節理分布性状の確率統計学的モデル化に関する研究 (その 1)

—対象領域の区分と節理母集団の節理群への区分—

菊地宏吉*・水戸義忠*・本多 眞**

Stochastic Modelling of Rock Joint Distribution

Part 1 : The Devision of the Objective Area into the Modelling Areas
and the Division of a Joint System into Joint Sets

Kokichi KIKUCHI*, Yoshitada MITO* and Makoto HONDA**

Key words : 節理分布 joint distribution, 節理調査 joint survey, 節理群 joint sets, 確率モデル stochastic model

Abstract

Generally, even if joint distribution has a regularity, the regularity is not uniform from the view of wide area. In order to generate the rock joint distribution-model, therefore, it is necessary to classify previously the survey area into regions for which statistical properties of distribution characteristics are similar as much as possible. The authors suggest such area-division method in this paper

Furthermore, a joint system is composed of several joint sets, and each joint set has its own distributional character. In this paper the authors also suggest the division method of joint system into several joint sets.

1. 緒 言

地下空間の利用が急速に増加し、また、その利用形態の多様化が進む今日、これら土木構造物の基礎となる岩盤の力学的・水理学的挙動もその目的に対し多様化しつつある趨勢である。このような土木構造物の基礎となる塊状硬質岩盤は、岩石自体の強度が非常に大きく透水性も非常に低いために、その工学的性状は不連続面の物理的性質に強く支配される。このため岩盤の工学的性状を把握するためには、不連続面系の地質量を適切な形で反映したモデルを作成し、解析することが必要となる。本論文では、このように岩盤内に存在する地質学的不連続面のうち、特に支配的に分布して塊状硬質岩盤の工学的性状に強い影響を与えると考えられる「節理」に着目し

て論を進める。

節理分布のモデル化に関する研究は、これまで節理分布を特徴づけるいくつかの特性要素に着目して広く行われてきたが、これらをまとめたシステムの開発についてはほとんど行われていないのが現状である。一般に節理は規則的な分布性状を示すが、この性質を利用することによって節理性岩盤における節理分布の確率的なモデル作成手法を提案することが本論の内容であり、「節理分布性状の確率統計学的モデル化に関する研究」と題して 3 編に分けて論じることにした。

節理分布をモデル化するに当っては、節理の分布に関する情報を標本調査し、確率統計学的に分布を評価する必要がある。このような確率論的アプローチを有効に行うことを目的として、本論文 (その 1) では、調査により得られた標本節理データを、モデル化を行うための統計的に類似したいくつかの標本集団に区分する手法について提案する。

* 京都大学工学部 Faculty of Engineering, Kyoto Univ.

** 清水建設(株)大崎研究室 Ohsaki Reserch Institute, Shimizu Co.

一般に、広範な地域に設置される土木構造物基礎の解析領域の岩盤には、数系統の節理系（節理の母集団）が各所に分布し、それぞれが異なった分布性状を呈している。このような節理分布の位置的な変化を考慮しなければ、実岩盤の節理分布を十分反映したモデルを作成することは不可能となる。したがって、事前に調査領域を節理の分布性状が同一であるとみなせる領域（統計的に類似した節理系が分布する領域）に区分し、その各領域についてモデルを考えることが必要である。

また、各領域における節理系は、形成時の応力環境に支配されてほぼ同一の方向性を持って分布する節理群がいくつか組み合わさることによって構成されている。節理分布を規定する特性要素の分布性状は、この節理群毎に異なるのが一般的であり（本論文-その2-参照）、節理系の分布の評価においては、節理系をいくつかの節理群に区分し、その節理群毎に分布性状を評価することが必要となる。

以上を考慮し、本論文ではまず、2つの代表的な節理標本調査の手法について述べ、次にこれら各調査手法により得られるデータの偏り（偏向）について確率統計学的な視点から考察する。そして、節理の幾何学的分布性状を支配する節理特性要素の中で方向性について着目し、広範な領域を節理分布性状が類似したいくつかの領域（モデル化領域）に区分する手法について提案する。さらに、節理系をおおむね同じ方向性を示す節理群に区分する手法についても提案する。

