

## (93) ステレオネットを用いた節理性岩盤の岩盤改良方向の検討

○京都大学工学部 喜藤 剛  
京都大学工学部 水戸 義忠  
京都大学工学部 菊地 宏吉

Description of permeability of jointed rock mass using stereo net

Tsuyoshi KITO, Kyoto University  
Yoshitada MITO, Kyoto University  
Koukichi KIKUCHI, Kyoto University

### Abstract

Since permeability of Jointed rock mass is strongly affected by joint distribution, we must grasp joint distribution in order to carry out grouting effectively. We suggested "Joint lineal density diagram" which gives us an effective information when we intend to reinforce or improve joints as many as possible. Recently, we also examine which direction is the most suitable, when we drill the grout hole in order to improve joints. When we make this examination, we must estimate permeability in the arbitrary direction. This paper suggests permeability estimation method in the arbitrary direction and suggests "anisotropic permeability diagram".

### 1. はじめに

一般に、節理性岩盤の透水性・変形性・強度等の工学的性状は節理に大きく影響されるため、より効果的な岩盤の補強・改良を行うためには節理の分布性状を正しく把握し、岩盤の補強・改良工法や処理範囲の選定、或いは岩盤の改良・補強効果の検討に役立たせる必要がある。また、グラウチングを行う際に岩盤内の方向ごとの流速を予め推測することができれば、注入圧力を適切に制御することにより、不必要な範囲へのグラウトの散逸を防止し、予定の処理範囲においてもグラウトが十分に残留し、より効果的・経済的なグラウチングが実施できるものと期待される。著者らは、効果的な岩盤の補強・改良を行う際に、有用な情報を提供する節理1次元密度ダイアグラムの提案を行っている<sup>1)</sup>。今回は、岩盤内の任意方向の透水性を表現した「透水異方性ダイアグラム」を提案する。本論文では、まず現場で得られる節理のデータから任意方向における透水係数の比較値を算出する方法を提案し、結果の平易な表現方法としての「透水異方性ダイアグラム」の一例を示す。次に、現場において節理の方向性及び密度に関する調査・推計を行い、節理1次元密度ダイアグラムおよび透水異方性ダイアグラムを用いた考察を行う。

### 2. 節理方向分布性状の調査手法及び推計手法

#### 2.1 節理分布性状の調査手法及び節理標本の偏向補正

岩盤内に節理が多数存在すること及び実際の現場において、調査可能な領域は限定されることなどを考え

ると、節理分布の調査は基本的に標本調査の形をとらざるを得ない。節理の標本調査手法として主に用いられている手法としては、①調査線を用いる手法、②調査平面を用いる手法が挙げられるが、これらの手法により得られた標本集団には、調査手法に起因した偏向が存在している。この偏向を補正する方法としては、各節理ごとに抽出される確率の逆数を取り、それを重み係数として個々の節理を評価する。重み係数は調査線の場合、調査平面の場合でそれぞれ次のようにして算出する。

#### ① 調査線による調査標本の偏向補正

$$W_i = \frac{1}{\sin\left\{\frac{\pi}{2} - \cos^{-1}(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_L)\right\}} \quad (1)$$

但し、 $\mathbf{n}_L$  は調査線の単位方向ベクトル、 $\mathbf{n}_i$  は節理面  $i$  の単位法線ベクトルとする。

#### ② 調査平面による調査標本の偏向補正

$$W_i = \frac{1}{\sin\{\cos^{-1}(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_S)\}} \quad (2)$$

但し、 $\mathbf{n}_S$  は調査平面の単位法線ベクトルとする。

### 2.2 密度計測点の設定及び密度の計測

今回は、計算機を用いて仮想球面ネット上で節理の方向ベクトルの密度を計測する菊地らの方法<sup>2)</sup>を応用して密度の計測を行った。具体的には、極座標系を用いて、密度計測点を動径 $\psi_m$ 、天頂角 $\theta_m$ が一定の距離(角度) $\eta_m$ となるように配置し、各密度計測点上で方向密度を計測した。なお、方向密度 $P_o(\mathbf{n}_m)$ は次のように定式化することができる。

$$P_o(\mathbf{n}_m) = \frac{\sum_{i=1}^N \left[ \frac{W_i \max\{\omega_m - \cos^{-1}(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_m), 0\}}{\omega_m - \cos^{-1}(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_m)} \right]}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (3)$$

