

(26) 節理性岩盤のモデル化に関する研究

東電設計(株) 菊地 宏吉
" 三室 俊昭

(株) アイ・エヌ・エー新土木研究所 大村富士夫
早稲田大学 原 敏昭

1. まえがき

節理性岩盤の力学特性、透水特性を把握するためには、その岩盤中の節理の幾何学的性状分布を把握することが極めて重要であり、その基礎岩盤の改良を目的として行なわれるグラウチングなどの基礎処理を効果的に施工するためにも重要なことである。

岩盤中の節理分布は、一般に規則性を有するとされているがその規則性は必ずしも完全なものではない。従って岩盤の力学特性、透水特性の検討に用いる岩盤節理モデルは、実態に近い単純規則化した近似モデルを用いることになる。筆者らはこのような岩盤節理モデルの作成を目的として2章に述べる節理の分布性状を支配する要素について定量的評価の考え方、調査、解析手法について順次提案してきた。本報告は、節理の方向性、連続性密度につづく開口度について検討評価を行った結果である。

2. 節理の分布性状を支配する要素

節理の分布性状を支配する要素として①節理の方向性、②節理の連続性、③節理の密度、④節理の開口度、⑤節理の組み合わせ、⑥節理の挟在物質の状況の6つがあげられる。これらの要素の内①方向性、②連続性、③密度については、筆者らがこれまでに検討を加え解析手法、評価方法を提示してきたものであるが、以下に概説し、今回行った節理の開口度についての検討結果を述べる。

3. 節理データのサンプリング方法

節理の計測においては、サンプリングの無作為性等を考慮してグリッドシステムにより計測点を選定し、その計測点において単位格子枠方式を用いて計測を行った。単位格子枠の寸法は、実際の節理状態を考慮して、連続性のある節理の計測格子枠は、一辺を約10mとしたが枠外に連続する節理については、可能な限り追跡し測定した。連続する節理の間を埋める比較的短い節理の計測格子枠については、一辺を1.5mとした。この格子枠寸法は、地表のみならず調査横坑等での節理計測をも考慮して決定した。すなわち、地表節理と岩盤深部の節理の整合性を考慮した。

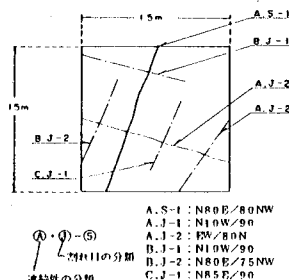


図-1 単位格子枠における節理長の分類

3.1 10m 格子枠による方法

この方法の主な目的は、連続性のある節理の分布性状を把握することである。

節理のサンプリングは、枠内に存在する長さ3m以上の節理について行った(Pグループ)。計測内容は、節理の走向・傾斜及び全長の測定等である。

3.2 1.5m格子枠による方法

この方法の主な目的は、連続性のある節理の間を埋めて分布する短い節理の分布性状を把握することである。

1 計測点においては、節理分布を三次元的にとらえるために原則として、水平1方向、垂直2方向の3測定面を設定した。節理のサンプリングは、枠内すべての節理について行った。計測内容は、節理の走向・傾斜及び枠内における長さである。計測にあたっては、節理をその長さによって、A(両端が枠外にあるもの)、B(一端が枠内にあるもの)、C(両端が共に枠内にあるもの)の3つに分類した。(図-1参照)

4. 節理の方向性、連続性、密度についての解析評価方法

4.1 節理の方向性の解析評価方法

節理の方向性についての解析手法は、筆者らがすでに開発した『電子計算機を利用した極座標による解析方法』を用いた。評価方法としては、下式のように節理属群保有率、節理属群分布率及び節理属群集中度を定義して各節理属群毎に値を求めこれによる評価を考えた。

$$\text{節理属群保有率: } \alpha_i = \left[\sum_{j=1}^n (N_{ij}) / N \right] \times 100\%$$

$$\text{節理属群分布率: } \beta_i = \left\{ N_i / \sum_{j=1}^n (N_{ij}) \right\} \times 100\%$$

$$\text{節理属群集中度: } \gamma_i = \left\{ (N_i) / N \right\} \times 100\%$$

N_{ij} : i 節理属群に属する節理の個数

N : 節理総数

節理屈群保有率とは、節理総個数中における各節理屈群に属する節理個数の総和に占める割合を示すものであり屈群保有率 α が大きいほど節理系の規則性の強いことを示している。この屈群保有率は、節理分布を単純規則化した近似モデルとして取り扱う場合の信頼度を示すものといえる。節理屈群分布率とは各節理屈群に属する節理個数の総和に対するひとつの節理屈群に属する節理個数の割合であり、屈群分布率が大きいほど規則性を有する節理屈群においてその節理屈群の卓越性が高いことを示している。節理屈群集中度とは、節理総個数に対するひとつの節理屈群に属する節理個数の割合であり、屈群集中度が大きいほど節理母集団におけるその節理屈群の絶対的な卓越度が高いことを示している。この解析手法における考え方及び計算法の特徴は次の3点である。

