = 0.5 \exp(-0.5l) \quad (9)$$

上式は、節理群を発生させた指数分布を正しく再現し、スキャンライン測量によって平均節理長を正確に求めることができることを示している。

Fig. 4はスキャンライン測量で得られた455本の節理間隔を0.2m刻みの階級毎に整理した柱状分布を示す。この場合のスキャンラインの総延長は380mであり、平均間隔は $s=1.20\text{m}$ となる。

図中の曲線はこの平均間隔を用いた理論値であり、次式により与えられる。

$$f(s) = 0.83 \exp(-0.83s) \quad (10)$$

以上の結果、露頭面の節理群は平均長 $l=2.0\text{m}$ 、平均間隔 $s=1.20\text{m}$ の特性値を有する確率変数として取り扱うことが可能となる。

3.2 分散解析

岩盤節理の分散現象を解析するにあたって、節理モデル内で死水域となる不連続な節理を取り除く処理をした。Fig. 5に処理後の節理群の一例を示す。この図から処理前では判別し難い節理の連続性および異方性が、この処理によって把握し易くなる。また、同時に計算機の記憶容量と計算時間を軽減する利点が見られる。

節理内の浸透流を平滑な平行板間の層流と考えると、節理内の平均流速は次式で与えられる。

$$v = \frac{\rho g}{12\mu} c b^2 \frac{\partial h}{\partial l} = K b^2 \quad (11)$$

ここに、 b は節理開口幅、 μ 、 ρ は流体の粘性係数と密度、 h はピエゾ水頭、 l は節理に沿った距離、 c は岩盤特性値で開口幅と節理間隔との比 b/s である。

節理開口幅 b は、平均1.0mm、標準偏差 $\sigma_b=0.5\text{mm}$ の正規分布に従う確率変数と仮定し、一様乱数を発生させて個々の節理の開口幅を決定する。ここで、岩盤内の分散機構を、複雑な節理群を濃度粒子が流下することによる分散現象としてとらえ、モンテカルロ法を用いたラグランジュの手法によりシミュレートする。Fig. 5に示す放出点から1000個の濃度粒子を放出する。粒子が節理交点に達したとき、一様乱数を発生させて開口幅と流下方向を決定し、(11)式から流速を求める。ただし、本解析では同式の K に1を与えている。この操作を所与の時刻まで繰り返して全濃度粒子の位置を決定する。

以上述べたモンテカルロ法による計算結果をFig. 6とFig. 7に示す。Fig. 6は主流方向における縦方向濃度分布を求めた3試行の結果を示す。いずれの試行においても濃度分布は歪みを有しており、正規分布に従わないことが認められる。Fig. 7は主流に直角な横方向濃度分布を示しており、Fig. 6の濃度分布と対をなすものである。横方向濃度分布は多峰分布型を示しており、濃度粒子は解析領域に広く分散し、その一部は領域外に流出している。これらの濃度分布は、流れ系に投入された濃度粒子が通過した節理の異方性と節理内流速変動に起因したものと考えられる。

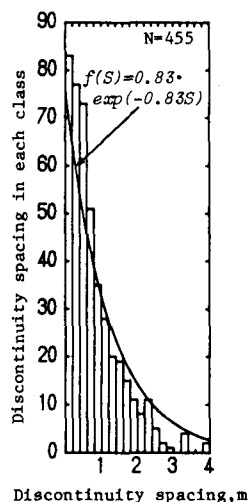


Fig. 4 Histogram of sampled trace spacing.

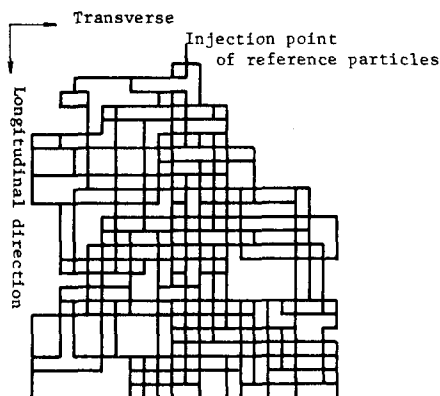


Fig. 5 Discontinuity trace simulation model.

