

(30) 現地調査による透水テンソルの決定例

○斎藤 禎二郎 西松建設(株)
北川 隆 西松建設(株)
小田 匡 寛 埼玉大学工学部

An example of geological survey and its application
to the estimation of permeability of rock masses

T. SAITO, NISHIMATSU CONSTRUCTION CO., LTD.
T. KITAGAWA, NISHIMATSU CONSTRUCTION CO., LTD.
M. ODA, SAITAMA UNIV.

Abstract : Rock masses containing a large number of discontinuities are treated as homogeneous, anisotropic porous media. Oda, M. (1986) has proposed an equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis of rock masses and the corresponding permeability tensor K_{ij} in terms of second-rank tensor P_{ij} . An example of the permeability estimation based on geological survey is given in this paper. An application of digital picture processing to the investigation of crack geometry is also reported.

1. はじめに

不連続面を有する岩盤の巨視的な透水係数や、その異方性の度合を調査の初期段階である程度予測できればその結果を考慮することにより、その後の調査・設計を有効に進めることができる。

小田(1986)は岩盤を等価な多孔質媒体とみなした場合の透水テンソルを、不連続面の幾何学的な情報により決定し得ることを示した。ここでは、この方法を用いて現地調査により透水テンソルを決定した例を示す。また、不連続面の情報化に必要と思われる不連続面の自動認識を試みた結果について報告する。

2. 透水テンソル

不連続面を含む岩盤の巨視的な透水性を表わす透水テンソルは式(1)のように表わせる。

$$k_{ij} = \lambda (P_{kk} \delta_{ij} - P_{ij}) \quad (1)$$

ここに、 λ は $0 \leq \lambda \leq 1/12$ のスカラー量、 P_{ij} は次のよう定義される2階のテンソル量である。

$$P_{ij} = \pi \rho / 4 \cdot \int_0^t \int_0^r \int_{\Omega} t^3 r^2 n_i n_j E(\underline{n}, r, t) d\Omega dr dt$$

t : 不連続面の開口幅、 r : 不連続面の直径、 $\underline{n}$: 不連続面上の法線ベクトル、 Ω : 全立体角
 n_i : 規準軸への方向余弦である。ここで、 $\underline{n}$, r , t の分布が互いに独立であると仮定し確立密度関数をそれぞれ $E(\underline{n})$, $f(r)$, $g(t)$ とすれば、ステレオロジーの手法を用いることにより P_{ij} は計測可能な量によって式(2)のように表わせる。

$$\begin{aligned}
 P_{ij} &= \pi \rho / 4 \cdot \int_0^m t^3 g(t) dt \int_0^m r^2 f(r) dr \int_{\Omega} n_i n_j E(\underline{n}) d\Omega \\
 &= \pi \rho / 4 \cdot \langle t^3 \rangle \cdot \langle r^2 \rangle N_{ij} \\
 &= \langle t^3 \rangle \cdot \frac{N^{(q)}/h}{\langle |\underline{n} \cdot \underline{q}| \rangle} N_{ij} \quad (2)
 \end{aligned}$$

ただし、 N_{ij} は $N_{ij} = \int_{\Omega} n_i n_j E(\underline{n}) d\Omega$ で表わせる2階の対称テンソルであり、 $\langle \rangle$ は、平均を表わす。 $\underline{q}$ は、観測面上の走査線の単位ベクトルであり、 $N^{(q)}/h$ は単位長さ当りに交わる不連続面の数でありRQDと等価な量、 $\langle |\underline{n} \cdot \underline{q}| \rangle$ はその補正係数である。

ところで、スカラー量である λ は不連続面のサイズと密度の増加にともなって増加する。パーコレーション・セオリーを用いた考察 (Robinson(1984)) によると3次元の場合には、不連続面の密度がかなり小さい場合にも不連続面相互の連結性が高いと考えられるので本地域の場合は $\lambda = 1/12$ を用いる。