2. 節理分布の調査手法

節理が岩盤内に多数存在することは一般によく知られている。例えば、KIKUCHI¹⁾は花崗岩の良好な平面露頭（108 m²）で30 cm以上の節理トレースを1097個（10.2個/m²）記載しているが、普通、解析の対象となる領域はこの平面露頭の寸法よりもかなり大きく、この実測データはすべての節理を調査するためには多大な労力を要することを示唆している。一方、節理を調査する際には、調査可能な領域は限定されるのが普通であり、すべての節理を調査することは物理的に不可能である。これらのことを考慮すると、節理の調査は基本的に標本調査の形を取らざるをえない。

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ため、標本集団の偏り（偏向）の定式化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、2)調査平面を用いる調査の2種が考えられる。以下、これらの調査手法について述べる。

る。

2.1 調査線を用いた節理調査

節理の標本調査手法として従来から広く用いられているものが、調査線を用いた標本調査手法である（例えばBAECHER²⁾、PRIEST and HUDSON³⁾）。これは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に記載する方法であり、a)露頭あるいは掘削面等の岩盤表面に調査線を設定するものと、b)ボーリング孔を調査線とみなし、ポアホールテレビジョン観察またはコア観察によって調査するものの2つに分類することができる。

調査の際に、調査線と交差するすべての節理を対象とするのは必ずしも効率的ではない。多くの過去の研究⁴⁾から節理トレース長は負の指数分布型に近似した分布型を呈しているとされており、工学的に重要でない小規模な節理はど多く存在する。このような微寸法の節理を対象にすることは、調査量の増大を招き、工学上望ましくない。このことを考慮し、岩盤表面に調査線を設定する調査の場合には、節理を標本とみなす最小のトレース長を設定する必要がある。

一方、ボーリング孔を用いた調査の場合にはトレース長を計測することができないので、トレース長と開口幅が相関関係を有する⁵⁾ことを考慮して、節理標本とみなす最小の開口幅を設定する方法が考えられる。この場合、岩盤表面とボーリング孔との標本集団の整合を図るために、岩盤表面における調査結果と最小のトレース長 l_0 を用いて、次のようにボーリング孔における最小の開口幅 t_0 を決定することを提案する。

$$t_0 = \alpha l_0^\beta \quad (1)$$

ただし、 α, β は最小2乗法を用いて決定された開口幅とトレース長の相関関係を示す回帰定数である。なお、ポアホールテレビジョン観察で同定可能な最小の節理開口幅は精度上0.1 mm程度であり⁶⁾、この場合、逆に次式を用いて l_0 を設定することを提案する。

$$l_0 = \{0.1(\text{mm})\alpha\}^{1/\beta} \quad (2)$$

2.2 調査平面を用いた節理調査

調査線による節理標本調査手法のほかに、従来から提案されている方法が調査平面を用いた手法である（例えば、菊地⁷⁾、KULATILAKE and WU⁸⁾）。これは露頭あるいは掘削面等の岩盤表面に調査平面を設定し、それと交差する節理について記載する方法である。

平面の形状は調査の簡便性を考慮して単純な幾何を呈するものが望ましいと考えられる。具体的な形状としては、円・正方形・長方形が挙げられる。このうち、円は等方的で理想的な形状である反面、a)現場での設定が困

難である, b)円周付近で精度が落ちる, c)密に設定する場合, 間隙が生じる, 等の理由により適用性が低い。また長方形の場合, サンプルングの方向に異方性が生じ, 調査の無作為性を損失しかねない。これらを考慮すると, 作業上最も有利で, なおかつ条件を大きく損わない形状である正方形を平面の形状とするのが妥当であると考えられる。

また, 調査線の場合と同様, 調査の際に調査平面と交差するすべての節理を対象とするのは効率的でなく, この場合も節理標本とみなす最小のトレース長を設定することが必要であると考えられる。

3. 標本集団の偏向の補正

現実分布する節理の母集団(以下「節理母集団」とする)に対し, 調査によって得られた節理集団(「標本集団」とする)は調査の手法に起因する「偏向(かたより)」を持った集団であるため, 統計的に扱うには各調査手法毎にこの偏向を定式化する必要がある。本章では, こ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よって得られた標本集団は, 主として次の2つの偏向を持つと考えられる。

a) 方向性に関する偏向

調査線を用いた調査において, 調査線と平行に近い節理ほど抽出し難くなる(図-1a)。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に偏向が生じることになる。この偏向については, TERZAGHI⁹⁾, BRIDGES¹⁰⁾らによって議論されている。

b) 連続性に関する偏向

トレース長の大きい節理はトレース長の小さい節理と比較して抽出しやすい(図-1b)ため, 偏向が生じる。この偏向に関しては BAECHEER and LARNEY¹¹⁾によって議論されている。