但し、 $\omega_m$ 、 $\mathbf{n}_m$  はそれぞれ球面上の計測点を中心とする中心角、原点を始点、計測点を終点とする単位ベクトルである。

## 3. 節理1次元密度ダイアグラム及び透水異方性ダイアグラムの作成

### 3.1 節理1次元密度ダイアグラムの作成

節理の1次元密度は、測線を設定した際に単位長さあたりに出現する節理の個数で表され、岩盤の補強・改良効果の検討を行う際には、任意の方向における1次元密度を算出することが必要となる。 $m$ 方向における1次元密度は、調査線を用いた場合、調査平面を用いた場合でそれぞれ次式で表される。

$$\rho(\mathbf{n}_m) = \frac{\sum (W_i |\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_m|)}{\sum L} = \frac{\sum \frac{\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_m}{\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_L}}{\sum L} \quad (4)$$

$$\rho(\mathbf{n}_m) = \frac{\sum W_i \ell_i |\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_m|}{\sum A} = \frac{\sum \ell_i |\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_m| \operatorname{cosec}\{\cos^{-1}(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_m)\}}{\sum A} \quad (5)$$

但し、 $\sum L$ 、 $\sum A$  は、それぞれ調査線の長さの合計、調査平面の面積の合計であり、 $\ell_i$  は、調査平面内における節理トレース長である。この値を球面上の各計測点で算出し、ウルフネット上にコンターを描いて示したものを節理1次元密度ダイアグラムとする。

### 3.2 透水異方性ダイアグラムの作成

節理性岩盤の透水性は、節理内の流れに支配されるものと考えられる<sup>3)</sup>。したがって節理の分布性状を把握し任意方向の透水係数の比較値を算出することができれば岩盤の透水異方性を把握することができ、より効果的なグラウチングが行えるものと考えられる。以下に、現場で得られる節理データから任意方向における透水係数の比較値を算出する方法およびその結果をステレオネット上に表した「透水異方性ダイアグラム」の作成方法について説明する。

岩盤内の水の流れを表現するモデルは種々提案されているが、ここでは岩盤内の水の流れが節理に支配される場合を考えているので、岩盤の節理内の流れが①平行平板モデルに従うとした場合、②管流モデル<sup>4)</sup>に従うとする場合について考える。

ある節理  $i$  の透水係数  $K_{ji}$  は、平行平板モデルに従うとする場合及び管流モデルに従うとする場合でそれぞれ次式で表される。

$$K_{ji} = \frac{g t_i^3}{12\nu} \quad (6)$$

$$K_{ji} = \frac{\pi g t_i^2}{128\nu} \quad (7)$$

但し、 $g, \nu, t_i$  はそれぞれ重力加速度、動粘性係数、 $i$  節理の開口幅である。

また、両モデルにおける岩盤に対する間隙率  $n_p, n_c$  は、それぞれ次式で表される。

$$n_{pi} = \rho_{ri} t_i \quad (8)$$

$$n_{ci} = n_s \rho_{ri} t_i \quad (9)$$

但し  $\rho_{ri}$  は、節理面の法線方向における  $i$  節理の出現頻度であり、 $n_s$  は、節理の有効間隙面積率である。したがって、 $i$  節理が寄与することによる岩盤の透水係数  $K_i$  はそれぞれ次式で表される。

$$\begin{aligned} K_i &= K_{ji} n_{pi} \\ &= \frac{\rho_{ri} g t_i^3}{12\nu} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} K_i &= K_{ji} n_{ci} \\ &= \frac{\pi n_s \rho_{ri} g t_i^2}{128\nu} \end{aligned} \quad (11)$$

