硬質岩盤における節理分布の数量モデル化および その適用に関する考察

緒方正 虔*

Quantitative Characterization of Distribution Parameters of Joints in Rock Masses

Seiken OGATA

Abstract

Highly simulated description of the joint system in rock masses can be performed by utilizing new parameter of discontinuity ratio besides the orientation and the spacing of joints. The discontinuity ratio is derived mathematically using field measurements of the spacing of joints.

The general parameters obtained are illustrated on some projects.

1. 序

硬質岩盤にダム、地下発電所、大断面トンネルなどの構造物が設けられる際には岩盤の強度・透水に関する性質について岩盤中に分布する節理の影響を考慮した設計がおこなわれており、また多くの検討実績がある。

著者は黒部川第四発電所の高圧トンネルで節理調査を実施し、その後各種の岩盤について節理調査を試みたが、節理の分布の表現のうち困難なもの一つは節理面の同一方向における面の断続性の評価であった。花崗岩などに存在する節理はきわめて規則性のあることが観察されることから、節理系には固有の節理の間隔や長さが存在するとみられる。この場合には断続性を数量的に評価しうる見通しをえた。そこで、従来からとり扱われている方向性、節理間隔などに加え断続性を導入すると一応岩盤中の節理群の分布の数量モデル化が可能と考えられる。そこで以下に節理分布を示す諸項目について検討例を示し、数量モデルおよびその適用例について述べる。

2. 節理分布に関する検討の状況

我が国のダム地質調査に組織的な節理調査が実施されたのは黒部川第四発電所の岩盤調査からと思われる。節理群の方向性についてはシュミットネットを用いて最大

集中方向を求め、井上 (1961)¹⁾、また岩盤中に存在する節理の間隔を Müller (1963)²⁾の区分によって分類し、田中ほか (1964)³⁾は岩質分布図を作成し設計の基礎資料とした。また圧力トンネル周壁の岩盤の節理がトンネルと交差する数を節理密度として示した、緒方 (1960)⁴⁾。

節理の方向の集中度を求める際のシュミット網を用いた統計処理については、計測上最大約 20% の計数円面積の誤差が生じることが明らかにされ、これに代ってウルフ網を用いた統計処理が緒方 (1964)⁵⁾により提案された。電算機による統計処理としては菊地ほか (1973)⁶⁾の検討、井上 (1971)⁷⁾によるウルフ網上への集中コンター自動図化がある。計算によって集中方向をもとめる方法には山口 (1959)⁸⁾の球面上に経線、緯線軸を設けて座標を求める、鍋岡 (1967)⁹⁾のベクトル和として計算する、埼玉大学 (1970)¹⁰⁾の方向余弦で計算する、などがある。

節理の数については星野 (1962)¹¹⁾による Fracture 密度の検討、緒方 (1965)¹²⁾の節理面の広がり の検討がある。

海外において節理の方向・数などの検討については Müller (1963)²⁾により概括的に示されているが、球面上の座標の集中方向、分散についての計算は Fisher (1953)¹³⁾、点計数円の直径と測定個数の関係の検討は Kirchmayer ほか (1960)¹⁴⁾、節理面の広がり の概念は John (1962)¹⁵⁾、節理の幾何学的表示は Silveira ほか (1966)¹⁶⁾、節理の方向性と密度の計算は Kiraly (1969)¹⁷⁾

* 電力中央研究所土木技術研究所

などがある。このほか節理を有する岩盤のボーリング調査のコアによる節理量の表示としては R.Q.D., Coon (1969)¹⁸⁾などがある。

3. 節理分布の数量モデルおよび適用

岩盤の露頭でかなり規則的に発達していると観察されるような節理系は通常二、三組の節理群より構成されている。花崗岩などでは固有の長さ、間隔を有する縦節理、横節理、水平節理が存在し、同じ花崗岩でもアプライト質の岩石では花崗岩より小目となることが知られる。