これらの偏向を補正するに当たっては, 解析の際に各節理を等価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用いて, 重み付けすることを提案する。2つの偏向についての重み付けの値(重み係数)はそれぞれ次のように与えられる。

1) 方向性に関する偏向に対する重み係数

同一長さの線分(節理トレース)が調査線と交差する確率は, 調査線と垂直方向の線分への射影の長さと同比例するため, 重み係数 $W_{\alpha i}$ はその逆数をとって次式で与

a) 方向性による偏向

b) 連続性による偏向

図-1 調査手法と標本抽出の偏向

えられる。ここで, i は抽出される節理の番号である。

$$W_{\alpha i} = \operatorname{cosec} \left\{ \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} (n_i \cdot n_L) \right\} \\ = \frac{1}{|n_i \cdot n_L|} \quad (3)$$

ここで, n_L は調査線の単位方向ベクトル, n_i は節理面 i の単位法線ベクトルであり,

$$0 \leq \cos^{-1} (n_i \cdot n_L) \leq \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

とする。

2) 連続性に関する偏向に対する重み係数

長さ L_L , 単位方向ベクトル n_L の調査線に対して, トレース長 l の節理が交差するための必要十分条件は, 節理トレースの midpoint が図-2a の点線の範囲内にあることである。この点線内の面積はトレース長 l の関数として表すことができる。

$$A(l) = L_L l \sin \{ \cos^{-1} (n_T \cdot n_L) \} \quad (5)$$

ここで n_T は節理トレースの単位方向ベクトルである。この面積が連続性に関する偏向に起因しており, これを補正するに当たっては, 抽出する最小トレース長 l_0 の節理がとる midpoint の範囲の面積を基準とし, その比の逆数を重み係数とすればよい。したがって, 連続性に関する偏向の重み係数 W_{Li} は次式で与えられる。

$$W_{Li} = \frac{A(l_0)}{A(l_i)}$$

図-2 節理トレース中点の存在範囲

$$\begin{aligned} &= \frac{L_L l_0 \sin \{\cos^{-1}(\mathbf{n}_T \cdot \mathbf{n}_L)\}}{L_L l_i \sin \{\cos^{-1}(\mathbf{n}_T \cdot \mathbf{n}_L)\}} \\ &= \frac{l_0}{l_i} \end{aligned} \quad (6)$$

このように、調査線による連続性補正式では節理トレース長と最小トレース長の比の逆数が重み係数となる。

これら2つの偏向は互いに独立であるので、2つの偏向を同時に補正するための重み係数 W_i は

$$W_i = W_{Oi} \cdot W_{Li} \quad (7)$$

で与えられる。

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よって得られた標本集団もまた調査線と同様、次の2つの偏向を有している。

a) 方向性に関する偏向

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ほど抽出し難くなる(図-1a)。一般に節理面と調査平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に偏向が生じる。

b) 連続性に関する偏向

トレース長の大きい節理はトレース長の小さい節理と比較して標本として抽出しやすい(図-1b)ため、標本集団に偏向が生じる。

これらの偏向を補正する際にも調査線の場合と同様、それぞれの節理について抽出される確率の逆数を用いて重み付けすることを提案する。2つの偏向に関しての重み係数はそれぞれ次のように与えられる。

1) 方向性に関する偏向に対する重み係数

$$W_{Oi} = \frac{1}{\sin \{\cos^{-1}(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_s)\}} \quad (8)$$

ここで $\mathbf{n}_s$ は調査平面の単位法線ベクトルであり、

$$0 \leq \cos^{-1}(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_s) \leq \frac{\pi}{2} \quad (9)$$

