

(2) 節理性岩盤のモデル化における節理の組合せ及び節理面粗度の検討

東電設計(株)		三室俊昭
東電設計(株)		小林隆志
東電設計(株)	正会員	菊地宏古
鹿島建設技術研究所	正会員	○稲生道裕
鹿島建設技術研究所	正会員	塩釜幸弘

1. はじめに

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とともに、節理面物性の調査・解析・評価手法を確立することが必要である。

岩盤中の節理分布は、一般的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。したがって岩盤の力学特性・透水特性の検討に用いる岩盤の節理モデルは、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。これまで筆者らは、このような岩盤節理モデルの作成を目的として、節理の分布性状を支配する要素のうち方向性・連続性・密度・開口性についての調査・解析・評価手法について検討し、岩盤節理モデル図作成手法について提案してきた。^{1)~7)}

本報告は、残された節理要素のうち、「節理の組合せ」と「節理面の粗度」について検討を行ったものである。節理の組合せについては、現地測定データの分析により、節理の組合せ状況を把握するとともに、モデル図を従来の研究よりさらに近似させうる手法を考えた。また、節理面の粗度については、現地データから粗度の状況を把握するとともに、より簡易な測定・評価方法の可能性を提案した。

2. これまでの研究成果 ^{1)~7)}

節理の分布性状を支配する要素としては、①方向性、②連続性、③密度、④開口性、⑤組合せ、⑥粗度、⑦挟持物がある。①~④については、筆者らがこれまでに調査・解析・評価手法を提示してきた。

節理データのサンプリング方法は、10m格子枠及び1.5m格子枠による方法がある。この方法によって得た節理データの方向性の解析手法は『電子計算機を利用した極座標による解析方法』を用い、節理属群保有率、節理属群分布率及び節理属群集中率により評価した。連続性については、節理属群別の長さの分布はほぼ対数正規分布を示すことが分かった。また密度については、方向性の検討によって得られたデータを基に、節理属群別の単位面積当りの節理本数を算出した。さらに開口幅については、節理属群別に節理長との関係をみると、長い節理ほど開口幅が大きいという傾向が認められた。

以上の解析評価手法をもとに、節理モデル図作成手法を開発した。この手法では、前述した解析手法を用いて節理属群の数と方向、節理属群別の節理本数を算出した。次に節理の長さの間隔については、節理調査によって得られた分布型に基いて表現した。(以上の詳細は文献1)~7)を参照)

3. 節理の組合せの検討

3.1 節理の連結タイプの分類

節理の組合せを検討するために図-1に示すように節理の連結タイプを分類した。このうちI、L、Tタイプは節

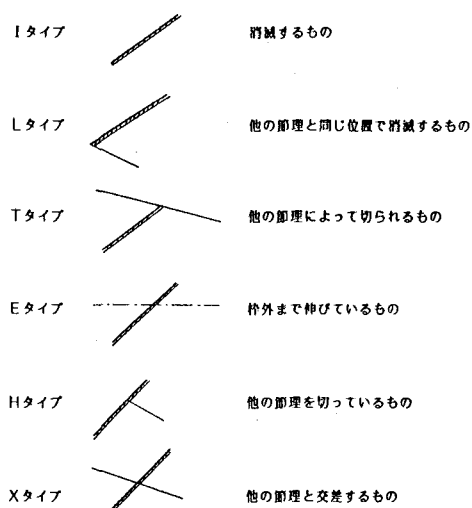


図-1 節理の連結タイプの分類

理の終端の状況であり、H、Xタイプは節理の途中の状況である。また限られた枠内で調査をしているため、枠外まで伸びているものをEタイプとした。

3.2 現地測定データによる節理連結タイプの分析

今回、1.5m格子枠を単位

として4.5m×12mの範囲をスケッチしたA地点の節理図面を用いて、節理の連結タイプの分析を行った。節理毎に連結タイプを記載して、タイプ別に計数し、これを節理属群別にまとめたものを表-1に示す。この表によって、タイプ別の構成比をみると、Iタイプ（消滅する）、Lタイプ（他の節理と同じ位置で消滅する）はわずかである。Xタイプ（交差する）が最も多く、Tタイプ（切られる）、Hタイプ（切る）はその半数程度（つまり $X \approx H+T$ ）となっている。また節理の終端については、Tタイプが圧倒的に多い。

次に節理属群別のHタイプ（切る）とTタイプ（切られる）の比 H/T は、その節理属群の優勢度合と考えられる。この優勢度合は表-1に示すようにIIが最も大きく、I、III、IVの順となっている。すなわち、この H/T によってどの節理属群が優勢（他方向の節理を切ることが多い）かを判断できる。