このとき、 $i$  節理が寄与することによる  $m$  方向における岩盤の透水係数  $K_i$  は、次式で表される。

$$K_i(m) = K_i |\hat{n}_i \cdot \hat{n}_m| \quad (12)$$

したがって、 $m$  方向における岩盤の透水係数  $K(m)$  は、

$$K(m) = \sum_{i=1}^N K_i(m) \quad (13)$$

となり、得られた節理のデータによって調査線の場合、調査平面の場合で各々以下のように表すことができる。

#### ①平行平板モデル

a) 調査線から得られるデータを用いる場合

$$K(m) = \frac{g}{12\nu \sum L} \sum_{i=1}^N \left[ t_i^3 \frac{\hat{n}_i \cdot \hat{n}_m}{\hat{n}_i \cdot \hat{n}_L} \right] \quad (14)$$

b) 調査平面から得られる情報を用いる場合

$$K(m) = \frac{g}{12\nu \sum A} \sum_{i=1}^N \left[ \ell_i t_i^3 |\hat{n}_i \cdot \hat{n}_m| \operatorname{cosec} \{ \cos^{-1} (\hat{n}_i \cdot \hat{n}_w) \} \right] \quad (15)$$

## ②管流モデル

a) 調査線から得られる情報を用いる場合

$$K(m) = \frac{\pi n_s g}{128 \sum L} \sum_{i=1}^N \left[ t_i^3 \frac{\hat{n}_i \cdot \hat{n}_a}{\hat{n}_i \cdot \hat{n}_L} \right] \quad (16)$$

b) 調査平面から得られる情報を用いる場合

$$K(m) = \frac{\pi n_s g}{128 \sum A} \sum_{i=1}^N \left[ \ell_i t_i^3 |\hat{n}_i \cdot \hat{n}_a| \operatorname{cosec} \{ \cos^{-1}(\hat{n}_i \cdot \hat{n}_w) \} \right] \quad (17)$$

となる。この値を球面上に設定した各計測点において算出し、ウルフネット上にコンターを描いて示したものを透水異方性ダイアグラムとする。

図-1、図-2、図-3は、それぞれ4.5m×4.5mの調査平面を流紋岩分布地域において設定し、得られた節理のデータを基にして、作成した節理方向分布図、節理1次元密度ダイアグラム及び透水異方性ダイアグラムである。図-2に示すような節理1次元密度ダイアグラムが得られた場合、ダム軸面の方向N60W90が図のような直線で描かれるので、この直線上で節理が最も頻出する方向（図-2のC点）に可能な限り近い方向で補強・改良工を実施すればより多くの節理を補強・改良できるものと推察される。

## 4. 透水異方性ダイアグラムの利用法

図-3に示すような透水異方性ダイアグラムが得られた場合、透水性が最も高い方向として推定される方向はA点を法線方向とする面方向であり、透水性が最も低い方向として推定される方向はB点を法線方向とする面方向である。したがって、最も効果的なグラウチングができる方向としてA方向が予測されるので、グラウチング孔をA方向に実施すれば、最も多量のグラウト液を注入することができ、これにより浸透経路をより効率的に改良することができると思われる。しかしながら、通常ダム基礎のグラウチング孔の方向は、ダム軸の面内で系統的に実施されるため、その面内で効率の高い方向を選択する必要がある。N60W90の面（ステレオネット上には大円として投影される。この場合は傾斜が90°であるので中心を通る直線となる）内で改良工を実施するとすると、ダム軸方向を描き入れた図-4の透水異方性ダイアグラムより、透水性が最も高い方向として推定される方向は、C点の方向であり、また最も低い方向として推定される方向は、D点の方向である。したがって、可能な限りC点に近く、D点より遠い方向で改良工を実施するのが効果的であることが分かる。