とする。

2) 連続性に関する偏向に対する重み係数

調査平面(矩型)の辺長をそれぞれ L_W, L_N とし、その1辺の単位方向ベクトルを $\mathbf{n}_n$ とすると、トレース長 l の節理が交差するための必要十分条件は、節理トレースの中点が図-2bの点線の範囲内にあることである。この点線内の面積はトレース長 l の関数として表すことができる。

$$\begin{aligned} A(l) &= L_W L_N + l[L_N \sin \{\cos^{-1}(\mathbf{n}_T \cdot \mathbf{n}_n)\} \\ &\quad + L_W \cos \{\cos^{-1}(\mathbf{n}_T \cdot \mathbf{n}_n)\}] \\ &= L_W L_N + l[L_N \sin \{\cos^{-1}(\mathbf{n}_T \cdot \mathbf{n}_n)\} \\ &\quad + L_W(\mathbf{n}_T \cdot \mathbf{n}_n)] \end{aligned} \quad (10)$$

この面積が連続性に関する偏向に起因しているため、これを補正するに当っては、調査線の場合と同様、抽出する最小トレース長 l_0 の節理がとる中点の範囲の面積を基準とし、その比の逆数を重み係数とする。

$$\begin{aligned} W_{Li} &= \frac{A(l_0)}{A(l_i)} \\ &= \frac{L_W L_N + l_0[L_N \sin \{\cos^{-1}(\mathbf{n}_T \cdot \mathbf{n}_n)\} \\ &\quad + L_W(\mathbf{n}_T \cdot \mathbf{n}_n)]}{L_W L_N + l_i[L_N \sin \{\cos^{-1}(\mathbf{n}_T \cdot \mathbf{n}_n)\} \\ &\quad + L_W(\mathbf{n}_T \cdot \mathbf{n}_n)]} \end{aligned} \quad (11)$$

調査平面の場合も2つの偏向は互いに独立であるので、2つの偏向を同時に補正するための重み係数 W_i は

$$W_i = W_{Oi} \cdot W_{Li} \quad (12)$$

となる。

このように、調査線・調査平面のいずれの場合にも、節理標本の偏向の補正には方向性による偏向の重み係数および連続性による偏向の重み係数を算出する必要があるため、すべての節理について方向性のデータのほかに連続性のデータが必要となる。しかしながら、すべての節理について連続性(トレース長)を調査することは多大な労力を要するし、また、ボーリング孔では連続性の調査は不可能である。したがって、通常は

$$W_i = W_{Oi} \quad (13)$$

と仮定し、重み係数を算出するのが一般的と思われる。

4. モデル化領域の区分方法

確率統計学的に節理分布の把握およびモデル化を行うに当っては、個々の節理の位置や形状を完全に把握することより、むしろ全体的な分布の規則性についての認識が必要である。節理の分布は一般に規則性を有しているが、広域的な視点から見るとその規則性は一様なものではなく、地域によって変化が見られるのが一般である。広範な領域で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、実岩盤の節理分布を適切に反映したモデルの作成ができなくなる（図-3）。

したがって、このような節理分布性状の地域的な変化をモデル化に反映させるためには、あらかじめ対象領域を節理分布性状が類似した領域（モデル化領域）に区分し、各々の領域について統計量の推定を実施することが必要である。

そこで対象領域を細分化し、各々の領域で節理分布性状を評価し、各領域間で類似性の比較を行うことによって節理分布性状の地域的な変化を把握する方法を提案する。

4.1 対象領域の細分化（部分領域の設定）

まず、解析の対象となる広範な領域をあらかじめ機械的に有限個の部分領域に分割する。各部分領域に存在する節理の標本集団を部分集団とし、この領域においては節理分布性状に変化はなく同質とみなせるものと仮定する。すなわち、分布性状の変化を考慮する必要のない領域を最小の単位とする。具体的には図-4aのようなモデル化対象領域において、図-4bに示すように部分領域を設定する。

領域の細分化を進めるに従って、領域内の分布性状の変化は小さくなるが、全体的な傾向がつかみにくくなる。それに対して部分領域が大きすぎると部分領域内の分布性状の分散が大きくなり、領域区分の目的が達成できなくなる。

したがって、部分領域の寸法（最小単位の寸法）については、調査の目的・範囲・精度、あるいは調査可能な地点の位置など、さまざまな条件を考慮して適切に決定しなければならないと考えられる。

4.2 各部分領域毎の節理分布性状の評価

4.1節で定めた部分領域内において、先に示した調査手法を用いて標本調査を行う。各部分領域内では一定の規則性を持つ単一の母集団を仮定しているため、サンプリング地点は可能なかぎり、等間隔に設定するのが統計的に望ましいが、実際には露頭状況を考慮して設定する

