

岩盤中の節理分布性状の定量的評価とその解析

電力中央研究所 土木技術研究所

○菊地宏吉 斉藤和雄 井上大栄

金折裕司

1. まえがき

土木構造物基礎岩盤中の節理の分布性状を把握することは、その基礎岩盤の力学的特性及び透水性状を解明するうえに、欠く事の出来ないことであり、その基礎岩盤の改良を目的として行なわれる基礎処理を効果的に行なうためにも必要なことである。しかしながら現状では、節理の方向性及び分布密度に関する分布性状については、シュミット網及びウルフ網によって定性的に検討する方法が用いられているのみであり、量的に把握する方法は殆どないと云うのが実情である。このような状況から、筆者らは数年に亘って節理の分布性状を量的に評価・把握する方法を検討している。この研究は、岩盤中の節理分布の量的な評価に関する一つの考え方と、その考え方に基づく電子計算機を用いた解析方法について述べたものである。

2. 節理分布の評価

岩盤中の節理分布の規則性は、完全なものではない。従って、岩盤の力学的特性の検討に用いる方向性に関するデータは、実態に近い単純規則化した近似モデルとして解析した結果を用いざるを得ない。この場合、岩盤中の節理の分布状況は、一般に火成岩類のように比較的規則性の強いものから、新第三紀の堆積岩類のように比較的弱いものまでであるので、検討にあたっては、規則性の程度及び内容の評価が必要と考えられる。

筆者らは、評価の一つの方法として、下式のように節理属群保有率及び節理属群分布率を定義し、これによる評価を考えた。(ここで走向・傾斜が3・3で述べる範囲に属する節理の一群を節理属群と呼ぶ。)

$$\text{節理属群保有率: } \alpha = \left\{ \sum_{i=1}^n (N_i) / N \right\} \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{節理属群分布率: } \beta_i = \left\{ N_i / \sum_{i=1}^n (N_i) \right\} \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots (2)$$

N_i : i 節理属群に属する節理の個数

N : 節理総個数

節理属群保有率とは、節理総個数における各節理属群に属する節理個数の総和の占める割合を示すものであり、節理属群保有率が大きいほど節理系の規則性の強いことを示している。この節理属群保有率は節理分布を単純規則化した近似モデルとして取扱う場合の信頼度を示すものといえる。

また節理属群分布率とは、各節理属群に属する節理個数の総和に対する一つの節理属群に属する節理個数の割合であり、節理属群分布率が大きいほど、その節理属群が有する規則性が高いことを示している。したがって、節理属群保有率 α が大きい場合には、節理属群分布率が、その岩盤の節理母集団における各節理属群の分布比率と見なし得るものとなる。

なお、このような取扱いにおいては、標本であるデータの採取の無作為性が基本的前提であり、目的に対する判断を誤らせることのないよう、データ採取にあたっては、この点を十分に考慮することが必要である。

3. 解析における考え方

節理分布性状を評価するための節理分布密度、節理属群保有率および節理属群分布率を算出する方法として電算機による方法を考案した。

この解析手法における考え方および計算法の特徴は、つぎの3点である。a)節理の分布密度を表現するために

，空間の極座標 ($R=\text{constant}$) および空間中の2点間の距離を用いる。b)節理属群を抽出するに必要な属群の中心点を求めるためにベクトル手法を適用する。c)節理面のアンジュレーションの程度に基づいて各節理属群の範囲を決定する。以下にその詳細を述べる。

3.1 空間の極座標を用いた分布密度の測定

従来の節理の分布密度を求める方法としては，走向傾斜によって球面座標上の点として示される個々の節理を，球面座標上に一定間隔に設けた各計測点^{*1}(普通は 5° あるいは 10° 毎に設ける)毎に，その点を中心とした単位カウンター^{*2}円を用いて，その円に入る節理点の個数を計測し，分布密度を測定する方法が用いられる。この場合，実際の作業は，球面座標の投影であるシュミット網およびウルフ網上に節理を走向傾斜によってプロットし，これをシュミット網およびウルフ網測定用にそれぞれ考案した円形カウンターを用いて計測し，分布密度を求めているが，このうちシュミット網を使用する方法については，緒方によって，測定方法に誤りがあることが指摘され，最近ではウルフ網が用いられている。しかしながらウルフ網を使用する場合についても，ウルフ網上では計測点によって，カウンターの大きさを変えなければならないという不便な点がある。そこで筆者らは，これに代るものとして下記の方法を考えた。