- i) 球面座標において、節理を表現するため、また節理分布性状を定量的に把握するための統計処理を行うために、空間の極座標($R = \text{一定}$)及び空間内の2点間の距離を示す式を用いる。
- ii) 節理屈群を抽出するのに必要な屈群の中心点を求めるためにベクトル手法を適用する。
- iii) 節理面のアンジュレーションの程度に基づいて各節理屈群の範囲を決定する。(図-2参照)

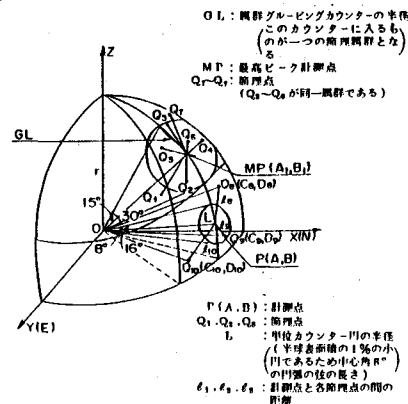


図-2 球面座標による節理分布密度の測定と節理屈群の抽出

4.2 節理の連続性の解析評価方法

節理の連続性についての解析は、方向性を考慮して行った。すなわち、3章節理データのサンプリング方法で述べたP, A, B及びCグループ各々について方向性の解析を行いグループ別の節理屈群を把握し、そのグループ別節理屈群各々について連続性を検討した。

この結果、連続性のあるPグループの節理と1.5m格子枠でのAグループの節理とは方向性がほぼ一致している事が明らかとなったが、このことはPとAとが同じものであると評価出来る。又、この連続性のある節理の間を理めるB, Cの方向性もこのP, Aの節理と同様な傾向を示している。

4.3 節理密度の解析評価方法

節理密度の解析は、方向性、連続性を考慮に入れて行った。すなわち、方向性、連続性の検討によって得られたデータをもとに、グループ別節理密度及びグループ別、屈群別の単位面積当りの節理本数を算出し、さらに節理本数と平均長から平均間隔を算出した。

5. 節理の開口幅についての検討評価

節理性状分布を構成する諸要素の一つである開口幅は、岩盤の透水性及び力学特性の把握、グラウチングの注入材や方法を選定する上で極めて重要である。このため、開口幅を解析、評価し、その成因や規則性を把握する必要がある。

節理は、地殻運動力、冷却・乾燥収縮及び応力開放(シーティング)などの成因により発生し、この時の応力状態によって引張節理とせん断節理に分けられる。引張節理では開口が認められるのに対し、せん断節理では開口が認められないのが一般である。しかし、実際の岩盤ではこれらの異った成因が時間的な差異をもって作用するので、いくつかの方向性を持った節理が発生した後も、引張節理及びせん断節理とも開口はさらに進行することがある。このような節理の発生・発達過程を考慮すると、冷却に起因する柱状節理以外の節理では、方向性及び応力の大きさによって開口幅は異なり、また、開口幅の大きい節理ほど連続性が大きいことが予想される。

この様な観点から、広島花崗岩から構成されるI島の採石場の採掘跡地斜面の露頭の節理と跡地掘削平地部のボーリング孔内の節理について開口性状を検討した。開口幅の調査にあたっては、採掘跡地斜面では間隙計を、また、ボーリング孔においてはボアホールテレビ装置を用いて計測した。

5.1 開口幅と長さ・方向の関係(採掘跡地斜面)

