

(101) 節理 1 次元密度ダイアグラムの提案

京都大学工学部 菊地宏吉
水戸義忠

Description of Joint Lineal Density using Stereo Net

Kohkichi KIKUCHI, Kyoto University
Yoshitada MITO, Kyoto University

Abstract

Joint lineal density is one of the most important joint characteristic elements which describes rock mass properties such as deformability, permeability and so on. This paper suggests Joint lineal density diagram in order to describes the joint lineal density measured in the arbitrary direction and shows the example of the diagram.

1. 緒言

節理の 1 次元密度 (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、単位次元: $1/L$) は、現在までに種々の形で土木・岩盤構造物の設計・施工に反映されている。例えば、多くの岩盤分類の分類要素として節理の平均間隔 (単位次元: L) が用いられている¹⁾が、これは 1 次元密度の逆数に他ならない。また、1 次元密度を用いて岩盤の等価な物性を表現する試みもなされている。その代表的なものとしては、Goodman と Duncan(1971)²⁾の等価な変形定数算定式、Snow(1965)³⁾の等価な透水係数算定式を挙げることができる。

実際の構造物の調査において、1 次元密度の影響を検討したものに菊地(1973)⁴⁾の研究が挙げられる。菊地は、東京電力(株) 奈川渡ダム基礎岩盤中の 1 次元密度を P S 工施工箇所のボーリングコアにより求め、P S 工緊張に伴う地山変位との間に相関関係を見出している。このように節理の 1 次元密度は、岩盤の物性評価において重要なパラメータと考えられる。

また、近年ではグラウチング孔を節理が最も頻出する方向 (1 次元密度が可能な限り高くなる方向) に削孔し、より多くの節理を改良する方法が検討されたり、P S 工やロックボルト工による縫い付け効果の検討においても、どの程度の節理を縫合するかということが検討されつつある。このような検討を行う場合には、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。

本研究においては、以上のことを鑑み、現場で得られる節理データから任意の方向における 1 次元密度を算出する方法ならびに結果の平易な表現方法としての節理 1 次元密度ダイアグラムを提案する。

2. 節理方向分布性状の調査手法

土木・岩盤構造物基礎岩盤の調査においては、地質構造の解明や岩盤性状の評価を目的として、シュミットネット・ウルフネット・球面ネット等によりパーティング・節理・シーム・断層等の地質学的不連続面の方向性を検討するのが一般的である。

このような検討には、標本採集時のランダムサンプリングが大きな前提条件となるが、実際には現場において土木・岩盤構造物の設置箇所ならびにその周辺付近全体にわたってのランダムサンプリングを実施することは至難に近く、調査の結果得られる標本データには調査手法に起因する偏向が存在するのが普通である。

例えば、ダム の調査において、調査横坑・調査ボーリング・掘削面のような細長い調査領域においては、調査横坑もしくはボーリングと概ね垂直に交わる方向の面構造については標本になりやすいが、低角度で交わる方向の面構造については標本になりにくい。一方、トンネルの切り羽面調査においても同様な理由で切り羽面に平行に近い面構造は標本になりにくい。また、計画段階の一般的な地表地質踏査においては、数少ない露頭における調査結果のみから方向性の記載を行わなければならないが、露頭状況により、ランダムサンプリングが確実に保証されているわけではない。

このように、一般の現場において、面構造のランダムサンプリングを実施することは必ずしも容易ではない。従って現場において有効な確率標本が得られるように、効果的な標本調査計画を立案することが必要となる。

標本調査によって得られる標本集団は標本抽出の際の偏りのために真の母集団とは一般に異なる。標本調査の統計的方法の根源的な目標はこのように異なる集団間の事実関係を明確にするところにある。この事実関係を明確にする準備段階としては、より事実関係を簡易にするために、現場においてより有効な確率標本を得るための調査計画を立案することが必要である。つまり、標本集団の偏向の定式化が可能で、不偏性や有効性をもった推定量を導くことが可能な調査手法を用いることが必要である。このような標本調査手法としては、①調査線を用いる調査（岩盤に有限長の調査線（scanline）を設定し、それと交差する節理についてのみ記載をする方法）、②調査平面を用いる調査（露頭或いは掘削面等の岩盤表面に有限な閉領域である調査平面を設定し、それと交差する節理について記載する方法）の2種が挙げられる。