すなわち球面座標上の点の位置が，その球の半径を動径とした空間の極座標でもあたえられることから，空間の2点間の距離を示す式(3)を用いて球面上にある各計測点(P)と対象とする節理点(Q)との間の線分の長さ(l …弦の長さ)を算出し(図-1参照)，その線分の長さ(l)と単位カウンター円の半径(L)との比較によって，その節理点のグルーピングを行なうものである。

$$l = \{ (x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2 \}^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

今，計測点(P)の方位角をAとし，天頂角をBとすると，半径rの球面上における計測点(P)の座標は極座標により(4)で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} x &= r \cdot \cos A \cdot \sin B \\ y &= r \cdot \sin A \cdot \sin B \\ z &= r \cdot \cos B \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

また，節理点を表わす走向をC，傾斜をDとすると節理点(Q)の座標は極座標により(5)で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} x' &= r \cdot \cos C \cdot \sin D \\ y' &= r \cdot \sin C \cdot \sin D \\ z' &= r \cdot \cos D \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

そこで，(3)，(4)，(5)から計測点(P)と節理点(Q)との間の長さ l (弦)は(6)式のように表わされる。

$$l = r \cdot \{ (\cos A \cdot \sin B - \cos C \cdot \sin D)^2 + (\sin A \cdot \sin B - \sin C \cdot \sin D)^2 + (\cos B - \cos D)^2 \}^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

この(6)式で得られる l と単位カウンター円の半径の弦の長さ(L)とを比較し，計測の対象となつた節理点がか

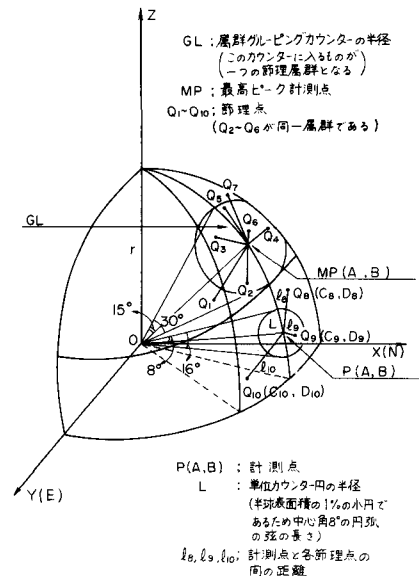


図-1 グルーピングカウンターによる節理属群の測定

*1 単位カウンター円；この場合は半球表面積の1%の面積を有する円をカウンターとしている。なお，このカウンター円の半径の中心角は 8° である。
 *2 節理点；節理面を球の中心を通る大円面とすれば，その大円面の軸が球面と交わる点の球面座標として節理面を表現出来るので，以下この点を節理点と呼ぶ。

ンターに入るか否かを判定し、その計測点における節理点の密度を測定する。このような密度測定を各計測点について行ない、節理の密度分布を求める。

この方法は、計測ならびに算出が直接的であるために、ウルフあるいはシュミットなどの投影ネットを使用する方法に比較して、処理過程での誤差が少なく、また電算機を利用することから、データ数が多い場合には、解析に要する時間の短縮にかなり有効である。

3.2 ベクトル手法による節理属群の中心点の選定

グルーピングカウンターを用いて、各節理属群を抽出する場合、その節理グループの中心となる点が必要である。実際には一つのグループをなす節理群の中心を、そのグループ内において3.1で求めた密度分布の最高ピーク計測点として、節理属群のグルーピングを行なうが、この場合、前記の密度分布の最高ピーク計測点が単数の時には、その点がそのまま中心点をなし、一方複数の時にはその代表となる中心点を求めなければならない。

複数個ある最高ピーク計測点の代表中心点は、それらの最高ピーク計測点を単位ベクトル群と考えれば容易に算出出来る。鍋岡によれば、いま、単位ベクトル $A_1, A_2, \dots, A_i \dots A_n$ が与えられた時、その平均ベクトルを A で表わせば、スカラー量の平均と同様に、 A は $\sum_{i=1}^n (A - A_i)^2$ を最小とする単位ベクトルであると考えることができる。そこで $(A - A_i)^2$ を変形すると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n (A - A_i)^2 &= \sum_{i=1}^n A_i^2 + \sum_{i=1}^n A^2 - 2 \sum_{i=1}^n (A_i \cdot A) \\ &= 2 \left(n - \sum_{i=1}^n (A_i \cdot A) \right) \\ &= 2 \left(n - \left(A \cdot \sum_{i=1}^n A_i \right) \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

