

(44) 節理性岩盤のモデル化システムの開発に関する研究

東電設計 備用地質部 菊地 宏吉
早稲田大学 大学院 水戸 義忠
早稲田大学 教育学部 本多 眞

Geotechnical Modelling System of Rock Joint Distribution

Kohkichi KIKUCHI, Tokyo Electric power services Co.,Ltd.
Yoshitada MITO, Graduate school of Sci & Eng, Waseda University
Makoto HONDA, School of Sci & Eng, Waseda University

Abstract

It is necessary to grasp joint distribution in rock masses and model it for reliable and effective analysis for groundwater flow. Joint information that we can obtain from the site is limited because of the several condition of the site investigation. Therefore statistical plans to estimate the distribution parameter of joint must be discussed for parametric estimation. We suggest the serial job flow of joint sampling, estimation and modelling methods(2-D,3-D) of the joint distribution from the limited information that we can obtain at sampling points.

1. はじめに

近年、土木構造物基礎岩盤に強く影響を与えると考えられる節理分布性状に関する研究が広く行われているが、調査・統計・モデル化の過程を取り纏めたシステムとしての節理性岩盤のモデル化システムの開発に関する研究は少ないのが現状である。そこで本研究では節理性岩盤のモデルを目的とし、これまで行われてきた節理分布の特性要素に関する研究¹⁾²⁾³⁾を纏め、また新たな手法も取り入れながらシステム化のための定式化を行い、モデル化までの計算システムを開発した。

2. システム概要

本システムでは、まず節理の方向性に着目して節理分布の空間的類似性を解析することによって節理母集団をいくつかの部分集団にクラスター化する。次に節理分布の各特性要素(①方向性②連続性③稠密性④開口性⑤挟在性⑥粗面性⑦連結性)を節理群毎に定義した確率空間モデルを基にその関数表現に必要な母数を確率統計学的に点推定または区間推定することにより確率構造を認識し、更にその確率空間を基に節理系を擬似発生してモデルを作成する(図-1 参照)。

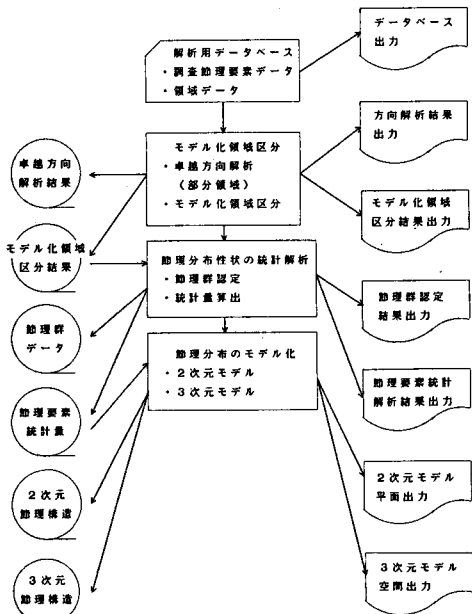


図-1 システム概要

3. 節理分布の確率空間の定義¹⁾

$$\text{方向性 } f_0(\omega, \varepsilon) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$\text{連続性 } f_L(l) = \frac{1}{\bar{l} - l_0} \exp\left(-\frac{l - l_0}{\bar{l} - l_0}\right), \quad f_R(r|l) = \int_L^{\bar{r}} \int_R^{\bar{r}} \frac{\bar{r}}{r} \frac{r}{dr} \sin^{-1}\left(\frac{l}{2r}\right) dr dl$$

$$\text{稠密性 } P_L(m) = \frac{(\rho_L)^m}{m!} \exp(-\rho_L), \quad P_A(m) = \frac{(\rho_A)^m}{m!} \exp(-\rho_A)$$