節理系を構成する数組の節理のうちのある一組の分布はつぎの諸量で表すことができる。

1) 平均節理方向 (度) $\bar{\theta}$

偏差 (度) σ_{θ}

平均節理方向は 360° 法でも走向傾斜による表示でもよい。偏差は平均節理面の法線方向の偏差。

2) 平均節理間隔 (m) $\bar{S}$

節理密度 (m^{-1}) $1/\bar{S}$

3) 平均節理長さ (m) $\bar{l}$

4) 節理断続率 a

$$a = \frac{i}{l+i}, \quad 0 \leq a \leq 1$$

5) 固有節理間隔 (m) S_i

図-1 は固有節理間隔 S_i を有し、長さが l 、断続長さ i を有する節理群の垂直断面を単純化して示したものである。

以下に節理調査を実施した計画地点の各種の岩盤について節理の諸量および適用例について述べる。

図-1 固有節理間隔を有する節理群の垂直断面

3-1. 平均節理方向

土质地質に関連した節理の方向性については最も注目され、また検討資料も多い。節理の方向性はウルフ網などを用いて図解で集中方向を求める方法と計算による方法に大別され、前者は最大集中方向、後者は平均節理方向を表わしていることになる。

図解による節理群の方向の集中性は普通ウルフ網の面積の 1% の面積を有する点計数器中に含まれる座標点数

が最大となる個所をウルフ網上で見出し、点計数器の中心の座標を最大集中方向とする。また節理群の方向の集中性は全測定個数に対する点計数器中に含まれる点の数の割合を % 表示であらわす。% の値が高ければ集中性が高いとみなされるが、統計的には必ずしも厳密ではない。しかしこの方法は節理方向の集中箇所をみつめるためには手法が簡単であり最も一般的に使われている。

計算によって平均節理方向を求める場合は処理がやや煩雑であるが、平均節理方向のほかに偏差、分散などの統計上の数値がえられる利点がある。岩盤の節理系が数組の節理群より構成される場合はまず計測値をウルフ網などにプロットし、視察で節理の組分割をおこない、各々の組について数値計算を実施しなければならない。計算の方法は Fisher¹³⁾、山口⁸⁾、鍋岡⁹⁾の方法が代表的であろう。

○岩盤の平均節理方向検討例

表-1 にウルフ網による図解法でえられた岩盤の節理系の最大集中方向、および球面上の経度、緯度による座標計算により求めた各種岩盤の平均節理方向の値の一覧を示す。

表-1 に示す 5 種類の岩盤に存在する節理は各種の岩盤中では比較的方向性を有しているものと考えられるが、このうちでもやはり花崗岩の方向性が最も高く、平均節理方向の偏差は広島型の花崗岩で $11 \sim 15$ 度程度である。野外観察でも花崗岩とくらべると他の岩盤の節理は方向性が低下するように感じられるが、計算結果でも偏差が大きい傾向を示し斑礫岩では 24 度となっている。したがって、安山岩、堆積岩などはより偏差は大きいのが実態と思われる。

また、図解で求めた最大集中方向は計算による平均節理方向とはほぼ一致しているとみてよいであろう。したがって、概括的に節理の集中方向を求めるには図解法で十分と思われる。ただ、集中度を示す % は必ずしも偏差値と対応していない。

3-2. 平均節理間隔

節理の間隔は岩盤中に存在する節理の数を表わす。このいみで節理間隔は土木地質では重要な量である。著者は岩盤の掘削面あるいは調査横坑、トンネルなどの節理調査で測線を設け測線と交差するある節理組に属する節理の間隔の平均値を平均節理間隔 $\bar{S}$ 、平均節理間隔の逆数を節理密度 ρ と定義した。すなわち

$$\bar{S} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \cdot \cos \phi \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\rho = \frac{1}{\bar{S}} \quad \dots \dots \dots (2)$$