また、平均透水係数は主値の平均値とし式(3)のように表わす。

$$\begin{aligned}
 k_{avo} &= 1/3 \cdot (k_1 + k_2 + k_3) \\
 &= 1/18 \cdot \langle t^3 \rangle \cdot \frac{N^{(q)}/h}{\langle |\underline{n} \cdot \underline{q}| \rangle} \quad (3)
 \end{aligned}$$

3. 調査内容とその結果

調査の対象とした地域の地形図を Fig.1 に示す。本地域では岩盤等級はC₁~Bであり岩種は花こう閃緑岩である。調査内容は不連続面の走行傾斜計測、および N_{ij} と $\langle |\underline{n} \cdot \underline{q}| \rangle$ の算出である。

走行・傾斜の測定は、転石ではないと考えられる露頭や沢のみで行なった。計測した走行・傾斜を南半球にステレオ投影したものを Fig.2 に示す。節理は、走行NSに近く傾斜がほぼ鉛直なものが卓越し、これと直交する2セット、計3セットが存在する。走行・傾斜のデータより N_{ij} を下に示すように求め、主値に変換したものを下に示す。ただし規準軸はX1-E 方向、X2-N 方向、X3-上方であり、 N_{ij} の主軸の方向はFig.2に示す。

$$N_{ij} = \begin{bmatrix} 0.488 & -0.068 & -0.045 \\ & 0.275 & -0.019 \\ \text{sym.} & & 0.236 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.514 & 0.000 & 0.000 \\ & 0.276 & 0.000 \\ \text{sym.} & & 0.210 \end{bmatrix}$$

N_{ij} は不連続面の方向性を表わす2階の対称テンソルである。構造の異方性を表わす指標を $A^{(N)} = (3N'_{ij} \cdot N'_{ij})^{1/2}$ (ただし、 $N'_{ij} = N_{ij} - N_{kk} \delta_{ij}/3, N_{kk} \delta_{ij} = 1$) で定義すると $A^{(N)} = 0.392$ であった。この値は主値空間における等方軸からのずれ角度が約21°であることを示している。次に $N^{(q)}/h$ については2カ所の露頭で計測した。露頭のトレース図の一例を Fig.3 に示す。 $N^{(q)}/h / \langle |\underline{n} \cdot \underline{q}| \rangle$ は、4.7~6.8となり平均値は5.7 (本/m)であった。この値は若干の幅を有するが、これは計測総数が少な

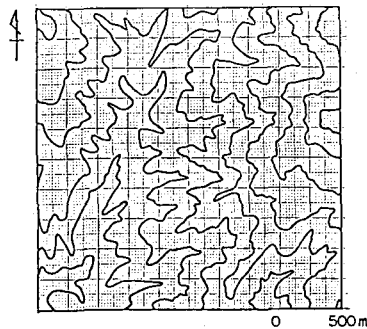


Fig.1 調査地域の地形
(等高線は100mコンター)

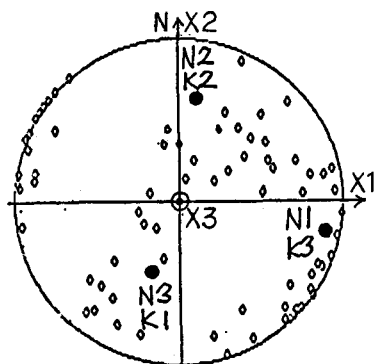


Fig.2 ステレオ投影図 (南半球投影)

いことと、現地の状況から鉛直方向の測線が不足したことに起因すると考えられる。

不連続面の開口幅については本地域では実測を行っていない。ルジオン試験等の透水試験の結果から求められる水理学的な開口幅を適用した例(青木(1989))が報告されているが、本地域においては透水試験は行っていないので以下のような開口幅を用いることとする。