図-3 モデル化に伴う位置的特質の平均化

ことになる（図-4c）。

節理分布性状を規定する節理特性要素としては、a)方向性、b)連続性、c)稠密性、d)開口性、e)挟在性、f)粗面性、g)連結性等が挙げられ、これらの分布を評価することが、当該地域の節理分布性状を評価することにはかならないが、領域区分を目的とする場合、比較するパラメータの分布がその場の節理系を十分に特徴付けるものでなくてはならない。ここで各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毎に異なった分布を示す（本論文-その2-参照）。そこで対象領域の区分に当っては、その比較パラメータとして方向性分布を評価することにする。図-4dは各部分領域で算出した方向性分布に関する統計量をシュミット・ネットに表したもので、黒丸の位置が卓越方向を示している。

4.3 類似性の比較基準設定および領域区分

各部分領域において求められた方向性に関する統計量、すなわち卓越方向の分布パターンから類似性を検討することにより、対象領域を分割する。方向性分布がベクトルで表されることから類似性の度合い（距離測定）としてベクトル間の角度を用いることにする。具体的に最終的な領域区分の手順は次のとおりである。

各部分領域において得られた卓越する方向ベクトルを合わせて対象領域全体でクラスター分析を行い、クラスターを形成する。次に、それぞれが属するクラスターの組み合わせを調べて、その分布パターンを分類する。そして分布パターンが一致し、かつ隣接する部分領域を連結して節理母集団（モデル化領域）とする。

ここで卓越方向を求める手法については、次章で詳しく述べることにして、対象領域全体についての全卓越方向ベクトルからクラスターを形成し、クラスターの組み合わせから分布パターンを分類する際に問題となるのが、クラスターの寸法（卓越方向の範囲を決定する中心角の大きさ）およびその数をいかにして決定するかである。まず、クラスターの寸法については、小さく設定す

図-4 クラスタ分析による領域区分の模式図

ればそれだけクラスター内での統計的分散が小さくなるが、逆にクラスターの数を増やさなくてはならず、組み合わせの数が増え、全体的な傾向が把握しにくくなる。大きく設定すれば組み合わせの数は減るが、逆にクラスター内での統計的分散が大きくなり、厳密性が薄れる。したがって、クラスター寸法の設定は、状況に応じて臨機応変に決定するのが望ましい。一般的には、クラスターの大きさが全体に占める割合として10%程度を考えた場合、その寸法は中心角で約30°程度が適当であると考えられる。

またクラスターの数については、組み合わせを考慮する段階で決定することにより、組み合わせの数の増減が可能である。すなわち、密度の小さいクラスターなどについては、削除するなどして組み合わせ数を減少させることが可能である。なお、 m 個のクラスターにおける組み合わせの数 N_c は次式によって与えられる。

$$N_c = \sum_{n=1}^m {}_m C_n + 1 \quad (14)$$

ここで、 ${}_m C_n$ は異なる n 個から m 個取る組み合わせの

数 (Combination) である。

以上の手順でモデル化領域区分が完了する。

5. 節理群の認定

節理系は一定の応力テンソル場で形成されるため、その成因に依存する方向分布形態を呈する場合が多い。各成因によって生じたこれらの節理は、それぞれ節理群（おおむね同じ方向性を示す節理集団）をなして分布する。これらの節理群が集合することによって節理系が形成される。このように、節理の方向分布の特徴として節理群の存在を挙げることができる。

各節理群は一般に成因が異なるために、その分布性状も節理群毎に異なることが多い。すなわち節理分布の異方性を考慮した確率モデルを考える場合、確率密度関数におけるパラメトリックな統計的推定を行うために、あらかじめ節理系をいくつかの節理群に区分しておく必要がある。

節理系を節理群に区分することは、基本的には卓越方向解析と同等であり、手法としてクラスタ分析の密度

探索法を利用する。

クラスター分析の方法としては、小さなクラスターを併合することによりクラスターの寸法を成長させる階層的方法と、母集団から始めてクラスターの寸法を個体レベルまで減少させる非階層的方法がある¹²⁾。ここで用いる密度探索法は後者の非階層的方法であり、方向密度分布より密度の稠密な部分を低密度の部分から分離するものである。

