

(3) 岩盤の不連続面に関する一評価手法

大成建設(株) ○ 里 優 亀村 勝美
芙蓉情報センター 久保 紳

1 緒 言

岩盤は、微細なクラックから大規模な断層に至るまで数多くの不連続面を有し、時として、これらの不連続面が、地下構造物の安定を脅かす原因となる。また、不連続面の分布状態によっては、地下水の流れにも影響を及ぼす場合があり、従って、岩盤の力学あるいは水理学的性質を明らかにする上で、不連続面の存在には、十分な注意を払う必要がある。

岩盤に含まれる不連続面は、その規模や分布の状況、あるいは評価の対象とする構造物の大きさにより、その取り扱い方が自ずと異なってくる。不連続面と構造物の相対的な大きさに着目し、不連続面を概念的に分類すると、次のようになる。

- i) 断層、及びこれに類するような、構造物と同程度ないしそれ以上の規模を有する不連続面
- ii) 構造物に比べ規模は小さいが、高い密度で存在する不連続面
- iii) 構造物に比べ規模が小さく、また分布密度も低い不連続面
- iv) 微細なクラックなど、構造物に比べ充分に小さく、高い密度で存在する不連続面

これらの内、iii)は、密度が低く、不連続面とおしの連絡が不充分であることなどから、力学的にも水理学的にも、特に配慮を必要としないであろう。また、i)及びiv)は、構造物の安定を検討する上で重要であるものの、それぞれ、不連続面のみ、あるいは、不連続面を含む連続体としての岩盤の性質に注目してこれらを評価することができ、既に地質学や岩石力学的立場から様々な評価手法が提案されている。岩盤の特性を大きく左右するにもかかわらず、最もその評価が困難とされているのは ii)に示すような不連続面である。このような不連続面は、不連続面とおしの連絡が充分期待できるため、岩盤水理の分野での研究が進んでいる。特に、Snow, Long, Wilsonらは、不連続面の空間分布が透水性に及ぼす影響を明らかにするとともに、不連続面と評価の対象領域の相対的な大きさが、みかけの透水性を変化させることも示している。岩盤力学の分野でも、Prist, Hudsonらが⁽⁴⁾精力的に研究を進めており、統計的な手法を用いて岩盤内の不連続面分布を評価する手法を提案している。また、不連続面の空間分布や幾何形状をテンソル量として表現し、これより岩盤の変形性や透水性を推定する試みが、小田らにより成され⁽¹⁾おり、さらに、このテンソルの値を、ボーリングデータや空洞壁面の観察結果から定める工夫が、小田、金谷らにより示⁽²⁾されている。筆者らも、ii)のような構造物に比べ規模が小さく、充分な密度で分布する不連続面を対象とし、不連続面の空間分布などをもとに、岩盤の物理的な性質を評価する手法を検討しているが、二階のテンソルとしてこれを表現する手法について、若干の知見を得たのでここに報告する。

2 テンソル表示について

高い密度で存在する不連続面は、一般に、観察されたデータをステレオネットやデニスネット等プロットし、これを密度関数として分布を特徴づける手法が用いられる。このような手法では、不連続面の空間的な分布を把握することができるものの、これを数量化し岩盤の物理的な性質と結びつけることは容易ではない。先に示した研究の多くは、このような困難を克服するため、一種の平均化手法を用い、対称テンソルとして密度分布を表現し、これと岩盤の物理特性を結びつけようとするものである。このような手法の是非はともかく、この手法により算定された岩石の物理量と実験結果がかなりの相関を有するとの報告があることや、テンソルの固有値、固有ベクトル等により、不連続面分布の特徴を評価することができることなどから実用性の高い手法と考えることができる。そこで、次のような平均化手法を用い、不連続面を含む岩盤の性