また、サンプリング個数の検討も行った。今回は1.5m枠を単位として24面の範囲の実測データを分析しているが、このうち1.5m枠を何面かランダムサンプリングして、各タイプの構成比をもとめた。範囲が小さくなるとEタイプ（枠外に続く）の割合が大きくなるので、Eを除く構成比で比べてみると、表-1に示すように3面サンプリングで全体の構成比に近づくことがわかる。これは全データを分析しなくても、数面程度のデータをランダムサンプリングすれば、タイプ別の構成比が求まることを示している。

3.3 組合せを考慮した節理モデル図作成手法

前節のデータの分析から、節理の組合せをモデル図に表現するには次のように考えるのがよいと思われる。まず節理の連結タイプのうち、終端の状況が不明なEタイプ（枠外に続く）及びその比率が非常に小さいLタイプ（他の節理と同じ位置で消滅する）を除いて他のタイプの構成比を算出する。次にIタイプ（消滅する）、Tタイプ+Hタイプ（切る切られるの関係）、Xタイプ（交差する）の構成比を求め、その構成比を反映するようにモデル図を作成する。

この方法は、インタラクティブな図形処理機を用い、従来の手法⁷⁾で作成されたモデル図をディスプレイ上に出力させ、節理線を移動することによってIタイプ（消滅する）をTタイプ（切られる）に変換するものである。この際優勢度合 H/T の低い節理属群から順に移動の操作をおこなって、モデル図の節理の連結タイプの構成比を現地測定データの構成比に近似させていくものとする。

4. 節理面粗度の検討

4.1 粗度の測定方法

今回節理面粗度の検討を行うためのデータの測定方法は、図-2に示すように節理面が表面に露出している所を選び、その節理面の最大傾斜方向に2mの測定尺をおき、2cm間隔に高さを測定して輪郭を描いた。この際、測定尺の傾斜方向・傾斜角と節理面の走向・傾斜を測定した。

4.2 粗度の定量化手法

次に以下に述べる手法（図-3参照）で、粗度の定量化を試みた。今回は1m区間の粗度を求め、その結果を表-2に示した。

表-1 節理の連結タイプ別分類表

連結タイプ		全体 (1.5×1.5m枠 24面)										サンプリング				
		節理属群					連結点 数	構成比 (%)	Eを除く 構成比 (%)	Eを除く 構成比 (%)	Eを除く 構成比 (%)	Eを除く構成比 (%)				
		中域方向	IV	III	II	I						4面	3面	2面	1面	面
I	消滅する	32	11	18	5	5	71	3.1	3.3	33	—	3.9	3.3	3.7	3.4	—
L	他の節理と同じ位置で消滅する	5	4	7	1	4	21	0.9	1.0	—	—	1.7	2.2	3.7	2.6	—
T	切られる	186	151	99	56	32	524	22.8	24.4	24.6	24.9	25.1	29.3	30.2	—	—
H	切る	174	232	56	22	8	524	22.8	24.4	24.6	24.9	25.1	29.3	30.2	—	—
X	交差する	382	350	161	83	33	1009	44.0	46.9	47.4	45.6	44.3	34.1	33.6	—	—
E	枠外まで伸びる	74	24	17	28	3	146	6.4	—	—	—	—	—	—	—	—
連結点計		853	772	390	195	85	2295	—	2149	2128	—	—	—	—	—	—
節理本数		148	95	71	45	22	361	—	—	—	—	—	—	—	—	—
節理属群の優勢度合 H/T		0.94	1.54	0.89	0.39	0.25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—



図-2 粗度の測定方法

(a) 平均波長：1 m間の節理の山谷数を求めてそれを2で割り、この逆数である平均波長を求め、これを指標とする。

(b) 高低差：1 m間の節理の最高点と最低点の差を指標とする。

(c) 高低差／平均波長：この値を指標とする。

(d) 標準偏差法：1 mを10等分した10 cm間隔に基準線と節理面との差を測定し、その11個のデータの標準偏差を求めてこれを指標とする。これは節理の凹凸の細かさの程度を反映した指標である

(e) $\sqrt{(\text{高低差}) \times (\text{標準偏差})}$ ：この値を指標とする。

(f) Waviness

齊藤、安井⁸⁾によって提案されたもので、節理面の断面をある三角形のくり返しと考え、その三角形の底角を使って粗度を表現する。基準長 L をきめ、 $L \sim L/4$ の刻みで粗度角を次々に測定する。次に正と負の粗度角を別々に平均し、節理面が底辺 $2L$ 、両端の角が正と負の平均粗度角の三角形のくり返しであるとし、底角の和をもって粗度の指標とする。なお、今回基準長は20 cm、刻みは $L/2$ として求めた。

(g) JRC (Joint Roughness Coefficient)

この方法はBarton⁹⁾によるもので、基準の表面粗さ断面形と比較して、0～20までのJRC値を決めてこれを粗度の指標とするものである。さらにJRCは式によりせん断強度と結びつけられている。