$$P_U(m) = \frac{(\rho_U)^m}{m!} \exp(-\rho_U)$$

$$\text{開口性 } f_T(\ln t | l) = N(\ln \alpha + \beta \ln l, \sigma_t(l))$$

$$\text{挟在性 } P_n(1) = p_n, \quad P_n(0) = 1 - p_n$$

$$\text{粗面性 } f(b) = N(\bar{b}, \sigma_b)$$

$$\text{連結性 } P_c(1) = p_1, \quad P_c(2) = p_L, \quad P_c(3) = p_T$$

但し、 ω, ε : 節理面方向の動径と天頂角、 σ : 方向分布の標準偏差

l : トレース長、 l_0 : 最小トレース長、 $\bar{l}$: 平均トレース長、 r : 節理面半径、 $\bar{r}$: 平均節理面半径

ρ_L : 1次元密度、 ρ_A : 2次元密度、 ρ_U : 3次元密度、 m : 節理頻度

t : 開口幅、 α, β : 定数、 σ_t : 開口幅の標準偏差、 p_n : 挟在物の存在確率

b : 粗面性の指標、 $\bar{b}, \sigma_b$: 指標の平均値と標準偏差

p_1, p_L, p_T : トレース終端状況(I:消滅、L:他の節理と同位置で消滅、T:他の節理に切られて消滅)の割合

4. 節理分布の標本調査

一般に、分布している節理の数が非常に多いことおよび調査可能な領域が限定されることを考慮すると、節理分布の調査は標本調査の形を取らざるを得ない。またこの調査において、2で定義した確率構造を推定するための情報を得る必要がある。このような標本調査法としては、岩盤表面に調査線あるいは調査平面を設定してこれと交差する一定長さ l_0 以上の節理について記載する方法が一般的である。また調査地点を設定するにあたっては、作業効率の高い等間隔抽出法に基づいて箇所を選定するのが望ましいと考える。

5. 節理母集団の決定²⁾

規則性を有している節理分布も、広域的な視点よりみるとその規則性は一様ではなく、地域によって変化がみられるのが一般である。そのため節理系モデルを考える場合、このような節理分布性状の地域差を考慮しないと現象構造の位置的特質が失われ、実岩盤の節理分布を適切に反映したモデル作成ができなくなる。換言すれば、この特質を反映させるためには、事前に調査領域を分布性状の統計的な質が可能な限り類似した領域、すなわち母集団の内分散が小さい領域に区分することが必要である。

層別化をするにあたっては、予め対象領域を有限個の部分領域に分割してそれぞれの部分領域内で節理分布性状を調査し、部分領域間の比較を行うのが適当である。この部分領域内においては節理分布性状の変化を認めず、同一集団内の変動とみなす。

次にそれぞれの部分領域について節理の分布性状を調査し、その分布の特徴を把握しておく必要がある。部分領域内では単一の節理母集団のみを仮定しており、それを決定することがここでの目的である。従ってサンプリングするパラメータの分布がその場の節理系の特徴を十分に説明し得るものでなければならない。節理特性要素の分布はいずれも節理系の方向性分布より与えられる節理群を条件とする条件付確率分布で表現されることを鑑み、方向性分布を層別化のパラメータとすることが重要であると思われる。

そこで各部分領域において求められた統計量の類似性を検討することにより、分布の質的内容が等質とな

るような領域に対象域を分割する。

類似性の度合を数量化する方法としては、節理群の方向性がベクトルで表現されるので、距離の測度としてベクトル間の角度を採用すべきであると考える。

以上を踏まえ、領域区分の際には、まずすべて節理群方向ベクトルについてベクトル間の角度を距離の測度として完全連結法によるクラスター分析を行い、クラスターを形成する。次に各部分領域毎に各節理群の属するクラスターの組み合わせを調査し、その組み合わせが一致し、かつ隣接する部分領域の集合をもって節理分布が統計的に等質な領域とみなす。ここで問題となるのが類似性の測度である角度距離の寸法をいかにして設定するかである。距離を小さく設定する程、各クラスター内部での統計的な純化が進むために厳密性が増す反面、クラスター数が増加するために組み合わせの数が増えて全体的な傾向が把握しにくくなる。

以上のことを考慮すると、後の統計計画の精度に合うように現場の状況を加味して試行錯誤的に距離の寸法を決定するのがよいと思われる。また小さなクラスターについては組み合わせを考慮する段階で無視することも組み合わせ数を減少させる有効な手段であると考えられる。

6. 節理分布性状の推計²⁾

3節で定義された節理分布要素についての確率構造を規定する各種定数の推計を行う。ここではその推計手法について述べる。なお、今回は点推定法のみ説明し、区間推定については割愛した。