小田(1986)によるとBandis et al.(1983)の実験結果は不連続面に作用する垂直応力 σ_n と開口変位 δ は2つの実験定数 a, b を用いて式(4)のように表われ、垂直剛性 H は式(5)で表わされる。ただし式(5)では、 h はサイズの効果을考慮するために導入された長さの単位を有する剛性、 $c (=t_0/r)$ はアスペクト比である。本地域の応力状態は現時点では把握されていないので、土被り圧が等方的に作用する場合を想定し $\sigma_n = \gamma z$ とすれば、開口幅 t は結局式(6)で表わせる。ここで、 γ は単位体積重量、 z は土被り、 t_0 は $\sigma_n=0$ における開口幅である。

$$\sigma_n = \frac{\delta}{a - b\delta} \quad (4)$$

$$H = \frac{\sigma_n}{\delta} = \frac{1}{r} (h + c\sigma_n) \quad (5)$$

$$t = t_0 - \delta = t_0 \left(1 - \frac{z}{h/c\gamma + z}\right) \quad (6)$$

式(6)で示されるように、 t_0 と $h/c\gamma$ を与えることによって開口幅 t を土被り z の関数として求められる。結局、式(1)、(2)、(6)より透水テンソル k_{ij} は式(7)のように表わされる。

$$k_{ij} = \lambda \left\{ t_0 \left(1 - \frac{z}{h/c\gamma + z}\right) \right\}^3 \cdot \frac{N^{(q)}/h}{\langle |n \cdot q| \rangle} \cdot (\delta_{ij} - N_{ij}) \quad (7)$$

ここでは、Fig.4に示す Bianchi & Snow(1968) の実測データをベスト・フィットする値を用いることとし、 $t_0=200(\mu m)$ 、 $h/c\gamma=20(m)$ とする。

式(3)より本地域における平均透水係数 k_{ave} は式(8)のように表わされる。また、 N_{ij} の場合と同様に異方性の指標 $A^{(k)}$ を定義すると $A^{(k)}=0.195$ であり主値空間における等方軸からのずれは約 11° である。

$$k_{ave} = 2.5 \times 10^{-5} \left(1 - \frac{z}{20 + z}\right)^3 \quad (m/s) \quad (8)$$

式(8)で表わされる本地域の平均透水係数を横軸にとり、深さ $z(m)$ を縦軸にとってSnow(1968)、青木ら(1989)の実測データとともにFig.5に示す。

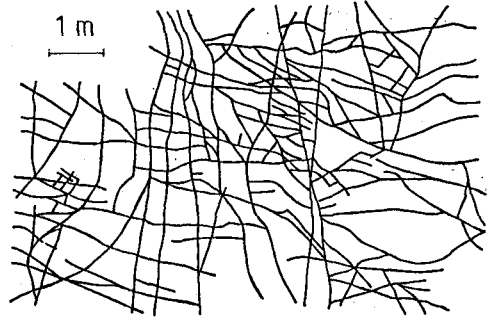


Fig.3 トレース図の一例

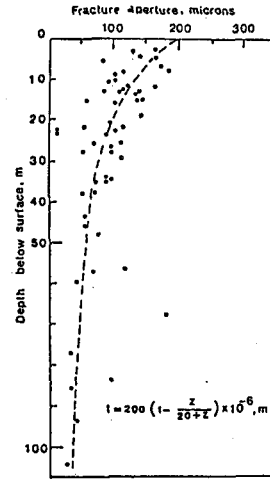


Fig.4 Bianchi & Snow(1968)による
実測開口幅。(Oda(1986))

4. 手書きトレース図の情報化

前述のように透水テンソルの決定においては不連続面のサイズのモーメントや亀裂間隔に相当する情報が必要である。これらの情報を自動的に得る一方法として画像処理技術の応用が挙げられる。