このうち(a)～(e)は、今回筆者らが簡易な方法として検討したものである。

4.3 粗度の定量化についての検討

まず、図-4に高低差と平均波長との関係を示す。両者の相関は強くないが、高低差が大きくなると平均波長も大きくなるというおおよその傾向がみられる。次に表-3に示すように既存の粗度の指標であるWaviness・JRCと今回検討した(a)～(e)の指標との間の相関係数を求めた。このうち高低差・標準偏差及び両者を組合せた $\sqrt{(\text{高低差}) \times (\text{標準偏差})}$ の指標との間の相関係数は高く、(図-5、6にその例を示す)これらが粗度のよい指標になりうることを示唆している。今回の測定方法では、表面に露出した節理面でしか測定ができず、そのためデータも数多くとれなかった。しかしながら、上で述べたようにより簡易な指標で粗度を表現できることになれば、測定方法もより簡易な方法を採用できる。つまり、露頭面と節理面が交わっていればその交線上に基準線をはって直接高低差や標準偏差を測定できるわけである。

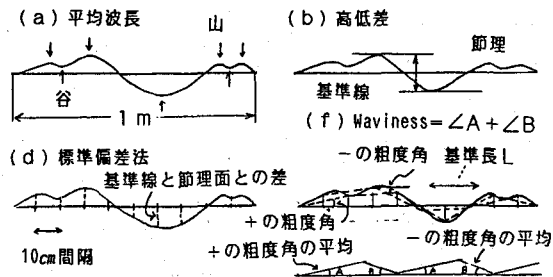


図-3 粗度の定量化手法

表-2 1 m区間の粗度

番号	平均波長 (cm)	高低差 (mm)	標準偏差 (mm)	$\sqrt{(\text{高低差}) \times (\text{標準偏差})}$	Waviness 1-20cm (度)	JRC
1	14.3	35.0	2.45	12.5	20.9	8-10 (9)
2a	13.3	41.0	3.08	12.4	22.5	10-12 (11)
2b	11.8	26.0	2.37	9.3	16.1	8-10 (9)
2c	13.3	19.0	1.42	4.7	9.4	6-8 (7)
3a	9.5	26.0	2.73	6.5	13.0	8-10 (9)
3b	10.5	37.0	3.52	11.9	21.0	12-14 (13)
4a	13.3	24.0	1.80	5.2	11.2	6-8 (7)
4b	15.4	24.0	1.56	8.6	14.4	8-10 (9)
5	15.4	16.0	1.03	4.3	8.3	6-8 (7)
6	25.0	53.5	2.14	16.1	29.3	10-12 (11)
7	11.1	27.5	2.47	8.4	15.2	8-10 (9)
8	11.1	20.0	1.80	5.1	10.1	6-8 (7)
9	13.4	52.0	3.37	16.1	28.9	14-16 (15)
10	10.8	23.0	2.30	7.7	13.3	10-12 (11)
11	13.3	13.0	0.97	4.5	7.7	8-10 (9)
12	16.7	31.0	1.86	8.7	16.4	10-12 (11)
13	22.2	20.0	0.90	5.3	10.3	8-10 (9)
14	12.5	26.0	2.24	4.0	10.6	8-10 (9)
15	15.4	18.0	1.17	3.8	8.2	6-8 (7)
16	40.0	60.0	1.50	17.0	32.5	12-14 (13)
17	11.1	12.0	1.08	3.6	6.6	4-6 (5)

表-3 指標間の相関係数

	(f) Waviness	(g) JRC
(a) 平均波長	0.471	0.350
(b) 高低差	0.916	0.806
(c) 高低差／平均波長	0.586	0.651
(d) 標準偏差	0.958	0.812
(e) $\sqrt{(\text{高低差}) \times (\text{標準偏差})}$	0.958	0.819

5. おわりに

節理の分布性状を支配する要素のうち、節理の組合せと節理面の粗度について、現地測定データを用いて基礎的検討を行った。その結果、次の事項が明らかとなった。

①節理の組合せについて、現地測定データを分析した結果、節理の連結タイプ別構成比が明らかとなった。これらの結果から節理の組合せを考慮した節理モデル図作成手法の改良を提案した。

②節理面の粗度について、現地測定データを各種手法で定量化した結果、既存の粗度の指標と相関が高いのは、高低差・標準偏差及び $\sqrt{(\text{高低差}) \times (\text{標準偏差})}$ である。これはこれらの指標がより簡易な測定方法で求まるために、非常に有効な指標となることを示唆している。今回は基礎的な検討であり、今後さらにデータを積重ねてこれらの結果を検証する必要がある。さらに今後は、節理面粗度とせん断強度の関係及び残された節理要素である節理の挟在物についても検討を加え、節理性岩盤の力学特性・透水特性を把握するための岩盤節理モデルをより現実的なものに近づけていきたい。