質をテンソル表示してみた。

3 体積の重みつき平均

いま、図-1(a)に示すような4つの部分からなる岩盤ブロックを考える。そして、ある物性値 E (スカラー量、あるいはテンソル量) が、各々の部分で定値をとるものとする。このときブロック全体での平均値を、次式で与えることとする。

$$E = \frac{1}{V} (V_1 E_1 + V_2 E_2 + V_3 E_3 + V_4 E_4) \quad (1)$$

同様に、図-1(b)に示すような体積 V_i の空隙を有する岩盤については、それぞれの物性値を E_i として

$$E = \frac{1}{V} \{ (V - \sum_i V_i) E_0 + \sum_i V_i E_i \} \quad (2)$$

を、ブロック全体の平均的な物性値と考えることとする。空隙部の体積がブロックに比べ充分小さいとき、(2)式は

$$E = E_0 + \frac{1}{V} \sum_i V_i E_i = E_0 + \tilde{E} \quad (3)$$

と書くことができる。これらの空隙を全て円板状 (図-2) と仮定すると、それぞれの空隙は、面の法線ベクトル P_c 直径 r_c 開口幅 t_c などで特徴づけられる。この面の物理的性質 E_c が二階のテンソル量 λ_c で表わされるものとする、面を円板としたから、面座標系では

$$\lambda_c = \lambda_{ij} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

と表わすことができる。ここに、 α は、面内方向の物理特性を与える定数、また β は、面の法線方向の特性を与える定数であり、これらは r_c 、 t_c などの関数である。 λ_c を全体座標系に変換したものが E_c である。このような P_c 、 r_c 、 t_c などで特徴づけられる空隙の個数を N_c とすると、全体座標系における面の方向を $A = (H_c, D_c, P_c) = a_{ij}$ とし

$$E_c = e_{ij} = a_{ik} a_{jl} \lambda_{kl} = \alpha (\delta_{ij} - a_{i3} a_{j3}) + \beta a_{i3} a_{j3} \quad (5)$$

$P_c = (a_{13}, a_{23}, a_{33})^t$ で、これを改めて n_i とおくと、結局

$$\tilde{E} = \frac{1}{V} \sum_c V_c \{ \alpha (\delta_{ij} - n_i n_j) + \beta n_i n_j \} N_c \quad (6)$$

または、 $V_c = \pi r_c^2 t_c / 4$ などから、次のようにも書くことができる。

$$\tilde{E} = \frac{\pi \rho}{4} \sum_c r_c^2 t_c \{ \alpha (\delta_{ij} - n_i n_j) + \beta n_i n_j \} D \quad D = D(P_c, r_c, t_c) = \frac{N_c}{N} \quad (7)$$

ここに、 N は空隙の総数、 ρ は空隙の体積密度 ($= N/V$)、 D は相対度数を表わす。従って、空隙の存在による物理特性の平均的变化分 $\tilde{E}$ は、二階のテンソルとして表わされることがわかる。(7)式において、 $\alpha = 0$ 、 $\beta = r_c / t_c$ とおけば、(7)式は、小田らの示したクラックテンソルに一致する。即ち、クラックテンソルは、不連続面における面内方向の変形性を0、面の法線方向の変形性を r_c / t_c に比例するとした上で、全領域について不連続面の体積を重みにとり平均したものとも解釈することができる。逆に、 $\beta = 0$ 、 $\alpha = \lambda t_c^2$ とすれば、Long、小田らが示しているように、面内方向の透水性が開口幅の二乗に比例すると

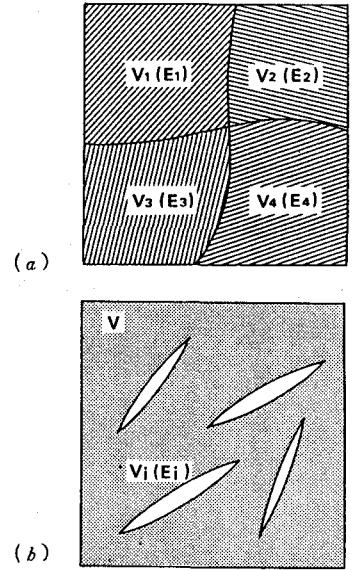


図-1 岩盤の平均的物性

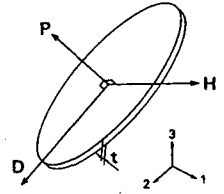


図-2 不連続面の理想化

仮定した場合の、透水性の異方性を表わすテンソルとなる。

4. テンソルの固有値と固有ベクトル

(7)式で表わされる二階のテンソルは対称性を有し、三個の固有値及び固有ベクトルが定められる。これらの物理的な意味合いについて、以下に考察を加える。まず、関数のため、(7)式を次の二式に分ける。

$$e_{ij}^{(1)} = \frac{1}{V} \sum_c V_c \alpha (\delta_{ij} - n_i n_j) N_c \quad (8) \quad e_{ij}^{(2)} = \frac{1}{V} \sum_c V_c \beta n_i n_j N_c \quad (9)$$