したがって、 A は $(A \cdot \sum_{i=1}^n A_i)$ を最大とするような単位ベクトルである。換言すれば、ベクトル A の方向がベクトル $\sum_{i=1}^n A_i$ の方向に一致したとき A は最大となる。したがって

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{\left| \sum_{i=1}^n A_i \right|} \dots \dots \dots (8)$$

となる。すなわち、平均ベクトル A は、ベクトル $A_1, A_2 \dots A_n$ の和のベクトル方向と一致する単位ベクトルである。

そこで、前記の各節理グループにおける最高ピーク計測点群の i 番目のものの方位角及び天頂角をそれぞれ ϕ_i 及び θ_i とし、最高ピーク計測点群の代表中心点の座標を、それぞれ ϕ 及び θ とすれば、上述の(8)式より

$$\cos \theta = \frac{\sum_{i=1}^n \cos \theta_i}{\sqrt{\left\{ \left(\sum_{i=1}^n \sin \theta_i \cos \phi_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n \sin \theta_i \sin \phi_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n \cos \theta_i \right)^2 \right\}}}, \quad \tan \theta = \frac{\sum_{i=1}^n \sin \theta_i \sin \phi_i}{\sum_{i=1}^n \sin \theta_i \cos \phi_i} \dots \dots \dots (9)$$

となる。ただし、この場合の条件は次の通りである。

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \sin \theta_i \sin \phi_i > 0, \sum_{i=1}^n \sin \theta_i \cos \phi_i > 0 &\text{ならば } 0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2} \\ \sum_{i=1}^n \sin \theta_i \sin \phi_i > 0, \sum_{i=1}^n \sin \theta_i \cos \phi_i < 0 &\text{ならば } \frac{\pi}{2} \leq \phi \leq \pi \\ \sum_{i=1}^n \sin \theta_i \sin \phi_i < 0, \sum_{i=1}^n \sin \theta_i \cos \phi_i < 0 &\text{ならば } \pi \leq \phi \leq \frac{3}{2}\pi \\ \sum_{i=1}^n \sin \theta_i \sin \phi_i < 0, \sum_{i=1}^n \sin \theta_i \cos \phi_i > 0 &\text{ならば } \frac{3}{2}\pi \leq \phi \leq 2\pi \end{aligned}$$

これによって、節理属群を定めるための最高ピーク計測点群の代表中心点の座標が求められる。

3.3 節理属群の範囲の決定

同一属群の範囲を決める方法として、筆者らは節理面のアンジュレーションから検討する方法を考えた。すな

わち、調査対象地点の現地において、比較的連続性を有する平滑な節理を選んで、節理面の変化の度合を測定し、これに基づき属群範囲を決定する方法である。図-2は石英閃緑岩及び玢岩岩体を基礎とする、あるダムサイトでの測定結果である。これによれば同一節理面の変化の範囲は、測定誤差を含めて中心角約30°の範囲であることを示している。したがって、この地点に対しては、同一属群の範囲を中心角30°の小円（すなわち中心角15°の半径を有する小円の範囲）として、これを同一属群をきめるグルーピングカウンター（以後属群グルーピングカウンターと呼ぶ）と定めた。

前節で求めた各節理グループにおける最高ピーク計測点、又は最高ピーク計測点群の代表中心点を中心点とした上記属群グルーピングカウンターに含まれる節理点群によって節理属群が定められる。

なお、この場合、属群グルーピングカウンターは直径が中心角30°の小円としていることから、この節理属群と最も近い位置にある他の節理属群との距離（すなわち、一つの節理属群の中心点と他の節理属群の中心点の距離）は中心角で最小限30°は離れることになる。

4. 解析方法

以上の考え方に基づき、電算機を用いた計算手法による解析処理過程の概略は下記の通りである。

- a. 単位カウンター計測による節理分布密度の測定
- b. 各節理属群のグルーピング
 - b-1 最高ピーク計測点または最高ピーク計測点群の決定
 - b-2 ベクトル手法による最高ピーク計測点群の代表中心点の決定
 - b-3 各節理属群の決定（図-2参照）
- c. 節理属群保有率(α)の算出
- d. 各節理属群の節理属群分布率(β_i)の算出