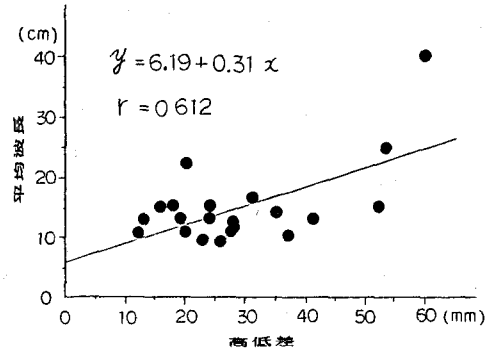


図-4 平均節理長と高低差との関係

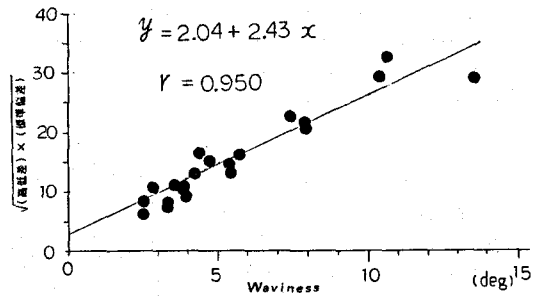


図-5 $\sqrt{(\text{高低差}) \times (\text{標準偏差})}$ とWavinessとの関係

参考文献

- (1) 菊地宏吉、井上大米：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 (1973)
- (2) 菊地宏吉、斎藤和雄、井上大米、金折裕司：岩盤中の節理分布性状の定量的評価とその解析、第10回岩盤力学シンポジウム (1976)
- (3) 菊地宏吉、斎藤和雄、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 (1973)
- (4) 菊地宏吉、斎藤和雄、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No. 154 (1978)
- (5) 楠建一郎、菊地宏吉、泉谷泰志：花崗岩岩盤における節理分布のモデル化についての試み、第13回岩盤力学シンポジウム (1981)
- (6) 菊地宏吉、三室俊昭、大村富士夫、原敏昭：節理性岩盤のモデル化に関する研究、第16回岩盤力学シンポジウム (1984)
- (7) 三室俊昭、小林隆志、菊地宏吉、永井博史、稲生道裕、加藤克行、上野勇武：岩盤中の節理分布性状の定量的評価とモデル化に関する検討、第6回岩の力学国内シンポジウム (1984)
- (8) 斎藤敏昭、安井伸弘：せん断試験による岩盤の不連続面が有する変形挙動特性の研究、日本鉱業会発表会
- (9) N. Barton, V. Choubey: The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice, Rock Mechanics vol. 10 No. 1-2 (1977)

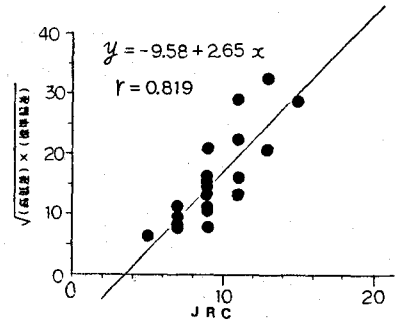


図-6 $\sqrt{(\text{高低差}) \times (\text{標準偏差})}$ とJRCとの関係

(2) A Study on the Modeling method of Jointy Rocks
— on the Joint Networks and Roughness —

T.Mimuro, T.Kobayashi and K.Kikuchi
(Tokyo Electric Power Services Co.,Ltd)

M.Inou and Y.Shioyama
(Kajima Institute of Construction Technology)

For finding the mechanical properties and permeability of jointy rocks, it is absolutely necessary to know the distributional condition of joints of foundation rocks and to establish the method of investigation, of analysis and of estimation of the properties of joint planes.

It is considered that the elements deciding the distributional condition of joints are enumerated as follows, 1) orientation, 2) length, 3) distributional density, 4) opening width, 5) networks, 6) roughness, and 7) filling. Previously authors proposed the opinions about the above mentioned elements from 1) to 4), and discussed on the modeling method of the rock joint observed in the fields actually.

In this paper, we discussed especially on the fundamental problem of the above mentioned elements of 5) and 6).

The results obtained are summarized as follows.

- 1) On the joint networks, it can be cleared up the patterns of joint connection. Consequently we proposed the improvement of the modeling method considered joint networks.
- 2) We made a comparative study on the joint roughness using various methods. Consequently it is obtained the possibility that the joint roughness can be estimated using simpler indexes, such as " the difference of height ", " standard deviation ", and the combination of these.

Further study on the relation between joint roughness and shear strength and on " filling " should be carried out. Consequently we aim to make the rock joint model more realistic.