3. 標本集団の偏向の補正

目的とする節理母集団に対し、標本集団は、標本調査手法に依存する偏向をもった集団であるので、推計の際には各調査手法毎にこの偏向を定式化することによって不偏或いは有効な統計量を算出することが必要である。本節では、方向性の分布の偏向補正について調査線による調査の場合と調査平面による調査の場合の2つに分けて論じる。

3. 1 調査線による調査標本の偏向補正

調査線を用いた調査において、調査線と平行に近い節理程抽出しにくくなる。一般に節理面と調査線のなす角がそれぞれの節理で異なり、抽出する確率が異なるために、結果として標本集団が偏向することになる。

この偏向を補正するにあたっては、母数の推定に各節理を等質に取り扱うのではなく、それぞれの節理について抽出される確率の逆数を推定量とし、これに実現値を代入して荷重することによって、不偏性・有効性・一致性をそなえた推定値を求める。

節理トレースが線と交差する確率は、線と垂直方向のトレースの写影の長さで比例するのでその逆数をとって次式のように荷重値を設定する。

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

$$= \frac{1}{\vec{n}_i \cdot \vec{n}_L}$$

但し、 $\vec{n}_L$ は調査線の単位方向ベクトル、 $\vec{n}_i$ は i 節理の単位方向ベクトルであり、

$$0 \leq \cos^{-1} (\vec{n}_i \cdot \vec{n}_L) \leq \frac{\pi}{2}$$

とする。

3. 2 調査平面による調査標本の偏向補正

調査平面を用いた調査において、調査平面に平行に近い節理程抽出しにくくなる。一般に節理面と調査平行面のなす角がそれぞれの節理で異なり、抽出する確率が異なるために、結果として標本集団が偏向することとなる。

この偏向を補正する際にも、それぞれの節理について抽出される確率の逆数を荷重して推定量を求める。荷重値は次式の通りである。

$$W_i = \operatorname{cosec}[\operatorname{Cos}^{-1}(\vec{n}_i \cdot \vec{n}_s)] \quad (2)$$

但し、 $\vec{n}_s$ は調査平面の単位方向ベクトルであり、

$$0 \leq \operatorname{Cos}^{-1}(\vec{n}_i \cdot \vec{n}_s) \leq \frac{\pi}{2}$$

とする。

4. 節理方向分布密度図及び節理1次元密度ダイアグラムの作成

従来より面構造の方向性の検討方法として、シュミット・ネットやウルフ・ネットによる統計処理手法が用いられている⁵⁾。緒方(1964)⁶⁾は、密度分布を定量的に把握する際には計数処理の過程で測定誤差の小さいウルフ・ネットを用いて統計処理すべきであるとしている。一方、菊地ら(1973)⁷⁾は、これら平面ネットによる方法の誤差を完全に排除する方法として球面ネットによる方法を提案している。この方法は計算機を用いて仮想の球面ネットを設定し、球面上で節理の方向ベクトルの密度を作成するものであり、特徴としては統計処理過程が平面ネットのそれと比較して不偏であること及び計算機を用いるために簡便であることが挙げられる。本研究ではこの手法を応用した以下のような手法を用いて節理方向分布密度図及び節理1次元密度ダイアグラムを作成する。

4.1 密度計測点の設定

密度計測点は、密度計測の精度の一様性を確保するためには球面上に等間隔かつ等方に存在しなければならない。厳密な意味で球面上に等方に点を設定するのは非常に困難であるが、次のような手法を用いることによって精度上十分に等方かつ等間隔の計測点を設定することができる。

中心を原点とする半径1の仮想球面上に一定距離(角度)、 η_m 毎に密度を計測する点を設定する。計測点の座標を極座標で示すと、天頂角 θ_m 、偏角 ψ_m は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \theta_m &= i \eta_m \\ \psi_m &= \frac{j \pi \eta_m}{\pi - |\pi - 2i \eta_m|} \end{aligned} \quad (3-1)$$