画像処理技術を用いた不連続面の認識は、次のように大きく二つの部分に分けられる。

- ①不連続面の抽出：写真やビデオの画像にヒストグラム変換、エッジ抽出、2値化などの処理を施して不連続面を線素として抽出し、トレース図を得る。
- ②不連続面の認識：①で得たトレース図（現状では、手書きトレース）から各不連続面を認識し、トレースとしての不連続面の両端点の把握、トレース長さ計測、亀裂間隔計測などの情報化を行なう。

ここでは、手書きトレース図の情報化について以下に述べる。Fig.8にフロー・チャートを、Fig.7に概念図を示す。

- (1)トレース図をイメージ・スキャナーなどにより2値画像として入力する。この際の解像度等については後ほど考察を行う。
- (2)入力画像を細線化し心線を得る。ここではHilditchのアルゴリズムを用いたが他にもRosenfeldやTamuraのアルゴリズムが有る。いずれを用いるにしても処理結果が4連結、8連結のどちらかに保証されている方が後の処理を行う上で有利と思われる。
- (3)各画素の隣接点数NPをカウントし、特徴点を抽出する。同時に、孤立点は削除する。
- (4)トレースの分岐、交差部では細線化後NP=3,4の点が隣接する場合が多いので、隣接するNP=3,4の点はまとめて一つの特徴点として扱う（ここでは、この処理のことを便宜上クラスター化とよぶ）。
- (5)NP=1の点を始点としてNP=2を追跡し、NP=1,3,4のいずれかに到達したらこれを終点として特徴点間を直線で近似する。
- (6)NP=2を追跡してNP=3,4を始点あるいは終点とする線分によって特徴点間を直線で近似する。
- (5)及び(6)の処理において折れ線近似するする場合には追跡の際、曲率による判断を加える必要がある。
- (7)上述の処理を行うと、各特徴点間を直線で近似した図を得る。各特徴点間の線分同士の連結性、線分の長さ・角度によって同一の不連続面のトレースに属しているか否かを判別し、全ての線分を調べ終わると終了する。

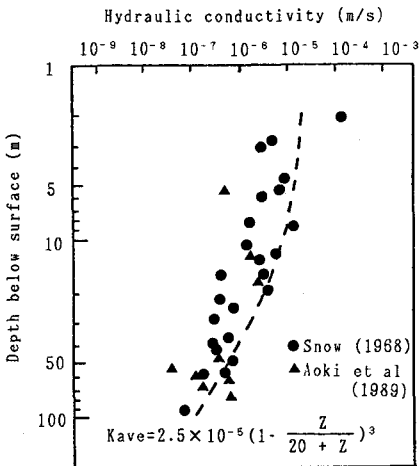


Fig.5 透水係数と深さの関係（データはSnow(1968),Aoki(1989)による）

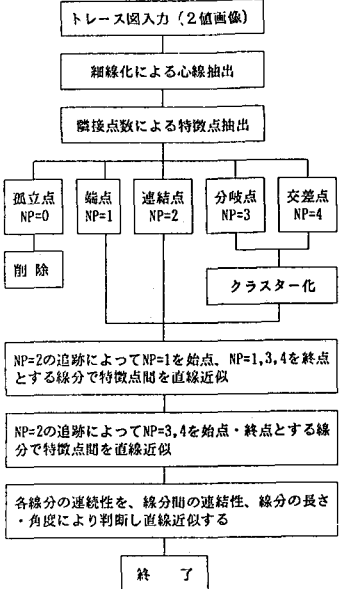


Fig.6 フロー・チャート

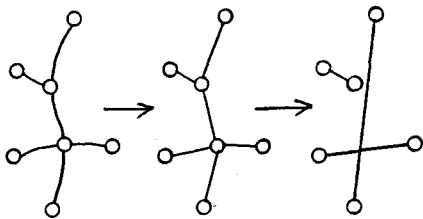


Fig.7 直線近似の概念図

以上のような処理を行った例を Fig.3 のトレース図を用いて Fig.8に示す。Fig.8においては a)入力2値画像、 b)細線化結果、 c)特徴点間直線近似、 d)最終結果である。最終的には、各不連続面のトレース面上における両端点の座標が得られる。すなわち現地での観察と、写真などを基に手書きのトレース図を作成すれば、このような単純な処理によってトレース長さや亀裂間隔などは後処理として自動的に求めることができる。