表-1 各種岩盤の節理の方向性

岩石種	地 点	節理組	最大集中方向* (度)	集中度 (%)	平均節理方向* (度)	偏 差 (度)	資料数
花 崗 岩	黒部湖貯水池周辺	I	345/60	6.8	345/55	18.1	41
		II	253/78	9.5	254/65	18.4	12
		III	59/55	5.4	79/60	18.5	21
	上廊下, 東沢周辺	I	17/85	11.4	13/83	8.9	8
		II	146/85	9.1	147/81	17.6	12
		III	10/45	13.6	9/41	18.7	16
花崗閃緑岩	黒部川上流 (栗師沢合流より)	I	44/77	16.1	39/77	12.6	12
		II	132/80	22.6	130/79	14.6	13
花 崗 岩	広島, 南原 ダムサイト	I			73/83	15.4	22
		II			336/83	12.3	10
		III			225/16	18.9	14
	明神ダムサイト	I			90/85	12.8	23
		II			344/89	13.0	24
" (粗粒)	発電所箇所	I			247/89	15.3	55
		II			161/87	11.2	42
		III			42/ 8	15.8	29
" (細粒)	発電所箇所	I			264/86	13.4	68
		II			157/84	14.3	75
		III			35/ 6	15.4	47
斑 糲 岩	若狭, 原子力地点	I			202/88	24.3	75
		II			149/72	11.7	
		III			294/67	20.4	
輝 緑 岩	若狭, 原子力地点	I			141/76	16.6	90
		II			33/49	18.3	
		III			243/75	21.7	
石英閃緑岩	若狭, 原子力地点	I			0/58	21.8	165
		II			130/73	22.8	
		III			263/63	16.4	

* 方向は 360° 方式, 南半球投影により S を 0° とする

表-2 節理の間隔による岩質表示の対照例^{19), 3)}

1 10 100 (cm)								
Crushed	Very close	Close		Wide		Occasional		John
Very close		Close		Moderately close	Wide	Very wide		Deere
Shattered		Very close	Close	Moderate	Wide	Massive		Eastaff
Broken			Blocky			Solid		Coates
Comminuted	Shattered	Very close	Close	Moderate	Wide	Very wide		Binnie & Partners
Crushed to mylonitized		Very closely		Closely		Widely		Müller

図-2 黒部川第四発電所圧力トンネルの節理密度、地形断面

と定義し節理の数を表示する方法を示した。ここで ϕ は測線と平均節理面の法線との夾角, S_i は計測節理間隔, N は計測節理資料数である。岩盤中の節理の分布量から ρ は 1 m 当りの本数 (m^{-1}) で表わすと都合がよい。

土木地質では岩盤の節理間隔の大小により岩質を区別して表現されている。表-2 に節理間隔に関する各種の述語の対照例を示す。表に示すように分類の区分, 述語はまだ統一されていない。

○岩盤の節理間隔, 節理密度の検討

トンネルと交差する節理の数はトンネルの向きにより異なってくるので, 節理密度で節理の量を表示すればトンネル各区分相互に節理の量を比較できる。また岩盤には普通数組の節理群を有しているのて岩盤全体の節理密度は各組の節理密度 ρ_i の総和 $\sum \rho_i$ であらわされる。

図-2 は黒部川第四発電所圧力トンネル周辺の花崗岩における全節理密度と岩盤覆り, 岩石種を示したものである。岩盤の節理密度は 1 号トンネル, 2 号トンネルとも 2~4 (m^{-1}) で地域による変化は少ない。岩盤の覆り量と節理密度の対応は認められないことから, これらの節理は岩盤固有の節理と考えられる。1 号トンネルの 500 m~600 m 区間の節理密度が高い。同区間は花崗岩とアブライト質花崗岩の境界に位置し岩盤は破碎している。したがって破碎による二次節理の存在によってこの区間は密度が高くなっているものと考えられる。

黒部川第四発電所の圧力トンネルは巻立コンクリートにプレストレスをかけることとし, 低圧グラウトのほか高圧グラウチングが実施された²⁰⁾。高圧グラウチングではトンネル 1 m 当り 2.25~4 本配孔され, 孔深は 1.5~3.0 m である。高圧グラウトは花崗岩の節理を主体とする分離面への注入による岩盤の一体化が目的とされる。注入実績と節理密度の関係の代表例として 1 号トンネルを図-3, 3 号トンネルを図-4 に示す。

トンネル周辺の岩盤注入実績によればセメントの注入量と節理密度の対応が明瞭ではない地域と (図-3), 対応が認められる地域 (図-4) があり地域による特性がある。対応が認められない場合としては岩盤が風化しており節理以外の岩石組織にも注入が予想されるか, 節理が密着している岩盤が考えられる。1 号トンネルの場合は注入量が少なく岩盤覆りが深いことから後者の地質条件である良質岩盤と考えられる。対応が認められる 3 号トンネルの場合注入量の最大値は節理密度とは対応するが注入量 V は $V \leq 0.6\rho$ の範囲に分布している。このように注入量がある範囲内に分布する岩質として, 節理内に粘土等の狭在物を含むため注入が阻害される場合, 節理