但し、

$$\begin{aligned} i &= 1, 2, 3, \dots, \frac{\pi}{\eta_m} \\ j &= 1, 2, 3, \dots, \frac{2(\pi - |\pi - 2i \eta_m|)}{\eta_m} - 1 \end{aligned}$$

この他に

$$\theta_m = 0, \pi \quad \psi_m = 0 \quad (3-2)$$

すなわち、(3-2) 式の両極点(2点、半球では1点)を除けば完全に等方で、しかも等距離の計測点を設定することができる。

4.2 節理方向分布密度図の作成

球面上に計測点を中心とする中心角 ω_m の単位円を描き、その円で囲まれた曲面内に単位方向ベクトルの終点がある節理について(1)(2)式で定義される荷重値、 W_i を合計し、これをすべての節理標本の荷重値の合計で除したものを方向密度 $P(\vec{n}_m)$ とする。ここで $\vec{n}_m$ は原点を始点、計測点

を終点とする単位ベクトルである。この方法は通常のシュミットネットあるいはウルフネットを用いた点の計数を調査による偏向を考慮して不偏の球面ネット上で行うものであり、次のように定式化することができる。

$$P(\vec{n}_m) = \frac{\sum W_i \text{Max}\{\omega_m - \text{Cos}^{-1}(\vec{n}_i \cdot \vec{n}_m), 0\}}{\omega_m - \text{Cos}^{-1}(\vec{n}_i \cdot \vec{n}_m)} \quad (4)$$

4.3 節理1次元密度ダイアグラムの作成

調査線の場合と調査平面の場合とに分けて、球面上の計測点m（一定方向を表す）において1次元密度を計算する。

真の母集団におけるi節理の出現頻度は $\vec{n}_m$ で表され、その真の1次元密度（節理面方向の法線方向についての密度： $\rho_R(i)$ ）は調査線の場合及び調査平面の場合でそれぞれ(5)(6)のように表すことができる⁸⁾。

$$\rho_R(\vec{n}_i) = \frac{W_i}{\sum L} \quad (5)$$

$$\rho_R(\vec{n}_i) = \frac{W_i \ell_i}{\sum A} \quad (6)$$

ここで、 $\sum L, \sum A$ は、それぞれ、調査線の長さの合計及び調査平面の面積の合計であり、 ℓ_i は、調査平面内における節理トレース長である。このとき、i節理のm方向におけるみかけの1次元密度は、それぞれ、

$$\rho_P(\vec{n}_i, \vec{n}_m) = \rho_R(\vec{n}_i) |\vec{n}_i \cdot \vec{n}_m| = \frac{W_i |\vec{n}_i \cdot \vec{n}_m|}{\sum L} \quad (7)$$

$$\rho_P(\vec{n}_i, \vec{n}_m) = \rho_R(\vec{n}_i) |\vec{n}_i \cdot \vec{n}_m| = \frac{W_i \ell_i |\vec{n}_i \cdot \vec{n}_m|}{\sum A} \quad (8)$$

のように表され、したがって、m方向における1次元密度は、それぞれ、

$$\rho(\vec{n}_m) = \frac{\sum (W_i |\vec{n}_i \cdot \vec{n}_m|)}{\sum L} = \frac{\sum \frac{\vec{n}_i \cdot \vec{n}_m}{|\vec{n}_i \cdot \vec{n}_m|}}{\sum L} \quad (9)$$

$$\rho(\vec{n}_m) = \frac{\sum W_i \ell_i |\vec{n}_i \cdot \vec{n}_m|}{\sum A} = \frac{\sum \ell_i |\vec{n}_i \cdot \vec{n}_m| \text{cosec}\{\text{Cos}^{-1}(\vec{n}_i \cdot \vec{n}_m)\}}{\sum A} \quad (10)$$

となる。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。

図-1、図-2は、それぞれ流紋岩分布地域において4.5m×4.5mの水平面で調査した節理データを基に作成した節理方向分布密度図（ウルフネット）及び節理1次元密度ダイアグラムである。本調査箇所においては長さ4mの垂直ボーリングを16孔実施しており、そのコアから1次元密度を算出すると9.8個/mの結果が得られた。この値と節理1次元密度ダイアグラム上の垂直方向を示す値（ダイアグラムの中心点：約9.9個/m）とを比較すると非常によく対応しているのがわかる。