6. 1 調査に起因する偏向補正

調査手法が標本調査の形をとっているため、目的とする節理母集団に対し、調査手法に依存する偏向を持つ。そこで推計を行う際には、この偏向を補正した不偏的な統計量の算出が重要である。節理標本集団の偏向として考えられるのは、①調査線や調査平面と平行に近い節理ほど抽出しにくいことに依る方向性に関する偏向と②トレース長の小さい節理ほど抽出しにくいことに依る連続性に関する偏向である。これらを補正する方法として、抽出される確率の逆数を取り、それを重み係数として評価する。

・調査線 ① $W_{oi} = 1 / |\hat{n}_i \cdot \hat{n}_l|$, ② $W_{li} = l_a / l_i$

・調査平面 ① $W_{oi} = 1 / \sin(\cos^{-1}(\hat{n}_i \cdot \hat{n}_s))$

$$\textcircled{2} W_{li} = \frac{L_w L_n + l_a [L_n \sin\{\cos^{-1}(\hat{n}_l \cdot \hat{n}_n)\} + L_w (\hat{n}_l \cdot \hat{n}_w)]}{L_w L_n + l_i [L_n \sin\{\cos^{-1}(\hat{n}_l \cdot \hat{n}_n)\} + L_w (\hat{n}_l \cdot \hat{n}_n)]}$$

最終的な重み係数は $W_i = W_{oi} W_{li}$ となる。

ここで、 $\hat{n}_i$: 節理面方向、 $\hat{n}_l$: 調査線方向、 $\hat{n}_s$: 調査平面方向、 $\hat{n}_n$: 調査平面の1辺の方向

$\hat{n}_l$: 節理トレースの方向、 L_w, L_n : 調査平面(矩形)の辺長

6. 2 節理群の認定

節理系の分布形態は、成因に依存した特定な形成場に基づくため、一般に節理群をなして分布している。各種確率密度関数の推計を行うためには、節理系を予めこのいくつかの節理群に区分しておく必要がある。この区分に用いる手法として、まず密度分布を作成し、ある程度以上の高密度の点を中心にクラスターを形成し、その中に存在する節理集団を節理群とする密度探索法を採用している。ここでは節理群がある範囲をもって分布する類似した方向性をもつ節理集団であることを考慮して、計算上の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球面ネットによる方法を用いる。密度の計測点はある程度密にかつ均質に配置し、節理系の分布性状を十分に反映するため、節理群域中心角 ω_n で計測した密度分布を用いてクラスターの形成を行う。

6. 3 節理特性要素の推計解析

①方向性分布の推計解析

節理群の平均方向を動径 ψ 、天頂角 θ 、各節理方向を動径 ψ_i 、天頂角 θ_i として次式を反復することにより、 ψ 、 θ 、 σ を決める。

$$\psi_s = \tan^{-1} \frac{Y}{X} \quad \theta_s = \tan^{-1} \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{Z} \quad \frac{\varepsilon_i}{\sin \varepsilon_i} \approx 1 \text{ (初期値)}$$

$$X = \sum_{i=1}^N \left\{ W_i \frac{\varepsilon_i}{\sin \varepsilon_i} \sin \theta_i \cos \psi_i \right\}, \quad Y = \sum_{i=1}^N \left\{ W_i \frac{\varepsilon_i}{\sin \varepsilon_i} \sin \theta_i \sin \psi_i \right\}, \quad Z = \sum_{i=1}^N \left\{ W_i \frac{\varepsilon_i}{\sin \varepsilon_i} \cos \theta_i \right\}$$

$$\cos \varepsilon_i = \sin \theta_i \sin \theta_s \cos (\psi_s - \psi_i) + \cos \theta_i \cos \theta_s$$

$$\sigma^2 = \left(\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 \right) / 2 - \pi^2 / \{ 8 \left(\exp \left(-\frac{\pi^2}{8\sigma^2} \right) - 1 \right) \}, \quad \sigma^2 = \left(\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 \right) / 2 \text{ (初期値)}$$

②連続性・稠密性分布の推計解析

◎1次元密度・2次元密度・平均トレース長

$$\rho_L = \bar{L} \rho_A \text{ (節理群)}, \quad \rho_L = 2/\pi \bar{L} \rho_A \text{ (非節理群)}$$

・調査線

$$\rho_L = \sum_{i=1}^{N_j} \left(\frac{1}{\sum_{j=1}^{N_j} \{ L_{Lj} | (\hat{n}_{Lj} \cdot \hat{n}_i) | \}} \right), \quad \bar{L} = \frac{2L_0 + \bar{L}_{1s} + \sqrt{\bar{L}_{1s}^2 + 4L_0 \bar{L}_{1s} - 4L_0^2}}{4}$$