Fig. 8は、縦方向濃度分布の分散(variance)の経時的な変化を示す。濃度の分散は時間の経過とともにほぼ直線的に増加する傾向が認められ、この曲線の勾配から縦方向巨視的分散係数は $D_L = d\sigma^2_L/dt = 0.14\text{m}^2/\text{h}$ と求められる。一方、横方向に関しては、本試行においては分散の経時変動が著しく、巨視的分散係数は算出できない。

4. 結 論

本研究で得られた結果を要約すると以下の通りである。

- 1) 節理モデルの作成にあたり、本文で示した統計的手法により岩盤露頭面における節理の性状特性を評価することが可能となる。
- 2) 亀裂性岩盤の分散は、濃度粒子の流下可能な節理の幾何学的な分布性状と開口幅の変化に基づく流速変動に起因して生ずる。
- 3) 本解析で用いた節理モデルは、中央部ではほぼ均質等方な性状を示すため、主流に沿う縦方向の濃度分布の分散(variance)は流下距離に伴いほぼ直線的に増加する。
- 4) 縦、横方向の濃度分布は、節理群の異方性と流速変動に起因する歪みを有する。従って、正規分布型の解を与える移流拡散方程式を用いたオイラー的な解法よりもモンテカルロ法によるラグランジュ的な解法が有効であると考えられる。

終わりに、本研究の遂行にあたり、計算等で協力された前本学学生長谷川潤君(現竹中土木株式会社)に協力を得たことを付記し感謝の意を表します。また、本研究は昭和63年度、平成元年度文部省科学研究補助金(一般研究(C)・代表・室蘭工大・藤間聡)の補助を受けたものであり、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Sager, B. and A. Runchal, Permeability of Fractured Rock: Effect of Fracture Size and Data Uncertainties, Water Resour. Res., 18(2), pp. 266-274, 1982.
- 2) Huyakorn, P. S. et al., An Efficient Finite Element Technique for Modeling Transport in Fractured Porous Media 1. Single Species Transport, Water Resour. Res., 19(3), pp. 841-854, 1983.
- 3) Cruden, D. M., Describing the size of discontinuities, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 14, pp. 133-137, 1977.
- 4) 大西裕三・外、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, 400/II-10, pp. 29-38, 1988.
- 5) Priest, S. D. and J. A. Hudson, Estimation of Discontinuity Spacing and Trace Length Using Scanline Surveys, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 18, pp. 183-197, 1981.
- 6) 前出5).
- 7) Wallis, P. F. and M. S. King, Discontinuity Spacing in a Crystalline Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 17, pp. 63-66, 1980.
- 8) 永井博史・外、岩盤中の節理分布性状の定量的評価とモデル化に関する検討、第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 127-132, 1984.

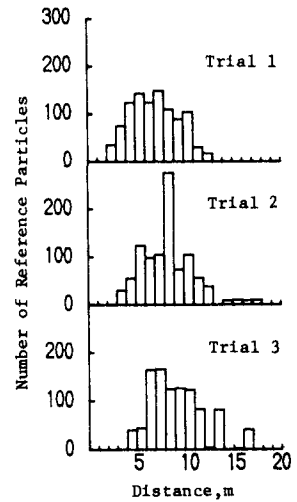


Fig. 6 Longitudinal dispersion of reference particles.

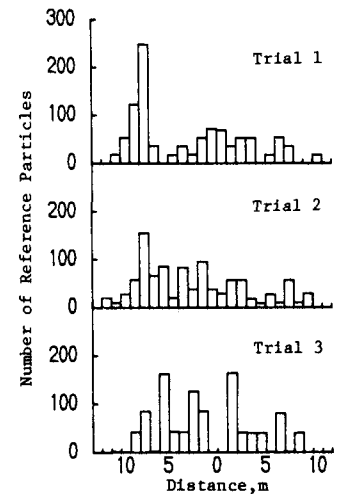


Fig. 7 Transverse dispersion of reference particles.

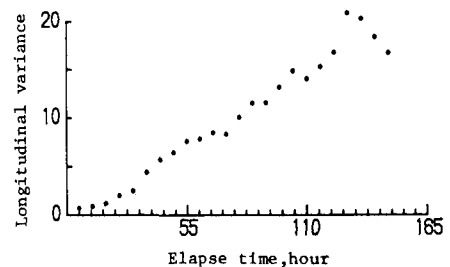


Fig. 8 Change in the rate of longitudinal variance as a function of time.