次に、任意の単位ベクトル $Q (=q_i)$ を $e_{ij}^{(1)}$ にかけ、スカラー量 $G(Q) = e_{ij} q_i q_j$ を求めてみる。 $e_{ij}^{(1)}$ の固有値を、 μ_1, μ_2, μ_3 ($\mu_1 \leq \mu_2 \leq \mu_3$) とすれば、 $G(Q)$ は、 $\mu_1 \leq G(Q) \leq \mu_3$ なる性質を持ち、また $G(Q) = \mu_1$ を与える Q の方向は、 $e_{ij}^{(1)}$ の μ_1 に対応する固有ベクトルの方向と一致する。 $G(Q)$ を変形すると

$$G(Q) = \left\{ \frac{1}{V} \sum_c V_c \alpha (\delta_{ij} - n_i n_j) N_c \right\} q_i q_j = \frac{1}{V} \sum_c V_c \alpha |n_i \times q_i|^2 N_c = \frac{1}{V} \sum_c V_c \alpha d^2 N_c \quad (10)$$

となるが、これは、 $G(Q)$ が P から Q に下した垂線の長さ d の二乗和に等価であることを示している。従って、 $G(Q)$ が最小となるような Q の方向、即ち $e_{ij}^{(1)}$ の最小固有値を与える方向は、不連続面の法線の平均的な方向と考えることができる。(8)式は、透水性の異方性を表わすことのできるテンソルであるが、面の法線ベクトルが集中する方向は、最も透水性の低い方向であり、これが最小固有値の意味あいと解釈することができる。(9)式について同様の処理を行なった場合の結果だけを示すと、

$$F(Q) = \frac{1}{V} \sum_c V_c \beta (n_i \cdot q_i)^2 N_c = \frac{1}{V} \sum_c V_c \beta \ell^2 N_c \quad (11)$$

となる。 $F(Q)$ は P から Q を法線とする面へ下した垂線の長さ ℓ の二乗和に等価であり、 $F(Q)$ の最小値を与える方向、即ち $e_{ij}^{(2)}$ の最小固有値を与える方向は、前述の場合とは逆に、不連続面の面内方向が、最もよく現われる方向となる。クラックテンソルでは、これが最も変形しにくい方向となることは、容易に理解できよう。

5. 解析例

(8)式で表わされるテンソルを例にとり、これが、不連続面の分布をどのように反映しているかを調べてみた。なお、 α 、及び γ_c 、 t_c は一様と仮定した。図-5~6は、正規乱数を用い、法線ベクトルの方向が一山分布となるように不連続面を発生させた場合の例である。図-5では、デニスネット上に、与えた不連続面の法線とこれをもとに算定したテンソルの固有ベクトルの方向をプロットしてある。このような場合は、分布の中心と、固有ベクトルの方向が概ね一致することがわかる。図-7~8は、同様にして、法線ベクトルの方向が二山分布となるように、不連続面を発生させた場合である。さらに図-9~10には、法線ベクトルが単一平面内に一樣に分布するような場合(投影面では大円上)についての結果を示し