また、本報告においては画素数は176*176であり、1つの画素のサイズは1mm角という非常に粗いものである。このように解像度が低いとトレースの分岐・交差の位置が近接し、その結果精度は低下する。逆にトレースの線幅に対して解像度が高くなると細線化に要する時間が増加し、ひげの発生によるノイズが生じる。よって、入力画像である手書きトレース図の線幅に見合った解像度で処理を行えば本方式で適切な結果が得られるが、本手法では細線化を用いているため、心線抽出に時間がかかるのが欠点である。

さらに、写真などから画像処理によって得たトレース図を入力画像として情報化を行なうに当たっては、本手法にとぎれ線の連続性判断を加える必要がある。

5. まとめ

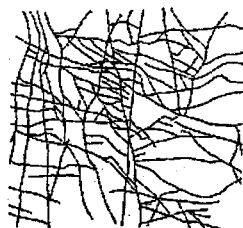
透水テンソルの決定については、不連続面の開口幅の計測が重要である。ここでは、Bianchi & Snow(1968)の実測データを用いたが彼らのデータがそのまま適用できるとは限らないので、今後さらにデータを蓄積して本調査結果の検討を行ないたい。

手書きトレース図の情報化として報告した方法は、様々なものの内の一例である。特に線図形の抽出・認識については、図面入力、地図・天気図の読み取りなどの分野においては、高度なテクニックが多数報告されている。今後は、より簡易でより正確な情報化の方法を模索したい。

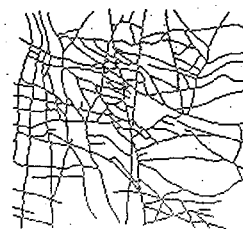
最後に、調査に協力して頂いた方々に謝意を表します。

(参考文献)

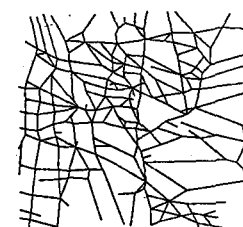
- 1)青木 謙治: "不連続性岩盤浸透流の調査・試験とその解析方法", 第6会岩盤システム工学セミナー, pp133-pp182, 1989年12月, (社)システム総合研究所。
- 2)Bandis, S.C., A.C.Lumsden, and N.R.Barton: Fundamentals of rock joint deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 20, 249-268, 1983.
- 3)Bianchi, L and D.T.Snow: Permeability of crystalline rock interpreted from measured orientation and aperture of fractures, Ann. Arid Zone, 8(2), 231-245, 1968.
- 4)N.J.Naccache and R.Shinghal: An investigation into the skeletonization approach of Hilditch, Pattern Recognition, Vol. 17, No. 3, pp. 279-284, 1984.
- 5)Oda, M.: An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow in jointed rock mass, Water Resources Research, Vol. 22, No. 13, pp. 1845-1856, Dec., 1986.
- 6)Robinson, P.C.: Connectivity, flow and transport in network models of fractured media, Ph.D. dissertation, Oxford University, 1984.
- 7)Snow, D.T.: Hydraulic characteristics of fractured metamorphic rock of the front range and implications to the Rocky mountain Arsenal well, Col. Sci. Mines q., 63, pp. 167-199, 1968



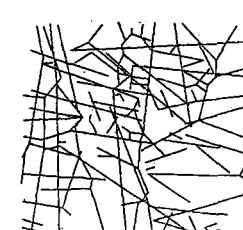
a)入力2値画像



b)細線化の結果



c)特徴点間の線分近似



d)情報化の為の直線近似

Fig.8 情報化の例