図-3 圧力トンネル (1号) における節理密度とベーストセメント注入量

図-4 圧力トンネル (3号) における節理密度とベーストセメント注入量

のうちある割合の節理だけ注入可能な間隙幅を有する場合などが考えられる。同トンネルでは節理は風化物を挟在しないので, 全節理のうちのある節理にゆるみによる間隙が発生していると思われる。

3-3. 平均節理長さ

岩盤の自然露頭あるいは掘削面に節理面が全域露出している場合は極めて稀であり, 普通には節理の断面が現れているにすぎない。しかし, 節理の断面の長さは節理平面の広さに関連する量であるので計測量として重要である。岩盤露頭における節理の長さの計測は比較的容易であり, 計測した節理長さの平均を平均節理長さ $\bar{l}$ と定

義する。

小目の節理を有する岩盤では節理断面長さの両端まで

表-3 各種岩盤における平均節理長さ

岩石種	地 点	節理組	平均節理長さ (m)
花 崗 岩	高瀬川本流 地域		4.2
	湯俣川地域		6.2
	水俣川地域		3.6
	不動・濁沢 地域		4.0
花 崗 岩	黒部湖集水 区域		1.9
花 崗 岩 (粗粒)	広島, 南原 発電所箇所	I	2.0
		II	2.2
		III	0.7
花 崗 岩 (細粒)	"	I	1.7
		II	1.6
		III	0.4
斑 糲 岩	若狭, 原子 力地点	I	0.4
		II	0.6
		III	0.5
輝 緑 岩	"	I	0.6
		II	0.4
		III	0.5
石英閃緑岩	"	I	0.6
		II	0.5
		III	0.4
緑泥片岩	佐 田 岬		0.6

が確認されるが、花崗岩、安山岩など大目の岩盤では l が数 m 以上になることがあるので有効な計測例は少なく、また横坑、トンネルでは掘削断面の制約があるため計測は実際上困難な場合が多い。

○平均節理長さの計測例

表-3 は地点で計測された各種の岩盤における平均節理長さの一覧である。

表-3 の計測例では花崗岩の平均節理長さは数 m で最も長く、他はより短い。図-5 は各種岩盤でえられた $\bar{l}$, $\bar{S}$ の関係を図示したものである。図より $\bar{S}$ が大きくなれば $\bar{l}$ も大きい傾向は認められるが、 $\bar{l}$ は $\bar{S}$ の 2~6 倍程度の範囲であるので、 $\bar{S}$ より $\bar{l}$ の概略の見当はつけられると思われるが詳細な検討を要する場合は岩種別に $\bar{l}$ をもとめる必要がある。

3-4. 節理断続率, 固有節理間隔に関する考察

節理の分布量を示す重要な項目として節理平面方向における相隣接する節理までの間隔を知らなければならない。相隣接する節理までの間隔は節理群の断面上では間隔 i (図-1) となる。現実の露頭で有効な i を計測するためには相隣接する二本の節理が露出していなければならないため、 l の計測よりもより困難である。そこで、節理に関する他の計測値から i あるいは i に関連する数値を求める方法を述べる。

節理調査において、掘削面、横坑、トンネルの側壁などの露頭面で測線を設け測線と交差する節理の間隔 S_i を計測することは容易である。 S_i を計測した場合に、 S_i の計測値のうちには岩盤の節理群が有している固有節理間隔 S_1 の計測値、図-1 に示すように隣接する節理をとばした次の節理との間隔 $2S_1$ の計測値、さらに次の次の節理との間隔 $3S_1$ の計測値というように固有節理間隔 S_1 および nS_1 ($n=1, 2, \dots$) の計測値が含まれて