方向密度分布を把握する手法として、従来からシュミット・ネットやウルフ・ネットによる方法が用いられているが¹³⁾、いずれも3次元空間に広がる方向分布を2次元平面で表すことによる測定誤差が存在するため、ここでは菊地ら¹⁴⁾による球面ネットを用いる。この方法は計算機上で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、および計算機を用いるために簡便であることが挙げられる。具体的には次の手順で行う。

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。しかしながら、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。そこで球面座標系として極座標系を用い、計測点を方位角 φ_m 、天頂角 θ_m が一定の距離（角度） η で配置されることで、均質に近い計測点の設定を図っている。

$$\left. \begin{aligned} \theta_m &= i\eta \\ \varphi_m &= \frac{j\pi\eta}{\pi - |\pi - 2i\eta|} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

ただし、

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

このほかに、

$$\left. \begin{aligned} \theta_m &= 0, \pi \\ \varphi_m &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

すなわち、式(16)の両極点（2点、半球では1点）を除けば完全に等方かつ等距離の計測点を設定することができる。

2) 密度の計測

原点を中心とする球面を考え、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、式

(7)、(12)で定義される重み係数 W_i を合計し、これをすべての節理標本の重み係数の合計で除いたものを方向密度 $P_O(\mathbf{n}_m)$ とする。ここで、 $\mathbf{n}_m$ は単位球面上で原点を始点、計測点を終点とする単位ベクトルである。このことを定式化すると次のようになる。

$$P_O(\mathbf{n}_m) = \frac{\sum_{i=1}^N \left[\frac{W_i \max \{ \omega_m - \cos^{-1}(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_m), 0 \}}{\omega_m - \cos^{-1}(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_m)} \right]}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (17)$$

ここで、 $\mathbf{n}_i$ は各節理面の法線ベクトル、 $\mathbf{n}_m$ は計測点の方向ベクトル、 $\max \{a, b\}$ は a, b の値の大きい方をとる関数である。

単位円の中心角 ω_m の寸法は、半球面積に対してある程度小さく設定する必要がある。球の半径が1のとき半球面積が 2π であるのに対し、単位円面積 S_m は、

$$\begin{aligned} S_m &= \int_0^{2\pi\omega} \int_0^m \left| \frac{\partial \mathbf{r}_m}{\partial \varphi} \times \frac{\partial \mathbf{r}_m}{\partial \theta} \right| d\varphi d\theta \\ &= \int_0^{2\pi\omega} \int_0^m \sin \theta d\varphi d\theta \\ &= 2\pi(1 - \cos \omega_m) \end{aligned} \quad (18)$$

である。したがって、半球面積に対する単位円面積の占める割合 γ_m は、次式で示される。

$$\gamma_m = \frac{S_m}{2\pi} = 1 - \cos \omega_m \quad (19)$$

ここで、例えば $\gamma_m = 0.01$ とすると中心角は 8.11° となる。このように方向密度分布を作成できたら、次に密度探索法によるクラスター分析を行い、節理群の認定を行う。

3) クラスター分析

密度分布の極大値を探索して、密度の高い順にその点を中心とする一定の角度 ω_M を距離測定とするクラスターを形成してこれを分離し、それぞれのクラスターについて節理の集中率（クラスター内に含まれる節理の全体に対する占有率）を求める。この集中率は次式によって求められる。ここで、 ω_M は最終的に節理群とみなす領域の距離測定である。

$$P_P(\mathbf{n}_p) = \frac{\sum_{i=1}^N \left[\frac{W_i \max \{ \omega_M - \cos^{-1}(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_p), 0 \}}{\omega_M - \cos^{-1}(\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_p)} \right]}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (20)$$

ここで $\mathbf{n}_p$ は極大値の単位方向ベクトルである。一方、節理が等方的に均質に分布している場合、一定角度 ω_M を距離測定とするクラスター内の密度 P_O は式(17)

より

$$P_0 = 1 - \cos \omega_M \quad (21)$$

である。この P_0 をもって、クラスターを節理群として認定する集中率の下限値とする。すなわち、 P_0 以上の集中率 $P_p(n_p)$ のクラスターを節理群として、それ未満のクラスターは節理群と認めず有意の差がないものとする。