4.4 節理1次元密度ダイアグラムの利用方法

図-3に示すような1次元密度ダイアグラムが得られた場合、節理が最頻する方向はA点の方向であり、それに対して疎な方向はB点の方向であることがわかる。したがって、グラウチング孔やロックボルト打設孔をA方向にすれば最も多くの節理を改良することができる。しかしながら、通常ダム基礎のグラウチング孔やロックボルトの打設の方向は、それぞれダム軸（鉛直な平面）の面

内、トンネル掘進方向に垂直な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。いま、N70W90の面（ウルフネット上には大円で投影される。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、節理が最頻する方向はC点の方向であり、また疎な方向は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率的であることがわかる（グラウチングのように改良深度が決められている場合、斜めボーリングは削孔長が増加するために、その経済性を考慮する必要がある）。

5. 結語

本論文では、節理1次元密度ダイアグラムの作成方法及び利用方法について述べた。今後は、本ダイアグラムを用いた種々の検討を行っていく所存である。

参考文献

- 1) 桜井春輔、吉中龍之進、菊地宏吉編：岩盤分類とその適用、土木工学社、1989
- 2) Goodman & Duncan: The role of structure and soil mechanics in the design of surface and underground in rock, Conf. on Soil Mechanics and Engineering Design, 1971
- 3) Snow: A parallel plate model of fractured permeable media, Ph.D. Dissertation, Univ. of California, 1965
- 4) 菊地宏吉：奈川渡ダムにおける基礎岩盤中の割れ目計測による基礎処理効果の検討、応用地質14巻、1973
- 5) 土木学会編：ダムの地質調査、1986
- 6) 緒方正虎：ウルフ網による地質の統計方法の改良、応用地質5巻2号、1964
- 7) 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
- 8) Kikuchi, Mito & Honda: Geotechnical modelling system of Rock joint distribution: Int. Symp. on Rock Mechanics at Great Depth, Pau, France, 1989

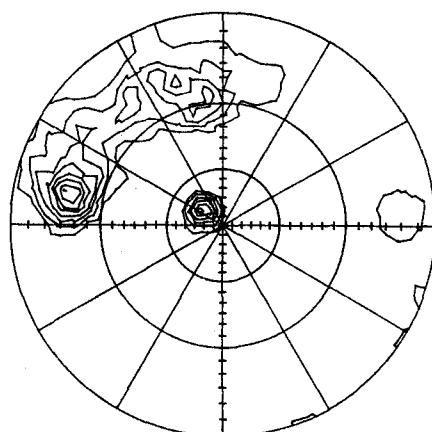
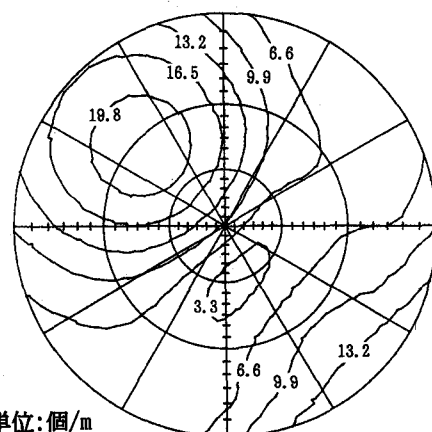


図-1 節理方向分布密度図



単位: 個/m

図-2 節理1次元密度ダイアグラム

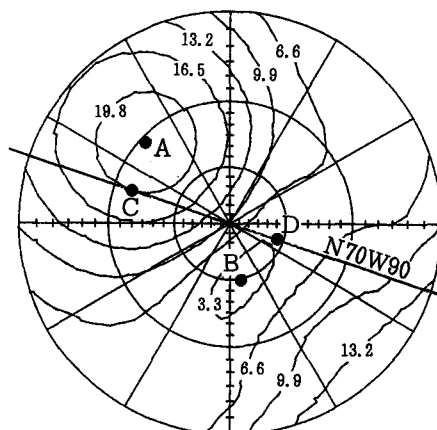


図-3 ダイアグラムの利用例