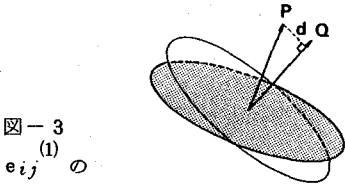


図-3 $e_{ij}^{(1)}$ の固有値

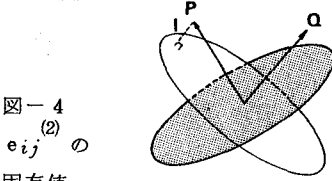


図-4 $e_{ij}^{(2)}$ の固有値

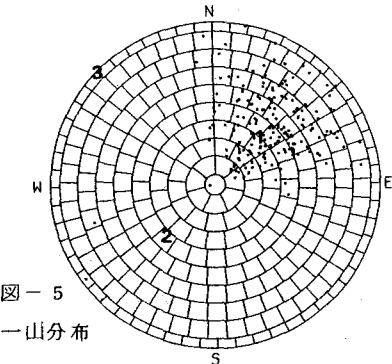


図-5 一山分布

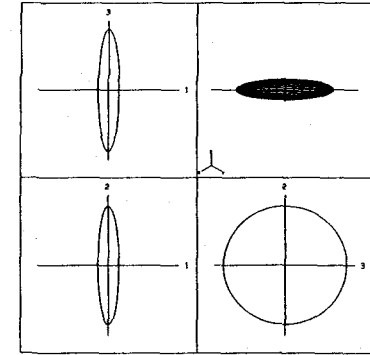


図-6 $e_{ij}^{(2)}$ (一山分布)

た。これらの場合では、当然ながら、分布の中心とテンソルの固有ベクトルの方向は一致せず、固有ベクトルの方向より、分布の様子を推定することはできない。しかしながら、固有値は、それぞれの分布の特徴を反映したものとなっており、従って、固有ベクトルの方向、及び固有値の大きさを吟味することにより、テンソル量から不連続面分布の特徴を、大まかに推定することができる（図-8，図-10）。

6. 結 言

本報告では、不連続面の物理特性が二階のテンソルで表わされるものとし、これを不連続面の体積を重みにとり平均化することによって不連続面を含む岩盤の物理特性の異方性を表現することを試みた。この過程で、次のような問題点が明らかとなった。

- i) 岩盤の変形特性の異方性をこのテンソルで表現しようとした場合、不連続面のせん断変形や摩擦などが考慮されていないため、テンソルの主軸と、変形、強度の異方性の主軸が一致しない可能性がある。
- ii) 平均化の過程で、不連続面を円板や楕円体などの単純な形状に置き換える必要がある。従って、面の物理特性を表わす定数（ここでは、 α ， β ）の意味合いが、極めて不明瞭なものとなる。
- iii) 同様に、平均化の過程で面とおしの連絡や相互作用を考慮することが難しい。

これらの難点は、不連続面の分布を二階のテンソル（直交異方性）として表現する上での根本的な問題であり、解決は難しい。しかしながら、岩盤の弾性波速度、透水性、熱伝導特性などは、これらの問題にさほど扱われる必要がないと考えられ、二階のテンソルがよい近似を与える可能性がある。今後は、このような手法の適用範囲を明確にするとともに、弾性波速度試験などによりテンソルの値を定める方法、あるいは実測値によりこれを修正する手法について検討してゆく所存である。

（参考文献）

- (1) Oda M. (1983) A Method for Evaluating the Effect of Crack Geometry on the Mechanical Behavior of Cracked Rock Mass. Mech. of Materials 2 pp.163-171
- (2) Kanatani K. (1984) Distribution of Directional Data and Fabric Tensors. Int.J. Engng. Sci., Vol.12 pp.149-164
- (3) Long J. C. S., et. al. (1982) Porous Media Equivalents for Networks of Discontinuous Fractures. Water Resources Res., Vol.18, pp. 645-658
- (4) Priest S.D. and A. Samaniego (1983) A Model for the analysis of Discontinuity Characteristics. 5th ICRM

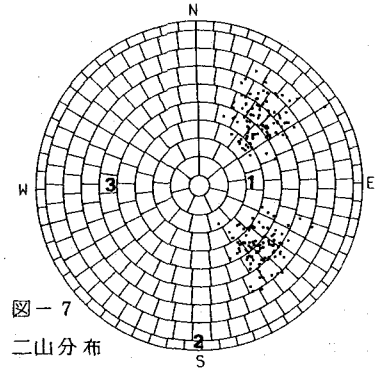


図-7
二山分布

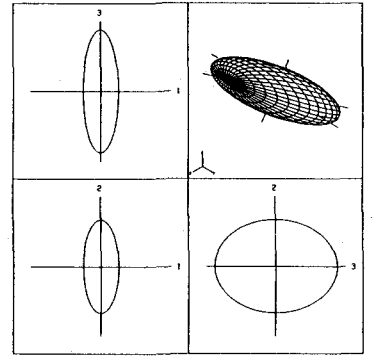


図-8 $e_{ij}^{(2)}$ (二山分布)