方向性を考慮せずに節理の長さと開口幅との関係を検討すると(図-3, a), 全体的に節理長が大きいほど開口幅が大きい傾向が認められるが、バラツキの範囲は広い。しかし、方向性を考慮して、各屈群別に節理長と開口幅の関係を検討すると(図-3, b, c), バラツキの範囲は狭くなり相関が高くなっている。このことは、節理長と開口幅の評価にあたっては方向性も考慮する必要があることを示している。これらの各屈群における節理長と開口幅の関係は下式で表わすことができ、各屈群毎の係数 α , β は表-1に示すとおりである。

$$l = \alpha t^\beta$$

表-1 節理の長さ l (m), 巾 t (mm)の関係式 $l = \alpha t^\beta$ の係数 α, β

地点	屈群(ピーク)	走向・傾斜	α	β
I島採石場	全体	-	1.43	0.554
	1	166/80	2.69	0.512
	2	336/70	4.70	0.448
	3	80/70	1.83	0.488
	4	296/65	1.41	0.653
Kグループ第一石山	5	253/17	2.30	0.489
	全体	-	0.90	0.384
	1	296/20	1.23	0.554
	2	55/35	0.76	0.585
	3	126/85	1.20	0.490
Kグループ第二石山	4	20/85	1.35	0.298
	5	55/35	0.97	0.230
	全体	-	1.72	0.379
	1	331/10	2.88	0.426
	2	85/35	1.73	0.468
第二石山	3	195/90	1.41	0.439
	4	341/87	1.21	0.529

ここに、 l : 節理長 (m), b : 開口幅 (mm), α, β : 係数である。従って、今回のモデル化にあたっては、この式を利用して開口幅あるいは節理長を決定した。

当採石場の採掘跡地斜面は $N20 \sim 30^\circ W80^\circ E$ となっており、これとほぼ平行する走向の節理 (No 3, No 4 ピーク) は、これとほぼ直交する走向の節理 (No 1, No 2 ピーク) に比べ開口幅が大きい (α が小さい) 傾向を示しており、節理発生時の応力よりも掘削時の応力解放による緩みの影響が大きいことを示している。なお、Kダム原石山の採掘跡地斜面における節理長と開口幅の関係も、I島の場合と同様の関係が得られている。(表-1)

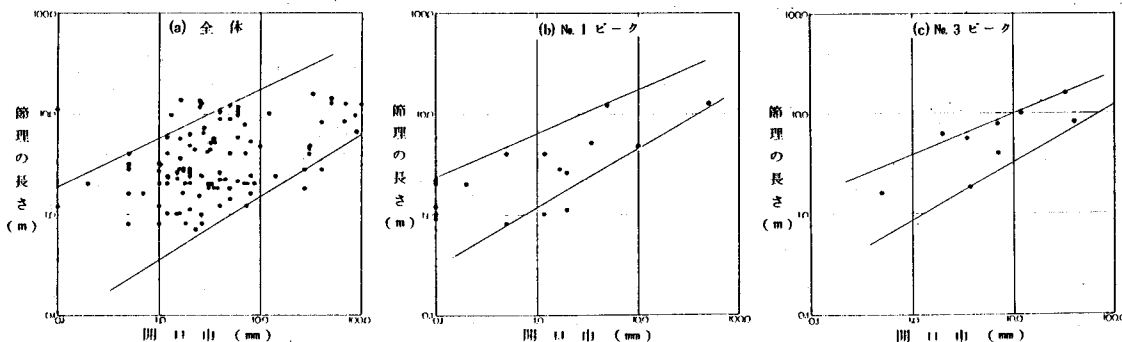


図-3 節理長と開口巾の関係(採掘跡地斜面)

5. 2. 開口幅と深度及び傾斜の関係(ボーリング孔)

ボーリング孔における節理の開口幅及び密度と深度との関係は図-4に示すとおりである。

この結果によれば、節理の開口幅は地表に近づくに従って大きくなっており、特に地表から20mまでには2mm以上のものも分布し、前述のI島の採掘跡地斜面の開口幅の分布範囲(図-3,a)とほぼ一致している。これに対し20m以深では全て2mm以下となっている。

また、節理の傾斜角と開口幅についてみると(図-5)、鉛直に近い節理ほど開口幅は小さく、水平に近い節理ほど開口幅は大きくなる傾向が認められ、特に深度20mまでにみられる2mm以上の節理の傾斜角は $0 \sim 30^\circ$ の範囲にある。

以上のことから、地表に近い水平な節理ほど開口幅は大きく、開口幅は明らかに掘削による応力解放の影響を強く受けているものと判断される。

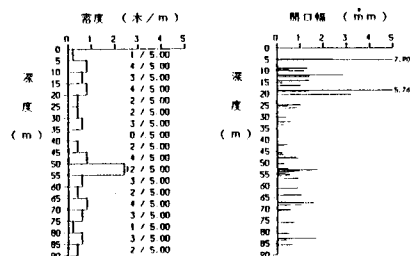


図-4 節理の密度と開口巾の深度分布(採掘跡地ボーリング孔)