図-5 平均節理間隔と平均節理長さ

おり、これらの計測値個数の割合は節理断続率 a によって異なってくる。

S_1 が計測される確率 P_{S_1} は

$$P_{S_1} = \frac{l}{l+i} = 1-a,$$

$2S_1$ が計測される確率 P_{2S_1} は

$$P_{2S_1} = \frac{i}{l+i} \cdot \frac{l}{l+i} = a(1-a),$$

$3S_1$ が計測される確率 P_{3S_1} は

$$P_{3S_1} = \frac{i}{l+i} \cdot \frac{i}{l+i} \cdot \frac{l}{l+i} = a^2(1-a),$$

同様に nS_1 が計測される確率は $P_{nS_1} = a^{n-1}(1-a)$ となる。したがって平均節理間隔 $\bar{S}$ は

$$\begin{aligned}\bar{S} &= \sum_{n=1}^{\infty} nS_1 \cdot P_{nS_1} \\ &= S_1 \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot P_{nS_1} \\ &= S_1 \{(1-a) + 2a(1-a) + 3a^2(1-a) + \dots \\ &\quad + na^{n-1}(1-a) + \dots\} \\ &= S_1(1-a)(1 + 2a + 3a^2 + \dots + na^{n-1} + \dots)\end{aligned}$$

$0 < a < 1$ であるから $n \rightarrow \infty$ ならば

$$\bar{S} = \frac{1}{1-a} S_1 \dots\dots\dots (3)$$

したがって節理断続率 a は

$$a = 1 - \frac{S_1}{\bar{S}} \dots\dots\dots (4)$$

でえられることとなる。 $\bar{S}$ は通常の節理調査によって求められるから、 a を得るには S_1 を求めなければならない。

ここで節理間隔の計測値 S_i の頻度の確率密度の和 $\sum_{n=1}^{\infty} a^{n-1}(1-a) = 1$ であり、密度分布は図-6に示すように指数型となる。現実の節理分布が図-1に示すような

図-6 nS_1 計測頻度密度分布

図-7 細粒花崗岩（広島型）における節理間隔頻度分布

模式的なものであれば計測値 S_i の頻度分布は理論上は図-6と同型となるはずでこの場合は分布型と(4)式の関係より S_1 および a を数学的に求めることも可能であろう。しかし實際上、節理の測定個数上の制約および岩盤の節理分布は概念的なものより複雑であると予想されることから節理分布より計算によって求めた S_i , a が節理分布の実態を忠実に反映するかどうかについては疑問の余地がある。

そこで、現実の岩盤で実施した節理間隔の調査により S_i 計測値の頻度分布を検討したのが図-7である。これらは広島型花崗岩中に建設された地下発電所の節理調査による資料によっている。図-7に示すように花崗岩中の3組の節理の分布形状は理論上の分布と必ずしも一致しないが、傾向的にはいずれもある割合で頻度が減少しているのが認められるので、節理の断続が節理間隔の計測頻度に反映していると考えられる。この場合、図-6にも示されるように S_1 はヒストグラムの左側の最大値を

示す個所に相当する。図-7はこのような方法でえられた a の値を示してある。節理間隔の計測値の分布において最大値が多少内側に現れる場合でも最大値の位置を S_1 としても実際上支障はないと思われる。しかし、計測値の分布形が正規型あるいは二項型のように左右対称型あるいは不規則形を示す場合には節理分布は断続モデルと異なっていると考えられるので当方法の採用は不適である。

節理間隔の計測値の頻度分布の検討において、階級区分は区間内の測定値がとびとびにならない程度に細分することが望ましく、 $\bar{S}$ までに少くとも1, 2区間を設け得る程度の測定個数が必要であろう。

分布型の適合性および階級区間のとりかたなどにより厳密には a の値は異なってくるので、 a によって節理の断続性のすべての特徴を表示しているものではないと思われるが、岩盤における節理面の断続の割合を総体的に示す数値として意味があると考えられる。

図-8 地下発電所周辺の節理分布数量モデル

以上の方法によれば節理調査によりたとえ i の計測値がえられなくても $\bar{l}$ がわかれば a と $\bar{l}$ より計算により i を求めることができる。また、 i, l の測定が出来ない場合でも S_i の計測値とその頻度分布より a は求めることが可能である。

節理断続率は節理を有する岩盤の節理面方向における岩盤実体部分の存在割合を示すもので、節理に関連する岩盤の強度のてい減あるいは強度方向異方性などの評価に有効な資料となると考えられる。