5. 適用例

東電K揚水地点ダムサイトの石英閃緑岩及び玢岩岩体について、上記の手法により、節理の分布性状を解析した。その結果、左岩側の玢岩岩体の節理は50.0%の節理属群保有率をもち、L-I（走向傾斜…166/81）、L-II（269/85）、L-III（80/73）、L-IV（194/57）、L-V（323/90）及びL-VI（253/38）の6つの節理属群の発達が認められ、それらの節理属群分布率はそれぞれ26%, 18%, 18%, 14%, 14%, 10%であった。一方、右岸側の石英閃緑岩岩体の節理は36.9%の節理属群保有率のもとに、R-I（280/71）、R-II（7/45）、R-III（216/80）、R-IV（312/82）及びR-V（184/65）の5つの節理属群の発達が認められ、それらの節理属群分布率は、それぞれ32.6%, 18.6%, 18.6%, 17.4%, 12.8%であった。

6. むすび

以上、岩盤中の節理分布性状の量的評価に対する筆者らの考え方と、その解析方法について述べた。

岩盤中の節理分布は、地質現象としては比較的規則性を有するものとは云っても、実際にはかなり不規則な要素の多いものであり、方向性及び密度に限りて考えても、上記のような取扱いで、全てが解決するとは考えていない。しかしながら、このような考え方で節理分布をとらえるならば、分布性状は客観的な評価のもとに取扱えるものと考えられ、岩盤変形破壊機構ならびに透水性状の解明のために有意義と考える。最後に、この研究を進めるにあたって、終始、有意義な御助言ならびに御協力を下さった東京電力KKの藤井建設部副部長、加藤徹夫氏及び当土木技研の矢作副所長、本荘静光氏、栗原千鶴子氏に対し、深く感謝する次第である。

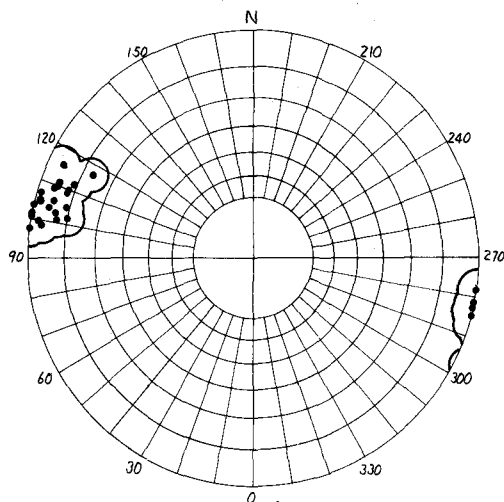


図-2 節理属群範囲の決定

Quantitative estimation and analysis of property of joint distribution in a basement rock.

Kokichi KIKUCHI
Kazuo SAITO
Daiei INOUE
Yuji KANAORI

A new method is proposed quantitatively to estimate a distribution of joints in a basement rock by processing obtained by the electronic computer.

1) Two terms are defined to express the distribution of joints quantitatively. The one is "separability ratio" of joints in a joint system, denoted by α in (1). The other is "distribution ratio" of joints in the same system, denoted by β_i in (2).

$$\alpha = \left\{ \sum_{i=1}^n (N_i) / N \right\} \times 100(\%) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\beta_i = \left\{ N_i / \sum_{i=1}^n (N_i) \right\} \times 100(\%) \quad \dots\dots\dots (2)$$

where

N_i = number of joints belonging to the i -th joint group,

N = total number of measured joints.

The distribution of joints in a basement rock is dealt with and characterized objectively by these terms.

2) The electronic computer is used to calculate the distribution density, the separability ratio and the distribution ratio of joints in a given joint system. The method of calculation is:

a) Distribution density of joints is obtained by calculating the spatical distance between two points on the spatical polar coordinates:

$$l = r \cdot \{ (\cos A \cdot \sin B - \cos C \cdot \sin D)^2 + (\sin A \cdot \sin B - \sin C \cdot \sin D)^2 + (\cos B - \cos D)^2 \}^{1/2}$$

where

l = the spatical distance between a point of a measured joint (the intersection point of a line normal to a joint plane to a spherical surface of projection) and a given point (the lattice point of scanning for determining density distribution).

r = radius of the sphere.

A = azimuth angle of a given point.

B = zenith angle of a given point.

C = strike of a measured joint.

D = dip of a measured joint.

b) The vector method is applied in determining the center of one group of joints.

c) Variation of a group given by an angular distance from its center is determined by an extent of orientation of one curved joint plane.

This method has an advantage, compared with the traditional method of treating the orientation data on a projection net such as Wulf's net or Schmidt's net, in that the obtained data are processed digitally, accurately and rapidly for analysis.