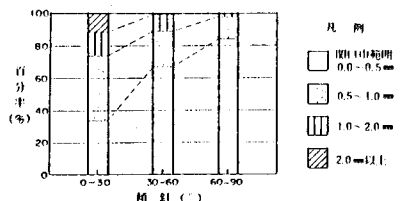


図-5 節理の傾斜と開口巾

6. 岩盤節理モデルの作成

以上に述べた解析結果を基に岩盤節理モデルを作成した。節理の方向性については、屈群集中度が4%以上のものを有意な屈群と見なし、これらを表示する。節理の密度については、各屈群毎の平均真の間隔を求め、表示は表示面に現われる間隔を用いる。

節理の長さ及び開口幅は、図-6、図-7に示すように一般に対数正規的な分布となるので平均長さ及び平均開口幅として超過確率50%値を用いる。このように得られた各屈群毎の方向、間隔、長さ及び開口幅をモデル図として表現することとし、水平、東西及び南北の各面に現われる節理を展開図法及び透視図法により表現した。(図-8参照) 図化に当たっては、便宜的に次の条件を設定した。

- i) 展開図法においては、各面毎にその中心点から

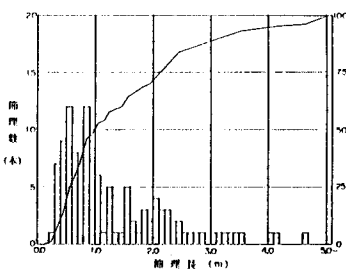


図-6 節理長の度数分布例

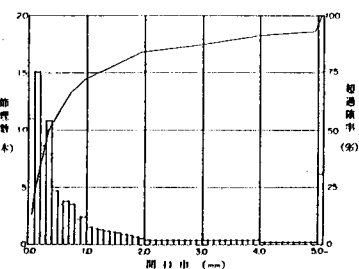


図-7 開口巾の度数分布例

各屈群とも等間隔に千鳥配置にする。

- ii) 透視図法においては、各屈群ともひとつの頂点から等間隔に3面を連続する線として描く。

7. 節理性状要素が透水係数に与える影響

節理の性状・分布から透水性を把握する一段階として、ボーリング孔の開口節理のデータから「開口節理を無限平行間隙」と仮定し、層流理論により透水係数を試算し、現場透水係数と比較してみると(図-9、図-10)、全体的な大小関係は良く一致しているが、現場透水係数に比べ、 $10^4 \sim 10^5$ 倍と大きな値となった。これは、開口幅の影響も大きいことを示しているが、実際の節理は上述の仮定に対して

i) 節理は無限には連続しない。

ii) 孔壁部では開口していても、奥では充填物が詰まっていることがある。

ことなどによるものであり、節理の性状・分布から透水係数を算出するためには節理の組合せ(交差)及び充填物の影響を考慮する必要があることを示している。

8. むすび

本報告は、節理性岩盤のモデル化を目的として節理の分布性状を支配する要素の定量的評価に関する一連の研究の内、間隙の問題(開口幅)について、検討した結果である。節理の開口幅についての検討の結果、次の事項が明らかになった。

i) 節理の開口幅は、節理の長さ(連続性)と相関性を有し、一般に節理長が大きい程開口幅が大きくなっている。この場合、節理長の増加の割合は、節理の方向性によって異なっている。

ii) 節理の開口幅は、地表に近づくに従って大きくなっている。

以上の現象は、地形営力による地形発達輪廻及びシーティング・ジョイントの発生機構等から考えると理解出来る現象である。

また、今回の岩盤節理モデルの作成にあたっては、従来までに検討考察した①節理の方向性、②節理の長さ、③節理の分布密度等の検討評価方法に加えて、今回新たに検討考察した開口幅の検討評価方法を適用したが、これによって、岩盤の節理モデルはより現実的なものに近づくものと考えられる。

節理の分布性状を支配する要素としては、7章で述べたように開口幅から試算した透水係数は実際の透水係数の $10^4 \sim 10^5$ 倍と大きい。これは、有効開口幅の違い(孔壁部では開口していても奥では充填している)や節理は無限に連続していない(途切れている)ことによるものと考えられ、今後は、⑤節理の組み合わせ、⑥節理の挟在物質の状況について検討を加え研究を進めていく方針である。