以上に述べた節理分布を示す諸量を組合せると、岩盤における総体的節理分布を数量的に表示することができる。図-8 は広島型花崗岩中に建設された地下発電所の花崗岩の節理系のうち節理組 I についての数量モデルでさる。この場合、 i は節理調査で計測できなかったの $\bar{l}, a$ より計算で求めた。

4. む す び

硬質岩盤が構造物の基礎あるいは構造物の収容体とされる際に、岩盤の強度および透水に関する性質について岩盤中に存在する節理の影響を考慮した設計検討がおこなわれる。

節理の分布はつぎの諸量で表すことができる。

- 1) 平均節理方向、偏差
- 2) 平均節理間隔、節理密度
- 3) 平均節理長さ
- 4) 節理断続率
- 5) 固有節理間隔

節理分布を数量的にモデル化するためには節理面の断続性の評価が必要である。断続性については節理調査により計測される節理間隔、およびその分布型より理論的に節理断続率を導くことが可能でありその方法を示した。

また、各種の岩盤について節理の諸量の計測数値の实例、検討例を示し、花崗岩について岩盤内における総体的節理分布の数量モデルの实例を示した。

なお、数量モデルの数学的検討については電力中央研究所土木技術研究所本荘静光主任研究員に助言をいただいた。記して謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 井上康夫 (1961): 節理・断層面などの統計に用いるシュミット網の書き方, 電力中央研究所業務資料
- 2) L. Müller (1963): Der Felsbau Ferdinand Enke Verlag
- 3) 田中治夫・井上康夫・緒方正虔 (1964): 黒部川第四地点の地質, 電力中央研究所研究報告, 地質・64001
- 4) 緒方正虔 (1960): 水力発電所圧力トンネルの地質調査について, 地質雑 Vol. 66, No. 778, 演旨
- 5) 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. 2
- 6) 菊地宏吉・井上大栄 (1973): 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 Vol. 14, No. 1, 2
- 7) 井上大栄 (1976): 電子計算機によるウルフ網の自動図化, 電力中央研究所, 2号印刷物
- 8) 山口貴雄 (1959): 地質統計案内, 地学団体研究会専報
- 9) 鍋岡昭三 (1967): 割れ目の多い花崗岩盤に及ぼすベンチ爆破の影響について, 電力中央研究所研究報告 No. 66062
- 10) 埼玉大学岩石工学研究室 (1970): 岩盤の現地調査法——(1) 岩盤力学に関するシンポジウム第6回講演概要
- 11) 星野一男 (1962): 地層中の Fracture 空隙率の求め方および埼玉県比企丘陵第三紀層についての計算例, 石油技術協会誌 Vol. 27, No. 5
- 12) 緒方正虔 (1965): 層理面の調査について, 電研土木講演と懇談の会講演概要集
- 13) S. R. Fisher (1953): Dispersion on a sphere, Proc. Roy. Soc. London
- 14) M. Kirchmayer and O. Casensky (1960): Die Kamb'sche Beziehung des Auszählkreises zur Anzahl der Meßdaten bei der Darstellung von Strukturen in Diagrammen. Mitteilungen Ges. Geol. Bergb. Stud. 11
- 15) K. W. John (1962): An approach to rock mechanics, Proc. Am. Soc. Civ. Eng. 88, SM4
- 16) A. F. Silveira, F. P. Rodrigues, N. F. Grossmann and F. M. Mendes (1966): Quantitative characterization of the geometric parameters of jointing in the rock masses, Proc. 1st Congr. Intern. Soc. Rock Mech. Lisbon, Vol. I
- 17) L. Kiraly (1969): Statistical Analysis of Fractures (Orientation and Density) Geol. Rundsch, Vol. 59, No. 1
- 18) R. F. Coon (1969): Predicting in situ modulus of deformations using Rock Quality Index ASTM Special Tech. Publication, 477
- 19) M. D. Watkins (1970): Terminology for describing the spacing of discontinuities of rock masses, Quart. J. Eng. Geol. Vol. 3, No. 3
- 20) 関西電力株式会社編 (1963): 黒部川第四発電所工事誌

(昭和 53 年 5 月 10 日受理)