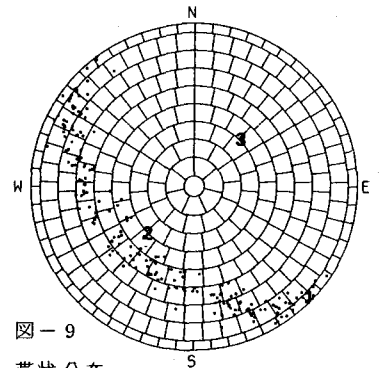


図-9
帯状分布

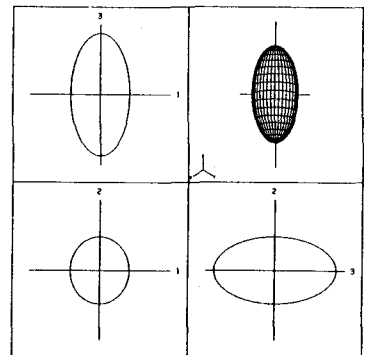


図-10 $e_{ij}^{(2)}$ (帯状分布)

(3) A Study on The Evaluation of Rock Discontinuities

Masaru Sato *
Katsumi Kamemura *
Shin Kubo **

Summary

Rock mass contains innumerable cracks which range in size from faults to microscopic cracks, and the mechanical stability of underground structures and geohydrologic property of rock mass depend upon the geometry and distribution of these cracks.

In this paper, cracks, which are smaller than the structure and distribute with high density, are examined. A method for evaluating the effect of these cracks on the mechanical and hydrological property of rock mass is presented.

A crack is regarded as a disk with r in diameter and t in thickness. Supposing that the physical property of the crack can be expressed by second rank tensor, some property of rock mass averaged over the total volume can be represented by tensor e_{ij} ;

$$e_{ij} = \frac{\pi \rho}{4} \int_t \int_r \int_\Omega \{ \alpha (\delta_{ij} - n_i n_j) + \beta n_i n_j \} D(n, r, t) d\Omega dr dt \quad (1)$$

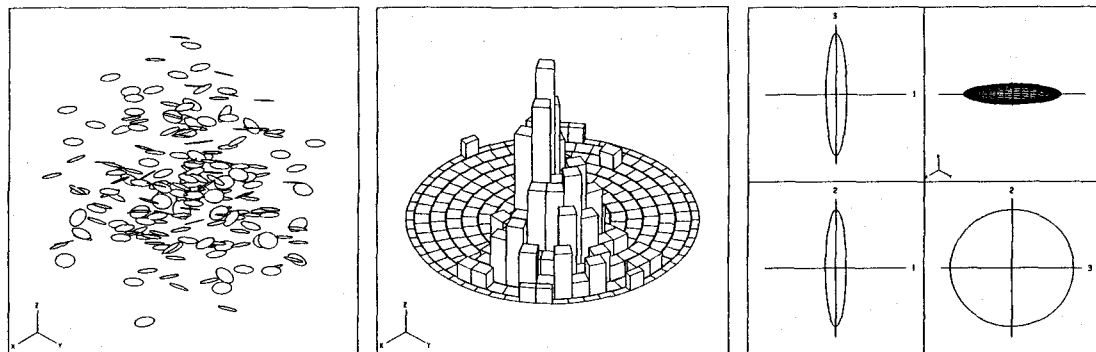
where ρ denotes volume density of crack, D is the density function, and α and β represent the physical properties of lateral and normal direction to a crack respectively. The anisotropy of rock mass can be characterized by equation (1).

This kind of averaging, however, has some disadvantageous, for instance,

- i) it is difficult to take shear behaviour into consideration
- ii) cracks are generally treated as idealised planes, such as disks or ellipsoids.

Therefore, values of the tensor e_{ij} should be modified by in-situ testing.

Examples of analysis are shown in Fig. 1.



a) Distribution
of cracks

b) Density function

c) Tensor e_{ij}

Fig. 1 Examples of analysis

* Taisei Corporation

** Fuyo Data Processing & System Development, Ltd.