＜ 参 考 文 献 ＞

- 1) 菊地宏吉・斉藤和雄・金折裕司；土木構造物基礎岩盤中の節理分布性状の一解析手法、第5回岩の力学国内シンポジウム(1977)講演
- 2) 菊地宏吉・井上大栄；電子計算機を利用した座座標を用いた岩盤節理の卓越方向の検討、応用地質第14巻2号
- 3) 菊地宏吉・斉藤和雄・楠建一郎；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No154
- 4) 楠建一郎・菊地宏吉・泉谷孝志；花崗岩岩盤における節理分布モデル化についての試み、第13回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集(1981)

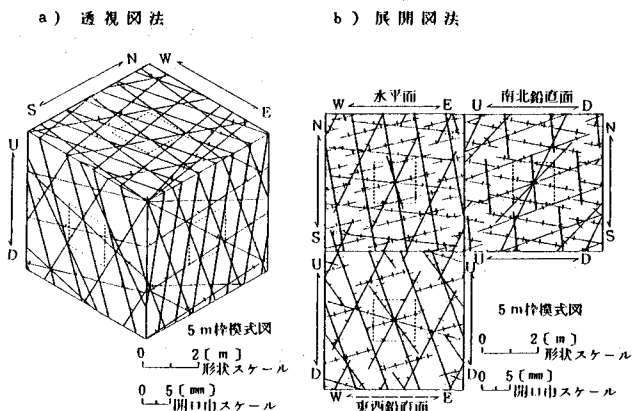


図-8 節理モデル図(探掘跡地斜面)

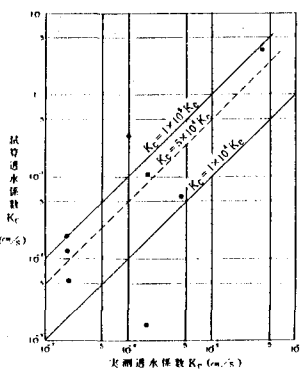


図-9 試算透水係数と実測透水係数の比較

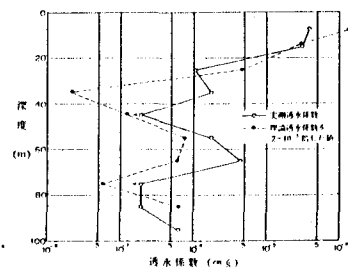


図-10 2×10^{-5} 倍した試算透水係数と実測透水係数の比較

(26) A STUDY ON THE PREPARATION OF MODELS OF JOINTY ROCKS

by Kokichi Kikuchi *1

Toshiaki Mimuro *1

Fujio Ohmura *2

Toshiaki Hara *3

For founding a civil engineering structure on jointy rocks, it is absolutely required to know the distribution conditions of joints in the foundation rocks, for clarifying the mechanical properties and permeability characteristics of the foundation rocks. It is also important for effectively executing such foundation treatment as grouting made for improving the foundation rocks.

Joints in rocks are generally said to be regularly distributed, but the regularity is not perfect. Therefore, a rock joint model used for examining the mechanical properties and permeability characteristics of rocks is an approximate model obtained by simplifying and regularizing actual conditions of the rocks. The authors have been variously studying for preparing the approximate model. This report describes the methods of investigating the opening widths of joints as one of the elements deciding the distribution conditions of joints, and the methods of evaluating and analyzing the opening widths required for preparing models, based on the results of studies made at an underground fuel storage site on I island and at T pumping-up power plant site.

The conditions of joint opening widths were examined and evaluated in reference to the results of the investigations made on the ground surface and the description of bore-holes. In this case it is characterized that the method of investigation mentioned below.

On the ground surface survey, the opening width was measured by a thickness gauge, and it was used a bore-hole television set for the description of bore-hole wall.

The examinations of joint opening widths clarified the following :

- i) The joint opening width has correlativity with the joint length (continuity), and in general, the longer the wider. In this case, the rate of the width to the length depends on the orientation of the joint concerned.
- ii) The joint opening width increases according to approach to the ground surface from the underground.

The above conditions can be well understood in view of the topographic evolution cycle caused by geomorphic agents and the generation mechanism of sheeting joints.

In the preparation of models of this time, the methods of examining and evaluating opening widths newly contrived this time have been applied, in addition to the methods of examining and evaluating such joint distribution elements as (1) orientation of joints, (2) lengths of joints and (3) distribution densities of joints. This method is surmised to make the rock joint models more realistic.

*1 Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.

*2 I.N.A Civil Engineering Consultants Co., Ltd.

*3 Faculty of Education, Waseda Univ.