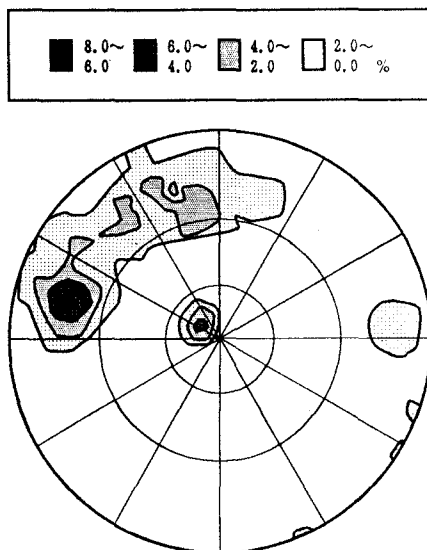


図-1 節理方向分布図

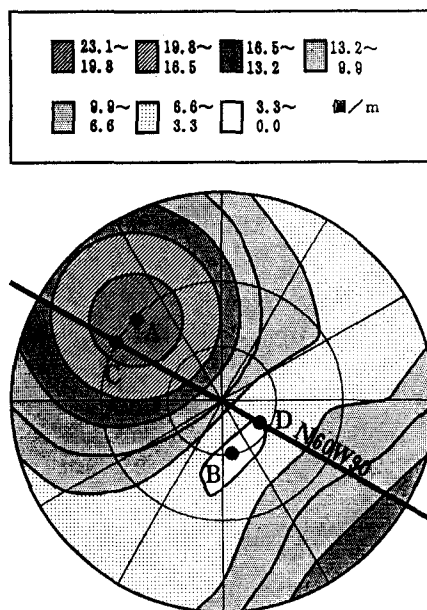


図-2 節理1次元密度ダイアグラム

5. 結語

本論文では、透水異方性ダイアグラムの提案を行い、その作成方法及び利用法について述べた。実際に岩盤の補強や改良を行う際には、節理の分布の他に諸要素を考慮しなければならない。例えば斜めボーリングを用いたグラウチングを行う場合には、決められた改良深度に達するまでの掘削長が増加し経済的に不利になり、孔曲がりを起こす危険性も伴う。しかしながら、節理性岩盤の効果的な補強・改良を行う際には、節理1次元密度ダイアグラム・透水異方性ダイアグラムが有力な検討資料となるものと考えられる。

参考文献

1) 菊地宏吉、水戸義忠：節理1次元密度ダイアグラムの提案、第24回土木学会岩盤力学シンポジウム講演論文集、1992

2) 菊地宏吉、井上大栄：電子計算機を利用した極座標を用いた岩盤節理の卓越方向の検討、応用地質14巻、1973

3) Long, J.C.S., Remer, J.S., Wilson, C.R. and Witherspoon, P.A. (1982): Porous Media Equivalents for Networks of Discontinuous Fractures, Water Resources Research, Vol.18, No.3 pp645-658

4) K. Kikuchi, Y. Mito, T. Mimuro, J. Yoshida & M. Honda: In-situ experimental studies on groundwater flow analysis for jointed rockmasses : Int. Symp. on Rock Mechanics at Great Depth, Pau, France, 1989

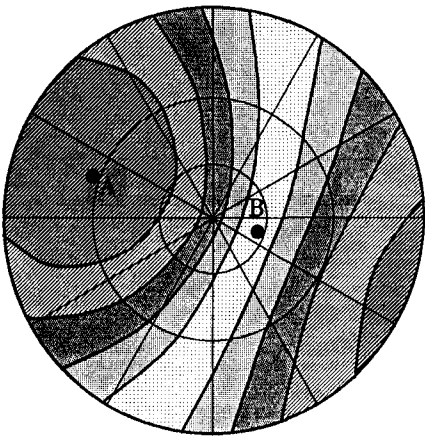
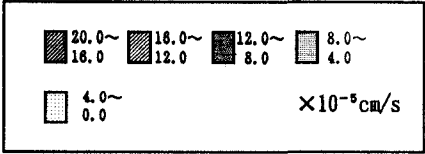


図-3 透水異方性ダイアグラム

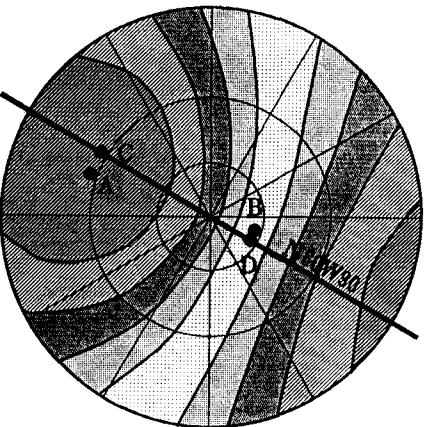
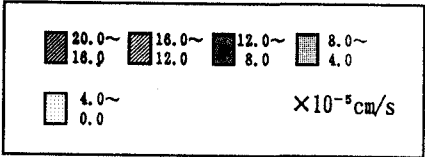


図-4 ダイアグラムの利用例