以上の手順によってモデル化領域内で計測した節理標本集団をいくつかの節理群および節理群に属さない節理集団 (非節理群と称する) に区分できることになる。このように、対象とする節理系が方向性に依存するいくつかの節理群に区分され、これ以降は、この節理群毎に確率モデルを設定し、関数を規定するパラメータを推定することで、目的とする節理分布のモデル化が可能となる。

6. 結 語

節理性岩盤のモデル化を目的として、まず本論文 (その1) では、節理の確率統計学的な調査手法に加えて、確率分布に基づく統計処理を施すために、調査標本データの区分に関する手法を提案した。その内容をまとめると次の通りである。

1) 節理標本集団には調査手法に依存する偏向が存在する。本論文ではこの偏向を補正するための重み係数を提案した。この重み係数を用いることにより、調査線あるいは調査平面 (正方形または矩形) による調査結果に確率統計学的な処理を行い、母集団統計量を推定することが可能となる。

2) 対象とする領域が広範な場合、分布は一様ではなく位置的な変化が見られるのが一般である。そこで本論文では、節理の方向性に着目してクラスター分析を用いた広域サイトのモデル化領域区分の手法について提案した。これにより対象領域を統計的に純化されたモデル化領域に分割することが可能となる。

3) 球面ネットを用いた節理群の認定手法を提案した。この方法は、まず球面ネット上に計測点位置をほぼ等方かつ等間隔に配置させ、調査手法に依存する偏向を考慮した密度計測を行い、得られた密度分布を密度探索法によりクラスター分析するものである。

以上、節理分布のモデル化の前段階として節理母集団

の区分の手法について述べた。

参 考 文 献

- 1) KIKUCHI, K., MIMURO, T., KOBAYASHI, T., IZUMIYA, Y. and MITO, Y. (1987) A joint survey and determination of joint distribution, 2nd Int. Symp. on Field measurements in Geomechanics, Vol. 1, pp. 239-248.
- 2) BAECHER, G. B., LARNEY, N. A. and EINSTEIN, H. H. (1977): Statistical description of rock properties and sampling, 18th U. S. Symp. on Rock Mech., pp. 5C1-8.
- 3) PRIEST, S. D. and HUDSON, J. A. (1981): Estimation discontinuity spacing and trace length using scanline surveys, Int. Jour. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr. 13, pp. 135-148.
- 4) 例えば, KIKUCHI, K., KURODA, H. and MITO, Y. (1987): Stochastic estimation and modelling of jointed rock masses based on statistical sampling, 6th Int. Cong. of ISRM, pp. 425-428.
- 5) 菊地宏吉, 三室俊昭, 大村富士男, 原 敏昭 (1984): 節理性岩盤のモデル化に関する研究, 第16回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 126-130.
- 6) 伊藤 一, 小林隆志, 菊地宏吉, 加藤克行, 百田博宣, 伊藤雅之 (1987): 節理内流れモデルによるルジオン試験結果の解釈, 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 235-240.
- 7) 菊地宏吉, 斉藤和夫, 楠健一郎 (1978): 土木構造物基礎岩盤中の節理分布性状の定量的評価に関する検討, 電力土木 (発電水力), No. 154, pp. 50-59
- 8) KULATILAKE, P. H. S. W. and WU, T. H. (1984): Estimation of mean trace length of discontinuities, Rock Mech and Rock Eng. 17, pp. 215-232
- 9) TERZAGHI, R. (1965): Source of error in Joint surveys, Geotechnique, 15, pp. 287-304.
- 10) BRIDGES, M. C. (1976): Presentation of fracture data for rock mechanics, 2nd Australian-New Zealand Conference on Geomechanics, pp. 144-148.
- 11) BAECHER, G. B. and LARNEY, N. A. (1978): Trace length biases in joint surveys, 19th U. S. Symp. on Rock Mech., pp. 56-65
- 12) EVERITT (1974): Cluster analysis, Heinemann Educational books.
- 13) 緒方正虔 (1964): ウルフ網による地質の統計方法の改良, 応用地質, Vol. 5, No. 25, pp. 81-91.
- 14) 菊地宏吉, 斉藤和雄, 井上大米, 金折裕司 (1976): 岩盤中の節理分布性状の定量的評価とその解析, 第10回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 1-10

(1992年3月11日受付, 1992年7月29日受理)