ここで、 N_j : 節理数 (各節理群ごと)、 N_j : 調査線数、 L_{Lj} : 調査線 j の寸法

$\hat{n}_{Lj}$: 調査線 j の単位方向ベクトル、 $\hat{n}_i$: 節理面 i の単位法線ベクトル

・調査平面

$$\rho_L = \sum_{j=1}^{N_j} \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_i} L_{1si}}{A_j \sin (\cos (\hat{n}_i \cdot \hat{n}_{Aj}))} \right), \quad \rho_A = \frac{\sum_{j=1}^{N_j} \sum_{i=1}^{N_i} N_i}{\sum_{j=1}^{N_j} A_j \sin (\cos^{-1} (\hat{n}_i \cdot \hat{n}_{Aj}))}$$

ここで、 N_i : 各調査平面ごとの節理数、 N_j : 調査平面数、 A_i : 調査平面の面積、 L_{1si} : トレース長

$\hat{n}_{Aj}$: 調査平面の単位法線ベクトル、 $\hat{n}_i$: 節理面の単位法線ベクトル

◎3次元密度、平均円盤半径

$$\rho_L = \bar{S} \rho_v, \quad \bar{S} = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int \sqrt{s} f_R \left(\sqrt{\frac{s}{\pi}} \right) ds, \quad \text{ここで、} \bar{S}: \text{平均円盤面積}$$

③開口性

$$\alpha = \exp \left(\frac{\sum (\ln l_i)^2 \sum \ln t_i - \sum \ln l_i \sum \ln l_i \ln t_i}{N \sum (\ln l_i)^2 - (\sum \ln l_i)^2} \right)$$

$$\beta = \frac{N \sum \ln l_i \ln t_i - \sum \ln l_i \sum \ln t_i}{N \sum (\ln l_i)^2 - (\sum \ln l_i)^2}, \quad \sigma_t(l)^2 = \frac{\sum (\ln t_i - \ln \alpha + \beta \ln l_i)^2}{N - 1}$$

④挟在性、粗面性、連結性

p_H : 挟在物の存在割合、 $\bar{L}$: 平均、 σ_B : 分散、 p_L 、 p_{L-} 、 p_{L+} : トレース終端状況各タイプの存在割合

7. 節理系の幾何学モデル

7.1 2次元幾何学モデル

①節理発生領域の設定

節理系のモデル化領域より十分大きい2次元平面をもって、節理トレースの中点発生領域と定める。

②節理発生個数の算定

節理発生領域の面積に2次元密度を乗じて整数化したものを節理発生個数とする。

③節理の発生

- ・節理トレース中点位置……2次元ポアソン過程により決定する。
- ・節理方向、トレース長、開口幅、挟在性、粗面性……確率空間に従う乱数により決定する。

④モデル化領域の切断と縫合

節理発生領域からモデル化領域を切りとり、他のモデル化領域と整合させる。

7. 2 3次元幾何学モデル

①節理発生領域の設定

節理系のモデル化領域より十分大きい3次元空間をもって、節理円盤の中心発生領域と定める。

②節理発生個数の算定

節理発生領域の体積に3次元密度を乗じて整数化したものを節理発生個数とする。

③節理の発生

- ・節理円盤中心位置……3次元ポアソン過程により決定する。
- ・節理方向、円盤半径、開口幅、挟在性、粗面性……確率空間に従う乱数により決定する。

④モデル化領域の切断と縫合

節理発生領域からモデル化領域を切りとり、他のモデル化領域と整合させる。

8. おわりに

本論文では節理系のモデル化システムとしてパラメトリックな推計に基づくシステムを構築した。今後は、本システムを用いて各種解析研究を実施していく所存である。

参考文献

- 1) Kikuchi, Kuroda and Mito: Stochastic estimation and modelling of jointed rock masses based on statistical sampling; 6th International Congress ISRM, Montreal, Canada, 1987.
- 2) 菊地、小林、泉谷、水戸：節理分布性状に基づく広域サイトのモデル化領域区分；第19回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、1987.
- 3) 菊地、水戸、黒田：節理分布の確率統計学的評価に基づく節理製岩盤のモデル化；第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、1987.